



РОСАТОМ
РФЯЦ-ВНИИЭФ



НЦФМ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ



III ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

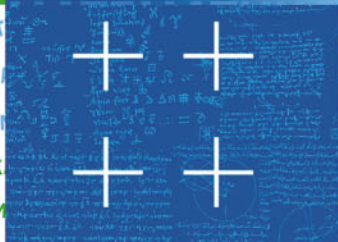
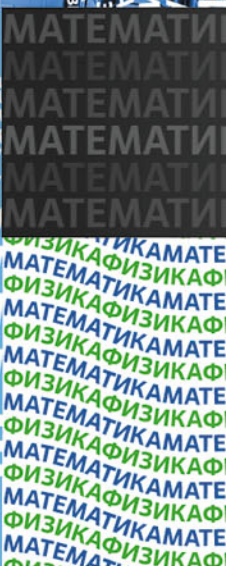
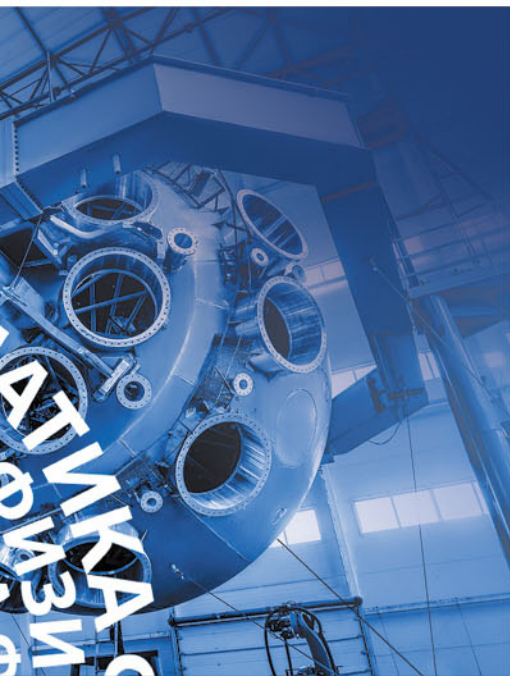
ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ И УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

ДЛЯ СТУДЕНТОВ СТАРШИХ КУРСОВ,
АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
И СПЕЦИАЛИСТОВ

ТЕЗИСЫ

22–26 июля 2024

г. Саров



ГОСКОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР –
ВСЕРОССИЙСКИЙ НИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

**III ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СТАРШИХ КУРСОВ, АСПИРАНТОВ,
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ
ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ
И УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ**

ТЕЗИСЫ

22–26 июля 2024 года

г. Саров

III Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике: тезисы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024. – 44 с., ил.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на III Всероссийской школе-семинаре Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике 22–26 июля 2024 г.

Состав программного комитета

III Всероссийской школы-семинара Национального центра физики и математики
для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов
по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике

Логашенко Иван Борисович	заместитель директора ИЯФ СО РАН по научной работе, профессор РАН, сопредседатель программного комитета
Григоренко Леонид Валентинович	ведущий научный сотрудник ОИЯИ, член-корреспондент РАН, сопредседатель программного комитета
Романовский Михаил Юрьевич	заместитель директора по науке АНО «НЦФМ», д.ф.-м.н., заместитель председателя программного комитета
Боос Эдуард Эрнстович	директор НИИЯФ МГУ, член-корреспондент РАН
Воеводин Владимир Валентинович	директор Филиала МГУ в г. Сарове, член-корреспондент РАН
Незнамов Василий Петрович	первый заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ по фундаментальным исследованиям, академик РАН
Пахлов Павел Николаевич	ведущий научный сотрудник НИУ ВШЭ, член-корреспондент РАН
Петренко Алексей Васильевич	ведущий научный сотрудник ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Ратников Федор Дмитриевич	ведущий научный сотрудник НИУ Высшая школа экономики, к.ф.-м.н.
Тихонов Юрий Анатольевич	научный руководитель направления ИЯФ СО РАН, член-корреспондент РАН
Шарков Борис Юрьевич	вице-директор ОИЯИ, академик РАН

СОДЕРЖАНИЕ

Тезисы лекций

Иван Борисович Логащенко

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЕ ФАБРИКИ 6

Сергей Юрьевич Миронов

ЛАЗЕРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ 7

Валентин Олегович Нестеренко

ДИНАМИКА АТОМНЫХ ЯДЕР: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ... 8

Данила Алексеевич Никифоров

ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ..... 9

Федор Дмитриевич Ратников

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ 10

Тезисы докладов

Н. Абед

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА
ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 30 кэВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ 11

В. В. Бармин, И. В. Романченко, В. Ю. Конев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ
НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ФОТОПРОВОДЯЩИМ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОММУТАТОРОМ (ФППК) 12

А. А. Батов, Р. А. Збруев, Т. В. Бондаренко, С. М. Полозов, М. В. Лалаян

РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ 14

С. А. Быков, И. И. Морозов, В. А. Востриков, А. В. Суханов

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ БЫСТРЫХ СКАНИРУЮЩИХ
МАГНИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ПОЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ
ВЫВЕДЕННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ..... 16

М. В. Владимиров, С. М. Полозов, В. И. Ращиков

ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ В ФОТОКАТОДАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ИНДУЦИРУЮЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ 17

М. А. Власов

РОЖДЕНИЕ ПАР ЗАРЯЖЕННЫХ ЛЕПТОНОВ
НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ 19

М. И. Волков, Д. А. Шкитов

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА, ПОЛУЧЕННЫХ С CMOS-МАТРИЦЫ 20

А. А. Зотов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ
РЕГИСТРАЦИИ ЖЕСТКИХ ГАММА-КВАНТОВ..... 23

<i>А. А. Зубанков</i> ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ НЕЙТРОНОВ ВПЕРЕД С ПОМОЩЬЮ ПРОТОТИПА ВЫСОКО-ГРАНУЛЯРНОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА HGND ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИССОЦИИ И ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $\text{Xe} + \text{CSi@3,8 АГэВ}$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BM@N	24
<i>Д. М. Казаркин, М. Н. Дубинин, Е. Ю. Федотова</i> МЕХАНИЗМ КАЧЕЛЕЙ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В ЛЕВО- ПРАВО-СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ	25
<i>С. Д. Колокольчиков, Ю. В. Сеничев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭДМ В НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦАХ	26
<i>И. Ю. Николайчук</i> СТРУННЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦЕВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ	27
<i>Е. М. Савченко</i> МАССЫ ТРИЖДЫ ТЯЖЁЛЫХ ТЕТРАКВАРКОВ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАРКОВОЙ МОДЕЛИ	29
<i>А. А. Кащеев, Я. А. Колесников, С. С. Савинов, Н. Ш. Сингатулина, И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО КАСКАДНОГО УМНОЖИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ	31
<i>И. С. Суханов</i> ПОЛУЛЕПТОННЫЕ РАСПАДЫ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ В ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕГКИХ МЕЗОНОВ	32
<i>В. В. Федоров</i> СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ	34
<i>Е. А. Фролова, К. А. Иванов, А. С. Конкин</i> ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ	35
<i>Н. Ю. Фурсова</i> НАРАБОТКА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ	37
<i>А. С. Худова</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДВАЖДЫ ТЯЖЕЛЫХ БАРИОНОВ В ПРИБЛИЖЕНИИ БОРНА-ОППЕНГЕЙМЕРА	39
<i>А. В. Чуйкина, С. Ф. Разиньков</i> ОБЗОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ	41
<i>О. Д. Шнырков, Е. Г. Яшина, К. А. Пшеничный, С. В. Григорьев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЛИСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МАЛОУГЛОВОМУ РАССЕЯНИЮ НЕЙТРОНОВ	42

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЕ ФАБРИКИ

Иван Борисович Логашенко
I.B.Logashenko@inp.nsk.su

Заместитель директора по научной работе, профессор Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

На сегодняшний день построена успешная теория микромира, Стандартная модель, описывающая в рамках единого подхода физику электромагнитных, сильных и слабых взаимодействий и согласующаяся с результатами многочисленных экспериментов, проведенных на коллайдерах и других установках. Тем не менее, существует ряд косвенных указаний на то, что Стандартная модель не полна и является низкоэнергетическим приближением более полной теории («Новой физики»). Существует множество теорий-расширений Стандартной модели. Одна из важнейших задач современной физики частиц – обнаружение в эксперименте явлений, которые не описываются Стандартной моделью. Именно они укажут, какая из возможных теорий Новой физики реализуется в природе.

Перспективное направление поисков – проведение прецизионных измерений на электрон-позитронных коллайдерах со сверхвысокой светимостью («фабриках»). В мире, включая Россию, развивается несколько проектов фабрик в разных диапазонах энергий сталкивающихся пучков.

В докладе будут обсуждаться ключевые мировые проекты электрон-позитронных фабрик, программы экспериментов на них, методы достижения сверхвысокой светимости и методы регистрации рожденных в столкновениях частиц. Особое внимание будет уделено проектам фабрики на область энергий от 3 до 7 ГэВ, развивающимся в России и Китае.

ЛАЗЕРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Сергей Юрьевич Миронов
sergey.mironov@mail.ru

Заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

В лекции будут рассмотрены основные модели активных сред, а также ключевые режимы работы оптических когерентных генераторов света. Отдельное внимание будет уделено источникам, работающим в режиме синхронизации мод и модуляции добротности. Будут обсуждаться методы и подходы к генерации ультракоротких лазерных импульсов с экстремальным уровнем пиковой мощности. Применительно к сверхмощным лазерным импульсам будут затронуты вопросы, связанные с диагностикой их временных характеристик, а также методы сокращения длительности и увеличения временного контраста. Будут затронуты аспекты, ограничивающие дальнейший рост пиковой мощности и возможные пути их преодоления.

Интересным направлением современной физики является создание источника комптоновского излучения (ИКИ). В ИКИ лазеры применяются как на стадии генерации электронных сгустков, так и при взаимодействии света с электронами. Генерация электронных пучков реализуется в инжекторах (пушках). Современные инжекторы в своей конструкции имеют фотокатоды, которые при облучении лазерным излучением генерируют электронные пучки. Параметры электронных сгустков в значительной степени зависят от характеристик лазерного излучения: длительности, энергии, распределения интенсивности и др. Лазеры, применяемые для облучения фотокатодов, называют лазерными драйверами. В лекции будет рассмотрена принципиальная схема лазерного драйвера, а также будут обсуждаться вопросы, связанные с управлением формой лазерных импульсов. В качестве примера будут приведены результаты экспериментальной реализации сложных лазерных структур, получаемых для генерации электронных сгустков. Отдельным вопросом будут обсуждаться лазеры для взаимодействия с электронными пучками: их архитектура и достигнутые на сегодняшний день параметры лазерного излучения.

