

Федеральное агентство научных организаций РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИФАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123  
№ госрегистрации 01201050399  
Инв.№



УТВЕРЖДАЮ  
директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ,  
ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, КОСМОЛОГИЯ  
(промежуточный за 2015 год)  
0031-2014-0065

Научный руководитель  
заместитель директора по научной работе  
д.ф.-м.н.



М.В.Либанов  
19 января 2016 года

Москва 2016

Федеральное агентство научных организаций РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 01201050399

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ

директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ,  
ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, КОСМОЛОГИЯ  
(промежуточный за 2015 год)  
0031-2014-0065

Научный руководитель  
заместитель директора по научной работе  
д.ф.-м.н.

М.В.Либанов  
19 января 2016 года

Москва 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



М.В.Либанов (введение, заключение)  
19.01.2016

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Красников Н.В. (раздел 1)  
19.01.2016



д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 2)  
19.01.2016



д.ф.-м.н. Ряжская О.Г. (раздел 3)  
19.01.2016



д.ф.-м.н. Куденко Ю.Г. (раздел 4)  
19.01.2016

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 150 с., 62 рис., 4 табл.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, АДРОННЫЙ АКСИОН, ПЕНТАКВАРК.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Открытие осцилляций мюонного нейтрино в тау нейтрино. По данным 2008 – 2012 гг. зарегистрировано 5 событий - кандидатов на взаимодействие тау нейтрино. Обнаруженные кандидаты позволяют оценить открытие осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  на уровне 5 стандартных отклонений. ИЯИ РАН в коллаборации OPERA.

Проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи. В ЦЕРНе проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи на пучке H4 ускорителя SPS. В основу предложения эксперимента были положены теоретические и экспериментальные работы, выполненные сотрудниками ИЯИ РАН. Разработка и создание детектора были осуществлены в основном силами российских институтов ИЯИ, ИФВЭ и ОИЯИ в сотрудничестве с научными центрами из Германии, Греции, Швейцарии и Чили. Результаты сеанса были рассмотрены на недавнем заседании комитета SPSC ЦЕРН и получили высокую оценку. P348 является одним из наиболее конкурентоспособных экспериментов по поиску скрытого сектора, обладающий также значительным потенциалом открытия новых частиц, связанных с g-2 аномалией магнитного момента мюона, редкими распадами нейтральных каонов, и другими распадами и реакциями адронов и лептонов. ИЯИ РАН в коллаборации P348.

Первое наблюдение очарованного пентакварка. В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. опубликованы результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ , в которых в спектре инвариантной массы ( $J/\psi, p$ ) пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , с уровнем значимости 9 и 12 стандартных отклонений. Их состав может быть объяснен только минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{s}uudd$ ,

это так называемый очарованный пентакварк. Таким образом предсказанные более 50 лет назад частицы наконец находят своё подтверждение. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Получено лучшее в мире ограничение на массу адронного аксиона. В различных моделях при решении CP-проблемы в рамках Квантовой хромодинамики возникает голдстоуновский бозон – аксион, который может рождаться в результате снятия возбуждения ядра Kг-83, присутствующего в Солнце. Эксперимент основан на использовании образца криптона (содержащего изотоп Kг-83) в качестве мишени для аксионов, летящих от Солнца, и в тоже время рабочей среды большого пропорционального счётчика. При наличии эффекта на энергетическом спектре фона счётчика должен быть пик в области 9.4 кэВ. Величина этого пика определяется константой связи аксионов с нуклонами, которая пропорциональна массе аксиона. Завершён первый этап измерений с образцом, обогащённым по изотопу Kг-83 до 58.2%. По данным полученным за время измерений 188.33 сут. получен лучший в мире предел на массу адронного аксиона на уровне 100 эВ (95% у.д.). ИЯИ РАН.

Измерена вероятность распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$ . Величины вероятностей таких распадов являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели. После обработки полного набора данных, полученных в 2011 и в 2012 гг. опубликован результат по первому в мире наблюдению распада  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и по первому в мире экспериментальному измерению вероятности распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$  со статистической достоверностью  $6\sigma$  и  $3\sigma$  соответственно. Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям Стандартной модели и позволяют ограничить возможные параметры её расширения. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Эксперимент NOvA наблюдает изменения в потоках нейтрино на расстоянии 810 км. Были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино. В отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино. Это является неоспоримым доказательством того, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых

условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества. ИЯИ РАН в коллаборации NOvA.

Измерен угол смешивания  $u$  и  $b$  кварков. Закончен анализ данных 2011-2012 гг. по измерению отношения вероятностей эксклюзивных распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda c^+\mu\nu$ , что позволило измерить отношение углов смешивания  $u$ ,  $b$  и  $s$ ,  $b$  кварков:  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$ . Эти моды распадов не были доступны на  $B$ -фабриках, в то время как на Большом адронном коллайдере предоставляется возможность использовать большое количество сигнальных событий, до 20% от производимых  $b$ -адронов. Используя мировое среднее для величины  $|V_{cb}|$ , было получено прецизионное значение для угла  $|V_{ub}|$ , которое хорошо согласуется с условиям унитарности матрицы смешивания. Полученный результат является наиболее точным единичным измерением в мире и даёт важный вклад в глобальный список значений параметров матрицы смешивания кварков. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Измерен период двухнейтринного бета распада  $Ge-76$  и найдена граница распада на возбуждённые уровни. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA, с участием учёных ИЯИ РАН, получен с высокой точностью период полураспада двухнейтринного бета распада  $Ge-76$ :  $(1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$  лет. Выполнен поиск двухнейтринного двойного бета распада изотопа  $Ge-76$  на три возбуждённых уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам, обогащённым по изотопу  $Ge-76$ , погруженным в жидкий азот. Получен верхний предел для искомого распада:  $3.7 \cdot 10^{23}$  лет, который превосходит более чем в 100 раз значения, известные из предыдущих аналогичных экспериментов. ИЯИ РАН в коллаборации GERDA.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

## СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	4
Введение	7
Основные результаты	9
1 Отдел теоретической физики	12
2 Отдел экспериментальной физики	29
3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики	85
4 Отдел физики высоких энергий	98
Заключение	148

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

развитие квантовой теории поля и теории суперструн, в том числе направлений, связанных с исследованием режима сильной связи, прецизионным теоретическим анализом процессов в физике элементарных частиц, описанием сверхплотной кварк-глюонной среды, изучением физических процессов в ранней и современной Вселенной;

развитие теории сильных взаимодействий - квантовой хромодинамики - в применении к новым типам процессов, в том числе при высоких энергиях;

развитие подходов к созданию квантовой теории гравитации, исследование фундаментальных свойств физического пространства-времени на предельно малых и предельно больших расстояниях, поиск пределов справедливости теории относительности и проявлений возможного существования дополнительных измерений пространства;

развитие теории полей высших спинов и теории черных дыр;

развитие конформной теории поля и теории интегрируемых систем;

теоретические исследования проблемы происхождения «тёмной энергии» и ускоренного расширения поздней Вселенной, проблемы барионной асимметрии Вселенной и механизмов ее генерации в процессе эволюции, проблемы природы темной материи во Вселенной;

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

построение на этой основе теории, существенно расширяющей современную теорию элементарных частиц;

исследование свойств адронов и механизмов реакций с их участием при промежуточных (до нескольких ГэВ) энергиях, поиски экзотических состояний, в том числе дибарионов, пентакварков и других;

в области физики нейтрино и астрофизики:

поиск частиц темной материи в неускорительных и коллайдерных экспериментах;

разработка методов регистрации темной материи;

прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск в них эффектов CP-нарушения;

прямой поиск массы нейтрино в диапазоне 0,1 - 0,3 эВ;

поиск нарушения закона сохранения лептонных чисел в процессах с мюонами на новом уровне чувствительности, поиск безнейтринного двойного бета-распада на уровне, предсказываемом осцилляционными экспериментами в предположении майорановской природы нейтрино;

поиск стерильных нейтрино в нейтринных осцилляциях, создание с этой целью галлиевого нейтринного детектора для экспериментов с высокоинтенсивными искусственными источниками нейтрино, а также подготовка и проведение экспериментов на исследовательских и промышленных атомных реакторах;

в области физики космических лучей:

измерение состава и энергетического спектра всех компонентов космического излучения (ядер, электронов, позитронов, фотонов) во всем диапазоне измеряемых энергий;

выяснение природы космических лучей сверхвысоких энергий, обнаружение их источников, исследование механизмов их генерации;

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

исследование астрофизических источников гамма-квантов высоких энергий, обнаружение новых типов таких источников, исследование механизмов генерации гамма-квантов;

мониторинг галактических и солнечных космических лучей, их состава, временных вариаций;

исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы в натуральных и лабораторных экспериментах;

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат;

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Открытие осцилляций мюонного нейтрино в тау нейтрино. По данным 2008 – 2012 гг. зарегистрировано 5 событий - кандидатов на взаимодействие тау нейтрино. Обнаруженные кандидаты позволяют оценить открытие осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  на уровне 5 стандартных отклонений. ИЯИ РАН в коллаборации OPERA.

Проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи. В ЦЕРНе проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи на пучке H4 ускорителя SPS. В основу предложения эксперимента были положены теоретические и экспериментальные работы, выполненные сотрудниками ИЯИ РАН. Разработка и создание детектора были осуществлены в основном силами российских институтов ИЯИ, ИФВЭ и ОИЯИ в сотрудничестве с научными центрами из Германии, Греции, Швейцарии и Чили. Результаты сеанса были рассмотрены на недавнем заседании комитета SPSC ЦЕРН и получили высокую оценку. P348 является одним из наиболее конкурентоспособных экспериментов по поиску скрытого сектора, обладающий также значительным потенциалом открытия новых частиц, связанных с g-2 аномалией магнитного момента мюона, редкими распадами нейтральных каонов, и другими распадами и реакциями адронов и лептонов. ИЯИ РАН в коллаборации P348.

Первое наблюдение очарованного пентакварка. В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. опубликованы результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ , в которых в спектре инвариантной массы ( $J/\psi, p$ ) пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , с уровнем значимости 9 и 12 стандартных отклонений. Их состав может быть объяснен только минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{s}uud$ , это так называемый очарованный пентакварк. Таким образом предсказанные более 50 лет назад частицы наконец находят своё подтверждение. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Получено лучшее в мире ограничение на массу адронного аксиона. В различных моделях при решении CP-проблемы в рамках Квантовой хромодинамики возникает голдстоуновский бозон – аксион, который может рождаться в результате снятия возбуждения ядра K<sub>r</sub>-83, присутствующего в Солнце. Эксперимент основан на использовании образца криптона (содержащего изотоп K<sub>r</sub>-83) в качестве мишени для аксионов, летящих от Солнца, и в тоже время рабочей среды большого пропорционального счётчика. При наличии эффекта на энергетическом спектре фона счётчика должен быть пик в области 9.4 кэВ. Величина этого пика определяется

константой связи аксионов с нуклонами, которая пропорциональна массе аксиона. Завершён первый этап измерений с образцом, обогащённым по изотопу Кг-83 до 58.2%. По данным полученным за время измерений 188.33 сут. получен лучший в мире предел на массу адронного аксиона на уровне 100 эВ (95% у.д.). ИЯИ РАН.

Измерена вероятность распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$ . Величины вероятностей таких распадов являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели. После обработки полного набора данных, полученных в 2011 и в 2012 гг. опубликован результат по первому в мире наблюдению распада  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и по первому в мире экспериментальному измерению вероятности распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$  со статистической достоверностью  $6\sigma$  и  $3\sigma$  соответственно. Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям Стандартной модели и позволяют ограничить возможные параметры её расширения. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Эксперимент NOvA наблюдает изменения в потоках нейтрино на расстоянии 810 км. Были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино. В отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино. Это является неоспоримым доказательством того, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества. ИЯИ РАН в коллаборации NOvA.

Измерен угол смешивания  $u$  и  $b$  кварков. Закончен анализ данных 2011-2012 гг. по измерению отношения вероятностей эксклюзивных распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda c^+\mu\nu$ , что позволило измерить отношение углов смешивания  $u$ ,  $b$  и  $s$ ,  $b$  кварков:  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$ . Эти моды распадов не были доступны на В-фабриках, в то время как на Большом адронном коллайдере предоставляется возможность использовать большое количество сигнальных событий, до 20% от производимых  $b$ -адронов. Используя мировое среднее для величины  $|V_{cb}|$ , было получено прецизионное значение для угла  $|V_{ub}|$ , которое хорошо согласуется с условиям унитарности матрицы смешивания. Полученный результат является наиболее

точным единичным измерением в мире и даёт важный вклад в глобальный список значений параметров матрицы смешивания кварков. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Измерен период двухнейтринного бета распада Ge-76 и найдена граница распада на возбуждённые уровни. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA, с участием учёных ИЯИ РАН, получен с высокой точностью период полураспада двухнейтринного бета распада Ge-76:  $(1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$  лет. Выполнен поиск двухнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 на три возбуждённых уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам, обогащённым по изотопу Ge-76, погруженным в жидкий азот. Получен верхний предел для искомого распада:  $3.7 \cdot 10^{23}$  лет, который превосходит более чем в 100 раз значения, известные из предыдущих аналогичных экспериментов. ИЯИ РАН в коллаборации GERDA.

## 1 Отдел теоретической физики

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Исследования в области космологии и астрофизики. Руководитель работ ак. В.А.Рубаков.

Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Руководитель работ д.ф.-м.н. А.Л.Катаев.

Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели. Руководитель работ д.ф.-м.н. Д.С.Горбунов.

Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей. Руководитель работ д.ф.-м.н. С.В.Троицкий.

## 1.1 РЕФЕРАТ

РАСШИРЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИЯ, АСТРОФИЗИКА, ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ, МОДЕЛИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ, ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ИНФЛЯЦИЯ, ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МОДЕЛИ.

Объектом исследования являются модели физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в частности суперсимметричные теории и теории с дополнительными пространственными измерениями, расширения Стандартной модели, содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино и темной материи, модифицированные теории гравитации, в том числе теории с нарушенной Лоренц-инвариантностью, модели физики и астрофизики космических лучей сверхвысоких энергий, методы Монте-Карло моделирования атмосферных ливней, процессы, происходившие в ранней Вселенной, такие как процессы фазового перехода, генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии.

Цель работы — построение новых теорий и моделей физики высоких энергий, способных решить широкий круг проблем современной теоретической физики, возникающих на стыке сразу нескольких направлений, таких как физика элементарных частиц, астрофизика и космология, а также обеспечение достижения научных результатов мирового уровня, подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирования эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Основным инструментом для исследования процессов и явлений в физике элементарных частиц и космологии был использован аппарат квантовой теории поля, квазиклассическое приближение, методы теории симметрий а также суперсимметрий. В рамках НИР этот математический аппарат был существенно развит и дополнен новыми методами, позволяющими получить количественные характеристики экспериментально наблюдаемых величин, таких как время жизни частиц, сечение рассеяния, вероятность туннельного прохождения и так далее. При исследовании как равновесных, так и неравновесных процессов, происходивших в ранней Вселенной, были использованы методы квантовой теории поля при конечных температурах, которые являются синтезом методов квантовой теории поля и статистической физики. Для решения задач, не поддающихся аналитическому исследованию, были использованы пакеты программ, такие как LatticeEasy, CompHEP, microOMEGAs, HYDJET++, CASCADE, PYTHIA,

NMSSMTools и другие.

В процессе выполнения НИР были получены следующие основные результаты:

Построена модель конформной космологии, являющаяся альтернативной к моделям инфляции, основанная на представлении о распаде ложного вакуума в классе конформных теорий.

Подведён итог работе, посвященной изучению моделей ранней Вселенной с конформной симметрией, механизмам генерации и свойствам возмущений в этих моделях.

Для класса дилатационно-инвариантных теорий с галилеоном доказана запрещающая теорема, утверждающая наличие возмущений, распространяющихся со сверхсветовыми скоростями в метрике Фридмана-Робертсона-Уокера.

На основе анализа кривых блеска сверхновых типа Ia получены ограничения на пространственно-временные вариации скорости распада никеля-56.

Завершено исследование возможного распределения барионного вещества около нашей Галактики при помощи меры дисперсии, измеряемой по сигналам от пульсаров в шаровых скоплениях и Магеллановых облаках.

Предложен квазиклассический метод вычисления S-матрицы для двух-стадийных гравитационных переходов, включающих в себя коллапс материи с образованием черной дыры и испарением последней.

Предложен конкретный вариант модификации метода beta-разложения улучшающий сходимость рядов теории возмущений в области низких и средних энергий.

Разработан метод вычисления неупругих структурных функций дейтрона в области возбуждения нуклонных резонансов и переходной области к глубоко-неупругому рассеянию.

Проведены вычисления дифференциальных сечений неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$ .

Исследованы партонные распределения в тяжелых ядрах ( $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) в области высоких инвариантных переданных импульсов  $Q$ .

Изучена феноменология моделей с асимметричной темной материей - хилогенезиса – в экспериментах на ускорителях (ЛНС).

Изучена феноменология смешивания в хиггсовском секторе суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии.

Коллаборацией “Байкал” при участии коллектива ОТФ исследована чувствительность нейтринного телескопа Байкал-ГВД к нейтринному сигналу от аннигиляции или распадов частиц темной материи в центре нашей Галактики.

Рассмотрена феноменология гипотетических нейтральных калибровочных бозонов с недиагональным по ароматам взаимодействием с фермионами.

Построено самосогласованное квазиклассическое описание распада ложного вакуума индуцированного столкновениями частиц в (1+1)-мерной теории поля.

## 1.2 ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование теоретических проблем на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии является одной из наиболее актуальных направлений современной физики. Это связано, во-первых, с новыми экспериментальными возможностями, в частности, с работой Большого адронного коллайдера, значительным прогрессом в повышении точности астрономических и космологических наблюдений, таких как измерения анизотропии и поляризации реликтового микроволнового излучения Вселенной и т.д.. Во-вторых, с масштабом нерешенных загадок, среди которых объяснение феномена осцилляций нейтрино, природа темной энергии и темной материи, отсутствие антивещества, объяснение однородности, изотропности и плоскостности Вселенной и т.д.. Цель работы — пролить свет на решение указанных проблем.

В отчете представлены результаты исследований отдела теоретической физики ИЯИ РАН. Одним из основных направлений является изучение возможности экспериментальной проверки моделей «новой физики» вне рамок Стандартной модели в ускорительных и астрофизических экспериментах, выработка предсказаний и рекомендаций по поиску таких моделей. Продолжены исследования, направленные на разработку теоретико-полевых методов вычисления пертурбативных поправок высоких порядков, необходимых для обработки экспериментальных данных, во-первых, с целью уточнения параметров СМ, а во-вторых, поиска эффектов новой физики. Коллективом ОТФ исследовались различные космологические модели ранней и поздней Вселенной, направленные на решение вопроса появления первичных возмущений плотности вещества и альтернативных теории инфляции.

### 1.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2015 г. коллективом ОТФ была построена модель конформной космологии, являющаяся альтернативной к моделям инфляции, основанная на представлении о распаде ложного вакуума в классе конформных теорий. Для построения модели использовались современные методы квантовой теории поля, основанные на  $adS/CFT$  соответствии. Линейный анализ возмущений показал, что все значимые для космологии свойства построенной модели буквально совпадают со свойствами возмущений, имеющимися в упрощенных моделях. В частности, модель не противоречит имеющимся наблюдательным данным и предсказывает специфическую форму негауссовости скалярных возмущений.

Подведен итог работе, посвященной изучению моделей ранней Вселенной с конформной симметрией, механизмам генерации и свойствам возмущений в этих моделях. Подробно рассмотрены спектр мощности, статистическая анизотропия и негауссовость скалярных возмущений, а также свойства первичных гравитационных волн. Описан механизм генерации первичных скалярных возмущений в модели с конформным скатыванием и в модели Генезис с галилеоном. Вычислена первичная негауссовость, которая является характерной особенностью данных моделей ранней Вселенной и потенциально позволит экспериментально различить их от инфляционных. Изучена псевдоконформная модель, в которой описан новый классический режим эволюции, соответствующий быстрому сжатию Вселенной. Вычислены спектр мощности скалярных и тензорных возмущений, а также негауссовость скалярных возмущений на уровне трехточечной корреляционной функции, генерируемые в быстром режиме. Поставлены ограничения на параметры модели. Результаты опубликованы в работе.

Коллективом ОТФ в 2015 г. был рассмотрен класс дилатационно-инвариантных теорий с галилеоном, представляющих интерес с точки зрения построения моделей ранней Вселенной альтернативных инфляции. Известно, что для пространства Минковского лагранжиан модели всегда может быть выбран таким образом, чтобы малые возмущения над любыми стабильными решениями уравнения поля распространялись со скоростями меньшими чем скорость света. Однако при рассмотрении модели в метрике Фридмана-Робертсона-Уокера, которая описывает расширяющуюся Вселенную, было показано, что существуют зависимости масштабного фактора от времени, такие, что возмущения над некоторыми фоновыми решениями распространяются со сверхсветовыми скоростями. Таким образом, была сформулирована и доказана запрещающая теорема. Результаты опубликованы в работе.

Светимость сверхновых типа Ia после максимума блеска обеспечивается радиоактивными распадами никеля-56 и кобальта-56. Скорости этих распадов пропорциональны константе слабого взаимодействия Ферми, то есть определяются вакуумным средним хиггсовского поля. На основе публично доступных данных по кривым блеска сверхновых типа Ia, изначально предназначенным для задач космологии, получены ограничения на пространственно-временные вариации скорости распада никеля-56. Хотя эти ограничения не слишком строгие, они – единственные в мире, относящиеся к интервалу красных смещений вплоть до  $z \sim 1$ .

Завершено исследование возможного распределения барионного вещества около нашей Галактики при помощи меры дисперсии, измеряемой по сигналам от пульсаров в шаровых скоплениях и Магеллановых облаках. Было показано, что NFW-профиль не подходит для распределения плотности горячего газа, необходимого для объяснения проблемы потерянных барионов в Галактике.

Предложен квазиклассический метод вычисления S-матрицы для двух-стадийных гравитационных переходов, включающих в себя коллапс материи с образованием черной дыры и испарением последней. Метод учитывает обратное влияние коллапсирующих и хокинговских квантов на фоновую метрику. Метод был проиллюстрирован в нескольких простых моделях, описывающих сферические самогравитирующие оболочки в асимптотически плоском пространстве и в пространстве анти-Де-Ситтера. Они показывают, что электрически нейтральные оболочки отражаются за счет вышеприведенного процесса коллапса-отражения с вероятностью  $\exp(-B)$ , где  $B$  - бекенштейновская энтропия промежуточной черной дыры. Этот результат находится в согласии с интерпретацией  $\exp(B)$  как числа микросостояний черной дыры. То же самое выражение для вероятности получается для заряженных оболочек только в том случае, если нестабильность горизонта Коши промежуточной черной дыры Рейсснера-Нордстрёма принята во внимание. Предложенный квазиклассический метод открывает новый систематический подход к информационному парадоксу в физике черных дыр.

Начато детальное исследование применения основывающегося на специфическом механизме нарушении конформной симметрии в КХД метода beta-разложения для фиксации масштабов предсказания теории возмущений для полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны и для правила сумм глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах. Показано, что феноменологическая обработка предполагает модификацию рассматриваемого варианта beta-разложения в связи с плохой сходимостью рядов теории возмущений в области низких и средних энергий. Предложен конкретный вариант такой модификации.

Разработан метод вычисления неупругих структурных функций дейтрона в области возбуждения нуклонных резонансов и переходной области к глубоко-неупругому рассеянию. Явно продемонстрировано, что при усреднении вкладов нуклонных резонансов в структурные функции протона и нейтрона по достаточно широкому интервалу инвариантного переданного импульса  $Q$  воспроизводятся результаты вычислений в глубоко-неупругой области в области больших бьеркеновских  $x$  с хорошей точностью (расхождение в пределах 5% во всей исследованной кинематической области). Исследованы отношения структурных функций дейтрона и для кинематики эксперимента BONUS (JLab). Результаты готовятся к публикации.

Проведены вычисления дифференциальных сечений неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$  в рамках ранее разработанного подхода для кинематики нейтринных экспериментов NuTeV (железная мишень), CHORUS (свинцовая мишень), MINERvA (ядерные мишени:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ). Проведено детальное сравнение с данными этих экспериментов. Результаты уточняются и готовятся к публикации.

Исследовались партонные распределения в тяжелых ядрах ( $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) в области высоких инвариантных переданных импульсов  $Q$ . Рассчитаны отношения (анти)кварковых распределений разных ароматов для комбинаций с различными значениями  $C$ -четности. Анализировалось распределение глюонов в ядрах на основе импульсного правила сумм для партонных распределений. Результаты опубликованы в работе.

В 2015 г. коллективом гранта изучена феноменология моделей с асимметричной темной материей - хилогенезиса – в экспериментах на ускорителях (LHC). Из сравнения с ограничениями экспериментов ATLAS и CMS на сечения процессов с джетом и «потерянной» энергией, получены ограничения на пространство параметров этой модели. Предложены дополнительные способы поиска такой темной материи на ускорителях - в частности в событиях с одним топ-кварком а также в событиях с четырьмя джетами.

Изучена феноменология смешивания в хиггсовском секторе суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии. В таких моделях, помимо обычного суперсимметричного спектра на электрослабом масштабе присутствуют дополнительные скалярные степени свободы - сголдстино. Показано, что смешивание скалярного сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса может быть значительным, особенно в случае, когда его масса близка к массе скалярного сголдстино. Проведено сканирование по пространству параметров модели с учетом современных экспериментальных ограничений в том числе ограничений из экспериментов на LHC с целью поиска

феноменологически приемлемых моделей. Изучено влияние смешивания на феноменологию легчайшего бозона Хиггса и распада скалярного сголдстино.

Коллаборацией “Байкал” при участии коллектива ОТФ исследована чувствительность нейтринного телескопа Байкал-ГВД к нейтринному сигналу от аннигиляции или распадов частиц темной материи в центре нашей Галактики. Для минимальной конфигурации из 12 кластеров за 1 год наблюдения получены ожидаемые ограничения на скорость аннигиляции частиц темной материи и ее время жизни для нескольких каналов аннигиляции/распада. Полученная чувствительность сравнима с существующими пределами других нейтринных телескопов.

Рассмотрена феноменология гипотетических нейтральных калибровочных бозонов с недиагональным по ароматам взаимодействием с фермионами. Такие частицы естественным образом появляются в моделях с дополнительными пространственными измерениями, объясняющими иерархию масс и смешиваний кварков, заряженных лептонов и нейтрино. Получено общее соотношение между массами новых калибровочных бозонов и их константами взаимодействия с фермионами; для конкретных реализаций модели даны количественные оценки. В рамках соответствующей эффективной модели получена связь между скоростями редких распадов мезонов и параметрами, характеризующими возможность наблюдения таких бозонов на Большом адроне коллайдере.

Построено самосогласованное квазиклассическое описание распада ложного вакуума индуцированного столкновениями частиц в  $(1+1)$ -мерной теории поля. Численно для конкретного потенциала показано, что вероятность такого процесса растет с ростом энергии сталкивающихся частиц, но остается экспоненциально подавленной при всех энергиях. При этом при энергии выше некоторого критического значения, зависящего от числа сталкивающихся частиц, экспонента подавления остается постоянной. При таких энергиях процесс описывается особым классом комплексных решений классических уравнений поля вдоль действительного времени. Предложены аргументы в пользу того, что теория возмущений для процессов распада ложного вакуума, индуцированного двухчастичными столкновениями, на фоне таких решений оказывается стабильной даже в пределе высоких энергий. В этом высокоэнергичном режиме процесс происходит путем испускания большого количества низкоэнергичных частиц, соответствующих энергии классического решения, а избыток уносится изначально сталкивающимися частицами.

## 1.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведем наиболее важные результаты, полученные коллективом Отдела теоретической физики в 2015 г.:

Построена модель конформной космологии, являющаяся альтернативной к моделям инфляции, основанная на представлении о распаде ложного вакуума в классе конформных теорий.

Подведен итог работе, посвященной изучению моделей ранней Вселенной с конформной симметрией, механизмам генерации и свойствам возмущений в этих моделях.

Для класса дилатационно-инвариантных теорий с галилеоном доказана запрещающая теорема, утверждающая наличие возмущений, распространяющихся со сверхсветовыми скоростями в метрике Фридмана-Робертсона-Уокера.

На основе анализа кривых блеска сверхновых типа Ia получены ограничения на пространственно-временные вариации скорости распада никеля-56.

Завершено исследование возможного распределения барионного вещества около нашей Галактики при помощи меры дисперсии, измеряемой по сигналам от пульсаров в шаровых скоплениях и Магеллановых облаках.

Предложен квазиклассический метод вычисления S-матрицы для двух-стадийных гравитационных переходов, включающих в себя коллапс материи с образованием черной дыры и испарением последней.

Предложен конкретный вариант модификации метода beta-разложения улучшающий сходимость рядов теории возмущений в области низких и средних энергий.

Разработан метод вычисления неупругих структурных функций дейтрона в области возбуждения нуклонных резонансов и переходной области к глубоко-неупругому рассеянию.

Проведены вычисления дифференциальных сечений неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$ .

Исследованы партонные распределения в тяжелых ядрах ( $^{56}\text{Fe}$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) в области высоких инвариантных переданных импульсов  $Q$ .

Изучена феноменология моделей с асимметричной темной материей - хилогенезиса – в экспериментах на ускорителях (LHC).

Изучена феноменология смешивания в хиггсовском секторе суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии.

Коллаборацией “Байкал” при участии коллектива ОТФ исследована чувствительность нейтринного телескопа Байкал-ГВД к нейтринному сигналу от аннигиляции или распадов частиц темной материи в центре нашей Галактики.

Рассмотрена феноменология гипотетических нейтральных калибровочных бозонов с недиагональным по ароматам взаимодействием с фермионами.

Построено самосогласованное квазиклассическое описание распада ложного вакуума индуцированного столкновениями частиц в (1+1)-мерной теории поля.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

## 1.5 ПУБЛИКАЦИИ

1. M. Libanov and V. Rubakov / Conformal Universe as false vacuum decay // Phys. Rev. D91 (2015) 10, 103515, arXiv:1502.05897
2. S. Mironov / Properties of perturbations in conformal cosmology // Phys.Part.Nucl. 46 (2015) 6, 891-918
3. R.Kolevatov / Superluminality in dilatationally-invariant generalized Galileon theories // Phys.Rev. D92 (2015) 12, 123532
4. Ivan Karpikov, Maxim Piskunov, Sergey Troitsky / Constraining spacetime variations of nuclear decay rates from light curves of type Ia supernovae // Phys.Rev. D91 (2015) 12, 127301
5. F. Bezrukov, D. Levkov and S. Sibiryakov / Semiclassical S-matrix for black holes // arXiv:1503.07181 [hep-th], JHEP 1512 (2015) 002
6. A. L.Kataev and S. V. Mikhailov / Generalization of the Brodsky-Lepage-Mackenzie optimization within the  $\beta$ -expansion and the principle of maximal conformality // Phys. Rev. D 91 (2015) 1, 014007
7. S.A.Kulagin and R.Petti / Nuclear Parton Distributions and the Drell-Yan Reaction// arXiv:1512.03291 [hep-ph]; Proceedings of 23rd International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2015), 27 Apr - 01 May 2015. Dallas, Texas, United States
8. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov / Collider signatures of Hylogenesis // Phys.Rev. D91 (2015) 3, 035005
9. K.O. Astapov, S.V. Demidov / Sgoldstino-Higgs mixing in models with low-scale supersymmetry breaking // JHEP 1501 (2015) 136
10. A.D. Avrorin et al. / Sensitivity of Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of Galactic dark matter halo // JETP Lett. 101 (2015) 5, 289-294
11. S.V. Demidov, O.V. Suvorova / Indirect searches for dark matter at Baksan and Baikal // Phys.Part.Nucl. 46 (2015) 2, 222-229
12. Sergei Demidov, Dmitry Levkov / High-energy limit of collision-induced false vacuum decay // JHEP 1506 (2015) 123
13. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, et al. Decrease of Atmospheric Neutron Counts Observed during Thunderstorms. // Phys. Rev. Lett. 114, 125003 (2015).
14. ALEKSEENKO, V., ARNEODO, F., BRUNO, G., DI GIOVANNI, A., FULGIONE, W., GROMUSHKIN, D., SHCHEGOLEV, O., STENKIN, Y., STEPANOV, V., SULAKOV, V. and YASHIN, I., 2015. Alekseenko et al. Reply. Physical Review Letters, 115(17), 179502.

15. Д. М. Громушкин, В. И. Волченко, А. А. Петрухин, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, И. И. Яшин / Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ // ЯФ, том 78, (2015), 379-382.
16. Д.М. Громушкин, В.И.Волченко и др. / Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32 // Известия РАН, серия Физическая, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 414–416
17. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. / Вариации нейтронного потока во время гроз // Известия РАН, серия Физическая, (2015), Vol. 79, No. 5, pp. 739–741.
18. S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao / Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude // Proc. 34<sup>th</sup> ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 343.
19. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin / EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32 // Proc. 34<sup>th</sup> ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 427.
20. B. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi et al. / Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment // ArXiv:1512.01326v1 [astro-ph.IM]
21. YU.V.STENKIN, D.M.GROMUSHKIN, A.A.PETRUKHIN, O.B.SHCHEGOLEV, V.I.STEPANOV, V.I.VOLCHENKO, I.I. YASHIN AND E.A. ZADEBA. /EAS thermal neutron lateral and temporal distributions // arXiv:1512.02042v1 [astro-ph.IM].
22. D. Gorbunov, I. Timiryasov / Testing vMSM with indirect searches // Phys.Lett. B745 (2015) 29
23. A.L. Kataev, V.S.Molokoedov / Fourth-order QCD renormalization group quantities in the V scheme and the relation of the  $\beta$  function to the Gell-Mann–Low function in QED // Phys. Rev. D92 (2015) 5, 054008
24. Я.В. Жежер, Э.Я. Нугаев, Г.И. Рубцов / Исследование распределения горячего газа в гало Млечного Пути при помощи меры дисперсии пульсаров // Письма в Астрономический журнал, т. 42, №3. стр 1-9 (2016)
25. S.V. Demidov, D.G. Levkov / Semiclassical description of soliton-antisoliton pair production in particle collisions», JHEP 1511 (2015) 066
26. E.Nugaev and A.Shkerin / Toward the correspondence between Q-clouds and sphalerons // Phys. Lett. B 747 (2015) 287
27. I.E.Gulamov, E.Y.Nugaev, A.G.Panin and M.N.Smolyakov / Some properties of U(1) gauged Q-balls // Phys. Rev. D 92 (2015) 4, 045011
28. Y. Zenkevich / Generalized Macdonald polynomials, spectral duality for conformal blocks and AGT correspondence in five dimensions // JHEP 1505 (2015) 131
29. D. Gorbunov, I. Timiryasov / Decaying light particles in the SHiP experiment. II. Signal rate estimates for light neutralinos // Phys.Rev. D92 (2015) 7, 075015

## 2 Отдел экспериментальной физики

### 2.1 ГЕРДА

Руководитель И.Р. Барабанов

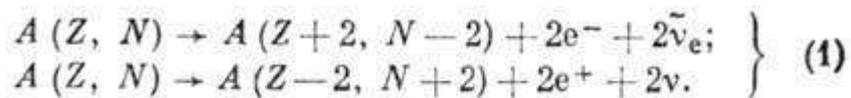
Исполнители: Л.Б Безруков, В.И. Гуренцов, А.В. Вересникова, Е.А. Янович

#### 2.1.1 Реферат

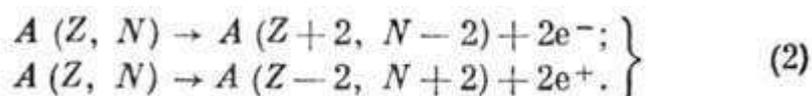
Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Его целью является определение природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможное нарушение лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия для физики частиц и космологии. Эксперимент GERDA предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада  $^{76}\text{Ge}$ . Основным преимуществом проекта является применение пассивной защиты из жидкого инертного газа и создание германиевых кристаллов нового типа, обеспечивающих высокую степень дискриминации фоновых событий по форме импульса. Проект включает три последовательные фазы. В 2013 г. Завершена первая фаза эксперимента. В результате получен верхний предел для периода полураспада  $^{76}\text{Ge}$  –  $2,1 \cdot 10^{25}$  лет (90%). В течение 2015 г была закончена подготовка второй фазы эксперимента, в которой наряду с модифицированными старыми кристаллами, будут использованы 30 новых кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. VTG кристаллы).

#### 2.1.2 Введение

ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД ( $2\beta 0\nu$ ) - особый вид бета-распада ядер, при котором ядро испускает два электрона или позитрона, превращаясь в ядро-изобару с зарядом  $Z \mp 2$  ( $Z$  - заряд родительского ядра). В случае сохранения лептонного числа Д. б.-р. сопровождается испусканием двух электронных антинейтрино или нейтрино:



Если лептонное число не сохраняется, нейтрино может быть истинно нейтральной частицей, т. е. совпадать со своей античастицей. Такое нейтрино называют майорановским. В этом случае возможен  $2\beta 0\nu$  распад:



Процесс БДБР происходит с нарушением закона сохранения лептонного числа и возможен только при выполнении двух условий:

- 1) нейтрино является майорановской частицей
- 2) масса нейтрино отлична от нуля.

В современной “классической” Стандартной модели частиц масса нейтрино строго равна нулю и БДБР невозможен. Однако одним из великих физических открытий начала 21-го века является открытие эффекта осцилляции нейтрино. Существование этого эффекта однозначно свидетельствует о наличии массы нейтрино и необходимости расширения Стандартной модели процесс БДБР становится возможным. Результаты экспериментов позволяют определить только разности квадратов масс различных типов нейтрино, но не позволяют определить их абсолютные значения.

В простейшем расширении Стандартной модели БДБР происходит в результате обмена легкими Майорановскими нейтрино или смесь правых токов в слабом взаимодействии, при этом время жизни изотопа относительно БДБР обратно пропорционально массе нейтрино. Таким образом поиск БДБР позволяет в случае положительного результата подтвердить майорановскую природу нейтрино (как и предполагается в простейших моделях расширения Стандартной модели), так и получить оценку ее массы. Другим следствием наблюдения БДБР, возможно даже более важным как для физики частиц, так и для космологии, было бы открытие нарушения закона сохранения лептонного числа.

### 2.1.3 Основная часть. Эксперимент GERDA

В эксперименте GERDA (GermaniumDetectorArray) предполагается создан детектор нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада  $^{76}\text{Ge}$ . Сотрудничество GERDA состоит из 13 институтов из 5 стран. Принципиальная схема эксперимента GERDA основана на расположении открытых Ge детекторы внутри жидкого газа большого объема. Эта идея основана на выводе из результатов предшествующих экспериментов с германиевыми детекторами, что фоновые сигналы в значительной мере определяются внешним излучением. Для достижения низкого уровня фона используется комбинированная защита: в большой водяной бак со сверхчистой водой установлен цилиндрический криогенный сосуд диаметром 4 м и длиной 6 м из нержавеющей стали, содержащий жидкий аргон высокой чистоты. Для снижения фона от материала криостата на его внутренней поверхности установлена дополнительная защита из меди высокой чистоты.

Эскиз принципиальной схемы GERDA изображён на рисунке 2.1.1.

Жидкий инертный газ, используемый в качестве пассивной защиты, может быть

очищен до высокой степени чистоты по радиоактивным примесям, недоступной для твердотельной защиты, используемой в предыдущих экспериментах

Эскиз принципиальной схемы GERDA изображен на рисунке 2.1.2.



Рисунок 2.1.1 - Схема установки GERDA

Проект включает три последовательные фазы. Целью проекта является достижение индекса фона на уровне  $10^{-3}$  /кэВ.кг.год к концу второй фазы эксперимента и на основании полученных результатов разработку крупномасштабного проекта с массой  $\sim 1$  тонны  $^{76}\text{Ge}$ .

Вторая фаза эксперимента.

В 2015 г закончена подготовка второй фазы эксперимента

1. Изготовлены, испытаны и подготовлены к установке в криостат 30 кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BEG детекторы) из обогащенного  $^{76}\text{Ge}$ .
2. Модернизированы и готовы к использованию коаксиальные детекторы, используемые в первой фазе эксперимента, которые предполагается использовать во второй фазе эксперимента в параллель с новыми детекторами.
3. Смонтирована полная система все кристаллов (рисунок 3) и готова к установке.
4. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе

эксперимента GERDA выполнен поиск двойного бета распада ( $2\nu\beta\beta$ ) изотопа  $^{76}\text{Ge}$  на три возбужденных уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам обогащенным по изотопу  $^{76}\text{Ge}$ , погруженным в жидкий азот. Анализ был основан на поиске совпадений сигналов двух детекторов, в одном из которых регистрировался гамма квант от распада возбужденного состояния ядра  $^{76}\text{Se}$  и двух электронов от двойного бета распада в другом. Из отсутствия сигнала получены верхние пределы для искомых распадов на уровне  $T(1/2) > (1,6-2,3) \cdot 10^{23}$  лет. Полученные пределы превосходят на два порядка значения, полученные в предыдущих аналогичных экспериментах. По полученным результатам опубликована статья.

