ODHAH

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ





Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) – ведущий российский научный центр мирового значения. В нем было открыто и объяснено излучение Вавилова-Черенкова, созданы генераторы и усилители, основанные на лазерно-мазерном принципе, создана теория сверхпроводимости и сверхтекучести, открыт принцип автофазировки и явление самофокусировки световых лучей в нелинейных средах, предложена концепция суперсимметрии и сделан целый ряд других, как экспериментальных, так и теоретических открытий мирового уровня. Семь сотрудников ФИАН были удостоены Нобелевских премий.

В настоящее время Физический институт им. П. Н. Лебедева продолжает активно работать практически по всем направлениям современной физики. Среди основных направлений наших исследований:

1. Фундаментальная и прикладная фотоника, лазерная физика, квантовая и нелинейная оптика; оптика и спектроскопия атомно-молекулярных систем, микро- и наноструктур, конденсированных сред и композитных материалов.

2. Физические основы лазерных, фотонных и оптоэлектронных технологий и взаимодействия лазерного излучения с веществом для решения задач навигации, управляемого термоядерного синтеза, информатики и биомедицины.

3. Физика конденсированного состояния: новых материалов, высокотемпературных сверхпроводников, молекулярных и твердотельных структур нанофотоники, наноэлектроники и спинтроники.

4. Физическая электроника, физика плазмы, пучков заряженных частиц и источников ВУФ и рентгеновского излучения.

5. Физика фундаментальных взаимодействий, ядерная и нейтринная физика, физика элементарных частиц, космических лучей и атмосферных процессов, гамма-астрономия, темная материя.

6. Астрофизика и космология, физика Солнца; рентгеновская, инфракрасная и радиоастрономия; наземно- космическая интерферометрия.

7. Физика нелинейных явлений, моделирование гидродинамических, оптических, астрофизических, физико-химических и медико-биологических систем. В Физическом институте им. П.Н. Лебедева работает более полутора тысяч сотрудников, в том числе более 200 докторов и около 400 кандидатов наук, 25 членов Российской академии наук. В 2017 году сотрудниками ФИАН опубликовано более 1200 научных статей, индексируемых в системе Web of Science, а количество ссылок на работы сотрудников без учета самоцитирования превышает двадцать пять тысяч.

Физический институт им. П. Н. Лебедева является лидером российской науки по реализации крупных проектов как фундаментального, так и прикладного характера. К таким проектам безусловно относится космический радиоинтерферометр «РадиоАстрон», который работает на орбите Земли с 2011 года. За это время с помощью «РадиоАстрона» были получены уникальные данные о структуре удаленных астрофизических объектов, и эта работа продолжается. К важнейшим прикладным разработкам ФИАН относятся создание первого российского полноразмерного томографа с полем 1,5 тесла и открытие центра протонной терапии в городе Обнинск с протонным комплексом «Прометеус», разработанным в Физико-техническом центре ФИАН. Закончена модернизация Тянь-Шаньской высокогорной научной станции, где создан новый комплекс детекторов для изучения состава и спектра различных компонент космического излучения в широком диапазоне энергий.

Завершается строительство и комплектация современным научным оборудованием Лаборатории высокотемпературной сверхпроводимости, идет работа в рамках крупных космических проектов "Миллиметрон", "Арка", "Гамма-400", ведутся работы в рамках про-граммы "Глонасс 2012–2020", ФЦП и мегагрантов МОН.

К научной работе в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН активно привлекается молодежь. ФИАН сотрудничает с 26 кафедрами ведущих ВУЗов России, более 130 студентов выполняли свои квалификационные работы в институте. В 2017 году в аспирантуре ФИАН обучалось 76 молодых исследователей, одновременно ведущих научную работу в лабораториях. Все это позволяет Физическому институту им. П.Н. Лебедева оставаться ведущим мировым научным центром и с уверенностью смотреть в будущее.

Настоящий сборник содержит основные результаты исследований, выполненных в ФИАН в 2017 году.

Директор ФИАН чл.-корр. РАН

1 Dear

7

Николай Николаевич Колачевский

Жесткие излучения в лабораторном атмосферном разряде

С использованием различных комбинаций пластиковых сцинтилляционных детекторов, размещаемых в камере из свинца с толщиной стенок 10 см, и ³Не-счетчиков тепловых нейтронов зарегистрированы всплески нейтронного излучения при формовании лабораторного высоковольтного разряда в воздухе. Отмечена сильная зависимость возникновения жесткого рентгеновского и нейтронного излучения от напряженности электрического поля на электродах.

Эксперименты выполнены на установке ЭРГ при напряжении 1 МВ, токе атмосферного разряда до 10-12 кА и длине разрядного промежутка 0.5-0.7 м. Длительность импульса напряжения составляла около 1 мкс при длительности фронта импульса 150-200 нс. Исследования проведены в двух режимах: «обычный» продольный разряд и «оборванный» (незавершенный продольный) разряд. Формирование «оборванного» разряда осуществлялось переключением тока с основного продольного промежутка на вспомогательный радиальный промежуток с целью выделения начальной фазы разряда. С использованием различных комбинаций пластиковых сцинтилляционных детекторов, размещаемых в камере из свинца с толщиной стенок 10 см, и ³Не-счетчиков тепловых нейтронов зарегистрированы всплески нейтронного излучения при формовании и развитии лабораторного высоковольтного разряда в воздухе.

Показана сильная зависимость возникновения жесткого рентгеновского и нейтронного излучения от напряженности элек-



Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — катод, 2 — анод, 3 — сцинтилляционный детектор в свинцовом боксе с толщиной стенок 10 см, 4 — сцинтилляционный детектор в свинцовом боксе с толщиной стенок 6 мм, 5 — открытый сцинтилляционный детектор (50 мкм Al), 6 — парафиновый замедлитель, 7 — сборка ^зНе-счетчиков, 8 — рупорная антенна, 9 — боковые фотокамеры. І и II — различные положения сборки сцинтилляционных детекторов.

трического поля на электродах. Временная структура жесткого рентгеновского и нейтронного излучения оказалась достаточно сложной, что может указывать на различные механизмы генерации проникающих излучений. Близкое совпадение измеренной и рассчитанной эффективности регистрации нейтронов ³Не-счетчиками позволяет оценить максимальное значение потока нейтронов в одном «выстреле» в диапазоне $1 \times 10^{3} - 5 \times 10^{4}$ в 4π стерадиан в зависимости от места генерации нейтронов (вблизи анода или вблизи катода, соответственно). При таких малых потоках очень сложно говорить





Рис. 2. Одновременная регистрация нейтронов сцинтилляционным детектором (слева) и сборкой ³Не-счетчиков (справа).

Результаты опубликованы:

1. A.V. Agafonov, V.A. Bogachenkov, A.P. Chubenko, A.V. Oginov, A.A. Rodionov, A.S. Rusetskiv, V.A. Ryabov, A.L. Shepetov, and K.V. Shpakov. Observation of hard radiations in a laboratory atmospheric high-voltage discharge. J.Phys.D: Appl.Phys. 50(2017) 165202 (9pp).

