



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ИМ. А.И. АЛИХАНОВА

ИТЭФ – НАУЧНЫЕ ИТОГИ ГОДА

Сборник аннотаций докладов конференции

«ИТЭФ – научные итоги года»

17-19 декабря 2019 г.



Москва

2020

Программный комитет

Председатель – Егорычев В.Ю., директор НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ;

Заместитель председателя – Голубев А.А., заместитель директора по научным вопросам;

Члены комитета:

Барабаш А.С., начальник лаборатории физики слабых взаимодействий;

Куликов В.В., начальник лаборатории адронной физики;

Рогожкин С.В., начальник отдела атомно-масштабных и ядерно-физических методов исследования материалов ядерной техники;

Трусов М.А., старший научный сотрудник лаборатории теоретической ядерной физики;

Юдин А.В., начальник лаборатории физики плазмы и астрофизики.

Секретариат программного комитета:

Галынская А.М., секретарь лаборатории решеточных калибровочных теорий;

Яковлева А.С., технический редактор отдела научно-технической информации.

Организационный комитет

Председатель – Васильев В.В., ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ;

Заместитель председателя – Иваненко В.А., начальник отдела научно-технической информации;

Секретарь – Яковлева А.С., технический редактор отдела научно-технической информации.

С информацией о конференции можно ознакомиться на:
<http://www.itep.ru/science/conference/konferentsiya-itef-nauchnye-itogigoda.php>.

Сборник аннотаций под редакцией Яковлевой А.С.

Предисловие

С 2018 г. по решению директора НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ В.Ю. Егорычева ежегодно в декабре месяце проводится отчетная конференция «ИТЭФ – научные итоги года», в которой принимают участие сотрудники всех научных подразделений. На конференции представляются доклады, освещающие основные направления деятельности подразделения в текущем году и наиболее значимые результаты. Кроме того, в рамках конференции проводится конкурс научно-исследовательских работ, на который по желанию авторов могут быть представлены их работы. Авторы лучших работ награждаются почетными грамотами и денежными премиями.

Программа конференции и аннотации докладов дают ежегодный обзор деятельности Института, очерчивают спектр актуальных научных тематик.

В 2019 г. возрастной диапазон докладчиков варьировался от 25 до 95 лет, научный статус – от аспиранта до члена-корреспондента Российской академии наук. Отмечен интерес слушателей ко всему диапазону тематики – от физики низких энергий и химии радиационных процессов до результатов экспериментов на Большом адронном коллайдере. Результаты конкурса научно-исследовательских работ представлены в заключительном разделе сборника.

Содержание

Предисловие	3
Содержание.....	4
Работы группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в эксперименте ALICE на БАК в 2019 году (Акиндинов А.В.)	8
Эксперимент ДАНСС – поиск стерильных нейтрино и не только (Алексеев И.Г.)	11
Термодинамика кварк-глюонной плазмы при конечной плотности в сильном магнитном поле (Абрамчук Р.А., Андрейчиков М.А., Лукашов М.С., Симонов Ю.А., Хайдуков З.В)	13
Разработка и создание низкотемпературных сцинтилляционных болометров для поиска и изучения процессов двойного бета-распада (Барабаш А.С., Коновалов С.И., Юматов В.И.).....	17
Проблемы динамики сверхновых, смоделированные в численном и лабораторном экспериментах (Блинников С.И., Глазырин С.И., Голубев А.А., Юдин А.В.)	22
Некоторые результаты лаборатории решеточных калибровочных теорий, полученные в 2019 году (Брагута В.В.)	24
Обзор основных направлений работы реакторного отдела в 2019 году (Герасимов А.С., Легостаев В.О., Медников И.В., Селиверстов В.В.).....	25
О состоянии исследований Т-нечетных эффектов в делении ядер поляризованными нейтронами (Данилян Г.В., Копач Ю.Н., Новицкий В.В.)	27
Теория спиновой накачки в бислойных пленках Fm/NM (Джепаров Ф.С., Станкевич К.Л.).....	29
Лаборатория радиационных процессов: научные итоги 2019 года (Долголенко А.Г.).....	33
Поиск оптимального состава пластичных смазок на основе литола и солидола с мезогенными присадками с применением метода диэлектрической спектроскопии (Акопова О.Б. ³ , Ельникова Л.В. ¹ , Пономаренко А.Т. ² , Терентьев В.В. ⁴ , Шевченко В.Г. ²)	37

Долгоживущие заряженные частицы в столкновениях протонов на БАК (Высоцкий М.И., Годунов С.И., Жемчужов Е.В., Новиков В.А., Розанов А.Н.).....	40
Новый результат эксперимента ЕХО-200 по поиску $0\nu\beta\beta$ ^{136}Xe (Белов В.А. ¹ , Данилов М.В. ² , Долголенко А.Г. ³ , Зельдович О.Я. ¹ , Карелин А.К. ¹ , Кученков А.В. ¹ , Стеханов В.Н. ⁴)	44
Исследования лаборатории физики высокой плотности энергии в веществе при воздействии интенсивных ионных пучков (Канцырев А.В.).....	47
Лаборатория ядерных реакций при промежуточных энергиях: научные итоги 2019 года (Киселев Ю.Т., Парьев Э.Я., Погорелко О.И., Полянский А.Ю.).....	51
Эксперименты РЭД-100 и COHERENT (CsI[Na]) по исследованию упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре (Акимов Д.Ю., Белов В.А. ¹ , Коваленко А.Г., Козлова Е.С., Коновалов А.М., Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Симаков Г.Е.).....	54
Работы лаборатории физики сверхплотной барионной материи по современным экспериментам (Акиндинов А.В., Голубков Д.Ю., Зайцев Ю.М., Королько И.Е., Прокудин М.С., Семенников А.И.)	56
Кварковый конденсатный механизм качелей для массы нейтрино (Бабич А., Коваленко С.Г., Криворученко М.И., Шимковиц Ф.Ф.).....	57
Разработка атомно-зондового томографа ПАЗЛ-3D с фемтосекундным лазерным испарением (Алеев А.А., Корчуганова О.А., Лукьянчук А.А., Никитин А.А., Разницын О.А., Рогожкин С.В., Хомич А.А., Хорошилов В.В., А.С. Шутов)	60
Фрагментация ионов железа и участие в проекте NICA (Мартемьянов М.А.)...	63
Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели на Большом адронном коллайдере (Абдуллин С.К., Власов Е.В., Гаврилов В.Б., Жокин А.С., Лычковская Н.В., Никитенко А.Н., Попов В.П., Поздняков И.Ю., Сафронов Г.Б., Спиридонов А.А., Степеннов А.Д., Томс М.Д., Эпштейн В.Ш.)	65
Разработка методики метрологического обеспечения испытательного стенда для проведения испытаний радиоэлектронных изделий на стойкость к воздействию тяжелых ионов высокой энергии (Батяев В.Ф. ² , Берлянд А.В. ³ , Берлянд В.А. ³ , Бобровский Д.В. ⁵ , Бутенко А.В. ¹ , Кулевой Т.В. ² , Павлов К.В. ² , Пешич М.П. ⁷ , Рогов В.И. ² , Сабуров В.О. ⁶ , Соболевский Н.М. ⁴ ,	

Соловьев А.Н. ⁶ , Сыресин Е.М. ¹ , Титаренко А.Ю. ² , Титаренко Ю.Е. ² , Тютюнников С.И. ¹ , Чумаков А.И. ⁵).....	67
Зависимость распространенности ядер, образующихся в r -процессе, от модели β -распада (Панов И.В.)	69
Простая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа IIР (Блинников С.И., Поташов М.Ш., Юдин А.В.)	72
Томографические атомно-зондовые исследования перспективных конструкционных материалов (Богачев А.А., Залужный А.Г., Искандаров Н.А., Лукьянчук А.А., Никитин А.А., Разницын О.А., Рогожкин С.В., Хомич А.А., Хорошилов В.В., Шутов А.С.).....	74
Анализ данных с жидкоаргонового детектора CENNS-10 в эксперименте по регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и исследование сцинтилляционных свойств жидкого аргона с примесью ксенона (Акимов Д.Ю., Белов В.А. ¹ , Козлова Е.С., Коновалов А.М., Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Симаков Г.Е.).....	76
Результаты работ по гранту РФФИ «Топологические теории поля и теории струн» в 2019 году (Слепцов А.В.).....	79
Обработка экспериментальных данных и результаты моделирования калориметров ZDC и ECAL BM@N на ускорительном комплексе NUCLOTRON-NICA (Ставинский А.В.).....	83
Изучение методом позитронной аннигиляционной спектроскопии процессов отжига радиационно-индуцированных дефектов в вольфраме, облученном протонами с энергией 21.6 МэВ (Боков А.В., Бяков В.М., Дубов Л.Ю., Ельникова Л.В., Илюхина О.В., Козлов А.В., Огородникова О.В., Селезнев Д.Н., Степанов С.В., Столбунов В.С., Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В.).....	85
Неабелева аномалия в переходных форм-факторах η , η' при разных виртуальностях фотона (Клопот Я.Н. ² , Оганесян А.Г. ^{1,2} , Теряев О.В. ² , Хлебцов С.П. ¹).....	89
Работы группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИГЭФ в эксперименте АТЛАС на БАК в 2019 году (Гаврилюк А.А., Горбунов П.А., Мордовец И.П., Рамакоти Е.Н., Цукерман И.И., Шаманов В.В., Шаталов П.Б.).....	91
Результаты работы отдела медицинской физики (Кленов Г.И., Хорошков В.С., Черных А.Н.)	93

Построение самосогласованных моделей карликовой галактики-спутника Млечного Пути в созвездии Печь (Блинников С.И., Щелканова Г.А.).....	95
Заключение	98

Работы группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в эксперименте ALICE на БАК в 2019 году

Акиндинов А.В.

Заместитель директора по научной работе по международным проектам

Аннотация

Представлен краткий отчет о результатах деятельности группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в эксперименте ALICE на БАК в 2019 г.

Проведены работы по замене детектора TOF, в частности демонтаж и обратный монтаж после улучшения более 80% блоков питания 72 крейтов.

В рамках программы улучшения системы считывания детектора TOF был проведен полный демонтаж крейт-контроллеров системы считывания детектора TOF, начата работа по монтажу улучшенных крейт-контроллеров DRM2 и линий съема информации на основе оптических волокон.

В 2019 г. было продолжено изучение масс и ширины короткоживущих адронных резонансов. Был проведен анализ сдвига массы резонанса $K^*(892)^0$ в столкновениях $p + p$ при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ как в обычных (minimum-bias) столкновениях, так и с триггером на высокую множественность. Сигнал можно описать с табличной шириной резонанса. Виден сдвиг массы $K^*(892)^0 \sim 7$ МэВ, в сторону меньших, по сравнению с табличными, значений в области малых поперечных импульсов резонанса.

Впервые проведён анализ сдвига массы $\rho(770)^0$ резонанса в столкновениях $p + p$ при энергиях $\sqrt{s} = 5.02$ ТэВ и $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Модель фитирования сигнала включала вклады от K^0_S , K^{*0} , ω , $\rho(770)^0$, $f_0(980)$, $f_2(1270)$ и комбинаторного фона. Форма сигнала от каждого из резонансов $\rho(770)^0$, $f_0(980)$ и $f_2(1270)$ описывалась тремя множителями: релятивистским Брейт – Вигнером, фазовым фактором PS и эффективностью, зависящей от инвариантной массы. Сигнал можно описать с табличными ширинами резонансов $\rho(770)^0$, $f_0(980)$ и $f_2(1270)$. Однако для массы $\rho(770)^0$ виден сдвиг ~ 10 МэВ.

В 2019 г. реализованы две задачи по изучению сильного взаимодействия методами фемтоскопии. В первой изучались Кр-взаимодействия в pp -столкновениях при трёх различных энергиях столкновения. Во второй впервые были измерены ЛК-корреляции в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ.

В области каон-гиперонной фемтоскопии впервые были измерены ЛК-корреляции в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Фемтоскопические радиусы R_{inv} , λ -параметры и параметры рассеяния были получены из анализа одномерных корреляционных функций. Параметры рассеяния для пар ЛК во всех трех комбинациях зарядов каонов (ΛK^+ , ΛK^- и ΛK^0_S) были измерены впервые. Обнаружены принципиальные различия в ΛK^+ , ΛK^- и ΛK^0_S корреляционных функциях, которые отражаются в уникальных наборах параметров рассеяния для каждой из пар. Извлечённые параметры рассеяния указывают на то, что природа сильных взаимодействий для ΛK^+ является отталкивающей, в то время как для ΛK^- и ΛK^0_S взаимодействие оказалось притягивающим.

В 2019 г. на площадке НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ была проведена закончена сборка 85 сцинтилляционных детекторов модуля, а на площадке ЦЕРН сборка несущей рамы модуля усовершенствованного детектора АККОРД. Также подготовлен доработанный вариант главы в готовящийся LoI, посвященный моделированию выделения сигналов от кваркониев.

Эксперимент ДАНСС – поиск стерильных нейтрино и не только

Алексеев И.Г.

Лаборатория поляризационных исследований (305)

Аннотация

Детектор реакторных антинейтрино ДАНСС (совместный проект НИЦ «Курчатовский институт» – ИГЭФ и ОИЯИ) расположен на подвижной платформе под промышленным реактором Калининской атомной станции. Реактор обладает тепловой мощностью 3.1 ГВт и создает в области детектора поток антинейтрино до $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$. Чувствительный объем детектора составляет кубический метр пластикового сцинтиллятора, собранный из 2500 стрипов с двойным считыванием с помощью кремниевых фотоумножителей и обычных фотоэлектронных умножителей (группами по 50). Расположение детектора обеспечивает, с одной стороны, большой поток нейтрино, а, с другой стороны, защиту в 50 м водного эквивалента, в результате получается высокая скорость счета событий обратного бета-распада при фоне от космических мюонов менее 2%. Все это позволяет достигнуть точности 1.5% измерения мощности реактора за два дня. Подвижная платформа дает возможность перемещать детектор в диапазоне 10.7–12.7 м (центр детектора – центр горения). Это обеспечивает возможность измерить изменение спектра реакторных антинейтрино с расстоянием с помощью одного и того же детектора и полностью устранить систематику, связанную с неопределенностями моделей спектра

реакторных антинейтрино и приборной неэффективностью.

В докладе представлен текущий статус эксперимента, результаты по поиску стерильного нейтрино в области $\Delta m^2 \sim 1$ эВ² и данные по наблюдению за мощностью реактора. Область исключения, полученная в данном эксперименте, представлена на рисунке 1.

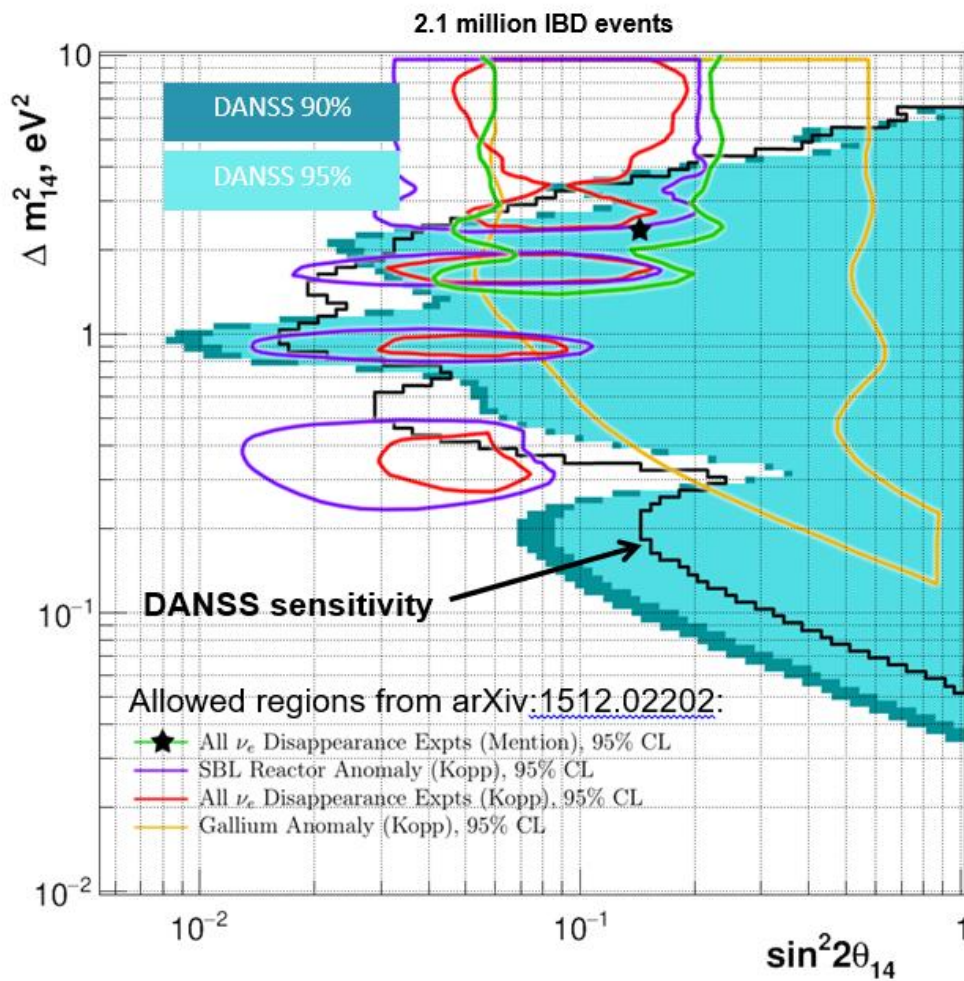


Рис. 1. Область исключения, полученная в настоящем эксперименте на основе анализа 2.1 млн. событий обратного бета-распада, в сравнении с областями вероятного существования осцилляций

Термодинамика кварк-глюонной плазмы при конечной плотности в сильном магнитном поле

Абрамчук Р.А., Андрейчиков М.А., Лукашов М.С., Симонов Ю.А.,
Хайдуков З.В.

Лаборатория теоретической ядерной физики (190)

Аннотация

В данном цикле работ были вычислены основные термодинамические характеристики кварк-глюонной плазмы — уравнение состояния, масштабная аномалия и скорость звука. Для расчетов использовался метод вакуумных корреляторов (МВК), разрабатываемый в лаборатории 190, с помощью которого была сформулирована непертурбативная квантовая хромодинамика (КХД) при конечной температуре. Оказалось, что качественно непертурбативные КХД-эффекты в кварк-глюонной плазме (КГП) могут быть описаны с помощью двух величин — магнитной дебаевской массы и линии Полякова, которые определяются величинами цветомагнитного и цветоэлектрического корреляторов соответственно. Метод МВК позволил просуммировать полученный ряд по мацубаровским частотам и получить аналитическое выражение для уравнения состояния КГП при конечной плотности [1]. Исследование аналитической структуры полученного уравнения состояния при комплексном химпотенциале позволило вычислить положение сингулярностей Роберге — Вейсса (рисунок 1). В [2] было показано, что увеличение магнитного поля приводит к аналогичному

изменению уравнения состояния, возникающему при росте магнитной дебаевской массы с температурой и при росте барионного химического потенциала (рисунок 2). В [3] исследовались величина масштабной аномалии и скорость звука в КГП при конечной плотности (рисунки 3, 5). Было показано, что производные термодинамические характеристики демонстрируют гладкое поведение вблизи точки фазового перехода конфайнмент-деконфайнмент, что соответствует сценарию гладкого фазового перехода (кроссовер) и отсутствию критической точки на диаграмме КХД. В работах [1, 3] наблюдалось существенное влияние магнитной дебаевской массы на динамику КГП – оказалось, что при асимптотически больших температурах уравнение состояния КГП не стремится к Стефан – Больцмановскому пределу, а отличается от него на константу, определяемую растущей магнитной дебаевской массой. В работе [4] на основании подходов, использованных в [1, 2, 3], было получено аналитическое выражение для уравнения состояния и магнитные восприимчивости КГП в магнитном поле для любого значения химического потенциала (рисунок 4). Все аналитические результаты для давления, масштабной аномалии и скорости звука, полученные в работах [1, 2, 3, 4], показали хорошее согласие с решеточными вычислениями в области нулевого химического потенциала.