ДИНАМИКА АТОМНЫХ ЯДЕР: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Валентин Олегович Нестеренко
nester@theor.jinr.ru

Ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук
Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова,
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Дается краткое описание базовых свойств атомных ядер (квантовые оболочки, деформация, гигантские резонансы, ...). Далее предлагается обзор ряда основных направлений в изучении динамики атомных ядер. Основное внимание уделяется четырем направлениям:

1) Мультипольные гигантские резонансы и их экзотические вихревые версии.

Дается классификация гигантских резонансов, раскрывается их связь с квантовыми оболочками, рассматриваются экзотические резонансы (орбитальные ножницы, твист, торонд).

2) Самосогласованные методы теории функционала плотности (релятивистские, с силами Сфирма и Гони), являющиеся в настоящее время основными теоретическими подходами в ядерной физике низких энергий.

3) Современное состояние дел в физике сверхтяжелых ядер.

4) Связь ядерной физики и современной астрофизики (уравнение состояния, нейтронные звезды, ...).

Литература

1. P. Ring and P. Schuck, "Nuclear Many Body Problem" (Springer-Verlag, New York, 1980).
2. А.Г. Ситенко и В.К. Тартаковский, «Лекции по теории ядра» (Москва, Атомиздат, 1972).
3. M. Bender, P.-H. Heenen, and P.-G. Reinhard, "Self-consistent mean-field models for nuclear structure", Rev. Mod. Phys. 75, 121 (2003).
4. Yu. Ts. Oganessian, A. Sobiczewski, and G. M. Ter-Akopian, "Superheavy nuclei: from predictions to discovery," Phys. Scr. 92, 023003 (2017).
5. S. Goriely, A. Choplin, W. Ryssens, and I. Kullmann, "Progress in Nuclear Astrophysics: a multidisciplinary field with still many open questions", arXiv:2212.02156[nuc1-th].

ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Данила Алексеевич Никифоров
D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

Научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

В настоящее время реализуются и прорабатываются несколько проектов по созданию больших ускорительных установок, таких как Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ), СИЛА, ускорительный комплекс со встречными электрон-позитронными пучками – Супер С-тау фабрики, источник Комптоновских гамма квантов и др. Инжекторы таких комплексов, как правило, состоят из источника электронов и линейного ускорителя на большую энергию с ускоряющей структурой на основе диафрагмированного волновода. В докладе будут рассмотрены основные особенности линейных ускорителей с ускоряющими структурами на основе диафрагмированных волноводов.

Литература

1. Лебедев, Техника и приборы СВЧ. Том 1 (1970).
2. Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute // Nucl. Phys. Engin. 2018. V. 9, No. 2. P. 192–199.
3. <https://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/proekty/superc-tau-factory>.
4. <https://srf-skif.ru/index.php>.
5. Andrianov A. et al. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. – 2022. – Т. 17. – №. 02. – С. T02009.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Федор Дмитриевич Ратников
fedorratnikov@gmail.com

Ведущий научный сотрудник
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Данная лекция является вводной для практического курса машинного обучения на Школе. Будут обсуждены общие принципы построения математических моделей, специфические различия физических моделей от моделей машинного обучения. Мы проведем обзор различных возможностей использования машинного обучения для решения практических задач. Рассмотрим специфику применения машинного обучения для задач естественных наук, с акцентом на физику элементарных частиц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 30 кэВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Н. Абед
NABIL-ABED.7@hotmail.com

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Интенсивные пучки с энергией электронов до 30 кэВ, обладают преимуществами относительно низкого уровня генерации тормозного излучения и упрощённой системой высоковольтного питания. Такие пучки также способны обеспечить высокую плотность мощности на исследуемой мишени, что востребовано в материаловедческих задачах для различных областей.

Так, в области управляемого термоядерного синтеза, одной из ключевых проблем для перспективных токамаков реакторного класса является выбор материалов, которые могут выдерживать тепловые нагрузки от интенсивных потоков плазмы и частиц. Наибольшие тепловые нагрузки на стенки токамака возникают в области дивертора. Например, для строящегося токамака ИТЭР в качестве материала облицовки дивертора был выбран вольфрам.

Для имитации такого теплового воздействия можно использовать частотно-импульсный источник электронного пучка с энергией до 30 кэВ на основе накаливаемого катода. Пучок должен обеспечивать экспозиционную нагрузку ~ 100 Дж/см² при длительности импульса около 1 мс на поверхности вольфрамовой мишени на площади около 1 см², работать на частоте 10–20 Гц при полном числе импульсов на мишень до 10^7 .

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается экспериментальный стенд для изучения усталостной стойкости тугоплавких материалов для будущих токамаков реакторного класса. Для имитации тепловой нагрузки на данном стенде используется интенсивный электронный пучок с энергией до 30 кэВ.

В работе описаны первые результаты работы с пучком, обсуждаются особенности конструкции стенда, приводятся результаты сравнения измеренных и расчетных параметров пучка из электронной пушки.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Никифоров.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ
НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ФОТОПРОВОДЯЩИМ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОММУТАТОРОМ (ФППК)**

В. В. Бармин, И. В. Романченко, В. Ю. Конев
valery@barmin.club

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Развитие и активное исследование в мире [1–3] мощных наносекундных фотопроводящих полупроводниковых коммутаторов (ФППК) или по англ. HG PCSS, привело к возможности замены ими, с присущими твердотельным преимуществами, газовых разрядников используемых для формирования высоковольтных наносекундных импульсов. Примером может служить, ускоритель, построенный на принципе разряда линии Блюмляйна через 12 ФППК из GaAs, и имеющий на выходе импульс длительностью 64 нс, амплитудой напряжения 220 кВ и током более 1 кА [4].

В данной работе приводятся результаты при воздействии лазерным излучением с энергией кванта 3,5 эВ на ФППК из GaAs с оксидным слоем SiO₂ нанесенным на кристалл [5] что приводит к нелинейному увеличению внутреннего сопротивления от 20 до 70 раз в проводящем состоянии и снижает требуемое для коммутации электрическое поле из-за отражения лазерного излучения и эффекта люминесценции в GaAs:Cr формирует излучение с длиной волны порядка 900 нм, по сравнению с параметрами этого же коммутатора со сравненным оксидным слоем. Воздействие лазерного излучения с квантовой энергией 1,17 эВ ($h\nu < E_g = 1.43$ эВ для GaAs) и 3,5 эВ, на наносекундные коммутационные характеристики ФППК [6] позволили определить что с более высокой энергией кванта при коммутации происходит формирование каналов проводимости (филаментов) с плотностью тока в 3 раза больше при меньшей длительности оптического импульса в 2,3 раза и меньшей оптической энергией в 14 раз. При облучении лазером с энергией кванта 2,33 эВ с помощью интерферометра Майкельсона для формирования нескольких филаментов [7] или при параллельном включении ФППК с воздействием излучения с энергией кванта 3,5 эВ в однофилламентном режиме [8] зафиксировано существенное укорочение фронта выходного импульса. Так же установлено, что внутренне сопротивление параллельно включенных ФППК составляет 5,5 Ом [8] это в 6 раз больше по сравнению с наилучшим результатом по сопротивлению [5] при коммутации оптическим импульсом с энергией 6 раз меньше (25 мкДж) и фронтом оптического импульса короче в 4,3 раза (2,7 нс). Данные результаты позволяют предположить, что зависимость внутреннего сопротивления при воздействии лазерным излучением с одинаковой энергией кванта в большей степени определяться скоростью ввода оптической энергии, а не его величиной.

Литература

1. S. Chen, M. Xu, L. Sun, C. Liu, L. Zhang, Q. Li, J. Wang, “Effect of optical pulsewidth on transition from linear to nonlinear mode of GaAs PCSS” // IEEE Electron Device Letters, V. 45, N. 6, p.p. 1052–1055, 2024. doi:10.1109/LED.2024.3387482.
2. N. Gonzalez, J. M. Lehr, “Investigating high-gain in Gallium Nitride photoconductive switches” // 2024 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-

- URSI NRSМ), Boulder, CO, USA, 2024, p.p. 253–254, doi: 10.23919/USNC-URSINRSM60317.2024.10464762.
3. M. G. Verkholetov, I.A. Prudaev, “Multi-Filament Triggering of Superfast HG PCSS” // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, p.p. 1930–1933, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016980.
 4. X. Ma, J. Deng, H. Liu, J. Yuan, “Development of all-solid-state flash x-ray generator with photoconductive semiconductor switches”, Review of Scientific Instruments, 2014.V.85, P.093307. doi:10.1063/1.4895829].
 5. V.V. Barmin, V.yu. Konev, I.V. Romanchenko, “Effect on the GaAs parameters of a photoconductive semiconductor switch with a silicon oxide layer when switched by 355-nm laser radiation”// VIII International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, October 2–8, 2022. doi: 10.56761/EFRE2022.S4-O-026701.
 6. V.V. Barmin, V.yu. Konev, I.V. Romanchenko, “Influence on the Parameters of GaAs-based HG PCSS Switching in Lock-On Mode at Laser Radiation with a Wavelength of 355 nm and 1064 nm”. // IEEE 24nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2023. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225142.
 7. V.V. Barmin, A.V. Puchikin, I.V. Romanchenko, “Photoconductive semiconductor switch behavior in multifilament mode under 532 nm laser irradiation // Russian Physics Journal. 2023. V.66. N8. p.p.875–879.
 8. V.V. Barmin, A.V. Puchikin, I.V. Romanchenko, “Switching parameters of two parallel photoconductive switches under 355 nm laser radiation” // Russian Physics Journal. 2023. V.66. N9. – p.p.1011–1016.

РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

А. А. Батов, Р. А. Збруев, Т. В. Бондаренко, С. М. Полозов, М. В. Лалаян
AABatov@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Исследуются особенности проектирования линейного ускорителя электронов, связанные с расчетом двухсекционной ускоряющей структуры и вводов высокочастотной мощности. Проведено моделирование динамики пучка электронов в ускорителе с помощью программы BEAMDULAC-BL. По результатам проведена настройка модели ускоряющей структуры с вводами мощности, получены значения электродинамических характеристик.

Линейные ускорители электронов S-диапазона широко используются в прикладных областях, таких как стерилизация, гамма-активационный анализ, дозиметрия и радиационная терапия. В НИЯУ МИФИ совместно с НПП «Корад» разработан ряд линейных ускорителей на основе бипериодической ускоряющей структуры [1–6].

В данной работе представлен проект двухсекционного линейного ускорителя электронов для прикладного применения. Моделирование проводилось с целью оптимизации геометрии структуры и получения необходимых электродинамических характеристик. Корректировка концепции ускорителя с учётом технических требований позволяет использовать его для создания опытного образца.