об изотропном излучении, поэтому реальный общий поток нейтронов может быть еще меньше. Косвенным доказательством этого утверждения могут служить «выстрелы», в которых нейтроны регистрируются либо сцинтилляцонными, либо ³Не-детекторами, разнесенными в пространстве. Кроме экспериментальных измерений эффективности регистрации нейтронов ³Не-счетчиками выполнен комплекс расчетов по прохождению нейтронов внутри сборки счетчиков и в окружающих ее материалах с помощью кода Geant4 для различных вариантов, использованных в экспериментах.

Прецизионное определение константы сильного взаимодействия α_{1} в глубоконеупругих процессах в эксперименте H1 на коллайдере HERA

Константа сильного взаимодействия $\alpha_{\rm c}$ была определена из инклюзивных сечений рождения одиночных и двойных струй в глубоконеупругом ер-рассеянии на коллайдере HERA в эксперименте H1. при использовании предсказания высоких порядков (NNLO) теории возмущений КХД. Исследовано влияние новых экспериментальных данных на уточнение сведений о партонных распределениях в протоне.

Константа сильного взаимодействия а является одним из важнейших параметров Стандартной Модели (СМ) физики частиц, и ее точное определение является критичным для дальнейших прецизионных экспериментов в физике высоких энергий, включая проверку Стандартной Модели и поиски новой физики за пределами Стандартной Модели. Основные свойства исследуемых процессов в глубоконеупругом ер-рассеянии описываются вычислениями в лидирующем порядке (LO) теории возмущений КХД. Однако, LO-вычисления зачастую демонстрируют сильную зависимость от выбора шкал факторизации (μ_{z}) и ренормализации (μ_{z}), и их прямое сравнение с экспериментальными данными является проблематичным. Поэтому для корректного описания экспериментальных результатов требуется учитывать вклады дополнительных партонных процессов, которые описываются включением поправок следующего за лидирующим (NLO) и даже более высоких порядков (NNLO) теории возмущения.

Ранее в эксперименте Н1 константа сильного взаимодействия α определялась из инклюзивных сечений рождения одиночных, двойных и тройных струй в глубоко-неупругих ер-взаимодействиях, с использованием предсказаний NLO-вычислений, и точность определения α (M,) была ограничена точностью этих вычислений. Достижени-

ем настоящей работы является измерение сечения рождения струй в глубоко-неупругом ер-взаимодействии, обусловленном нейтральными токами. Это сечение напрямую связано с константой сильного взаимодействия, имеет ясный экспериментальный сигнал и идеально подходит для прецизионного измерения константы сильного взаимодействия. Одновременное появление новых расчетов для процессов рождения струй в высоких порядках (NNLO) теории возмущений позволяет использовать данный процесс рождения струй для извлечения и более точного измерения константы сильного взаимодействия.

На рис.1 приведены итоги определения константы сильного взаимодействия α (M_) в различных процессах рождения струй в эксперименте Н1 с использованием предсказаний высоких порядков (NNLO) теории возмущений КХД.

В работе также впервые использовались предсказания высоких порядков (NNLO) теории возмущения КХД для совместного определения константы сильного взаимодействия и параметров структурных функций адронов (партонных распределений, PDF). Новые NNLO-вычисления значительно улучшили описание экспериментальных данных и уменьшили основную теоретическую неопределенность определения константы $\alpha_{c}(M_{z})$ по сравнению с предыдущими NLO-расчета-



 α_{s} results from H1 jet data in NNLO

H1and NNLOJET

сильного взаимодействия α (М,) в эксперименте Н1 с использованием различных процессов рождения струй и предсказаний высоких порядков (NNLO) теории возмущения КХД.

ми. Было найдено новое прецизионное значение константы сильного взаимодействия: $\alpha_{s}(M_{z}) = 0.1157 (20)_{exp} (29)_{th}.$

Настоящая работа является первым измерением константы сильного взаимодей-

Результаты опубликованы:

- 1. H1 Collaboration (V. Andreev (Lebedev Inst.) et al.). Measurement of Jet Production Cross Sections in Deep-inelastic ep Scattering at HERA. Eur. Phys. J. C 77, 215 (2017).
- 2. H1 Collaboration (V. Andreev (Lebedev Inst.) et al.). Determination of the strong coupling constant $\alpha_{c}(M_{\gamma})$ in next-to-next-to-leading order QCD using H1 jet cross section measurements. Eur. Phys. J. C 77, 791 (2017).



Рис.2. Результаты определения константы α (М_) (нижняя панель) и ее зависимость от шкалы ренормализации μ_{o} (верхняя панель). Для сравнения также приведены результаты определения $\alpha_{\Lambda}(M_{\gamma})$ в других экспериментах и в других физических процессах. Экспериментальные данные сгруппированы с близкими значениями шкалы ренормализации $\mu_{\scriptscriptstyle B}$.

ствия $\alpha(M_{2})$ с использованием данных по рождению струй и NNLO-расчетов теории возмущений, которое открывает новый этап в прецизионных измерениях на основе КХД на адронных коллайдерах.

Основные результаты работы на эксперименте CMS в составе международной коллаборации

Группа ФИАН CMS занималась калибровкой адронного калориметра, последующей сертификацией данных, использованных для физического анализа результатов. В частности, деятельность группы в настоящий момент сфокусирована на подготовке (оценка возможности реконструкции, уровни фонов) данных, необходимых для исследования процессов, связанных с рождением Ј/ψ.

Можно выделить следующие работы с высокой научной ценностью, в которые вклад группы ФИАН CMS был особенно весомым:

[1] Измерено двойное отношение (проводился отбор только прямого рождения $N\psi(2S)/NJ/\psi[P \ bP \ b] / N\psi(2S)/NJ/\psi[pp]), xa$ рактеризующее то, насколько выход $\psi(2S)$ относительно *J/* ψ подавлен в *Pb-Pb* по сравнению с р-р. Приведенное отношение важно для уточнения теоретических моделей столкновения ультрарелятивистских ядер.

Ниже приведен график зависимости двойного отношения для разных значений попе-



Рис. 1. Зависимость двойного отношения рождения J/ ψ к ψ (2S) в столкновениях ядер в зависимости от поперечного импульса для двух областей псевдобыстрот.

речного импульса в двух областях быстрот без отбора по центральности столкновений. Более детальный анализ и графики, приведенные в статье, показывают, что зависимость двойного отношения от центральности столкновений не слишком заметна.

Наблюдаемое относительное подавление выхода $\psi(2S)$ следует ожидать и оно, как предполагается, связано с тем, что потенциал взаимодействия $\psi(2S)$ слабее и, соответственно, его размеры больше чем у J/ψ , таким образом, $\psi(2S)$ более подвержен диссоциации в среде.

[2] Измерены фактор ядерной модификации R₄₄ и коэффициент азимутальной асимметрии v2 для прямого и непрямого рождения J/ ψ в столкновениях Pb-Pb и p-p при $\sqrt{s_{MM}}$ = 2.76 TeV в эксперименте CMS. Результаты приведены для различных значений интервала центральностей и нескольких кинематических областей: *pT* > 6.5ГэВ/с для центральных быстрот |y|< 2.4 и с *pT* > 3 ГэВ/с для более узкой области быстрот 1.6 < |y| < 2.4. Было обнаружено, что v2 для прямого рождения J/ψ не равен 0, однако не обнаружено существенной зависимости коэффициента от кинематических характеристик (быстрота, центральность, поперечный импульс). Для непрямого рождения J/ψ v2 неотличим от 0. Подавление $R_{_{AA}}$ для прямого рождения J/ψ явно демонстрирует наличие подавления, которое пропорционально центральности столкновений, тогда как зависимость от быстроты или поперечного импульса не выражена. Для непрямого рождения подавление растет как с увеличением центральности, так и с увеличением быстроты и поперечного импульса.