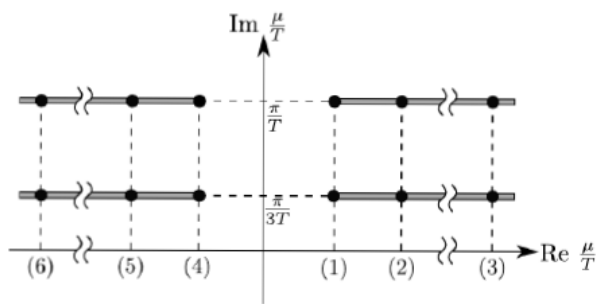


Рис. 1

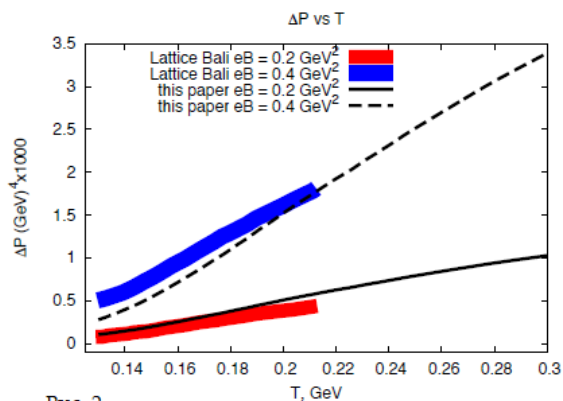


Рис. 2

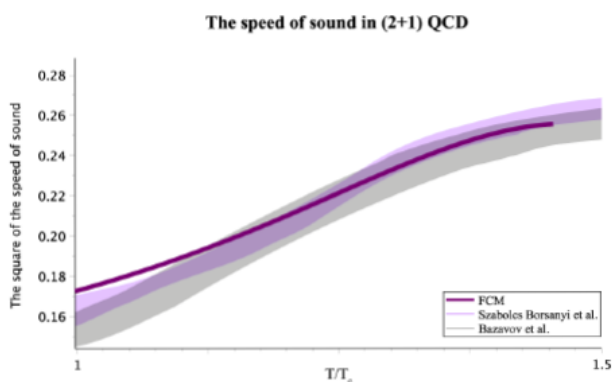


Рис. 3

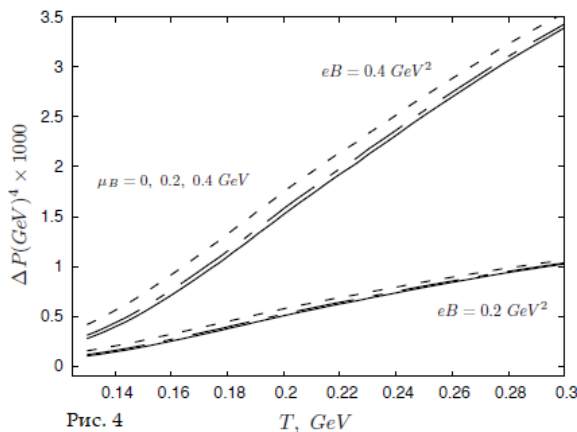


Рис. 4

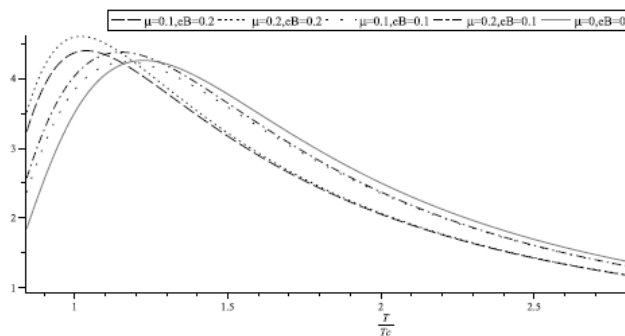


Рис. 5

Рис. 1 – Структура уравнения состояния КГП в комплексной плоскости химпотенциала. Положения точек (1)-(6) определяются значением магнитной дебаевской массы. Мнимые значения обусловлены фазой линии Полякова

Рис. 2 – Уравнение состояния КГП в магнитном поле в сравнении с решетками

Рис. 3 – Зависимость скорости звука в КГП от T в сравнении с решетками

Рис. 4 – Уравнение состояния КГП при конечном химпотенциале в магнитном поле

Рис. 5 – Зависимость величины масштабной аномалии от температуры и барионного химического потенциала

Литература:

- [1] M.A. Andreichikov, M.S. Lukashov, Yu.A. Simonov. Nonperturbative quark-gluon thermodynamics at finite density. *Int. J. Mod. Phys. A* **33**, 8, 1850043 (2018).
- [2] M.A. Andreichikov, Yu.A. Simonov. Nonperturbative QCD thermodynamics in the external magnetic field. *Eur. Phys. J. C* **78**, 420 (2018).
- [3] Z.V. Khaidukov, Yu.A. Simonov. Thermodynamics of a quark-gluon plasma at finite baryon density. *Phys. Rev. D* **100**, 076009 (2019).
- [4] R.A. Abramchuk, M.A. Andreichikov, Z.V. Khaidukov, Yu.A. Simonov. Dense quark-gluon plasma in strong magnetic fields. *Eur. Phys. J. C* **79**: 1040 (2019).

Разработка и создание низкотемпературных сцинтилляционных болометров для поиска и изучения процессов двойного бета-распада

Барабаш А.С., Коновалов С.И., Юматов В.И.

Лаборатория физики слабых взаимодействий (214)

Аннотация

Интерес к безнейтринному двойному бета-распаду существенно возрос в последние 15-20 лет, когда из анализа результатов с атмосферными, солнечными, ускорительными и реакторными нейтрино было сделано заключение о существовании нейтринных осцилляций, что позволило сделать вывод о наличии у нейтрино массы. Эксперименты по поиску 2β -распада способны дать важную информацию об абсолютной шкале масс и типе иерархии нейтрино, дать ответ на вопрос о природе массы нейтрино (дираковская или майорановская) и дать информацию о CP-нарушении в лептонном секторе. В связи с этим проводится большое количество экспериментов, направленных на поиск и регистрацию этого процесса. Одним из лучших современных экспериментов является эксперимент CUORE, который проводится в Гран-Сассо (Италия). В этом эксперименте исследуется 750 кг кристаллов TeO_2 в режиме низкотемпературного болометра. Основным недостатком эксперимента является высокий уровень фона (в основном от альфа-частиц). Эксперимент следующего поколения CUPID планирует использовать всю существующую инфраструктуру эксперимента

CUORE, но при этом планируется использовать сцинтилляционные болометры вместо просто болометров. Это позволит существенно уменьшить уровень фона и исследовать разные ядра-кандидаты на двойной бета-распад. Возможными кандидатами являются ^{130}Te , ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{116}Cd . В рамках эксперимента CUPID была поставлена задача создать сцинтилляционные болометры, содержащие эти изотопы, изучить свойства таких детекторов, выбрать лучшие детекторы, наладить их производство и создать рабочие прототипы.

Настоящий цикл работ представляет результаты, полученные в рамках коллабораций LUMINEU/LUCINEU и CUPID-Mo, которые включают в себя группы из НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, ИНХ СО РАН (Новосибирск), IN2P3/CNRS (Франция), INFN (Италия) и ИЯИ (Украина). Приведем далее основные результаты.

Разработана технология производства кристаллов $^{116}\text{CdWO}_4$, $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$, $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ из обогащенных материалов (и с минимальными потерями изотопа).

Впервые кристаллы $^{116}\text{CdWO}_4$, $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$, $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ испытаны в режиме низкотемпературных болометров.

Впервые применена процедура перекристаллизации для очистки кристаллов от радиоактивных примесей. Продемонстрирована эффективность данной процедуры для уменьшения содержания радиоактивных примесей (фактор $\sim 3-10$).

Исследованы основные свойства низкотемпературных болометров на основе кристаллов $^{116}\text{CdWO}_4$, $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$, $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ (энергетическое разрешение, дискриминация альфа-частиц, собственный радиоактивный фон).

Проведены низкофоновые измерения с детекторами $Zn^{100}MoO_4$ и $Li_2^{100}MoO_4$. С лучшей в мире точностью измерен период полураспада ^{100}Mo по двухнейтринному каналу:

$$T_{1/2} = [6.9 \pm 0.15(\text{стат}) \pm 0.37(\text{сист})] \times 10^{18} \text{ лет.}$$

Этот результат включен в таблицы элементарных частиц, издаваемых Particle Data Group, за 2018 г. Затем было получено новое значение:

$$T_{1/2} = (6.99 \pm 0.15) \times 10^{18} \text{ лет.}$$

Этот результат дает наиболее точное значение для Mo-100 и является одним из лучших в мире (по точности) среди всех исследованных изотопов.

Изготовлено 40 кристаллов $Li_2^{100}MoO_4$. Собран и испытан прототип CUPID-Mo с 20 кристаллами (см. рисунок 1).

Продемонстрировано, что с точки зрения производства кристаллов и основных рабочих характеристик лучшими являются детекторы $Li_2^{100}MoO_4$.

Опция с $Li_2^{100}MoO_4$ в настоящее время рассматривается как № 1 для эксперимента CUPID.

В течение 2019 г. велся набор данных на установке CUPID-Mo, получены первые физические результаты для Mo-100: $T_{1/2}(0\nu) > 3 \times 10^{23}$ лет. Продемонстрирована возможность достижения чувствительности на уровне $\sim 10^{25}$ лет ($\langle m_\nu \rangle \sim 0.1-0.2$ эВ).

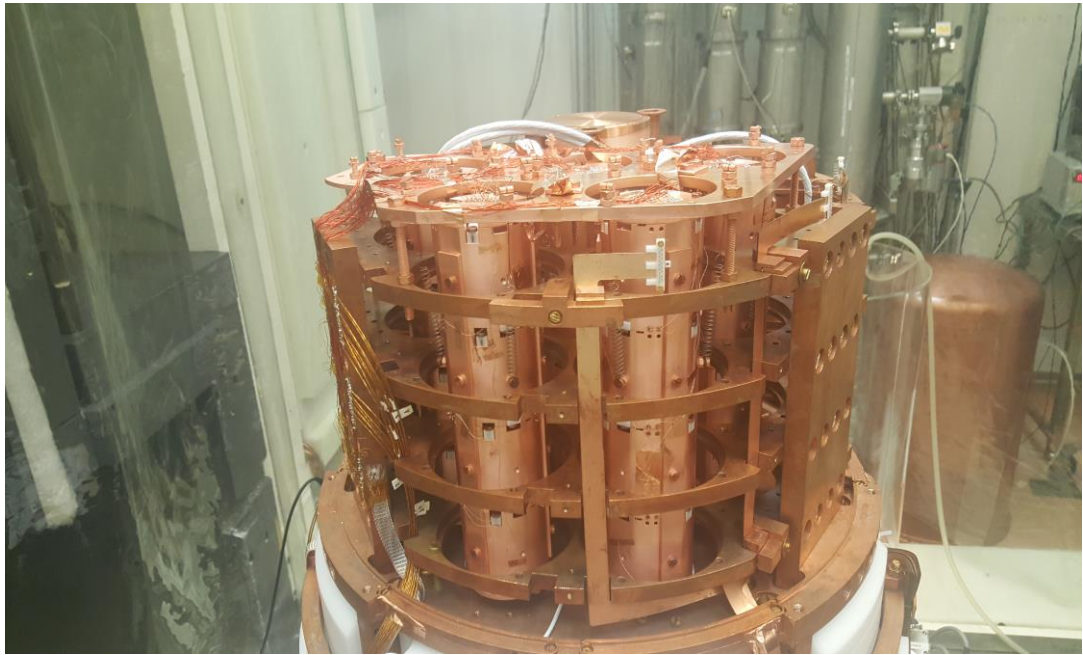


Рис. 1. Установка CUPID-Mo

Результаты опубликованы в следующих работах:

- [1] D.V. Poda et al. CdWO_4 crystal scintillators from enriched isotopes for double beta decay experiments. *Radiation Measurement* **56** (2013), p. 66-69.
- [2] A.S. Barabash et al. Enriched $\text{Zn } ^{100}\text{MoO}_4$ scintillating bolometers to search for $0\nu 2\beta$ decay of ^{100}Mo with the LUMINEU experiment. *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 3133.
- [3] A.S. Barabash et al. First test of an enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ scintillating bolometer for neutrinoless double-beta-decay searches. *Eur. Phys. J. C* **76** (2016) 487.
- [4] A.S. Barabash et al. Improvement of radiopurity level of enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ and ZnWO_4 crystal scintillators by recrystallization. *Nucl. Instr. Meth. A* **833** (2016), p. 77-81.
- [5] E. Armengaud et al. Development of ^{100}Mo -containing scintillating

bolometers for a high-sensitivity neutrinoless double-beta decay search. Eur. Phys. J. C **77** (2017) 785.

[6] E. Armengaud et al. Precise measurement of $2\nu 2\beta$ decay of ^{100}Mo with Li_2MoO_4 low temperature detectors: Preliminary results. AIP Conf. Proc. **2165** (2019) 020005.

[7] E. Armengaud et al. The CUPID-Mo experiment for neutrinoless double-beta decay: performance and prospects. Eur. Phys. J. C **80** (2020) 44.

Проблемы динамики сверхновых, смоделированные в численном и лабораторном экспериментах

Блинников С.И., Глазырин С.И., Голубев А.А., Юдин А.В.

Лаборатория физики плазмы и астрофизики (230)

Аннотация

Недавние эксперименты с сильными взрывчатыми веществами (ВВ) обеспечивают условия, которые позволяют наблюдать гидродинамические течения, подобные тем, что приводят к отскокам ("bounce") при взрывах сверхновых звезд с коллапсом после захвата нейтрино (см. рисунок 1). В этих течениях наблюдаются существенные эффекты неидеальности плазмы в уравнении состояния, качественно схожие с эффектами в сверхновых. Значения удельной энтропии в экспериментах близки к полученным при численном моделировании в процессе коллапса сверхновых. Они намного ниже, чем полученные на лазерных установках, в которых тоже достигают высокую степень сжатия, т. е. лучше воспроизводят условия в сверхновых. Эксперименты с ВВ могут служить полезной тестовой площадкой для астрофизических гидродинамических кодов. Для диагностики при сжатии макроскопических объемов вещества в многослойных установках требуется высокое разрешение для наблюдений за 3D-неустойчивостями. Проблема заключается в металлическом экранировании, которое окружает мишень. Нужно применять источники жесткого рентгеновского излучения (бетатроны), чтобы увидеть детали сжатия такого рода, когда нужно

смотреть на сжатую мишень сквозь стальные оболочки. Протонная рентгенография, развиваемая в проекте FAIR, точно подходит для такого типа экспериментов и может дать лучшее разрешение, чем используемое в настоящее время гамма- и жесткое рентгеновское излучение, создаваемое бетатронами.

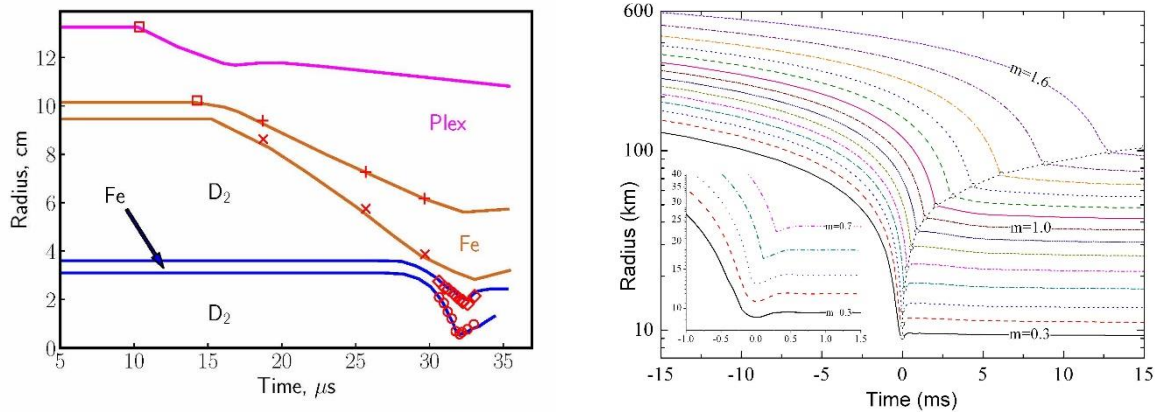


Рис. 1. Слева – профили ударных волн в образце во взрывных экспериментах. Справа – рассчитанные траектории вещества в коллапсирующем ядре сверхновой звезды. Из сравнения данных на левой и правой панелях рисунка становится ясна основная идея работы: предлагаемая аналогия между земными и звёздными процессами

Некоторые результаты лаборатории решеточных калибровочных теорий, полученные в 2019 году

Брагута В.В.

Лаборатория решеточных калибровочных теорий (191)

Аннотация

В докладе представлены некоторые результаты, полученные в лаборатории решеточных калибровочных теорий в 2019 г. В частности, рассмотрены следующие вопросы:

- изучение фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (КХД) при конечной барионной плотности и внешнем магнитном поле;
- изучение КХД-подобных теорий, в которых нет проблемы знака при конечной барионной и изоспиновой плотностях;
- проводимость кварк-глюонной плазмы, которая находится в сильном внешнем магнитном поле;
- изучение теории сильных взаимодействий с ненулевой киральной плотностью.

Обзор основных направлений работы реакторного отдела в 2019 году

Герасимов А.С., Легостаев В.О., Медников И.В., Селиверстов В.В.

Отдел тяжеловодных реакторов (340)

Аннотация

Наиболее значимым направлением работы в 2019 г. продолжает быть комплекс мероприятий по выводу из эксплуатации тяжеловодного реактора. Вывод из эксплуатации начат в 1988 г. Работы проводятся в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 г.». В 2019 г. проводились работы по пункту 5.13 этой программы. К настоящему времени проведены следующие мероприятия:

- проведены работы по лицензированию деятельности в области использования атомной энергии;
- получено положительное заключение государственной экологической экспертизы на материалы обоснования лицензии, дающие право на вывод из эксплуатации.
- пройдена экспертиза безопасности пакета документов на вывод из эксплуатации реактора ТВР.
- были изготовлены и поставлены в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ специализированные средства

технологического оснащения, используемые при выводе из эксплуатации реактора ТВР.

В отделе проводятся работы по разработке методов и программ моделирования параметров ядерных реакторов. На базе комплекса программ TRIFON-SHERATON, имеющего универсальные возможности, первоначально ориентированного в основном на расчеты тяжеловодных реакторов, проведены модельные расчеты элементов активной зоны реактора ВВЭР-440.