5. На основе анализа данных первой фазы эксперимента GERDA с полной экспозицией 17,9 кг.год и улучшенным анализом источников фона получено новое значение периода двух нейтринного бета распада Ge-76

$$T_{1/2, 2\nu} = (1.926 \pm 0.095) \times 10^{21} \text{ г}$$

По полученным данным подготовлена статья для публикации.

6. Разработана и создана система антисовпадений в установке ГЕРДА по поиску двойного бета распада германия-76 (рисунок 2). Система состоит из набора 810 сцинтилляционных волокон, образующих цилиндр высотой 2,2 м и диаметром 47 см вокруг основных германиевых детекторов. Сцинтилляционные волокна просматриваются 90 кварцевыми фотоумножителями. Система регистрирует сигнал от сцинтилляционных вспышек жидкого аргона. Проведены два сеанса предварительных измерений эффективности системы, Получено, что в эксперименте по регистрации двойного двух нейтринного бета распада германия-76 достигнуто снижение фона в 45 раз.



Рисунок 2 - Система светособирающих волокон

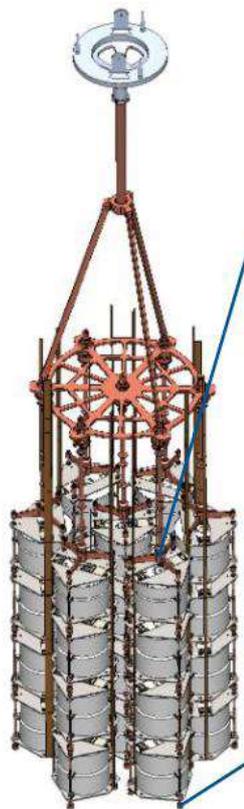


Рисунок 3 - Система детекторов полной сборки

## 2.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015 г закончена подготовка второй фазы эксперимента и выполнены первые тестовые измерения.

На основе анализа данных первой фазы эксперимента GERDA с полной экспозицией 17,9 кг.год и улучшенным анализом источников фона получено новое значение периода двухнейтринного бета распада Ge-76

$$T_{1/2,2\nu}=(1.926\pm 0.095)\times 10^{21} \text{ г}$$

Подготовлена публикация

## 2.1 ПУБЛИКАЦИИ

- 1 “ $2\nu\beta\beta$  decay of  $^{76}\text{Ge}$  into excited states with GERDA Phase I” J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 (2015) 115201 GERDA collaboration
- 2 “Results on  $\beta\beta$  decay with emission of two neutrinos or Majorons in  $^{76}\text{Ge}$  from GERDA Phase I” Eur. Phys. J. C 75 (2015) 416 GERDA Collaboration
- 3 “Improvement of the energy resolution via an optimized digital signal processing in GERDA Phase I” Eur. J. Phys. C 75 (2015) 255 GERDA collaboration
- 4 “Production, characterization and operation of  $^{76}\text{Ge}$  enriched BEGe detectors in GERDA” EPJC 75 (2015) 39 GERDA collaboration
- 5 “Upgrade of the GERDA Experiment” PoS (TIPP2014) 109 GERDA collaboration

2.2 Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и средних энергиях и перспективные разработки  
2.2.1 Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководители темы: доктор физико-математических наук В.С. Панту

Заведующий лабораторией: кфмн Н.А. Титов

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник кфмн Е.В. Гераскин

Старший научный сотрудник кфмн С.В.Задорожный

Старший научный сотрудник кфмн А.А. Голубев

Научный сотрудник кфмн А.А. Нозик

Ведущий инженер В.И. Парфёнов

Ведущий инженер А.И. Белесев

Научный сотрудник А.К. Скасырская

2.2.1.1 РЕФЕРАТ

Отчет 7 с., 3 рис.

МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК.

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск массы нейтрино в бета распаде. Проведена модернизация отдельных элементов установки, включая высоковольтную систему, вакуумного оборудования. Полностью обновлено и опробовано программное обеспечение сбора данных, контроля состава газов, вакуумных параметров. Проведен большой объём организационно-технических мероприятий с целью получения официального разрешения для работы с радиоактивным тритием. Данное разрешение получено, приобретено минимально значимое количество трития. В 2015 году проведен предварительный сеанс измерений бета-спектра трития с целью получения оценок чувствительности установки для поиска тяжёлых нейтрино. Испытан новый вариант дейтериевой лампы для использования в электронной пушке. Лампа имеет значительно лучшую стабильность интенсивности света. Обработаны спектры потерь электронов на изотопах водорода, протии и дейтерии при энергии 14 кэВ, 17 кэВ, 19 кэВ и 25 кэВ. По результатам обработки подготовлена статья. Проведена обширная вычислительная работа по оценке влияния различных систематических эффектов на измеряемый спектр электронов. В частности, объяснен эффект искажения функции пропускания спектрометра. Результаты этого

исследования опубликованы в виде электронного препринта и посланы в печать. Постоянно проводились модернизация и ремонт отдельных элементов вакуумной и криосистем.

#### 2.2.1.2 Введение

Стандартная модель физики частиц не полна. Об этом свидетельствуют ненулевая масса нейтрино и существование темной материи во Вселенной. Природа частиц темной материи неизвестна. К числу наиболее естественных кандидатов на роль темной материи относятся стерильные нейтрино. Эти частицы появляются в большинстве расширений Стандартной модели на случай массивных нейтрино. Стерильные (правые) нейтрино — это нейтральные лептоны. Являясь  $SU(2)$  синглетами, они не участвуют в слабых взаимодействиях. Однако, за исключением специальных вырожденных случаев, они смешиваются с активными (левыми) нейтрино и приводят к появлению дополнительных массовых состояний в спектре.

С экспериментальной точки зрения, в пользу существования стерильных нейтрино говорят результаты некоторых осцилляционных экспериментов с короткой базой (LSND и MiniBooNE), реакторная аномалия и результаты калибровки радиохимических экспериментов по измерению потоков солнечных нейтрино. Эти аномалии можно описать в предположении одного или двух легких стерильных нейтрино с массой порядка электронвольт. Современные космологические данные (измерение анизотропии реликтового излучения и первичный нуклеосинтез) также указывают на наиболее вероятное значение эффективного числа легких нейтрино равного четырем, что можно интерпретировать как вероятное существование одного легкого состояния стерильных нейтрино в дополнение к трем активным. С точки же зрения объяснения темной материи, наиболее интересным является диапазон масс стерильных нейтрино в области килоэлектронвольт.

По аналогии с тремя поколениями фермионов Стандартной модели, можно ожидать, что стерильные правые нейтрино также образуют поколения. Обнаружение одного поколения стерильных нейтрино придаст уверенности в существовании остальных поколений. Если одно из них образует темную материю, соотношение между массой и углом смешивания такого нейтрино существенно ограничено астрофизическими наблюдениями. Эти ограничения не распространяются на остальные поколения. В связи с этим прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино представляют особенный интерес, как в области значений параметров, соответствующих сектору темной материи, так и вне ее. Обнаружение стерильных нейтрино даст ответ сразу на ряд фундаментальных вопросов физики частиц (структура массовой матрицы нейтрино,

характер расширения стандартной модели, несохранение лептонного числа), астрофизики и космологии (темная материя).

Проект направлен на прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино в широкой области значений масс. Конкретная задача - значительное улучшение существующих ограничений на угол смешивания стерильных и активных нейтрино в области масс от десятков электронвольт и вплоть до 10 кэВ. Эта область значений масс недоступна в осцилляционных экспериментах, планирующихся в ряде мировых научных центров.

На установке «Троицк ню-масс» также проводится работа, связанная с исследованием свойств и возможных систематических эффектов в газовых тритиевых источниках по типу «Троицк ню-масс», что, в частности, также важно для установки KATRIN, Карлсруэ, Германия.

### 2.2.1.3 Полученные в 2015 году результаты

#### 2.2.1.3.1 Модернизация установки «Троицк ню-масс»

Проведена существенная модернизация криогенной и вакуумной частей установки. Произведён ремонт гидравлических клапанов отсечения жидкого азота в криогенных ловушках в парортутных насосах, выполнен ремонт и замена отдельных частей в сосуде-испарителе жидкого азота в системе вакуумной откачки контура, проведены испытания работоспособности двух высокопроизводительных магнитоэлектрических насосов с новыми источниками питания.

Модернизирован вакуумный стенд для испытания отдельных элементов установки. В частности, на нем проведено исследование возможности использования безоконных лавинных фотодетекторов в качестве регистраторов низкоэнергетичных электронов.

В июле 2015 года на установке успешно проведён отладочный сеанс с частичным включением вакуумной системы без запуска сверхпроводящих магнитов. Испытаны элементы вакуумной системы, а также патрон очистки от остаточных газов, проверены отдельные программные элементы контроля параметров установки.

Проведены дополнительные расчеты магнитного транспортного канала электронной пушки. На основании этих расчетов внесены некоторые изменения в систему пушки, в частности, установлен дополнительный коллиматор.

В целях повышения скорости системы регистрации и модернизации полностью заменена система накопления и передачи данных, установлены и проверены современные контроллеры считывания и управления сигналами. Полностью переписано программное обеспечение системы сбора данных. Кроме этого, создано программное обеспечение для высоковольтной системы, контроля токами сверхпроводящих магнитов, газового масс-

анализатора. Близка к завершению программа медленного контроля за всеми вакуумными и температурными датчиками.

### 2.2.1.3.2 Проведение сеанса измерений

Успешно завершен ряд организационных и технических мероприятий по получению разрешения работы с тритием. Разрешение получено, закуплено некоторое количество трития в пределах минимально значимой активности.

Как результат, в декабре месяце проведен сеанс первых измерений с тритием и с проверкой работоспособности всех систем установки после значительной модернизации. Начат набор статистики бета-спектра электронов с целью поиска сигналов от вклада стерильных нейтрино, Рисунок 2.2.1.1. Результаты обрабатываются.

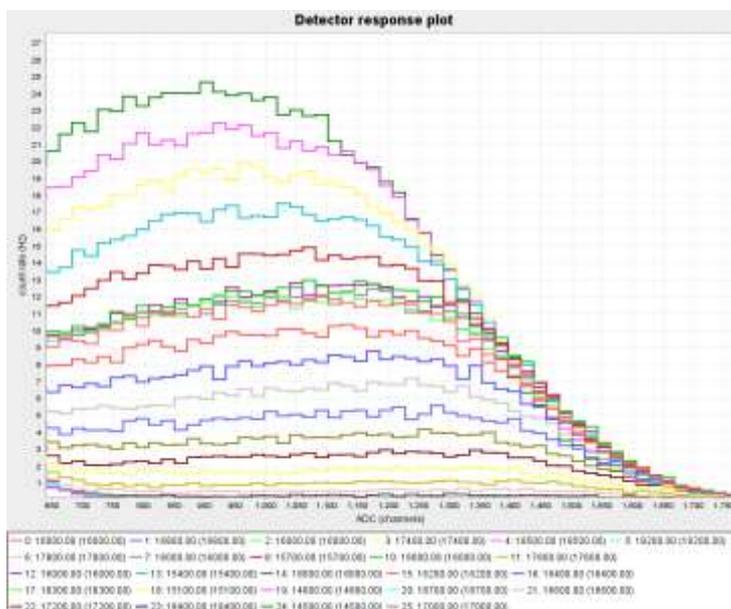


Рисунок 2.2.1.1 - Самые первые спектры амплитуды с кремниевого детектора при измерении с тритием для различных запирающих напряжений на спектрометре.

### 2.3 Работа над публикациями

Подготовлен препринт и опубликована статья с детальным описанием планируемого эксперимента и ожидаемыми результатами, Рисунок2.

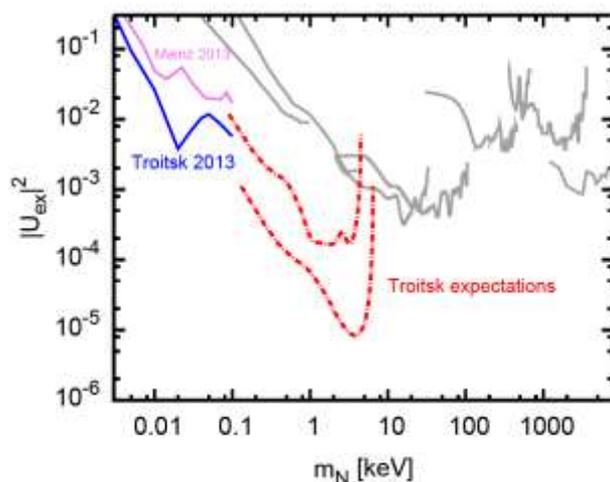


Рисунок 2.2.1.2 - Ожидаемые оценки на верхний предел матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино (arXiv:1504.00544).

Проведён ряд новых расчетов рассеяния электронов назад на регистрирующем детекторе и влияние этого процесса на свойства спектрометров, подобных нашему. Доля таких электронов достигает 15-20% и отражается в свойствах функции пропускания спектрометра. Это становится особенно важным для подготавливаемого в Германии другого эксперимента KATRIN с аналогичным спектрометром. Результаты расчетов объяснили ряд эффектов, наблюдавшихся ранее и остававшихся непонятыми. Написана и послана в печать статья с описанием полученных результатов. В декабрьском сеансе измерений с электронной пушкой еще раз была проверена и подтверждена правильность проведенных расчётов, Рисунок 2.2.1.3.

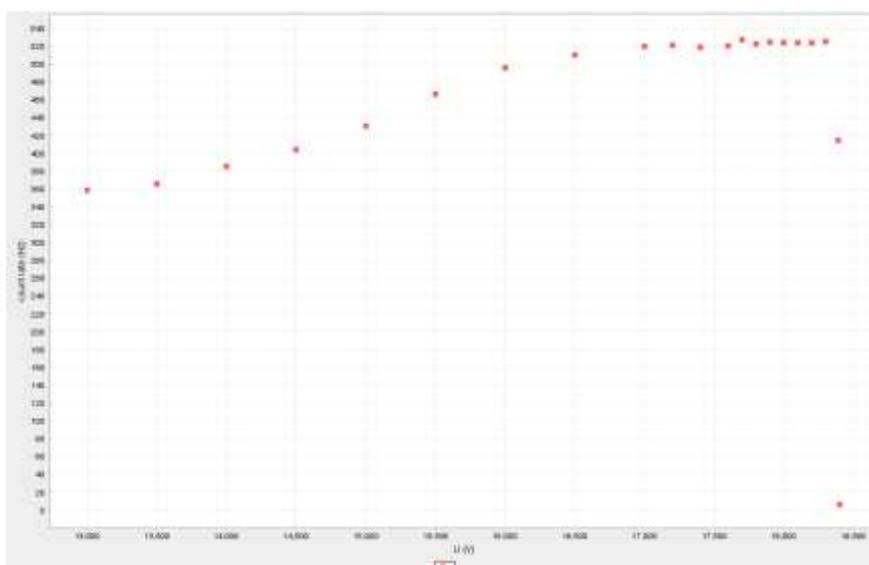


Рисунок 2.2.1.3 - Пример одного из замеров искажения функции пропускания спектрометра для электронов от пушки с энергией 18400 эВ в зависимости от напряжения на спектрометре. В интервале напряжений от 18400 В до 16500 В наблюдается плавное

падение интегрального спектра за счет рассеяния на детекторе. При еще меньших напряжениях происходит потеря адиабатичности в движении электронов и дальнейшее падение функции. <http://arxiv.org/abs/1511.06129>

#### 2.2.1.3.3 Участие в 2015 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

1. Нозик А.А. Доклад: "The DataForge framework for data acquisition and analysis", International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond September 6-10, 2015, Moscow, Russia. <http://csp2015.ac.ru/s9-2.html>
2. Коротеев Г.А. Доклад, "Status of "Troitsk nu-mass" experiment". Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015. [http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon\\_programme.htm](http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm)
3. Нозик А.А. Постер: "The DataForge software framework for scientific data processing automation", Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015. [http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon\\_programme.htm](http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm)

#### 2.2.1 Заключение. Наиболее важные достижения в 2015 году

- Выполнен ряд организационно-технических мероприятий, позволивший получить официальное разрешение на приобретение и работу с радиоактивным тритием.
- Осуществлена полная модернизация программного обеспечения сбора данных и отдельных элементов медленного контроля.
- На установке проведен полноценный сеанс измерений с радиоактивным тритием. Основная цель сеанса была в тестировании и отладке нового программного обеспечения сбора данных и отдельных элементов медленного контроля.
- Получены предварительные спектры бета-электронов в распадах трития в интервале энергий 13-19 кэВ.
- Завершена обработка результатов измерения рассеяния электронов на изотопах водорода H<sub>2</sub> и D<sub>2</sub> с энергией 14-25 кэВ.
- Исследован эффект влияния обратного рассеяния электронов на регистрирующем детекторе на функцию пропускания для спектрометров по типу MAC-E фильтров.
- Опубликована статья с полным описанием проводимого эксперимента.

#### 2.2.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. D.N. Abdurashitov et al., "The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino", Journal of Instrumentation 10 (2015) 10, T10005, [arxiv.org/abs/1504.00544](http://arxiv.org/abs/1504.00544).
2. P.V. Grigorieva, A.A. Nozik, V.S. Pantuev, A.K. Skasyrskaya, "The role of electron scattering from registration detector in a MAC-E type spectrometer", <http://arxiv.org/abs/1511.06129>, направлено в Journal of Instrumentation.

2.2.2 Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов  
УДК 539.12, 537.8

№ госрегистрации 01.2.00 305481

Руководитель темы к.ф.-м.н. Н.А. Титов

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. С.В.Задорожный

Научный сотрудник к.ф.-м.н. А.В. Лохов

#### 2.2.2 РЕФЕРАТ

Кол-во стр. – 11, рисунков – 7, таблиц – 2, список литературы – 15 наименований.

**МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СПЕКТР ВОЗБУЖДЕНИЙ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ.**

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного нейтрино в бета-распаде трития. Рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике КАТРИН с учетом внутреннего движения атомов в молекуле. Разработаны оптимальные критерии выделения сигнала стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития. Исследовался вклад различного представления спектра конечных состояний в измеряемую величину массы нейтрино.

#### 2.2.2 ВВЕДЕНИЕ

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку позволяет сделать выбор между различными моделями генерации массы, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино определяет динамику эволюции Вселенной. При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. Рисунок 2.2.2.1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

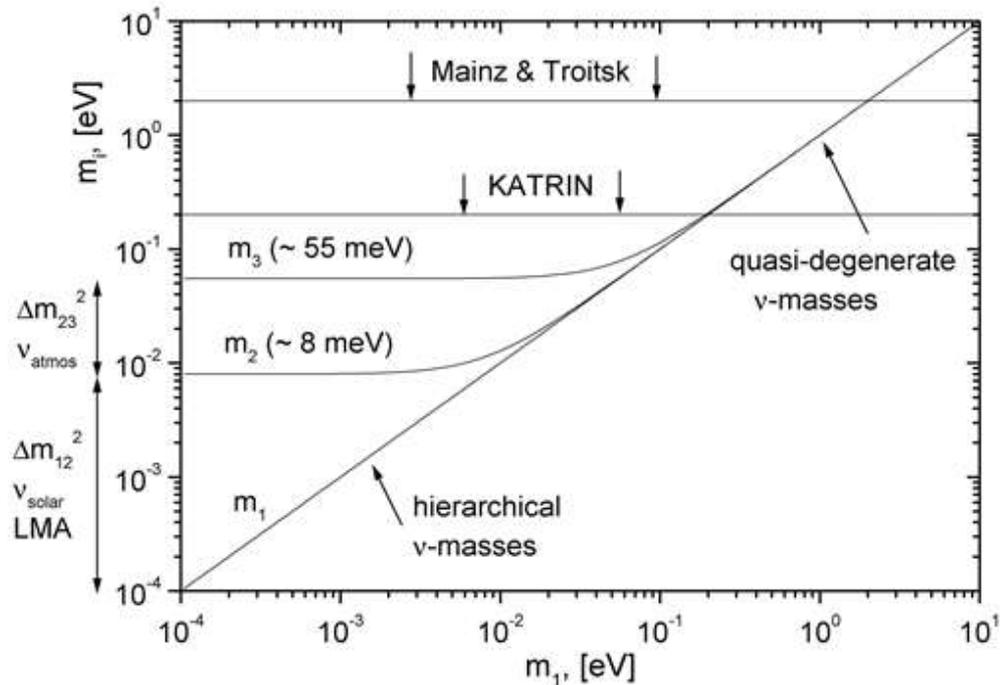


Рисунок 2.2.2.1 - Спектр «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майорановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ [1,2]. В 2016 году, в Технологическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) будет запущена новая установка в рамках проекта КАТРИН, которая позволит поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ [3].

В течение длительного времени, в качестве альтернативного источника данных о массе нейтрино рассматривались болометрические эксперименты по бета-распаду в рении-187 и К-захвату в гольмии-163. На сегодняшний день следует признать, что по разным причинам в реализации этих проектов возникли проблемы.

В тоже время появились новые предложения по поиску сигнала массы нейтрино в бета-распаде трития. К ним относятся проекты Project8 [4] и PTOLEMY [5]. В Project8 предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения

частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В проекте PTOLEMY используется широкий набор существующих и предложенных в Project8 экспериментальных методик в сочетании с источником большой площади на основе атомарного трития адсорбированного на поверхности графена. Оба проекта находятся на стадии R&D, хотя в рамках Project8 уже получен важный результат, который может быть использован, в частности, в проекте КАТРИН.

Из изложенного выше следует, что в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино на обозримое будущее только проект КАТРИН должен дать лучшее ограничение на массу электронного антинейтрино.

Следующей большой программой, обсуждаемой для установки КАТРИН, является поиск сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно  $1\text{эВ}/c^2$  до нескольких  $\text{кэВ}/c^2$  [6] и [7]. В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино содержат три собственных состояния с определенной массой. Есть основания предполагать существование дополнительных состояний, преимущественно стерильных, т.е. не участвующих в взаимодействиях в рамках Стандартной модели. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси таких состояний в активных нейтрино. Как можно наблюдать сигнал стерильных нейтрино в бета-распаде? Общепринято, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое массовое состояние. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады и их можно попытаться выделить.

Проект КАТРИН является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей, системах сбора данных и т.д. Следует отметить также применение последних достижений в области программного обеспечения, как сбора, так и обработки физических данных.

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН.

Project8 получен важный результат, который может быть использован, в частности, в проекте КАТРИН. Создан специальный резонатор и схема регистрации сигнала, позволяющие детектировать прохождение единичного электрона с энергией масштаба десятка  $\text{кэВ}$  и приводящие к вариации энергии регистрируемого электрона не более  $0,1\text{эВ}$ .

Применение созданного прибора в качестве источника стартового сигнала может позволить перевести работу спектрометра в режим по времени пролета и увеличить тем набора статистики. Повышение точности данных вблизи конца спектра сделает возможным получение данных о примеси правых токов в бета-распаде трития, а также обнаружить сигнал легкого (с массой около  $1\text{эВ}/c^2$ ) стерильного нейтрино.

#### 2.2.2.1 Проект КАТРИН

Из основных узлов установки КАТРИН: торцевая секция (RS), безоконный газовый источник (WGTS), фронтальная транспортная секция (DPS-2F), криогенная откачная секция (CPS), предварительный спектрометр (PS) находятся в разной степени готовности (см. Рисунок2). Предварительный спектрометр (PS) был изготовлен первым и его испытания завершены. На основном спектрометре (MS) и детекторе (D) проводятся многочисленные тесты. Ведется монтаж газового источника (WGTS) и торцевой секции (RS). В середине 2016-го года планируется завершить монтаж и наладку компонентов и приступить к запуску установки в целом.

В рамках Project8 получен важный результат, который может быть использован в проекте КАТРИН. В университете штата Вашингтон создан специальный резонатор и схема регистрации сигнала, позволяющие детектировать прохождение единичного электрона с энергией масштаба десятка кэВ. Вариация энергии регистрируемого электрона (ускорение/торможение) составляет не более 0,1 эВ. Версия разработанной аппаратуры смонтирована в промежутке между предварительным и основным спектрометрами, где уже выделена наиболее важная часть спектра вблизи конечной точки с суммарным потоком электронов в несколько десятков Герц. При такой скорости счета применение созданного прибора в качестве источника стартового сигнала может позволить перевести работу спектрометра в режим по времени пролета и увеличить тем самым скорость набора статистики при поиске массы активного нейтрино. Повышение точности данных вблизи конца спектра сделает возможным получение данных о примеси правых токов в бета-распаде трития, а также обнаружить сигнал легкого (с массой около  $1\text{эВ}/c^2$ ) стерильного нейтрино.

Выявленная ранее проблема, состоящая в эманации Радона-219 из материала геттера откачивающего основной спектрометр, решена. В промежутке, отделяющем объем геттерного насоса от основного спектрометра, установлена охлаждаемая жидким азотом ловушка, позволяющая перехватывать поток радона на необходимом уровне.

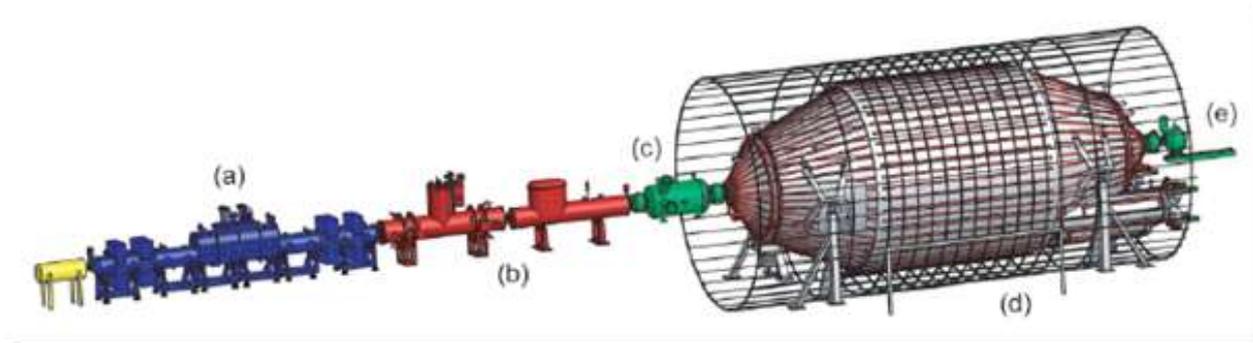


Рисунок 2.2.2.2 - Установка КАТРИН. а – безоконный газовый источник трития, б – канал транспортировки электронов с дифференциальной и криогенной откачками, с – предварительный спектрометр, d – основной спектрометр, e – сегментированный детектор.

Собственный фон спектрометра находится сейчас на уровне 400 мГц и ведется интенсивное исследование его природы.

### 2.2.2.3 Работы по проекту КАТРИН и ИЯИ РАН

#### 2.2.2.3.1 Влияние упругого рассеяния электронов на потерю энергии в газовом источнике.

Упругое рассеяние электронов на атоме трития при низких температурах приводит к пренебрежимо малым потерям ими энергии. Существование «нулевых» колебаний атомов в молекуле трития существенно увеличивает величину потерь.

На XXIX-м совещании коллаборации КАТРИН (5-8 октября 2015 года, Карлсруэ, Германия) был представлен доклад «Влияние упругого рассеяния электронов на функцию отклика в эксперименте КАТРИН». В докладе представлены результаты исследования систематических эффектов, а именно потерь энергии электроном в тритиевом газе за счёт упругого рассеяния. Такое исследование необходимо для оценки возможного вклада упругого рассеяния при моделировании эксперимента КАТРИН и дальнейшем при анализе экспериментальных данных. Одним из ранее неучтённых эффектов является вращательное и колебательное движение атомов в молекуле трития. Вращательные и колебательные энергетические уровни заполнены даже при низких температурах (~30К), это может вносить дополнительное размытие спектра в процессе упругого рассеяния электронов бета-распада на ядрах в молекулах. Такие эффекты были измерены в экспериментах [8] по рассеянию электронов на молекулах водорода и дейтерия с большой передачей импульса.

В нашей работе была выбрана модель молекулы трития на основе потенциала Морса, построена функция, связывающая переданный при рассеянии импульс и переданную энергию с распределением рассеивающих атомов по импульсам. С помощью этой функции с использованием дифференциального сечения упругого рассеяния электронов на молекулах трития строится функция потерь энергии, отражающая вероятность потери

электроном данного количества энергии при однократном упругом рассеянии (Рисунок3).

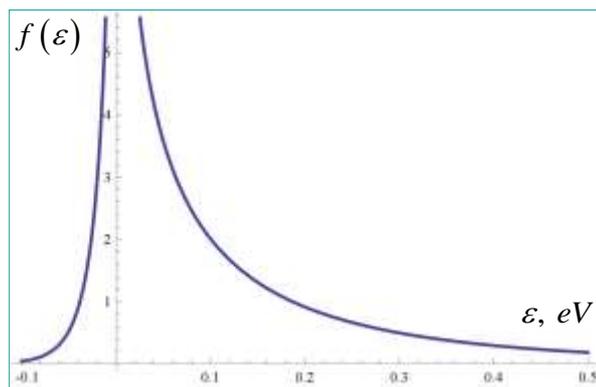


Рисунок 2.2.2.3 - Функция потерь энергии электрона при упругом рассеянии на молекуле трития

Наличие у данной функции значений в отрицательной области свидетельствует о том, что часть электронов приобретает дополнительную энергию при рассеянии. Затем вычислением свёртки функции потерь энергии с геометрическим разрешением спектрометра эксперимента КАТРИН получена функция отклика, выделенная красным на Рисунок 2.2.2.4.

Таким образом, в данной работе в рамках модели Морса движения рассеивающих ядер получена функция потерь энергии электронов при упругом рассеянии в тритиевом газе. Показано, что часть электронов может приобретать дополнительную энергию при упругом рассеянии. В то же время колебательное и вращательное движение ядер в молекулах не оказывает существенного влияния на функцию отклика в эксперименте КАТРИН

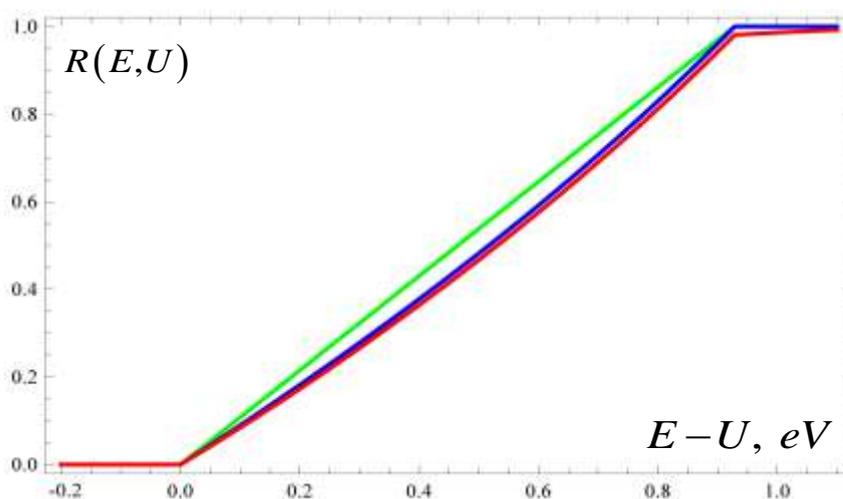


Рисунок 2.2.2.4 - Модельная функция отклика эксперимента КАТРИН без учета упругого рассеяния (зеленый, синий) и с учетом упругого рассеяния (красный)

#### 2.2.2.3.2. Анализ экспериментального спектра на присутствие примеси тяжелых стерильных нейтрино

Диапазон масс такого нейтрино предсказывается астрофизическими и космологическими оценками и лежит в области начиная от нескольких кэВ, что допускает поиск этого состояния нейтрино в спектре бета-распада трития в экспериментах КАТРИН и Троицк-ню-масс. Для поиска вклада дополнительного состояния нейтрино с массой порядка нескольких кэВ в спектре бета-распада трития можно использовать различные подходы.

Первый подход состоит в непосредственном фитировании экспериментальных данных с добавлением двух свободных параметров, соответствующих массе тяжёлого нейтрино и углу смешивания. Такой подход является наиболее чувствительным, но в то же время требует хорошего знания теоретического спектра. Любые неучтенные поправки к теоретическому спектру снижают чувствительность данного подхода.

Другим способом поиска дополнительного нейтрино в спектре бета-распада является построение статистических критериев, чувствительных к конкретному виду добавки к спектру от такого тяжёлого нейтрино. В рамках этого подхода ранее были предложены поиски характерного для тяжелого нейтрино вклада (типа «кинк») с помощью фильтров [9] и с применением вейвлет-анализа [10].

На 14-й Международной конференции по физике частиц и физике подземных экспериментов (7-11 сентября 2015 года, Турин, Италия) был представлен доклад по теме «Статистические критерии для поиска тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития». В докладе представлены предварительные результаты работы по разработке статистических методов поиска аномальных вкладов в экспериментальных спектрах, в частности для актуального в настоящее время поиска «тяжёлого» массового состояния нейтрино.

В нашей работе предложен новый систематический подход к построению специальных статистических критериев, основанный на фундаментальном методе оценивания – методе квазиоптимальных моментов [11]. Построены квазиоптимальный (quasi-optimal) критерий для поиска «кинка», а также критерий попарных корреляций соседей (pairwise neighbours'), чувствительный к различным аномальным вкладам в спектры. Для сравнения чувствительности данных критериев к вкладу тяжёлого нейтрино в спектр построены так называемые функции мощности критериев. Для сравнения добавлен стандартный критерий хи-квадрат.

На Рисунке 2.2.2.5 показаны функции мощности для трёх критериев и трёх значений моделированной массы тяжёлого нейтрино (10 кэВ, 7 кэВ, 5 кэВ).

Из построенных функций мощности видно, что квазиоптимальный критерий оказывается наиболее чувствительным (критерий тем эффективнее и чувствительнее, чем выше лежит его функция мощности). Кроме того, специальные критерии (квазиоптимальный и критерий попарных корреляций соседей) оказываются устойчивыми по отношению к одному из параметров (массе тяжёлого нейтрино). Именно эти два критерия сохраняют чувствительность при изменении реальной (моделированной) массы тяжёлого нейтрино. Таким образом, построенные критерии являются эффективными инструментами для поиска дополнительного тяжёлого нейтрино, не требуют точного знания теоретического спектра и могут быть использованы в эксперименте КАТРИН.

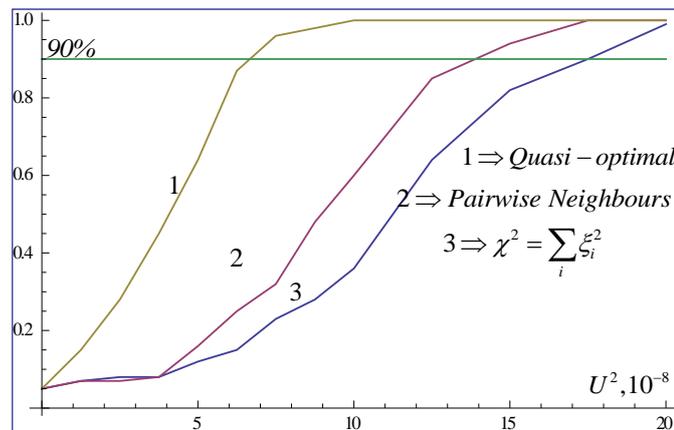
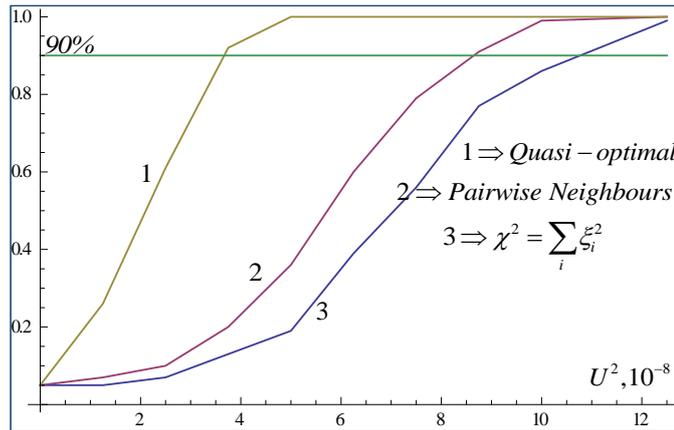
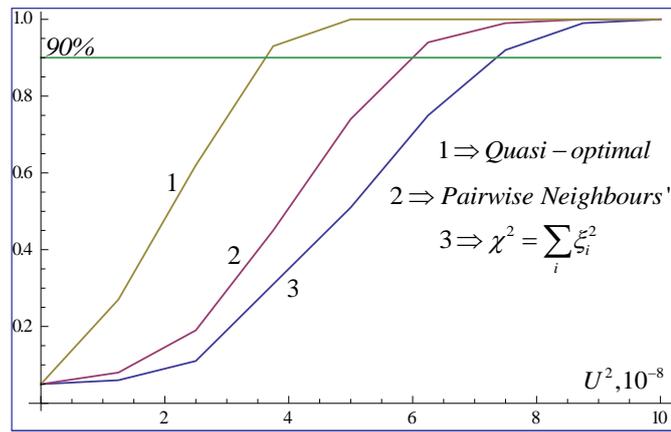


Рисунок 2.2.2.5 - Функции мощности критериев для поиска тяжёлого нейтрино с массой 10 кэВ (внизу), 7 кэВ (в центре) и 5 кэВ (вверху)

### 2.2.2.3.3. Сдвиг оценки массы нейтрино и представление спектра конечных состояний

В ряде экспериментов по измерению эффективной массы нейтрино в бета-распаде трития наблюдался эффект большого отрицательного квадрата массы (см. Таблица 2.2.3.1)

Таблица 2.2.3.1

Laboratory	$m_\nu^2, \text{eV}^2$	Fit range, eV
LANL	$-147 \pm 68 \pm 41$	825
LLNL	$-130 \pm 20 \pm 15$	1100
Troitsk	$\approx -20$ each run	275

В работе [12] предложено решение проблемы для экспериментов в Лос-Аламосе (*LANL*) и Ливерморе (*LLNL*), связанное с тем фактом, что при анализе данных этих экспериментов использовался спектр возбуждения конечных состояний из работы [13]. Аналогичный спектр в более продвинутых расчетах [14] имеет значение дисперсии на  $83 \text{ эВ}^2$  больше. Неучтенное размытие спектра приводит к появлению отрицательного сдвига квадрата массы:

$$\Delta m_\nu^2 = -2 \Delta(\sigma_{\text{FSD}}^2) \quad (1)$$

Таблица 2.2.3.2 (Из работы [12])

	LANL [15]	LLNL [16]	
<b>As published. Theory: Fackler <i>et al.</i> [59]</b>			
$\Delta_{00}$	18570.5(20)	18568.5(20)	eV
$Q_A$	18588.6(20)	18586.6(25)	eV
$m_\nu^2$	-147(79)	-130(25)	$\text{eV}^2$
<b>Re-evaluated. Theory: Saenz <i>et al.</i> [8]</b>			
$\Delta_{00}$	18571.2(20)	18569.2(20)	eV
$Q_A$	18589.3(20)	18587.3(25)	eV
$m_\nu^2$	20(79)	37(25)	$\text{eV}^2$

Экспериментальные данные для обсуждаемых экспериментов более не доступны и коррекция результатов проводилась с помощью соотношения (1). Результаты приведены в таблице 2.2.3.2.

Следует отметить, что с самого начала при анализе данных «Троицк ню-масс» использовался спектр из работы [15], который отличается от спектра [13] включением непрерывного хвоста. Несмотря на то, что суммарный вклад хвоста составляет менее

0.5%, он дает существенный вклад в дисперсию распределения (см. Рисунок 2.2.3.6)

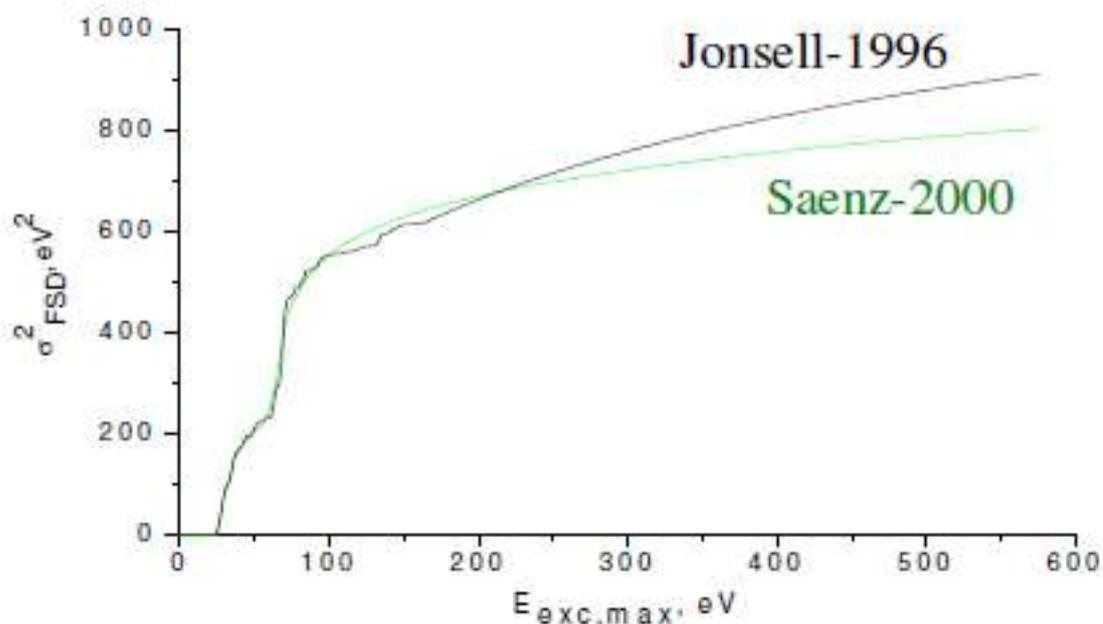


Рисунок 2.2.3.6 - Дисперсия распределения конечных состояний молекулярного иона из работ [14] и [15] в зависимости от верхнего предела интегрирования (анализа).