Результаты опубликованы:

- 1. Sirunyan, A.M. et al. (CMS Collaboration). Relative modification of prompt ψ (2S) and J/ψ yields from pp to *PbPb* collisions at $V(s_{NN}) = 5.02$ TeV. Physical Review Letters, 118, 162301. (2017). DOI 10.1103/PhysRevLett.118.162301.
- 2. Khachatryan, V. et al. (CMS Collaboration). Suppression and azimuthal anisotropy of prompt and nonprompt J/ψ production in *PbPb* collisions at $V(s_{NN}) = 2.76$ TeV. Eur. Phys. J. C (2017) 77:252. DOI 10.1140/epjc/s10052-017-4781-1.

В качестве иллюстрации ниже представлены два графика зависимости подавления $R_{_{AA}}$ от центральности столкновения для непрямого и прямого рождения *J/ψ* соответственно.



Рис. 3. Зависимость подавления R_{4,4} от числа частиц для прямого рождения Ј/ѱ.

Эксперимент COMPASS – результаты исследования в адронных и мюонных пучках

В эксперименте COMPASS впервые наблюдается экзотическое состояние a1(1420) с квантовыми числами $J_{pc} M^{\varepsilon} = 1^{++}O^{+}$, распадающееся в систему двух частиц f0(980)π, во взаимодействиях π⁰⁻ с водородной мишенью при энергии 190 ГэВ/с. Измерены множественности заряженных каонов, рожденных при взаимодействии мюонов с аммониевой мишенью, при энергии 160 ГэВ/с, в зависимости от кинематических параметров. Полученные данные позволяют существенно ограничить область изменения параметров существующих теоретических моделей.

В рамках эксперимента COMPASS реализуются две физические программы по исследованию структуры адронов посредством изучения структурных функций и спетроскопии легких мезонов методом парциальных волн.

Измерения структурных функций проводятся в процессах глубоконеупругого рассеяния пучка поляризованных мюонов с энергией 160 ГэВ на водородной, дейтериевой или амониевой поляризованной мишенях. При реализации программы по спектроскопии легких мезонов данные набирают в пучках пионов на водородной или твердотельных мишенях при энергии пучка 190 ГэВ.

Основой эксперимента COMPASS является двухплечевой спектрометр, в состав которого входят два магнита, трековые детекторы, электромагнитные и адронные калориметры, детектор образов черенковского излучения, детекторы мюонов. В зависимости от реализуемой физической программы используются различные типы мишеней. Более подробное описание и характеристики спектрометра приведены в [1].

Наиболее интересным результатом исследований в адронных пучках является наблюдение нового узкого состояния аксиально-векторного мезона а1(1420) [2]. Названное состояние наблюдается в эксклюзивном процессе при взаимодействии отрицательных пионов с энергией 190 ГэВ с мишенью жидкого водорода.

Для анализа используется набор из 88 комплексных амплитуд. Анализ данных производился методом декомпозиции комплексных амплитуд конечного состояния π⁺π⁺π⁻ по парциальным волнам с использованием [$\pi\pi$] S-волн без изобар, т.е. наиболее модельно-независимым методом. Такой подход впервые использовался в анализе парциальных волн, и результат представлен на рис. 1.

Необходимо отметить, что кварк-антикварковая модель не предсказывает резонансов с данными квантовыми числами и с массой около 1.4 ГэВ.

В рамках программы по изучению структурных функций выполнены прецизионные измерения множественностей заряженных каонов (К⁺ и К⁻) в процессах глубоконеупругого рассеяния в пучке мюонов с энергией 160 ГэВ, рассеиваемых на неполяризованной ⁶LiD мишени в кинематических областях 1 (ГэВ/с)² < Q^2 < 60 (ГэВ/с)² по переданному импульсу виртуального фотона 10⁻³ < *x* < 0.7, быстроте 0.1 < y < 0.7, 0.2 < y < 0.85 и W > 5 ГэВ/с² по массе адронов в конечном состоянии [3]. Просумми-



Рис.1. Слева: интенсивность комплексной амплитуды состояния с квантовыми числами $J P C M q = 1^{++}0^{+}$, распадающегося в систему двух частиц f0(980) π , и аппроксимация резонанса функцией Брейта–Вигнера (резонансная компонента) и нерезонансной компонентой (фон). Справа: изменение фазы комплексной амплитуды относительно фазы известного резонанса 4(2040), что подтверждает резонансную природу объекта 1(1420).

рованные множественности заряженных каонов, проинтегрированнные по z, в области больших х указывают на большую величину функции фрагментации для нестранных кварков при сравнении с предыдущими величинами.



Измеренные величины, представленные на рис. 2, в области малых х позволяют существенно усилить ограничения на произведение функции распределения партонов для странных кварков и функции фрагментации.

Результаты опубликованы:

- 1. Abbon, P., et al. (2007). The COMPASS experiment at CERN. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 577(3), 455-518. DOI: 10.1016/j.nima.2007.03.026.
- 2. Adolph, C., et al. (2017). Resonance production and $\pi\pi$ S-wave in $\pi^- + p \rightarrow \pi^-\pi^-\pi^+ + p_{recoil}$ at 190GeV/c. Physical Review D, 95(3), 032004. DOI: 10.1103/PhysRevD.95.032004.
- 3. Adolph, C., et al. (2017). Multiplicities of charged kaons from deep-inelastic muon scattering off an isoscalar target. Physics Letters B, 767, 133-141. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.01.053.

Рис.2. Сравнение сумм множественности заряженных каонов M K⁺ + M K⁻, проинтегрированных по z, измеренных в эксперименте COMPASS (закрытые окружности) с результатами измерений эксперимента HERMES (открытые окружности).Полоса внизу представляет величину систематических ошибок.

Релятивистские эффекты в составных ядерных системах

Впервые решено уравнение Бете-Солпитера для системы трех релятивистских частиц с взаимодействием нулевого радиуса. Релятивистские эффекты приводят к эффективному отталкиванию, что стабилизирует систему и устраняет так называемый коллапс Томаса, который возникает в нерелятивистском приближении. Найдены массы трехчастичных состояний как функции парного взаимодействия. Вычислен электромагнитный формфактор системы двух частиц с учетом вклада перекрестных диаграмм. Этот вклад составляет заметную величину порядка 10%.

Принято считать, что атомные ядра представляют собой нерелятивистские системы, с высокой точностью описываемые уравнением Шредингера. Однако средние скорости нуклонов в ядрах всего лишь в несколько раз меньше скорости света (в отличие от атома водорода, где эти скорости составляют меньше процента от скорости света). Кроме того, энергия связи ядра (малая по сравнению с массами нуклонов) представляет собой разность двух больших величин: средних потенциальной и кинетической энергий. Относительно небольшие вариации каждой из них (благодаря релятивистским эффектам) приводят к значительной вариации энергии связи. А в случае упругого рассеяния электронов высоких энергий на ядрах с большой передачей импульса релятивистские эффекты в электромагнитных формфакторах становятся доминирующими: чтобы передать большой импульс и не развалить ядро, электрон должен рассеяться на внутриядерном нуклоне, несущем большой импульс. Вот почему релятивистские эффекты в ядрах, не содержащиеся в уравнении Шредингера, важны, и их исследования являются актуальными.