Из принципиально новых методов расчета разрабатываются алгоритм и программа двумерного нейтронно-физического расчета ячеек реактора на основе интегрально-дифференциального метода решения уравнения переноса нейтронов. К настоящему времени получен алгоритм численного кинетического решения уравнения переноса нейтронов для двумерной цилиндрической ячейки.

О состоянии исследований Т-нечетных эффектов в делении ядер поляризованными нейтронами

Данилян Г.В., Копач Ю.Н., Новицкий В.В.

Лаборатория нейтронной физики (315)

Аннотация

Более двадцати лет тому назад нами в сотрудничестве с российским и немецким институтами в эксперименте на реакторе ИЛЛ была обнаружена Т-нечетная трехвекторная угловая корреляция в тройном делении ядер поляризованными холодными нейтронами. Оказалось, что α -частицы испускаются асимметрично относительно плоскости, определяемой вектором импульса легкого осколка и псевдовектором спина делящегося ядра. До сих пор обнаруженная корреляция не объяснена корректно. Это происходит из-за сложности процесса тройного деления ядер, усугубляемой тем, что при делении ядер s -нейтронами когерентно возбуждаются конкурирующие спиновые каналы $J + 1/2$ и $J - 1/2$, и деление происходит из смешанного по спину состояния. Избежать этой неоднозначности можно только поставив эксперимент с возбуждением изолированного нейтронного резонанса. Такую возможность предоставляет ядро-мишень ^{235}U , в сечении деления которого имеется изолированный резонанс при энергии нейтронов 1.14 эВ. На реакторе FRM II (Гархинг, Германия) имеется подходящий инструмент, однако максимальная энергия пучка нейтронов ограничена энергией 0.3 эВ. Нами была предложена реконструкция системы вывода пучка, и разработан в деталях новый коллиматор-вставка, позволяющий использовать нейтронные пучки с

энергией до 1.5 эВ. После завершения реконструкции на этом инструменте будет поставлен эксперимент по измерению трехвекторной корреляции при делении ядер ^{235}U поляризованными нейтронами с энергией 1.14 эВ. На рисунке 1 представлена группа, которая ставит эксперименты в Гархинге (Германия).

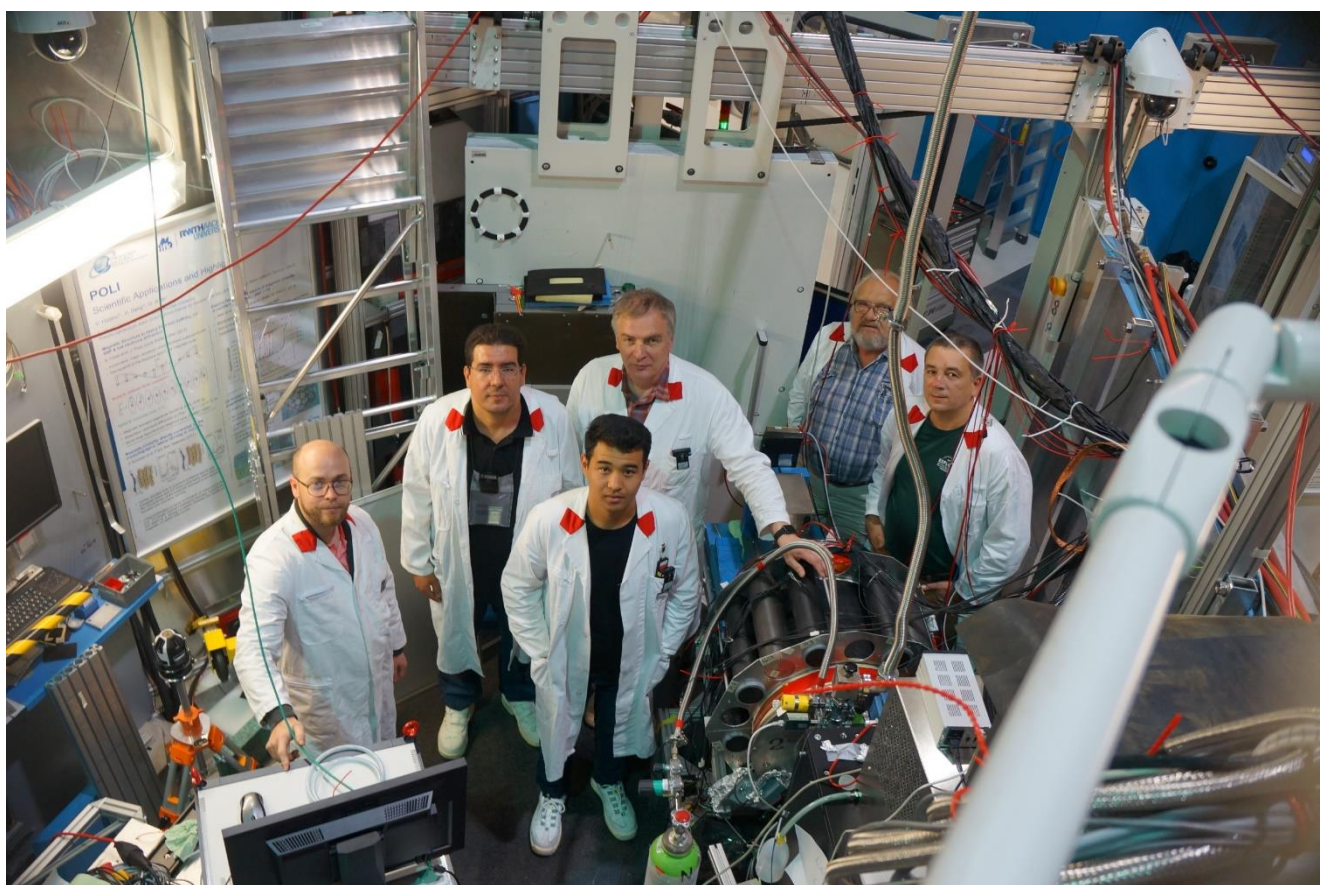


Рис. 1. Группа, ставящая эксперименты в г. Гархинг (Германия)

Теория спиновой накачки в бислойных пленках Fm/NM

Джепаров Ф.С., Станкевич К.Л.

Лаборатория нейтронной физики (315)

Аннотация

Ферромагнитный резонанс в двухслойных структурах, образованных пленками ферромагнетик (Fm)/нормальный металл (NM), приводит к эффекту спиновой накачки, при котором прецессирующие электроны ферромагнетика в условиях магнитного резонанса инжектируют спиновую поляризацию в пленку нормального металла и наводят в ней спиновый ток. Первоначально эффект был описан в формализме, предназначенном для описания мезоскопических явлений в квазиодномерных системах [1], и было продекларировано удовлетворительное согласие теории и эксперимента несмотря на то, что рассматриваемые структуры не квазиодномерны. Более поздние построения [2, 3] тоже недостаточно просты и наглядны. В данной работе, основываясь на стандартной феноменологии движения намагниченности в ферромагнетике, мы строим теорию спиновой накачки в случае металлического ферромагнетика, направленную на выяснение зависимости наведенного спинового тока от намагниченности ферромагнетика. Важность исследования этой зависимости была указана в работе [4].

Исходим из предположения, что а) в ферромагнетике в условиях ферромагнитного резонанса (ФМР) устанавливается квазиравновесие между локализованными ферромагнитными электронами и

электронами проводимости, характеризуемое векторным полем локальной намагниченности $\mathbf{M}(x,t)$, и б) пространственный перенос намагниченности происходит за счет спиновой диффузии и спиновых волн. Образец состоит из металлической пленки Fm (с толщиной d_F) и прижатой к ней пленки нормального металла с толщиной d_M . Плоскость общей границы пленок совпадает с плоскостью zy , статическое поле \mathbf{H}_0 направлено по оси z , переменное поле $\mathbf{H}_1(t)$ лежит в плоскости xy , а возникающий спиновый ток направлен по оси x . В соответствии с симметрией задачи намагниченность зависит только от координаты x .

Уравнение движения для намагниченности ферромагнетика имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M} = -[\mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega}_{eff}] + \frac{\alpha}{M} [\mathbf{M} \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M}] - \frac{\mathbf{M}}{MT_0} (M - M_0) + D_F \nabla_x^2 \mathbf{M}. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\Omega}_{eff} = \gamma \mathbf{H}_{eff} = \gamma (\mathbf{H} + f \nabla_x^2 \mathbf{M}) = \boldsymbol{\Omega} + \gamma f \nabla_x^2 \mathbf{M}$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1(t)$, слагаемое $f \nabla_x^2 \mathbf{M}$ учитывает вклад энергии неоднородности, γ – гиромагнитное отношение, α – релаксационная константа Ландау – Лифшица – Гильберта, T_0 – время релаксации для модуля намагниченности, а D_F – коэффициент спиновой диффузии для Fm. На границе с вакуумом (при $x = -d_F$) поток намагниченности равен нулю, а на границе с NM (при $x = 0$) он совпадает с потоком в NM (см. ниже), поэтому:

$$D_F \nabla_x \mathbf{M}(x = -d_F) + \gamma f [\nabla_x \mathbf{M}(x = -d_F) \times \mathbf{M}(x = -d_F)] = 0, \quad (2)$$

$$D_F \nabla_x \mathbf{M}(x = 0) + \gamma f [\nabla_x \mathbf{M}(x = 0) \times \mathbf{M}(x = 0)] = D_N \nabla_x \mathbf{m}_N(x = 0). \quad (3)$$

В нормальном металле ларморовские частоты малы в сравнении со скоростью блоховской релаксации κ . Поэтому отклонение $\Delta \mathbf{m}_N(t, x)$ намагниченности нормального металла от ее равновесного значения

описывается уравнением

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \kappa - D_N \nabla_x^2\right) \Delta \mathbf{m}_N(t, x) = 0, \quad (4)$$

где D_N – коэффициент спиновой диффузии в NM. Граничные условия:

$$\Delta \mathbf{m}_N(t, x=0) = q(\mathbf{M}(x=0, t) - \mathbf{e}_z M_0), \quad \nabla_x \mathbf{m}_N(t, x=d_N) = 0. \quad (5)$$

Они учитывают, что значение $\Delta \mathbf{m}_N(t, x=0)$ (и связанный с ним спиновый ток в NM) обусловлено отклонением $\Delta \mathbf{M}(x=0, t) = \mathbf{M}(x=0, t) - \mathbf{e}_z M_0$ намагниченности электронов проводимости ферромагнетика $\mathbf{M}(x=0, t)$ от ее равновесного значения $\mathbf{e}_z M_0$. При этом непрерывно в $\Delta \mathbf{m}_N(t, x=0)$ переходит только доля q от $\Delta \mathbf{M}(x=0, t)$, обусловленная вкладом электронов проводимости в Fm.

Получены и проанализированы решения этих уравнений в условиях ФМР. В случае достаточно медленного переноса намагниченности в Fm, в нем должны возбуждаться спиновые волны, что проявится в существенном отклонении наблюдаемой формы линии ФМР от ее стандартной лоренцевской формы. Полученная зависимость спинового тока в NM от намагниченности Fm качественно согласуется с результатами [4].

Литература

- [1] Y. Tserkovnyak et al. Nonlocal magnetization dynamics in ferromagnetic heterostructures. Rev. Mod. Phys. **77**, 1375 (2005).
- [2] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator. Nature, **464**, 262 (2010).

- [3] S.M. Rezende, R.L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo. Magnetic relaxation due to spin pumping in thick ferromagnetic films in contact with normal metals. *Phys. Rev. B* **88**, 014404, (2013).
- [4] V.A. Atsarkin et al. Temperature dependence of pure spin current and spin-mixing conductance in the ferromagnetic–normal metal structure. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 245002 (2018).

Долголенко А.Г.

Лаборатория радиационных процессов (112)

Аннотация

В докладе представлено описание исследований свойств элементарных частиц и резонансов в экспериментах с фиксированной мишенью на ускорителях низких энергий, проводимых с участием сотрудников лаборатории. На ускорителе COSY (Юлих, Германия) с использованием установки WASA проведено исследование рождения изотензорного дибариона D_{21} с $I(J^P)=2(1^+)$ в квазисвободной $pp \rightarrow ppp + p^-$ реакции, образующейся в pd -столкновениях при $T_p = 1,2$ ГэВ [1]; осуществлен поиск связанного состояния η -мезона и ядра ${}^3\text{He}$ в pd -взаимодействиях протонов в интервале импульсов протонов 1.426–1.635 ГэВ/с; с целью изучения трехнуклонной динамики dp -столкновений измерены дифференциальные сечения реакции распада дейтрона ${}^1\text{H}(d, pp) n$ при энергии пучка дейтронов 340 МэВ. На электронном ускорителе TJLab (США) продолжается эксперимент PrimEx-D с целью прецизионного измерения ширины двухфотонного распада η -мезона; в экспериментах PrimEx-I, II осуществлено высокоточное измерение сечения комптоновского рассеяния фотонов в области энергий 5 ГэВ [2]; с использованием установки GlueX измерено сечение эксклюзивной реакции $\gamma p \rightarrow J/\psi p$ на пучке фотонов с энергией около порога реакции [3], и в эксперименте PRad измерены сечения упругого ep -рассеяния в

зависимости от переданного импульса, также определен зарядовый радиус протона [4]. С использованием снимков пузырьковой камеры ДИАНА, полученных на ускорителе У-10 НИЦ «Курчатовский институт – ИТЭФ», продолжается набор статистического материала (поиск, отбор и измерения событий) для исследования взаимодействий K^+ и K^- - мезонов с ядрами ксенона. В рамках проекта ФАИР с целью создания водородной корпускулярной мишени для эксперимента PANDA на установке «Действующий макет корпускулярной мишени в НИЦ «Курчатовский институт – ИТЭФ» (рисунок 1) проводятся методические исследования и разработки. С участием сотрудников лаборатории в 2019 году опубликовано 9 научных работ в ведущих физических журналах и 3 работы в виде препринтов. Результаты исследований представлены в 9 докладах на международных и российских конференциях. В лаборатории есть грант РФФИ № 18-02-00938.

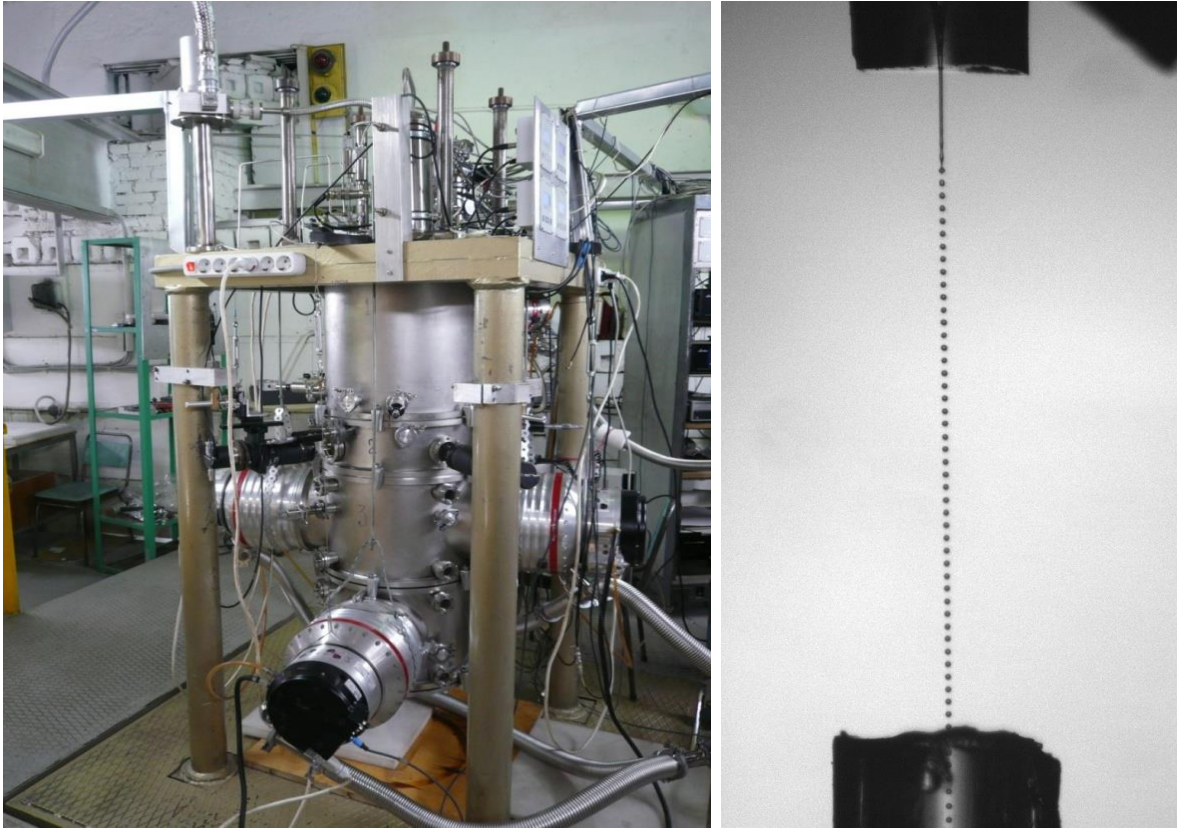


Рис. 1. Действующий макет корпускулярной мишени в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ. Слева – криостат мишени в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ. Справа – монодисперсный распад струи жидкого водорода

Литература

- [1] P. Adlarson et al. (WASA-at-COSY Collaboration). Examination of the production of an isotensor dibaryon in the $pp \rightarrow ppp + \pi^-$ reaction. Phys. Rev. C **99** (2019) 025201.
- [2] P. Ambrozewicz et al. (PrimEx Collaboration). High Precision Measurement of Compton Scattering in the 5 GeV region. Phys. Lett. B **797** (2019) 4884.

- [3] A. Ali et al. First Measurement of Near-Threshold J/ψ Exclusive Photoproduction off the Proton. (GlueX Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 072001.
- [4] W. Xiong et al. (PRad Collab.). A small proton charge radius from an electron-proton scattering experiment. *Nature* **575** (2019), 147–150.

Поиск оптимального состава пластичных смазок на основе литола и солидола с мезогенными присадками с применением метода диэлектрической спектроскопии

Акопова О.Б.³, Ельникова Л.В.¹, Пономаренко А.Т.², Терентьев В.В.⁴,
Шевченко В.Г.²

¹Лаборатория физической химии НИЦ «Курчатовский институт» –
ИТЭФ (322),

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН, Москва, РФ;

³Ивановский государственный университет, Иваново, РФ;

⁴Ивановская государственная сельскохозяйственная академия, Иваново, РФ

Аннотация

Для повышения износостойкости деталей машин в промышленности и сельском хозяйстве применяются разнообразные синтетические смазки с мезогенными присадками. Известно, что добавление присадки мезоморфных гомологов карбоксилата меди (II) $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_9\text{COO})_2$ (КМ), валерата и изовалерата меди (II) в базовую смазку Литол-24 или солидол, приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа деталей машин. Лиотропное жидкокристаллическое фазообразование смазочных композиций (СК) Литол-24/ $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_9\text{COO})_2$ и синтетический солидол/ $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_9\text{COO})_2$ нами исследовано методом диэлектрической спектроскопии для концентраций присадок 1, 5, 10, 20 масс. % обеих конформаций КМ. Получены частотные зависимости диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности (см.