Ускоряющая секция состоит из двух структур S-диапазона: одна имеет 12 ячеек (включая 6 ячеек группирователя), а другая – 8 ячеек. Для каждой структуры разработан симметричный ввод мощности в виде прямоугольного волновод с размерами поперечного сечения 90×45 мм. Параметры ускоряющих структур и вводов мощности представлены в таблице 1, а вид ускоряющей секции показан на рисунке 1.

Таблица 1

Параметры ускоряющих структур
линейного ускорителя электронов прикладного назначения

Секция, число ячеек	12 ячеек	8 ячеек
S ₁₁ ввода мощности структуры	0.76	0.78
Шунтовое сопротивление, Ом/м	79	78
Коэффициент связи между ячейками, %	10.6	10.6

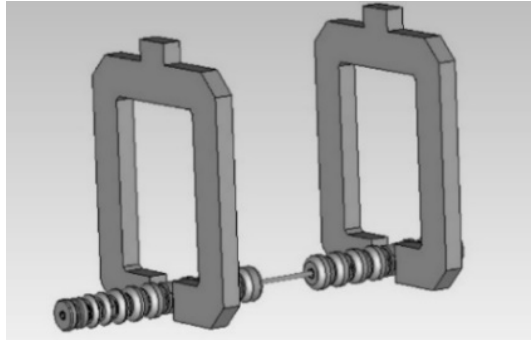


Рис. 1. Ускоряющая секция линейного ускорителя электронов прикладного назначения

Литература

1. Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I. Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 493-495.
2. Basyl D. S. et al. Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 173-175.
3. Polozov S. et al. Beam Dynamics Optimization and Future Plans for LUE-200 Linac Upgrade //7th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'16), Busan, Korea, May 8-13, 2016. – JACOW, Geneva, Switzerland, 2016. – С. 1788-1790.
4. Batov A. A. et al. Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 699-703.
5. Batov A. A. et al. Control of Electrodynamic Characteristics of Biperiodic Accelerating Structure Cells During Manufacturing //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 11. – С. 2411-2415.
6. Samarokov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ
БЫСТРЫХ СКАНИРУЮЩИХ МАГНИТОВ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ПОЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ
ВЫВЕДЕННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ**

С. А. Быков, И. И. Морозов, В. А. Востриков, А. В. Суханов
sabykov@inbox.ru

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Для управления углом выхода выведенного пучка ионов требуется создать магнитное поле, изменяющееся с частотой до 200 Гц. Для этого разработаны и оптимизированы быстрые сканирующие магниты для получения заданного поля облучения выведенным пучком ионов (могут использоваться для облучения протонами с энергией до 700 МэВ и ионами $^{41}\text{Bi}^{209}$ с энергией до 36 МэВ/нуклон площадки $100 \times 100 \text{ мм}^2$). Форма полюсов оптимизирована для устранения нагрева токами Фуко. Расчёт сканирующих магнитов и исследования магнитного поля. Расчёты проводились в программе COMSOL.

Литература

1. B. Krause, I. Morozov, I. Okunev, and A. Petrov Fast dipole magnet development // FAST DIPOLE MAGNET DEVELOPMENT// 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETIC TECHNOLOGY: MT25 CONFERENCE 2017, Amsterdam, The Netherlands, 27 августа – 01 сентября 2017 года.
2. Персов Б.З. Расчёт и проектирование экспериментальных установок // Москва-Ижевск, 2006.
3. Th. Zickler Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets // ed. By D. Brandt Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Magnets, Bruges, Belgium, CERN-2010-004 (2009).
4. T. Furukawa, T. Shirai, T. Inaniwa, S. Sato, E. Takeshita, K. Mizushima, Y. Hara, K. Noda, N. Kakutani, Y. Kanai, Y. Iseki, Y. Hirata, and C. Yamazaki Development of Fast Scanning Magnets and Their Power Supply for Particle Therapy/ IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 24, NO. 3, JUNE 2014.

ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ В ФОТОКАТОДАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИНДУЦИРУЮЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

М. В. Владимиров, С. М. Полозов, В. И. Раутиков
MVVLadimirov@mephi.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

В докладе представлена модель для описания транспорта электронов в полупроводниковых фотокатодах под внешними воздействиями в ВЧ фотопушках. Рассмотренный подход позволяет получать профиль фототока как отклик на лазерный импульс произвольного профиля, что потенциально открывает дорогу к более корректному моделированию режима работы ВЧ фотопушек в качестве генераторов сверхкоротких (пико- и субпикосекундных) электронных сгустков для наиболее передовых научно-исследовательских установок, основанных на ускорителях заряженных частиц. Отдельно рассматривается и обсуждается зависимость фронтов фототока от модельных параметров.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) фотопушки – основные генераторы сверхкоротких (пико- и субпикосекундных) электронных сгустков для источников излучения высокой яркости (ЛСЭ, источники излучения на основе комптоновского рассеяния) и некоторых экспериментальных методик (сверхбыстрая МэВ электронная дифракция, микроскопии). В тех приложениях, где также требуется большой заряд сгустка, используются полупроводниковые фотокатоды, которые совместно с мощными лазерами позволяют генерировать сгустки с зарядом вплоть до единиц нКл.

Обратной стороной использования полупроводниковых фотокатодов является их большая инерционность: глубина проникновения лазерного излучения в металлические фотокатоды на порядки меньше таковой для полупроводниковых, тем же образом соотносятся и времена отклика фотокатода [1]. Затягивание фронтов импульса фототока из-за конечного выхода фотоэлектронов из твердого тела и характерный временной параметр (время отклика фотокатода) исследовались как теоретически [2–4], так и экспериментально [5–7]. Важно отметить, что работы теоретического характера имеют существенные ограничения: воздействие лазерного импульса учтено или в качестве дельта-образного генерационного слагаемого в задаче диффузии, или «встроено» в начальное распределение электронов вдоль фотокатода в задачах диффузии (дрейфа-диффузии), а фотокатод рассматривается полубесконечной средой.

В данной работе предпринята попытка устранить названные допущения. Ставится и решается одномерная задача дрейфа-диффузии на отрезке, границы которого соответствуют контактам металл-полупроводник и полупроводник-вакуум. Для общности воздействие лазерного импульса считается произвольным. Получена зависимость профиля фототока, рассмотрены основные закономерности и зависимость профиля от модельных параметров.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2022-830 от 27.05.2022.

Литература

1. Spicer W. E., Herrera-Gomez A. Modern theory and applications of photocathodes //Photodetectors and Power Meters. – SPIE, 1993. – Т. 2022. – С. 18-35.
2. Hartmann P. et al. A diffusion model for picosecond electron bunches from negative electron affinity GaAs photocathodes //Journal of applied physics. – 1999. – Т. 86. – №. 4. – С. 2245-2249.
3. Jani H., Chen L., Duan L. Pre-emission study of photoelectron dynamics in a GaAs/AlGaAs photocathode //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2019. – Т. 56. – №. 1. – С. 1-8.
4. Jia T. et al. Response time characteristics of a transmissive uniformly doped GaAsP photocathode //Applied Optics. – 2023. – Т. 62. – №. 33. – С. 8804-8810.
5. Cultrera L. et al. Thermal emittance and response time of a cesium antimonide photocathode //Applied Physics Letters. – 2011. – Т. 99. – №. 15.
6. Aryshev A. et al. Femtosecond response time measurements of a Cs₂Te photocathode //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – №. 3.
7. Loisch G. et al. Direct measurement of photocathode time response in a high-brightness photoinjector //Applied Physics Letters. – 2022. – Т. 120. – №. 10.

РОЖДЕНИЕ ПАР ЗАРЯЖЕННЫХ ЛЕПТОНОВ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ

М. А. Власов
maksim-v2002@yandex.ru

Научный руководитель – доц. М. В. Мартынов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, г. Ярославль

Наиболее известным ускорителем частиц является ЛHC – круговой ускоритель частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжелых ионов, с энергией $E = 13.6$ ТэВ в системе центра инерции.

Его главными недостатками по сравнению с линейными ускорителями частиц являются: столкновение нефундаментальных частиц, синхротронное излучение. Синхротронное излучение, возникающее в случае ускорения протонов при высоких энергиях, приводит к существенным потерям энергии пучков. Также при столкновении не фундаментальных частиц большая часть энергии идет на субпродукты столкновения, что также является высокой потерей энергии.

Исходя из этого, для открытия новой физики нам будет необходимо рассмотреть другую технику ускорения частиц, учитывающую недостатки кругового коллайдера.

Главной задачей данного исследования стало рассмотреть калибровочный процесс столкновения на перспективных линейных e^+e^- коллайдерах, получить матричные элементы S-матрицы перехода и получить полное сечение рождения для процесса,

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (1)$$

Линейные коллайдеры интересны тем, что проходящие на них процессы столкновения элементарных частиц (в частности e^+e^-), при высоких энергиях порядка $E \sim 300$ ГэВ и выше.

Данный процесс используется для калибровки линейных коллайдеров. Кроме того, электроны и мюоны являются фундаментальными частицами, поэтому события рождения мюонной пары и аннигиляции электронов будут более «чистыми». В этих событиях возможно будут проявляться сигналы Новой физики – физики за пределами Стандартной модели.

В работе были вычислены соответствующие матричные элементы для процесса через фотон и через Z-бозон. Также был рассчитан квадрат амплитуды процесса, вычислено дифференциальное и полное сечение процесса, приведены график полного сечения рождения процесса через фотон, а также приведен график полного сечения в случае фотона и Z-бозона.

Литература

1. Биленький С. М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия. – М.: Энергоатомиздат, 1990.—327 с.
2. Пескин М., Шрёдер Д. Введение в квантовую теорию поля. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 784 стр.
3. CORE 3.2 (COMpendium of RELations, Version 3.2) V.I. Borodulin, R.N. Rogalyov, S.R. Slabospitskii.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА, ПОЛУЧЕННЫХ С CMOS-МАТРИЦЫ

М. И. Волков
miv5@tpu.ru

Научный руководитель – Д. А. Шкитов

Томский политехнический университет, г. Томск

Введение

В настоящее время планируется строительство новых электронных ускорителей в России, не говоря о строящейся в настоящее время установке СКИФ. Например, обновление источника синхротронного излучения КИСИ в Москве, строительство источника синхротронного излучения СИЛА в Подмоскowie и РИФ во Владивостоке, источника комптоновского излучения в Сарове. В связи с этим потребуются использование методов и средств диагностики параметров пучков заряженных частиц, которые ранее в России практически не были востребованы. В том числе методы, основанные на оптической диагностике с помощью механизмом переходного излучения (ПИ) и излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) [1]. Целью данной работы является разработка программы на языке Python, которая производит обработку изображения, полученного с CMOS-матрицы оптической камеры.