Решение уравнения на связанные состояния в системе нескольких тел (а тем более – релятивистского уравнения в системе многих тел) – довольно сложная задача. Однако наиболее интересные общие закономерности могут быть исследованы в решаемых моделях. Нами впервые получено решение релятивистского уравнения Бете-Солпитера для связанных состояний системы из 3-х одинаковых частиц в модели с парным взаимодействием нулевого радиуса. Найдена зависимость квадрата массы системы из трех частиц от обратной длины рассеяния (то есть, амплитуды рассеяния при нулевой энергии) в системе двух частиц. В нерелятивистском подходе такая система подвержена так называемому коллапсу Томаса – ее энергия связи не ограничена снизу. В пределе, когда радиус взаимодействия стремится к нулю, энергия связи стремится к минус-бесконечности. Релятивистские эффекты приводят к эффективному отталкиванию и спасают 3-частичную систему от коллапса – найденная энергия связи (рис. 1) оказывается конечной. Релятивистские эффекты также заметно влияют на энергию связи даже в пределе ее исчезающе малого («нерелятивистского») значения.

Нуклоны взаимодействуют между собой путем обмена мезонами, которые, таким образом, также присутствуют в ядрах. Было исследовано влияние присутствия виртуальных мезонов на электромагнитный



Рис. 1. Зависимость квадрата массы системы трех релятивистских частиц от обратной длины рассеяния в системе двух частиц. Сплошная кривая – основное состояние, расчет в рамках уравнения Бете-Солпитера (BS). Штриховая кривая – расчет в рамках другого релятивистского подхода: «динамика на световом фронте» (LF). Штрихпунктирная и дважды штрихпунктирная кривые – первое возбужденное состояние. Состояния с отрицательными квадратами масс – нефизические.

формфактор двухчастичной системы. Помимо простейшего импульсного приближения (треугольная диаграмма), впервые был учтен вклад «перекрестной диаграммы» (рис. 2) как во взаимодействие в составной системе, так и в электромагнитную вершину. Результат, полученный в рамках подхода Бете-Солпитера, показан на рис. 3. Этот вклад, обычно пренебрегаемый в расчетах, составляет порядка 10% и должен быть учтен при анализе прецизионных экспериментов.

Результаты опубликованы:

- 1. E. Ydrefors, J.H. Alvarenga Nogueira, V. Gigante, V.A. Karmanov, and T. Frederico. Three-body bound states with zero-range interaction in the Bethe–Salpeter approach. Phys. Lett. B 770 (2017) 131–137; arXiv:1703.07981.
- 2. V. Gigante, J.H. Alvarenga Nogueira, E. Ydrefors, C. Gutierrez, V.A. Karmanov, and T. Frederico. Bound state structure and electromagnetic form factor beyond the ladder approximation. Phys. Rev. D 95 (2017) 056012; arXiv:1611.03773.



Рис. 2. Перекрестная диаграмма, вносящая вклад в электромагнитный формфактор. Виртуальные мезоны показаны штриховыми линиями.



Рис. 3. Электромагнитный формфактор двухчастичной системы как функция переданного импульса. Штриховая кривая — импульсное приближение. Штрихпунктирная кривая – вклад перекрестной диаграммы рис.2. Штриховая кривая — полный результат.



2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 Энергия фотонов (кэВ)



Результаты опубликованы:

Число событий

40

400

йи 300 -200 -

120

120

событий 80 90 ео

Число

событий

Число

 $\theta = 119.6^{\circ}$

Число

1. Alekseev V. I., Eliseyev A. N., Irribarra E., Kishin I. A., Klyuev A. S., Kubankin A. S., Nazhmudinov R. M., Zhukova P. N. Evolution of the characteristics of Parametric X-ray Radiation from textured polycrystals under different observation angles . Phys. Letters A. – 2018. – Vol. 382. – Nr. 7. p. 503–506.

Генерация рентгеновского излучения релятивистскими электронами в средах с частично упорядоченной атомной структурой

Выполнена серия экспериментов по измерению спектров параметрического рентгеновского излучения релятивистских электронов из мишеней с различной степенью упорядоченности атомной структуры: текстурированный поликристалл, порошковая среда. Выполнено сравнение полученных результатов с моделями параметрического рентгеновского излучения, разработанными на основе кинематического приближения. Показано хорошее согласие теории и эксперимента.

В начале XXI века появился ряд работ, в которых был предложен альтернативный подход к измерению параметров атомной и кластерной структуры конденсированных сред, основанный на измерении когерентного фотонного отклика среды, с которой взаимодействует релятивистская заряженная частица. При взаимодействии кулоновского поля налетающей частицы с упорядоченными атомами среды основной вклад в излучение вносит когерентная составляющая, обусловленная наличием периодичности расположения атомов. В научной литературе когерентная составляющая имеет два названия: параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) и когерентное поляризационное тормозное излучение. К настоящему времени разработано несколько моделей ПРИ, которые предсказывают возможность использования данного вида излучения для диагностики атомной и кластерной структуры вещества, в том числе размеров и формы кластеров.

В настоящей работе выполнена серия экспериментов, направленных на изучение ПРИ из сред с частичноупорядоченной атомной структурой. Эксперименты выполнены на установке «Рентген 1» Отдела физики высоких энергий ФИАН.

В качестве источника пучка электронов использовался микротрон с энергией ускоренных электронов 7 МэВ. Основная цель экспериментов состояла в наблюдении ПРИ из сред с различной степенью упорядоченности атомной структуры и сравнении полученных результатов с существующими моделями ПРИ из поликристаллов и из мозаичных кристаллов.

В качестве мишеней использовались текстурированная поликристаллическая фольга вольфрама толщиной 20 мкм и шириной распределения текстуры 5.44° (кристаллографическая плоскость (200)), а также вольфрамовый порошок со средним размером зёрен 1.6 мкм.

Результаты измерения и расчёта спектров ПРИ при различных углах наблюдения излучения θ (угол между направлениями распространения излучающих электронов и регистрации излучения) представлены на рис. 1. Видно, что экспериментальные результаты более корректно описывает теория ПРИ, разработанная для мозаичных кристаллов, при этом расходимость эксперимента и теории ПРИ для поликристаллических сред уменьшается при стремлении угла наблюдения к 180°.

На рис. 2 представлены результаты измерения и расчёта спектра ПРИ из порошковой мишени для угла наблюдения 180°. Расчёт выполнен на основе теории ПРИ для поликристаллических сред. Из рисунка можно отметить совершенно иной вид спектра в

сравнении со спектрами, представленными на рис. 1. Видно, что одновременно вклад дают сразу несколько кристаллографических плоскостей. Наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента.



Рис. 2. Спектр ПРИ из вольфрамового порошка. Сплошная линия – теория для поликристалла.