Для экспериментальных данных в Троицке были проведены расчеты с реальными данными. Сдвиг квадрата массы приведен в зависимости от нижнего предела анализа, который приведен в абсолютных цифрах (граничная энергия спектра 18575 эВ). Как видно из Рисунок7, отличие в результатах много меньше типичного значения отрицательного квадрата массы в эксперименте и не следует за абсолютной величиной и знаком разницы дисперсий двух представлений.

Из приведенного рассмотрения следует два вывода:

- отрицательный квадрат массы в эксперименте «Троицк ню-масс» не связан с представлением спектра возбуждений конечного молекулярного иона;
- наблюдается значительное отклонение от оценки по формуле (1), причины которого необходимо исследовать.

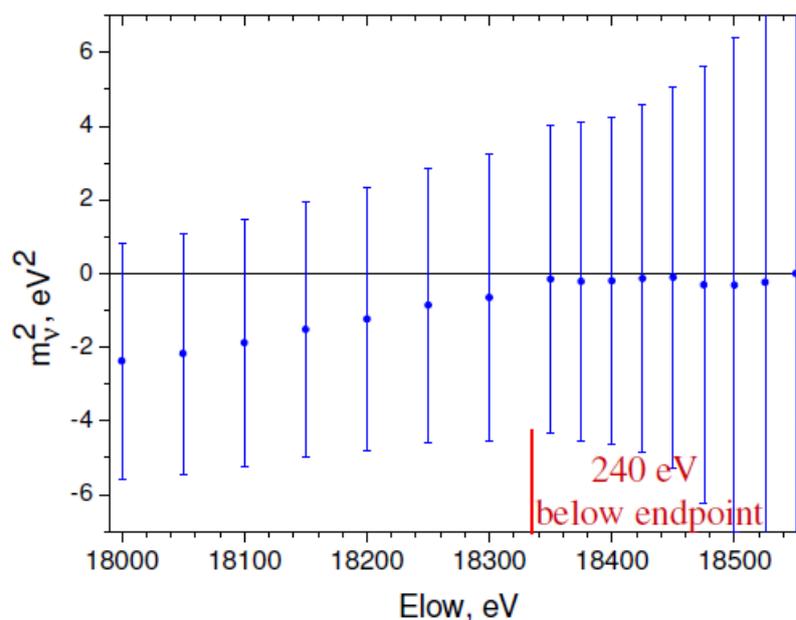


Рисунок 2.2.3.7 - Сдвиг измеренной величины квадрата массы нейтрино в эксперименте «Троицк ню-масс» при переходе от спектра конечных состояний из работы [14] к аналогичному спектру из работы [15].

#### 2.2.3.4 Результаты:

- рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике КАТРИН с учетом внутреннего движения атомов в молекуле;
- разработаны оптимальные критерии выделения сигнала стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития;
- исследовался вклад различного представления спектра конечных состояний в измеряемую величину массы нейтрино.

#### 2.2.3 Литература

1. C. Kraus et al. Eur. Phys. J. C **40**, 447–468 (2005)
2. V.M.Lobashev. Nuclear Physics A, Volume 719, 19 May 2003, pp. 153-160.
3. arXiv: hep-ex 0109033, 21 Sept 2001.
4. <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7090.pdf>
5. <http://www.project8.org/>
6. <http://web.ornl.gov/info/news/pulse/no430/story1.shtml>
7. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>
8. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>
9. Vos, Went, J. Phys. B 42 (2009) 065204
10. S. Mertens et al., JCAP02 (2015) 020
11. S. Mertens et al., Phys. Rev. D 91, 042005 (2015)
12. F.V. Tkachov, arXiv:physics/0604127

13. L. I. Bodine, D. S. Parno, and R. G. H. Robertson Phys. Rev. C 91, 035505
14. O. Fackler, B. Jeziorski, W. Kołos, H. J. Monkhorst, and K. Szalewicz, Phys. Rev. Lett. 55, 1388 (1985)
15. A. Saenz, S. Jonsell, and P. Froelich, Phys. Rev. Lett. 84, 242 (2000).
16. S. Jonsell, H. J. Monkhorst Phys. Rev. Lett. 76, (1996), 4476

Выступления на конференциях, рабочих совещаниях и подготовка публикаций

Доклад на научной конференции

1. А.В. Лохов «Статистические критерии для поиска тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития». 14-я Международная конференция по физике частиц и физике подземных экспериментов (ТАУР- 7-11 сентября 2015 года, Турин, Италия)

Выступления на рабочих совещаниях

XXVIII совещание по проекту КАТРИН:

2. С.В. Задорожный Status of Troitsk nu-mass setup
3. А.В. Лохов Statistical criteria for indications of heavy neutrinos XXIX совещание по проекту КАТРИН:
4. А.В. Лохов Influence on the response function from the elastic electron scattering in the source.
5. Н.А. Титов Final states distribution version and negative neutrino mass puzzle

## 2.2.3 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте « $\mu e$ »

Руководитель темы д.ф.-м.н Р.М. Джилкибаев

Исполнитель темы: Старший научный сотрудник В. Л. Матушко

### 2.2.3 Реферат

#### МЮОН. РЕДКИЕ РАСПАДЫ МЮОНА. НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННЫХ ЧИСЕЛ

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы сохранения лептонных квантовых чисел. Обнаружение связи между семействами лептонов будет свидетельством существования новых физических явлений вне рамок Стандартной модели. Цель работы - поиск процесса конверсии мюона на ядре, идущего с нарушением закона сохранения лептонных чисел, с уровнем чувствительности превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение в международном эксперименте  $\text{Mu}2e$  проводимом в FNAL (Chicago) США. Основная идея эксперимента предложена (1989 г.) и разработана сотрудниками института ядерных исследований. Повышение уровня чувствительности в эксперименте  $\text{Mu}2e$  на несколько порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми тяжелыми частицами с массами  $\approx 1000$  ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в экспериментальном исследовании основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO с новым фото детектором APD (Avalanche Photodiode) большой площади и разработке новой концепции эксперимента ( $3\text{in}1$ ), позволяющей поиск трех редких распадов  $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$  на одной установке.

#### 1 Введение

Поиск явлений и процессов, выходящих за пределы Стандартной модели представляет собой одну из главных задач современной физики. Поиск возможен как в экспериментах на коллайдерах с максимально доступной энергией (LHC, Tevatron), так и в прецизионных экспериментах, осуществляемых при относительно низких энергиях. При этом два указанных класса экспериментов дают взаимно дополняющую информацию. Важнейшей проблемой, стоящей перед прецизионными экспериментами, является обнаружение процессов, идущих с нарушением закона сохранения лептонных квантовых чисел. В то время, как Стандартная модель не содержит в себе механизмов нарушения электронного, мюонного и тау лептонного чисел, они естественным образом возникают практически во всех теориях, расширяющих Стандартную модель. Наибольший прогресс достигнут в экспериментальном исследовании редких мюонных процессов, идущих нарушением электронного и мюонного квантовых чисел. На рисунке 1 представлены результаты

экспериментов по измерению верхнего предела на относительную вероятность процессов идущих с нарушением лептонного квантового числа.

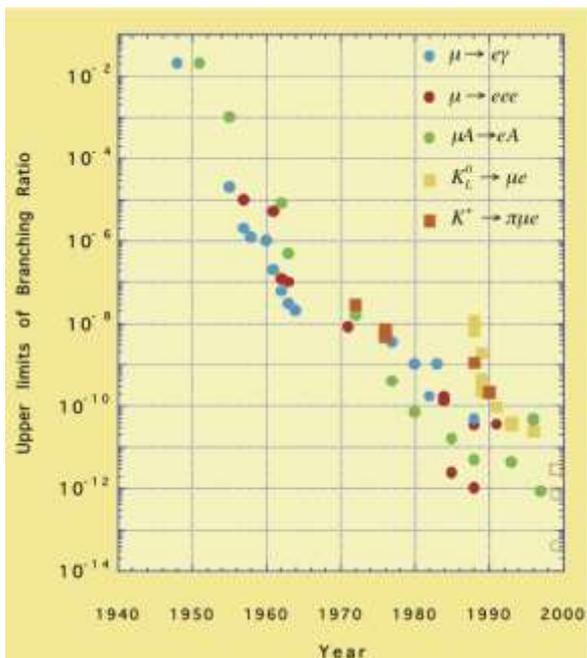


Рисунок 1. Результаты экспериментов по измерению верхних ограничений трех мюонных и двух каонных процессов, идущих с нарушением лептонных чисел.

Современная теория элементарных частиц не может предсказать процесс наиболее чувствительный к поиску нарушения лептонных чисел. Поиск трех редких мюонных процессов ( $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$ ) чувствительных к трем возможным новым взаимодействиям лептон-кварк, лептон-фотон и лептон-лептон на базе одной установки повышает вероятность открытия новых физических явлений связанных с нарушением лептонных чисел. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре был принят DOE (Department of Energy, US) 11 ноября 2009.

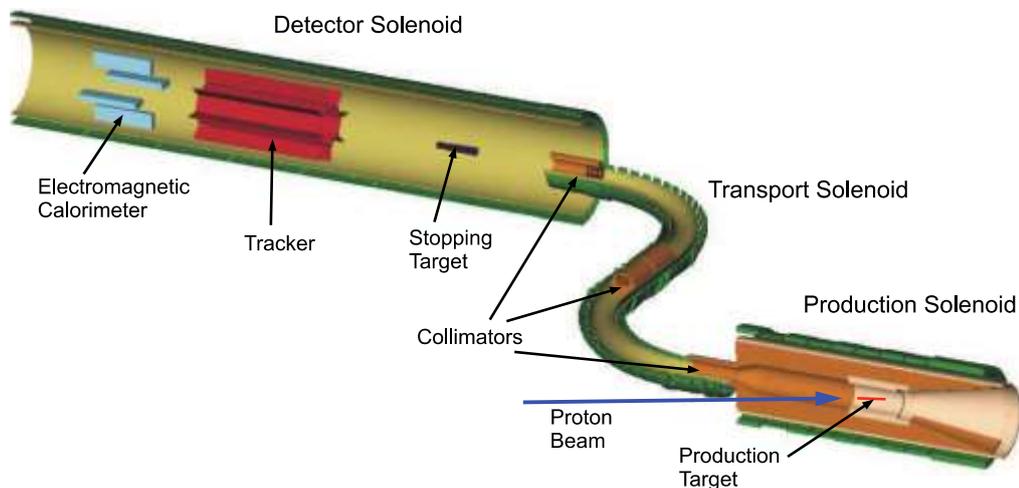


Рисунок 2. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре.

### 2.1 Состояние эксперимента «Mu2e» в 2015 году

В 2015 г. завершена стадия CD-1 эксперимента : разработка концепции, оценка стоимости эксперимента. Подготовлен TDR (Technical Design Report), который завершает эту работу. Одобрен и утвержден бюджет следующей стадии CD-2/3 эксперимента комитетом DOE США в 2015 г. Планируется завершить стадию CD-2 в 2016 г. и переход к стадии CD-3 завершающей создание установки.

### 2.2 Разработка новой концепции (3in1) эксперимента Mu2e

Разработка новой концепции эксперимента (3in1) позволит вести поиск трех редких процессов ( $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$ ) на одной установке с одним общим набором модулей детекторов. Переход от одного из трех экспериментов к другому осуществляется простой перестановкой модулей. Велись работы по разработке нового метода поиска редких мюонных процессов, основанного на использовании пульсирующего протонного пучка и объединении источника мюонов, системы формирования пучка и детектирующей части установки в одну магнитную систему с неоднородным полем. Результаты детального моделирования искомых процессов и основных фонов процессов показывает, что разработанный метод повышает чувствительность эксперимента по поиску процессов ( $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$ ) по сравнению с существующим уровнем в  $10^5$ , 300 и 100 раз соответственно.

### 2.3 Исследования основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO

В рамках темы создана установка для исследования основных характеристик кристаллов LYSO, необходимых для прототипа калориметра эксперимента Mu2e. Кристалл LYSO состоит из следующих химических элементов  $\text{LuY}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ . Экспериментальная установка с системой съема информации на основе КАМАК, показана на Рисунок 3. Установка создавалась с помощью отделов КОРЭ (О. Каравичев, В. Постоев), ОЭФ (Ю. Рябов) и лаборатории ЛФЯР (В. Недорезов, А. Русаков).

Использование двух фотоприемников для регистрации света в кристалле LYSO, позволяет провести измерения основного вклада в энергетическое разрешение с помощью радиоактивного источника. Измерение разницы  $A_1 - A_2$  и суммы  $A_1 + A_2$  амплитуд сигналов APD позволяет оценить стохастический вклад в разрешение калориметра, обусловленный флуктуациями фото статистики и шумами электроники, в области низких энергий. Измерение основных характеристик кристаллов LYSO сопряжено с трудностями, связанными с собственным свечением в кристалле от радиоактивных примесей редкоземельного элемента Lu. Интенсивность собственных сцинтилляций составляет

величину равную  $500 \text{ Hz/cm}^3$ . Для исследуемого кристалла  $\text{LYSO:Ce}$  (95% Lu/ 5% Y) размером  $3 \times 3 \times 5 \text{ cm}^3$ , производства PROTEUS (USA), частота собственных сцинтилляций составляет величину - 18 kHz. Энергетический спектр этих сцинтилляций лежит в области до 1 МэВ.

Основную характеристику кристалла - энергетическое разрешение можно измерить при помощи радиоактивных гамма-источников с интенсивностью превышающих в несколько раз частоту собственных сцинтилляций или с помощью космических мюонов.

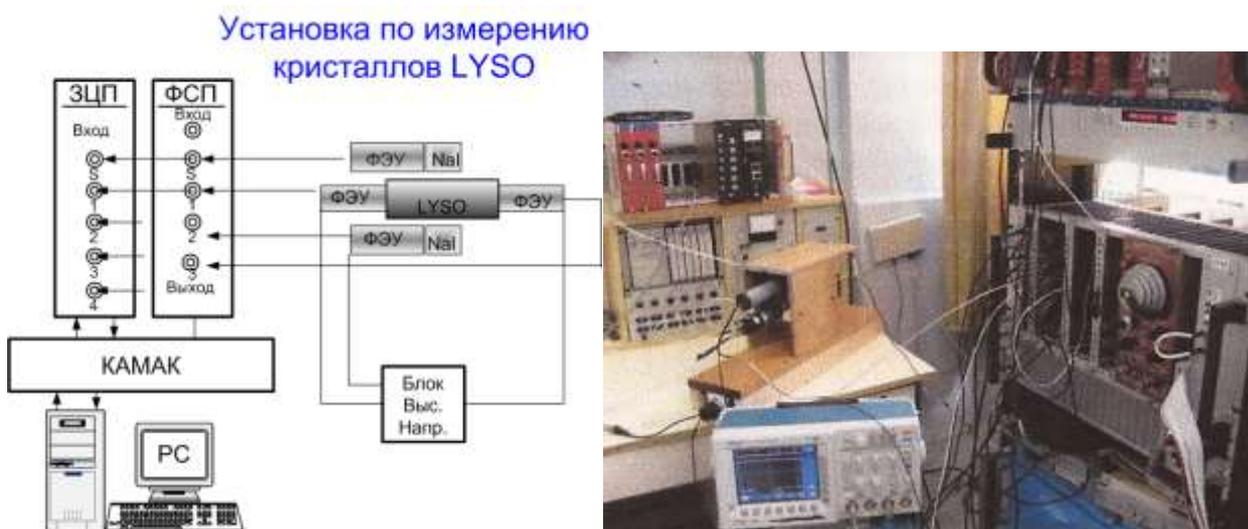


Рисунок 3 Схема установки (слева) и внешний вид установки (справа) для исследования свойств кристаллов LYSO.

Использование APD позволит улучшить энергетическое разрешение калориметра практически в два раза, по сравнению с ФЭУ, за счет увеличения квантовой эффективности фотодетектора. Квантовая эффективность APD больше, чем фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в 3-3.5 раза и составляет величину равную 70-80%. Для работы с APD необходим быстрый малощумящий зарядо-чувствительного предусилитель-формирователь. На Рисунок 4 показана схема предусилителя и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

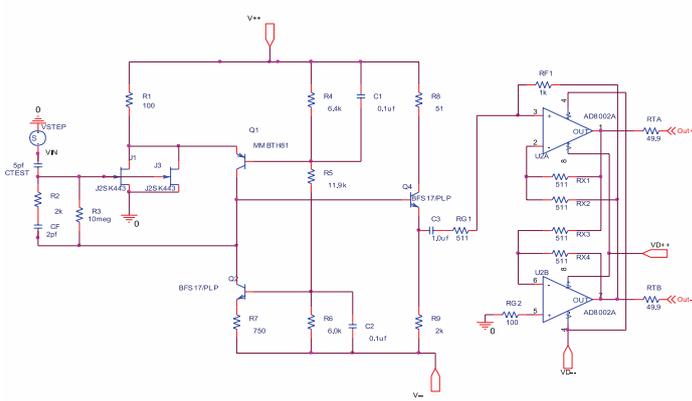


Рисунок 4 Схема предусилителя (слева) и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле, смоделированное с помощью GEANT4, хорошо описывается распределением Ландау с максимумом потерь равным 28 МэВ (Рисунок 2.2).

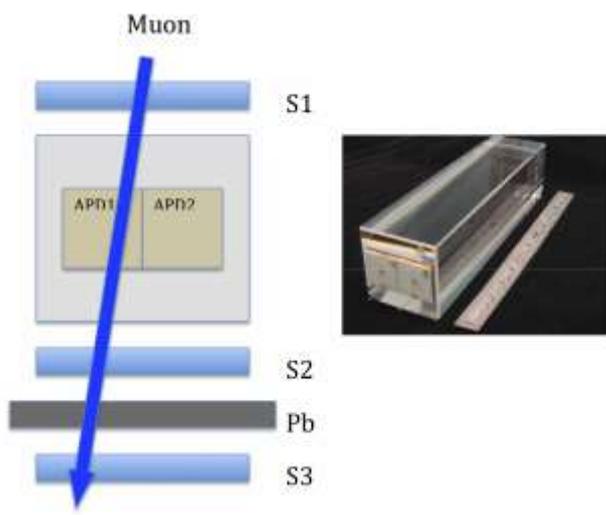
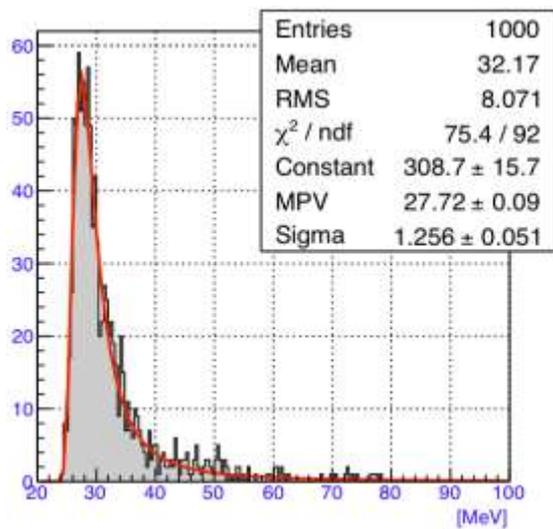


Рисунок 2.2 Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле (а). Схема измерения разрешающей способности кристалла LYSO с помощью космических мюонов (б) и внешний вид кристалла LYSO с приклеенными APD1-2 (в).

Относительная разрешающая способность кристалла LYSO ( $\sigma_E/E$ ) может быть оценена из спектра  $(A1-A2)/(A1+A2)$  (Рисунок 6 б) и составляет величину равную  $\sigma_E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$ , где  $E$  – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ.

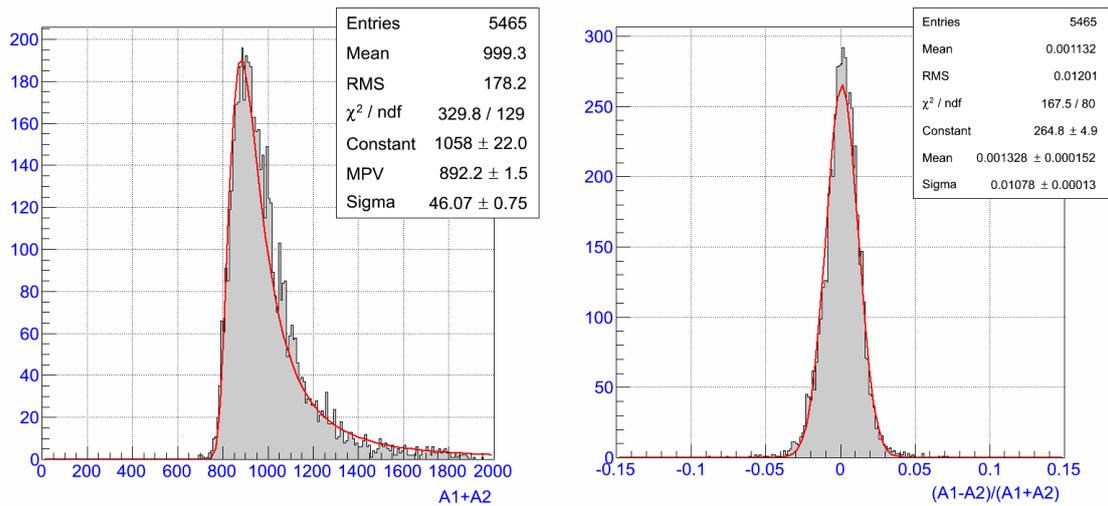


Рисунок 6 Спектр суммы (а) и относительной разности (б) сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле.

Во втором квартале 2015 г. проводились работы по новому измерению энергетического разрешения кристалла LYSO (30x30x50 mm<sup>2</sup>) с лавинными фотодиодами (APD 10x10мм<sup>2</sup> Hamamatsu) с новым электронным блоком по оцифровке и обработке сигналов APDs для калориметра эксперимента Mu2e.

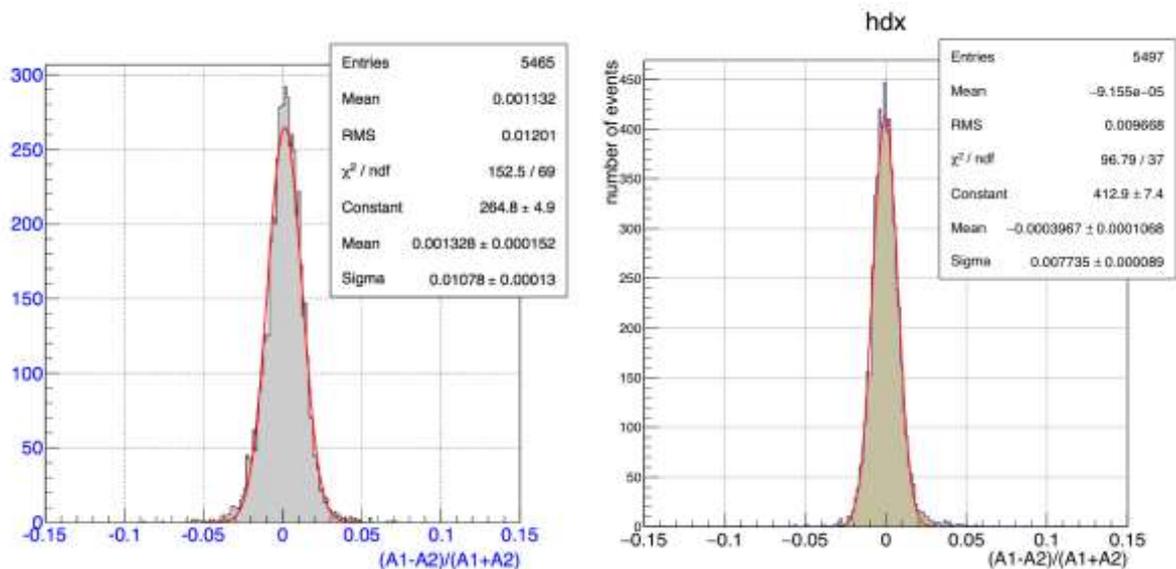


Рисунок 7 Спектр относительной разности сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле LYSO с помощью АЦП LeCroy ADC 2249A (слева) и CAEN WDT 5742 (справа).

Новые измерения проводились с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs, CAEN WDT 5742, которые существенно повышают точность измерения амплитуды и формы сигналов. Повышение точности измерения амплитуды с помощью блока WDT 5742 по сравнению с ADC 2249A связано с

использованием более точного метода определения амплитуды сигнала. Относительная разрешающая способность кристалла LYSO ( $\sigma_E/E$ ) может быть оценена из спектра  $(A1-A2)/(A1+A2)$  (Рисунок 7) и составляет величину равную  $\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$ , где  $E$  – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ,  $A1$  и  $A2$  амплитуды сигналов с APD1 и APD2, соответственно. Как видно из Рисунок7 измеренное энергетическое разрешение кристалла на 38% лучше, чем измерения ( $\sigma_E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$ ) проведенные ранее с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

### 3. Заключение. Наиболее важные достижения в 2015 году

Проведено новое измерение энергетическое разрешение кристалла, с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs (CAEN WDT 5742) которое позволяет улучшить на 38% энергетическое разрешение кристалла ( $\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$ ) по сравнению с ранними измерениями с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

### 4. Поддержка работы в 2015 г.

5. Адрес web-страницы проекта: [mu2e.fnal.gov](http://mu2e.fnal.gov)

### 6. Публикации в 2015 году

1. K. Afanciev, ... R. Djilkibaev et al. “Response of LYSO:Ce Scintillation Crystals to Low Energy Gamma-Rays”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 12, No. 2, pp. 319–324 2015.

2. R. Djilkibaev, O.Karavichev, V. Postoev “LYSO scintillator studies for a fast low-energy calorimeter” JINST 10, P03019, 2015.

### 7. План Российской группы в 2016 г.

Проведение измерений энергетического разрешения, с помощью космических мюонов, нового кристалла LYSO (3x3x11 см<sup>3</sup>) производства Saint-Gobain с разными лавинным фото-диодом (APD) большой площади Hamamatsu S8664 10x10 mm<sup>2</sup> и RMD 13x13 mm<sup>2</sup>. Измерение эффективности регистрации заряженных частиц для базового элемента годоскопа, сцинтилляционного волокна с новым кремниевым фото-умножителем (SiPM) SensL MicroFC-30035\_SMT с пониженным уровнем шумов.

### 8. Запрашиваемые деньги на 2016 год.

1. Покупка кремниевых ФЭУ и электроники APD – 200 т. руб.

## 2.2.4 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX

Руководитель темы, дфмн В.С. Пантуев

### Реферат

#### ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА

Исследования направлены на решение проблемы создания и изучение свойств плотной и горячей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Поставленная задача связана с исследованием КХД вещества при экстремальной температуре и плотности, которая затрагивает многие фундаментальные проблемы физики, такие как: природа конфайнмента и восстановление киральной симметрии, космология ранней вселенной, астрофизика компактных объектов. Работа выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве ИЯИ РАН с Брукхэвенской национальной лабораторией, США. Эксперимент PHENIX продолжается уже 15 лет. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в поддержании работоспособности дрейфовых камер центрального плеча установки, а также в работе над статьями, готовящимися к печати.

### 1 Введение

Построение квантовой хромодинамики (КХД) явилось поворотным пунктом в понимании природы сильного взаимодействия между элементарными частицами. КХД стала фундаментальной теорией сильного взаимодействия. Вскоре на стыке нескольких областей физики - ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики и в некоторой степени астрофизики- стало развиваться новое направление: исследование КХД вещества при экстремальной температуре и плотности. Это направление привлекает все большее внимание экспериментаторов и теоретиков последние 30 лет. Важным этапом в этом направлении был запуск в 2000 году ускорителя на встречных пучках, Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC, в Брукхэвенской Национальной Лаборатории США. Он был разработан и построен преимущественно под программу изучения столкновений ядер с массой вплоть до золота и энергией 200 ГэВ в системе центра масс двух нуклонов. В течение 15-ти лет на ускорительном комплексе ведёт измерения эксперимент PHENIX. В ближайшее время начнётся набор статистики в 2016 году. Основной проблемой для столь длительного эксперимента является поддержание и функционирование всех элементов установки, в частности, дрейфовых камер центрального плеча. В.С. Пантуев является ответственным экспертом, следящим за работоспособностью этих детекторов. Набор статистики, безусловно связан с обеспечением круглосуточной работы в течение полугодичного периода измерений.

Помимо экспериментальных работ, проводившихся на установке «PHENIX», ведётся подготовка к публикации научных статей. В.С. Пантуев в 2015 г. участвовал во внутри коллаборационных обсуждениях подготавливаемых статей.

## 2. Работы, проведённые на установке «PHENIX» в 2015 году

На установке успешно завершён очередной ремонт одной из дрейфовых камер. Камера, размер которой 2 на 4.5 метра, была вскрыта. Произведён визуальный осмотр проволок. Все порванные нити были удалены по специально разработанной технологии. В октябре месяце проведена проверка электроники одной из камер. Обнаружены две неработающие карты электроники, которые были извлечены и отремонтированы. Камеры проверены как по высокому напряжению, так и по системе считывания и готовы к началу новых измерений в феврале 2016 года.

Как член комитета по детекторам В.С. Пантуев участвует в ежемесячных совещаниях комитета.

## 3. Заключение. Наиболее важные достижения в 2015 году

Успешно выполнен ремонт дрейфовых камер. Принято участие в сменах по набору статистики.

## 4. Конференции

### 2.2. Публикации

1. A. Adare et al., Measurements of elliptic and triangular flow in high-multiplicity 3He+Au collisions at  $sNN\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 14, 142301.
- A. Adare et al.,  $\phi$  meson production in  $d$ +Au collisions at  $sNN\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 4, 044909.
2. A. Adare et al., Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at  $sNN\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 3, 034914.
3. A. Adare et al., Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in Cu+Cu and Au+Au Collisions at  $sNN\sqrt{s}=62.4$  and 200 GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 3, 034913.
4. A. Adare et al., Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized p+p collisions at  $s\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev. D91 (2015) 3, 032001.
5. A. Adare et al., Search for dark photons from neutral meson decays in  $p+p$  and  $d + Au$  collisions at  $sNN\sqrt{s}= 200$  GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 3, 031901.
6. A. Adare et al., Cross section for  $bb^-$  production via dielectrons in  $d$ +Au collisions at  $sNN\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 1, 014907.
7. A. Adare et al., Centrality dependence of low-momentum direct-photon production in Au+Au collisions at  $sNN\sqrt{s}=200$  GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 6, 064904.

8. A. Adare et al., Measurement of  $K^0_S$  and  $K^*_0$  in  $p+p$ ,  $d+Au$ , and  $Cu+Cu$  collisions at  $sNN\sqrt{=200}$  GeV. Phys.Rev. C90 (2014) 5, 054905.
9. A. Adare et al., Heavy-quark production and elliptic flow in Au+Au collisions at  $sNN\sqrt{=62.4}$  GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 4, 044907.
10. A. Adare et al., Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and (anti)protons in central  $d+Au$  collisions at  $sNN\sqrt{=200}$  GeV. Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 19, 192301.
11. N.N. Ajitanand et al., Comparison of the space-time extent of the emission source in  $d+Au$  and Au+Au collisions at  $sNN=200$  GeV. Nucl.Phys. A931 (2014) 1082-1087.
12. A. Adare et al., Measurement of  $Y(1S+2S+3S)$  production in  $p+p$  and Au+Au collisions at  $sNN\sqrt{=200}$  GeV/ Phys.Rev. C91 (2015) 2, 024913.

## 6. План группы ИЯИ в 2016 г.

1. Принять участие в планируемом сеансе измерений в 2016г.
2. Обеспечить текущий ремонт дрейфовых камер центрального спектрометра установки в периоды технологических остановок.
3. Как член комитета по детекторам, участие в ежемесячных совещаниях комитета.
4. Участие в подготовке и обсуждении текущих статей с экспериментальными данными, полученными на PHENIX.

## 2.2.5 Поиск тёмной материи Вселенной

Научный руководитель: д.ф-мат. наук Овчинников Б.М.

Изготовлена камера для прямого детектирования темной материи Вселенной с предполагаемой массой частиц около 0.5 Гэв. Результаты испытаний камеры в лабораторных условиях опубликованы в работах:

1. Б.М.Овчинников, И.И.Ткачев, В.В.Парусов, Препринт ИЯИ РАН 1405-2015.
2. Physics Journal, "The Methods for Direct Detection of WIMP with Mass  $\leq 0,5$  GeV/c<sup>2</sup>", Vol.1, No 2, 2015 p.31 (USA)
3. Universal Journal of Physics and Application. "The Methods for Detection of low Mass WIMP", 9(4) 2015, p.173 (USA)

## 2.2.6 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ 01.2.00 305485

Руководители темы:

Внс, дфмн

Ю.В. Рябов

Снс, дфмн

Ю.В. Григорьев

1. В соответствии с планом на 2015г по исследованию нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролета на установках НСВП-ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР-2М ЛНФ ОИЯИ группа ТРОНС ЛИРП ОЭФ (научный руководитель Ю.В.Рябов, исполнители: Ю.В.Григорьев, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, А.В.Новиков-Бородин, Е.В.Хаустов, Д.В.Хлюстин) проводила проверку работоспособности спектрометрической аппаратуры, детекторов нейтронов и гамма-лучей, а также вела работу по созданию нового быстродействующего жидкостного шестисекционного (n, $\gamma$ )-детектора на основе растворителя ЛАБ с гадолиниевым поглотителем нейтронов. Проведена работа по созданию многосекционного спектрометра на основе 8 кристаллов NaI на нейтронном пучке 50м пролетной базе импульсного нейтронного источника РАДЭКС, что позволит использовать спектрометрию множественности излучений в экспериментах по радиационному захвату и делению. К сожалению, из-за отсутствия финансовой поддержки не удалось реализовать технологий имеющейся проект удлинения двух пролетных баз и строительства павильона для детекторов и накопителей информации. Учитывая, что реализация проекта позволило бы улучшить энергетическое разрешение и фоновое условия в измеряемых спектрах, следует невыполненные планы 2015г перенести на 2016г или поздние сроки. В связи с удачной проводкой протонного пучка линейного ускорителя ММФ в начале 2016г. в зд. 25 на импульсный нейтронный источник РАДЭКС и свинцовый куб СВЗ $\square$ 100 реально выполнить намеченные планы для фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследований, в том числе: нейтрон-нейтронных и нейтрон-электронных взаимодействий и получения нейтрон-ядерных величин, необходимых для внедрения в практику передовых высоких технологий

2. Проведены расчеты характеристик предлагаемого времяпролетного спектрометра в комбинации со спектрометром по времени замедления СВЗ $\square$ 100, что позволяет более эффективно использовать нейтронный комплекс ММФ ИЯИ.

3. В рамках совместной работы ИЯИ г.Троицк и ОИЯИ г.Дубна проведена модернизация экспериментальной аппаратуры, что позволяет вести измерение времяпролетных спектров с высоким разрешением на пролетных базах импульсного источника нейтронов ИРЕН ЛНФ ОИЯИ.

4. Сделаны образцы-радиаторы из марганца, железа и никеля для изучения резонансной структуры нейтронных сечений радиационного захвата для этих материалов. Проведена работа по созданию экспериментальной установки на вертикальном канале РАДЭКС для исследования (n-n)-рассеяния и (n,e)-взаимодействия. Изготовлен нейтронпровод в виде стальной вакуумной трубы длиной 4м и внутренним диаметром 10 см для вертикального канала импульсного нейтронного источника РАДЭКС. Создана необходимая спектрометрическая и накопительная электронные системы с детекторами нейтронов и гамма-лучей на основе He-3 и Zn-S. Проводились исследования с пропорциональным счетчиком, наполненным дейтериевым газом до давления 2 атм. для поиска бинейтрона, тринейтрона и возможных других мультинейтронных нейтральных ядер. Проводилась работа по восстановлению установки для изучения сильновозбужденных ядер-изомеров, разрабатывался стенд в виде призм из Pb, U-238, Th-232 для моделирования различных вариантов мишеней нейтронных источников и решения вопросов АДС, трансмутации радиоактивных отходов атомной промышленности и наработки ядерного топлива электроядерным методом.

5. Для исследования оптических и акустических спектров колебания и дважды дифференциальных сечений неупругого и упругого рассеяния тепловых нейтронов в конденсированных средах подготавливался проект многоугольного спектрометра рассеяния нейтронов на конденсированных средах.

По результатам работы подготовлены и выпущены следующие публикации за 2014–2015гг:

1. Ю.В.Григорьев, И.А.Васильев, О.Н.Либанова, Ю.В.Рябов, Д.В.Хлюстин. Исследование резонансной структуры нейтронных сечений и их интегральных характеристик на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС, ИН-06. - Препринт ИЯИ, Троицк, (в печати)

2. А.А.Алексеев, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов. Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод. Препринт ИЯИ РАН, 1413/2015, ноябрь 2015, Москва 2015.

3. A.A.Alekseev, Yu.V.Grigoirev, V.A.Dulin, O.N.Libanova, A.V.Novikov-Borodin, V.L.Matushko, Zh.V. Mezentseva, Yu.V.Ryabov. The TOF method for the LSDS-100 spectrometer. – Proc. Int. Seminar ISINN-23, Dubna, JINR (in print).

4. Alekseev A.A., Grigoriev Yu.V., Dulin V.A., Libanova O.N., Matushko V.L., Mezentseva Zh.V., Novikov-Borodin A.V., Ryabov Yu.V. The TOF method for the LSDS-100 spectrometer. - EPrint arXiv: <http://arxiv.org/abs/1510.07622>, 26 Oct. 2015.
5. Ю.В.Григорьев, Д.В.Хлюстин. Введение в нейтронную ядерную физику (методическое пособие для студентов МФТИ). - Препринт ИЯИ, Троицк (в печати,).
6. Ю.В Григорьев (совместно с Д.В.Хлюстином) прочитал курс лекций: Введение в нейтронную ядерную физику студентам МФТИ с 1 сентября по 21 декабря 2015г.
7. Ю.В Григорьев осуществлял научное руководство над н.с. Д.В.Хлюстиным, как соискателем ученой степени кандидата наук.
8. A.V.Novikov-Borodin. Set Theory as Unified Scheme for Physics. - E-Print arXiv: <http://arXiv.org/abs/0901.3962>, 8 Jan 2015.

### 2.2.7.1 Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях

В связи с открытием коллаборацией LHCb пентакварков со скрытым очарованием и кварковым составом  $c\bar{b}ag$  с  $uud$  были сделаны оценки масс пентакварков со скрытой "прелестью" и составом  $b\bar{b}uud$  или  $b\bar{b}uud$ . 10.6 – 10.8 GeV, а также скрытой странностью. Это предсказание массы новой частицы должно быть проверено экспериментально. Статья помещена в электронный архив:

arXiv:1510.05958 [hep-ph], и направлена в журнал Phys Rev. D.

Статья о ситуации с наблюдением пентакварков опубликована в издании «Троицкий вариант (Наука)».

Современный статус теории и возможности экспериментов по поиску осцилляций нейтрон-антинейтрон, которые предсказываются в некоторых вариантах теории великого объединения (GUT). В.Копелиович занимался проблемой интерпретации данных о нестабильности ядер в терминах параметров, описывающих возможный переход нейтрон-антинейтрон в вакууме. Статья Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects

D.G.Phillips, W.M.Snow, K.Babu ... V.B.Kopeliovich.... (63 authors) находится в базе данных HEP (INSPIRE) и принята к печати в журнале Physics Reports [2].

На основании статьи «'Свет Будды ' кумулятивных частиц (ядерный gloria-эффект)» и докладов с тем же названием была написана монография, которая опубликована издательством Scholars-Press и в настоящее время доступна для приобретения во всех частях света (кроме Африки и Антарктиды): ISBN: 978-3-639-76496-3.