Описание метода диагностики и программы обработки изображений

Для реализации метода диагностики на пути пролета электронного пучка устанавливается мишень. Пучок электронов взаимодействует с материалом мишени в результате чего образуются различные виды излучений: переходное, ИВЧ, флюоресценция и т.д. ПИ возникает при взаимодействии заряженных частиц с различными мишенями на границе раздела сред (вакуум – металл, воздух – металл, и др.). ИВЧ возникает при движении заряженной частицы со скоростью, которая превышает фазовую скорость света в данной среде. Образующееся излучение, которое лежит в оптическом диапазоне, как правило, отражается от зеркала, фокусируется, и попадает на детектирующую систему, которая представляет из себя нейтральный фильтр, объектив и детектор оптического излучения (CCD или CMOS камеру). В нашем случае в качестве детектора выступает оптическая камера QHY533C [2] с CMOS-матрицей, дающей цветные изображения. В качестве исходных данных для обработки выбраны результаты, полученные нами при измерении свойств ИВЧ от пластины корунда на линейном ускорителе электронов ЛИНАК-200 (ОИЯИ, Дубна). Обработка включает в себя нахождение центра масс изображения, фильтрацию (нахождение выбросов и их замену) и аппроксимацию данных двумерным гауссовым распределением с целью определения базовых параметров сечений (положение максимума, ширина на полувысоте, амплитуда). Созданная программа позволяет обрабатывать изображения в TIFF, PNG или JPEG форматах, которые получены оптической камерой при детектировании оптического ИВЧ и ПИ. Однако отметим, что механизм излучения

Аппроксимация данных происходила с использованием формулы двумерного нормального распределения, которая выглядит следующим образом:

$$f(x, y) = B + A \cdot \exp \left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(y - \mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right)$$

Обсуждение и результаты

Figure 1 displays the results of the algorithm for processing 2D and 3D data. The figure is organized into two main rows, each containing three sub-figures. The top row shows 2D data processing, and the bottom row shows 3D data processing.

Top Row (2D Data):

- Исходное (2д):** Original 2D data showing a noisy triangular region of interest.
- Отфильтрованное (2д):** Filtered 2D data, where the noise is reduced.
- Аппроксимированное (2д):** Approximated 2D data, showing a smooth triangular shape.

Bottom Row (3D Data):

- Исходное (3д):** Original 3D data showing a noisy surface.
- Отфильтрованное (3д):** Filtered 3D data, where the noise is reduced.
- Аппроксимированное (3д):** Approximated 3D data, showing a smooth surface.

Additional Visualizations:

- Маска:** A 2D mask used for the 2D processing, showing a triangular region of interest.
- Сечение вдоль оси OY:** A cross-section of the 3D data along the Y-axis, comparing the original (red dots), filtered (blue dots), and approximated (black line) data.
- Сечение вдоль оси OX:** A cross-section of the 3D data along the X-axis, comparing the original (red dots), filtered (blue dots), and approximated (black line) data.

Рис. 1 – Результаты работы программы (*а, з* – полученные 2Д и 3Д распределения после действия обрезки маской; *ж* – маска для обрезки изображения; *б, д* – распределения после фильтрации; *в, е* – распределения после аппроксимации; *з, к* – сечения в центре масс распределений)

Реализованная программа написана на языке Python. В качестве инструмента для построения графиков использована стандартная библиотека matplotlib языка Python. На вход программе подавалось 8-битное цветное изображение в формате JPEG. Программа позволяет обрабатывать также черно-белые изображения. Перед фильтрацией и аппроксимацией распределений программа обрезает полученное изображение таким образом, чтобы оставить только центральную часть изображения пластины из корунда, где проходил пучок электронов. Для этого вручную необходимо выделить замкнутую область с помощью интерфейса, реализованного с использованием библиотеки ruqt5. Далее происходит обрезка изображения: всё, что находится вне этой фигуры – обрезается. Поступая так, мы избавляемся от влияния излучения от торцов пластины, которое может негативно повлиять на обработку интересующего излучения. Маска, использованная в этой работе, представлена на рис. 1ж. Полученное изображение после действия обрезки маской представлено на рис. 1а. После удаления и замены выбросов программа производит аппроксимацию полученного распределения. На выходе программа выдает экспериментальные (а), отфильтрованные (б) и аппроксимированные (в) двумерным гауссовым распределением «тепловые карты» (1 ряд сверху) и их трёхмерные распределения (2 ряд). Помимо этого, программа строит двумерные распределения по горизонтальной (з) и вертикальной (к) осям в точке центра масс изображения. После аппроксимации программа выдает значение фона, амплитуду сигнала, средние значения и среднеквадратические отклонения (по осям x и y). Для двумерных распределений помимо этих величин программа выдает значение амплитуды отфильтрованного распределения, координату, в которой была найдена эта амплитуда, и ширину на полувысоте. Реализация программы позволяет строить такие двумерные распределения в произвольно выбранных точках. Координаты центра масс представлены на рис. 1 пересечением черных линий. Нахождение ширины на полувысоте (жёлтая линия на графиках в 3 ряду) пока сделано в нулевом приближении, и этот функционал не отлажен в программе.

Заключение

В результате проделанной работы реализована программа по нахождению основных поперечных характеристик электронного пучка из изображений, которые могут быть получены при проведении экспериментов по регистрации оптического переходного излучения и излучения Вавилова-Черенкова. В дальнейшем планируется использование более продвинутых алгоритмов по фильтрации. Выбор метода фильтрации будет осуществляться в реальном времени при работе программы.

Литература

1. Наumenko Г.А. Диагностика электронных пучков низких энергий на основе оптического переходного излучения / Г.А. Наumenko, А.П. Потылицын, Б.Н. Калинин [и др.]. – Текст: непосредственный // Известия ТПУ. – 2004. – Т. 307, № 2. – С. 15-19.
2. QHYCCD // QHY533M & QHY533C сайт. – 2024. – URL: <https://www.qhyccd.com/astronomical-camera-qhy533>.
3. Scipy.optimize.curve_fit // SciPy v1.11.4 Manual: сайт. – 2024. – URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЖЕСТКИХ ГАММА-КВАНТОВ

А. А. Зотов
A.A.Zotov@inp.nsk.su

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

В настоящее время в ИЯФ СО РАН продолжается разработка макета высокоэффективной системы регистрации (ВСР) на основе мозаичного сцинтилляционного экрана (МСЭ) для рентгенографии объектов с большой оптической толщиной. Традиционно устройства такого типа создаются по схеме: «Сцинтиллятор – оптическая система – фотодетектирующие элементы» [1]. Однако было установлено что, замена оптической системы на волоконную оптику позволяет увеличить эффективность сбора светового сигнала в таких системах на несколько порядков.

В качестве чувствительного элемента ВСР используется МСЭ, состоящий из тяжелых сцинтилляционных кристаллов ортосиликата лютеция-иттрия (LYSO). Свет, возникший в результате взаимодействия гамма-квантов с веществом сцинтиллятора, передается по волоконной оптике на матричные фотоприемники (МФ). Одним из ключевых элементов системы регистрации являются камеры на основе матричных фотоприемников[2]. Их свойства вносят значительный вклад в характеристики высокоэффективной системы регистрации жестких гамма-квантов.

В данной работе представлен разработанный автоматизированный алгоритм восстановления сигналов, полученных с макета СР, для формирования рентгенограмм исследуемых объектов [3]. С использованием этого алгоритма были проведены исследования светочувствительных характеристик матричных фотоприемников различных типов, а также измерения энергетического и координатного разрешения макета СР.

Литература

1. Акимов, Ю.К. Фотонные методы регистрации излучения / Ю.К.Акимов – Дубна: ОИЯИ, 2006. – 281 с. – ISBN 5-9530-0104-5.
2. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью / Ф.П.Пресс – Москва: Радио и связь, 1991. – 261 с. – ISBN 5-256-00855-2.
3. А. Роуз Зрение человека и электронное зрение / Роуз А. – Москва: Мир, 1977 – 216 с.

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ НЕЙТРОНОВ ВПЕРЕД
С ПОМОЩЬЮ ПРОТОТИПА ВЫСОКО-ГРАНУЛЯРНОГО
ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА HGND
ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИССОЦИАЦИИ И ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ $\text{Xe} + \text{CsI@3,8 АГэВ}$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BM@N**

А. А. Зубанков
zubankov@inr.ru

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) [1,2] – первый действующий эксперимент с фиксированной мишенью на ускорительном комплексе NICA (ОИЯИ, Дубна), одном из МегаСайенс проектов в России. Эксперимент направлен на изучение свойств ядерной материи при высоких барионных плотностях. В ИЯИ РАН ведется разработка и создание высоко-гранулированного времяпролетного нейтронного детектора – HGND (High Granularity Neutron Detector), который будет использоваться в эксперименте BM@N для измерения выходов и азимутальной асимметрии нейтронов, образующихся в ядерных столкновениях. Многослойная продольная структура (поглотитель/сцинтиллятор), высокая гранулярность и хорошее временное разрешение этого детектора позволят идентифицировать и измерять энергии нейтронов, образующихся в ядерно-ядерных столкновениях, по их времени пролета.

Прототип HGND был впервые использован в сеансе $\text{Xe} + \text{CsI@3,8 АГэВ}$ эксперимента BM@N для измерения выходов нейтронов-спектаторов из ядерного взаимодействия в центральных и полуцентральных столкновениях и нейтронов из электромагнитной диссоциации в ультрапериферических столкновениях. Как показывают результаты моделирования, из электромагнитной диссоциации тяжелых ядер происходит в среднем эмиссия только одного нейтрона при энергиях эксперимента BM@N . Поэтому, отбор событий с электромагнитной диссоциацией на установке BM@N может быть использован в качестве источника нейтронов высоких энергий с множественностью близкой к единице. Кроме того, нейтроны из электромагнитной диссоциации и могут быть использованы для калибровки нейтронного детектора.

В докладе обсуждается структура прототипа нейтронного детектора и представлено сравнение экспериментально измеренных выходов нейтронов-спектаторов в центральных ядро-ядерных взаимодействиях и в реакции электромагнитной диссоциации в ультрапериферических столкновениях. Полученные результаты сравниваются с результатами моделирования. Оценены сечения электромагнитной диссоциации и ядерного взаимодействия для реакции $\text{Xe} + \text{CsI}$ при энергии ядер ксенона 3,8 АГэВ. Полученные результаты могут быть использованы для оценки потоков нейтронов из электромагнитной диссоциации в эксперименте MPD на NICA.

Литература

1. Kapishin M. Studies of baryonic matter in the BM@N and MPD experiments at Nuclotron/NICA // PoS(CORFU2018)188. 2019.
2. Senger P. The heavy-ion program at the upgraded Baryonic Matter@Nuclotron Experiment at NICA // PoS CPOD2021 (2022), 033.