110

Новые люминофоры для светодиодных источников белого света

Проведены поисковые исследования новых люминофоров для светодиодных источников белого света. Люминофоры создавались на основе сложных силикатов со структурой апатита или граната, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов, с целью получения более «теплого» белого света путем увеличения доли красной компоненты в спектре излучения люминофоров. Оптимизация химического состава люминофоров позволила получить образцы, перспективные для практического использования в белых светодиодах.

В настоящее время наблюдается постоянный рост исследований и разработок новых люминофоров для ламп белого света, основанных на использовании светодиодов, что обусловлено растушим применением таких источников света в различных областях человеческой деятельности. Большинство светодиодных источников белого света основаны на комбинации из синего светодиода и желтого люминофора типа стандартного Y_Al_O_1:Ce³⁺ (YAG:Ce). Белый свет генерируется в результате смешивания излучений синего и желтого цвета от светодиода и люминофора. Для светодиодных ламп белого света имеется проблема низкого индекса цветопередачи, а именно: белый свет от таких источников выглядит голубоватым («холодным»). Для получения более естественного «теплого» белого света, ком-



Рис. 1. Видимая люминесценция при УФ-облучении от трех образцов апатитов, активированных 1.0 am.% Еи³⁺: до (нижний ряд) и после (верхний ряд) отжига в атмосфере H /Ar. Anaтит Mg_La_Si_O_:Еи после отжига стал испускать яркую желтую люминесценцию, обусловленную 5d-4f переходами в Eu²⁺.

фортного для человеческого глаза, в спектр свечения желтого люминофора необходимо добавить красную компоненту.

Было показано, что в силикатных апатитах, соактивированных ионами Eu²⁺/Eu³⁺ (рис. 1, 2) или Eu²⁺/Mn²⁺ в оптимальных концентрациях, можно ожидать получения эффективной передачи энергии от Eu²⁺ к Eu³⁺ или Mn²⁺, что обеспечит сосуществование желтой d-f люминесценции Eu²⁺ и красной f-f или d-d люминесценции Eu³⁺ или Mn²⁺, соответственно, от однофазного люминофора, который, в результате, будет удовлетворять требованиям к люминофору для светодиодных источников теплого белого света.



Рис. 2. Спектры возбуждения люминесценции 614 (1) и 550 (2) нм и спектры люминесценции при возбуждении 275 (3) и 355 нм (4) ионов Еи³⁺ (1, 3) и Eu²⁺ (2, 4) в anamume Mg₂La₂Si₂O₂.

Был также разработан новый активированный Mn⁴⁺ красный люминофор со структурой граната Y₂Mg₂Ge₃O₁₂:Mn⁴⁺(1%),Li⁺(1.5%) (рис. 3), обладающий очень высокой температурной стабильностью люминесценции.



Результаты опубликованы:

нограмма граната Ү,Мд,Ge,O,,.

1. Jansen, T., et al. (2017). Site selective, time and temperature dependent spectroscopy of Eu3+ doped apatites (Mg, Ca, Sr)₂Y₂Si₂O₂. Journal of Luminescence, 186, 205–211. DOI: 10.1016/j. ilumin.2017.02.004

Рис. 3. Кристаллическая структура и рентге-

- 2. Khaidukov, N. M., Makhov, V. N., et al. (2017). Extended broadband luminescence of dodecahedral multisite Ce³⁺ ions in garnets {Y₂}[MgA](BAlSi)O₁₂ (A = Sc, Ga, Al; B = Ga, Al). Dyes and Pigments, 142, 524–529. DOI: 10.1016/j.dyepig.2017.04.013
- 3. Khaidukov, N. M., Kirm, M., et al. (2017). Luminescence Properties of Silicate Apatite Phosphors M₂La₂Si₂O₂: Eu (M = Mg, Ca, Sr). Journal of Luminescence, 191, 51–55. DOI: 10.1016/j. ilumin.2017.01.033
- 4. Kirm, M., Feldbach, E., et al. (2017). Silicate apatite phosphors for pc-LED applications. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 66(4), 383–395. DOI: 10.3176/proc.2017.4.14
- 5. Khaidukov, N. M., Zhidkova, I. A., et al. (2018). Mechanism for bifurcation of broadband luminescence spectra from Ce³⁺ ions at dodecahedral sites in garnets {CaY₂}[M₂](Al₂Si)O₁₂ (M=Al, Ga, Sc). Dyes and Pigments, 148, 189–195. DOI: 10.1016/j.dyepig.2017.09.012
- 6. Jansen, T., Gorobez, J., et al. (2018). Narrow band deep red photoluminescence of Y_Mg_Ge_O___ Mn⁴⁺, Li⁺ inverse garnet for high power phosphor converted LEDs. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 7(1), R3086–R3092. DOI: 10.1149/2.0121801jss

Было обнаружено, что данный люминофор эффективно поглощает излучение в синей области спектра и испускает яркую красную $^{2}E \rightarrow {}^{4}A_{2}$ люминесценцию с максимумом полосы при 658нм, а также обладает очень высокой температурой тушения люминесценции T_{1/2} > 800 К (рис. 4), т.е. этот люминофор имеет перспективу использования в качестве красной компоненты свечения в смеси люминофоров для высокомощных светодиодных источников теплого белого света.



Рис. 4. Температурная зависимость спектров люминесценции Y₂Mg₂Ge₂O₁₃:Mn⁴⁺(1%),Li⁺(1.5%). На вставке показана зависимость интегральной интенсивности люминесценции от температуры в диапазоне от 78 до 800К.

Свойства разностного метода для поиска анизотропии первичного космического излучения

Проведен анализ особенностей и свойств оригинального разностного метода, разработанного для поиска анизотропии первичного космического излучения (ПКИ) в области излома энергетического спектра. Показано, что метод, в котором исследуются не интенсивности, а массовый состав потоков частиц, позволяет надежно обнаружить анизотропию ПКИ, обладает высокой чувствительностью и устойчив к случайным и систематическим ошибкам эксперимента. Многократное рассеяние заряженных частиц в магнитных полях Галактики, обычно являющееся помехой, здесь используется для исследования областей неба за пределами прямой видимости установки.

Работа проведена совместным коллективом ученых ФИАН и Национальной научной лаборатории имени А. Алиханяна (до 2011 г. Ереванский физический институт, ЕрФИ), Республика Армения.

Распространение ПКИ в масштабе Галактики подобно диффузному переносу из-за многократного рассеяния частиц, поэтому анизотропия его интенсивности в области излома (10¹⁵–10¹⁶ эВ) не превышает процента и находится на уровне ошибок. Поиски анизотропии и вообще аномалий ведутся много лет, так как их надежное обнаружение требуется для определения природы излома.

Разностный метод анализа, изначально учитывающий диффузный характер распространения ПКИ в Галактике, был специально разработан для поиска аномалий. В нем анализируется массовый состав потоков частиц из разных участков неба, поскольку тяжелые ядра при прочих равных условиях сильнее рассеиваются в магнитных полях, чем легкие. Поэтому со стороны источника состав ПКИ должен быть более легким, чем с противоположной.