[http://www.ebook.de/de/product/24331748/vladimir\\_kopeliovich\\_galina\\_matushko\\_buddha\\_s\\_li\\_gh\\_t\\_of\\_cumulative\\_particles.html](http://www.ebook.de/de/product/24331748/vladimir_kopeliovich_galina_matushko_buddha_s_li_gh_t_of_cumulative_particles.html)

Продолжено изучение свойств ядерно-подобных систем с необычными свойствами, имеющими квантовые числа очарование или прелесть. Совместно с Д.Е.Ланским (НИИЯФ МГУ) и И.К.Поташниковой (Санта Мария Унив., Вальпараисо) рассчитывается спектр барионных систем с различными значениями очарования и прелести, в рамках киральной (топологической) модели. Готовится к публикации статья "Charmed and beautiful baryonic systems (hypernuclei) in chiral soliton models".

### Публикации

1. Simple estimates of the masses of pentaquarks with hidden beauty or strangeness. Vladimir Kopeliovich, Irina Potashnikova. ArXiv: 1510.05958 [hep-ph]

2. Продолжение пентакварковой драмы. Владимир Копелиович. Троицкий вариант(наука) 184, 28 июля 2015 г. <http://trv-science.ru/2015/07/28/prodolzhenie-pentaquarkovoj-dramy/>

3. Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects D.G.Phillips, W.M.Snow, K.Babu ... V.B.Kopeliovich.... (63 authors) Phys. Reports (in print); e-print arxiv: 1410.1100 [hep-ex]

4. 'Buddha's light' of cumulative particles (nuclear glory phenomenon). Vladimir Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT), Galina Matushko (Moscow, INR). Scholars-Press, Saarbruecken, Germany. ISBN:978-3-639-76496-3

5 . 'Buddha's light' of cumulative particles (nuclear glory phenomenon). V.B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT), G.K. Matushko (Moscow, INR) I.K.Potashnikova (Univ. Santa Maria, Valparaiso) Доклад на Международной конференции «Quarks and Nuclear Physics» QNP-2015, Вальпараисо, Чили, 2–6 марта 2015 г.

## 2.2.7.2 Изучение релятивистских потоков в астрофизике

Руководитель темы, дфмн

Б.Е. Штерн

### 1. Численное моделирование простейших механизмов излучения блазаров.

Ранее в нескольких работах Б.Штерна и Ю.Поутанена были найдены свидетельства фотон-фотонного поглощения в спектрах блазаров (активных галактических ядер, джеты которых направлены на нас). Этот эффект виден в данных космического гамма-телескопа «Ферми» как изломы спектра в районе 5 ГэВ (поглощение гамма-квантов линией Лайман-альфа дважды ионизованного гелия) и в районе 20 ГэВ (поглощение на Лайман-альфа водорода). При этом оставался вопрос, как именно поглощение влияет на спектр – ведь поглощенные гамма-кванты дают пары, которые в свою очередь комптонизируют фотоны – идет электромагнитный каскад, влияющий на спектр.

В работе был вычислен фон излучения района широких эмиссионных линий с помощью общедоступного кода X-star для разных условий, далее с помощью нашего кода LRMC моделировалось гамма-излучение в простейшем предположении, что ускорение частиц в джете дает степенной спектр электронов при том, что наклон этого спектра и одна из граничных энергий – варьируемые параметры. Излучение района широких эмиссионных линий выступало как среда, с которой взаимодействуют частицы высоких энергий.

Оказалось, что завалы спектров описываются достаточно хорошо. Были подобраны параметры, адекватно описывающие спектры трех ярчайших блазаров. Результаты не опубликованы, поскольку в задаче остается слишком много неопределенностей и набор условий, которым можно описать спектры слишком широк, то есть вытащить из данных конкретные сведения о механизме ускорения не удается.

### 2. Исследование новой версии данных «Ферми» Pass 8 и экстрагалактический гамма-фон

Как уже показал наш горький опыт, даже на лучшие базы данных, каковой являются данные «Ферми», нельзя слепо полагаться. Как правило, функция отклика детектора и сами данные искажены настолько, что могут имитировать статистически значимые эффекты и влиять на результаты.

В качестве теста мы выбрали спектр центральной области галактики и спектр областей неба, наиболее «темных» в гамма-диапазоне. Сравнение спектров для новой и предыдущей версии данных (Pass 7) дано на рисунке 1. Спектры нормированы на наклон - 2.5 ( $dN/dE$ ). Виден завал спектров в районе 100 ГэВ – это совершенно естественный

эффект, связанный с межгалактическим поглощением гамма-квантов на инфракрасном фоне от пыли галактик. Он виден в обеих версиях, но в Pass 8 завал резче. Статистика гамма-квантов выше 100 ГэВ для Pass 8 выше, что и являлось одной из целей новой обработки данных. Однако выше 400 ГэВ наблюдается рост не имеющий ясной физической интерпретации. Это не примесь ошибочно идентифицированных электронов, поскольку в малом телесном угле от центра Галактики имеется такой же рост.

Скорее всего, это результат неверного восстановления энергии гамма-квантов выше 300 ГэВ – этот диапазон действительно сложен, так как толщина детектора (около 12 радиационных единиц) становится недостаточной.

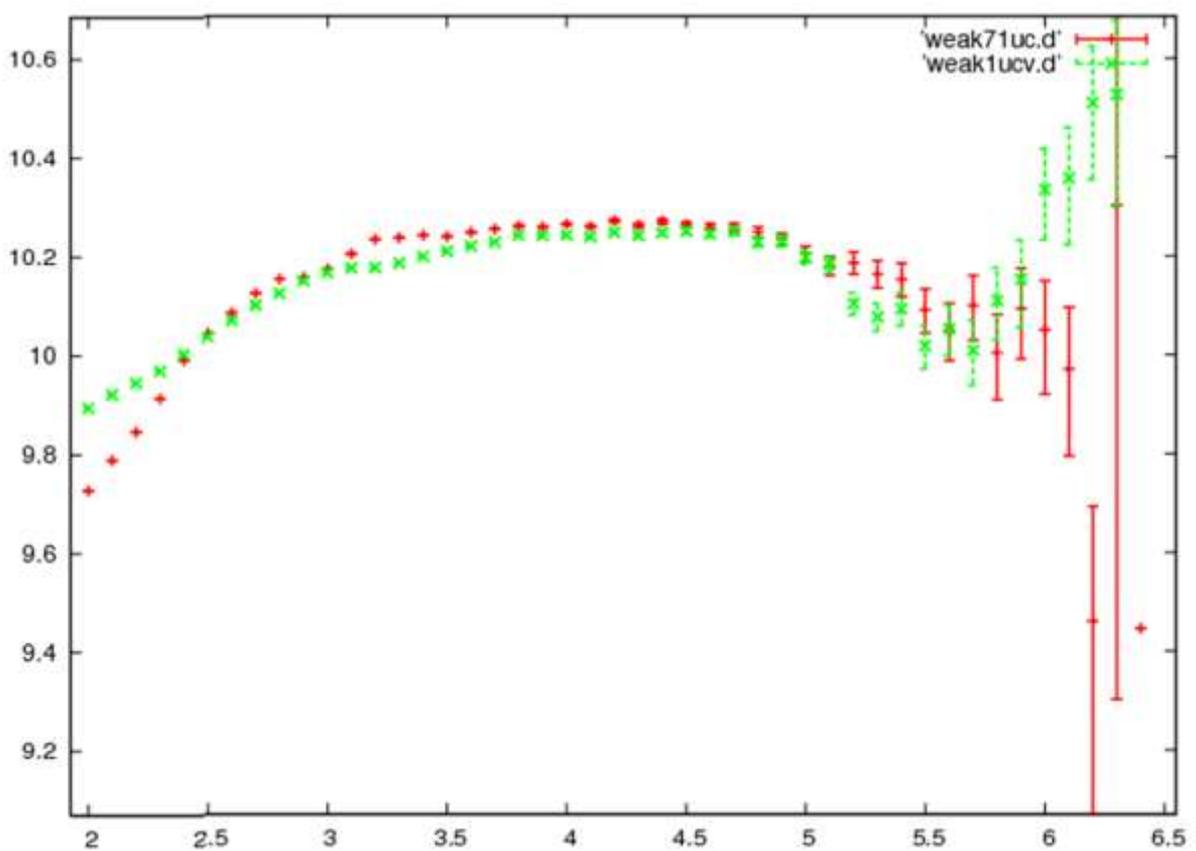


Рисунок1 Спектр «темных» областей неба (70% от 4 π) для Pass 7 (красные точки) и Pass 8 (зеленые точки). По горизонтальной оси – логарифм энергии (МэВ), по вертикальной Log (dN/dE \* E<sup>2.5</sup>)

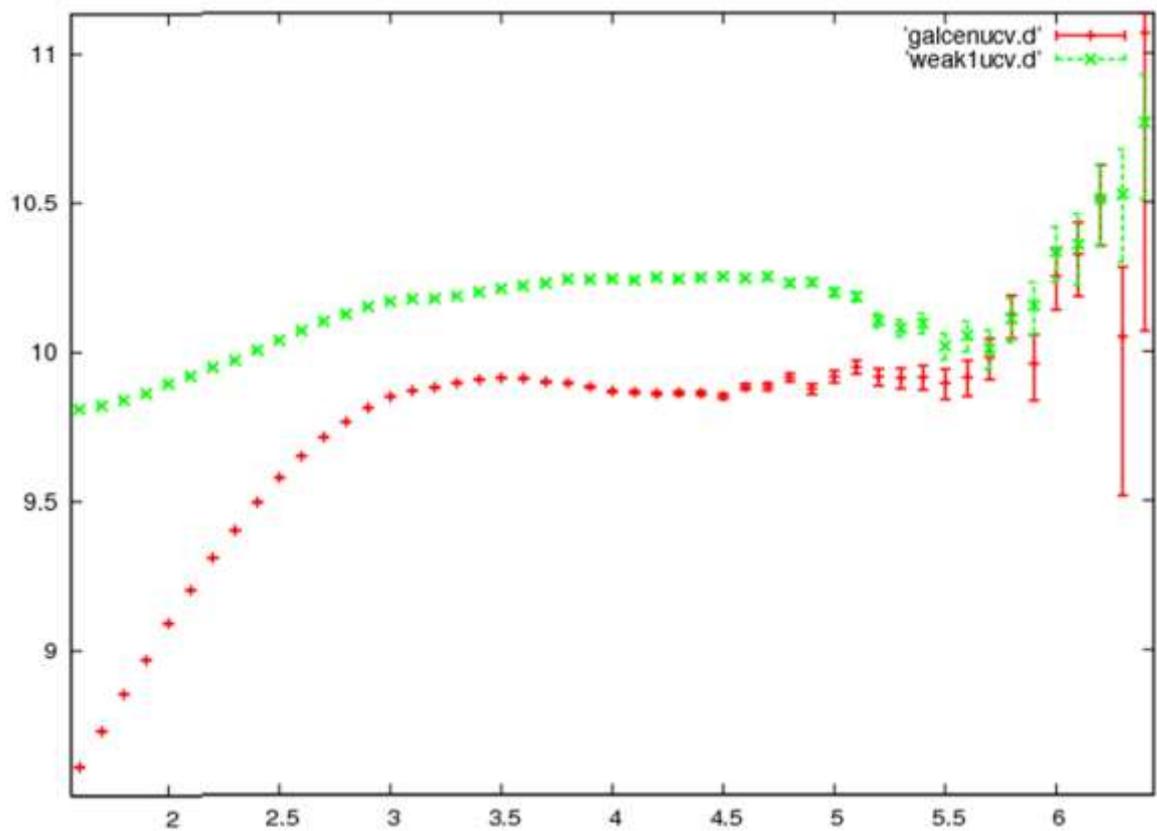


Рисунок2 Спектр «темных» областей неба (зеленые точки) и центральной части галактического диска (красные точки). Оси те же, что на Рисунок 1

На рисунке 3 показан спектр темных областей неба вместе с функцией поглощения источников, распределенных по красному смещению так же, как темп рождения звезд и примерный поглощенный спектр от блазаров, распределенных так же. Видно, что завал наблюдаемого спектра гораздо меньше того, что следовало бы ожидать от внегалактических источников любого типа. Это значит, что большая часть диффузного фона принадлежит нашей галактике.

Попытки определить происхождение диффузного фона по спектру и угловому распределению делаются давно. Устоявшегося мнения по этому поводу нет до сих пор. Наиболее популярное предположение – в фоне доминируют слабые неразрешенные лацертиды. Сейчас мы впервые имеем достаточно хорошую статистику выше 100 ГэВ, чтобы попытаться вытащить примесь экстрагалактического фона из завала спектра. Похоже, она не превышает половины того, что трактуется, как изотропная составляющая. Однако, для этого надо хорошо разобраться с происхождением крутого прилива выше 300 ГэВ. Этот прилив не описывается декларируемой функцией отклика. Похоже, ошибки в восстановлении энергии выше 300 ГэВ недооценены.

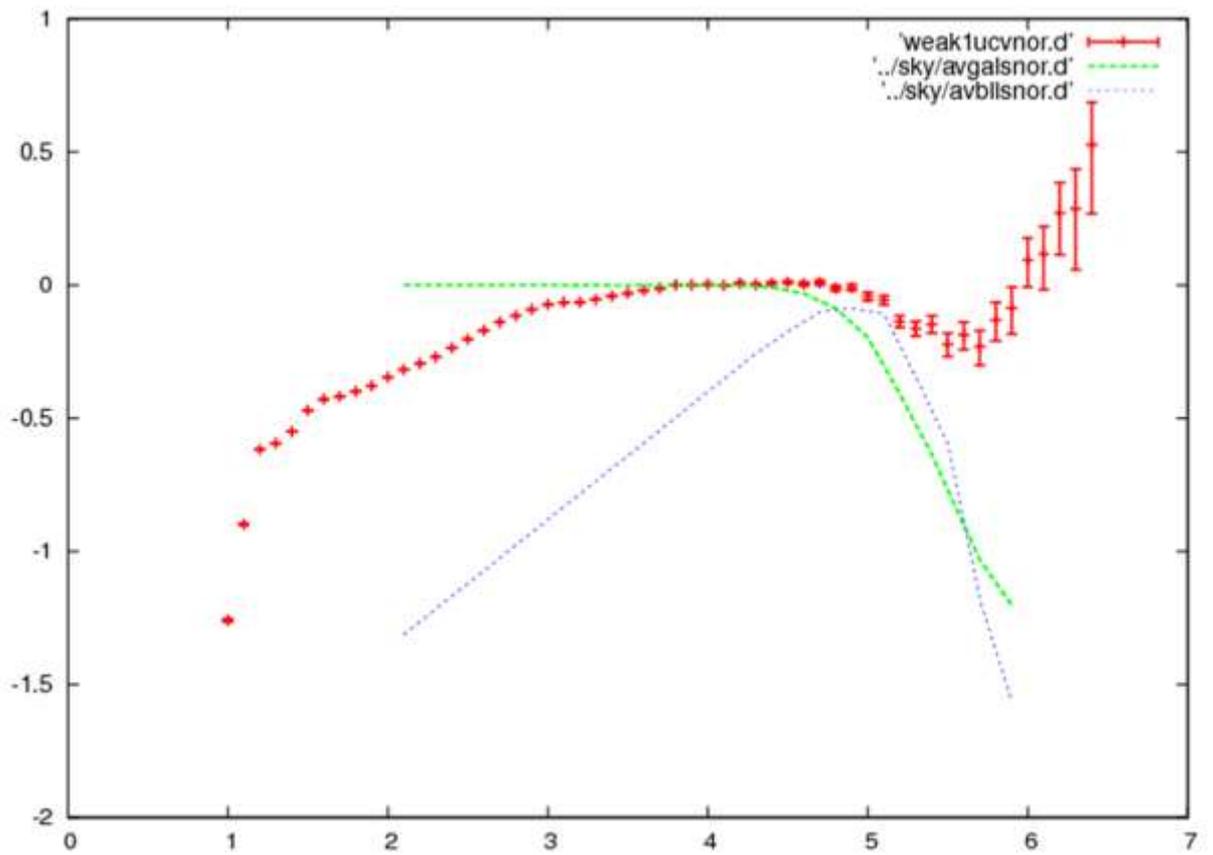


Рис 3. Спектр темных участков неба (красные точки), межгалактическое поглощение (зеленая кривая), примерный спектр лацертид с поглощением (синяя кривая)

## 2.2.8 Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях

### Реферат

В рамках нового подхода, использующего ядерную спектральную функцию, современные экспериментальные данные о сечениях соответствующих элементарных процессов, исследована в инклюзивных протон-, фотон- и эксклюзивных фотон-ядерных реакциях модификация свойств (масс)  $J/\psi$ ,  $\eta'$  и  $K^-$  мезонов в ядерной среде при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для абсолютных и относительных сечений рождения этих частиц в данных реакциях в различных сценариях ренормализации их масс в ядерной материи, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина реальной части антикаон-ядерного оптического потенциала при импульсе антикаона порядка 0.5 ГэВ/с. Также сделан важный вывод о возможности получения надежной информации о “истинном” сечении  $J/\psi$ -N взаимодействия и о сдвигах масс  $J/\psi$  и  $\eta'$  мезонов в ядерной среде из изучения их околопорогового и подпорогового фоторождения на ядрах.

### Введение

Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов,  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов), а также легких векторных мезонов ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в последние годы. Основным интересом к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них ренормализации свойств этих частиц, предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных длин рассеяния, и т.д.), в горячей/плотной ядерной материи. Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов теории сильных взаимодействий-квантовой хромодинамики, (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной среде, но уже и при обычных ядерных плотностях, строение необычных звездных объектов-нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики, короткодействующая часть нуклон-нуклонного потенциала.

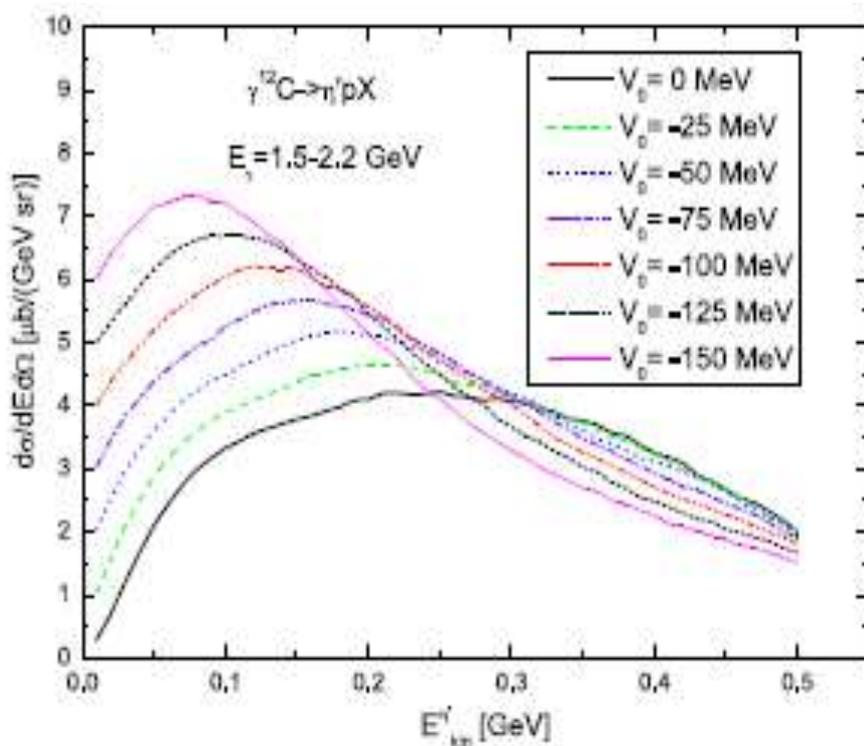
Основные результаты исследований:

#### 1. Свойства $\eta'$ - мезонов в ядерной среде

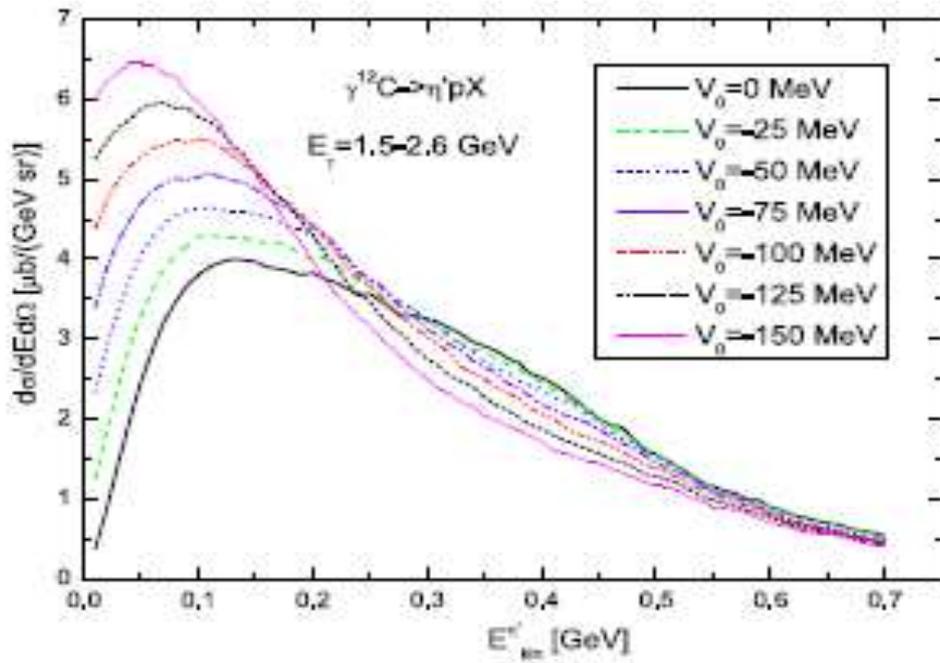
Завершено теоретическое изучение эксклюзивной реакции ( $\gamma$ ,  $\eta'$ p) на ядре углерода при энергии первичных фотонов 1.5-2.2 ГэВ, 1.5-2.6 ГэВ и 1.3-2.6 ГэВ. Разработаны

современные физическая и математическая модели данной реакции, включающие в себя соответствующие прямой и двухступенчатые процессы, новейшую информацию о сечениях этих процессов.

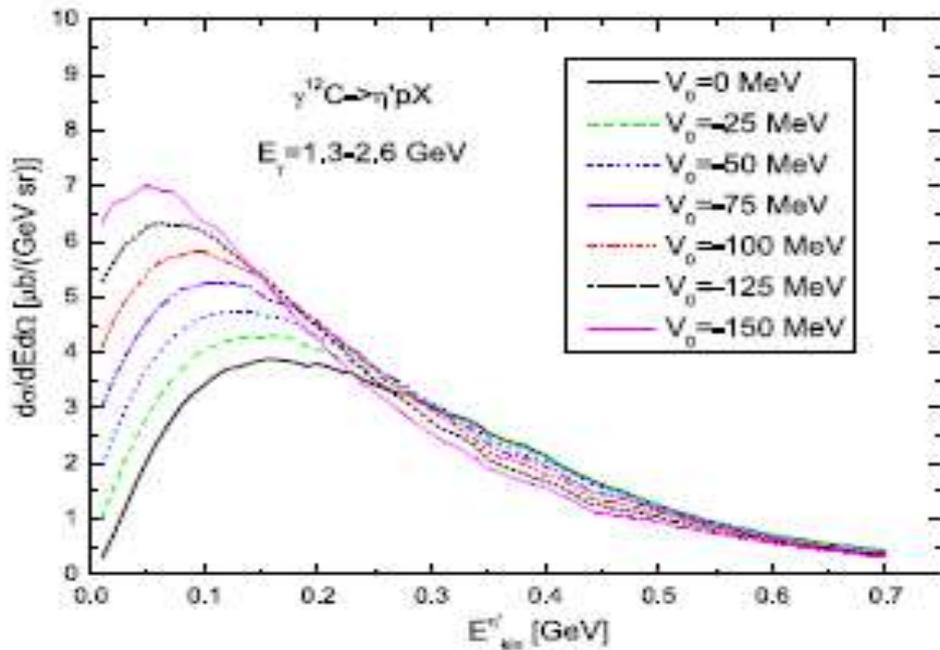
Проведены окончательные расчеты сечения данной реакции в кинематических условиях эксперимента, выполненного коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA (усредненного по телесному углу рождения  $\eta'$  мезонов их распределения по кинетической энергии при условии вылета детектируемого протона в интервале углов 1-11 градусов в лабораторной системе) и в различных сценариях ренормализации свойств (массы)  $\eta'$  мезонов в ядерной среде, результаты которых представлены на прилагаемых ниже рисунках.



**Figure 2.** Differential cross section as a function of the  $\eta'$  vacuum kinetic energy for photoproduction of  $\eta'$  mesons in the full solid angle off the carbon target nucleus from primary channel (I) in coincidence with protons, going into the laboratory polar angular range of  $1^\circ$ – $11^\circ$  and feeling inside the nucleus a momentum-dependent nuclear potential (8), after averaging over the incident photon energy range of 1.5–2.2 GeV for different in-medium  $\eta'$  mass shifts at normal nuclear density indicated in the inset.

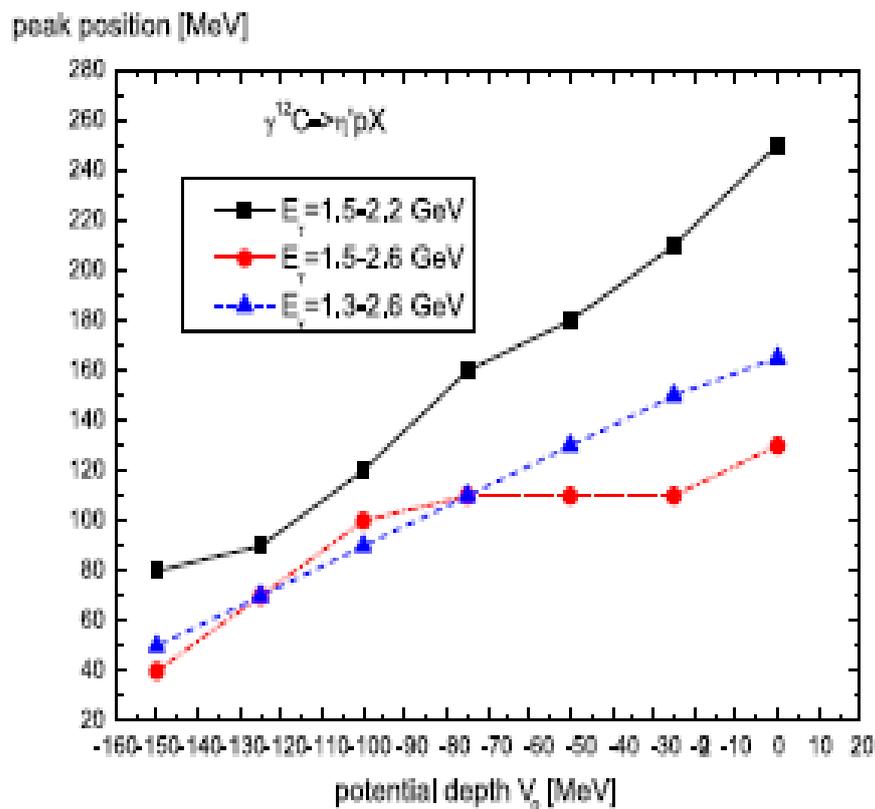


**Figure 3.** The same as in figure 2, but for the interaction of photons of energies of 1.5–2.6 GeV with the carbon target nucleus.



**Figure 4.** The same as in figure 2, but for the interaction of photons of energies of 1.3–2.6 GeV with the carbon target nucleus.

Показано (см. Рисунок ниже), что имеется четкая корреляция между положением максимума распределений по кинетической энергии  $\eta'$  мезонов, показанных на приведенных выше рисунках и величиной их сдвига массы в ядерной материи.



**Figure 5.** Peak positions in the  $\eta'$  meson kinetic energy distributions shown in figures 2, 3 and 4, as functions of the in-medium mass shift at normal nuclear density. The lines are to guide the eyes.

Поэтому прямое сравнение результатов наших расчетов с получаемыми в настоящее время данными эксперимента CBELSA/TAPS позволит получить надежный вывод о величине сдвига массы  $\eta'$  мезонов в ядерной среде (или о величине реальной части  $\eta'A$  потенциала) при импульсах  $\eta'$  мезонов порядка 0.5 Гэв/с. Знание этого сдвига важно как для понимания механизма генерации масс псевдоскалярных мезонов в QCD, так для понимания различных аспектов “in-medium” адронной физики.

Результаты этого исследования опубликованы в работах 6 и 7, указанных в прилагаемом ниже списке публикаций.

## 2. ИЗУЧЕНИЕ АНТИКАОН-ЯДЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Завершена работа по результатам российско-германского научного сотрудничества в рамках коллаборации ANKE (Юлих, Германия) в области изучения нерезонансного рождения каонных пар в протон-ядерных реакциях ( $A=C, Cu, Ag, Au$ ) при энергии 2.83 ГэВ с целью определения актуальной в настоящее время величины - реальной части антикаон-ядерного среднеполевого потенциала. Получено, что эта величина равна -

(63+15-12) МэВ при импульсе  $K^-$  мезона порядка 0.5 ГэВ/с (см. Рисунок ниже). Данное значение говорит в пользу существования скорее “мелкого”, чем “глубокого” притягивательного антикаон-ядерного оптического потенциала, что, по-видимому, исключает как

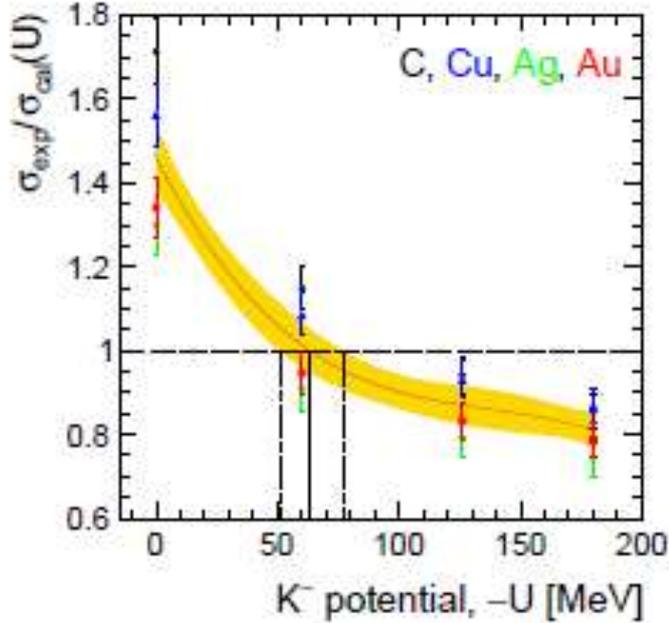


FIG. 4: (color online) Ratio of the measured integrated cross section for non-resonant  $K^+K^-$  pair production on a given nucleus  $A$  to the corresponding cross sections, calculated within the adopted model supposing four values for the  $K^-$  potential depth at nuclear matter density:  $U = 0$  MeV,  $-60$  MeV,  $-126$  MeV, and  $-180$  MeV. The curve represents a third-order polynomial fit of all ratios presented in the figure, with the shaded band indicating the  $1\sigma$  confidence interval. The pair of vertical dotted lines corresponds to the regions where the ratio is unity within the errors given by the third-order fit. The color code is identical to that shown explicitly in Fig. 3.

существование такой “странной” ядерной материи как каонный конденсат в таких компактных звездных объектах как нейтронные звезды, так и возможное существование таких ядерных объектов как глубокосвязанные каонные состояния  $K(-)pp$ ,  $K(-)ppn$ ,  $K(-)ppn$ ,  $K(-)pppn$ , каон и мульти-каон связанные ядерные состояния.

Результаты проделанной работы опубликованы в статьях 1-4, указанных в прилагаемом ниже списке публикаций.

### 3. ИЗУЧЕНИЕ ОКОЛОПОРОГОВОГО РОЖДЕНИЯ ЧАРМОНИЯ ( $J/\psi$ мезона) В ФОТО-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Для нужд планируемого эксперимента в Hall C на ускорительном комплексе CEBAF (USA) впервые были получены предсказания для абсолютных и относительных сечений рождения  $J/\psi$  мезонов в фотон-ядерных реакциях при околопороговых и подпороговых начальных энергиях фотонов (5-11 ГэВ). Для этого была разработана соответствующая физическая модель, учитывающая как поглощение  $J/\psi$  мезонов в ядерном веществе, так и их длину формирования в нем, а также ренормализацию их массы, предсказываемой современными основанными на КХД адронными моделями, в ядерной материи. Показано (что также видно из прилагаемого ниже рисунка), что из данных по  $A$ -зависимости абсолютных и относительных сечений фоторождения  $J/\psi$  мезонов на ядрах, полученных при околопороговых начальных энергиях фотонов, можно достаточно надежно определить “истинное” сечение неупругого  $J/\psi$ - $N$  взаимодействия, представляющее в настоящее время значительный интерес.

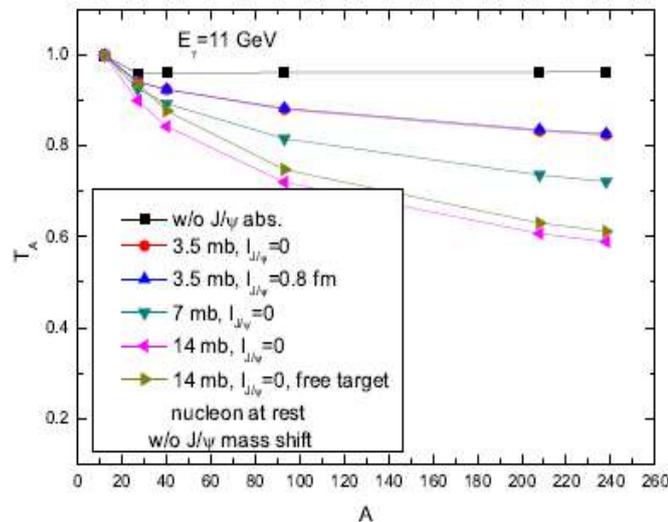


Figure 3: (color online) Transparency ratio  $T_A$  for  $J/\psi$  mesons from primary  $\gamma N \rightarrow J/\psi N$  reactions proceeding on an off-shell target nucleons and on a free ones being at rest as a function of the nuclear mass number  $A$  in the scenario without their mass shift as well as for their different absorption cross sections and formation lengths indicated in the inset. The lines are to guide the eyes.

Далее продемонстрировано (см. Рисунок ниже), что из данных по функциям возбуждения  $J/\psi$  мезонов на ядрах, полученным в подпороговой области энергий первичных фотонов (5-8 ГэВ), можно извлечь важную и актуальную в настоящее время информацию о возможном сдвиге массы  $J/\psi$  мезона в ядерной среде.

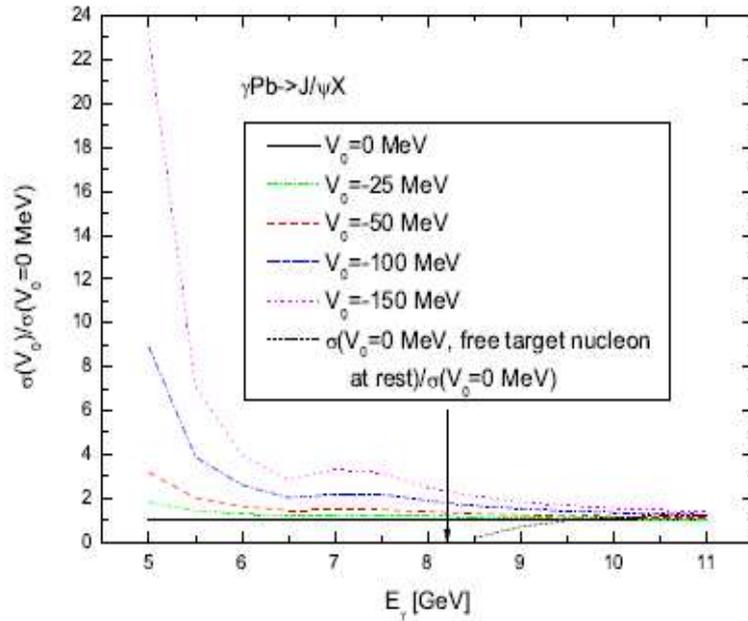


Figure 8: (color online) Ratio between the  $J/\psi$  production cross sections on  $^{208}\text{Pb}$  with the mass shift, shown in figure 6, and the cross section without this shift, calculated for an of target nucleons, as a function of photon energy. The arrow indicates the threshold for the reaction  $\gamma N \rightarrow J/\psi N$  occurring on a free nucleon.

Результатов проведенных теоретических исследований опубликованы в работе 5, указанной в прилагаемом ниже списке публикаций.

## Заключение

Прямое сравнение эксклюзивных данных по фоторождению  $\eta/\eta'$ -мезонов, получаемых в настоящее время коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), с результатами выполненных нами теоретических исследований позволит извлечь величину сдвига массы этих мезонов в ядерной материи и тем самым проверить предсказания на этот счет современных адронных моделей.

Полученные результаты представляют также большой интерес для понимания в рамках КХД происхождения существенно большей массы  $\eta/\eta'$  мезонов по сравнению с массами других членов псевдоскалярного мезонного нонета.

Применение результатов проведенных теоретических исследований к анализу данных по нерезонансному рождению каонных пар в pA реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ, впервые полученных коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY, позволило извлечь величину антикаон-

ядерного скалярного оптического потенциала (или сдвига массы антикаона в ядерной материи), имеющую большое значение для современной ядерной и адронной физики .

Наконец, сделан важный вывод о возможности получения надежной информации о “истинном” сечении  $J/\psi$ -N взаимодействия и о возможном сдвиге массы  $J/\psi$  мезона в ядерной среде из изучения околопорогового и подпорогового рождения чармония в фотоядерных реакциях.

#### Публикации

1. E. Ya. Paryev, M. Hartmann, Yu. T. Kiselev, Non-resonant kaon pair production and medium effects in proton-nucleus collisions. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 42 (2015) 075107 (20 pages).
2. E. Ya. Paryev, M. Hartmann, Yu. T. Kiselev, Non-resonant kaon pair production and medium effects in proton-nucleus collisions. ArXiv: 1505.01992 [nucl-th] (2015).
3. Yu. T. Kiselev, M. Hartmann, A. Polyanskiy, E. Ya. Paryev et al. ( yet 22 co-authors). Kaon pair production in proton-nucleus collisions at 2.83 GeV kinetic energy. ArXiv: 1509.04830 [nucl-ex] (2015).
4. Yu. T. Kiselev, M. Hartmann, A. Polyanskiy, E. Ya. Paryev et al. ( yet 22 co-authors). Kaon pair production in proton-nucleus collisions at 2.83 GeV kinetic energy. *Phys. Rev. C* 92, 065201 (2015).
5. E. Ya. Paryev, Yu. T. Kiselev, Near-threshold  $J/\psi$  photoproduction off nuclei. ArXiv: 1510.00155 [nucl-th] (2015); submitted to *Int. J. Mod. Phys. E*.
6. E. Ya. Paryev, Study of in-medium eta/prime properties in the  $(\gamma, \eta/\prime p)$  reaction on nuclei. ArXiv: 1503.09007 [nucl-th] (2015).
7. E. Ya. Paryev, Study of in-medium eta/prime properties in the  $(\gamma, \eta/\prime p)$  reaction on nuclei. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 43 (2016) 015106 (20 pages).  
Published (на сайте журнала) 10 December 2015 – Указано на титульном листе статьи.

Руководитель темы, дфмн, внс СМОЭ

Э.Я. Парьев

## 2.2.9 Осцилляции частиц в поглощающей среде. Исследование переходов нейтрон-антинейтрон. Регенерация каонов

Руководитель темы, кфмн ОЭФ

В.И. Назарук

### Реферат

Целью работы является разработка принципиально новой модели переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде и ее обобщение на случай  $ab$ -переходов, а также модели регенерации каонов.

### Введение

Все результаты, полученные нами, являются принципиально новыми. Для переходов нейтрон-антинейтрон это относится к сути модели - теоретико-полевому подходу, поскольку ранее нами было показано, что только с его помощью можно корректно описать основной эффект, индуцируемый средой – поглощение. Для регенерации каонов, по нашему мнению, корректная модель отсутствует в принципе.

### Основные результаты

В 2015 г основное внимание уделено общему вопросу теории реакций и распадов в среде: применимость оптической теоремы в моделях с неэрмитовым Гамильтонианом. Дело в том, что при работе в рамках направления указанного выше выяснилось, что в стандартной модели расчета переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде неправильно используется оптическая теорема. Она должна применяться для унитарной  $S$ -матрицы. Однако модель, упомянутая выше, существенно неунитарна. В результате ширина процесса обратно пропорциональна ширине аннигиляции антинейтрона в среде, тогда как в предложенной нами модели с эрмитовым Гамильтонианом она прямо пропорциональна вышеуказанной ширине.

Зависимость от основного эффекта влияющего на скорость процесса (ширина аннигиляции антинейтрона в среде) в обеих моделях противоположна. Этот факт является принципиальным.