МЕХАНИЗМ КАЧЕЛЕЙ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В ЛЕВО-ПРАВО СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ

Д. М. Казаркин^{1,2}, М. Н. Дубинин¹, Е. Ю. Федотова¹
kazarkin@theory.sinp.msu.ru

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

² Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Наблюдение нейтринных осцилляций указывает на ненулевые массы нейтрино, что является убедительным доказательством новой физики за пределами Стандартной модели (СМ). Согласно СМ левокиральные и правокиральные фермионы представлены в дублетах и синглетах соответственно, что приводит к нарушению четности. Естественным обобщением на масштабе высоких энергий, теоретически мотивированным идеей Великого объединения взаимодействий, является лево-правая симметрия (LR-симметрия), в которой лево- и правокиральные фермионы равноправны, а наблюдаемое нарушение четности при низких энергиях объясняется спонтанным нарушением LR-симметрии, [1]. Кроме того, такие модели обладают набором привлекательных следствий:

1. предоставляют источники нарушения четности, что может объяснить наблюдаемую барионную асимметрию Вселенной,
2. реализуют механизм «качелей» (seesaw), объясняющий наличие малых масс у нейтрино и явление нейтринных осцилляций,
3. предсказывают наличие новых тяжелых частиц-кандидатов для описания темной материи (ТМ), стабильность которых обеспечивается нечетностью относительно дискретных симметрий модели, см. [2].

В нашей работе мы сконцентрировали внимание на т.н. минимальной лево-правой симметричной модели (Minimal Left-Right-Symmetric Model, MLRSM) с калибровочной группой $SU(3)_C \times SU(2)_R \times SU(2)_L \times U(1)_{B-L}$, которая нарушается до $SU(3)_C \times U(1)_{em}$ благодаря нетривиальной структуре вакуумных средних расширенного хиггсовского сектора, [3]. В рамках рассматриваемой модели исследуются допустимые наборы параметров расширенного хиггсовского потенциала с «настройкой» на наблюдаемый бозон Хиггса с массой 125 ГэВ и учетом имеющихся экспериментальных ограничений на массу дополнительных нестандартных хиггсовских бозонов и новых массивных векторных бозонов $W_R^\pm$ и Z_R . Для выявленных параметрических сценариев осуществляются численные вычисления реликтовой плотности частиц ТМ, приводятся контуры на плоскости свободных параметров, при которых реализуется наблюдаемое значение относительной плотности ТМ на уровне 25%.

Литература

1. G. Senjanovic and R. N. Mohapatra, “Exact Left-Right Symmetry and Spontaneous Violation of Parity”, Phys. Rev. D, vol. 12, p. 1502, 1975.
2. P. S. Bhupal Dev, R. N. Mohapatra and Y. Zhang, “Naturally stable right-handed neutrino dark matter”, JHEP, vol. 11, p. 077, 2016.
3. K. Kiers, M. Assis and A. A. Petrov, “Higgs sector of the left-right model with explicit CP violation”, Phys. Rev. D, vol. 71, p. 115015, 2005.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭДМ В НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦАХ***С. Д. Колокольчиков, Ю. В. Сеничев*

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный

Наблюдаемая барионная асимметрия, означает преобладание материи над антиматерией во Вселенной. В 1967 г. А. Сахаров теоретически установил, что необходимым условием для бариогенеза является нарушение СР-инвариантности [1]. Существование ненулевых электрических дипольных моментов (ЭДМ) элементарных частиц нарушает СР-инвариантность и способно установить применимость теорий, выходящих за рамки Стандартной Модели (СМ). [2]

Идея исследования ЭДМ частиц основана на уравнении Т-БМТ (Томас, Баргман, Мишель, Телегди) [3]. Описывающего динамику классического спин-вектора для ансамбля частиц. Для заряженных частиц, например, протонов и дейтронов, необходимо использование кольцевых накопительных установок. Первоначально в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), США была предложена концепция «замороженного спина» [4]. В настоящее время институт ядерной физики Юлихского исследовательского центра (FZJ, Германия) разрабатывает концепцию накопителя ProtoType Ring (PTR) специально для поиска ЭДМ дейтронов и протонов [5]. В России исследование поляризованного пучка дейтронов может быть осуществлено при помощи концепции «квази-замороженного спина» на коллайдере NICA, Дубна [6], также рассматривается модернизированная структура Nuclotron, являющегося бустером в коллайдер [7].

Вне зависимости от установки, задача измерения ЭДМ включает в себя следующие фундаментальные проблемы, которые необходимо решить: максимальное время спиновой когерентности (SCT) частиц в сгустке должно быть более 1000 с., особое внимание должно быть уделено точности измерения частоты прецессии спина, и вклад систематических ошибок в общую частоту прецессии спина должен быть меньше, чем вклад сигнала от ЭДМ.

Литература

1. A. D. Sakharov, Violation of CP in variance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe, Pis'maZh. Eksp.Teor. Fiz. 5,32-35 (1967), JETPLett. 5,24-27 (1967), DOI:10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
2. D. Anastassopoulos, et al., AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10⁻²⁹ e cm level, April, 2008.
3. V. Bargmann, Louis Michel, and V. L. Telegdi Precession of the Polarization of Particles Moving in a Homogeneous Electromagnetic Field, Phys. Rev. Lett. 2, 435, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.2.435>.
4. F. J.M. Farley, K. Jungmann, J.P. Miller, W.M. Morse, Y.F. Orlov, B. L. Roberts, Y.K. Semertzidis, A. Silenko, and E. J. Stephenson, Phys. Rev. Lett. 93, 052001 (2004).
5. F. Abusaif, A. Aggarwal, A. Aksentev et al. (CPEDM collaboration), CERN Yellow Reports: Monographs, 2021-003, CERN, Geneva (2021).
6. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion, Y. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, V. Ladygin, E. Syresin and N. Nikolaev, Journal of Physics: Conference Series, 2420 (2023) 012052, doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012052.
7. Senichev, Y.V., Aksentyev, A.E., Kolokolchikov, S.D. et al. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei. Phys. Atom. Nuclei 86, 2434–2438 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823110418>.

СТРУННЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦЕВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

И. Ю. Николайчук
nikolajchuk@jinr.ru

Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна

Магнитная система кольцевого ускорителя определяет геометрию замкнутой орбиты и обеспечивает фокусировку пучка. Требования к магнитному полю структурных элементов современных ускорителей достаточно высоки. На стадии производства каждый структурный магнит проходит этап измерений параметров магнитного поля с целью определения их соответствия установленным проектным значениям. Повышение требований к качеству магнитного поля требует улучшения точности измерений. Струнные методики измерений позволяют определять интегральные параметры структурных магнитов с высокой точностью. В работе приводится описание методов измерений магнитных полей с использованием струны, достигаемые точности и преимущества данных методов измерений.

Создание ускорителя кольцевого типа предусматривает производство большого количества магнитных элементов, формирующих магнитооптическую систему установки. На этапе проектирования магнитов и определения допусков на их изготовление и сборку, использующих расчеты динамики пучка [1], закладывается базис для получения магнитов, поля которых отвечают всем заложенным критериям для обеспечения проектных параметров ускорителя. Несмотря на требование к обеспечению заявленных точностей изготовления и сборки, производится проверка качества изготовленных магнитов с помощью проведения магнитных измерений [2]. Наиболее распространенными средствами измерений основных параметров магнитного поля структурных элементов ускорителей являются датчик Холла, гармонические катушки и струна [3]. Струнные методики измерений имеют ряд преимуществ, таких как более высокая точность определения абсолютных интегральных параметров поля, возможность измерений магнитов с малыми апертурами и универсальность. В зависимости от способа взаимодействия струны с магнитным полем выделяют следующие методы: вибрирующей струны, натянутой струны и пульсирующей струны.

Методика вибрирующей струны основана на действии силы Лоренца и наиболее применима для определения положения магнитной оси квадрупольных магнитов [4–5]. При протекании переменного тока по струне, расположенной в постоянном поле измеряемого магнита, возбуждаются механические колебания струны. Изменяя радиально-азимутальное положение струны в апертуре квадрупольного магнита, определяется магнитная ось как положение, при котором амплитуда колебаний минимальна. Для повышения чувствительности частота переменного тока выбирается равной частоте собственных колебаний струны или кратной ей. Помимо определения магнитной оси, методика вибрирующей струны позволяет измерять продольное распределение магнитного поля вдоль струны. Для этого измеряются зависимости амплитуды колебаний струны от частоты переменного тока в ней вблизи частот, кратных резонансной. Аппроксимируя полученные зависимости полиномиальным выражением [6], определяются коэффициенты разложения магнитного поля.

В основе метода натянутой струны лежит измерение ЭДС, наводящейся в струне. ЭДС возникает при движении струны в постоянном магнитном поле или при фиксированном положении струны в импульсном поле. Проведя измерения при движении струны по круговой траектории определяются гармонические составляющие магнитного поля. При движении струны

по другим траекториям можно измерить поперечное и угловые положения магнитной оси, а также угол «скручивания» магнитного поля. Для более точного определения высших гармоник магнитного поля струна перемещается по специальным траекториям, форма которых подбирается таким образом, чтобы компенсировать влияние основной компоненты поля [7].

Метод пульсирующей струны наиболее широко применяется при измерениях интегралов магнитного поля ондуляторов и вигглеров [8]. Метод заключается в подаче импульса высокого напряжения на струну, находящуюся в постоянном магнитном поле измеряемого магнита. При этом в струне возникают локальные отклонения, амплитуда которых зависит от величины поперечного поля в этой точке. Интегральное влияние всех отклонений формирует в струне волну, распространяющуюся к концам. При помощи оптических датчиков регистрируется форма волны. Дальнейшая обработка позволяет вычислить величины первого и второго интеграла поля.

Струнные методики измерения магнитных полей элементов кольцевых ускорителей обладают универсальностью и потенциально высокой точностью. Однако, для достижения требуемой точности измерения необходимо произвести ряд работ по минимизации влияния внешних шумов и сторонних магнитных полей на результаты измерений. Данные исследования проводятся на этапе ввода в эксплуатацию магнитометрической системы на основе струнных методик и позволяют в дальнейшем проводить серийные измерения различных типов магнитов без существенной доработки измерительного стенда.

Литература

1. Бутенко, А. В. и др. Допуски на погрешности магнитного поля Бустера Нуклотрона // Препринт ОИЯИ (2017), Р9-2017-18.
2. Костромин, С. А. и др. Измерение характеристик магнитного поля дипольного магнита Бустера NICA // Письма в ЭЧАЯ (2016). Т. 13. №7(205). С. 1333-1342.
3. Walckiers, L. Magnetic measurement with coils and wires // <https://arxiv.org/abs/1104.3784v1>.
4. Николайчук, И. Ю. и др. Первые измерения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ (2023). Т. 20, № 6 (251). С. 1463-1469.
5. Николайчук, И. Ю. и др. Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Сибирский физический журнал (2024). Т. 19, №1. С. 68-79.
6. Temnykh, A. Vibrating wire field-measuring technique // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (1997). V. 399, Issues 2–3. P. 185-194.
7. Le Bec, G. et al. Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets // PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS – ACCELERATORS AND BEAMS (2012). № 15, 022401.
8. Толмачёв, С.В. Экспериментальные исследования по созданию специальных ондуляторов для лазеров на свободных электронах и лазерных ускорителей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. ф.-м. н. Москва, 2004.