рисунок 1), тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$, температурные и концентрационные зависимости электрических величин при использовании измерительного электрического поля в диапазоне частот 100 Гц–1 МГц и при нагреве от комнатной температуры до температур плавления базовых смазок. Обнаружено влияние конформации присадки (валерат или изовалерат) на $\text{tg}\delta$ и мезоморфизм. В результате анализа диаграмм Коул – Коула найдены энергии активации смазок на основе Литола-24 при 1 и 5 масс. % КМ ($\sim 1,12$ и $1,07$ эВ) и времена релаксации $\sim 0,1$ мс. При этом в пользу аргументации наличия фазового перехода при изменении концентрации КМ наблюдалась смена типа проводимости и два типа релаксационных процессов. По трибологическим свойствам наиболее оптимальным составом рекомендуется СК с содержанием присадок 5–10 масс. %.

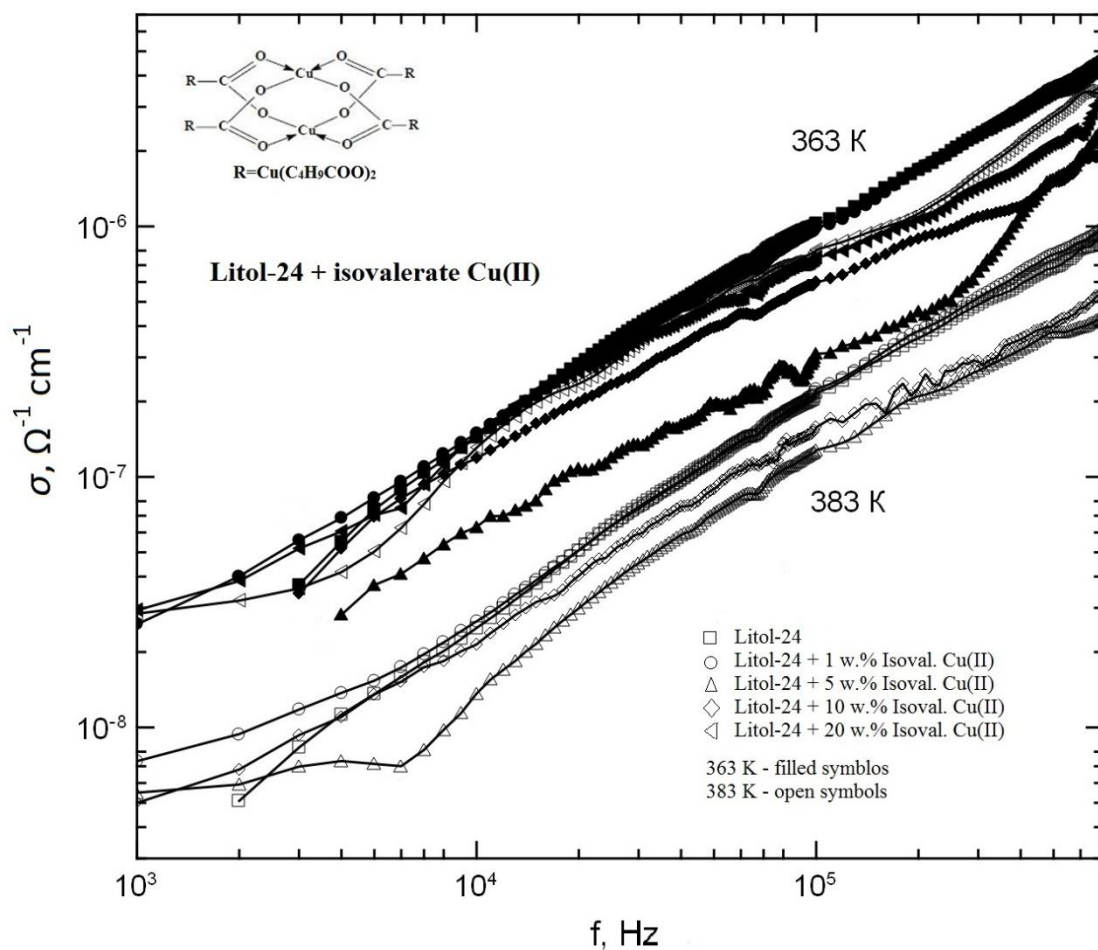


Рис. 1. Частотная зависимость удельной электропроводности для смазочной композиции Литол-24-изовалерат меди (II) при температурах 363 К и 383 К

Долгоживущие заряженные частицы в столкновениях протонов на БАК

Высоцкий М.И., Годунов С.И., Жемчугов Е.В., Новиков В.А.,
Розанов А.Н.

Лаборатория теории сильных взаимодействий (160)

Аннотация

В ультрапериферических столкновениях сталкивающиеся частицы проходят на некотором расстоянии друг от друга и сталкиваются своими электромагнитными полями. При этом сами частицы остаются целыми и могут быть зарегистрированы в специальных передних детекторах. Такие столкновения хорошо описываются приближением эквивалентных фотонов, в котором электромагнитное поле ультрарелятивистской частицы заменяется на набор почти реальных фотонов, распределённых по известному спектру. Таким образом, Большой адронный коллайдер можно рассматривать как фотон-фотонный коллайдер, в котором фотоны рождаются в ультрапериферических столкновениях протонов или тяжёлых ионов.

Так как в ультрапериферических столкновениях подавлена интерференция между обменом фотоном и обменом Z -бозоном, а также гипотетическими нейтральными бозонами (хиггсино, Z' , ...), сечение рождения пары частиц в ультрапериферических столкновениях зависит только от двух модельных параметров: заряда и массы рождающихся частиц. Поэтому ультрапериферические столкновения позволяют поставить модельно-независимые

ограничения на массы гипотетических новых заряженных частиц, в отличие от обычных (инклюзивных) столкновений, в которых ограничения получаются модельно-зависимые.

В некоторых моделях появляются заряженные частицы, которые могут жить достаточно долго, чтобы вылететь из детектора. К примеру, такими будут легчайшие чарджино в некоторых суперсимметричных теориях с малой разницей масс между легчайшими нейтралино и чарджино. При рождении пары таких чарджино в конечном состоянии будет всего четыре частицы: исходные протоны или ионы и сами чарджино. Протоны могут быть зарегистрированы в передних детекторах, а чарджино оставят в центральном детекторе трек, подобный треку от мюона, по которому можно измерить его импульс. В этом случае можно восстановить полную кинематику системы и измерить массу родившихся заряженных частиц. Этот подход можно рассматривать как дополнительный к обычному поиску новых заряженных частиц по их потерям на ионизацию вещества и времени пролёта через детектор. Результаты моделирования измерения массы для чарджино с массой 100 ГэВ с учётом фона от рождающихся мюонов приведены на рисунке 1. На рисунке 2 показаны массы и времена жизни чарджино, которые могут быть открыты в имеющихся данных БАК.

Подробное изложение можно найти в работе [arXiv:1906.08568](https://arxiv.org/abs/1906.08568).

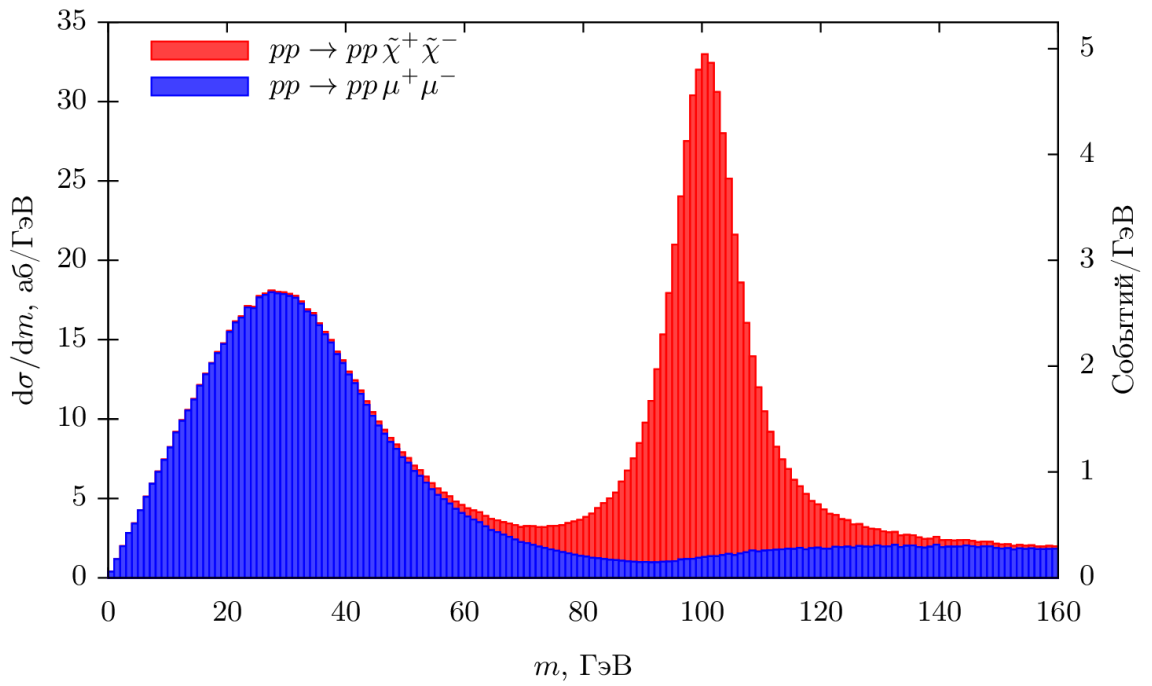


Рис. 1. Результаты моделирования измерения массы долгоживущих заряженных частиц

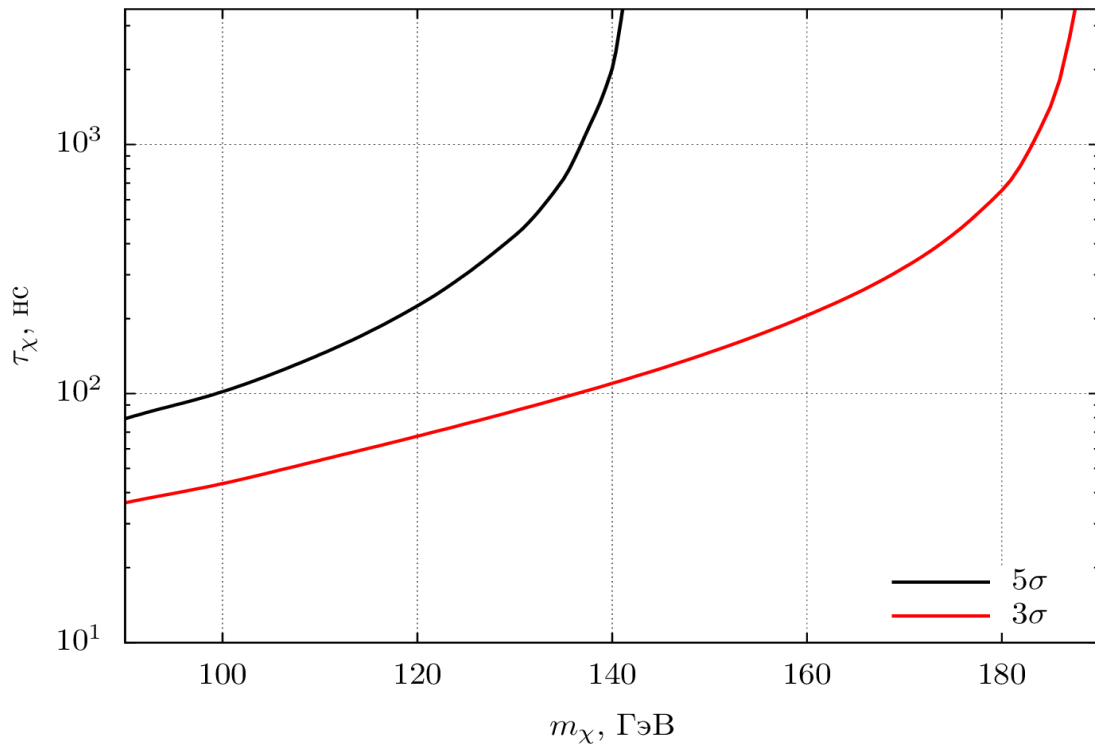


Рис. 2. Области (масса, среднее время жизни) долгоживущих заряженных частиц, при которых они могут быть обнаружены на БАК с различным уровнем достоверности

Новый результат эксперимента ЕХО-200 по поиску $0\nu\beta\beta$ ^{136}Xe

Белов В.А.¹, Данилов М.В.², Долголенко А.Г.³, Зельдович О.Я.¹,
Карелин А.К.¹, Кученков А.В.¹, Стеханов В.Н.⁴

¹Лаборатория физики сильных взаимодействий (201),

²ФИАН,

³Лаборатория радиационных процессов (112),

⁴Лаборатория сцинтилляционных методов регистрации частиц (205)

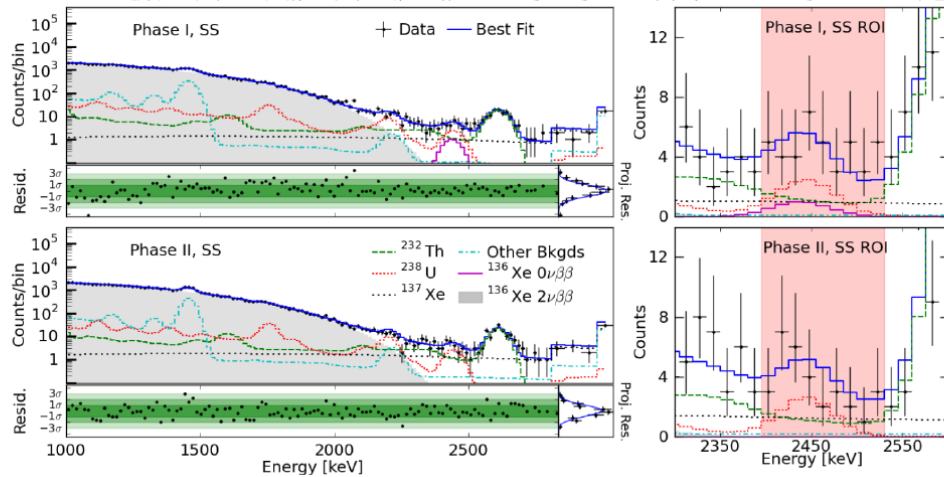
Аннотация

Эксперимент ЕХО-200 по поиску безнейтринного двойного бета-распада ^{136}Xe закончил набирать статистику в конце 2018 г. Детектором служила время-проекционная камера (“time projection chamber”, ТРС) на жидком ксеноне. Использовался большой образец (200 кг) ксенона, обогащенного до 80% изотопом ^{136}Xe . Обработаны данные двух фаз эксперимента, набранные за 1180 дней живого времени. Энергетическое разрешение детектора на энергии $0\nu\beta\beta$ -перехода ^{136}Xe ($Q = 2475$ кэВ) было улучшено с $\sigma / E = 1,23\%$ до $\sigma / E = (1,15 \pm 0,02) \%$ для второй фазы в результате проведенных мероприятий в ТРС-детекторе и анализе. Впервые в эксперименте по поиску безнейтринного распада использовались методы глубокой нейронной сети (“deep neural network”, DNN) для выделения сигнала из массива фоновых событий. Включение DNN-дискриминатора позволило увеличить чувствительность на 25% по сравнению с обычной обработкой ЕХО-200. Были сделаны дополнительные улучшения в анализе. Увеличена эффективность к $0\nu\beta\beta$ -распаду – с 80% до 97%. Введено 2D-ограничение на отношение

сцинтилляционного сигнала к ионизационному. Комбинируя данные нового анализа двух фаз эксперимента, определена чувствительность на период полураспада по безнейтринному каналу $T(0\nu\beta\beta) > 5,0 \cdot 10^{25}$ лет (CL 90%) для полной экспозиции 234,1 кг-лет по ^{136}Xe . Результаты отдельного анализа фоновых спектров двух фаз эксперимента представлены на рисунке 1. Статистически значимый сигнал $0\nu\beta\beta$ -распада не наблюдался. Получен предел на период полураспада по безнейтринному каналу $T(0\nu\beta\beta) > 3,5 \times 10^{25}$ лет (CL 90%), и установлено ограничение на эффективную массу майорановского нейтрино ($m_{\beta\beta} < 93\text{--}286$ мэВ). Результат находится на уровне лучших мировых данных и опубликован (G. Anton, et al. (EXO-200 collaboration). "Search for Neutrinoless Double-Beta Decay with the Complete EXO-200 Dataset", Phys. Rev. Lett., **123**, 161802 (2019)).

EXO-200 Best-fit Result

arXiv: 1906.02723



Background contribution to $Q \pm 2\sigma$

(counts)	^{238}U	^{232}Th	^{137}Xe	Total	Data
Phase I	12.6	10.0	8.7	32.3 ± 2.3	39
Phase II	12.0	8.2	9.3	30.9 ± 2.4	26

Рис. 1. Результаты анализа фоновых спектров двух фаз эксперимента

**Исследования лаборатории физики высокой плотности энергии в
веществе при воздействии интенсивных ионных пучков
(итоги 2019 года)**

Канцырев А.В.

*Лаборатория физики высокой плотности энергии в веществе при
воздействии интенсивных ионных пучков (118)*

Аннотация

Лаборатория проводит экспериментальные и теоретические исследования физических процессов, возникающих при взаимодействии интенсивных ионных пучков с веществом, исследования экстремального состояния вещества при сверхвысоких давлениях и температурах, разрабатывает новые методики диагностики параметров вещества при высокой плотности энергии с использованием высокоэнергетичных протонных пучков, лазерного или рентгеновского излучения.

В рамках участия НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в международном проекте FAIR сотрудники лаборатории участвуют в подготовке нескольких экспериментов:

- разработка и запуск новой установки PRIOR-II, которая будет размещаться на ускорителях SIS-18 и SIS-100 проекта FAIR. Ведутся работы по полномасштабному численному Монте-Карло моделированию предстоящих протонно-радиографических экспериментов со статическими и

динамическими мишенями, отрабатываются методики реконструкции объемной плотности и томографической реконструкции структуры мишеней;

- разработка автоматизированных систем управления и сбора данных для экспериментов НИИХ и PRIOR-II коллаборации HED@FAIR/APPA, системы управления и диагностики мишенной установкой “pellet target” коллаборации PANDA;
- в 2019 г. на ускорителе UNILAC и лазере PHELIX в GSI (Германия) проводились эксперименты и численное моделирование, нацеленные на разработку рентгеновских методов диагностики экстремального состояния вещества в будущем эксперименте НИИХ проекта FAIR. На рисунке 1 приведено полученное на лазерной установке PHELIX рентгенографическое изображение тестового объекта – часы. На рисунке 2 приведена фотография сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ совместно с коллегами по эксперименту. На лазере PHELIX при плотности потока излучения $\sim 10^{19-20}$ Вт/см² проводились эксперименты по совершенствованию режимов лазерного ускорения электронов в мишенях на основе пены триацетата целлюлозы, в которых зарегистрированная максимальная энергия электронов составила ~ 80 МэВ. Экспериментальная мишенная камера и система регистрации лазерной плазмы показаны на рисунке 3.