Если Гамильтониан неэрмитов и применяется оптическая теорема, то  $S$ -матрица должна быть унитаризована. На практике в ряде хорошо известных моделей различных процессов (не только переходов нейтрон-антинейтрон) это требование не выполняется.

Таким образом, рассматриваемый вопрос выходит далеко за рамки изучаемого процесса: переходы нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде.

Закончена работа над статьей “Kaon regeneration in perturbation theory”. Регенерация короткоживущей компоненты  $K$ -мезонов - одно из самых интересных и важных явлений.

Оно прямо связано с CP -, T- и CPT- инвариантностью и описано в учебниках с конца 50-х годов прошлого века.

Соответствующий расчет содержит диагонализацию массовой матрицы с многочисленной сменой базиса. Мы предлагаем принципиально новый подход, основанный на теории возмущений. Имеют место не только альтернативный метод расчета, но и новые результаты. Они представлены в работе указанной в списке литературы.

Работа соответствует утвержденному плану ОЭФ.

Источник финансирования – госзадание (базовое).

#### Список публикаций

1. V.I. Nazaruk arXiv:1408.3295 v3 [nucl-th] 28 Apr 2015 “Models with non-Hermitian Hamiltonian and optical theorem”
2. V.I. Nazaruk, arXiv:1510.01629 [hep-ph] (2015). Kaon regeneration in perturbation theory.

## 2.2.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах

По основной деятельности в ИЯИ РАН

- Подана заявка на патент РФ С.Г.Лебедев, В.Э.Янц. «Радиохимический детектор плотности потока быстрых нейтронов»

Участие в серии обсуждений экспертной группы ИЯИ совместно с руководством отдела и дирекцией по разработке «Программы работ на мезонной фабрике ИЯИ РАН».

- По заданию дирекции проводится подготовка возможных облучательных работ на ускорителе ИЯИ РАН. Установлены контакты с возможными пользователями из ИМЕТ РАН, Росатома и Минобороны РФ.
- На X111 Российско – Китайском симпозиуме «Новые материалы и технологии» был представлен доклад по облучательным экспериментам на установках ИЯИ РАН.
- На международной конференции по «компьютерному моделированию в физике и не только» представлен приглашенный устный 20-минутный доклад.
- По заданию дирекции подготовлена и подана заявка на региональный центр прогнозирования развития нереакторных ядерных технологий на базе ИЯИ РАН.
- Опубликована монография С.Г.Лебедев «Токоограничители в интеллектуальных энергетических сетях», ISBN-13: 9783659779978, LAP Lambert Academic Publishing, 2015.

В рамках экспертной деятельности в качестве федерального эксперта научно-технической сферы С.Г.Лебедевым

- проведена экспертиза 11 отчетов по базовой части и 31 отчета по проектной части научных проектов ВУЗов. По результатам экспертизы составлены экспертные заключения, которые направлены в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ.
- совместно с коллегами из Российского института научной экспертизы (РИНКЦЭ) Минобрнауки подготовлена статья для сборника “Инноватика и экспертиза” по тематике углеродных токоограничителей.
- Проведена экспертиза «Предложения по приоритетным направлениям научных исследований и разработок в интересах решения социально-экономических задач». Составлено и отправлено в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ экспертное заключение.
- Совместно с коллегами из Российского института научной экспертизы (РИНКЦЭ) Минобрнауки подготовлена статья для журнала ЖКХ по тематике углеродных токоограничителей.

### Публикации

1. С.Г.Лебедев, Н.И.Андрианов, С.П.Юркевичус. «БЕСКОНТАКТНЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ – ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ

УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ И ИХ ЗАЩИТЫ В ТЕХНОЛОГИИ SMART GRID» статья в сборнике “Инноватика и экспертиза” ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2015 г.

2. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов  $^{53}\text{Mn}$ , и  $^{10}\text{Be}$  в земных породах» принято к публикации в журнал «Геохимия» 2015 г.

3. Подана заявка на патент РФ С.Г.Лебедев, В.Э.Янц. «Радиохимический детектор плотности потока быстрых нейтронов», 2015 г.

4. С.Г.Лебедев, Н.И.Андрианов, С.В.Генералова «ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДСТВА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ ОБЪЕКТОВ ЖКХ И ИХ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ» журнал ЖКХ, N12, стр. 54, 2015 г.

5. S.G.Lebedev, “Computer Simulation of Thin Stripper Target Behaviour Under Bombardment of Intense Pulsed Ions” Proc. Of International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, September, 6-9, 2015, Moscow, Russia. To be published in Journal of Physics Conference series.

6. A.V.Feschenko, L.V.Kravchuk, E.A. Koptelov, S.G. Lebedev , M.V.Libanov, N.M. Sobolevsky, I.I.Tkachev “EXPERIMENTAL AND COMPUTER MODELING OF NEW MATERIALS BEHAVIOR UNDER IRRADIATION ON INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH RAS FACILITIES AND SOFTWARE”, Труды X111 Российско – Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», стр. 378, Казань, 20-26 Сентября 2015 г.

7. S.G.Lebedev, Phonon resonators – new perspective nanocomposite for ruling out of electron-phonon interaction. Труды X111 Российско – Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», стр.374, Казань, 20-26 Сентября 2015 г.

8. С.Г.Лебедев, «Токоограничители в интеллектуальных энергетических сетях», ISBN-13: 9783659779978, LAP Lambert Academic Publishing, 2015.

Руководитель темы, кфмн

С.Г.Лебедев

2.2.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)

Руководитель группы

С.Г.Лебедев

- Продолжалась работа в рамках межотдельской экспертной группы по разработке новой программы исследований на экспериментальном комплексе ИЯИ РАН.
- Подана на рассмотрение заявка на патент РФ «Радиохимический детектор плотности потока быстрых нейтронов»
- По заданию дирекции проводится подготовка возможных облучательных работ на ускорителе ИЯИ РАН. Установлены контакты с возможными пользователями из ИМЕТ РАН, Росатома и Минобороны РФ.
- На X111 Российско – Китайском симпозиуме «Новые материалы и технологии» был представлен доклад по фононным резонаторам.
- Послана аннотация приглашенного доклада на конференции NANOTECH-2016 в Дубай.

Публикации

1. С.Г.Лебедев, В.Э.Янц. «Радиохимический детектор плотности потока быстрых нейтронов» заявка на патент РФ, 2015 г.
2. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов  $^{53}\text{Mn}$ , и  $^{10}\text{Be}$  в земных породах» принято к публикации в журнал «Геохимия», 2015.
3. S.G.Lebedev, “PHONON RESONATORS – NEW PERSPECTIVE NANOCOMPOSITE FOR RULING OF ELECTRON – PHONON INTERACTION”, Труды X111 Российско – Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», Казань, 20-26 Сентября 2015 г.
4. S.G.Lebedev, “Electrical Resistance Switching in Nano-Graphite Films” report presented on NANOTECH-2016, April, 21-23, Dubai, UAE

## 2.2.12 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями благородных газов с кислородом

### Аннотация.

Совместно с Больницей РАН в Г. Троицке, медиками Екатеринбурга и Биофаком МГУ показано, что терапия благородными газами в смеси с кислородом продлевает долголетие, вылечивает гипертонию, депрессию, наркоманию, онкологию, инсульты, раненых и увеличивает потенцию. Для этих целей в Екатеринбурге создается сеть клиник. Лечение аргон-кислородными смесями раненых внедрено в госпиталь МВД в Екатеринбурге.

Результаты опубликованы в работах:

1. А.Ю.Перов, А.В.Бобровников, Б.М.Овчинников, В.В.Парусов

"Терапия смесями благородных газов с кислородом", Препринт ИЯИ РАН 1406/2015.

2.1. А.Ю.Перов, А.В.Бобровников, Б.М.Овчинников, В.В.Парусов

"Терапия смесями благородных газов с кислородом для долголетия", Препринт ИЯИ РАН 1407/2015 ИЮЛЬ 2015.

### 2.2.13. Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах

1. Завершена работа над программой, моделирующей рождение "странности" в элементарном антинуклон-нуклонном взаимодействии в области энергий  $T \leq 3$  ГэВ. Для прямого моделирования элементарного акта антинуклон-нуклонного взаимодействия в программе используются параметризации энергетической зависимости сечений основных его каналов (аннигиляции, упругого взаимодействия, перезарядки, неупругого пинообразования и неупругих каналов с рождением "странности"), полученные из анализа существующих на настоящий момент экспериментальных данных.

Из сравнения независимых экспериментальных данных следует, что сечения  $\bar{p}p$  превышают  $\bar{n}p$  – сечения в области импульсов  $\lesssim 200$  МэВ/с ( $T_0 = 20$  МэВ), что связано с влиянием кулоновского взаимодействия при малых энергиях. Энергетическая зависимость сечений в этой области крайне важна для задач, связанных с поиском нейтрон-антинейтронных осцилляций при моделировании процессов аннигиляции остановившихся антинейтронов в ядре. В данной программе учитывается асимптотическое поведение сечений аннигиляции:

$$\sigma_{ann}(T < T_0) = 1/\beta^2 * \sigma_{ann}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}p \text{ – аннигиляции и}$$

$$\sigma_{ann}(T < T_0) = 1/\beta * \sigma_{ann}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}n \text{ –}, \bar{n}p \text{ –}, \bar{n}n \text{ – аннигиляции.}$$

Энергетическая зависимость упругого сечения и сечения перезарядки при малых энергиях ( $T < T_0$ ) так же зависит от типа взаимодействующих частиц и определяется как

$$\sigma_{el,ex}(T < T_0) = 1/\beta^2 * \sigma_{el,ex}(T = T_0) \quad \text{для упругого } \bar{p}p \text{ - взаимодействия и}$$

$$\sigma_{el,ex}(T < T_0) = \sigma_{el,ex}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}n \text{ –}, \bar{n}p \text{ –}, \bar{n}n \text{ – взаимодействия.}$$

Разработанный и реализованный в вычислительной программе подход подробно описан в опубликованном препринте [1]. В настоящее время программа, моделирующая элементарный акт антинуклон-нуклонного взаимодействия при низких энергиях, передана разработчикам программного комплекса QGSM (Quark-Gluon String Model) для компиляции, что даст возможность прямого моделирования рождения "странности" адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий.

2. В рамках участия в новой международной коллаборации по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на ESS подготовлена программа для моделирования аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах углерода. На основе проведенной работы был написан раздел Modeling of Annihilation Events для обзорной статьи Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects [2]. Работа принята в Physics Reports.

## Публикации

1. Голубева Е.С. Моделирование элементарного акта антинуклон-нуклонного взаимодействия при  $T < 3$  ГэВ. Препринт ИЯИ РАН 1412/2015.

2. Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects

Authors: D. G. Phillips II, W. M. Snow, K. Babu, S. Banerjee, D. V. Baxter, Z. Berezhiani, M. Bergevin, S. Bhattacharya, G. Brooijmans, L. Castellanos, M-C. Chen, C. E. Coppola, R. Cowsik, J. A. Crabtree, P. Das, E. B. Dees, A. Dolgov, P. D. Ferguson, M. Frost, T. Gabriel, A. Gal, F. Gallmeier, K. Ganezer, E. Golubeva, G. Greene, B. Hartfiel, A. Hawari, L. Heilbronn, C. Johnson, Y. Kamyshev, B. Kerbikov, M. Kitaguchi, B. Z. Kopeliovich, V. B. Kopeliovich, V. A. Kuzmin, C-Y. Liu, P. McGaughey, M. Mocko, R. Mohapatra, N. Mokhov, G. Muhrer, H. P. Mumm, L. Okun, R. W. Pattie Jr., C. Quigg, E. Ramberg, A. Ray, A. Roy, A. Ruggles, U. Sarkar, A. Saunders, A. P. Serebrov, H. M. Shimizu, R. Shrock, A. K. Sikdar, S. Sjue, S. Striganov, L. W. Townsend, R. Tschirhart, A. Vainshtein, R. Van Kooten, Z. Wang, A. R. Young

. arXiv:1410.1100

Руководитель темы кфмн снс СМОЭ

Голубева Е.С.

### 3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики

#### 3.1 Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ: эксперименты E938 (MINERvA) и E929 (NOvA)

Руководитель проекта: А.В. Буткевич д.ф.-м.н., внс  
Состав участников Проекта ИЯИ РАН:  
Матвеев В.А. академик  
Родкин Д.М. аспирант МФТИ, стажер-исследователь ИЯИ  
Лучук С.В. аспирант МФТИ, стажер-исследователь

#### 3.1 РЕФЕРАТ

Коллаборация NOvA получила первые результаты исследований осцилляций нейтрино в ускорительном эксперименте. При экспозиции  $2.74 \cdot 10^{20}$  протонов на мишень в нейтринном пучке NuMI на дальнем детекторе было зарегистрировано 6 событий, обусловленных взаимодействием электронных нейтрино, тогда как ожидаемое число фоновых событий составляет порядка  $0.99 \pm 0.11(\text{syst})$ . Избыток наблюдаемых электронных событий на уровне  $3.3\sigma$ , обусловленный  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляциями, позволяет исключить на 90% доверительном уровне значения фазы нарушения CP-инвариантности  $\delta_{CP}$  в интервале  $0.1\pi - 0.5\pi$  при обратной иерархии масс нейтрино.

Кроме того, в этом эксперименте на дальнем детекторе было зарегистрировано 33 мюонных события от взаимодействия мюонных нейтрино. Ожидалось, что в отсутствии нейтринных осцилляций будет зарегистрировано  $211.8 \pm 12.5(\text{syst})$  таких событий. Из анализа этих данных следует, что значения квадрата разностей масс  $\Delta m_{23}^2 = (2.52^{+0.2}_{-0.18}) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  и ограничение на угол смешивания  $0.38 < \sin^2 \theta_{23} < 0.65$  на 65% доверительном уровне. Получены результаты и для обратной иерархии масс.

В эксперименте MINERvA были измерены дифференциальные сечения рождения пионов при резонансном и когерентном рассеянии (анти)нейтрино заряженным и нейтральным токами с ядрами углерода и водорода в области энергий 1.5-20 ГэВ. Кроме того, было измерено дифференциальное сечение процесса рождения мюона и протона в конечном состоянии. Изучение этих процессов необходимо для прецизионного анализа эффектов, связанных с осцилляциями нейтрино.

#### 3.1 ВВЕДЕНИЕ

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis  $\nu_e$  Appearance) является изучение  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций нейтрино и определение фазы нарушения CP-инвариантности, иерархии масс нейтрино, а также, уточнение уже измеренных параметров осцилляций нейтрино. В этом эксперименте используется самый мощный нейтринный пучок off axis NuMI (Neutrino Main Injector) мощностью 700 кВт и энергией нейтрино 1-3 ГэВ и два подобных детектора - ближний и дальний, оптимизированные для регистрации взаимодействий

электронных нейтрино. Ближний детектор с массой жидкого сцинтиллятора 0.3кт расположен в Фермилабе, а дальний детектор с массой 14 кт расположен на расстоянии 810 км и на глубине 4 м под землей в районе Аш-Ривер (ш. Миниссота). В 2015 г. работа группы ИЯИ в эксперименте включала определение эффективности и чистоты регистрации событий обусловленных взаимодействием электронных и мюонных нейтрино в детекторах NOVA и ожидаемого числа сигнальных и фоновых событий на дальнем детекторе.

Целью эксперимента MINERvA является изучение рассеяния нейтрино на ядрах. Программа эксперимента включает измерение сечений взаимодействия нейтрино с различными ядерными мишенями от протона до свинца в области энергий квази-упругого рассеяния, рождения резонансов и глубоко-неупругого рассеяния. Эксперимент находится в стадии набора и анализа данных.

### 3.1 РЕЗУЛЬТАТЫ

В международном эксперименте NOvA были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино. При экспозиции  $2.74 \cdot 10^{20}$  протонов на мишень в нейтринном пучке NuMI в отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино, Это является неоспоримым доказательством, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Из анализа этих данных следует, что значения квадрата разностей масс  $\Delta m^2_{23} = (2.52^{+0.2}_{-0.18}) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  и ограничение на угол смешивания  $0.38 < \sin^2 \theta_{23} < 0.65$  на 65% доверительном уровне.

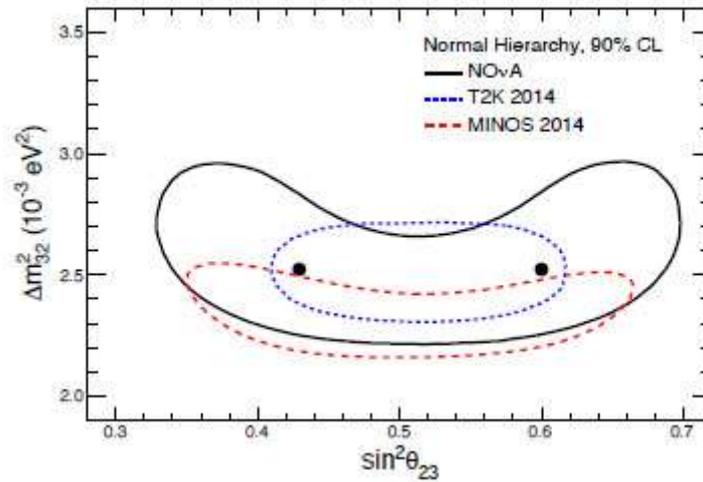


Рисунок 1 - Ограничения на разность квадратов масс и угол смешивания нейтрино в сравнении с данными экспериментов T2K и MINOS в случае нормальной иерархии масс нейтрино.

Для обратной иерархии масс нейтрино значения квадрата разностей масс  $\Delta m_{23}^2 = (-2.56 \pm 0.19) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  и ограничение на угол смешивания  $0.37 < \sin^2 \theta_{23} < 0.64$  на 65% доверительном уровне.

Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Избыток наблюдаемых электронных событий на уровне  $3.3\sigma$ , обусловленный  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляциями, позволяет исключить на 90% доверительном уровне значения фазы нарушения CP-инвариантности  $\delta_{CP}$  в интервале  $0.1\pi \text{ — } 0.5\pi$  при обратной иерархии масс нейтрино.

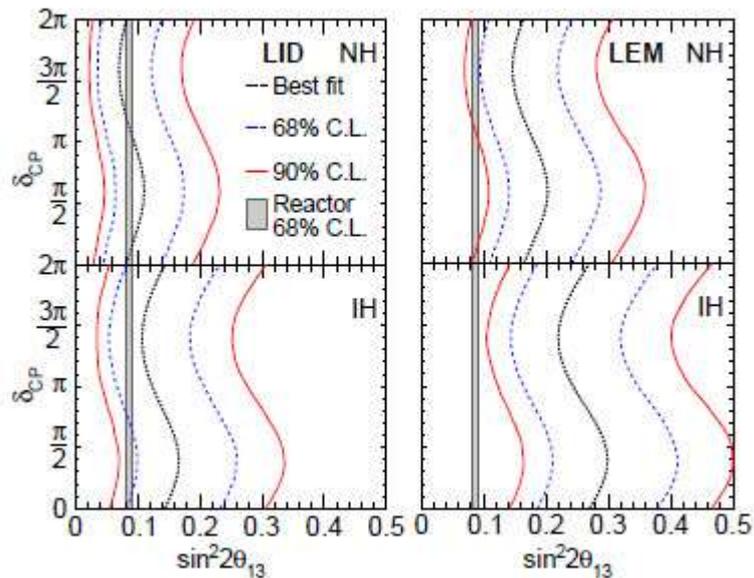


Рисунок 2 - Область разрешенных значений фазы  $\delta_{CP}$  как функция угла смешивания  $\sin^2 2\theta_{13}$  для нормальной (верхний рисунок) и обратной иерархии (нижний рисунок) масс нейтрино.

Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества.

В 2015 году был завершен анализ двух-частичных событий, обусловленных взаимодействием нейтрино на ядрах углерода и водорода в сцинтилляторе. Получены дифференциальные сечения рассеяния нейтрино, как функции квадрата переданного 4-х импульса. Данные хорошо согласуются с предсказаниями модели фермиевского газа. Кроме того, были измерены дифференциальные сечения рождения пионов при резонансном и когерентном рассеянии (анти)нейтрино заряженным и нейтральным токами с ядрами углерода и водорода в области энергий 1.5-20 ГэВ.

### 3.1 ВЫВОДЫ

При экспозиции  $2.74 \cdot 10^{20}$  протонов на мишень в нейтринном пучке NuMI, что составляет менее 10% от запланированной экспозиции в эксперименте NOvA были получены первые результаты измерения  $\Delta m^2_{23}$ , которые хорошо согласуются с уже имеющимися данными и значения угла  $\theta_{23}$ , которое в пределах погрешностей соответствует максимальному смешиванию состояний нейтрино  $\nu_2$  и  $\nu_3$ . Также, получены ограничения на 90% доверительном уровне на фазу нарушения CP-инвариантности  $0.1\pi < \delta_{CP} < 0.5\pi$  при обратной иерархии масс нейтрино. Измерены дифференциальные сечения рождения пионов при резонансном и когерентном взаимодействии (анти)нейтрино с ядрами углерода и водорода.

### 3.1 ПУБЛИКАЦИИ ЗА 2015 ГОД

- [1] R. B. Patterson et al. (NOvA Collaboration) " Oscillation measurements with the NuMI beam" Nucl.Part.phys.Proc. 265-266 (2015) 153-158
- [2] J. Coelho et al. (NOvA Collaboration) " Status of NuMI experiments:MINOS+ and NOvA" Nucl.Part.phys.Proc. 260 (2015) 178-181
- [3] P.Adamson et al. (NOvA Collaboration) " First measurement of electron neutrino appearance in NOvA" [arXiv:1601.05022]
- [4] P.Adamson et al. (NOvA Collaboration) " First measurement of muon-neutrino appearance in NOvA" [arXiv:1601.05037]
- [5] T.Le et al. (MINERvA Collaboration) " Single neutral-pion production by charged-current antineutrino interaction on hydrocarbon at  $E_{\nu}=3.6$  GeV" Phys.Lett. B749 (2015) 130-136 [arXiv:1503.02107]
- [6] L.Aliaga et al. (MINERvA Collaboration) " MINERvA neutrino detector response measured with test-beam data" Nucl.Instrum. Meth. A789 (2015) 28-42 [arXiv:1501.06431]
- [7] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Measurement of electron neutrino CCQE-like quasielastic scattering in the MINERvA experiment" [arXiv:1501.05214]
- [8] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Implication of recent MINERvA result for neutrino energy reconstruction" [arXiv:1501.05210]
- [9] T. Walton et al. (MINERvA Collaboration) " Measurenet of muon plus proton final satate in neutrino interactions on hydrocarbon at  $E_{\nu} \sim 4.2$  GeV. Phys.Rev. D91, (2015), 7, 071301 [arXiv:1409.4497[hep-ex]].
- [10] B. Eberly et al. (MINERvA Collaboration) " Charged pion production in  $\nu_{\mu}$  intrraction on hydrocarbon at  $\langle E_{\nu} \rangle \sim 4.$  GeV. Phys.Rev. D92 (2015) 9, 092008 [arXiv:1406.6415[hep-ex]]

### 3.2 Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах

Научный руководитель н.с Анатолий Васильевич Копылов

Список исполнителей:

н.с. Игорь Вадимович Орехов

вед.инженер Евгений Павлович Петров

н.с. Валерий Вячеславович Петухов

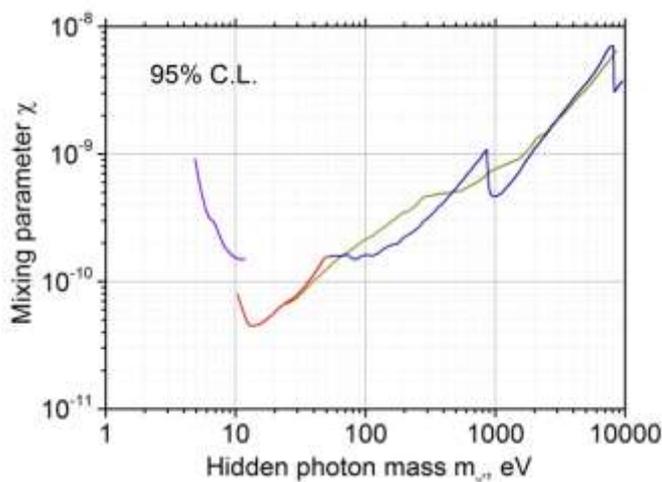
#### 3.2 РЕФЕРАТ

Низкофоновый газовый детектор с порогом регистрации несколько эВ (объект)

Регистрация когерентного рассеяния нейтрино на ядрах, (цель)

Регистрация скрытых фотонов холодной темной материи (цель)

Завершен первый этап работы, получены ограничения на параметр смешивания скрытый фотон – фотон (результат)



#### 3.2 ВВЕДЕНИЕ.

Современные детекторы ионизирующего излучения, как правило, имеют порог в несколько сотен эВ. Область энергий менее 100 эВ практически не использовалась. Регистрация когерентного рассеяния нейтрино на ядрах для антинейтрино от реакторов предполагает надежную работу детектора ионизирующего излучения именно в области менее 100 эВ. Этим объясняется наш интерес к разработке соответствующей методики. Помимо регистрации когерентного рассеяния существуют также и другие задачи, которые требуют низкого порога регистрации. Среди них – регистрация скрытых фотонов в качестве частиц, кандидатов на холодную темную материю. Низкофоновый газовый детектор с порогом регистрации несколько эВ является весьма эффективным детектором для регистрации конверсии скрытый фотон – фотон при этом этот детектор не регистрирует конверсию фотон – скрытый фотон. Так что с экспериментальной точки

зрения эти два процесса не одно и то же, в то время как существующие ограничения из астрофизических исследований получены с использованием теоретических моделей, где не предполагается различия между этими процессами. Конструкция детектора, разработанная методика и первый результат, полученный за два месяца круглосуточных измерений, нами изложены в трех электронных препринтах и поданы для публикации в научных журналах.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

В плане дальнейшего развития методики был разработан, изготовлен и протестирован мультикатодный счетчик для регистрации одноэлектронных событий, вызванных эмиссией электронов с поверхности металлического катода. Наличие 4х катодов и возможность измерения в трех конфигурациях позволяла вычистить фон от торцов счетчика с искаженным электрически полем, а также от треков ионизирующих частиц, проходящих в пространстве за катодом.

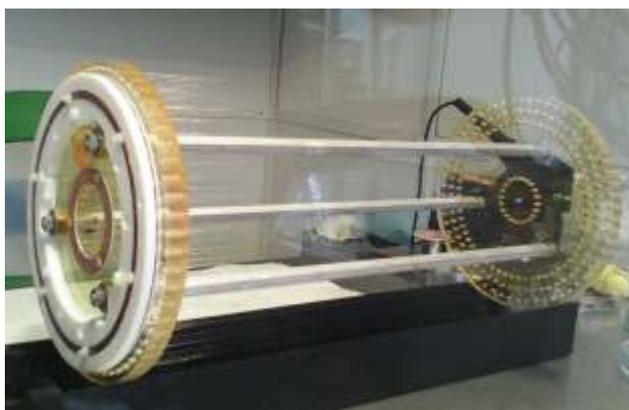


Рисунок 3.2.1 - Общий вид центральной части мультикатодного счетчика.

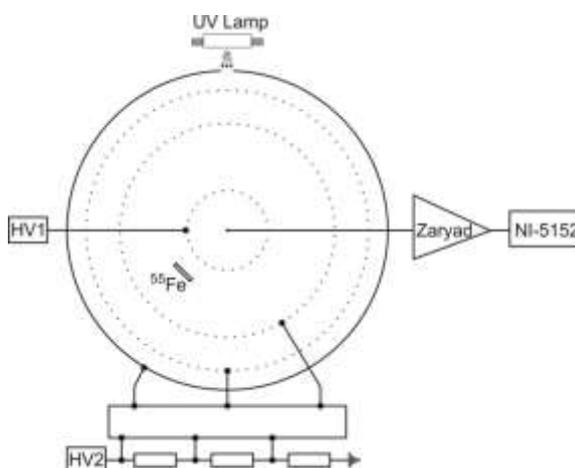


Рисунок 3.2.2 - Упрощенная электронная схема детектора.

Счетчик был прокалиброван источником рентгеновского излучения  $^{55}\text{Fe}$  и УФ фотонами от ртутной лампы через кварцевое окно. Использовался режим ограниченной пропорциональности с высоким, порядка 105, коэффициентом газового усиления.

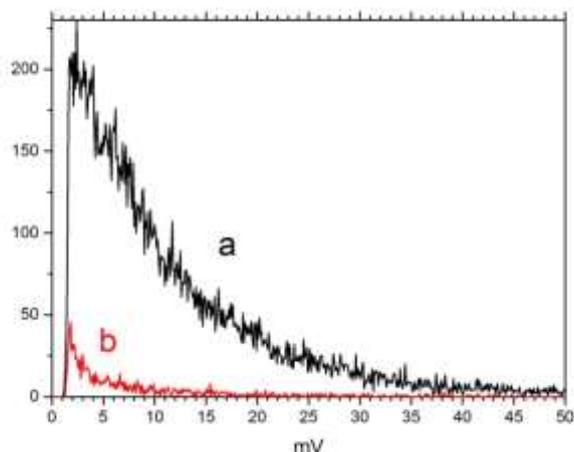


Рисунок 3.2.3 - Спектры одноэлектронных импульсов полученных в конфигурациях 1 (a) и 2 (b).

По завершению отработки методики были проведены измерения в течение ноября и декабря 2015 года и по результатам математической обработки полученных экспериментальных данных были впервые получены пределы на параметр смешивания для области масс скрытых фотонов от 5 эВ до 10 кэВ.

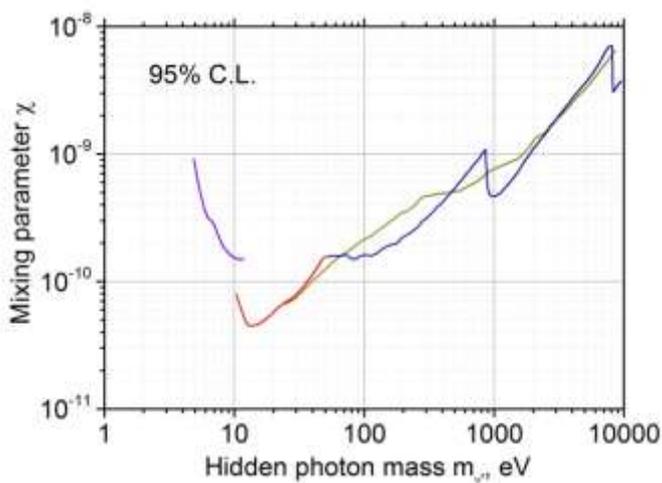


Рисунок 3.2.4 - Пределы на параметр смешивания, полученные по результатам измерений в течение 60 суток в ноябре-декабре 2015 года.

### 3.2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована задача поиска скрытых фотонов холодной темной материи по одиночным электронам, эмитируемым с поверхности металлического катода. Предложен

метод регистрации одиночных электронов с помощью низкофонового газового детектора с порогом регистрации несколько эВ и возможностью вычитания фона с помощью многокатодной конструкции счетчика. Разработан и изготовлен мультикатодный счетчик (МуКС) и проведены его наладка и испытания. Проведены измерения в течение 60 суток в ноябре-декабре 2015 года в 115 корпусе г.Троицк, Москва, обработаны экспериментальные данные и по результатам обработки получены пределы на параметр смешивания скрытый фотон – фотон для области масс скрытых фотонов от 5 эВ до 10 кэВ. Результаты для данной области масс получены впервые, представлены в трех электронных препринтах и поданы для публикации в научных журналах. В течение 2016-2017 года планируется изготовить усовершенствованную конструкцию детектора, провести исследования в плане дальнейшего совершенствования методики и с новым усовершенствованным детектором провести измерения в подземной лаборатории с низким потоком мюонов. Предполагается увеличить чувствительность эксперимента на порядок.

### 3.2 Список публикаций

1. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V., Solomatin A.E. / "Gaseous Detector with sub-keV Threshold to Study Neutrino Scattering at Low Recoil Energies" // *Advances In High Energy Physics* (2014) Article ID 147046

2. А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов, А.Е.Соломатин / «Газовый детектор ионизирующего излучения для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах» // Письма в Журнал Технической Физики, 2014, т.40, вып.5, сс.1 – 7

3. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "Using a Multi-Cathode Counter (MCC) in the Search for Hidden Photon CDM" // arXiv: 1509.03033 [physics.ins-det]

4. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "Experience of Using a Multi-Cathode Counter (MCC) in a Search for Hidden Photon CDM " // arXiv: 1512.04675 [physics.ins-det]

5. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "A Search for Hidden Photon CDM in a Multi-Cathode Counter (MCC) data" // arXiv: 1601.02199 [physics.ins-det]

Список основных научных публикаций, индексируемых в бд Web of Sciences [1,2]

### 3.3 Новые свойства атомных ядер и нейтрино и их роль в формировании новых явлений в физике и астрофизике

Научный руководитель темы с.н.с. к.ф.-м.н. Ю. С. Копысов

#### 3.3 РЕФЕРАТ

Разработана ядерно-молекулярная концепция холодной трансмутации атомных ядер. В её основе лежит представление о том, что молекула, содержащая в себе тяжёлое ядро-катализатор и атомы дейтерия, при определённых условиях превращается в ядерно-молекулярный составной активированный комплекс, в котором ядро-катализатор захватывает ядра дейтерия, расщепляет их, поглощает нейтроны и выбрасывает энергичные протоны, нагревающие окружающую среду. Такая последовательность явлений осуществляется благодаря рыхлому нуклонному гало вокруг ядра-катализатора, образуемому во втором порядке теории возмущений в форме вытянутых цилиндрических квазистационарных шлейфов, в которых реализуется предложенный ранее автором кумулятивный процесс преодоления кулоновского барьера.

Разработка теоретического аппарата, способного численно подтвердить изложенную концепцию, ещё не окончена, однако уже удалось получить убедительные аргументы в пользу возможности существования цилиндрических ядерных структур. Удалось также рассчитать спектр квазистационарных уровней в этих структурах и проследить эволюцию спектра с изменением размеров ядерно-молекулярного активированного комплекса.

В рамках обнаруженной аналогии обсуждаемых процессов с классическим процессом Оппенгеймера-Филлипса найдена возможность исследования новых ядерных структур средствами традиционной ускорительной техники.

#### 3.3 ВВЕДЕНИЕ

В последней четверти века в зарубежных странах и в России развивается новое направление в науке, которое в разных странах имеет разное название: В Италии и Японии – это “Condensed Matter Nuclear Science” (CMNS), в США – “Low Energy Nuclear Reactions” (LENR) (международные конференции проводились под названием International Conference on Cold Fusion” (ICCF)), в России – Холодная трансмутация атомных ядер (ХТЯ). По этой теме в России была проведена 21 конференция и 13-я международная конференция ICCF13.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о появлении избыточного тепловыделения в различных экспериментах с металлами, насыщенными водородом, обогащённым дейтерием, а также следов ядерных излучений типа гамма-квантов, нейтронов, трития. Несмотря на большой

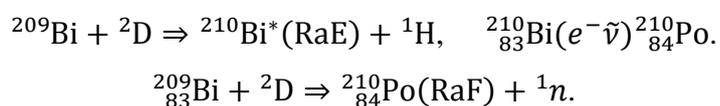
поток работ, авторы которых пытаются разобраться в физической сущности новых явлений, единой теоретической концепции наблюдаемых процессов не существует. В истекших 2014 и 2015 годах были проведены исследования с целью сформулировать теоретическую концепцию ХТЯ, не выходящую за рамки традиционной ядерной физики.

### 3.3 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первые наметки такой концепции содержатся в работе [1], доложенной Г. Т. Зацепиным в апреле 1978 г. в Вашингтоне на мемориальном симпозиуме, посвященном памяти К. Л. Коуэна. Обсуждалась возможность каталитического ускорения *pp*-реакции водородной цепи в присутствии третьей частицы-нуклида. Отмечалось, что необходимое условие ускорения – существование рыхлых составных ядер, т. н. «активированных ядерных комплексов». Оставался невыясненным вопрос, какова природа рыхлых ядерных состояний. Решение этого вопроса было предложено в докладах [2,3,4,5,6]. В рамках теории самосогласованного поля ядра была разработана гипотеза о существовании процесса кумулятивного преодоления кулоновского барьера. Процесс осуществляется через формирование и распад квазистационарной протяженной осесимметричной ядерной структуры, которая является ключевым пунктом новой концепции, сформулированной в докладах [7,8,9,10]. В качестве рабочей гипотезы предполагается, что такие ядерные структуры служат основой для осуществления процессов ХТЯ. В связи с этим необходимо иметь строгое теоретическое обоснование возможности существования обсуждаемой здесь протяженной ядерной структуры.

В истекшем 2015 году были проведены исследования с целью найти пути такого обоснования. Для описания цилиндрической самосогласованной ядерной структуры весьма удобным оказался аппарат анизотропного квантового осциллятора. С его помощью удалось аналитически получить первое приближение для самосогласованного осцилляторного поля нуклонной струны. Было также показано, что гантелеобразной струне, имитирующей молекулярную ядерную структуру, существуют не только связанные состояния нуклонов, но и богатый спектр квазистационарных уровней. Такие состояния как раз и открывают возможность реализации кумулятивного процесса преодоления кулоновского барьера атомами водорода с одновременным адиабатическим схлопыванием всей молекулы на ядро-катализатор с образованием нового возбужденного ядра, распадающегося на конечные продукты.

Рассмотрена интересная возможность новой интерпретации процесса Оппенгеймера-Филлипса на ядре  $^{209}\text{Bi}$  [9]:



В работах [10,11] было показано, что начиная с энергии налетающего дейтрона  $E_d \sim 8$  МэВ снижение  $E_d$  приводит к резкому увеличению отношения сечения реакции  $(d,p)$  к сечению реакции  $(d,n)$ . Предложенная модель процесса кумулятивного преодоления кулоновского барьера вполне может объяснить этот эффект. Однако, желательны измерения при как можно более низких энергиях.

### 3.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по разработке теории ядерного катализа посвящаются автором Столетнему Юбилею со дня рождения академика Георгия Тимофеевича Зацепина. Г. Т. Зацепина особенно интересовали реакции подфотосферных областях Солнца, где по его мнению могли возникать термоядерные взрывы с выбросом вещества и генерацией потоков нейтрино. По мнению автора, такие взрывы могли бы происходить только под действием ядерного катализа, возникающего под воздействием крупных небесных тел, падающих на солнечную атмосферу. Автор надеется, что основные принципы, сформулированные при разработке ядерно-молекулярной модели холодной трансмутации атомных ядер помогут и в создании теории солнечных подфотосферных взрывов.

### 3.3 ЛИТЕРАТУРА

1. Yu. S. Kopysov. "Solar neutrinos and the catalytic role of a third particle in hydrogen burning". AIP Conference Proceedings No. 52, New York, 1979.
2. Ю. С. Копысов / Нуклеохимия холодной трансмутации атомных ядер. (ХТЯ) // Приглашённый доклад на пленарном заседании I Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Министерство образования и науки РФ, РУДН, Москва (13-16).05.2014.
3. Ю. С. Копысов / Нуклеохимия холодной трансмутации атомных ядер (ХТЯ) // I Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Москва, РУДН, (13-16).05.2014, стр. 128.
4. Ю. С. Копысов / Кумулятивный процесс преодоления кулоновского барьера в реакциях холодной трансмутации атомных ядер // Доклад на международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». МИФИ, Москва, (17-21).11.2014.
5. Ю. С. Копысов / Кумулятивный процесс преодоления кулоновского барьера в реакциях холодной трансмутации атомных ядер // Доклад на I Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Москва, РУДН, 14.05.2015.
6. Ю. С. Копысов / Кумулятивный процесс преодоления кулоновского барьера в реакциях холодной трансмутации атомных ядер // I Всероссийская конференция по

проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Москва, РУДН, 14.05.2015, стр. 56.

7. Ю. С. Копысов / Ядерно-молекулярный катализ в процессах холодной трансмутации атомных ядер // Доклад на LI Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Москва, РУДН, 12.05.2015.

8. Ю. С. Копысов / Ядерно-молекулярный катализ в процессах холодной трансмутации атомных ядер // LI Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Москва, РУДН, 12.05.2015, стр. 236-237.

9. Oppenheimer and Phillips, Phys. Rev. **48**, 500 (1935).

10. Cork, Phys. Rev. **70**, №7-8, 1946.

11. Cork and Tatel, Phys. Rev. **71**, №7, 1947.

## 4 Отдел физики высоких энергий

### 4.1 Лаборатории моделирования физических процессов при высоких энергиях Изучение фундаментальных свойств материи на установке CMS в ЦЕРНе: поиск новой физики на Большом адронном коллайдере

#### 4.1 СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, зав. лабораторией, д-р физ.-мат. наук Н.В. Красников

Исполнители темы

С.н.с., канд. физ.-мат. наук Ю.М. Андреев

В.н.с., канд. физ.-мат. наук С.Н. Гниненко

М.н.с. А.В. Дерменев

С.н.с., канд. физ.-мат. наук М.М. Кирсанов

М.н.с. А.Е. Корнеев

Н.с., канд. физ.-мат. наук Д.А. Тлисов

С.н.с., канд. физ.-мат. наук А.Н. Торопин

#### 4.1 РЕФЕРАТ

Отчет: 39 с., 36 рис., 1 табл., 2 источника, 1 прил.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ГЕНЕРАТОРЫ МОНТЕ-КАРЛО, АДРОННЫЕ СТРУИ, КАЛИБРОВКА АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ.