МАССЫ ТРИЖДЫ ТЯЖЁЛЫХ ТЕТРАКВАРКОВ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАРКОВОЙ МОДЕЛИ

Е. М. Савченко
savchenko.em16@physics.msu.ru

Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва

Предложенная в середине прошлого века кварковая модель адронов предсказывает существование разных связанных состояний кварков и антикварков, основные требования к которым заключаются в отсутствии цветового и целочисленности электрического зарядов. Тем не менее, в течение десятилетий в экспериментах наблюдалось лишь два типа состояний: барионы, состоящие из трёх кварков, и мезоны, состоящие из пары кварка и антикварка, и выделенность этих комбинаций не находила убедительных теоретических объяснений. В результате состояния, обладающие кварковым составом, отличным от наблюдаемых адронов, получили название «экзотических», и впервые обнаружить их удалось лишь в начале этого тысячелетия.

Простейшими экзотическими состояниями являются тетракварк (связанное состояние двух кварков и двух антикварков), и пентакварк (связанное состояние четырёх кварков и одного антикварка). Первыми обнаруженными явно экзотическими состояниями стали заряженные дважды тяжёлые тетракварки со скрытым очарованием ($cc\bar{c}\bar{d}$) Z_c^+ [1]: для того, чтобы иметь отличный от нуля заряд, они должны, помимо очарованных кварка и антикварка, содержать также пару лёгких кварка и антикварка различных ароматов. Затем была обнаружена пара заряженных дважды тяжёлых пентакварков также со скрытым очарованием ($uudc\bar{c}$) $P_c^+(4380)$, $P_c^+(4450)$ [2]. Всего за последние двадцать лет было обнаружено несколько десятков, как, пока что, лишь кандидатов, так и уже достоверно подтверждённых тетракварков и пентакварков (подробный обзор и ссылки на экспериментальные работы можно найти в статье [3].)

Тетракварки достоверно обнаружены как в секторе дважды тяжёлых (упомянутый Z_c^+ [1] и другие [4]), так и в секторе четырёхжды тяжёлых ($X(6900)$ и другие [5–7]). Более того, среди дважды тяжёлых есть как состояния, содержащие два тяжёлых кварка [4], так и состояния, содержащие тяжёлый кварк и антикварк [1]. Всё это даёт основание полагать, что в ближайшем будущем можно ожидать экспериментального прогресса и в секторе трижды тяжёлых тетракварков.

В данном докладе обсуждаются трижды тяжёлые тетракварки $QQ'\bar{Q}''\bar{q}$ без ($q = u$) и со ($q = s$) странностью. В дикварк–антидикварковой картине трижды тяжёлый тетракварк рассматривается как сильносвязанное состояние тяжёлого дикварка с тяжёло-лёгким антидикварком. Взаимодействия между кварками дикварка и антикварками антидикварка не учитываются. В рамках релятивистской кварковой модели, основанной на квазипотенциальном подходе и квантовой хромодинамике, вычислены массы основных состояний таких тетракварков с помощью численного решения квазипотенциального уравнения типа Шрёдингера [8]. Релятивистский квазипотенциал взаимодействия дикварка с антидикварком в тетракварке построен без использования нерелятивистского разложения. Важной особенностью модели является последовательный учёт зависящих и не зависящих от спина релятивистских эффектов. Кроме того, с помощью рассчитанного формфактора дикварк–глюонного взаимодействия производится учёт конечного размера дикварка. Полученные массы сравниваются с порогами

сильных распадов на пару тяжёлый+тяжёло-лёгкий мезонов. Если масса тетракварка оказывается ниже соответствующего порога, тогда сильные распады, протекающие через перегруппировку кварков и антикварков, кинематически запрещены, и такое состояние будет наблюдаться в подавленных (слабых или радиационных) каналах распадов и иметь узкую ширину. Если тетракварк имеет массу, незначительно превышающую эти пороговые значения, то его также можно наблюдать как узкий резонанс. На основании такого анализа делаются выводы о том, какие состояния вероятно являются более долгоживущими, а потому предпочтительными для экспериментальных поисков.

Ранее в рамках данной модели уже были рассчитаны массы основных и возбуждённых состояний всех четырежды тяжёлых тетракварков [9–14]. Анализ показал, что они хорошо согласуются с результатами измерений Коллабораций LHCb [5], ATLAS [6] и CMS [7].

Благодарность

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, профессору кафедры Квантовой Теории и Физики Высоких Энергий Физического факультета МГУ Галкину В. О. за сотрудничество и помощь в подготовке доклада. Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант № 22-2-10-3-1.

Литература

1. Liu Z.Q. [et al.]. Study of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle // *Phys. Rev. Lett.* 2013, vol. 110, p. 252002.
2. Aaij R. [et al.]. Observation of $J/\psi p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ Decays // *Phys. Rev. Lett.* 2015, vol. 115, p. 072001.
3. Chen H.-X., Chen W., Liu X., Liu Y.-R., Zhu S.-L. An updated review of the new hadron states // *Rep. Prog. Phys.* 2022, vol. 86, p. 026201.
4. Aaij R. [et al.]. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark // *Nat. Phys.* 2021, vol. 18, p. 751–754.
5. Aaij R. [et al.]. Observation of structure in the J/ψ -pair mass spectrum // *Sci. Bull.* 2020, vol. 65, p. 1983–1993.
6. Aad G. [et al.]. Observation of an excess of di-charmonium events in the four-muon final state with the ATLAS detector // *Phys. Rev. Lett.* 2023, vol. 131, p. 151902.
7. Hayrapetyan A. [et al.]. New Structures in the $J/\psi J/\psi$ Mass Spectrum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2024, vol. 132, p. 111901.
8. Ebert D., Faustov R.N., Galkin V.O., Martynenko A.P. Mass spectra of doubly heavy baryons in the relativistic quark model // *Phys. Rev. D.* 2002. vol. 66, p. 014008.
9. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Masses of the $QQ\bar{Q}\bar{Q}$ tetraquarks in the relativistic diquark-antidiquark picture // *Phys. Rev. D.* 2020. vol. 102, p. 114030.
10. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Heavy Tetraquarks in the Relativistic Quark Model // *Universe.* 2021, vol. 7, p. 94.
11. Галкин В.О., Савченко Е.М., Фаустов Р.Н. Спектроскопия четырежды тяжёлых тетракварков в релятивистской кварковой модели // *УЗФФ.* 2022, № 4, с. 2241512.
12. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Fully Heavy Tetraquark Spectroscopy in the Relativistic Quark Model // *Symmetry.* 2022, vol. 14, p. 2504.
13. Галкин В.О., Савченко Е.М. Релятивистское описание спектров масс четырежды тяжёлых тетракварков // *УЗФФ.* 2023, № 4, с. 2341504.
14. Galkin V.O., Savchenko E.M. Relativistic description of asymmetric fully heavy tetraquarks in the diquark-antidiquark model // *Eur. Phys. J. A.* 2024, vol. 60, p. 96.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО КАСКАДНОГО УМНОЖИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

*А. А. Кащеев¹, Я. А. Колесников^{1,2}, С. С. Савинов^{1,2},
Н. Ш. Сингатулина^{1,3}, И. Н. Сорокин^{1,2}, С. Ю. Таскаев^{1,2}
ntsasht@gmail.com*

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Генерация потока быстрых нейтронов актуальна в материаловедческих целях для различных научных групп, а также для крупных физических установок, таких как Большой адронный коллайдер и Международный экспериментальный термоядерный реактор. На данный момент в Институте ядерной физики СО РАН разработан и функционирует ускорительный источник нейтронов VITA. На ускорительном источнике при транспортировке мощного (до 10 кВт/см²) пучка протонов или дейтронов на мишень генерируют нейтроны с широким диапазоном энергий: холодные, тепловые, эпитепловые и быстрые. Генерируемый поток нейтронов разного энергетического диапазона используется для проведения исследований в области бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний, измерения сечения ядерных реакций (${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,\alpha)\alpha$, ${}^7\text{Li}(d,\alpha){}^5\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$ ${}^7\text{Li}(d,\alpha)\alpha n$), проведения материаловедческих исследований и других приложений. В ходе экспериментов по облучению материалов быстрыми нейтронами для Большого адронного коллайдера, Международного экспериментального термоядерного реактора и Института теоретической и экспериментальной физики максимальная плотность потока нейтронов в образцах достигала $2,9 \cdot 10^{14}$ см⁻². Однако VITA не модернизирована для проведения дейтронного пучка и получения потока быстрых нейтронов, поскольку изначально проектировалась для проведения протонного пучка. Таким образом, предел мощности проводимого до мишени пучка дейтронов в 10 раз ниже, чем у протонного пучка. Создание отдельной и более компактной установки VITAmin на основе существующей VITA для генерации быстрых нейтронов позволит проводить терапию злокачественных опухолей быстрыми нейтронами и радиационное тестирование перспективных материалов. Установка будет предназначена для генерации и проведения дейтронного пучка, при этом высоковольтный и промежуточные электроды ускорителя будут соединены непосредственно с соответствующими секциями высоковольтного источника питания, расположенного внутри газовой части проходного изолятора. В качестве источника питания для VITAmin предложена симметричная каскадная схема умножителя напряжения Кокрофта-Уолтона. В работе представлены модель, схема, теоретические расчеты, моделирование и результаты первоначальных тестирований конструкций источника питания.

**ПОЛУЛЕПТОННЫЕ РАСПАДЫ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ
В ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕГКИХ МЕЗОНОВ***И. С. Суханов*
savchenko.em16@physics.msu.ru

Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, Москва

Полулептонные распады тяжелых мезонов дают важную информацию о значениях матричных элементов Каббиро-Кобаяши-Маскавы (далее ККМ) V_{Qq} (где Q обозначает тяжелый кварк, а q – легкий), которые являются существенными элементами Стандартной Модели. Экспериментально такие распады могут быть измерены более точно, чем чисто лептонные, поскольку они не подавлены по спиральности.

Ещё одним важным достоинством полулептонных распадов является простота их теоретического описания: лептонная часть легко рассчитывается с помощью стандартных методов, а адронная -- факторизуется, что снижает теоретическую неопределенность. Адронный матричный элемент обычно параметризуют набором инвариантных формфакторов, которые рассчитываются с использованием непerturbативных подходов, основанных на квантовой хромодинамике (КХД), таких как решеточная КХД, правила сумм КХД, потенциальные кварковые модели. В полулептонных распадах в конечном состоянии помимо лептонов присутствует адрон, что приводит к более богатой феноменологии по сравнению с чисто лептонными распадами.