Рис. 1. Фотография и пример рентгенографического изображения
тестового объекта – часы



Рис. 2. Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ
совместно с коллегами в экспериментальном зале лазера PHELIX в GSI
(Германия)



Рис. 3. Мишенная камера и система регистрации лазерной плазмы

На базе ускорителя ТИПр в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и UNILAC в GSI проводятся исследования торможения пучков тяжелых ионов в плазменных мишенях. В 2019 г. в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ проведен эксперимент по исследованию взаимодействия пучка ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м. в водородной газоразрядной плазме. Разрабатываются численные методы моделирования плазменных процессов. На технической базе в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ выполняются экспериментальные работы по исследованию режимов генерации Z-pinch плазменного разряда при инициации интенсивным электронным пучком.

Лаборатория ядерных реакций при промежуточных энергиях: научные итоги 2019 года

Киселев Ю.Т., Парьев Э.Я., Погорелко О.И., Полянский А.Ю.

Лаборатория ядерных реакций при промежуточных энергиях (212)

Аннотация

В 2019 г. основным направлением работы лаборатории ядерных реакций при промежуточных энергиях было изучение эффектов модификации гиперонов в ядерной материи. Согласно современным представлениям модификация свойств адронов в сильно взаимодействующей среде связана с частичным восстановлением киральной симметрии квантовой хромодинамики (КХД) в плотной и (или) горячей барионной материи. В сотрудничестве с Институтом ядерной физики исследовательского центра г. Юлих (Германия) закончена обработка данных по образованию пар $K^+\Lambda(1116)$ протонами с энергией 2.83 ГэВ на ядрах углерода, меди, серебра и золота, полученных на установке ANKE. Количественная оценка наблюдаемого увеличения ширины $\Lambda(1116)$ гиперона находится в стадии уточнения.

Планируется продолжение этих исследований в рамках международного проекта FAIR на установке HADES в Германии. В 2019 г. на митингах коллаборации HADES было представлено два предложения по извлечению новой физической информации из уже имеющихся данных. Первое – определение ширины Γ тяжелого гиперона $\Lambda(1520)$, образованного пучком пионов на ядерных

мишенях. Теория предсказывает пятикратное увеличение ширины при нормальной ядерной плотности по сравнению с шириной этого гиперона в свободном пространстве. Пунктирные стрелки на рисунке 1 иллюстрируют метод определения ширины путем сравнения экспериментальных сечений с расчетами, проведенными в рамках развитой нами модели спектральной функции. Первая оценка величины предсказанного эффекта ожидается в 2020 г.

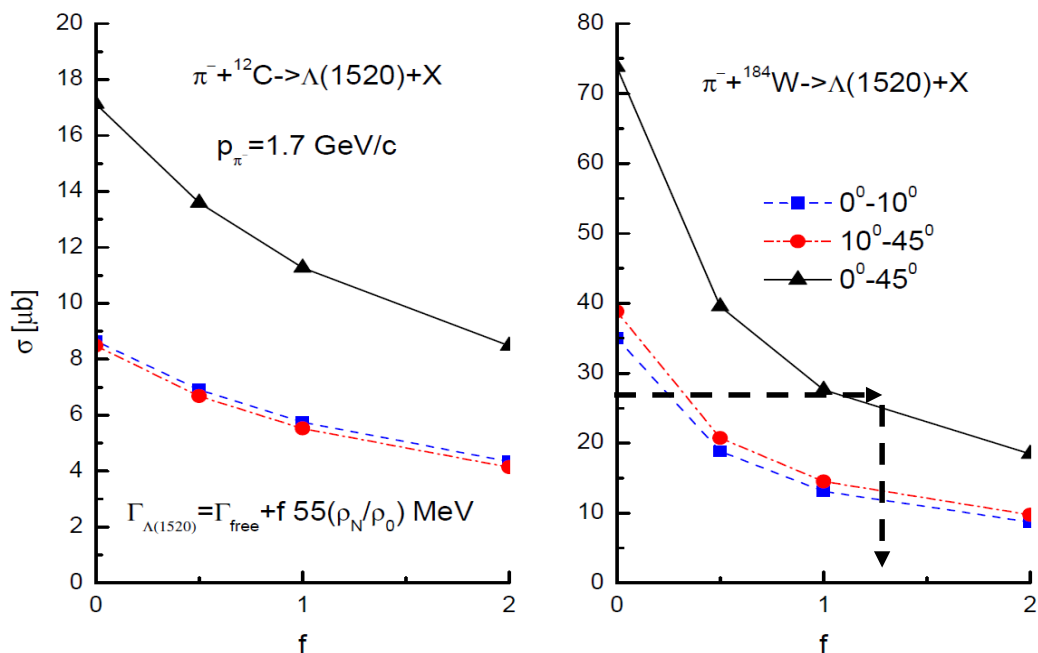


Рис.1. Зависимость полных сечений образования $\Lambda(1520)$ гиперонов π^- мезонами с импульсом 1.7 ГэВ/с на ядрах углерода и вольфрама от их ширины Γ в ядерной среде с нормальной плотностью (сплошная кривая). Горизонтальная шкала соответствует изменению Γ от 15.6 МэВ/с² (0) до 125.6 МэВ/с² (2)

Второе предложение состояло в использовании большой статистики (1.3×10^{10} событий), набранной в Au+Au взаимодействиях,

и было направлено на исследование процессов образования странных адронов за пределами кинематики столкновений ядерных нуклонов с нормальными ферми-импульсами. Ожидаемые результаты дадут новую информацию о природе короткодействующих нуклонных корреляций, ответственных за рождение частиц в кинематически запрещенной области, и структуре ядерной материи на малых межнуклонных расстояниях.

В лаборатории имени Т. Джефферсона (США) сотрудники лаборатории 212 участвовали в интерпретации данных четырех экспериментов на установке CLAS-12, в которых исследовались свойства короткодействующих нуклонных корреляций в электрон-ядерных реакциях. В 2019 г. в реферируемых журналах было опубликовано 11 статей.

Эксперименты РЭД-100 и COHERENT (CsI[Na]) по исследованию упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре

Акимов Д.Ю., Белов В.А.¹, Коваленко А.Г., Козлова Е.С.,
Коновалов А.М., Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Симаков Г.Е.

*Лаборатория развития сцинтилляционных методов регистрации частиц
(205)*

¹*Лаборатория сильных взаимодействий (201)*

Аннотация

Анализ экспериментальных данных лабораторных испытаний двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100 (изображен на рисунке 1) показал успешность применения технических решений – электронного затвора и блокировки фотоумножителей на время прохождения мюонов – для обеспечения работы детектора в условиях значительного фона от космических мюонов. Было достигнуто рекордное для детекторов данного типа время жизни свободных электронов в жидком ксеноне. Был исследован основной технологический фон детектора – шум от спонтанных одиночных электронов, вызванный прохождением космических мюонов, и было показано, что в условиях работы на атомной станции, где поток мюонов уменьшен за счет значительной экранировки конструктивными элементами станции, условия работы приемлемы для регистрации процесса упругого когерентного рассеяния антинейтрино на атомном ядре.

В докладе также представлен статус обработки экспериментальных данных, полученных установкой CsI[Na] на SNS Окриджской Национальной Лаборатории, США (коллаборация COHERENT) в период с 2017 по 2019 гг., а также результаты работы над уточнением величины сцинтилляционного выхода кристалла CsI[Na] для ядер отдачи.

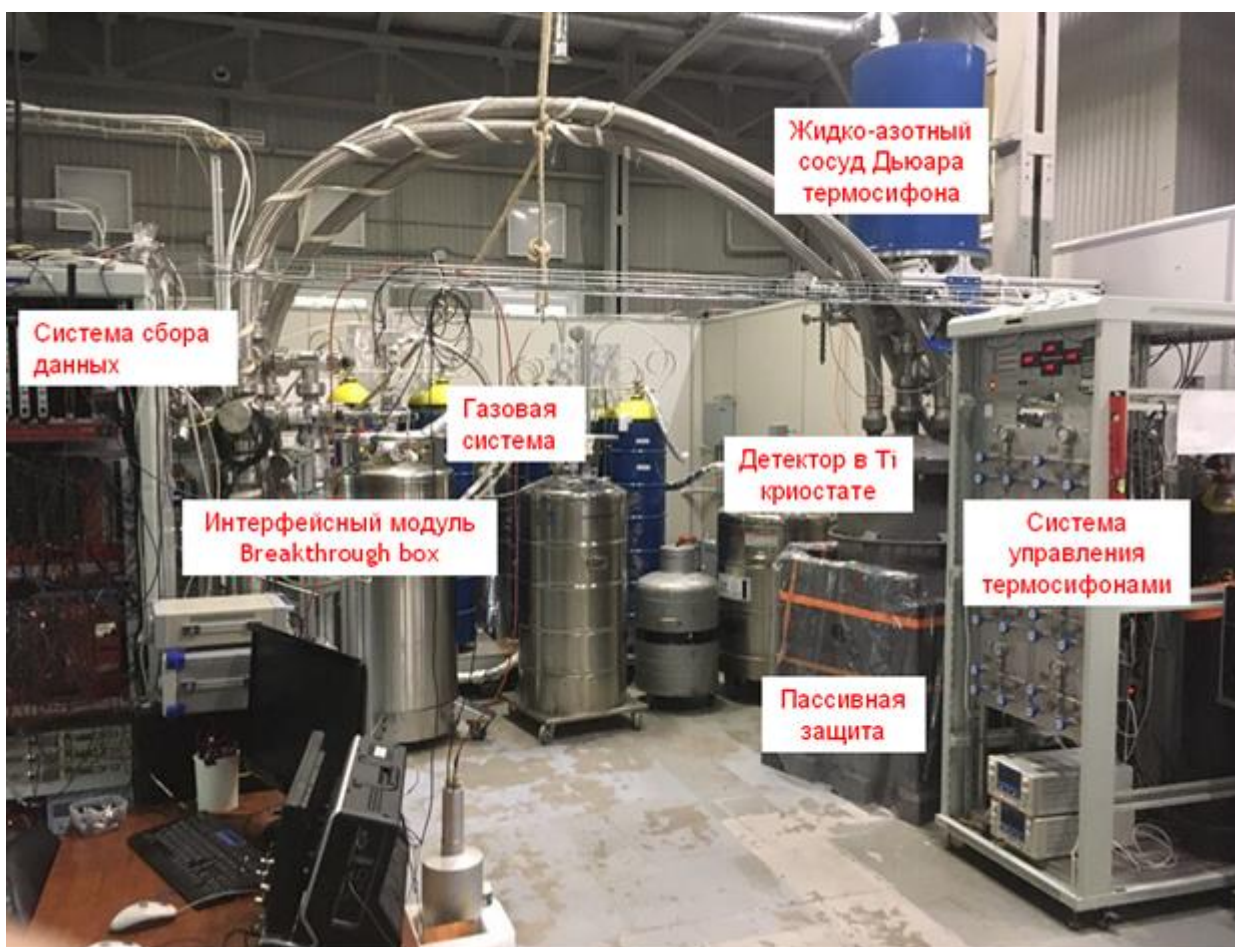


Рис.1. Установка РЭД-100

Работы лаборатории физики сверхплотной барионной материи по современным экспериментам

Акиндинов А.В., Голубков Д.Ю., Зайцев Ю.М., Королько И.Е.,
Прокудин М.С., Семенников А.И.

Лаборатория физики сверхплотной барионной материи (032)

Аннотация

В нашем докладе представлены работы, проводимые сотрудниками лаборатории № 032 по экспериментам СВМ (“Compressed Baryonic Matter”), SHIP (“Search for Hidden Particles”) и ЛНСб.

В эксперименте СВМ сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ участвуют в:

- разработке и строительстве электромагнитного калориметра;
- разработке и строительстве центральной части времяпролетной системы;
- разработке нового поколения программного обеспечения;
- поддержке ИТ-инфраструктуры для российских участников ФАИР.

Кварковый конденсатный механизм качелей для массы нейтрино

Бабич А., Коваленко С.Г., Криворученко М.И., Шимковиц Ф.Ф.

Лаборатория теории элементарных частиц (180)

Аннотация

Рассмотрен механизм генерации майорановской массы нейтрино за счет спонтанного нарушения киральной симметрии. Эффект кваркового конденсата передается в нейтринный сектор через нарушающие сохранение полного лептонного числа (LNV) лептон-кварковые операторы размерности $d = 7$, которые ранее рассматривались в литературе в качестве возможного источника безнейтринного двойного бета-распада $(0\nu\beta\beta)$, не связанного с обменом легким майорановским нейтрино:

$$O_7 = \frac{\sqrt{2}g_{\alpha\beta}}{\Lambda^3} \bar{L}^c_{\alpha} L_{\beta} H [(\bar{Q}u_R), (\bar{d}_R Q)],$$

где L и Q — лептонные и кварковые дублеты, H — скаляр Хиггса, u_R и d_R — правые компоненты нестранных кварков, $g_{\alpha\beta} \sim 1$ — константы связи, Λ — масштаб LNV. Малость массовой матрицы нейтрино

$$m_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta} \frac{v \langle \bar{q}q \rangle}{\Lambda^3},$$

где $v = \sqrt{2}\langle H \rangle$, возникает из-за отличия Λ от масштаба нарушения киральной симметрии. Рассмотренная схема представляет собой новую реализацию механизма «качелей», которую мы называем кварковыми конденсатными качелями (QCSS). Показано, что доминирование QCSS требует мягко нарушенной симметрии, подавляющей оператор Вайнберга. В QCSS u - и d -кварки получают токовые массы на (много-)петлевом уровне, и малость масс нейтрино связана с малостью токовых масс u - и d -кварков. Рассмотрены следствия QCSS для $0\nu\beta\beta$ -распада с учетом эффектов ядерной материи. Для двух типов диаграмм, представленных на рисунке 1, показано, что естественная реализация QCSS ведет к нормальному упорядочению масс нейтрино в узком диапазоне диагональных масс. Приводится пример реализации QCSS с симметрией Z_4 , которая обеспечивает указанные особенности спектра.

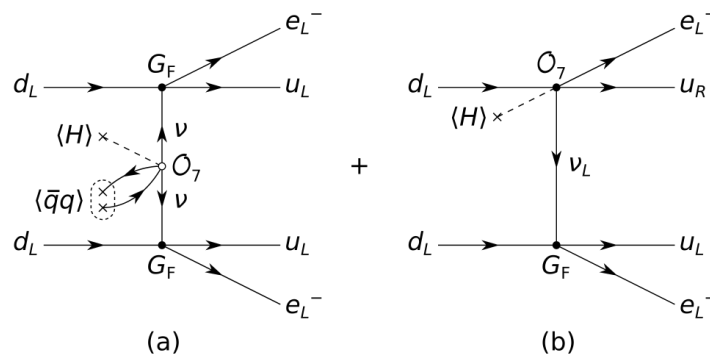


Рис. 1. Два типа диаграмм, описывающих вклад эффективного оператора O_7 в амплитуду $0\nu\beta\beta$ -распада. На диаграмме (a) распад вызван обменом майорановским нейтрино, масса которого определяется вакуумным средним поля Хиггса и кварковым конденсатом. В механизме (b) распад идет через вершину O_7 , связанную пропагатором нейтрино со слабой вершиной

Литература

- [1] A. Babič, S. G. Kovalenko, M. I. Krivoruchenko and F. Šimkovic. Quark Condensate Seesaw Mechanism for Neutrino Mass. arXiv: 1911.12189 [hep-ph].
- [2] A. Babič, S. Kovalenko, M. I. Krivoruchenko and F. Šimkovic. On the generation of Majorana neutrino mass via quark condensate. AIP Conf. Proc. **2165**, 020001 (2019).

Разработка атомно-зондового томографа ПАЗЛ-3D с фемтосекундным лазерным испарением

Алеев А.А., Корчуганова О.А., Лукьянчук А.А., Никитин А.А.,
Разницын О.А., Рогожкин С.В., Хомич А.А., Хорошилов В.В.,
А.С. Шутов

*Лаборатория атомно-масштабных исследований
конденсированных сред (321)*

Аннотация

Атомно-зондовая томография является одним из наиболее эффективных прямых методов определения пространственных распределений химических элементов в различных материалах. Контроль трехмерного распределения химических элементов с точностью, близкой к нескольким ангстремам, актуален для разработки новых конструкционных материалов. В России атомно-зондовые исследования проводятся только в организациях НИЦ «Курчатовский институт». Значительная часть этих исследований посвящена изучению наноструктуры реакторных материалов. Для повышения эффективности, расширения возможностей и круга решаемых задач в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ был разработан, собран и запущен прототип атомно-зондового томографа с лазерным испарением (ПАЗЛ-3D) (внешний вид представлен на рисунке 1). Данный прибор является многокомпонентным, высокотехнологичным устройством, включающим вакуумные камеры, в которых поддерживается высокий и сверхвысокий вакуум, использующим современную быстродействующую детектирующую

систему ионов, а также мощную лазерную систему с импульсами фемтосекундной длительности.

Также был создан уникальный комплекс программного обеспечения «КВАНТМ-3D», позволяющий расшифровывать и визуализировать данные, полученные на приборе. Таким образом, в настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ разработана и собрана уникальная научная установка ПАЗЛ-3D по исследованию nano-структуры и распределения химических элементов на масштабах от 1 до 100 нанометров. Разработаны и апробированы методики проведения исследования различных материалов. Продемонстрированы возможности установки по исследованию перспективных материалов для различных областей применения.



Рис. 1. Внешний вид установки атомно-зондовой томографии с фемтосекундным лазерным испарением (ПАЗЛ-3D)

Фрагментация ионов железа и участие в проекте NICA

Мартемьянов М.А.

Лаборатория адронной физики (301)

Аннотация

Кратко освещаются два направления исследований, проводимых в лаборатории 301: изучение фрагментации ядер на данных установки ФРАГМ, набранных на тяжелоионном ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН (импульсные спектры фрагментов приведены на рисунке 1) и участие в международном проекте MPD-NICA, реализуемом в ОИЯИ. По первому направлению будут представлены новые данные по фрагментации ионов железа при 230 МэВ/нуклон, где впервые на эксперименте наблюдается расщепление фрагментационных пиков для легких ионов. По второму направлению представлены результаты работы по разработке программ моделирования для электромагнитного калориметра детектора MPD.