Объектом исследования являются процесс рождения и возможность экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Цель работы:

Продолжение анализа данных эксперимента CMS, полученных в 2012 г. при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 ТэВ, с целью выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, проверки предсказаний Стандартной модели и поиска возможных отклонений.

Моделирование сигнальных событий от распадов  $W_R$  и  $N_e$  с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. Моделирование фоновых событий с сигнатурой «два лептона и две струи».

Изучение шумов адронного калориметра установки CMS.

Методы выполнения работы:

Разработка методов выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS. Развитие Монте-Карло-генераторов для моделирования таких процессов. Анализ данных эксперимента CMS,

собранных в 2010-2012 гг. Создание и поддержка необходимого программного обеспечения.

Мониторинг качества данных и контроль работы детекторных систем эксперимента CMS во время дежурств в ЦЕРНе.

Экспериментальные результаты:

В результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2010-2012 гг. и соответствующих полной светимости БАК  $19,7 \text{ фб}^{-1}$ , в 2014 г. были получены предварительные ограничения на массу правого бозона  $W_R$  около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 1800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 3,7 раза.

Степень внедрения:

Разработана основа ПО для контроля измерительной аппаратуры, реконструкции и анализа физических объектов высокого уровня, доступных наблюдению в эксперименте CMS. Выполнены работы по созданию программного обеспечения для стенда по изучению характеристик новых образцов гибридных фотодиодов, планируемых для установки в адронный калориметр установки CMS.

Научно-технический уровень выполненной НИР:

Результаты, полученные в эксперименте CMS в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 ТэВ по поиску тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БАК	Большой адронный коллайдер
КХД	квантовая хромодинамика - современная теория сильных взаимодействий
ЛПСМ	лево-право симметричная модель
МЛФД	микروпиксельный лавинный фотодиод
ПО	программное обеспечение
СМ	Стандартная модель — теоретическая схема, используемая в настоящее время для расчетов вероятностей рождения различных частиц (в том числе бозона Хиггса и топ-кварка) на коллайдере LHC; хорошо проверена экспериментально
Тэватрон	ускоритель Национальной лаборатории им. Э.Ферми, США
ЦЕРН	Европейская организация ядерных исследований
CMS	Compact Muon Solenoid – Компактный мюонный соленоид, экспериментальная установка для изучения процессов взаимодействия адронов высокой энергии на LHC
CMSSW	CMS Software – пакеты программ реконструкции и моделирования различных реакций в детекторе CMS
DCS	Detector Control System - система контроля работы детектора
DPG	Detector Performance Group – группа характеристик детектора
DQM	Data Quality Monitoring - контроль качества принимаемых экспериментальных данных
HCAL	Hadronic Calorimeter – адронный калориметр установки CMS
HPD	Hybrid Photodiode – гибридный фотодиод
PYTHIA	стандартная программа моделирования взаимодействий адронов высоких энергий
QIE	Charge (Q) Integrator and Encoder – зарядово-цифровой преобразователь
SiPM	Silicon Photomultiplier – кремниевый фотоумножитель
SLHC	Super LHC – проект модернизации коллайдера LHC
SPS	Super Proton Synchrotron – протонный синхротрон в ЦЕРНе
Фб	фемтобарн, $10^{-15}$ барн

#### 4.1 ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. сотрудники Лаборатории моделирования физических процессов в соответствии с планом научно-исследовательской работы Лаборатории МФП на 2015 г. выполняли работы по модернизации адронного калориметра детектора “Компактный мюонный соленоид”, по моделированию отклика детектора “Компактный мюонный соленоид” на процессы новой физики, а также участвовали в экспериментах, не связанных с Большим адронным коллайдером.

### 4.1.1 МОДЕРНИЗАЦИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА CMS

#### Сертификация данных адронного калориметра

В 2015 году детектором CMS было набрано около  $3 \text{ fb}^{-1}$  данных в протон-протонных столкновениях, большое количество данных космических ранов, а также до конца года будет происходить накопление данных по ион-ионным столкновениям. Проверка данных адронного калориметра и сертификация этих данных для последующего физического анализа является одной из важнейших задач. Сотрудники Лаборатории МФП участвовали в этой работе, в результате которой были своевременно найдены и устранены многочисленные проблемы в работе электроники переднего адронного калориметра: потеря синхронизации данных в передней считывающей электронике, потеря данных с задней считывающей электроники, нештатная работа источников низковольтного питания и другие проблемы (рисунок 4.1.1).

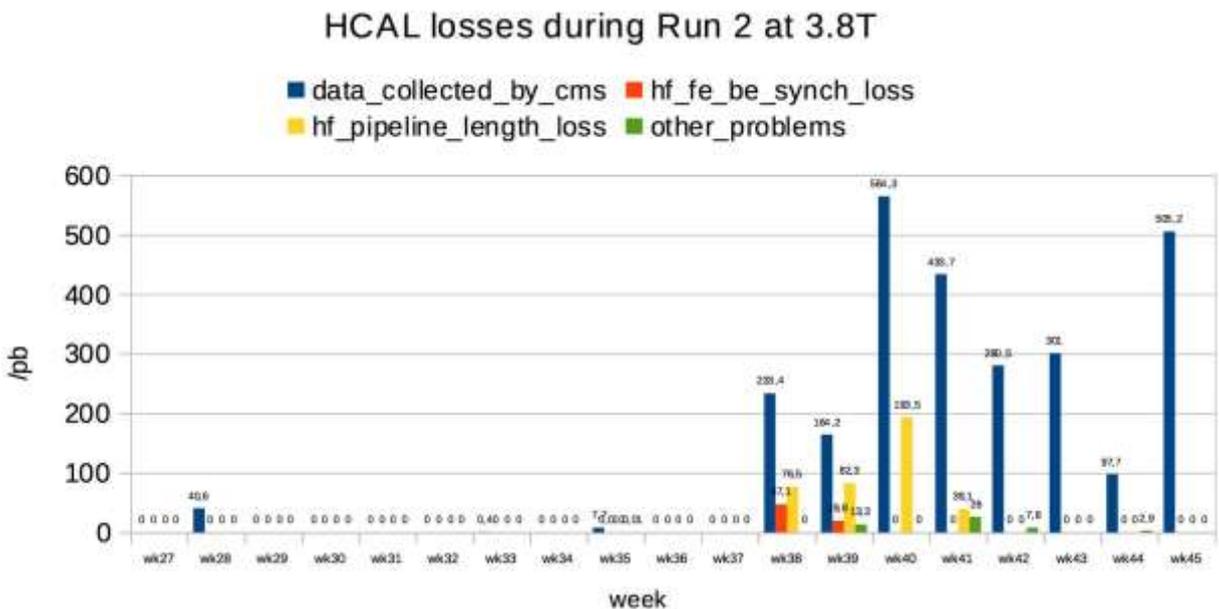


Рисунок 4.1.1 - Количество набранных данных детектором CMS и потерянных данных из-за проблем с адронным калориметром при магнитном поле 3,8 Тл.

Для сертификации данных адронного калориметра были с нуля разработаны специальные программы сертификации данных: CMT (рисунок 4.1.2) – для глобальных ранов: космики, протон-протонных, ион-ионных и протон-ионных столкновений; RMT (рисунок 4.1.3) – для локальных ранов: пьедестальных, светодиодных, лазерных. Данные инструменты позволяют выявлять различные проблемы в адронном калориметре –ошибки CapID (рисунки 4.1.4 и 4.1.5), потерю синхронизации данных в передней считывающей электронике, потерю данных задней считывающей электроники, нештатную работу

источников низковольтного питания (рисунок 4.1.6), каналы с повреждёнными оптическими волокнами (рисунки 4.1.7 и 4.1.8) и другие проблемы.

**Certificate Monitoring Tool for Global RUNs**

[CMT tool description](#)

**Reference to other Monitoring Tools:**

**Run List**

AMT Tool for Local Runs		RMT Tool for Local Runs		RMT Twiki		CMT Twiki					
#	Run Number	Num. of LSs	LHC Fill	Run Start Date	Run Duration	Run End Date	Link to CM tool	Link to RM tool	Magnetic Field	LHC Energy	Run Processing Date
1	236905	1562	3595	2015-03-04 20:02:55	8:57:10	2015-03-05 06:05:48	<a href="#">CMT_236905</a>	<a href="#">RMT_236905</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 22 21:44 /nb
2	237068	1983	3595	2015-03-05 19:28:18	11:26:55	2015-03-06 08:00:33	<a href="#">CMT_237068</a>	<a href="#">RMT_237068</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 23 23:15 /nb
3	237143	74	3596	2015-03-06 16:30:10	0:50:27	2015-03-06 16:45:11	<a href="#">CMT_237143</a>	<a href="#">RMT_237143</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:08 /nb
4	237146	51	3596	2015-03-06 17:00:07	0:47:06	2015-03-06 17:18:32	<a href="#">CMT_237146</a>	<a href="#">RMT_237146</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:07 /nb
5	237201	142	3596	2015-03-06 22:43:07	0:13:03	2015-03-06 23:35:21	<a href="#">CMT_237201</a>	<a href="#">RMT_237201</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 23:16 /nb
6	237202	402	3596	2015-03-06 23:39:13	1:29:10	2015-03-07 02:13:34	<a href="#">CMT_237202</a>	<a href="#">RMT_237202</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 21 19:21 /nb
7	237203	216	3596	2015-03-07 02:16:32	0:16:07	2015-03-07 03:38:31	<a href="#">CMT_237203</a>	<a href="#">RMT_237203</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 23:59 /nb
8	237216	274	3597	2015-03-07 14:34:29	0:40:15	2015-03-07 16:20:39	<a href="#">CMT_237216</a>	<a href="#">RMT_237216</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 21 01:16 /nb
9	237228	129	3597	2015-03-07 16:54:54	0:15:15	2015-03-07 17:45:09	<a href="#">CMT_237228</a>	<a href="#">RMT_237228</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 22:57 /nb
10	237229	15	3597	2015-03-07 17:46:07	1:00:07	2015-03-07 17:51:17	<a href="#">CMT_237229</a>	<a href="#">RMT_237229</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:04 /nb
11	237232	86	3597	2015-03-07 18:05:01	0:31:50	2015-03-07 18:38:34	<a href="#">CMT_237232</a>	<a href="#">RMT_237232</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 09:11 /nb
12	237234	24	3597	2015-03-07 18:44:03	0:56:24	2015-03-07 18:53:00	<a href="#">CMT_237234</a>	<a href="#">RMT_237234</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:06 /nb
13	237243	1119	3597	2015-03-08 08:48:23	6:05:18	2015-03-08 15:59:42	<a href="#">CMT_237243</a>	<a href="#">RMT_237243</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 21 17:29 /nb
14	237246	80	3598	2015-03-08 16:32:21	0:47:27	2015-03-08 16:50:57	<a href="#">CMT_237246</a>	<a href="#">RMT_237246</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:56 /nb
15	237255	41	3598	2015-03-09 06:13:50	0:50:02	2015-03-09 06:29:22	<a href="#">CMT_237255</a>	<a href="#">RMT_237255</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:58 /nb
16	237256	154	3598	2015-03-09 06:30:50	0:06:33	2015-03-09 07:29:51	<a href="#">CMT_237256</a>	<a href="#">RMT_237256</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 23:05 /nb
17	237257	93	3598	2015-03-09 07:31:47	0:37:56	2015-03-09 07:59:28	<a href="#">CMT_237257</a>	<a href="#">RMT_237257</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 22:15 /nb
18	237260	42	3598	2015-03-09 08:09:04	0:52:42	2015-03-09 08:21:42	<a href="#">CMT_237260</a>	<a href="#">RMT_237260</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:53 /nb
19	237262	200	3598	2015-03-09 08:26:40	0:39:52	2015-03-09 08:52:32	<a href="#">CMT_237262</a>	<a href="#">RMT_237262</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:27 /nb
20	237265	39	3598	2015-03-09 09:48:34	0:51:32	2015-03-09 10:02:52	<a href="#">CMT_237265</a>	<a href="#">RMT_237265</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 09:12 /nb
21	237318	84	3598	2015-03-09 16:51:29	0:36:33	2015-03-09 17:20:51	<a href="#">CMT_237318</a>	<a href="#">RMT_237318</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 21:41 /nb
22	237332	184	3598	2015-03-09 18:09:08	0:46:01	2015-03-09 18:26:23	<a href="#">CMT_237332</a>	<a href="#">RMT_237332</a>	0.0376024239 T	None GeV	Mar 20 12:47 /nb

Рисунок 4.1.2 - Заглавная страница CMT.

**Remote Monitoring Tool for Local Runs**

[RMT tool description](#)

[Det/Diag link](#)

**Reference to other Monitoring Tools:**

**Run List**

CMT Tool for Global Runs		AMT Tool for Local Runs		RMT Twiki		CMT Twiki			
#	Run Number	Run Type	Num. of events	Run Date	Run Time	Reference Run	Link to RDM tool	Link to DQM data	Comment
1	262065	LED	1000	2015-11-19	11:16:52	212965	<a href="#">LED_262065</a>	<a href="#">Det/Diag_262065</a>	OK
2	262050	LED	1000	2015-11-19	09:50:15	212965	<a href="#">LED_262050</a>	<a href="#">Det/Diag_262050</a>	OK
3	262043	LED	2000	2015-11-19	09:19:55	212965	<a href="#">LED_262043</a>	<a href="#">Det/Diag_262043</a>	OK
4	262040	LED	2000	2015-11-19	08:59:33	212965	<a href="#">LED_262040</a>	<a href="#">Det/Diag_262040</a>	OK
5	261351	LED	2000	2015-11-14	14:58:18	212965	<a href="#">LED_261351</a>	<a href="#">Det/Diag_261351</a>	OK
6	261349	LED	2000	2015-11-14	13:31:25	212965	<a href="#">LED_261349</a>	<a href="#">Det/Diag_261349</a>	OK
7	261182	LED	2000	2015-11-12	21:46:49	212965	<a href="#">LED_261182</a>	<a href="#">Det/Diag_261182</a>	OK
8	261118	LED	1000	2015-11-11	18:51:57	212965	<a href="#">LED_261118</a>	<a href="#">Det/Diag_261118</a>	OK
9	260930	LED	2000	2015-11-09	09:31:13	212965	<a href="#">LED_260930</a>	<a href="#">Det/Diag_260930</a>	OK
10	260784	LED	10000	2015-11-05	08:13:42	135077	<a href="#">LED_260784</a>	<a href="#">Det/Diag_260784</a>	OK
11	260783	LED	10000	2015-11-05	08:07:49	135077	<a href="#">LED_260783</a>	<a href="#">Det/Diag_260783</a>	OK
12	260777	LED	10000	2015-11-05	06:59:58	135077	<a href="#">LED_260777</a>	<a href="#">Det/Diag_260777</a>	OK
13	260710	LED	2000	2015-11-03	22:12:08	135077	<a href="#">LED_260710</a>	<a href="#">Det/Diag_260710</a>	OK
14	260655	LED	2000	2015-11-03	08:40:20	135077	<a href="#">LED_260655</a>	<a href="#">Det/Diag_260655</a>	OK
15	260314	LED	2000	2015-10-29	16:04:19	135077	<a href="#">LED_260314</a>	<a href="#">Det/Diag_260314</a>	OK
16	260297	LED	2000	2015-10-29	14:05:59	135077	<a href="#">LED_260297</a>	<a href="#">Det/Diag_260297</a>	OK

Рисунок 4.1.3 - Заглавная страница RMT.

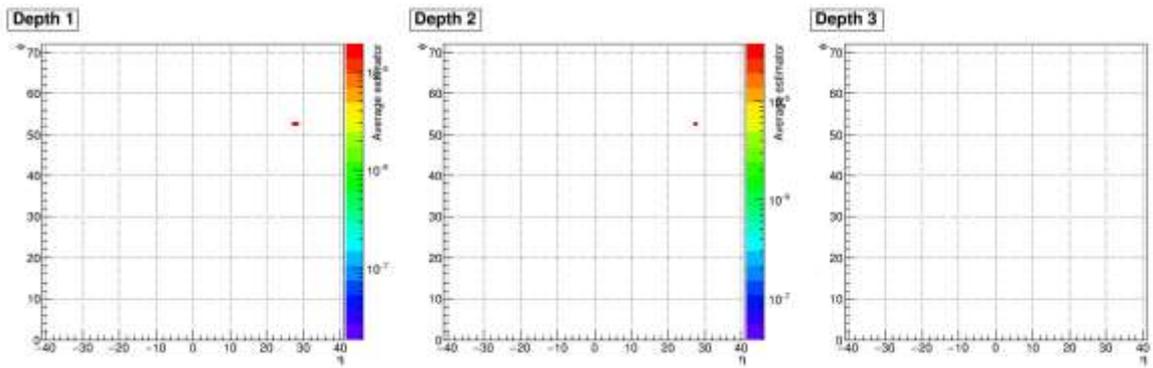


Рисунок 4.1.4 - Пример наличия ошибок CapID в нескольких каналах первой и второй глубины торцевой части адронного калориметра во время протон-протонных столкновений, обнаруженных с помощью СМТ.

**4.Lumisecion Status for HE**

**Legends: Red boxes correspond BAD LS selected with following cut**

LS	Number of events	< Nbcs > Depth 1	< Nbcs > Depth 2	< Nbcs > Depth 3
1	479	0	0	0
2	510	0	0	0
3	497	0	0	0
4	467	0	0	0
5	463	0	0	0
6	478	0	0	0
7	491	0	0	0
8	508	0	0	0
9	499	0	0	0
10	462	0	0	0
11	502	0	0	0
12	491	0.00443459	0.00221729	0
13	451	0	0	0
14	496	0	0	0
15	506	0	0	0
16	504	0	0	0
17	514	0	0	0
18	527	0	0	0
19	520	0	0	0
20	460	0	0	0
21	516	0	0	0
22	497	0	0	0
23	557	0	0	0
24	463	0	0	0
25	473	0	0	0
26	548	0	0	0
27	469	0	0	0
28	459	0	0	0

Рисунок 4.1.5 - Пример наличия ошибок CapID в одной люмисекции во время протон-протонных столкновений в первой и второй глубине торцевой части адронного калориметра, обнаруженных с помощью СМТ.

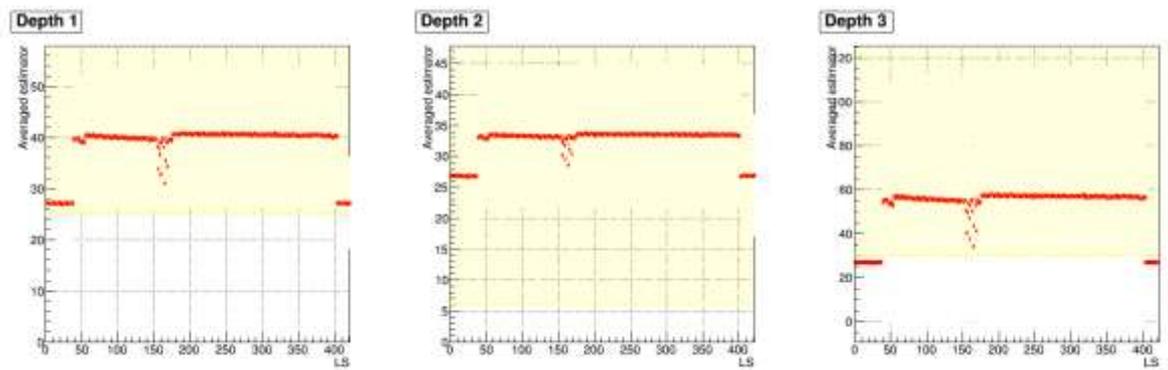


Рисунок 4.1.6 - Пример наличия различных ошибок в люмисекции во время протон-протонных столкновений в торцевой части адронного калориметра, обнаруженных с помощью СМТ.

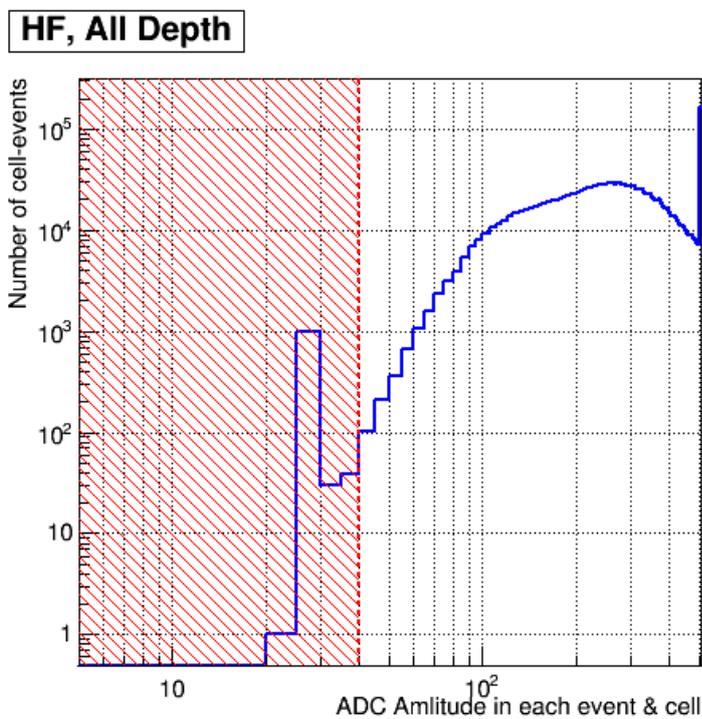


Рисунок 4.1.7 - Распределение по амплитуде в переднем калориметре, виден пик от канала с повреждённым оптоволоконном с низкой средней амплитудой в RMT.

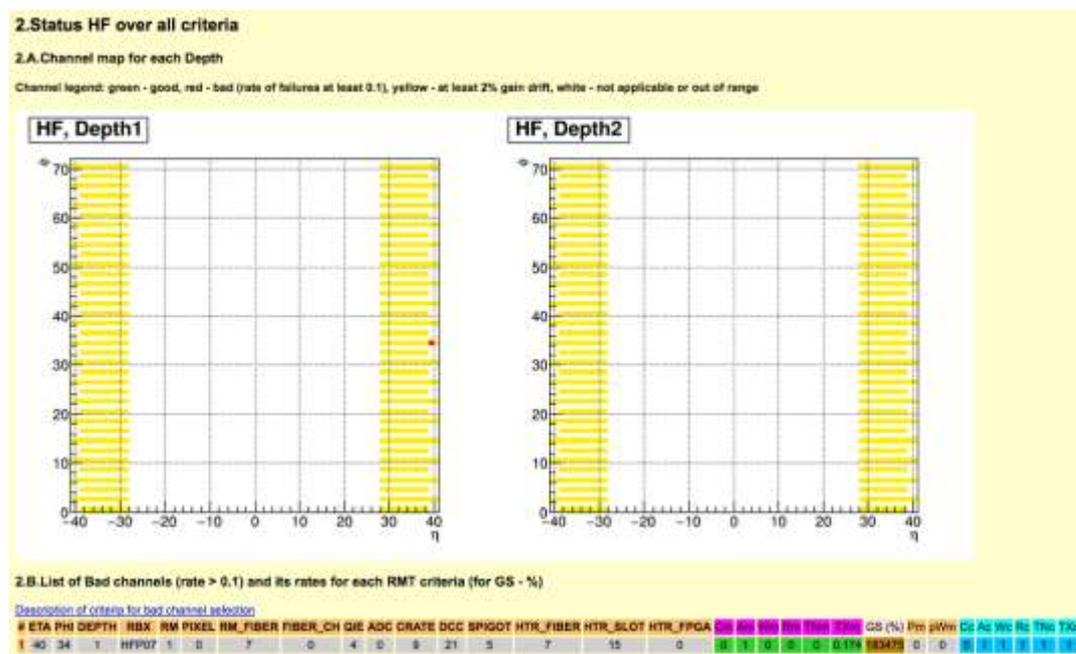


Рисунок 4.1.8 - Канал с повреждённым оптоволоконном в RMT.

Тестирование электроники для модернизации адронного калориметра.

В 2015 году была проведена подготовка и проверка прототипов электроники для модернизации передней электроники торцевой части адронного калориметра в 2016-2017 гг. и баррельной - в 2017-2018 гг. Сотрудники Лаборатории МФП участвовали в двух тестах: облучение задней панели с модулем питания и QIE-карт в смешанном пучке высокой интенсивности ускорителя PS на установке CHARМ и тесте на старение задней панели с модулем питания и QIE-карт. QIE-карта (рисунок 4.1.9) представляет собой электронную плату, на которой находятся 12 высокоскоростных АЦП, которые считывают информацию с кремниевых фотодетекторов, многофункционального чипа Igloo2, мостового чипа, оптического передатчика VTTX-2 и других вспомогательных элементов. Далее эти карты будут собираться в наборы (рисунок 4.1.10) и устанавливаться внутрь детектора CMS. В тесте CHARМ передняя электроника была установлена в активную зону и облучалась в течение одной недели смешанным пучком. Общая доза облучения электроники составляла около 10 кРад. В результате эксперимента была подтверждена стойкость электроники к высоким дозам облучения и ее работоспособность (рисунок 4.1.11).



Рисунок 4.1.9 – QIE-карта новой передней считывающей электроники торцевого и баррельного адронных калориметров. Сверху вниз стрелками обозначены 6 высокоскоростных АЦП (ещё 6 находятся с другой стороны), многофункциональный чип Igloo2, оптический передатчик VTTX-2, мостовой чип.

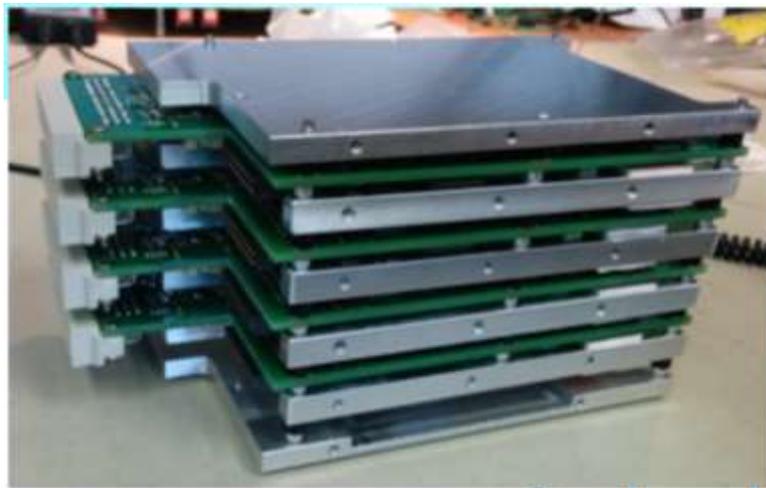


Рисунок 4.1.10 - Наборы QIE-карт с охлаждающей механикой.

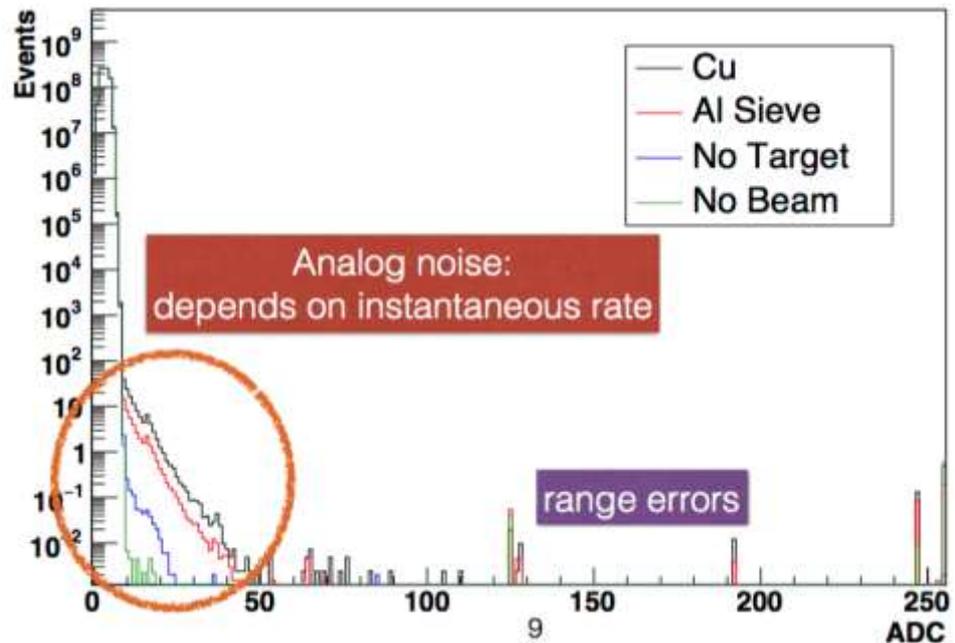


Рисунок 4.1.11 - Пьедестальный сигнал от считывающей электроники при различных мишенях и различном уровне радиации на установке CHARM.

Тест по ускоренному состариванию производился в специальной климатической камере (рисунки 4.1.12 и 4.1.13), которая может поддерживать постоянную внутреннюю температуру. Тестирование и работа электроники происходили при последовательном повышении температуры 25С, 40С, 60С, 70С (рисунок 4.1.14). При этом наиболее горячие места QIE-карт, такие как АЦП и чип Igloo2 (рисунок 4.1.15), имели температуру примерно на 15С выше температуры окружающего воздуха. Две недели работы электроники в климатической камере эффективно соответствуют двум годам работы в обычных условиях.



Рисунок 4.1.12 - Климатическая камера для ускоренного старения электроники и задняя считывающая электроника.

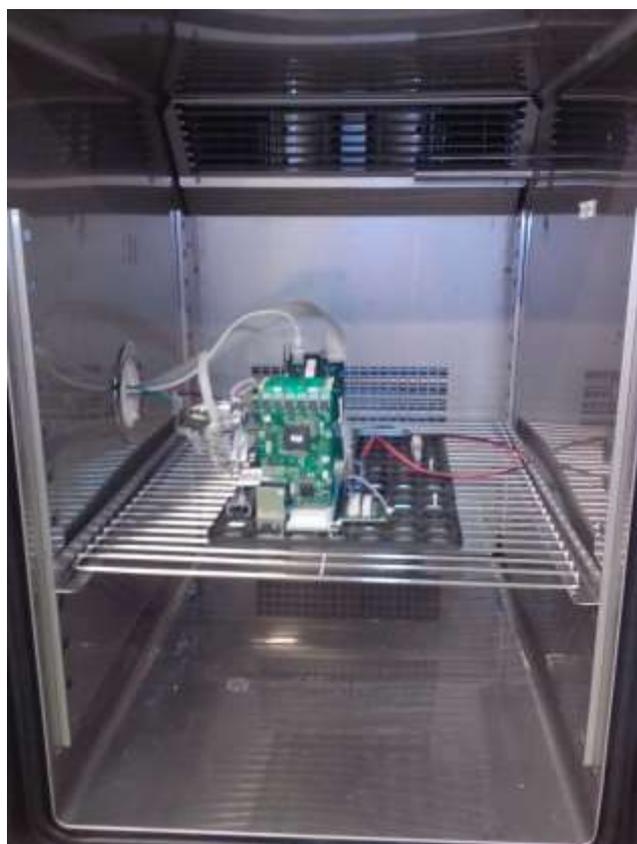


Рисунок 4.1.13 - Электроника внутри климатической камеры.

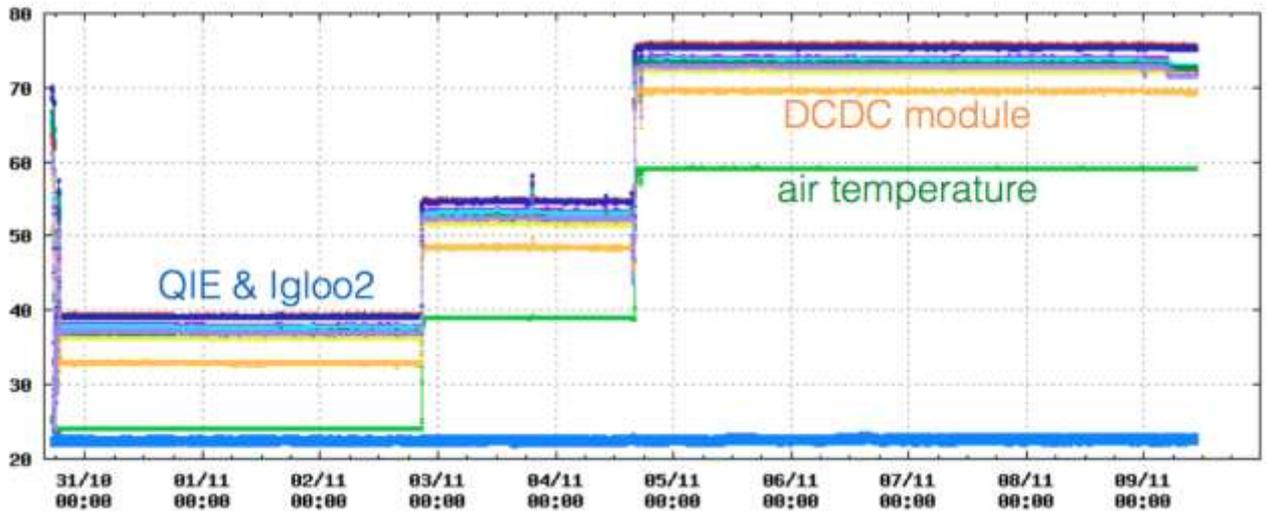


Рисунок 4.1.14 - Температура в климатической камере в зависимости от дня теста.

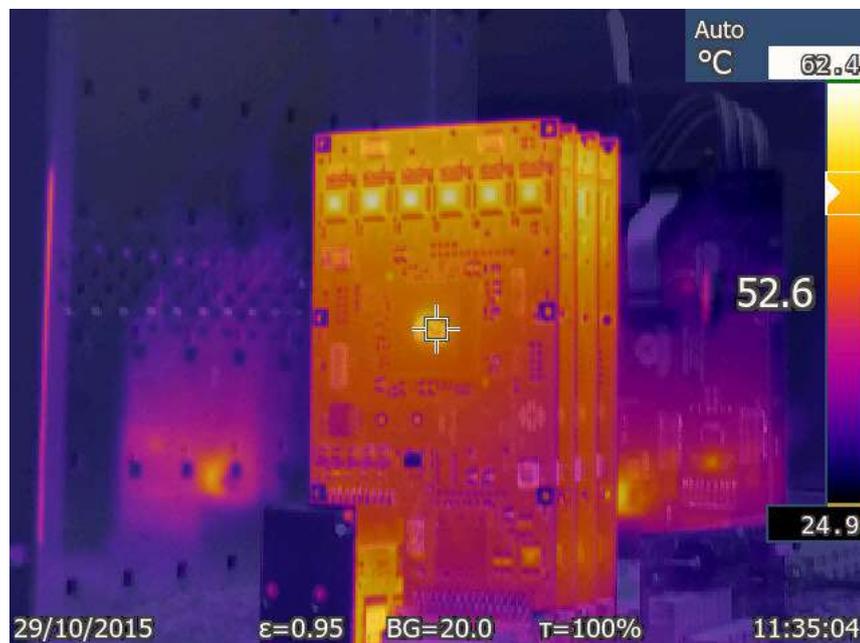


Рисунок 4.1.15 – QIE-карта в ИК-диапазоне.

#### Модернизация фотоприемников адронного калориметра.

Одной из основных целей эксперимента CMS на БАК является поиск и исследование новой физики и, особенно, детектирование суперсимметричных частиц. Многие из возможных сигнатур новой физики требуют измерения адронных струй с поперечным импульсом вплоть до нескольких тераэлектронвольт. Следовательно, одним из основных требований при конструировании детектора CMS является хорошая адронная калориметрия. Роль адронной калориметрии особенно возрастёт при повышении светимости ускорителя БАК до  $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ . Для улучшения параметров адронного

калориметра (АК) CMS в условиях высокой светимости предложено использовать систему считывания сигналов с АК по слоям (продольную сегментацию калориметра). Такая модификация требует замены существующих фотоприёмников (гибридных фотодиодов) на микропиксельные лавинные фотодиоды или кремниевые фотоэлектронные умножители (КФЭУ), которые обладают более высокой квантовой эффективностью, компактностью и нечувствительностью к магнитным полям. Кроме того, использование КФЭУ может более, чем в 10 раз улучшить соотношение сигнал/шум при регистрации мюонов, что позволит проводить непрерывную калибровку АК CMS и сохранить требуемое разрешение в условиях значительных повреждений его сцинтилляционных элементов.

Сотрудники Лаборатории МФП принимали активное участие в разработке и исследовании КФЭУ для апгрейда АК CMS. Участниками группы были созданы уникальные автоматизированные экспериментальные стенды для прецизионных измерений наиболее важных параметров КФЭУ: коэффициента усиления, квантовой эффективности, быстродействия, шумов, ёмкости, последовательного сопротивления, линейности. Были проведены измерения многочисленных прототипов КФЭУ, изучена их радиационная стойкость, стабильность в условиях повышенных температур и влажности. Результаты этих измерений существенно продвинули понимание принципов работы КФЭУ и помогли оптимизировать их структуру для работы в условиях АК БАК.

В течение этого года группой была продолжена разработка и использование новых измерительных стендов и проведена серия измерений предварительной партии КФЭУ для первой фазы модернизации АК CMS на БАК.

Новые фотоприемники КФЭУ, устанавливаемые в рамках модернизации в АК CMS должны будут использоваться в течение достаточно продолжительного периода времени порядка 10 лет. Поэтому важно оценить скорость старения и изменения параметров КФЭУ с течением времени эксплуатации. Для этих целей был подготовлен новый измерительный стенд и программное обеспечение для автоматизации измерений. Общий вид стенда показан на рисунке 16: 1 – источник высокого напряжения и многоканальная система сбора данных, 2 – термокамера, внутри камеры находится модуль для установки КФЭУ, 3 – измерительная электроника подключена по интерфейсу GPIB (General Purpose Interface Bus) к компьютеру, что позволяет автоматизировать измерения (сканирование по отдельным фотоприемникам, управление источником света и измерение температуры). Продолжительное время эксплуатации имитируется с помощью размещения КФЭУ в среде с повышенной температурой.

Стенд включает в себя:

термокамеру, (температура 25 – 200 градусов Цельсия)  
источник высокого напряжения Keithley 6487  
многоканальную систему сбора данных Keithley 2701  
модуль подключения КФЭУ на 80 каналов (10 линеек), в модуле установлен  
источник света (светодиод) и датчик температуры  
компьютер для управления измерениями, программное обеспечение написано с  
применением LabVIEW.

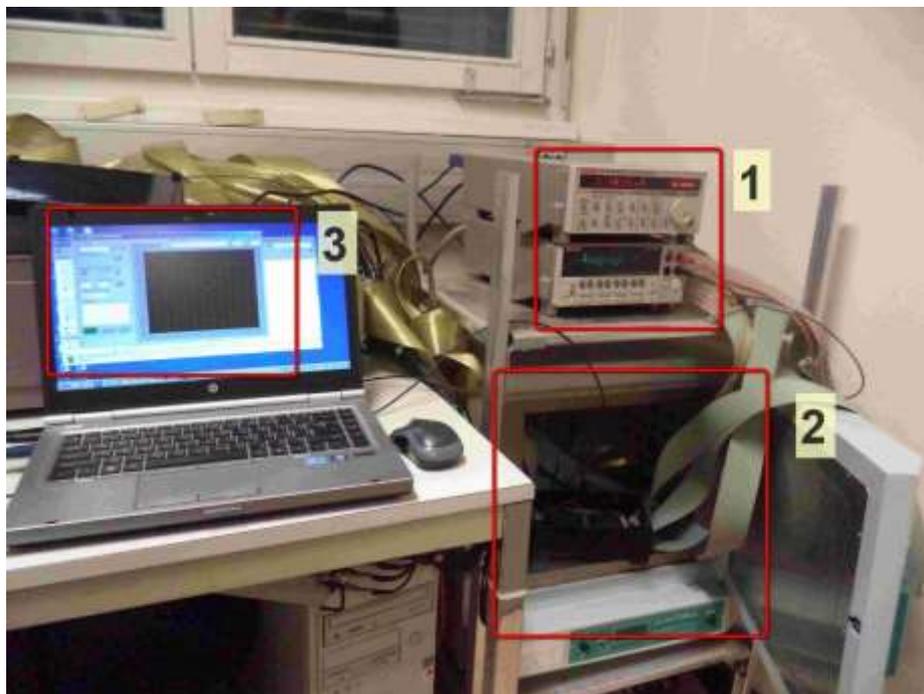


Рисунок 4.1.16 – Стенд контроля стабильности КФЭУ.