Более точные и детальные измерения абсолютных и дифференциальных вероятностей и формфакторов распадов D - и D_s -мезонов на псевдоскалярные и векторные мезоны стали доступными благодаря большой статистике, накопленной коллаборацией BES III на BEPS II. Были исследованы как наиболее вероятные, так и подавленные элементами матрицы ККМ моды распада с позитроном и мюоном. Это позволяет проверить лептонную универсальность в распадах D -мезонов. Отметим, что возможные намеки на ее нарушение недавно были обнаружены в B -распадах [1]. Более точные и полные данные ожидаются с BES III и Belle II в ближайшем будущем. В этой связи, повышенный интерес вызывают распады D -мезонов в орбитально и радиально возбужденные состояния странных и легких мезонов: экспериментально только для нескольких каналов распада имеются измерения [2,3], а для большинства получены только верхние ограничения на ширину распадов; теоретически такие распады мало и плохо исследованы.

В данной работе проведен расчет матричных элементов изменяющего аромат заряженного слабого тока между начальными D - или D_s -мезонами и конечными орбитально возбужденными: легкими скалярными (3P_0 состояние), аксиально векторными (P_1 и P_1' состояния), и тензорными (3P_0 состояние) и радиально возбужденными: псевдоскалярными (2^1S_0) и векторными (2^3S_1) мезонами в рамках релятивистской кварковой модели [4], основанной на квазипотенциальном подходе. Найдено, что релятивистские эффекты играют очень важную роль как для легких, так и для тяжелых адронов. Таким образом, формфакторы рассчитаны с последовательным учетом релятивистской динамики кварков. Они выражены через интегралы перекрытия волновых функций мезонов, известных из изучения их спектроскопии. Зависимость формфакторов от квадрата переданного импульса q^2 определена в явном виде во всем кинематическом диапазоне без дополнительных предположений и экстраполяций. Эти форм-

факторы и спиральный формализм были использованы для расчета дифференциальных и полных вероятностей распада (Branching fraction), а также наблюдаемых параметров, таких как поляризации и асимметрии. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными и предыдущими предсказаниями.

Благодарность

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, профессору кафедры Квантовой теории и физики высоких энергий физического факультета МГУ Галкину В.О. за сотрудничество и помощь в подготовке доклада. Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант № 23-2-2-11-1.

Литература

1. LHCb collaboration. Test of lepton universality in beauty-quark decays //Nature Physics. – 2022. – Т. 18. – №. 3. – С. 277-282.
2. Ablikim M. et al. Observation of the Semileptonic D^+ Transition into an Axial-Vector Meson $K_1(1270)0$ //arXiv preprint arXiv:1907.11370. – 2019.
3. Ablikim M. et al. Observation of $D^0 \rightarrow K_1(1270) e^+ \nu_e$ //Physical Review Letters. – 2021. – Т. 127. – №. 13. – С. 131801.
4. Faustov R. N., Galkin V. O., Kang X. W. Semileptonic decays of D and D_s mesons in the relativistic quark model //Physical Review D. – 2020. – Т. 101. – №. 1. – С. 013004.

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В. В. Федоров

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Создание программного комплекса для расчета динамики частиц во внешних электромагнитных полях является актуальной задачей, обусловленной необходимостью глубокого понимания процессов, происходящих в сильноточных электронных и ионных пучках в ускорителях. В рамках данной работы были разработаны и исследованы две части программного комплекса: KENV и REDPIC, каждая из которых решает свои специфические задачи. В первой части работы, посвященной KENV, была разработана модель на основе уравнений огибающей для эллиптического пучка с распределением Капчинского-Владимирского. Этот подход позволил существенно ускорить процесс расчетов, сохраняя при этом достаточную точность по сравнению с PIC-кодами и экспериментальными данными. Основные задачи данной части включали в себя разработку соответствующего кода, сравнение полученных результатов с альтернативными методами моделирования, а также применение алгоритмов машинного обучения для восстановления огибающей пучка.

Вторая часть работы, REDPIC, фокусируется на кинетическом описании динамики пучков с использованием уравнений Власова-Максвелла. Данный подход позволяет детально анализировать структуру распределения частиц в фазовом пространстве, что является ключевым для понимания коллективных взаимодействий в пучках. Разработанный код, представляя пучок в ускорителе как ансамбль макрочастиц, реализует численную релятивистскую разностную схему, которая приближает систему уравнений Власова-Максвелла во втором порядке точности.

Обе части программного комплекса демонстрируют важность комплексного подхода к моделированию динамики частиц и открывают новые перспективы для исследования различных процессов в электронных и ионных пучках в ускорителях. Результаты данной работы могут быть использованы для оптимизации параметров ускорительных комплексов, а также для разработки новых методик управления пучками частиц.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д.А. Никифоров.

ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Е. А. Фролова, К. А. Иванов, А. С. Конкин

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

В настоящее время ИЯРФ в рамках тематики НЦФМ участвует в разработке перспективного источника гамма-квантов высокой энергии, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния [1]. Источники данного типа отличаются высокой угловой направленностью, яркостью и монохроматичностью излучения, вследствие чего нашли широкое применение в различных областях науки [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13]. Для генерации гамма-квантов высокой энергии в данных источниках используется эффект обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на ультрарелятивистских электронах.

В докладе содержится схема разрабатываемого источника комптоновского излучения и приведены расчетные оценки параметров лазерной и ускорительной систем, обеспечивающих необходимые выходные характеристики гамма-излучения, а также проводится сравнение с зарубежными аналогами.

Литература

1. Россель Ж. Общая физика. М.: МИР, 1964.
2. Guo B. et al. High-resolution phase-contrast imaging of biological specimens using a stable betatron X-ray source in the multiple-exposure mode // Scientific Reports. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 1-10.
3. Pikuz S. A. et al. Micro-radiography with laser plasma X-ray source operating in air atmosphere // Laser and Particle Beams. – 2010. – Т. 28. – №. 3. – С. 393-397.
4. Rougé-Labriet H. et al. X-ray Phase Contrast osteo-articular imaging: a pilot study on cadaveric human hands // Scientific reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-8.
5. Ravasio A. et al. Hard x-ray radiography for density measurement in shock compressed matter // Physics of Plasmas. – 2008. – Т. 15. – №. 6. – С. 060701.
6. Morace A. et al. Development of x-ray radiography for high energy density physics // Physics of Plasmas. – 2014. – Т. 21. – №. 10. – С. 102712.
7. Workman J. et al. Phase-contrast imaging using ultrafast x-rays in laser-shocked materials // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Т. 81. – №. 10. – С. 10E520.
8. Montgomery D. S., Nobile A., Walsh P. J. Characterization of national ignition facility cryogenic beryllium capsules using x-ray phase contrast imaging // Review of Scientific Instruments. – 2004. – Т. 75. – №. 10. – С. 3986-3988.
9. Koch J. A. et al. Refraction-enhanced x-ray radiography for inertial confinement fusion and laser-produced plasma applications // Journal of Applied Physics. – 2009. – Т. 105. – №. 11. – С. 113112.
10. Reutershan T. et al. Numerical evaluation of high-energy, laser-Compton x-ray sources for contrast enhancement and dose reduction in clinical imaging via gadolinium-based K-edge subtraction // Applied Optics. – 2022. – Т. 61. – №. 6. – С. C162-C178.

11. Montay-Gruel P. et al. X-rays can trigger the FLASH effect: Ultra-high dose-rate synchrotron light source prevents normal brain injury after whole brain irradiation in mice // *Radiotherapy and Oncology*. – 2018. – Т. 129. – №. 3. – С. 582-588.
12. Abendroth J. et al. X-ray structure determination of the glycine cleavage system protein H of *Mycobacterium tuberculosis* using an inverse Compton synchrotron X-ray source // *Journal of Structural and Functional Genomics*. – 2010. – Т. 11. – №. 1. – С. 91-100.
13. Huang J. et al. Energy-dispersive X-ray Absorption Spectroscopy with an inverse Compton Source // *Scientific Reports*. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-10.

НАРАБОТКА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

Н. Ю. Фурсова
nfursova@bk.ru

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

В настоящее время основу ядерной медицины составляет ограниченный круг радиоизотопов, что связано с отсутствием для ряда перспективных медицинских изотопов простых методов наработки. Радионуклиды, используемые для диагностики и терапии, в основном нарабатываются на исследовательских реакторах и циклотронах. Эти способы ограничены из-за малого количества исследовательских реакторов с подходящими характеристиками, высокой стоимости установок и мишеней, невозможности (в ряде случаев) получения целевого нуклида без побочных изотопов того же элемента, сложных методов выделения целевого нуклида.

Кроме традиционных изотопов в настоящее время несколько десятков радионуклидов рассматриваются как перспективные для ядерной медицины благодаря их ядерно-физическим характеристикам. Лишь для немногих из них налажено коммерческое производство.

К радионуклидам, применяемым в медицине, предъявляется ряд требований:

- период полураспада в пределах от часов до нескольких суток;
- наличие подходящих для визуализации (низкоэнергетические гамма-кванты или β^+) или терапии (β , α , Auger, SE) излучений;
- возможность обеспечить химическую связь с носителем.

Для большинства перспективных радионуклидов остаются открытыми вопросы о возможности получения в необходимых для доклинических и клинических испытаний количествах, оптимальных методах наработки и выделения из облучённых мишеней. Актуальным становится поиск альтернативных методов наработки этих изотопов. Наряду с циклотронным и реакторным методами получения радионуклидов существует возможность наработки их на электронных ускорителях в результате фотоядерных реакций.

Достоинствами фотоядерного метода являются возможность использования компактных ускорителей электронов в непосредственной близости от медицинских центров и, в ряде случаев, простая химия разделения макроколичеств мишени и микроколичеств целевого нуклида. Кроме того, использование ускорителей электронов может стать альтернативой при производстве тех радионуклидов, которые находятся далеко от линии стабильности на N-Z диаграмме и не могут быть получены простыми путями. Перспективными могут быть (γ , $1p$), (γ , $1pxn$) реакции, а также косвенные процессы, идущие через распад промежуточного продукта (γ , xn) реакции.

Для ответа на вопрос о возможности наработки медицинских количеств радионуклидов, в первую очередь, нужно знать выходы и сечения всех реакций, приводящих к образованию не только целевого, но и побочных нуклидов. Путь производства медицинских изотопов должен обеспечивать:

- активность на уровне ГБк;
- удельную активность, соизмеримую с теоретически достижимой (то есть без носителя);
- отсутствие долгоживущих (соизмеримых с $T_{1/2}$ целевого продукта или более) примесей.