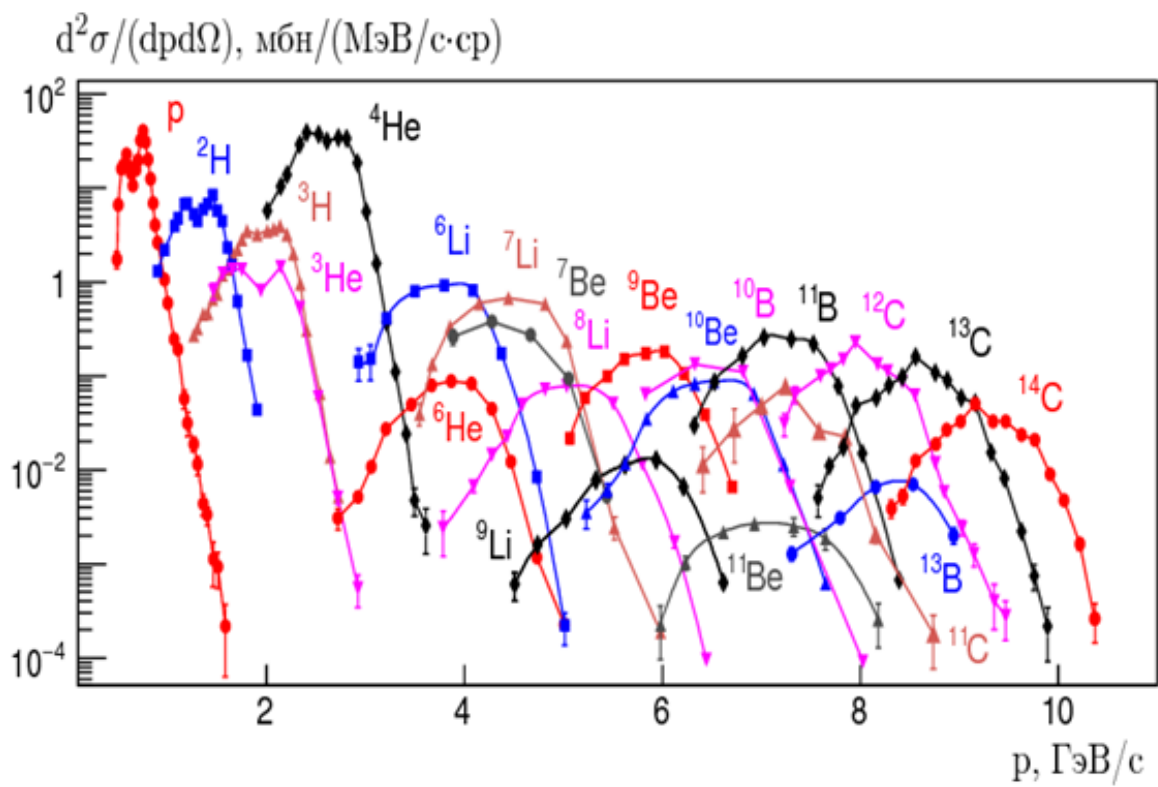


Рис. 1. Импульсные спектры фрагментов при фрагментации ионов железа, полученные в эксперименте ФРАГМ

Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели на Большом адронном коллайдере

Абдуллин С.К., Власов Е.В., Гаврилов В.Б., Жокин А.С.,
Лычковская Н.В., Никитенко А.Н., Попов В.П., Поздняков И.Ю.,
Сафронов Г.Б., Спиридонов А.А., Степеннов А.Д., Томс М.Д.,
Эпштейн В.Ш.

Лаборатория экспериментальной ядерной физики высоких энергий (211)

Аннотация

Мотивация работ связана с растущим интересом к поискам Новой физики за пределами Стандартной модели. Представлены поиски Новой физики в Хиггсовском секторе, которые проводились на ЛHC на установке CMS при энергиях протон-протонных столкновений 7, 8 и 13 ТэВ. Были проведены поиски дополнительных бозонов Хиггса с массами как больше, так и меньше массы h -бозона (125 ГэВ) в модах распада $\mu\mu$, $\tau\tau$, hh (для нейтральных бозонов) и $t^+\nu$ (для заряженного бозона). Энергии и интенсивности протон-протонных взаимодействий, доступные на ЛHC, позволили существенно расширить область поиска в пространстве параметров рассматриваемых моделей по сравнению с предыдущими экспериментами на LEP и Tevatron. Открытие бозона Хиггса h с массой 125 ГэВ на ЛHC позволило впервые провести поиск его нестандартных распадов. Искались моды распада h -бозона, $h \rightarrow \phi_1\phi_1$ (ϕ_1 обозначает легкий псевдоскалярный или скалярный бозон Хиггса) и $h \rightarrow invisible$ (невидимая мода распада на частицы темной материи).

Полученные результаты существенно ограничили пространство свободных параметров в моделях Новой физики. Это позволило

скорректировать программу дальнейших поисков дополнительных бозонов Хиггса и нестандартных распадов h -бозона при энергии 14 ТэВ и большей светимости (HL-LHC). Методы отбора событий, измерения фона и выделения потенциального сигнала, разработанные в диссертации А.Н. Никитенко «Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели на Большом адронном коллайдере», будут применены для дальнейших поисков на HL-LHC.

Результаты поиска заряженного бозона Хиггса позволили сделать вывод о том, что открытый бозон Хиггса с массой 125 ГэВ скорее всего является h , а не H -бозоном в модели MSSM. Это позволяет использовать измерения открытого бозона Хиггса для исключения значительной области в пространстве свободных параметров MSSM $m_A, \tan \beta$ без поисков дополнительных бозонов в этой области. Измерение верхнего предела на сечение процесса $pp \rightarrow b^- b^+ A; A \rightarrow \mu\mu$ в интервале масс A -бозона 25–60 ГэВ позволило исключить “Wrong-sign Yukawa coupling” – сценарий в модели 2HDM в этой области масс.

**Разработка методики метрологического обеспечения
испытательного стенда для проведения испытаний
радиоэлектронных изделий на стойкость к воздействию тяжелых
ионов высокой энергии**

Батяев В.Ф.², Берлянд А.В.³, Берлянд В.А.³, Бобровский Д.В.⁵,
Бутенко А.В.¹, Кулевой Т.В.², Павлов К.В.², Пешич М.П.⁷, Рогов В.И.²,
Сабуров В.О.⁶, Соболевский Н.М.⁴, Соловьев А.Н.⁶, Сыресин Е.М.¹,
Титаренко А.Ю.², Титаренко Ю.Е.², Тютюнников С.И.¹, Чумаков А.И.⁵

¹ОИЯИ, Дубна, Московская обл., 141980, Россия;

²НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, 117218, Россия;
Лаборатория фундаментальных ядерно-физических исследований (344)

³ГНЦ РФ ФГУП ВНИИФТРИ, г. п. Менделеево, Московская обл., 141570,
Россия;

⁴ФГБУ ИЯИ РАН, Москва, 117312, Россия;

⁵АО «ЭНПО СПЭЛС», Москва, 115409, Россия;

⁶МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава
России, г. Обнинск, Калужская обл., 249036, Россия;

⁷Винча ИЯН, Белградский университет, Белград, 07003170, Сербия

Аннотация

В докладе рассматриваются вопросы метрологической аттестации пучков высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов, которые будут использоваться при проведении исследований и испытаний на радиационную стойкость перспективных изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники, твердотельной СВЧ-электроники и микромеханических систем. Одно из основных требований, предъявляемых к таким пучкам – обеспечение требуемого диапазона

величины линейных потерь энергии (ЛПЭ). Рассмотрены два метода изменения ЛПЭ, один из которых основан на использовании ионов различных типов (^{16}O , ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{56}Fe , ^{84}Kr , ^{136}Xe , ^{209}Bi), а второй на использовании иона одного типа (^{197}Au), но с разными энергиями. Рассмотрены преимущества использования как первого, так и второго методов, выполнен анализ проблем, который возникают при использовании второго метода.

Зависимость распространенности ядер, образующихся в r -процессе, от модели β -распада

Панов И.В.

Лаборатория физики плазмы и астрофизики (230)

Аннотация

В процессе работы по изучению причин сдвига расчетного платинового пика на кривой распространенности химических элементов была показана роль точности прогнозирования периодов бета-распада, определяющих скорость нуклеосинтеза в r -процессе. В результате моделирования выходов тяжелых ядер в r -процессе в сценарии слияния нейтронных звезд и определения их чувствительности к входным данным, проанализировано влияние скоростей бета-распадов, рассчитанных на основе разных теоретических моделей [1, 2], на распространенность тяжелых ядер (рисунок 1). Сильная зависимость скорости протекания r -процесса от модели бета-распада заметно влияет не только на процесс формирования третьего пика на кривой распространенности ядер, его размер и положение, но и на распространенность всех тяжелых ядер. Показано, что для полного согласия положения расчетного платинового пика с наблюдаемым, скорости бета-распада для большинства короткоживущих ядер из области протекания r -процесса должны быть в 2-4 раза больше величин периодов бета-

распада, прогнозируемых современными теоретическими моделями и использующимися для расчетов нуклеосинтеза тяжелых ядер.

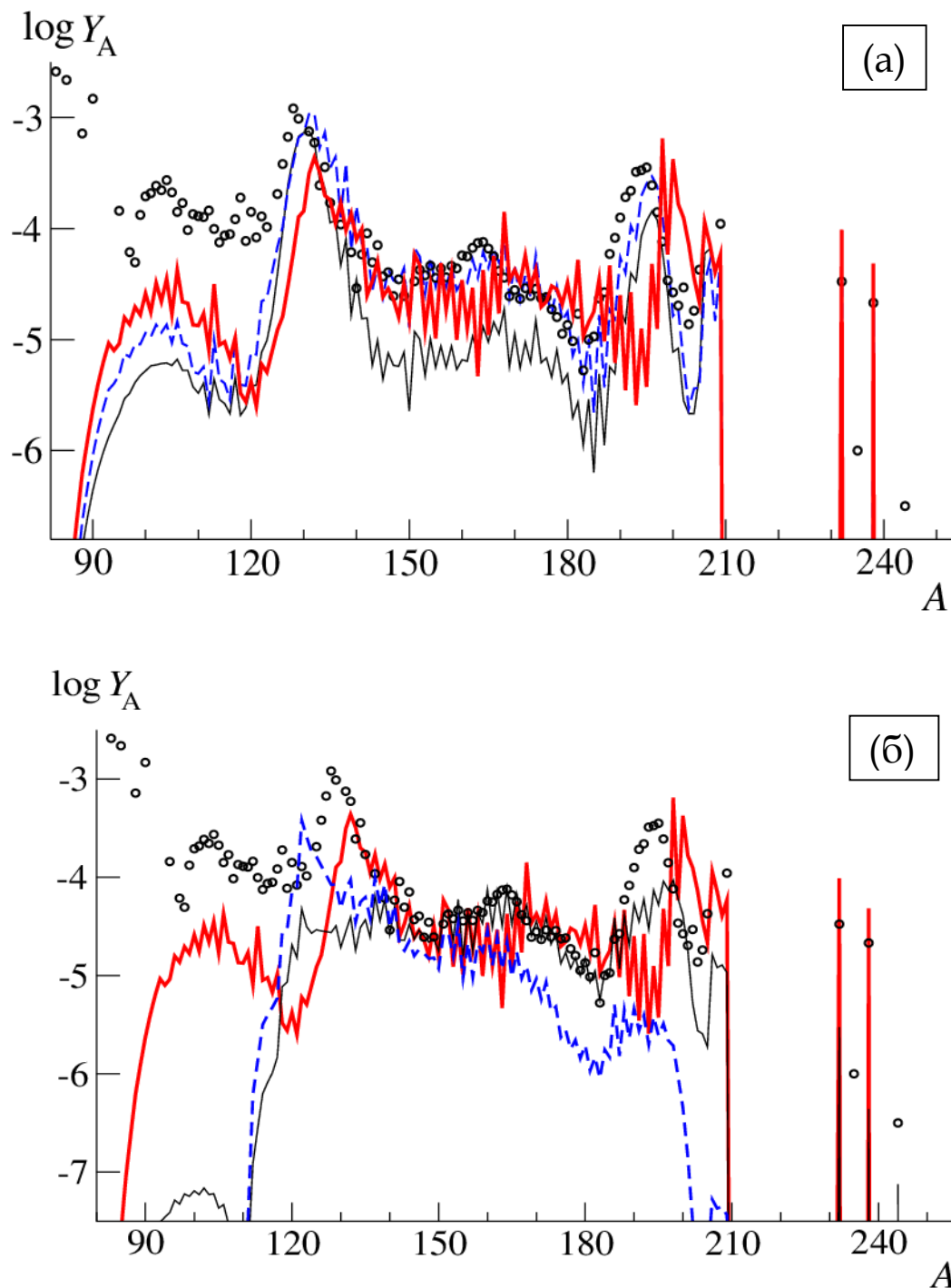


Рис. 1. (а) Распространенности тяжелых ядер, рассчитанные с использованием различных прогнозов скоростей бета-распада: линия — скорости бета-распада [2]; штриховая линия — скорости бета-распада [2]

для всех изотопов с $Z > 82$ увеличены в 4 раза; красная линия — модифицированная БЕТА-модель [1]. (б) Влияние изменения скорости бета-распада $\ln 2/T_{1/2}$ [1] на формирование ядер с $A > 100$ (внизу). $\lambda_{\beta}^{\text{norm}} = \lambda_{\beta}^{\text{calc}}/k$ ($1 < k < 6$), $k = 1$ (красная жирная линия), $k = 4.8$ (линия), $k = 6$ (штриховая линия)

Литература

- [1] I. Panov, Yu. Lutostansky, F.-K. Thielemann. Beta-decay half-lives for the r -process nuclei. NP. A **947**, 1 (2016).
- [2] P. Möller, B. Pfeiffer, K.-L. Kratz. New calculations of gross β -decay properties for astrophysical applications: Speeding-up the classical r -process. Phys. Rev. C **67**, 055802 (2003).

Простая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа II

Блинников С.И., Поташов М.Ш., Юдин А.В.

Лаборатория физики плазмы и астрофизики (230)

Аннотация

В работе исследована упрощённая система кинетики атома водорода (два уровня плюс континуум) в условиях сверхновой типа II на стадии плато. Аналитически получен эффект «закалки» ионизации при больших временах, сравнимых с длительностью фазы плато. В равновесном приближении на больших временах система полностью рекомбинирует, чего в реальности не происходит. На основе времени релаксации получен критерий проверки равновесности системы при заданных условиях для любых масштабов времён. Если время релаксации мало по отношению к характерному времени изменения параметров сверхновой (несколько дней), то система равновесна, и эффекта нестационарной ионизации (отклонения истинных населённостей от равновесных) не будет. Критерий неравновесности расширен на полную кинетическую систему, включающую в себя различные физические свойства (ударные процессы, многоуровневая модель водорода, примеси металлов и т.п.). Показано, что важнейшую роль для нестационарности играет форма внешнего излучения в континууме на частотах между порогами Бальмера и Лаймана. Чем выше температура чёрнотельного приближения, аппроксимирующего это

излучение, тем меньше будет время релаксации рассматриваемой системы. В свою очередь, металлические примеси также уменьшают время установления равновесия (см. рисунок 1). Численная оценка этого времени для различных кинетических систем подтверждает необходимость учёта эффекта нестационарности в кинетике в течение фотосферной фазы при взрыве сверхновой.

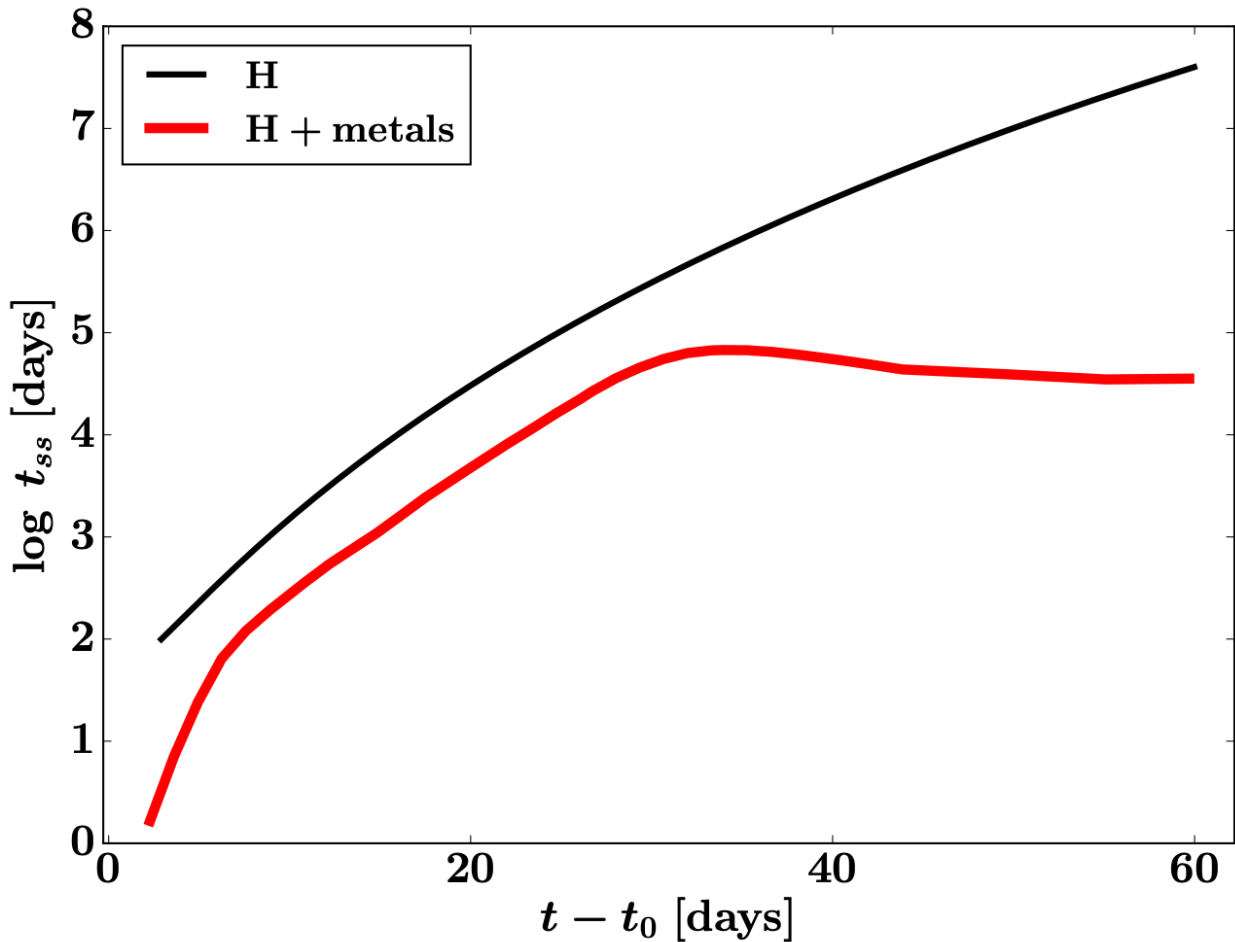


Рис. 1. Эволюция времён релаксации для различных кинетических систем относительно физического времени, где t_0 соответствует началу фотосферной фазы (~ 20 дней). Чёрная линия построена для чисто водородной системы, в то время как красная представляет систему с металлическими примесями

Томографические атомно-зондовые исследования перспективных конструкционных материалов

Богачев А.А., Залужный А.Г., Искандаров Н.А., Лукьянчук А.А.,
Никитин А.А., Разницын О.А., Рогожкин С.В., Хомич А.А.,
Хорошилов В.В., Шутов А.С.

*Отдел атомно-масштабных и ядерно-физических методов исследования
материалов ядерной техники (320)*

Аннотация

Значительная часть современных перспективных технологий и разработок сопровождается формированием специфических наноразмерных структур со сложным химическим составом. Соответственно, возникает необходимость контроля характеристик таких структур – их размера, формы, концентраций легирующих элементов в них. Атомно-зондовая томография является одним из наиболее эффективных прямых методов определения пространственных распределений различных химических элементов в материале. В России атомно-зондовые исследования проводятся только в организациях НИЦ «Курчатовский институт». Значительная часть этих исследований посвящена изучению наноструктуры реакторных материалов.