Суть метода: в небесных координатах задаются произвольные направления, затем вокруг каждого из них строится конус с так подобранным раствором, чтобы вся статистика пришедших частиц делилась на два равных по числу событий набора – внутри конуса и вне его. В обоих наборах строятся распределения параметра, зависящего от массы первичной частицы, и вычитаются друг из друга с вычислением $\chi^2 = \sum (\Delta_i / \sigma_i)^2$, где Д. – разность между распределениями в интервале *i*, а ее ошибка $\sigma_i \approx (n_i)^{1/2}$. Здесь п. – суммарное число событий в обоих наборах в интервале і. Ошибка не зависит от заданного направления, что имеет решающее значение для поиска максимума χ^2 . В этом направлении максимально отличаются массовые составы, указывая на источник ПКИ со стороны более легкого состава.

При вычитании уничтожается общий фон и методические ошибки, так как они одни и те же в обоих наборах, а многократное рассеяние частиц в Галактике помогает регистрировать ПКИ от источников, лежащих за пределами прямой видимости установки.

Мы проанализировали 3.38 млн ШАЛ с первичной энергией 10¹⁴ ÷ 10¹⁷ эВ, зарегистрированных в 2011-2013 годах на установке ГАММА (г. Арагац, Армения, 3200 м над уровнем моря). Параметром, зависящим от массы первичной частицы, была взята крутизна *S* спада функции пространственного распределения ливневых частиц в ШАЛ.

«Слепой» поиск анизотропии для частиц с энергиями в области излома обнаружил единственную аномалию в Южном полушарии неба с Галактическими координатами *I* = 277°, *b* = −5° (рис. 1). Для этого направления $\chi^2/J = 57.6$, где J = 17 - число степеней свободы. Было показано, что большая величина χ^2/J и высокая чувствительность обеспечиваются использованием полной статистики для любого направления.

Вводя искажения в параметр S, мы выяснили, что случайные ошибки не меняют положение аномалии, но приводят к уменьшению высоты максимума χ^2/J , зависящему от величины искажений. Если искажения еще и азимутально-асимметричны в лабораторной системе, то они вызывают появление



Рис. 1. Аномалия в галактических координатах. Белый кружок – кластер Vela.

degree

þ,

Результаты опубликованы:

method for searching for anisotropy of primary cosmic rays. Bulletin of the Lebedev Physics Institute 44(2), 40-45 2017, DOI 10.3103/S106833561702004X.

дополнительного максимума параметра χ^2/J в направлении оси вращения Земли – Полюсе мира – независимо от направления асимметрии (рис. 2).

Вблизи найденной аномалии находится кластер в созвездии Парусов (Vela) с двумя близко расположенными остатками сверхновых Vela X и Vela Jr, расстояния до которых составляют 0.3 и 0.2 кпс соответственно.

Некоторый сдвиг координат аномалии относительно кластера Vela может быть связан с наличием регулярного магнитного поля между источником и Землей.

Обнаруженная аномалия с большой вероятностью указывает на близкий источник ПКИ, участвующий в формировании излома (колена) в спектре ПКИ.

Разностный метод показал свою простоту, высокую чувствительность и надежность.





1. Pavlyuchenko V.P., Martirosov R.M., Nikolskaya N.M., Erlykin A.D. Properties of the difference

Исследование фоторождения п-и п'-мезонов

Реакции ур \rightarrow пр и ур \rightarrow п'р изучены от порога до энергии в системе центра масс (СЦМ) W = 1.96 ГэВ с использованием меченых фотонов микротрона МАМИ (Майни). Дифференциальные сечения определены с рекордной статистической точностью. Обнаружен сильный касп в полном сечении фоторождения п мезонов вблизи порога рождения п'. В рамках изобарной модели п-MAID такой касп может быть объяснен только сильной связью пр и п'р с плохо изученным резонансом N(1895)1/2⁻. Новые данные открывают возможность изучения свойств этого резонанса.

Выполненная работа является вкладом в изучение фоторождения п- и п'-мезонов, представляя величины дифференциальных сечений процессов $vp \rightarrow np$ и $vp \rightarrow n'p$ от порогов реакции до Еу = 1577 МэВ (полная энергия в СЦМ W = 1960 МэВ). Данные получены с малым размером шага по энергии Еу падающих на жидководородную мишень гамма-квантов и покрывают весь диапазон углов рождающихся п-и п'-мезонов.

Основная часть экспериментальной установки – центральный калориметр Crystall Ball (CB), углы в передней полусфере перекрывались TAPS-калориметром. Работа проводилась на меченом тормозном пучке гамма-квантов от электронов микротрона МАМІ (университет г. Майнц) на медном конвертере толщиной 10 мкм. Основу анализа гамма-квантов по энергии составляла система мечения Глазго-Майнц. Для точного анализа высокоэнергетической части спектра тормозных гамма-квантов (что особенно важно при изучении фоторождения п'-мезонов) использовался дополнительно спектрометр мечения в области конечной точки (ЕРТ).

Экспериментальные данные по фоторождению р и р', собраны в разные годы в течение нескольких сеансов. Первый массив экспериментальных данных Run-I был сформирован в 2007 году на электронном пучке с энергией 1508 МэВ и фотонами тормозного излучения с верхней границей мечения по энергии Еу = 1402 МэВ. Массив данных Run-II был набран в 2009 году на электронном пучке с энергией 1557 МэВ, при этом верхняя граница мечения тормозных фотонов по энергии составила 1448 МэВ. Массив данных Run-III был набран в 2014 году на электронном пучке с энергией 1604 МэВ, в этом случае система мечения тормозных фотонов была дополнена ЕРТ-спектрометром, который перекрыл диапазон энергий от 1426 МэВ до 1576 МэВ.



Рис. 1. Приведено полученное полное сечение для реакции үр → пр наряду с предшествующими данными эксперимента CBELSA / TAPS. Данные сравниваются с модельными расчетами nMAID-2003 (черный пунктир), SAIDGE09 (синий штрихпунктир) и BG2014-2 (пурпурный штрих). Новое модельное решение nMAID2016 показано черной сплошной линией. Реджи-фон (чёрный штрих), а также сумма фона и вклады резонансов N1/2 (чёрный штрихпунктир) показаны отдельно.



Результаты опубликованы:

1. V.L. Kashevarov (Lebedev Inst.) et al. [A2 Collaboration at MAMI]. Study of n and n' Photoproduction at MAMI. Phys. Rev. Lett. 118, No.21, 212001 (2017). DOI: 10.1103/ PhysRevLett.118.212001. e-Print: arXiv:1701.04809.

Рис. 2. Полное сечение, полученное для ур \rightarrow η' р наряду с предшествующими данными экспериментов CBELSA/TAPS, SAPHIR, ABBHHM и АННМ. Данные сравниваются с модельными расчетами nMAID-Regge-2003 (черный пунктир) и с новым решением для модели пМАІD2016 (черная сплошная линия). Кроме того, фон (черный штрих), а также основные резонансные вклады N(1895)1/2– (красный штрихпунктир), N(1990)1/2+ (зеленый штрих) и N(2020)3/2- (синий штрихпунктир) показаны отдельно.

Низкоэнергетические ядерные реакции в кристаллических наноструктурах (установка ГЕЛИС)

Проведена серия работ по исследованию стимулирования ядерных реакций в дейтерированных кристаллических структурах. Обнаружены дополнительные пики в спектрах рентгеновской флуоресценции. Исследован ориентационный эффект увеличения коэффициента усиления DD-реакции в CVD-алмазе. Показана возможность стимулирования DD-реакции в твердотельных дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов.