В НИИЯФ МГУ на разрезном импульсном микротроне с максимальной энергией 55 МэВ исследовались фотоядерные реакции на натуральной смеси изотопов титана, цинка, эрбия и иттербия, приводящие к образованию целевых медицинских изотопов ^{47}Sc [1], ^{67}Cu

[2], ^{166}Ho , ^{167}Tm [3] и всех побочных нуклидов. Полученные в ходе работы радиохимические выходы и сечения, а также анализ химических методов выделения целевого нуклида, позволяют сделать вывод, что фотоядерный метод наработки ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{167}Tm может конкурировать с циклотронным и реакторным способами. Кроме того, в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций [4,5] были определены оптимальные энергии для наработки для радионуклидов ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{166}Ho , ^{167}Tm . В дальнейшем планируются исследования на обогащённых мишенях из титана, цинка, эрбия и иттербия.

Литература

1. Aliev R.A., Belyshev S.S., Furkina E.B. et al. Photonuclear production of medically relevant radionuclide ^{47}Sc . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 326(2), 1099–1106 (2020).
2. Krasnovskaya O.O., Abramchuck D., Erofeev A. et al. Recent Advances in $^{64}\text{Cu}/^{67}\text{Cu}$ -Based Radiopharmaceuticals. *International Journal of Molecular Sciences* 24(11), 9154 (2023).
3. Aliev R.A., Priselkova A. B., Khankin V.V., Petrov V.G., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A. Production of medical radioisotope ^{167}Tm by photonuclear reactions on natural ytterbium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 508, 19–23 (2021).
4. Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Combined model of photonucleon reactions. *Physics of Atomic Nuclei* 74(1), 19–39 (2011).
5. Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Modified versions of the combined model of photonucleon reactions. *Physics of Atomic Nuclei* 78(5), 557–573 (2015).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВАЖДЫ ТЯЖЕЛЫХ БАРИОНОВ В ПРИБЛИЖЕНИИ БОРНА-ОППЕНГЕЙМЕРА

А. С. Худова
annakhudova394@gmail.com

Научный руководитель – зав. каф. А. Я. Пархоменко

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, г. Ярославль

Приближение Борна-Оппенгеймера обычно используется для расчета энергии связи в молекулах или их ионах [1–4]. В этом подходе тяжелые степени свободы – ядра атомов считаются статическими источниками внешнего электрического поля и динамика системы полностью определяется легкими степенями свободы – электронами. При решении задачи о нахождении энергии связи положительно заряженного иона молекулы водорода с учетом динамики ядер – протонов, соответствующее уравнение Шредингера можно решить точно только численными методами. Однако, использование приближения Борна-Оппенгеймера позволяет часть расчетов, связанных с усреднением по распределению электронного облака, выполнить аналитически. Согласно этому методу волновые функции, называемые орбиталями, задаются в виде произведения волновых функций атома водорода с центрами в местах расположения протонов [1–4]. Чтобы достичь лучшего согласия со спектром иона молекулы водорода, в орбитали вводится дополнительный вариационный параметр Ритца. Связанное состояние наблюдается только у иона с симметричной волновой функцией. Энергия связи такого состояния 15.9 эВ и расстояние между ядрами 1.06×10^{-8} см.

Дважды тяжелые барионы [5], в состав которых входит пара из тяжелых *c*- и/или *b*-кварков и один легкий *u*-, *d*- или *s*-кварк, представляют собой аналог положительно заряженного иона молекулы водорода. Два тяжелых кварка аналогичны протонам, а легкий кварк эквивалентен электрону. Отличие барионов от иона молекулы водорода в том, что внешнее поле кварков имеет не электромагнитную, а сильную природу. Тем не менее, приближение Борна-Оппенгеймера можно также использовать для расчета спектра масс дважды тяжелых барионов, если предположить, что взаимодействие между кварками можно задать потенциалом, например, корнеллским [6]. Энергия связи в барионе вычисляется как минимум потенциала взаимодействия у дважды тяжелого дикварка – состояния из двух тяжелых кварков. Для описания основного состояния бариона используются волновые функции основного состояния атома водорода. Радиус первой боровской орбиты в случае иона заменяется на аналогичный радиус, определяемый массой легкого кварка. Среднее значение оператора Гамильтона для бариона находится вариационным методом Ритца, а энергия связи двух статических тяжелых кварков ищется как минимум средней энергии [6]. Полученное аналитическое выражение исследовано на наличие экстремумов. Связанное состояние с двумя неподвижными тяжелыми кварками не реализуется. Для вычисления массы дважды тяжелого бариона требуется учет динамики тяжелых кварков, причем решение соответствующего уравнения Шредингера можно найти численными методами.

Литература

1. Ландау Л. Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория). / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2016. 800 с.
2. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. / Д. И. Блохинцев М. : Наука. 1976. 664 с.

3. Давыдов А. С. Квантовая механика. / А. С. Давыдов М. : Наука. 1973. 700 с.
4. Соколов А. А. Квантовая механика. / А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский / М. : Наука, 1979. 528 с.
5. Zyla P. A. et al. Review of Particle Physics // PTEP. 2020. Vol. 2020, №. 8. P. 083C01.
6. Maiani, L., Polosa, A. D., Riquer, V. Hydrogen bond of QCD in doubly heavy baryons and tetraquarks // Physical Review D. 2019. Vol. 100. P. 074002. arXiv:1908.03244 [hep-ph].

ОБЗОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А. В. Чуйкина, С. Ф. Разиньков

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

Значительным шагом в повышении энергетического разрешения гамма-спектрометров стало появление низкотемпературных детекторов (НД) сверхвысокого разрешения или микрокалориметров. Сообщается, что достигнутое энергетическое разрешение микрокалориметра на основе датчиков на краю сверхпроводящего перехода (TES) составляет 22 эВ при энергии квантов 97,4 кэВ (гамма-излучение ^{153}Gd), что на порядок лучше энергетического разрешения детекторов из особо чистого германия (от 400 эВ для пика 122 кэВ) [1]. Непревзойдённые характеристики делают привлекательным использование НД как в научных исследованиях, так и в технических приложениях.

В работе проведен обзор конструкции, принципов работы, характеристик и вариантов применения наиболее распространённых микрокалориметров. По результатам обзора проведен анализ возможности применения НД сверхвысокого разрешения для проведения ядерно-спектроскопических исследований на источнике (квази)монохроматических гамма-квантов, получаемых методом на обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на релятивистских электронах.

Литература

1. M. K. Bacrania, A. S. Hoover, P. J. Karpus et al. Large-Area Microcalorimeter Detectors for Ultra-High-Resolution X-Ray and Gamma-Ray Spectroscopy, IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009. – Vol. 56, №4 pp. 2299-2302.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
ЛИСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
ПО МАЛОУГЛОВОМУ РАССЕЯНИЮ НЕЙТРОНОВ**

О. Д. Шнырков^{1, 2}, Е. Г. Яшина^{1, 2}, К. А. Пиеничный¹, С. В. Григорьев^{1, 2}
oleg.shnyrkov@mail.ru

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Фракталы – объекты, фрагментированные настолько, что измерение их привычными нам мерами (длина, площадь, объём) дает разные результаты в зависимости от выбора мерного отрезка (масштаба). Понятие «фрактал» ввёл Бенуа Мандельброт [1], он же положил начало новой «фрактальной» геометрии. При помощи моделирования экспериментов по малоугловому рассеянию света с использованием численного преобразования Фурье, нашей командой была разработана классификация фрактальных и нефрактальных объектов в двумерном пространстве [2]. Логарифмические фракталы – класс фракталов, представители которого имеют иерархическую ветвящуюся структуру и подчиняются закону равенства площади на разных уровнях их иерархии (разных масштабах).

В нашей работе [3] было показано, что боковая проекция взрослого лиственного дерева является логарифмическим фракталом. Мы сделали вывод, что при росте и ветвлении дерево подчиняется закону сохранения площади при масштабировании от нескольких метров до нескольких дециметров: суммарная площадь боковой поверхности «дочерних» ветвей равна площади поверхности ветви, из которой они растут. На огромном количестве экспериментальных кривых рассеяния в области больших переданных импульсов (на малых масштабах) наблюдается кроссовер в другой режим, отличающийся другим показателем степени при масштабировании от дециметров до сантиметров (масштаб молодых веток). Мы предложили математическую модель, отличающую организацию молодых веток и в целом молодых деревьев от строения взрослого дерева и взрослых ветвей. В основе модели положен не закон сохранения площади, как для взрослого дерева, а закон сохранения объёма веток: суммарный объём «дочерних» веток равен объёму ветки, из которой они растут.

Мы также использовали метод численного Фурье-анализа для экспериментального изучения фрактальной структуры ветвей ели. Изучены изображения еловых лап взрослого дерева размером более 10 метров на различной высоте дерева. Фурье образы фотографий еловых лап, демонстрируют одинаковую структуру кривой малоуглового рассеяния: область Гинье, два участка с прямолинейным характером спада интенсивности, область Гаусса. Мы предложили математическую модель, описывающую полученные кривые: $I(q) = A \cdot \exp((qb)^2/3) + P \cdot q^{(-N)}$ в области малых переданных импульсов (больших масштабов) и $I(q) = R \cdot q^M + S \cdot \exp(-2 \cdot (q - L)^2/F^2)$ в области больших переданных импульсов (малых масштабов). Показано, что показатель степени N близок к 2, что соответствует логарифмическому фракталу, функция Гаусса, описывающая поведение кривой в области больших переданных импульсов, соответствует хвое. Показано, что поскольку на крупных масштабах лапы ели формируются с учётом покрывающей их хвои, подчиняясь закону логарифмического фрактала в двумерном пространстве, для них выполняется правило, сохранения площади ветвей с иголками до и после ветвления.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-12-00188.

Литература

1. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1983.
2. Pustovoit P.M., Yashina E.G., Pshenichnyi K.A., and Grigoriev S.V.// Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020, Vol. 14, No. 6, pp. 1231–1238.
3. Grigoriev S.V., Shnyrkov O.D., Pustovoit P.M., Iashina E.G., and Pshenichnyi K.A. Experimental evidence for logarithmic fractal structure of botanical trees// Phys. Rev. E 105, 044412.

Научное издание

**III Всероссийская школа-семинар
Национального центра физики и математики
для студентов старших курсов, аспирантов,
молодых ученых и специалистов
по физике высоких энергий, ядерной физике
и ускорительной технике**

Тезисы

22–26 июля 2024 года

Материалы публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 17 июля 2024. Формат 60×84/8
Печать электрографическая. Усл. печ. л. ~5,1. Уч. изд. л. ~4,5.
Тираж 90 экз. Зак. тип. 1370-2024

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23