На рисунке 4.1.17 показан модуль КФЭУ для размещения на стенде, а на рисунке 4.1.18 – результаты измерения темнового тока КФЭУ. В термокамеру с температурой 60°C была помещена одна линейка КФЭУ (8 каналов измерения), измерения продолжались около 20 часов. Увеличение темнового тока в начале измерений и уменьшение в конце соответствует нагреву до рабочей температуры и последующему охлаждению до комнатной температуры.



Рисунок 4.1.17 - Модуль для установки КФЭУ внутри термокамеры.

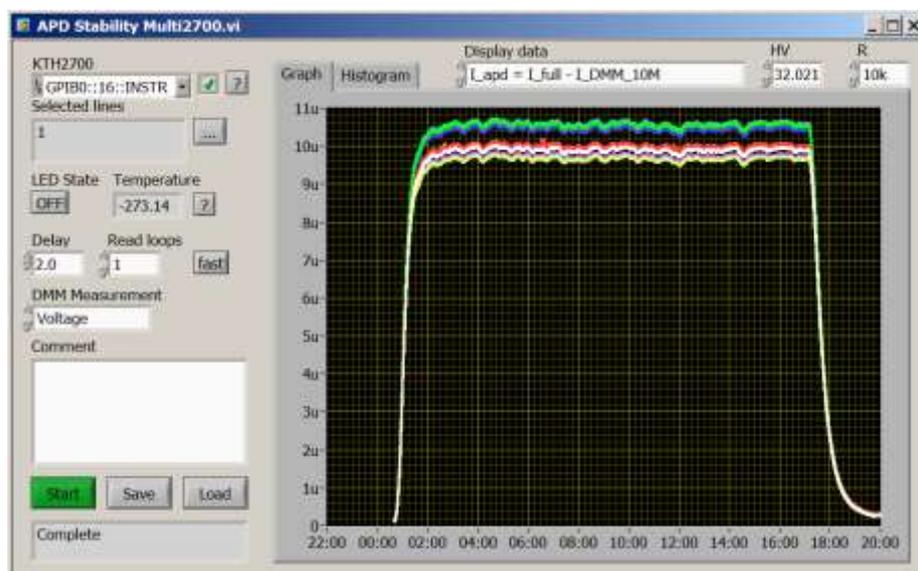


Рисунок 4.1.18 - Результаты измерения темного тока.

В течение этого года сотрудниками Лаборатории МФП была проведена серия измерений предварительной партии КФЭУ, произведенных фирмой Hamamatsu. Измерения были необходимы для того, чтобы убедиться в возможности поставок большого количества приборов с малым разбросом характеристик и в соответствии характеристик приборов спецификации на модернизацию CMS.

Всего было получено 175 линеек (в каждой линейке по 8 приборов КФЭУ), 70% линеек с размером светочувствительного окна 2,8 мм, остальные с размером окна 3,3 мм (рисунок 4.1.19). Приборы были получены в апреле 2015 года. Далее изложены основные результаты измерений характеристик приборов КФЭУ.

На рисунке 20 показаны вольт-амперные характеристики всех 175 линеек / 1400 приборов КФЭУ, все приборы работоспособны. Слева приборы с размером окна 2,8 мм (984 штуки), справа – 3,3 мм (416 штук). Сверху - результаты измерения темнового тока (большинство приборов соответствуют спецификации, только несколько приборов имеют повышенный темновой ток), снизу – результаты измерения фототока (ноль шкалы соответствует напряжению смещения КФЭУ, хорошая однородность фототока как при напряжении смещения, так и при рабочем напряжении перенапряжения +3 В).



Рисунок 4.1.19 - Линейка КФЭУ, содержащая 8 отдельных фотоприемников.

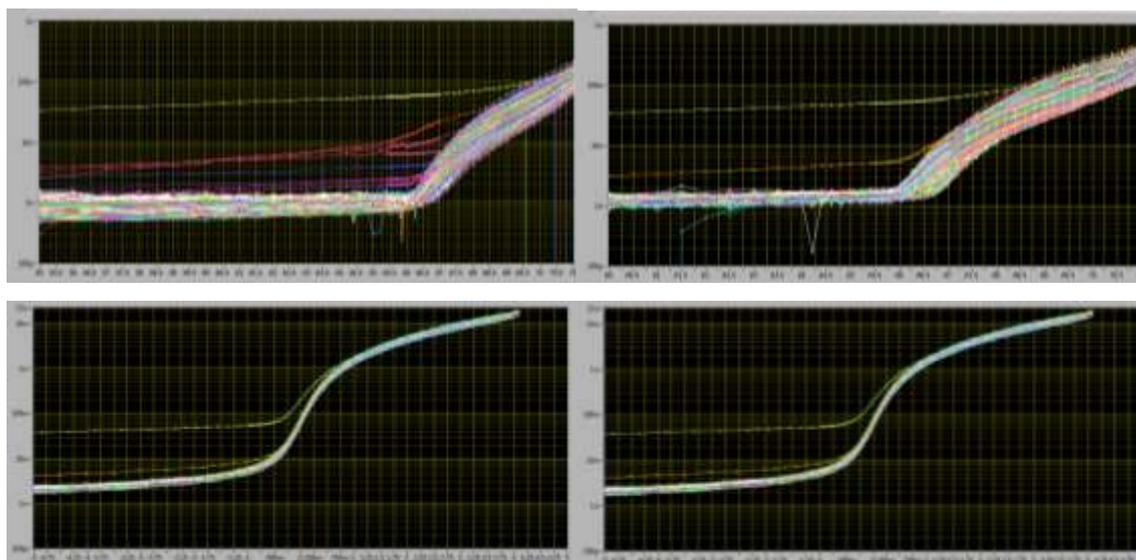


Рисунок 4.1.20 - Вольт-амперные характеристики всех линеек КФЭУ.

На рисунке 4.1.21 показаны результаты вычисления величины напряжения смещения (соответствует положению максимума на кривой  $dI/dV$ , отмечены

вертикальными линиями). Сверху - приборы с размером окна 2,8 мм, снизу - 3,3 мм. Разброс величины напряжения смещения менее 1 В.

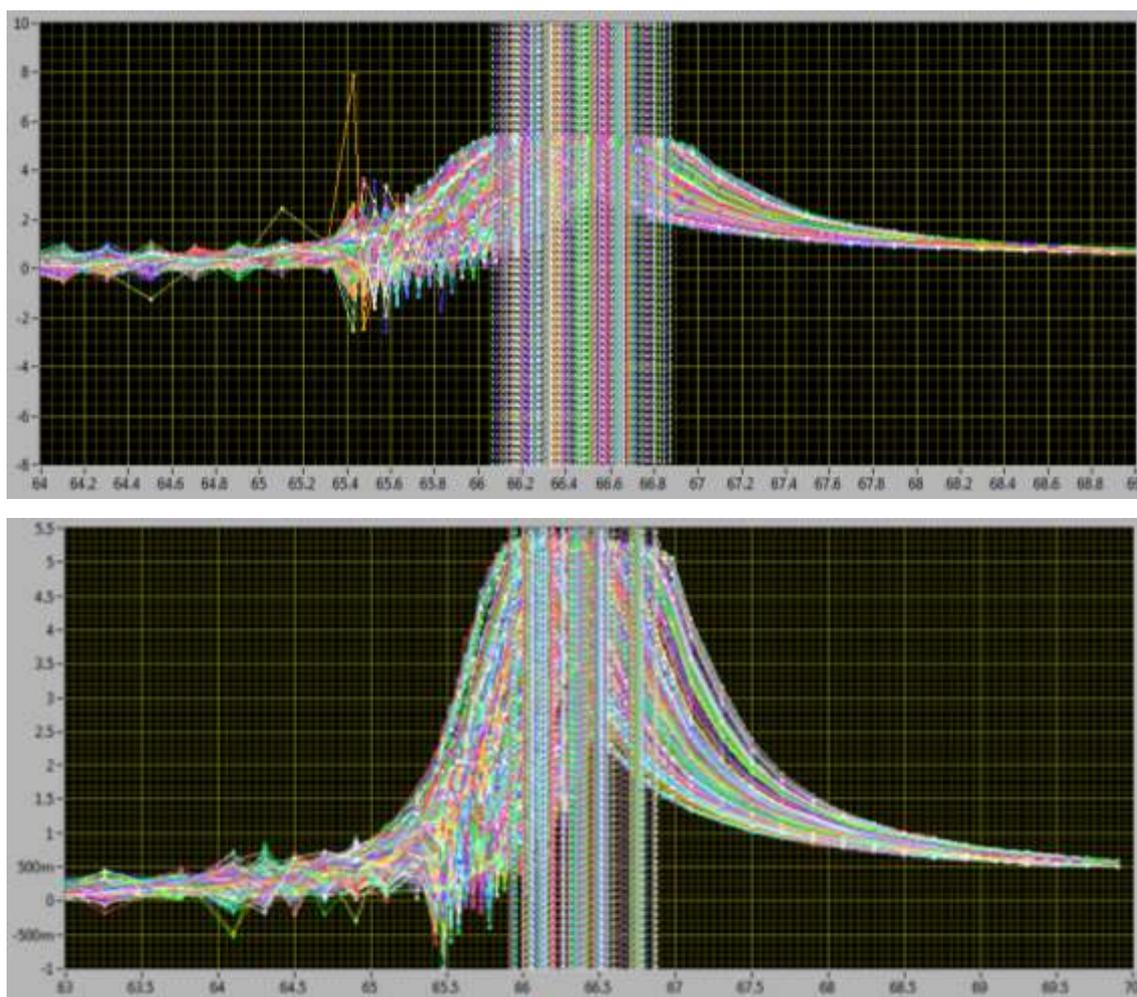


Рисунок 4.1.21 - Результаты вычисления величины напряжения смещения.

Линейки КФЭУ проверялись на предмет соответствия спецификации. На рисунке 22 показан коэффициент усиления (при температуре 22°C). При перенапряжении +4 В коэффициент усиления составил 350000, что соответствует спецификации. Эффективность регистрации фотонов (рисунок 4.1.23) составила 30% при перенапряжении +3 В и 35% при перенапряжении +4 В, что лучше, чем в спецификации.

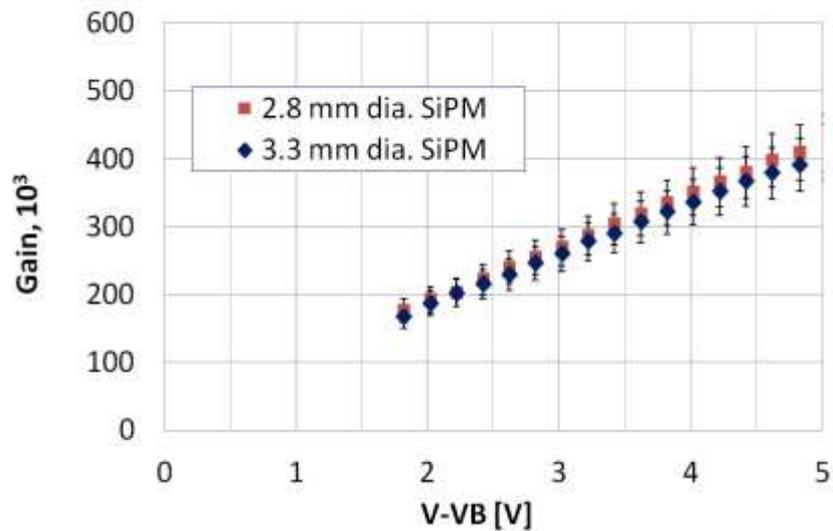


Рисунок 4.1.22 - Коэффициент усиления.

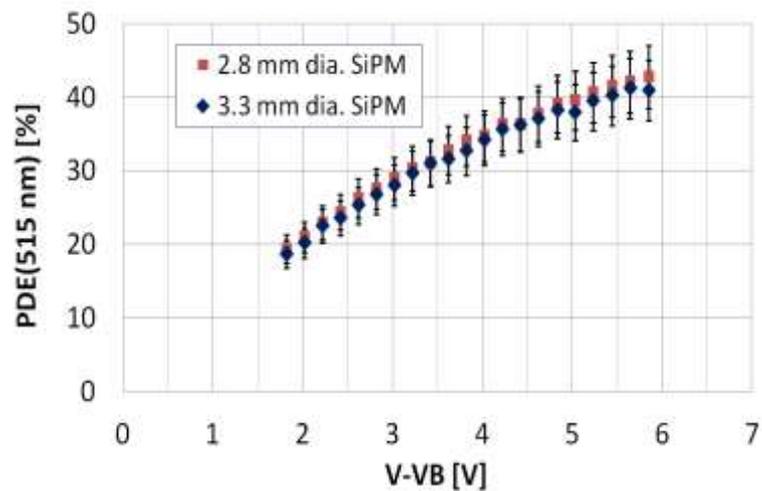


Рисунок 4.1.23 - Эффективность регистрации фотонов.

Для изучения стабильности (эффекта “старения”) использовались 80 приборов КФЭУ. Приборы были помещены в термокамеру с температурой 70°C на четыре недели, при этом постоянно измерялась величина темнового тока. На рисунке 24 показан темновой ток при высокой температуре (показаны первые две недели из четырех). “Ступенька” в измерениях на третий день связана с тем, что было увеличено перенапряжение. Небольшие колебания темнового тока связаны с дневным циклом колебания температуры. Все приборы показывают стабильное поведение, нет выбросов или сбойных приборов.

Также исследовались вольт-амперные характеристики темнового тока до (рисунок 4.1.25, вверху) и после (рисунок 4.1.25, внизу) периода нахождения в термокамере при температуре 70°C. Не наблюдалось сбоев и увеличения темнового тока.

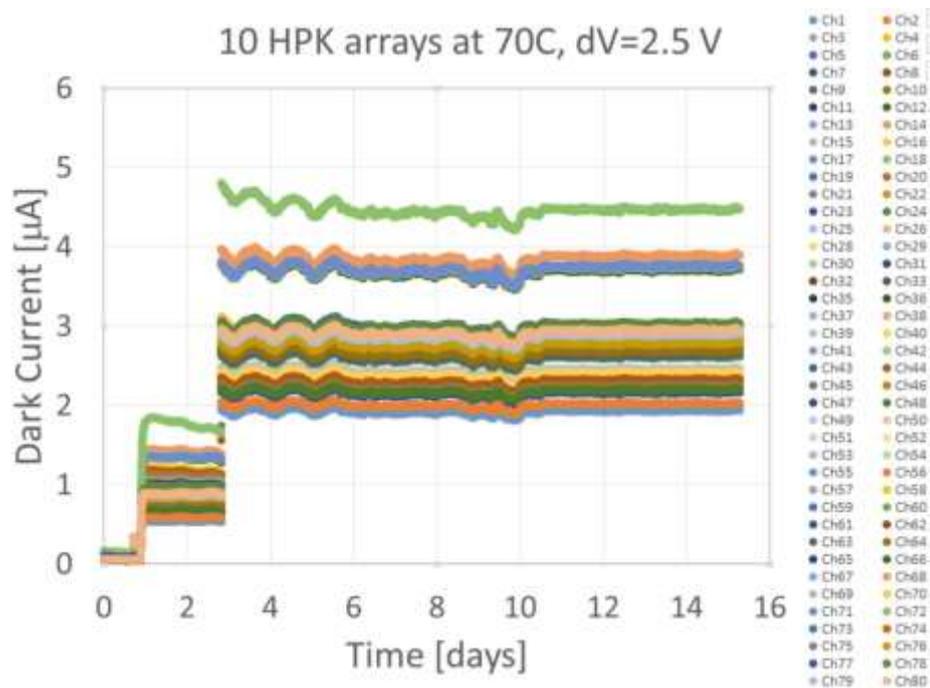
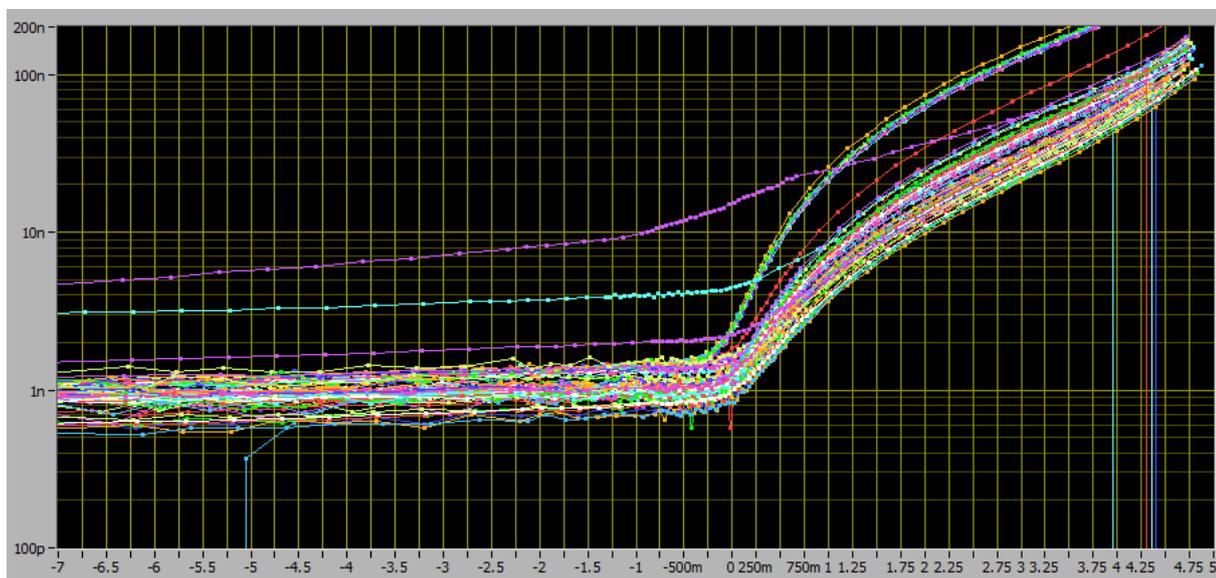


Рисунок 4.1.24 - Темновой ток при высокой температуре.



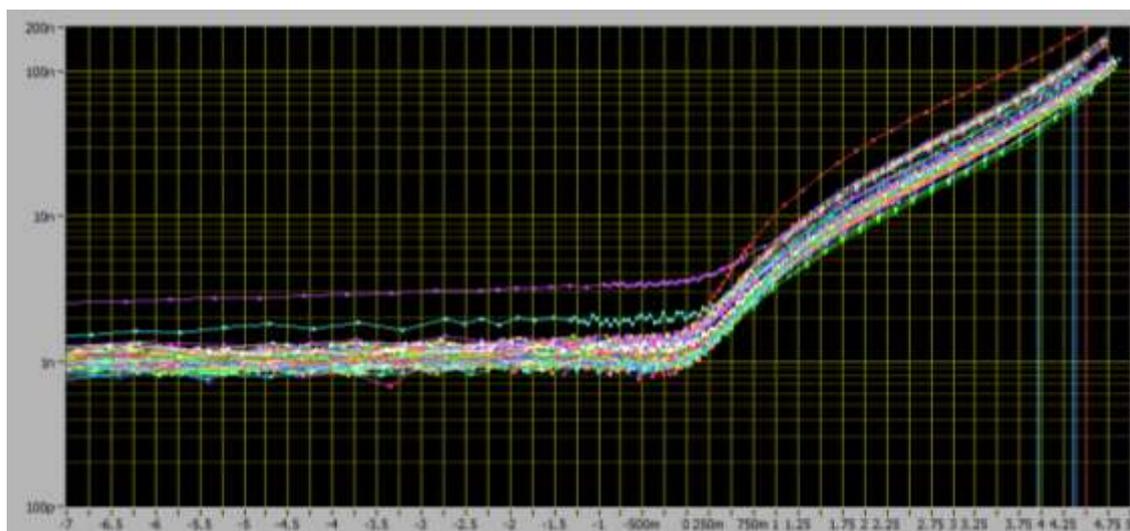


Рисунок 4.1.25 - Вольт-амперные характеристики темного тока.

Для изучения радиационной стойкости 4 линейки (32 прибора КФЭУ) были облучены пучком протонов 24 ГэВ на установке IRRAD в CERN. Каждый из приборов КФЭУ получил дозу облучения от  $2 \times 10^{10}$  нейтронов/см<sup>2</sup> до  $5 \times 10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup> в зависимости от положения на пучке. На рисунке 26 показаны вольт-амперные характеристики темного тока приборов КФЭУ после облучения. Все приборы остались работоспособными. Разные уровни темного тока соответствуют разным дозам полученного облучения. Величина темного тока после облучения соответствует спецификации.

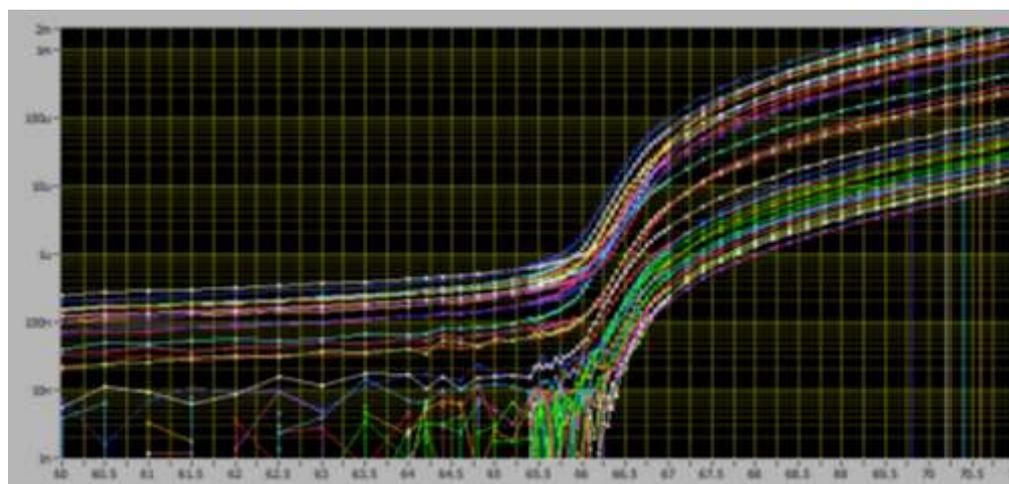


Рисунок 4.1.26 - Вольт-амперные характеристики темного тока приборов КФЭУ после облучения.

Таким образом, можно сделать вывод, что все приборы из предварительной партии работоспособны, приборы соответствуют спецификации для всех проведенных

измерений, успешно прошли тест “укоренного старения”, а радиационная стойкость приборов соответствует спецификации.

Измерительная лаборатория полностью готова к проведению приемочных измерений и контроля качества 1100 линеек, которые будут поступать в CERN начиная с декабря 2015 года для модернизации АК CMS.

Таблица 1 - Спецификации и измеренные параметры КФЭУ.

Parameter	Spec Value	HPK	КЕТЕК-I	КЕТЕК-II
Cell size [mm]	15	15	15	15
Sens. area [Ømm]	2.8	2.8	2.8	2.8
Operating temperature [° C]	24	24	24	24
VB [V]	<90	~65	~28	~43
Vop-VB (V)	>2	4.0	4.0	4.0
Dark Current [nA]	<1000	150	300	60
PDE(515 nm) [%]	>25	30	27	33
Gain, x103	<700	350	600	420
Capacitance [pF]	<600	215	525	330
Recovery time [ns]	≤10	10	10	5
Excess Noise Factor	<1.3	1.18	1.14	1.16
Optical Cross-Talk [%]	<20	17	14	15
After-pulses [%]	<5	<2	<2	<2
dVB/dT [mV/° C]	<60	58.5	20.4	35.4
Temperature sensitivity [%/C]	<6	3	0.8	1.5
Voltage sensitivity [%/V]	<60	50	38	48
Neutron noise sensitivity	low	low	no	no
Dark current ( 2*10 <sup>11</sup> n/cm <sup>2</sup> ) [mA]	<500	140	450	215
ENC (50 ns, 2*10 <sup>11</sup> n/cm <sup>2</sup> ) [pe]	<12	8	11	10
Fractional gainXPDE after 2*10 <sup>11</sup> n/cm <sup>2</sup> [%]	>95	>95	>95	>95
Laser resp., 10 Ohm (Int=90%, ns)	–	30	62	39
Laser resp., 10 Ohm (Int=95%, ns)	–	41	78	50
Idark(20 ° C)/Idark(10 ° C)	–	1.86	1.66	1.78

Исследования характеристик работы адронного калориметра.

Адронный калориметр может случайно зарегистрировать сигналы с аномально большим шумом. Средняя частота таких сигналов не очень высока, но такие шумовые сигналы могут дать чрезвычайно большой вклад в измеряемую энергию взаимодействия частиц и привести к заметному искажению параметров реконструированного события. Для того, чтобы уменьшить количество подобных сигналов, были разработаны специальные фильтры.

Одним из таких фильтров, разрабатываемых в последние два года, является фильтр отрицательной энергии (NEF – Negative Energy Filter). Этот фильтр разрабатывается для того, чтобы уменьшить количество сигналов с аномально большой энергией (пиков) в бочковидной (Barrel) и торцевых крышках (Endcap) частях адронного калориметра. Такого вида сигналы могут быть произведены частицами непосредственно пересекающими считывающие элементы детектора (HPD – гибридные фотодиоды) или редкими случайными разрядами в считывающей электронике детектора.

Сцинтилляционные сигналы, произведенные в элементах детектора проходящими частицами, спадают экспоненциально. Напротив, пиковые шумовые сигналы имеют резкие границы. Если мы вычтем из периферии (хвоста) пикового шумового сигнала амплитуды, предсказанные с использованием средней формы сцинтилляционного сигнала в соответствующей части адронного калориметра, мы можем получить отрицательные значения энергии. Если эта разница превысит соответствующий порог, сигнал будет обозначен как пиковый шум. В этом случае будет установлен соответствующий бит в статусном слове реконструируемого энерговыделения в калориметре.

В результате прохождения частиц через активные элементы адронный калориметр регистрирует соответствующие заряды. Зарядово-цифровой преобразователь (QIE) адронного калориметра раскладывает заряд в 10-ти последовательных временных интервалах (10 Time Slices – 10 TS, 1 TS = 25 ns) (рисунок 4.1.27). При этом в Barrel и Endcaps частях HCAL окно триггера совпадает с TS4 и TS5 и энерговыделение в одиночном акте срабатывания HCAL (Hit Energy) описывается суммой зарядов в TS4 и TS5 с соответствующими калибровочными коэффициентами и поправочными множителями, связанными с формой наведенного заряда.

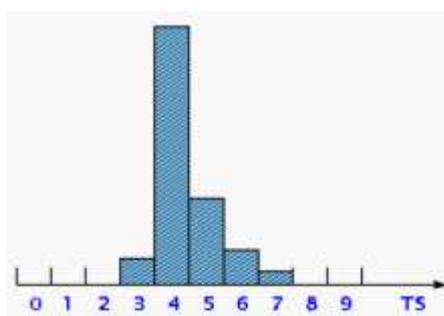


Рисунок 4.1.27 - Типичное распределение заряда в 10 временных интервалах оцифрованного сигнала с адронного калориметра.

Для работы фильтра отрицательной энергии (NEF) необходимо определить среднюю форму импульса в TS5 и TS6 как функцию величины заряда в TS4. Функции  $a_1(TS4) = f(TS5/TS4)$  и  $a_2(TS4) = f(TS6/TS4)$  для различных частей адронного калориметра

показаны на рисунке 4.1.28. Аналитическая зависимость функций описывалась суперпозицией полиномов до 5 степени включительно.

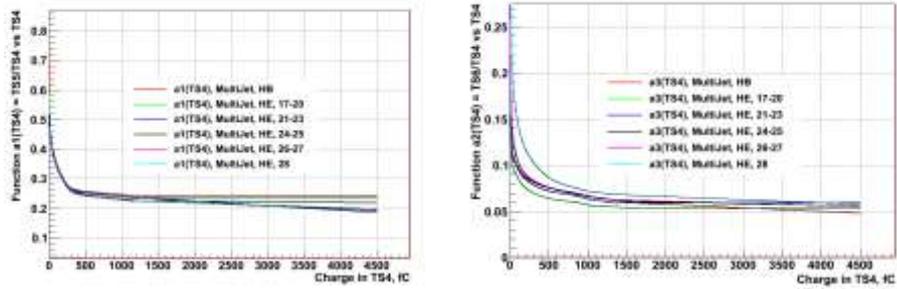


Рисунок 4.1.28 - Функции  $a_1(x)$  и  $a_2(x)$  для различных частей адронного калориметра.

Распределения разностей между исходными величинами зарядов в TS5 и TS6 и вычисленными величинами зарядов в соответствующих TS, полученными с помощью определенных выше функций, представлены на рисунке 29. Эти распределения отражают качество полученных функций.

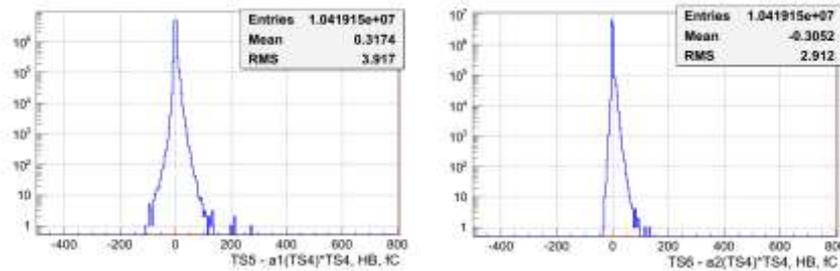


Рисунок 4.1.29 - НВ. Гистограмма  $\Delta_1 = TS5 - a_1(TS4) \times TS4$  (слева),  $\Delta_2 = TS6 - a_2(TS4) \times TS4$  (справа).

Возможный заряд в TS5 и TS6, предсказанный с использованием заряда в TS4, определяется как  $TS5' = a_1(TS4) \times TS4$ ,  $TS6' = a_2(TS4) \times TS4$ . Для упрощения выражений умножение на ( $\times TS4$ ) было помещено внутрь функций и тогда  $TS5' = a_1(TS4)$ ,  $TS6' = a_2(TS4)$ .

При работе фильтра отрицательной энергии определяются дискриминанты  $TS[i]' = TS[i] - a_1(TS[i - 1]) - a_2(TS[i - 2])$ , где  $i = 4, 5, 6$ . Т.е. из заряда каждого  $i$ -того TS вычитается возможный вклад от зарядов из двух предыдущих TS. Нормализованные распределения отрицательной энергии для 5 различных триггеров (HTMHT, MET, MultiJet, HeavyIons, SingleMu) для  $TS4'$ ,  $TS5'$  и  $TS6'$  приведены на рисунке 30. Из этого рисунка видно, что возможный вклад от таких фоновых процессов различен для данных триггеров и составляет величину порядка  $10^{-6}$ .

При обработке события, если один из трех дискриминантов имеет величину ниже определенного порога, выставляется соответствующий бит в специальном статусном слове (FlagWord). При необходимости такого вида срабатывания могут не приниматься в рассмотрение при окончательной обработке событий.

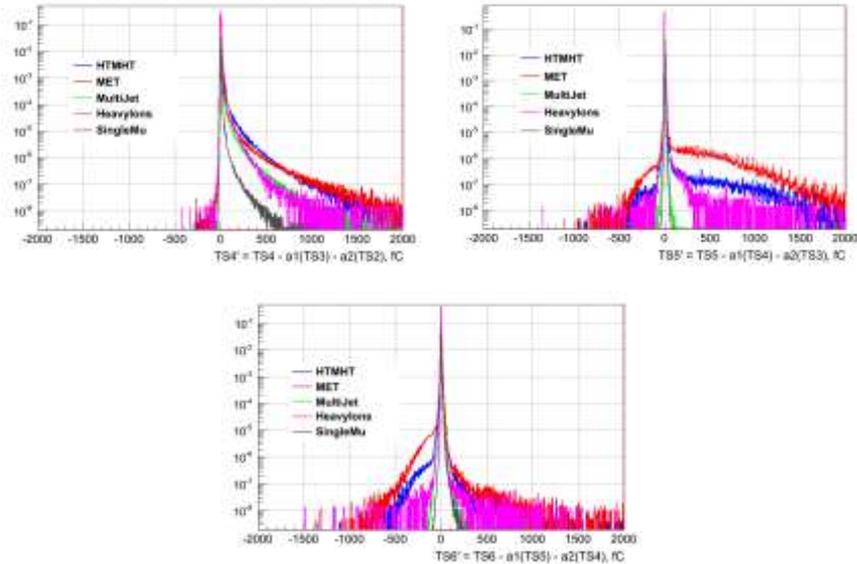


Рисунок 4.1.30 - Нормализованные распределения отрицательной энергии для 5 различных триггеров (HTMHT, MET, MultiJet, HeavyIons, SingleMu) для TS4', TS5' и TS6'.

Похожий фильтр, разработанный для обработки данных 2010 – 2012 годов, называется HBHESpikeNoise фильтр. Дискриминант этого фильтра определяется как  $Discriminant = \log(RMS8Max) \times 2 - \log(NominalChi2)$ , где RMS8Max вычисляется с использованием всех элементов TS данного энерговыделения за исключением двух с наибольшим зарядом. Затем эта величина делится на наибольший заряд среди всех элементов TS. NominalChi2 определяется сканированием всех возможных расстояний (числа элементов TS между двумя возможными компонентами импульса) и полного заряда оставшегося от вычитания двух компонент:

$$C^2 = \sum_{i=0}^9 \frac{\sum_{j=0}^9 TS[i] - a1 \cdot F1[i] - a2 \cdot F2[i]}{S_i} \cdot \frac{1}{\theta^2}$$

здесь  $TS[i]$  – компоненты обрабатываемого импульса,  $F1[i]$  и  $F2[i]$  – идеальные компоненты импульса, определенные из функции на рисунке 31.

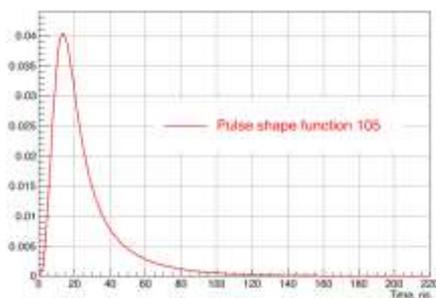


Рисунок 4.1.31 - Идеальная форма импульса для HBHE (105).

Для того, чтобы принять решение, HBHEspikeNoise фильтр использует 9 элементов из 10 в TS векторе. В условиях высокой интенсивности сталкивающихся пучков частиц, когда неизбежно будет присутствие наложения сигналов (pile-up), решения такого фильтра могут стать ненадежными.

В отличие от HBHEspikeNoise фильтра NEF может использовать меньшее число TS элементов для принятия решения (~3). Данный фильтр использовался для подбора параметров NEF с использованием данных 2012 года (Run 1). Для этого были определены «хорошие» и «плохие» события с использованием решения данного фильтра и решения от так называемых основных фильтров (Baseline Filters – BLF, CMS CR-2012/238).

Энерговыделение считалось «хорошим» (Good), если событие прошло основные фильтры и HBHEspikeNoise фильтр. И наоборот энерговыделение считалось «плохим» (Bad), если событие не прошло основные фильтры и не прошло HBHEspikeNoise фильтр.

Для получения решения фильтра отрицательной энергии (NEF) определялись дискриминанты  $TS[i]' = TS[i] - a_1(TS[i - 1]) - a_2(TS[i - 2])$ ,  $i = 4, 5, 6$  и граничные линии (Limit Lines). В результате была определена кусочно-непрерывная линия, проходящая через 3 точки (0, -15), (1500, -180), (15000, -1000), определенные в системе координат (ChargeInWindow, Discriminant).  $ChargeInWindow = TS[4] + TS[5] + TS[6]$ ,  $Line = a \times ChargeInWindow + b$ , где  $a$  и  $b$  для соответствующего отрезка линии определялись с использованием указанных выше трех точек. Распределения дискриминантов как функции ChargeInWindow для всех энерговывделений и только для «хороших» энерговывделений приведены на рисунке 32 для MET триггера (наиболее «шумного», MissingET – триггер недостающей поперечной энергии) и на рисунке 33 для SingleMu триггера (наименее «шумного», SingleMu – отдельный мюон).

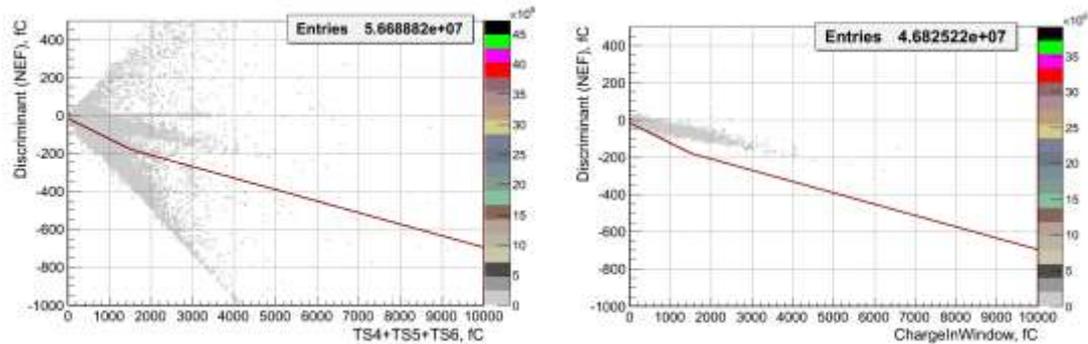


Рисунок 4.1.32 - Распределения дискриминантов как функции ChargeInWindow для всех энерговыделений (слева) и только для «хороших» энерговыделений (справа) для MET триггера. Энерговыделения, расположенные выше граничных линий считаются «хорошими», ниже граничных линий считаются «плохими».

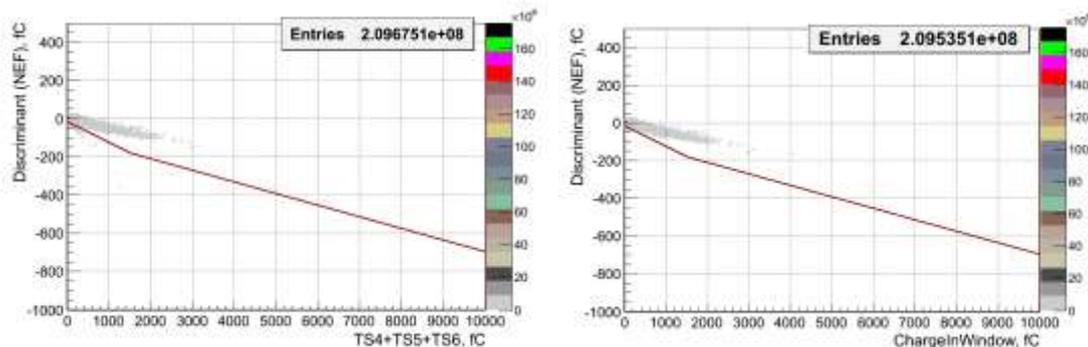


Рисунок 4.1.33 - Распределения дискриминантов как функции ChargeInWindow для всех энерговыделений (слева) и только для «хороших» энерговыделений (справа) для SingleMu триггера. Энерговыделения, расположенные выше граничных линий считаются «хорошими», ниже граничных линий считаются «плохими».

После настройки параметров расхождения в оценке качества энерговыделений двумя фильтрами HBHESpikeNoise и NEF составляют  $\sim 3.70 \times 10^{-4}$  для MET триггера и  $\sim 1.31 \times 10^{-6}$  для SingleMu триггера.

Была получена оценка возможного влияния pile-up на принятие решения фильтрами. Имитация pile-up была проведена следующим способом. Вся работа по изучению и настройке данных фильтров выполняется с использованием только TS векторов. Pile-up может быть имитирован путем наложения TS векторов от разных событий со сдвижкой по времени или без сдвижки. Для имитации pile-up использовались TS вектора, полученные из событий MinimumBias (MB) триггера. Среднее число первичных вершин (PV) в одном событии MB триггера  $\langle PV \rangle \sim 15$ . Число первичных вершин в одном событии MET или SingleMu триггеров  $\langle PV \rangle \sim 20$ . Если мы наложим на

одно исходное событие (MET или SingleMu) одно событие MB триггера, мы получим событие с  $\langle PV \rangle \sim 35$ . Наложение означает, что к каждому энерговыделению исходного события мы прибавляем случайно выбранное энерговыделение от MB триггера. Это будет означать, что теперь каждое энерговыделение исходного события будет соответствовать энерговыделению от события с  $\langle PV \rangle \sim 35$ . Сложение энерговыделений от двух событий означает сложение двух TS векторов. Мы можем добавить к исходному событию несколько событий MB триггера, тем самым мы можем контролировать уровень pile-up. На рисунке 34 показана схема получения события с 30 дополнительными pile-up вершинами (+2PU hits).