1. Измерены выходы ядерных реакций в образцах текстурированного CVD-алмаза при их облучении пучком ионов дейтерия. Показано, что ориентация образца в пучке дейтронов оказывает влияние на величину выхода DD-реакции. Исследованы рентгеновские спектры флуоресценции поверхности дейтерированных мишеней при облучении их пучком ионов. Анализ спектров флуоресценции

позволил обнаружить «дополнительные» пики (рис.1), появление которых нельзя ассоциировать ни с одним из известных элементов, и требует дальнейших исследований [1].

2. Путем моделирования исследован ориентационный эффект увеличения коэффициента усиления DD-реакции в CVD-алмазе. Получено, что эффект каналирования до 2.2 раза увеличивает относительный фактор



Рис. 1. Спектр от мишени из CVD-алмаза на медном держателе, облученной пучком ионов D⁺ (20 кэВ, 200 мкА) под разными углами. Пунктирная линия — 10°, точечная линия — 20°, сплошная линия — 30°, пунктирная линия (толстые штрихи) — 40°, пунктирная линия (длинный пунктир) — 50°. «Дополнительные» пики показаны стрелками. Видно, что изменение ориентации мишени в пучке ионов не приводит к смещению «дополнительных пиков». Следовательно, они не связаны с процессами дифракции.

усиления для параллельного пучка дейтронов и до 1,2раза для пучка с разбросом по углу, равному 3 критическим углам каналирования (рис.2). Получено качественное согласие с экспериментом. Наблюдаемый ориентационный эффект показывает, что каналирование ионов пучка играет достаточно заметную роль в повышении выхода реакции DD [2].

3. Двумя независимыми методами (с использованием нейтронного детектора на



Рис.2. Относительный фактор усиления DD-реакции в зависимости от угла разброса пучка. ■ Δϑ = ϑ /5, • Δϑ = ϑ /2, ▲ Δϑ = ϑ , • Δϑ = 2ϑ , ▼ Δϑ = 3ϑ (ϑ = 1.39° — критический угол каналирования).

Результаты опубликованы:

- 1. А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий, В. И. Цехош, А. А. Болотоков. Спектры рентгеновского излучения при взаимодействии пучков ионов с энергией меньше 25 кэВ с дейтерированными кристаллическими структурами. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, № 1, с. 36-40.
- 2. A.V. Bagulya, O.D. Dalkarov, M.A. Negodaev, Yu.L. Pivovarov, A.S. Rusetskii, T.A. Tukhfatullin. Orientation effect in d(d,n)3He reaction initiated by 20 keV deuterons at channeling in textured CVD-Diamond target. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 402, (2017), 243-246.
- 3. А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий, В. И. Цехош, Б. Ф. Ляхов, Е.И. Саунин, А. А. Болотоков, Ю. Ж. Тулеушев. Взаимодействие рентгеновских квантов с энергией 20-30 кэВ с дейтерированными кристаллическими структурами. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, № 2, с. 16-22.

основе счетчиков Не-3 и трекового детектора CR-39) измерена эмиссия нейтронов и протонов – продуктов ядерных реакций в образцах дейтерированных структур текстурированного CVD-алмаза, палладия и циркония при облучении пучком рентгеновских квантов. Показана возможность стимулирования DD-реакции в твердотельных дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов с энергией 20-30 кэВ [3].

Исследование параметров нейтринных осцилляций в эксперименте NOvA

В эксперименте NOvA с использованием пучка мюонных нейтрино от ускорителя FNAL и 14-тонного детектора получены новые данные о параметрах нейтринных осцилляций.

На основе обработки данных с эквивалентной экспозицией 6.05×10²⁰ протонов, сброшенных на мишень нейтринного канала, при анализе моды выбывания пучка *v* в предположении нормальной иерархии нейтринных масс, получены величины Δm_{22}^{2} = (2.67 ± 0.11)×10⁻³ эВ² и с двумя статистически вырожденными значениями

 $0,404^{\scriptscriptstyle +0,030}_{\scriptscriptstyle -0,022}$ и $0,624^{\scriptscriptstyle +0,022}_{\scriptscriptstyle -0,030}$. Это первое указание, полученное на уровне достоверности 2.6 о, на отклонение от сценария максимального смешивания, в котором $\sin^2 \vartheta_{22} = 0.5$. Допустимые области параметров осцилляций, измеренные в эксперименте NOvA, представлены на рис.1.

Измерены параметры осцилляций для переходов мюонного нейтрино в электрон-



Рис. 1. Сплошные контуры – допустимые области параметров осцилляций, измеренные в эксперименте NOvA в предположении нормальной иерархии нейтринных масс на уровне достоверности 90%. Точки – наилучший фит параметров в эксперименте NOvA. Пунктирные контуры – данные экспериментов MINOS и T2К.

ное ($v_{\mu} \rightarrow v_{\mu}$). В дальнем детекторе наблюдалось 33 кандидата на у события при ожидаемом фоне 8.2 ± 0.8 (сист.). При комбинировании данных эксперимента NOvA по выбыванию пучка мюонных нейтрино, появлению электронных нейтрино, а также ограничений, полученных в реакторных экспериментах по определению параметра смешивания $\sin^2 \vartheta_{_{12}}$, гипотеза инвертированной иерархии нейтринных масс исключена на уровне достоверности более 93% для всех значений фазы СР-нарушения δ_{сл}. На рис.2 представлены допустимые области пространства параметров (sin²ϑ₂₃, δ_с) для различных уровней достоверности.

Исследованы вклады стерильных нейтрино в осцилляции на основе изучения выбывания вкладов событий нейтрального тока (NC), измеряемые в дальнем детекторе, относительно количества NC-событий, измеряемых в ближнем детекторе. NC-события не чувствительны к осцилляциям $v_{\mu} \rightarrow v_{r}$ и $v_{\mu} \rightarrow v_{\mu}$, но будут отражать вклады осцилляций $v_{\mu} \rightarrow v_{ster}$, если они существуют. Поэтому в сценарии со стерильными нейтрино число NC-событий, наблюдаемое в дальнем детекторе, будет изменяться. На основе набранной статистики нейтринных взаимодействий нейтрального тока показано отсутствие смешивания стерильных нейтрино с нейтрино трех активных ароматов. Для сценария с одним стерильным нейтрино (3 + 1) поставлены ограничения на углы смешивания и на уровне достоверности 90% в области значений 0.05 эВ²≤ *Δm*² ≤ 0.5 эВ².

На рис.3 показаны ограничения эксперимента NOvA на углы смешивания стерильных нейтрино и элементы матрицы смешивания.



Рис.2. Допустимые области пространства параметров (sin² ϑ_{22} , δ_{CP}) для различных уровней достоверности, согласующиеся с наблюдаемым спектром V_-событий и данными по выбыванию пучка V. Верхняя панель соответствует нормальной иерархии нейтринных масс (Δm_{22}^{2} > 0), нижняя панель — инвертированной uepapxuu ($\Delta m_{22}^2 < 0$).