Разработка в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ атомно-зондового томографа с лазерным испарением ПАЗЛ-3D обеспечила проведение исследований широкого класса материалов. В настоящее время проведены исследования различных чистых материалов: вольфрама, алюминия, сплавов алюминия, а также

высокоэнтропийных сплавов, никелевых суперсплавов для авиационных газотурбинных двигателей (пример наноструктуры изображен на рисунке 1), широкого ряда конструкционных сталей для ядерных реакторов: ЭК-181, ЧС-139, Eurofer 97, дисперсно-упрочненных оксидам сталей.

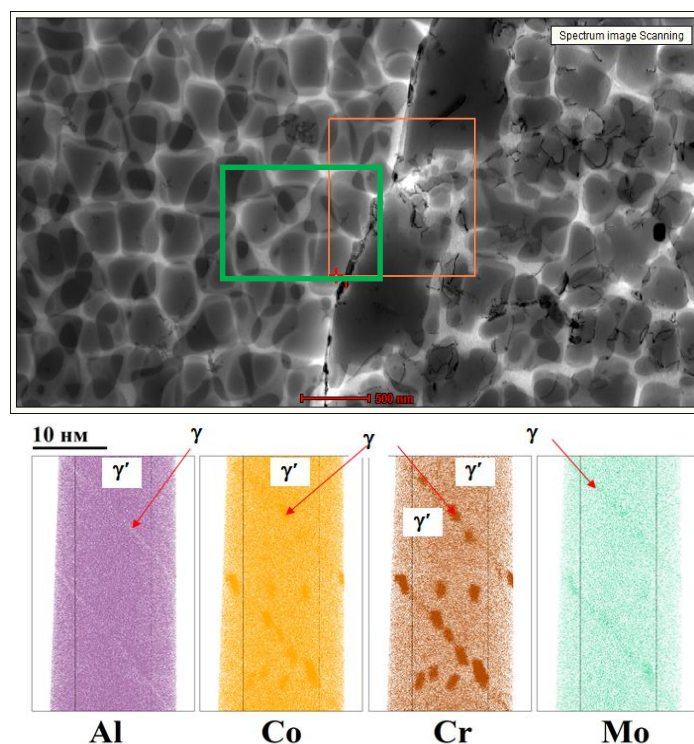


Рис. 1. Пример комплексного анализа наноструктуры никелевого суперсплава для газотурбинных двигателей методами растровой электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии

Анализ данных с жидкоаргонового детектора CENNS-10 в эксперименте по регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и исследование сцинтилляционных свойств жидкого аргона с примесью ксенона

Акимов Д.Ю., Белов В.А.¹, Козлова Е.С., Коновалов А.М.,
Разуваева О.Е., Рудик Д.Г., Симаков Г.Е.

Лаборатория сцинтилляционных методов регистрации частиц (205)

¹*Лаборатория сильных взаимодействий (201)*

Аннотация

Проведена обработка первого набора физических данных с жидкоаргонового детектора CENNS-10 в совместном эксперименте на SNS в Окриджской национальной лаборатории, США (коллаборация COHERENT) по исследованию процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре (УКРН). Первое ограничение на сечение представлено на рисунке 1. Обработка экспериментальных данных велась параллельно и независимо российской и американской группами, и в настоящее время произведено сравнение результатов анализа. В докладе будут представлены основные элементы анализа данных и предварительные результаты.

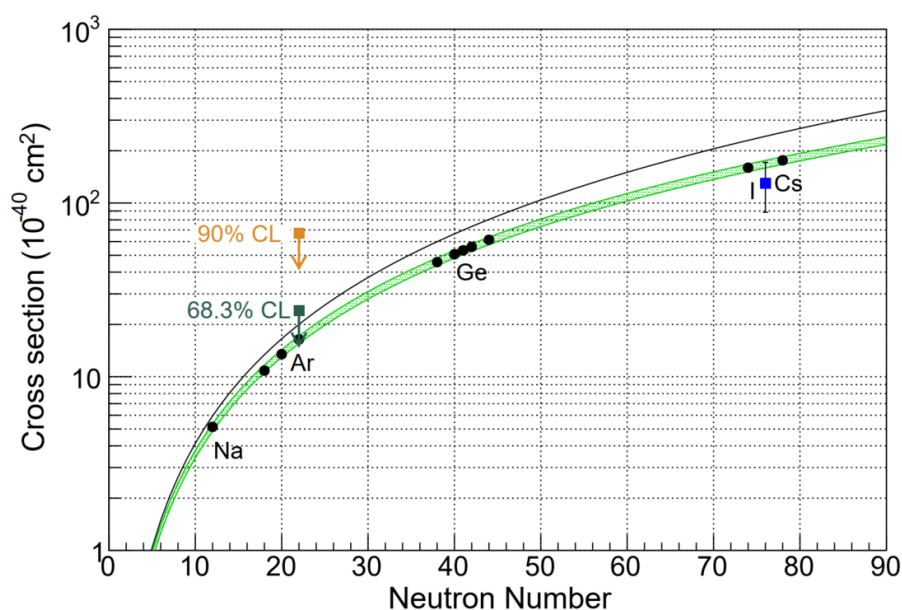


Рис. 1. Первое ограничение на сечение УКРН, полученное при обработке данных инженерного сеанса детектора CENNS-10

Приведены результаты исследования сцинтилляционных свойств смеси жидкого аргона с небольшим количеством (до нескольких тыс. ppm) ксенона. Добавка вводится с целью переизлучения сцинтилляционного света жидкого аргона (125 нм) в более длинноволновую область излучения возбужденных молекул ксенона (175 нм), для которой имеются фотоприемники с высокой квантовой эффективностью (см. рисунок 2). Были получены новые экспериментальные данные о кинетике процесса передачи возбуждения от аргона к ксенону при различных концентрациях ксенона в жидком аргоне. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность переизлучения быстрой компоненты сцинтилляции жидкого аргона при концентрации ксенона > 1000 ppm.

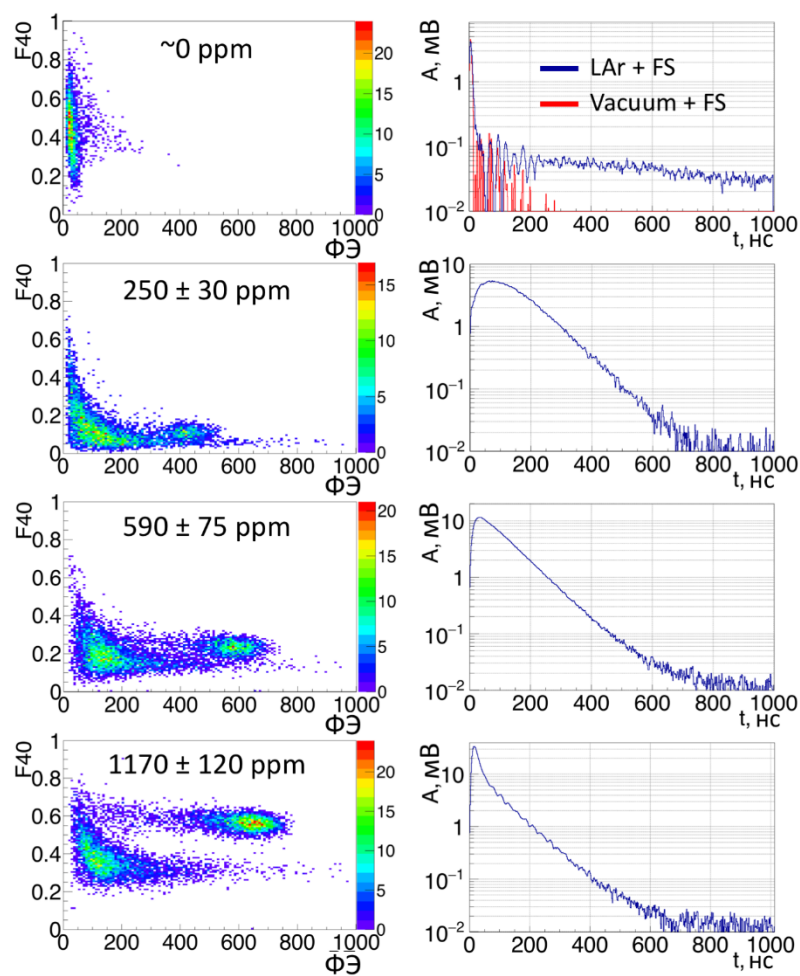


Рис. 2. Улучшение разделения сигналов от частиц разного сорта по форме импульса (левый столбец) и изменение усредненной формы сигнала (правый столбец) с увеличением (сверху вниз) концентрации Хе в смеси аргона с ксеноном в тестах с использованием фильтра из плавленого кварца (FS); каждый ряд соответствует концентрации Хе, приведенной слева; F40 – параметр разделения типов частиц по форме сигнала; ФЭ – площадь сигнала в фотоэлектронах

Результаты работ по гранту РФФИ «Топологические теории поля и теории струн» в 2019 году

Слепцов А.В.

Лаборатория методов математической физики (170)

Аннотация

В этом докладе рассказано про результаты, полученные в рамках выполнения проекта РФФИ 16-12-10344 «Топологические теории поля и теории струн» под руководством А.Ю. Морозова.

Во-первых, нами было проведено исследование пертурбативных свойств самодуальной теории Янга – Миллса. Подробно исследована структура сингулярностей полулокальных корреляторов поля P и светоподобной вильсоновской петли. Мы получили явное выражение для ампутированной трехточечной корреляционной функции полей P в одной петле. В этой теории однопетлевое приближение является точным. Проверена его инвариантность относительно дилатаций и специальных конформных преобразований. Установлено, что после перенормировки трехточечный вклад остается инвариантным относительно модифицированных (аномальных) конформных тождеств Уорда.

Во-вторых, мы исследовали интегрируемые системы, связанные с вещественными расслоениями Хиггса, когда в отмеченных точках калибровочная группа редуцируется к максимальной компактной подгруппе. Мы строим интегралы движения и доказываем, что, действительно, в этом случае мы получаем вещественные вполне

интегрируемые системы. Интегрируемость следует из подсчета независимых интегралов движения, находящихся в инволюции.

В-третьих, была получена формула, которая по групповому фактору из инвариантов Казимира дает результат действия соответствующего дифференциального полинома из производных Хироты на 1-солитонную тау-функцию. Показано, что таким образом получаются дисперсионные соотношения для солитонов. Также была подробно изучена новая симметрия цветного полинома Александера на уровне групповых факторов. Было показано, что при наложении уравнений Александера, следующих из однокрюкового свойства, можно описать комбинаторную структуру групповых факторов, удовлетворяющих обоим свойствам и написать их явный вид.

В-четвертых, мы обнаружили, что формулы эволюции для полиномов Хованова в случае претцельных узлов рода 2 описывают новое явление по сравнению со случаем торических узлов. А именно, полином Хованова, записанный как линейная комбинация ляпуновских экспонент (то есть, как частное решение уравнения эволюции в данной области фазового пространства), содержит больше различных экспонент, чем полином Джонса в аналогичной форме.

Полином Джонса есть предел полинома Хованова по одной из формальных переменных ($t \rightarrow -1$), и между эволюционными формулами для одних и других часто обнаруживается достаточно прозрачное соответствие, например, в исследованном ранее случае торических узлов. Однако в фазовом пространстве претцельных узлов есть особые области, где полиномы Хованова содержат специфические слагаемые (обращающиеся в нуль при $t \rightarrow -1$), не

имеющие непосредственных аналогов в эволюционных формулах для полиномов Джонса, по форме близкие к попарным произведениям остальных членов. Таким образом, эти специфические члены растут вдоль фазовых траекторий быстрее (в определенных предположениях относительно значений формальных переменных), чем обычные члены (типа джонсовских).

В-пятых, мы показали, что понятие Керовских гамильтонианов имеет четко определенное значение, и построили полный набор гамильтонианов для функций Керова. Также установлено, что особые свойства гамильтонианов в случае Шура имеют обобщения на другие локусы, и это дает надежду поднять конструкцию, скажем, на обобщения Фрейнда – Забродина локуса Макдональда.

В-шестых, мы исследовали внутреннюю структуру эксклюзивных матриц Рака для представлений без кратностей квантовой универсальной обертывающей алгебры $sl(N)$. Разложение эксклюзивной матрицы Рака на верхне- и нижнетреугольную части привело к построению универсальной, т. е. не зависящей от представления, эволюционной матрицы, с помощью которой теперь можно построить данную матрицу Рака для любого представления.

Наконец, в работе по изучению свойств абелевой модели Хиггса было показано, что основные свойства вторичных структур молекул протеинов могут быть описаны при помощи модели с потенциалом, содержащим два минимума энергии. Один из этих минимумов соответствует альфа-спиралям, а второй – бета-цепям. Нерегулярные вторичные структуры, например, повороты и переходы, появляются в модели как солитоны, интерполирующие между минимумами. В работе было показано, что минимальная модель зависит от четырех

параметров, три из которых могут быть зафиксированы для протеинов универсальным образом, сравнивая предсказания модели с экспериментальными данными. Это, в частности, позволило вывести предсказание модели для минимального размера бета-цепи. Также было показано, что четвертый параметр, контролирующий характерный размер солитонов, может зависеть от локального химического состава молекулы. Главным результатом исследования можно считать описание бета-цепей, как специальных солитонов с продолжительным участком малой кривизны. Кроме того, было показано, что данная модель наделяет особой ролью концы молекул, а точнее ориентацию фрейминга, которая на конце кривых приобретает физический смысл. В связи с этим в теорию был введен дополнительный топологический заряд, характеризующий эти краевые степени свободы.

Обработка экспериментальных данных и результаты моделирования калориметров ZDC и ECAL BM@N на ускорительном комплексе NUCLOTRON-NICA

Ставинский А.В.

Лаборатория релятивистской ядерной физики (111)

Аннотация

Экспериментальные данные и результаты моделирования в рамках GEANT4 ZDC калориметра BM@N (детектор представлен на рисунке 1) проанализированы с целью определения центральности ядро-ядерного взаимодействия. Усовершенствован алгоритм определения формы кластера, позволивший повысить точность определения прицельного параметра до величины порядка 1 фм. Для различных конфигураций калориметра ECAL BM@N проведено моделирование, позволившее выбрать оптимальный вариант размещения модулей. Для этого варианта размещения спроектирована и изготовлена опорная конструкция. Проведено моделирование процедуры идентификации нейтральных пионов в ядро-ядерном взаимодействии. Получено соотношение «сигнал/фон» масштаба 1 при ширине пика около 12 МэВ.

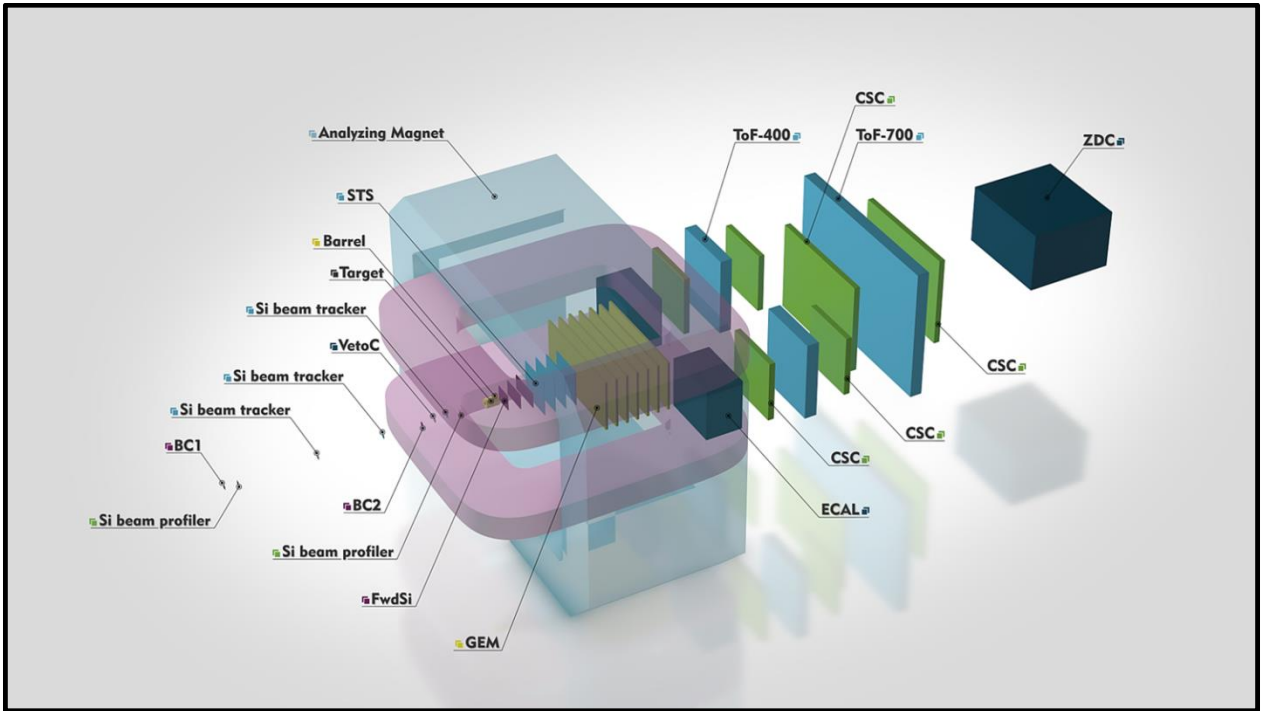


Рис. 1. Детектор BM@N

Изучение методом позитронной аннигиляционной спектроскопии процессов отжига радиационно-индуцированных дефектов в вольфраме, облученном протонами с энергией 21.6 МэВ

Боков А.В., Бяков В.М., Дубов Л.Ю., Ельникова Л.В., Илюхина О.В.,
Козлов А.В., Огородникова О.В., Селезнев Д.Н., Степанов С.В.,
Столбунов В.С., Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В.

Лаборатория физической химии (322)

Аннотация

Изучение поведения радиационных дефектов в конструкционных материалах будущих термоядерных реакторов является актуальной задачей. Именно дефекты определяют деградацию механических и эксплуатационных свойств материалов (охрупчивание, накопление трития). И это в конце концов лимитирует долговечность всего аппарата. Наиболее энергонагруженной частью реактора, подверженной воздействию мощного нейтронного потока и частиц D-T плазмы, является дивертор, изготовленный из пластин вольфрама.

В лаборатории 322 совместно с отделом ускорительных технологий была проведена работа по изучению накопления и отжига радиационных дефектов вакансионного типа в вольфраме под действием протонного облучения. Изучены образцы поликристаллического вольфрама (W), облученного при 100 °С протонами с энергией 21,6 МэВ (флюенс 10^{16} 1/см²). Облучение производилось на протонном ускорителе И-2 в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ. В ходе эксперимента исследовались образцы

поликристаллического вольфрама (ITER grade) чистотой 99,95% (размер $10 \times 10 \times 0.1$ мм), с размером зерен 5-30 мкм. Поверхности пластинок были отполированы с обеих сторон. Содержание основных примесных элементов следующее (в 10^{-6} г/г): Fe – 8, Mo – 12, C – 6.

После завершения облучения проводились последовательно отжиг облученных образцов (с шагом в 100 °C) и измерения временных аннигиляционных спектров. Отжиг проводился в кварцевой колбе под форвакуумом в муфельной печи в течение 1 часа.

Аннигиляционные спектры измерялись на временном позитронном спектрометре, собранном из стандартных блоков наносекундной электроники фирмы ORTEC. Спектры разлагались на три убывающие во времени экспоненты. Соответствующие времена жизни позитронов и интенсивности компонент представлены на рисунке 1.

Используя метод временной позитронной аннигиляционной спектроскопии, обнаружены следующие особенности поведения радиационных дефектов в зависимости от температуры отжига:

- при температурах ниже 450 °C вакансионные дефекты состоят преимущественно из моно- и дивакансий;
- начиная с температуры 450 °C наступает активная миграция моновакансий, приводящая к их слиянию в более крупные вакансионные кластеры. Анализ распределения этих кластеров по размерам проведен в двухгрупповом приближении. Первую группу составляют кластеры от одной до шести вакансий. Число вакансий в этих кластерах максимально при температуре отжига 800 °C;

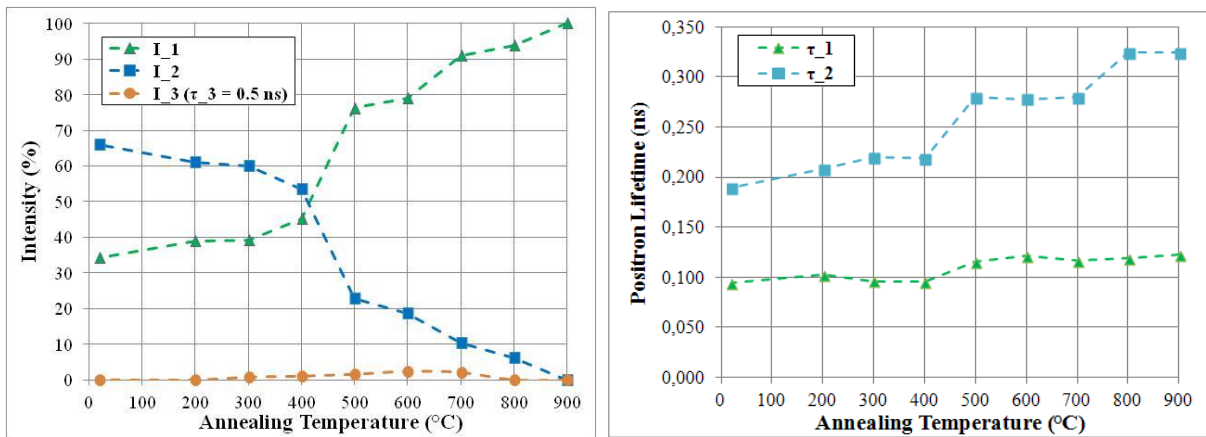


Рис. 1. Параметры разложения временных аннигиляционных спектров (интенсивности и времена жизни) в зависимости от температуры отжига образцов

- одновременно с укрупнением вакансионных кластеров в первой группе при $T > 450$ °С обнаружено образование еще более крупных вакансионных пор размером в 10 моновакансий и больше;
- показано, что при температурах отжига выше 700-800 °С число пор начинает снижаться, а при 900 °С происходит их полное растворение. При 900 °С также исчезают и мелкие вакансионные кластеры;
- на основании измеренных значений скорости захвата позитронов радиационными дефектами, проведена оценка концентрации присутствующих дефектов при разных температурах;
- отмечено, что даже после высокотемпературного отжига (2700 °С, 15 мин) в кристаллической решетке вольфрама сохраняются пока неидентифицированные структурные дефекты (скорее всего дислокации, декорированные углеродом), приводящие к небольшому увеличению времени

жизни позитронов по сравнению с их временем жизни в идеальной решетке вольфрама.

Проделанная работа демонстрирует эффективность позитронной аннигиляционной спектроскопии в изучении радиационных дефектов вакансионного типа в вольфраме, их структуры, процессов миграции и отжига.

Неабелева аномалия в переходных форм-факторах η , η' при разных виртуальностях фотона

Клопот Я.Н.², Оганесян А.Г.^{1,2}, Теряев О.В.², Хлебцов С.П.¹

¹Лаборатория теории сильных взаимодействий (160) НИЦ «Курчатовский
Институт» – ИТЭФ, 117218, Москва, Россия

²ЛТФ им Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, 141980, Дубна, Россия

Аннотация

С помощью дисперсионного представления для аксиальной аномалии, было получено аномальное правило сумм (АПС) для синглетного тока, учитывающее вклады электромагнитной и глюонной (неабелевой) аномалий. В сочетании с АПС для изовекторного и октетного токов получены выражения для переходных форм-факторов π^0 , η , $\eta' \rightarrow \gamma^* \gamma$ с учетом вклада глюонной аномалии (см. рисунок 1). Показано, что в случае виртуального фотона вклад глюонной аномалии существенно больше, чем в случае двух реальных фотонов. Найдены существенные корреляции между параметрами векторного и аксиального каналов.

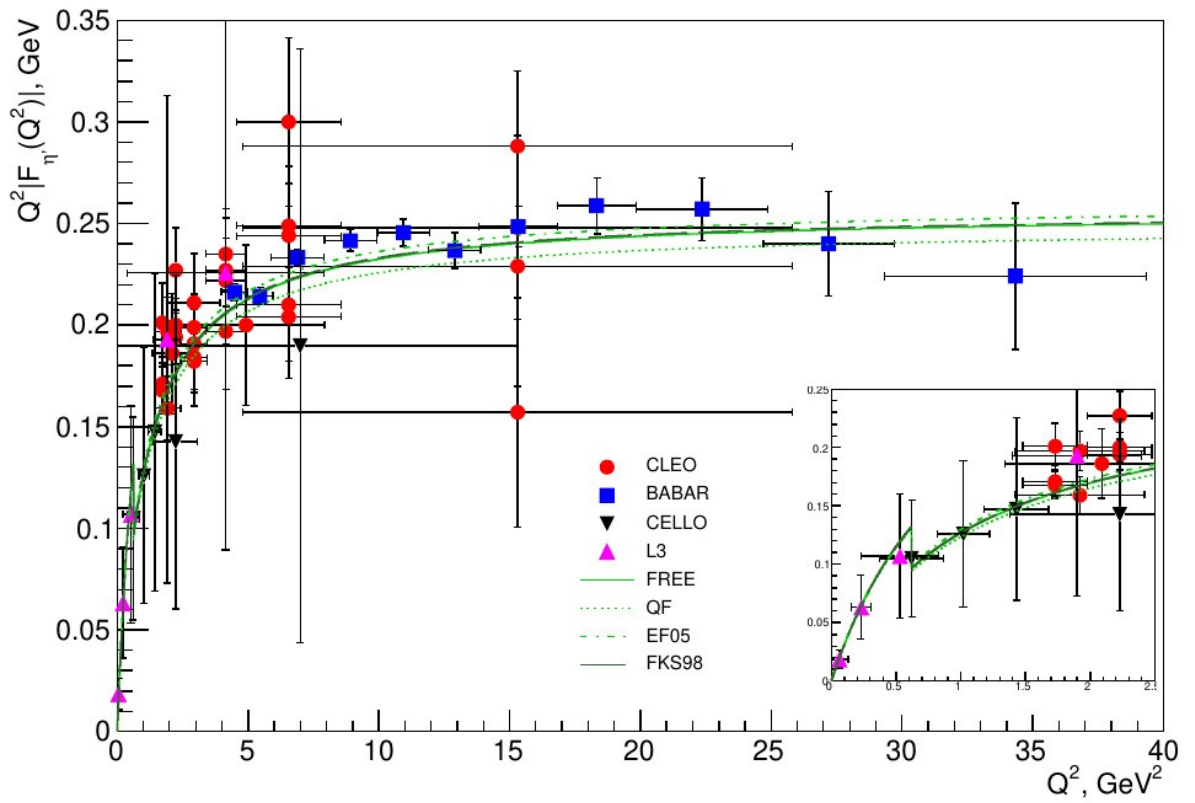


Рис. 1. Переходный форм-фактор η' -мезона в пространственно-подобной области с учётом вклада глюонной аномалии

Работы группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в эксперименте АТЛАС на БАК в 2019 году

Гаврилюк А.А., Горбунов П.А., Мордовец И.П.,
Рамакоти Е.Н., Цукерман И.И., Шаманов В.В., Шаталов П.Б.

Лаборатория нейтринной физики (031)

Аннотация

Представлен краткий отчет о результатах деятельности группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в эксперименте АТЛАС на БАК в 2019 г. Мы принимали участие как в физических исследованиях по изучению стандартного (СБХ), так и в поисках тяжелого бозона Хиггса (ТБХ) в канале $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$, в модификации программного обеспечения жидкоаргонового калориметра (LAr) на фазе 1 модернизации БАК и АТЛАС и в подготовке к изготовлению охлаждающих пластин для новых плат электроники LAr-калориметра на фазе 2 его модернизации.

Для изучения свойств СБХ используется образец $e\mu$ -событий, соответствующий светимости 139 фб^{-1} . Нами исследована кинематика адронных струй, и построены распределения по E_T^{miss} . Особое внимание уделялось передним струям, где нет трекера. В целом данные неплохо описываются с помощью метода Монте-Карло.

Мы продолжили начатый в середине 2018 г. новый анализ для поиска ТБХ, основанный на полной статистике, набранной при 13 ТэВ. С помощью разработанного нами ранее пакета программ для построения профильных гистограмм исследован эффект наложения адронных струй (“pile-up”). Также изучены контрольные кинематические области основных фонов.

Для задач изучения свойств СБХ и поиска ТБХ наша группа внесла определяющий вклад в изучение около 100 млн $Z \rightarrow ee$ и $Z \rightarrow \mu\mu$, что было необходимо для детального исследования эффекта “pile-up” при светимости БАК до $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Экспериментальные данные неплохо описываются Монте-Карло моделированием, серьезных проблем в калориметрах ATLAS не выявлено.

Результаты работы отдела медицинской физики

Кленов Г.И, Хорошков В.С., Черных А.Н.

Отдел медицинской физики (010)

Аннотация

В 2019 г. деятельность отдела 010 развивалась в трех направлениях:

– разработка и комплексирование пакета документации, необходимого и достаточного для конструирования, изготовления, сертификации и эксплуатации оборудования медицинского назначения для создания исследовательского онкоофтальмологического комплекса протонной лучевой терапии на базе циклотрона Ц-80 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ;

– разработка и проведение моделирования новых аппаратных и технологических подходов при позиционировании онкоофтальмологических пациентов для проведения протонно-лучевой терапии (ПЛТ);

– организация работ по созданию Центра Компетенции протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт» (ЦК ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт»).

Первые два направления доведены до стадии выпуска предприятиями-изготовителями рабочей документации по разработанным НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ материалам.

В результате активной деятельности сотрудников отдела 010 и патентного отдела НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в 2019 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ стал правообладателем двух патентов на изобретение: «Способ протонной лучевой терапии внутриглазных злокачественных новообразований» и «Компактный однокабинный комплекс протонной лучевой терапии» (см. рисунок 1), связанных с перспективными направлениями развития НИЦ «Курчатовский институт» и НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ.

Сотрудники отдела участвовали в пяти конференциях, опубликовали одно учебное пособие и восемь работ в сборниках трудов конференции и в журналах.

В докладе будут представлены основные результаты по всем направлениям деятельности.

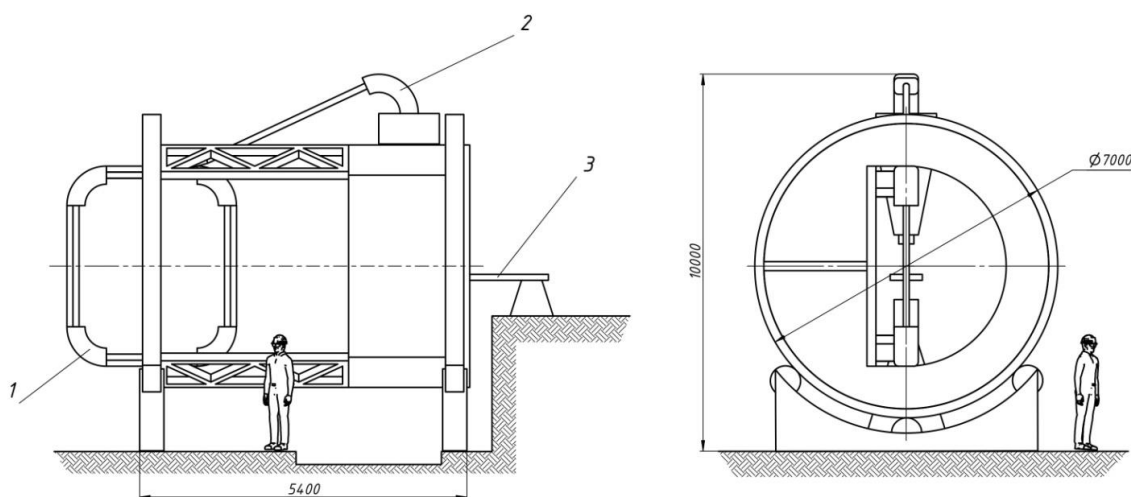


Рис. 1. Проект однокабинного комплекса НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ (патент RU 2697232). 1 – синхротрон на энергию протонов $70 \div 250 \text{ MeV}$, 2 – поворотный магнит, 3 – дека для размещения пациента

Построение самосогласованных моделей карликовой галактики-спутника Млечного Пути в созвездии Печь

Блинников С.И., Щелканова Г.А.

Лаборатория теории элементарных частиц (180)

Аннотация

В работе рассматривается построение квазиравновесных самосогласованных двухкомпонентных моделей карликовой галактики-спутника Млечного Пути в созвездии Печь. В таких галактиках наблюдается преобладание тёмной материи, и в них практически нет газовой составляющей. Эти объекты идеальны для моделирования N тел, учитывающего две компоненты: звездную и гало темной материи. Для построения компонент в работе в качестве начального приближения была использована гидродинамическая модель галактики, учитывающая анизотропию дисперсии скоростей. Ранее гидродинамическими моделями, т. е. уравнениями Джинса, в литературе для этого объекта и ограничивались, но пробеги частиц тёмной материи и звёзд в галактиках огромны, и применимость гидродинамического приближения сомнительна. Мы же строим модели, где каждая из N частиц следует по своей орбите в самосогласованном потенциале, который этими частицами и создаётся. По данным распределениям плотностей компонент мы получили модельные профили дисперсии скоростей звездной составляющей галактики. Эти профили согласуются с наблюдательными данными по звёздной компоненте и могут

использоваться для предсказаний аннигиляционного сигнала для тёмной материи.

В работе использованы два различных программных кода для получения численных самосогласованных моделей галактики при N порядка нескольких миллионов. Мы также проследили за эволюцией полученных моделей. Они оказались достаточно стабильны на протяжении нескольких динамических времен.

На рисунке 1 представлены модельные профили дисперсии скоростей звезд в сравнении с наблюдательными данными. Видим, что для этих моделей полученные профили хорошо согласуются с наблюдениями.

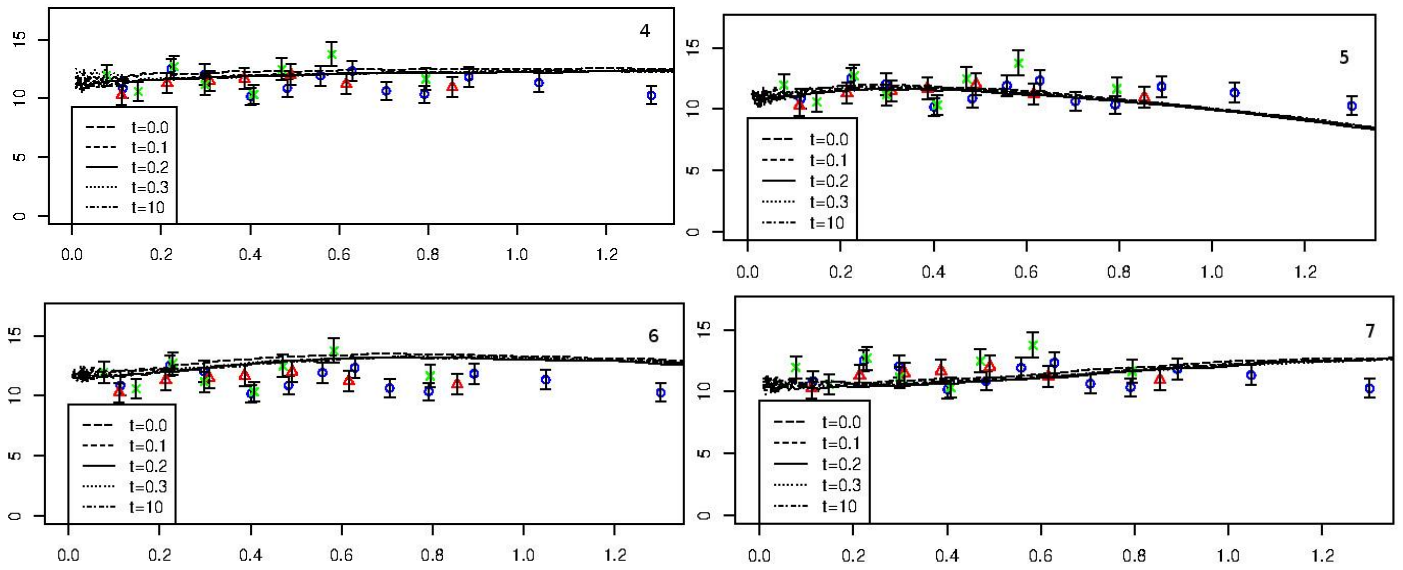


Рис. 1. Смоделированные и наблюдаемые профили дисперсии скоростей для четырех моделей. Дисперсия скоростей выражена в км/с, расстояние от центра галактики — в кпк

Заключение. Результаты конкурса научных работ 2019 г.

С 2018 г. в рамках конференции «ИТЭФ – научные итоги года» проводится конкурс научно-исследовательских работ. Жюри работает в ходе конференции, оценивая все работы, предварительно поданные на конкурс.

По решению жюри денежными премиями и дипломами лауреатов в 2019 году были награждены авторы следующих работ:

в номинации «Фундаментальные научные исследования – теория»:

Р.А. Абрамчук, М.А. Андрейчиков, М.Г. Лукашов, З.В. Хайдуков, Ю.А. Симонов «Термодинамика кварк-глюонной плазмы при конечной плотности в сильном магнитном поле»;

в номинации «Фундаментальные научные исследования – эксперимент»:

С.К. Абдуллин, В.Ш. Эпштейн, В.Б. Гаврилов, А.С. Жокин, Н.В. Лычковская, А.Н. Никитенко, В.П. Попов, И.Ю. Поздняков, Г.Б. Сафронов, А.А. Спиридонов, А.Д. Степеннов, М.Д. Томс, Е.В. Власов «Поиски Хиггсовских бозонов вне рамок Стандартной модели на Большом адронном коллайдере»;

в номинации «Разработка новых экспериментальных методов и создание современных физических приборов и установок»:

А.С. Барабаш, С.И. Коновалов, В.И. Юматов «Разработка и создание низкотемпературных сцинтилляционных болометров для поиска и изучения процессов двойного бета-распада»;

в номинации «Прикладные научные исследования»:

С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Лукьянчук, А.А. Хомич, Н.А. Искандаров, А.А. Богачев, О.А. Разницын, А.С. Шутов, В.В. Хорошилов, А.Г. Залужный «Томографические атомно-зондовые исследования перспективных конструкционных материалов».

Дипломы были вручены победителям конкурса в День ИТЭФ 26 декабря 2019 г.