Результаты опубликованы:

- 1. P. Adamson, L. Aliaga, D. Ambrose,..., V. Grichine, ..., S. Kotelnikov,..., V. Ryabov et al. (NOvA Collaboration). Measurement of the neutrino mixing angle θ_{23} in NOvA. Physical Review Letters, 2017, Vol. 118, p. 151802; DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151802.
- 2. P. Adamson, L. Aliaga, D. Ambrose,..., V. Grichine, ..., S. Kotelnikov,..., V. Ryabov et al. (NOvA Collaboration). Constraints on oscillation parameters from v appearance and v disappearance in NOvA. Physical Review Letters, 2017, Vol. 118, p. 231801; DOI:10.1103/ PhysRevLett.118.231801.

Отделение ядерной физики и астрофизики



Рис.3. Исключенные области для возможных углов смешивания $artheta_{_{24}}$ и $artheta_{_{34}}$ (верхний рисунок) и исключенные области для элементов $|U_{\mu}|^2$ и *U_т* |² матрицы смешивания в предположении $\cos^2 \vartheta_{14}$ (нижний рисунок).

Международное сотрудничество

Международные проекты ФИАН

ФИАН активно развивает научные связи с ведущими международными центрами, участвует в международных научных конференциях. Сотрудники ФИАН также непрерывно работают в международных научных проектах ЦЕРН (проекты LHC, CLOUD, COMPASS, SHiP и др.) и отдельных научно-исследовательских институтов Европы (Институт М. Планка, INFN и проч.) и США. Помимо этого, ФИАН является базой для таких крупных международных проектов, как «Гамма-400», «РадиоАстрон», КОРОНА, «XUV Спектроскопия Солнца», «Миллиметрон», «Тянь-Шаньская высокогорная научная станция» и другие. Часть этих проектов в настоящее время находится на стадии проектирования или начального запуска, другая – активной реализации, сопровождающейся интересными, значимыми результатами. О последних и расскажем в данном разделе.

Тянь-Шаньская высокогорная научная станция

В течение последних нескольких лет ФИАН и ряд научных учреждений Республики Казахстан создали базовую основу стратегического научно-образовательного сотрудничества. Новая форма сотрудничества имеет глубокие корни и связана с фундаментальными и прикладными задачами, которые на протяжении более 50 лет успешно решаются на экспериментальном комплексе филиала ФИАН «Тянь-Шаньская высокогорная научная станция» (ТШВНС), расположенном вблизи г. Алматы, Республика Казахстан. На базе ТШВНС учеными обеих стран проводятся уникальные эксперименты в области физики космических лучей, астрофизики и атмосферной физики высоких энергий. Высока и прикладная значимость научных исследований, проводимых на ТШВНС, которые позволяют оценивать и предсказывать природные риски, связанные с воздействием космического излучения на объекты биосферы, грозовую активность, на сейсмоактивность и глобальные климатические процессы.

В рамках Консорциума «Евразийский высокогорный научный центр космических лучей», головным учреждением которого является ФИАН, на ТШВНС создан ряд современных установок, которые постоянно модернизируются и совершенствуются. Наряду с ФИАН в консорциум также входят крупнейшие казахстанские научные и образовательные учреждения: Физико-технический институт, КазНУ имени аль-Фараби и Институт ионосферы. По своей информативности, высокогорному расположению, набору детекторов и созданной за все прошедшие годы инфраструктуре, высокогорный научный комплекс ТШВНС не имеет аналогов в мире. Результаты исследований регулярно публикуются в самых высокорейтинговых международных журналах, что способствует укреплению позиций России и Казахстана в мировом научном сообществе и на мировом рынке наукоемких технологий.

На ТШВНС регулярно проходят производственную практику студенты и аспиранты



Тянь-Шаньская высокогорная научная станция по регистрации частиц космического излучения. Станция расположена на перевале Жусалы-Кезень на высоте 3336 метров Источники изображений: наверху – http://www.nat-geo.ru/photo/1169164/ внизу – http://gotravelto.kz/uploads/obekty/almatinskaya-oblast/kosmostanciya.jpg

Международное сотрудничество

российских и казахстанских высших учебных заведений. Для образовательного процесса привлекаются ведущие ученые, которые проводят лекционные и семинарские занятия. Под их руководством проходит и практическое обучение экспериментальным дисциплинам на базе многочисленных установок, функционирующих на ТШВНС. В 2017 г. (второй год подряд) при поддержке Межгосударственного фонда гуманитарного сотрудничества государств — участников СНГ в г. Алматы проводилась Международная школа молодых ученых «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц

сверхвысоких энергий». Инициатором проведения школы выступал ФИАН, практические занятия проводились на установках ТШВНС. Лекторы и слушатели прибыли в Казахстан из России, Беларуси, Армении, Азербайджана, Кыргызстана, Узбекистана, Таджикистана, Молдовы и Украины. Организаторы прошедшей школы надеются, что ее проведение создаст предпосылки для учреждения правительствами России и Казахстана международного центра, к которому в будущем могут присоединиться научно-образовательные организации стран СНГ, а также дальнего зарубежья.

ЦЕРН—ОЯФА

В 2017 г. продолжались работы по экспериментам ATLAS, NA64, CMS, COMPASS, GBAR, CLOUD. Проводились подготовительные работы для нового эксперимента SHiP.

ATLAS: поддержка функционирования Трекового Детектора Переходного Излучения (TRT); поддержка, оптимизация и развитие программного обеспечения внутреннего детектора; участие в модернизации установки, фаза-I; проведение тестовых измерений на пучках ускорителя по разработке новых детекторов переходного излучения; физический анализ по исследованию распада $W \rightarrow J/\psi + D_c$.

NA64: участие в разработке трековых детекторов на основе тонкостенных пропорциональных камер; компьютерное моделирование процессов образования «темного фотона» при взаимодействии электронов с веществом.

CMS: измерение характеристик процессов с рождением струй в *pp* столкновениях при энергии 13 ТэВ; исследование поведения сечений взаимодействия протонов в широкой области энергий; проведен анализ экспериментальных данных по абсолютной калибровке торцевого адронного калориметра радиоактивным источником Co60; проведена модернизация базы данных калибровочных констант всех подсистем адронного калориметра.

COMPASS: Набор данных по глубоко не-

Международное сотрудничество

162

Международное сотрудничество

165

упругому рассеянию пучка поляризованных мюонов на поляризованной мишени.

GBAR: выполнялась программа экспериментов по исследованию гравитационных свойств ультрахолодного антиводорода; изучено квантовое отражение ультрахолодных атомов антиводорода от поверхности жидкой гелиевой пленки; получено время жизни антиводорода 1,3 с над поверхностью жидкого ⁴Не и 1,7 с для жидкого ³Не.

CLOUD: получены новые результаты о роли заряженных частиц в атмосферных процессах.

SHIP: проводилось моделирование, конструирование и тестовые испытания прототипа эмульсионного детектора – основного детектирующего элемента нейтринного детектора.

Группа ФИАН участвует в разработке программного пакета Geant4, имеющего статус постоянного проекта ЦЕРН. В настоящее время усилия направлены на реализацию ПП для взаимодействия нейтрино, процессов с частицами темной материи и процессов, выходящих за рамки стандартной модели.



Группа коллаборации GBAR и делегация ФИАН осматривают экспериментальный корпус замедлителя антипротонов (AD), где будут проводиться эксперименты по исследованию антиматерии. Внизу идет строительство установки ELENA для накопления и охлаждения антипротонов. Фотография предоставлена Н. Н. Колачевским.