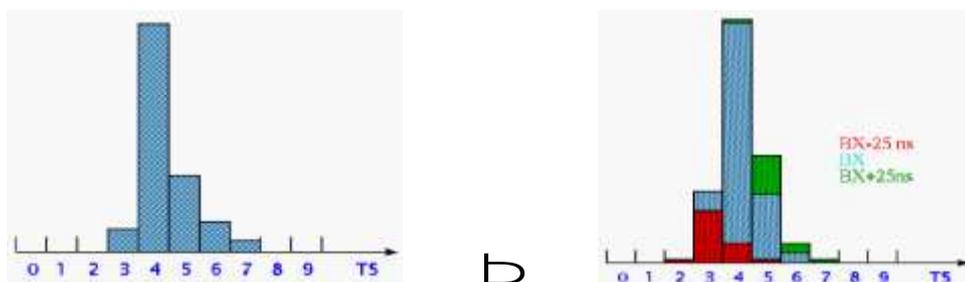


Рисунок 4.1.34 - Первоначальное энерговыделение (слева) и энерговыделение справа с двумя добавленными pile-up векторами, один из них сдвинут на 1 TS влево (-25 нс), а другой сдвинут на 1 TS вправо (+25 нс).

НВHESpikeNoise фильтр устанавливает бит 13 в статусном слове. Иногда для простоты на него ссылаются как на Bit13 фильтр. На рисунке 4.1.35 показаны корреляционные гистограммы, показывающие эффективность работы NEF и Bit13 фильтров в случае добавления pile-up с  $\sim 30$  PV к исходным событиям.

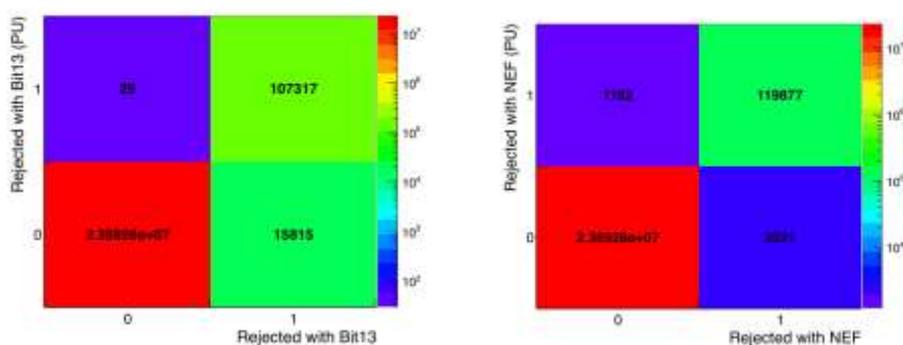


Рисунок 4.1.35 - Корреляционные гистограммы, показывающее эффективность работы фильтров после добавления  $\sim 30$  PV к исходным событиям. Слева – НВHESpikeNoise фильтр (Bit13), справа – NEF.

На рисунке 4.1.36 элемент (0,0) гистограмм показывает «хорошие» энерговыделения, когда фильтры не забраковали данные энерговыделения, элемент (1,1)

показывает «плохие» энерговыделения, когда фильтры сработали. Недиagonальные элементы (0,1) и (1,0) показывают неэффективность работы фильтров после наложения pile-up событий:

- для Bit13 фильтра неэффективность равна:  $((0,1)+(1,0))/All = 6.68 \times 10^{-4}$
- для NEF фильтра неэффективность равна:  $((0,1)+(1,0))/All = 1.35 \times 10^{-4}$

На рисунке 4.1.53 показаны корреляционные гистограммы, показывающие эффективность работы NEF и Bit13 фильтров в случае добавления pile-up с  $\sim 60$  PV к исходным событиям. Эффективность работы фильтров в этом случае равна:

- для Bit13 фильтра неэффективность равна:  $((0,1)+(1,0))/All = 1.20 \times 10^{-3}$
- для NEF фильтра неэффективность равна:  $((0,1)+(1,0))/All = 2.44 \times 10^{-4}$

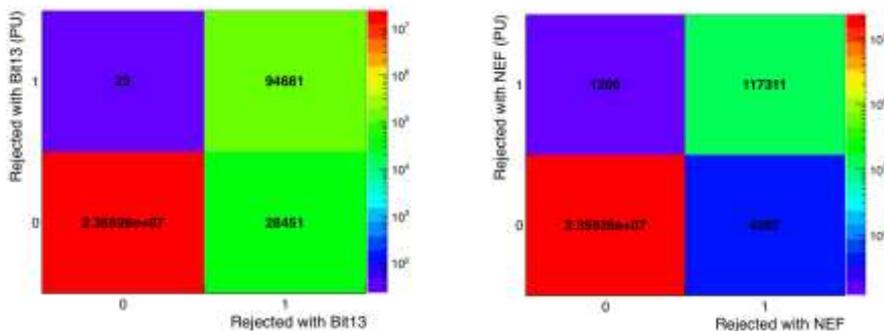


Рисунок 4.1.36 - Корреляционные гистограммы, показывающее эффективность работы фильтров после добавления  $\sim 60$  PV к исходным событиям. Слева – HBHESpikeNoise фильтр (Bit13), справа – NEF.

Отношение сумм недиагональных элементов (0,1) + (1,0) для двух фильтров равно: Bit13/NEF  $\sim 5$  (приблизительно одинаково для  $\sim 30$  PV и  $\sim 60$  PV). Это можно трактовать как эффективность NEF в случае pile-up в  $\sim 5$  выше по отношению к HBHESpikeNoise фильтру.

Фильтр отрицательной энергии (NEF) включен в официальное программное обеспечение для реконструкции экспериментальных данных, начиная с CMSSW\_7\_5\_0. В настоящее время проходит реконструкция экспериментальных данных сеансов 2015 года (Run 2) и оптимизируются параметры NEF фильтра в соответствии с условиями данного рана. По результатам данных работ было сделано 13 сообщений на заседаниях рабочей группы (Noise WG) и один доклад на 18-й Ежегодной конференции RDMS CMS в г. Варна, Болгария.

#### 4.1.2 ПОИСК ТЯЖЕЛЫХ НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

Лево-правосимметричная модель.

Эксперимент CMS на БАК в ЦЕРНе является одним из основных экспериментов, использующим крупномасштабный многоцелевой детектор и открывающим новые перспективы для исследования широкого круга фундаментальных проблем и поиска новых явлений, лежащих за пределами SM. Среди нескольких расширений SM, которые могут быть исследованы на CMS, ЛПСМ определенно является одной из наиболее привлекательных. Модель включает дополнительно три тяжелых калибровочных бозона,  $W_R^\pm$  и  $Z'$ , а также три правых тяжелых майорановских нейтрино,  $N_i$ . Эти нейтрино могут быть партнерами легких нейтринных ароматов, т.е. соответственно электронного, мюонного и тауонного нейтрино, и могут генерировать их массы посредством механизма типа «see-saw». Это делает поиски тяжелых нейтрино в эксперименте CMS чрезвычайно важными и актуальными.

Моделирование сигнальных и фоновых событий.

Моделирование сигнальных событий и вычисление сечений при полной энергии БАК 13 ТэВ было выполнено с помощью пакета PYTHIA 6.2. Полное сечение процесса  $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_{e^+}e^\pm + X$  более чем на порядок превосходит сечение реакции  $p+p \rightarrow Z' + X \rightarrow 2N_{e^+} + X$ , делая его, таким образом, наиболее предпочтительным для поиска тяжелых нейтрино. Моделирование сигнальных событий от распадов  $W_R$  и  $N_e$  было выполнено с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. После реконструкции событий, на первом этапе отбора событий-кандидатов требовалось наличие, по крайней мере, четырех реконструированных объектов, а именно, двух или более изолированных электронов (мюонов) и двух или более струй. Эффективность отбора истинных сигнальных событий составила при этом около 90%. Источником фона для сигнальных событий являются процессы SM с парой лептонов и, по крайней мере, двумя струями в конечном состоянии. Для оценки величины фона эти события были смоделированы, реконструированы и отобраны с помощью тех же программ и критериев, что и сигнальные события. В результате анализа было показано, что совокупный фон после прохождения условий отбора также может быть хорошо описан экспоненциальной функцией. Несмотря на то, что фон в области масс в несколько сотен гигаэлектронвольт достаточно велик, пик от распадов нейтрино хорошо идентифицируется. Если потребовать, чтобы реконструированная инвариантная масса комбинации  $e_{12}j_{1j_2}$  в этом же событии была

больше, чем 1 ТэВ, уровень фона под пиком существенно уменьшается. Распределение масс для  $W_R$ -событий в присутствии фона показывает, что пик  $W_R$  проявляется отчетливо.

Результаты очередного этапа эксперимента.

В результате предварительного анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2014-15 г. и соответствующих полной светимости БАК  $19,7 \text{ fb}^{-1}$ , были получены ограничения на массу  $W_R$  около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого  $W$ -бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза. Диапазон исключаемых масс  $W_R$  получен для каждого из лептонных каналов по отдельности (т.е. для электронного и мюонного) и может быть расширен вплоть до 3,5 ТэВ в предположении, что массы соответствующих тяжелых нейтрино вырождены. Полученные результаты находятся в стадии подготовки к докладам в соответствующих группах анализа данных CMS.

Н.В.Красниковым в соавторстве с В.А.Матвеевым написаны монография «Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ» [1] и обзор по поиску тяжелого нейтрино и правого  $W$ -бозона [2]. Монография представляет обзор результатов по поиску новой физики на Большом адронном коллайдере, включая открытие бозона Хиггса, во время сеансов 2010-2012 гг., и опубликована издательством «Красанд» в 2015 г.

#### 4.1.3 УЧАСТИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ P348

В 2015 г. эксперимент P348 (номер, присвоенный научным комитетом SPSC CERN) начал работу по поиску легкого калибровочного бозона темной материи в международном центре ЦЕРН (CERN - l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, Европейский центр ядерных исследований). Сотрудники Лаборатории МФП принимают активное участие в эксперименте, а С.Н.Гниненко является его руководителем. В настоящее время в ЦЕРНе участниками коллаборации P348 анализируются данные, полученные в сеансе на установке в течение 2015 г. Проводится их обработка с последующей реконструкцией событий и анализом полученных результатов.

Метод исследования основывается на регистрации в диапазоне энергий 10...60 ГэВ недостающей энергии, возникающих от испускания в поле ядра мишени установки P348 гипотетической новой частицы - массивного бозона, с массой покоя в диапазоне 1...1000 МэВ, испускаемой налетающим электроном с энергией 100 ГэВ.

Мотивация для данных исследований следующая. Установлено, что большая часть вещества нашей Вселенной находится в неизвестном виде, называемом «темная материя». Одним из возможных кандидатов на этот вид вещества является массивный векторный бозон, или «темный фотон», обычно обозначаемый  $A'$ . Он был введен в теорию элементарных частиц для объяснения возможного взаимодействия между обычной и темной материей. Метод недостающей энергии, используемый в установке P348, позволяет достичь уникальной чувствительности при определении возможного потока  $A'$ . Обнаружение  $A'$  позволило бы решить сразу две важнейшие проблемы фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц: наличие темной материи и вид ее взаимодействия с обычным веществом. Отметим, что поисками темного фотона занимаются коллективы исследователей в США (установки в JLab и FNAL), Японии (установка в КеК), Италии (DAFNI) и других странах.

Установка P348 состоит из большого дипольного магнита (длина 2,26 м), создающего мощное магнитное поле, и ряда детекторов, расположенных по обоим торцам магнита. Установка P348 собиралась в ЦЕРНе в течение 2014-15 гг. коллективом, состоявшим из более чем 40 ученых и инженеров ЦЕРНа и научных институтов России, Германии, Греции, Франции, Чили, Южной Кореи и Швейцарии. Руководителями коллаборации P348 являются российские ученые.

Целью первого этапа работ на данной установке являлось:

- создание детекторов для регистрации электронов и гамма-квантов в гэвной области энергий с низким порогом регистрации и высоким разрешением;
- запуск трековых детекторов и спектрометра на основе дипольного магнита;
- создание системы калориметров, позволяющей обеспечить надежную герметичность установки;
- проведение сеансов по набору статистического материала;
- обработка и анализ экспериментальных данных и получение первых физических результатов.

В результате работ, проведенных на первом этапе 2015 г., получено следующее:

- разработан, изготовлен и запущен в эксплуатацию полномасштабный прототип установки P348;
- проведен тестовый сеанс по набору данных в 2015 г.;
- выполнено конструирование и изготовление системы контроля параметров и блокировки узлов установки P348, что позволило провести безаварийный набор данных в течение 2015 гг.;
- проведен анализ экспериментальных данных, полученных в результате экспозиции 2015 г.,
- по результатам анализа экспериментальных данных поставлен предел на константу связи обычного фотона с темным фотоном  $\varepsilon < 8,8 \times 10^{-3}$  для области масс  $m_A' < m_A < 50$  МэВ;
- результаты, ожидаемые в следующем году, более чем на порядок улучшат результаты предыдущих экспериментов по поиску  $A'$ ;
- проведены оценки интенсивности потоков новых частиц, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в канале ускорителя и в мишени установки, а также предложен первый эксперимент по возможной регистрации этих потоков;
- подготовлено и опубликовано в печати предложение нового поколения эксперимента P348.

Результаты исследований доложены на конференциях и готовятся к опубликованию в ряде ведущих физических журналов.

## 4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, предусмотренные очередным этапом участия сотрудников Лаборатории МФП в эксперименте CMS, выполнены. Этот этап в основном был связан с проведением работ по модернизации адронного калориметра детектора CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников, анализом набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий.

В результате проделанной в 2015 г. работы продолжены исследования потенциала и возможности обнаружения на установке CMS тяжелого нейтрино майорановского типа  $N_e$  и нового калибровочного бозона  $W_R$ . Тяжелые нейтрино могут быть партнерами легких нейтринных ароматов и могут обеспечивать их массивность. Показано, что необходимое подавление фона от процессов, описываемых Стандартной моделью, достигается за счет требования наблюдения в конечном состоянии двух изолированных электронов и, по крайней мере, двух струй. В 2015 г. представлены предварительные результаты поиска тяжелых нейтрино и правого  $W_R$ -бозона, которые возникают в лево-правосимметричных расширениях Стандартной модели. Анализ основан на статистике протон-протонных столкновений при энергии 8 ТэВ, полученной в детекторе CMS на Большом адронном коллайдере при полной светимости  $19,7 \text{ фб}^{-1}$ . Пока не получено доказательств того, что наблюдается избыток событий, превышающий их число, ожидаемое в Стандартной модели. В результате предварительного анализа данных были получены ограничения на массу  $W_R$  около 3100 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино порядка половины массы W-бозона. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза. Диапазон исключаемых масс  $W_R$  получен для каждого из лептоных каналов по отдельности (т.е. для электронного и мюонного).

Наряду с участием в физической программе на установке CMS сотрудники Лаборатории МФП в 2015 г. участвовали в дежурствах, обеспечивая высокую эффективность контроля работы детектора, участвовали в сервисных работах группы адронного калориметра, участвовали в работах по модернизации адронного калориметра и принимали активное участие в разработке и совершенствовании генераторов Монте-Карло для моделирования физических событий на установке CMS.

#### 4.1 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красников Н.В., Матвеев В.А. Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ. М.: Красанд, 2015. – 272 с.
2. Krasnikov N.V., Matveev V.A. Search for the Right handed WR Boson and a Heavy Neutrino at the LHC // Bull.Georg.Acad.Sci. 2015. V.9. P.51-55.

## 4.1 ПРИЛОЖЕНИЕ

Публикации:

Сотрудники Лаборатории МФП входят в авторский коллектив коллаборации CMS, который в 2015 г. опубликовал более 70 печатных работ, из них 45 - в ведущих научных изданиях (полный список работ сотрудников Лаборатории МФП приведен в материалах по ПРНД).

Доклады и сообщения:

N.V.Krasnikov. Search for light dark matter and (g-2) muon anomaly // International conference on calculations at the LHC, Dubna 25 July - 3 August 2015.

D.Kirpichnikov. Baryogenesis in non-minimal split supersymmetry model // QFTHEP-2015, The XXII International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory June 24– July 1, 2015 Samara, Russia.

D.Tisov. Heavy neutrino and space anisotropy searches // 18th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Varna, Bulgaria, 27 August, 2015. <http://rdms2015.jinr.ru>  
<https://indico.cern.ch/event/438865/>

A.Toropin. HCAL calibration and event reconstruction // 18th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Varna, Bulgaria, 27 August, 2015. <http://rdms2015.jinr.ru>  
<https://indico.cern.ch/event/438865/>

Ю.Андреев. Создание сверхвысокочувствительных радиационно-стойких компонентов мюонного супердетектора КМС Большого адронного коллайдера ЦЕРН для экспериментальных исследований высокоэнергетичных столкновений протонов // Конференция «Итоги реализации в 2015 году ПНИЭР по приоритетным направлениям в рамках ФЦП «Исследования и разработки 2014 – 2020», Москва, Россия, 2-4 декабря 2015. <https://xpir.ru/conference> 2015

Сотрудниками Лаборатории МФП по результатам работ было сделано более 25 сообщений на заседаниях рабочих групп DPG, Noise WG, HCAL Integration & Upgrade адронного калориметра, рабочих групп электромагнитного калориметра и генераторной группы CMS.

## 4.2 Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb

### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта, научный сотрудник Е.Н.Гущин

Исполнители темы:

Научный сотрудник С.Н.Филиппов

Заместитель директора, О.В.Каравичев

Научный сотрудник, А.А.Тихонов

Заведующий сектором, Л.Н.Гольшкин

Ведущий инженер, З.Н.Шарифуллин

### 4.2 РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 14 с., 59 источников.

**БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, РЕДКИЕ РАСПАДЫ В-МЕЗОНОВ, НАРУШЕНИЕ СР-ЧЕТНОСТИ, КАЛОРИМЕТРИЯ, СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН**

Объектом исследования работы являются редкие распады В- мезонов и прецизионное измерение параметров СР-нарушения с целью проверки Стандартной модели и поиска эффектов Новой физики. Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков. В 2015 г. начат новый цикл по набору данных на увеличенной энергии пучков 6.5 ТэВ, было набрано 320/fb интегральной светимости. Также продолжается обработка набранных ранее данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе более точное измерение вероятностей распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и  $B^0 \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $|V_{ub}|$  матрицы смешивания, первое наблюдение очарованного пентакварка и ряд других. В эксперименте LHCb Институт ядерных исследований РАН участвует в разработке и создании калориметрической системы, ранее в ИЯИ был изготовлен предливневый детектор. В 2015 г., сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных фотоумножителей калориметрической системы. Кроме обеспечения текущей работы калориметра группа ИЯИ РАН также проводит работы по подготовке эксперимента к работе на повышенной светимости. Так в 2015 г. были разработаны и изготовлены платы высоковольтных делителей для фотоумножителей, модернизирована система мониторинга предливневого детектора. Также были получены новые результаты по разработке трековой системы на основе сцинтилляционных волокон: изготовлены прототипы многоканальных фотоприемников

на основе кремниевых лавинных фотодиодов с улучшенными характеристиками: уменьшенным коэффициентом оптической связи и увеличенной чувствительностью.

## 4.2 ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент LHCb предназначен для изучения физики тяжелых кварков на большом адронном коллайдере LHC. Основная цель эксперимента – прецизионное измерение нарушения CP четности и редких распадах адронов с  $c$ - и  $b$ - кварками и поиск эффектов Новой Физики, в том числе путем измерения параметров, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (СМ). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к отклонениям от теории. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , измерение осцилляционного параметра  $\Delta m_d$  в системе  $B^0$  мезона и CP-нарушающей  $\phi_s$  фазы в интерференции между смешиванием и распадами  $B_s$  – мезона, угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания, изучение изотопической асимметрии в распадах  $B \rightarrow K^{(*)}\mu\mu$  и ряд других. Результаты LHCb по углу  $\gamma$  являются доминирующими в мировом среднем значении.

Институт ядерных исследований участвует в коллаборации LHCb начиная с проектной стадии эксперимента 1993 г. Группой ИЯИ РАН была проведена разработка и создание части калориметрической системы - предливневого детектора. Калориметрическая система эксперимента LHCb играет важную роль в идентификации и измерении энергии частиц и выработке триггера нулевого уровня. За время работы эксперимента в 2010-2013 гг. калориметрическая система показала устойчивую работу в полном соответствии с проектными параметрами. В период набора статистики сотрудники ИЯИ РАН участвовали в эксплуатации установки, обеспечивая контроль работоспособности калориметра в дежурствах и обработке полученной информации.

Параллельно набору и обработке текущих данных эксперимент LHCb проводит подготовку к работе на модернизированном ускорителе LHC при большей энергии и светимости. Основная цель необходимой модернизации установки LHCb – обеспечение возможности работы на светимости до  $2 \cdot 10^{33}/\text{см}^2/\text{сек}$ , что в 5 раз превышает достигнутый уровень. Для этого требуется модернизация электроники считывания всех подсистем и создание полностью гибкого программируемого триггера, что позволит улучшить эффективность отбора конечных адронных состояний. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента будет способен за 10 лет набрать статистику около  $50/\text{fb}^{-1}$  интегральной светимости. В этой связи, в частности, существенно возрастают требования к быстродействию и радиационной стойкости электроники и фотодетекторов, включая приемную электронику и элементы питания фотоэлектронных умножителей (ФЭУ)

калориметров. Так как для сохранения анодного тока на приемлемом уровне в условиях повышенной светимости потребуется уменьшение усиления ФЭУ, модификация приемной электроники предполагает в частности увеличение чувствительности входной цепи в 5 раз. Также планируется изменение входных параметров электронной цепи, поэтому соответствующие изменения в формировании формы импульса должны быть учтены при модификации формирующей цепочки, расположенной на плате высоковольтного распределителя питания ФЭУ.

Также в рамках модернизации калориметрической системы ЛHCб потребовалось устранить недостатки, выявленных при эксплуатации системы мониторинга сцинтилляционно-падового спектрометра, таких как недостаточная надежность при распределении системы по большому количеству компьютеров и дисков хранения информации. Для устранения недостатков были использованы «облачные» технологии и осуществлен переход на виртуальные машины. Также, для повышения быстродействия, был сделан переход с системы Windows на систему Linux.

В рамках разработки новой трековой системы ЛHCб на основе сцинтилляционных волокон разработаны и получены новые прототипы многоканальных фотоприемников фирмы HAMAMATSU с улучшенными параметрами: коэффициентом оптической связи 4% и чувствительностью (PDE) 47%. Далее необходима проверка радиационной стойкости новых фотоприемников.

#### 4.2 Основные результаты

Основная цель эксперимента ЛHCб – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах B-мезонов. В 2015 году на ускорителе LHC завершились плановые работы, в результате которых энергию пучков протонов впервые удалось увеличить до 6.5 ТэВ. Поскольку часть времени отводилась на пуско-наладочные работы, изначальный план по интегральной светимости был достигнут уровня  $\sim 200/\text{fb}$  для ЛHCб. В результате успешной совместной работы ускорителя и экспериментов он был перевыполнен, и была набрана светимость  $\sim 320/\text{fb}$ , при этом практически вся статистика набрана при временном интервале между сгустками протонов 25 нсек. Кроме набора новых данных эксперимент ЛHCб в 2015 г. продолжил работу в области обработки ранее набранных данных за 2011-2013 г.г., получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе более точное измерение вероятностей распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и  $B^0 \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $|V_{ub}|$  матрицы смешивания, первое наблюдение очарованного пентакварка и ряд других.

Основные физические результаты, полученные ЛHCб в 2015 г.

Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2015 году можно выделить следующие:

Измерение вероятности распада  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  [1]. Величины вероятностей распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  представляют большой интерес с точки зрения эксперимента, так как являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели (СМ). После обработки полного набора данных, полученных в 2011 и в 2012 г.г., эксперименты LHCb и CMS выполнили совместный анализ и опубликовали результат по первому в мире наблюдению распада  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и по первому в мире экспериментальному измерению вероятности распада  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  со статистической достоверностью  $6\sigma$  и  $3\sigma$  соответственно. Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям СМ и позволяют ограничить возможные параметры ее расширения.

Измерение угла  $V_{ub}$  матрицы смешивания СКМ [2]. В LHCb закончен анализ данных 2011-2012 г.г. по измерению отношения вероятностей эксклюзивных распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda c^+\mu\nu$ , что позволило измерить отношение углов  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$ . Эти моды распадов не были доступны на B-фабриках, в то время как на БАК предоставляется возможность использовать большое количество сигнальных событий, до 20% от производимых b-адронов. Кроме этого, измерение относительной вероятности распадов позволяет избежать многих экспериментальных неопределенностей. Используя мировое среднее для величины  $|V_{cb}|$ , было получено прецизионное значение для угла  $|V_{ub}| = (3.27 \pm 0.15 \pm 0.16 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ , где первая неопределенность связана с экспериментальной ошибкой, вторая - с теоретической неточностью, а третья – с ошибкой нормализации к углу  $|V_{cb}|$ . Полученное значение  $|V_{ub}|$  хорошо согласуется с условиям унитарности матрицы смешивания. Полученный результат является наиболее точным единичным измерением в мире и дает важный вклад в глобальный фит параметров СКМ матрицы.

Первое наблюдение очарованного пентакварка [3]. В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^-\rho$ , в которых в спектре инвариантной массы  $(J/\psi, \rho)$  пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , с уровнем значимости 9 и 12 стандартных отклонений. Их состав может быть объяснен только минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{s}uud$ , это так называемый очарованный пентакварк. Таким образом, предсказанные более 50 лет назад частицы наконец находят свое подтверждение. Этот

результат уже нашел признание и вошел в «топ-10» наиболее прорывных по физике за 2015 г., по версии журнала «[Physics World](#)».

Модернизация калориметрической системы.

Основные требования к модернизированному детектору БАК-би вытекают из планируемых условий его эксплуатации: энергия встречных пучков  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ; мгновенная светимость  $10^{33}$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>, что будет достигнуто при временном интервале между соседними сгустками протонов 25 нсек и среднем числе взаимодействий на одно пересечение сгустков  $\mu=2$ ; интегральная светимость 5 fb<sup>-1</sup> за год и 50 fb<sup>-1</sup> за весь период эксплуатации. В частности, существенно возрастают требования к быстродействию и радиационной стойкости электроники и фотодетекторов, включая приемную электронику и элементы питания фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) калориметров. Так как для сохранения анодного тока на приемлемом уровне в условиях повышенной светимости потребуется уменьшение усиления ФЭУ, модификация приемной электроники предполагает в частности увеличение чувствительности входной цепи в 5 раз. Также планируется изменение входных параметров электронной цепи, поэтому соответствующие изменения в формировании формы импульса должны быть учтены при модификации формирующей цепочки на плате высоковольтного распределителя питания ФЭУ.

Детали конструкции делителей напряжения.

При выбранном типе фотоумножителя и конструкции модуля электромагнитного калориметра определяющую роль в энергетическом разрешении наряду со стабильностью и радиационной стойкостью самого фотоприёмника играет также надежность и эксплуатационные характеристики высоковольтного делителя фотоприёмника. На стадии проектирования в качестве такового был выбран делитель, использующий принцип каскадной генерации высокого напряжения Кокрофт-Уолтона. При разработке делителя для калориметрической системы супердетектора БАК-би (как электромагнитного, так и адронного калориметров), был использован опыт аналогичной разработки в эксперименте HERA-B (DESY, Германия).

Разработанный высоковольтный делитель для электромагнитного калориметра показал надёжную работу в течении трех лет использования на супердетекторе БАК-би. Тем не менее, для продолжения работы при высокой интенсивности после реконструкции ускорителя БАК необходима замена части делителей на новые: во-первых, в соответствии с результатами испытаний на радиационную стойкость, ожидается набор предельной накопленной дозы для делителей, работающих во внутренней зоне калориметра. Во-вторых, с учетом опыта эксплуатации делителей в реальных условиях, было принято

решение изменить номиналы ряда элементов. В-третьих, для согласования с требованиями разрабатываемой новой электроники, понадобилось также внести изменения в конструкцию.

В результате коллаборацией БАК-би было принято решение изготовить партию модифицированных делителей в количестве 750 шт. Пробная партия из 24 штук изготовлена и прошла испытания.

Модернизация мониторной системы сцинтилляционно-падового спектрометра (СПС)

Система мониторинга СПС предназначена для решения следующих задач:

- в процессе сборки и эксплуатации СПС необходимо иметь возможность контроля работоспособности каждой ячейки детектора. Для этого используется сигнал от светодиода, расположенного на каждой ячейке сцинтиллятора детектора.
- Проверка работоспособности и настройка каналов приемной электроники.
- Осуществление контроля за усилением и стабильностью работы каналов ФЭУ на стадии запуска и в процессе эксплуатации.
- Предварительная калибровка каналов детектора перед началом набора данных.

Для этой цели в ИЯИ РАН была разработана и изготовлена оригинальная система мониторинга на основе светоизлучающих диодов.

В процессе эксплуатации системы управления экспериментом выявились некоторые недостатки, снижающие её надежность и функциональность: проекты WIN CC работали на большом количестве ЭВМ под управлением Windows. Это снижало надёжность системы из-за неизбежного отказа аппаратных средств. Хотя вероятность отказа достаточно мала, но, при большом количестве машин и дисков, восстановление работоспособности подсистем требовало больших трудозатрат. В свете современного подхода к созданию распределенных вычислительных сетей было принято решение о переходе на виртуальные машины (“облачные технологии”). При этом надежность возрастает как за счет отсутствия сети аппаратных средств, так и благодаря легкости дублирования аппаратных и программных средств, находящихся на основном сервере. Одновременно, для повышения быстродействия, был сделан переход с системы Windows на систему Linux. Все проекты были адаптированы под Linux. Всё программное обеспечение проектов WIN CC загружается в виртуальные машины с центрального сервера. В случае сбоя в работе проекта (ошибки проекта, сбой связи и т.д.) достаточно перезагрузить виртуальную машину, что не требует большого времени.

Разработка новых фотоприёмников для волоконного треккера ЛНСб.

Продолжается разработка фотоприёмников совместно с фирмами производителями с учетом требований улучшения базовых параметров SiPM: коэффициент оптической связи менее 5%, улучшение чувствительности в зеленой области спектра. Были получены новые чипы фирмы HAMAMATSU, с улучшенным коэффициентом оптической связи 4% (было 10%) и чувствительностью (PDE) 47% (было 40%). Таким образом в новой партии были улучшены оба критических параметра. На следующем этапе планируется проверка радиационной стойкости новых фотоприемников.

Параллельно продолжается работа с другим производителем КЕТЕК, было предложено несколько вариантов для улучшения параметров. Также продолжается разработка нового корпуса фотоприёмника, удовлетворяющего требованиям треккера ЛНСб.

#### 4.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы ЛНСб. Эксперимент ЛНСб в 2015 г. начал работу по набору статистики после модернизации ускорителя ЛНС на повышенной энергии протонов 6.5 ТэВ. Также продолжена обработка набранных за 2011-2013 г.г. данных, получен ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе более точное измерение вероятностей распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$  и  $B^0 \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $|V_{ub}|$  матрицы смешивания, первое наблюдение очарованного пентакварка и ряд других.

На этапе создания установки ЛНСб группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, являющийся частью калориметрической системы. За время эксплуатации было показано, что конструкция предливневого детектора является надежной и удовлетворяет поставленным требованиям эксперимента. С точки зрения операционной эксплуатации общая эффективность детектора близка к 100%. В 2015 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных фотоумножителей калориметрической системы.

В рамках модернизации калориметрической системы ЛНСб в результате проведения научно-исследовательской работы были разработаны конструкции модифицированных электронных высоковольтных делителей фотодетекторов и изготовлена их опытная партия. Также разработана программа и методика испытаний электронных компонентов калориметрической системы. Разработанные электронные компоненты и технологии изготовления соответствуют техническим требованиям на модернизацию элементов супердетектора БАК-би, необходимую для обеспечения

возможности проведения экспериментальных исследований при интенсивности пучка ускорителя БАК, в десять раз превышающую нынешнюю.

Также была проведена работа по устранению недостатков, выявленных при эксплуатации системы мониторинга сцинтилляционно-падового спектрометра, таких как недостаточная надежность при распределении системы по большому количеству компьютеров и дисков хранения информации. Для устранения недостатков были использованы «облачные» технологии и осуществлен переход на виртуальные машины. Также, для повышения быстродействия, был сделан переход с системы Windows на систему Linux. Всё программное обеспечение проектов WinCC-OA загружается в виртуальные машины с центрального сервера. В случае сбоя в работе проекта достаточно перезагрузить виртуальную машину, что не требует большого времени.

В рамках разработки новой трековой системы LHCb на основе сцинтилляционных волокон разработаны и получены новые прототипы многоканальных фотоприемников фирмы HAMAMATSU с улучшенными параметрами: коэффициентом оптической связи 4% (было 10%) и чувствительностью (PDE) 47% (было 40%). Далее необходима проверка радиационной стойкости новых фотоприемников.

#### 4.2 Список основных публикаций LHCb в 2015 г.

1. LHCb Collaboration, “Observation of the rare  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decay from the combined analysis of CMS and LHCb data”, Nature 522 (2015) 68-72
2. LHCb Collaboration, “Determination of the quark coupling strength  $|V_{ub}|$  using baryonic decays”, Nature Phys. 11 (2015) 743-747
3. LHCb Collaboration, “Observation of  $J/\psi$  Resonances Consistent with Pentaquark States in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^0$  decays”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 072001
4. LHCb Collaboration, “Forward production of  $\Upsilon$  mesons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=7$  and  $8$  TeV”, JHEP 1511 (2015) 103
5. LHCb Collaboration, “Measurement of forward  $J/\psi$  production cross-sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV”, JHEP 1510 (2015) 172
6. LHCb Collaboration, “First measurement of the differential branching fraction and  $CP$  asymmetry of the  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  decay”, JHEP 1510 (2015) 034
7. LHCb Collaboration, “Measurement of the time-integrated  $CP$  asymmetry in  $D^0 \rightarrow K^0_S K^0_S$  decays”, JHEP 1510 (2015) 055
8. LHCb Collaboration, “Search for hidden-sector bosons in  $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$  decays”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 16, 161802
9. LHCb Collaboration, “Measurement of the  $B_s^0 \rightarrow \phi \phi$  branching fraction and search for the decay  $B^0 \rightarrow \phi \phi$ ”, JHEP 1510 (2015) 053

10. LHCb Collaboration, “ $B$  flavour tagging using charm decays at the LHCb experiment”, JINST 10 (2015) 10, P10005
11. LHCb Collaboration, “Measurement of the branching fraction ratio  $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+)/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+)$ ”, Phys.Rev. D92 (2015) 7, 072007
12. LHCb Collaboration, “Measurement of the forward-backward asymmetry in  $Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$  decays and determination of the effective weak mixing angle”, JHEP 1511 (2015) 190
13. LHCb Collaboration, “Angular analysis and differential branching fraction of the decay  $B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ ”, JHEP 1509 (2015) 179
14. LHCb Collaboration, “Measurement of the ratio of branching fractions  $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau)/\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \mu^- \bar{\nu}_\mu)$ ”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 11, 111803, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 15, 159901
15. LHCb Collaboration, “First observation of top quark production in the forward region”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 11, 112001
16. LHCb Collaboration, “Measurement of the exclusive  $Y$  production cross-section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV and 8 TeV”, JHEP 1509 (2015) 084
17. LHCb Collaboration, “Study of  $B^{\pm} \rightarrow DK^{\mp} \pi^{\pm} \pi^{\mp}$  and  $B^{\pm} \rightarrow D \pi^{\mp} \pi^{\pm} \pi^{\mp}$  decays and determination of the CKM angle  $\gamma$ ”, Phys.Rev. D 92, 112005 (2015)
18. LHCb Collaboration, “Measurement of the forward  $Z$  boson production cross-section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV”, JHEP 1508 (2015) 039
19. LHCb Collaboration, “Study of  $W$  boson production in association with beauty and charm”, Phys.Rev. D92 (2015) 5, 052001
20. LHCb Collaboration, “Search for the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \eta^{\prime}$  and  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \eta$  decays with the LHCb detector”, JHEP 1509 (2015) 006
21. LHCb Collaboration, “Dalitz plot analysis of  $B^0 \rightarrow \overline{D}^0 \pi^+ \pi^-$  decays”, Phys.Rev. D92 (2015) 3, 032002
22. LHCb Collaboration, “Search for the decay  $B_s^0 \rightarrow \overline{D}^0 f_0(980)$ ”, JHEP 1508 (2015) 005
23. LHCb Collaboration, “Amplitude analysis of  $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^+ \pi^-$  decays”, Phys.Rev. D92 (2015) 1, 012012
24. LHCb Collaboration, “Identification of beauty and charm quark jets at LHCb”, JINST 10 (2015) 06, P06013

25. LHCb Collaboration, “Quantum numbers of the  $X(3872)$  state and orbital angular momentum in its  $\rho^0 J/\psi$  decay”, Phys.Rev. D92 (2015) 1, 011102
26. LHCb Collaboration, “A study of CP violation in  $B^{\mp} \rightarrow Dh^{\mp}$  ( $h=K, \pi$ ) with the modes  $D \rightarrow K^{\mp} \pi^{\pm} \pi^0$ ,  $D \rightarrow \pi^{\pm} \pi^{\mp} \pi^0$  and  $D \rightarrow K^+ K^- \pi^0$ ”, Phys.Rev. D91 (2015) 11, 112014
27. LHCb Collaboration, “Evidence for the strangeness-changing weak decay  $\Xi_b^- \rightarrow \Lambda_b^0 \pi^-$ ”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 24, 241801
28. LHCb Collaboration, “First observation and measurement of the branching fraction for the decay  $B^0_s \rightarrow D_s^{*\mp} K^{\pm}$ ”, JHEP 1506 (2015) 130
29. LHCb Collaboration, “Observation of the  $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$  decay from an amplitude analysis of  $B^0 \rightarrow (\pi^+ \pi^-)(\pi^+ \pi^-)$  decays”, Phys.Lett. B747 (2015) 468-478
30. LHCb Collaboration, “Observation of the  $B^0_s \rightarrow \eta \eta'$  decay”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 5, 051801
31. LHCb Collaboration, “Differential branching fraction and angular analysis of  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$  decays”, JHEP 1506 (2015) 115
32. LHCb Collaboration, “Observation of the decay  $\overline{B}_s^0 \rightarrow \psi(2S) K^+ \pi^-$ ”, Phys.Lett. B747 (2015) 484-494
33. LHCb Collaboration, “Measurement of CP violation in  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0_S$  decays”, Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 3, 031601
34. LHCb Collaboration, “Measurement of the time-dependent CP asymmetries in  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ ”, JHEP 1506 (2015) 131
35. LHCb Collaboration, “Measurement of CP asymmetries and polarisation fractions in  $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{\pm} \pi^{\mp}$  decays”, JHEP 1507 (2015) 166
36. LHCb Collaboration, “First observation and amplitude analysis of the  $B^{\pm} \rightarrow D^{\pm} K^{\mp} \pi^{\pm}$  decay”, Phys.Rev. D91 (2015) 9, 092002
37. LHCb Collaboration, “Measurement of forward  $Z \rightarrow e^+ e^-$  production at  $\sqrt{s}=8$  TeV”, JHEP 1505 (2015) 109
38. LHCb Collaboration, “Precise measurements of the properties of the  $B_{1(5721)}^{0,+}$  and  $B_{2(5747)}^{0,+}$  states and observation of  $B^{+,0} \pi^{\mp,+}$  mass structures”, JHEP 1504 (2015) 024
39. LHCb Collaboration, “Measurement of indirect CP asymmetries in  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$  and  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$  decays using semileptonic  $B$  decays”, JHEP 1504 (2015) 043

40. LHCb Collaboration, “Angular analysis of the  $B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-$  decay in the low- $q^2$  region”, JHEP 1504 (2015) 064
41. LHCb Collaboration, “Determination of the branching fractions of  $B_{(S)}^0 \rightarrow D_{(S)}^{\mp} K^{\mp}$  and  $B^0 \rightarrow D_{(S)}^{\mp} K^{\pm}$ ”, JHEP 1505 (2015) 019
42. LHCb Collaboration, “Study of the rare  $B_{(s)}^0$  and  $B^0$  decays into the  $\pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$  final state”, Phys.Lett. B743 (2015) 46-55
43. LHCb Collaboration, “LHCb Detector Performance”, Int.J.Mod.Phys. A30 (2015) 07, 1530022
44. LHCb Collaboration, “Search for long-lived particles decaying to jet pairs”, Eur.Phys.J. C75 (2015) 4, 152
45. LHCb Collaboration, “Measurement of the inelastic pp cross-section at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 7$  TeV”, JHEP 1502 (2015) 129
46. LHCb Collaboration, “Measurement of the lifetime of the  $B_c^+$  meson using the  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$  decay mode”, Phys.Lett. B742 (2015) 29-37
47. LHCb Collaboration, “Observation of two new  $\Xi_b^-$  baryon resonances”, Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 062004
48. LHCb Collaboration, “Search for the rare decays  $B^0 \rightarrow J/\psi \gamma$  and  $B^0_{(s)} \rightarrow J/\psi \gamma$ ”, Phys.Rev. D92 (2015) 11, 112002
49. LHCb Collaboration, “Precision measurement of CP violation in  $B_{(s)}^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$  decays”, Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 4, 041801
50. LHCb Collaboration, “Measurement of  $B_c^+$  production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV”, Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 13, 132001
51. LHCb Collaboration, “Measurement of the CP-violating phase  $\beta$  in  $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$  decays and limits on penguin effects”, Phys.Lett. B742 (2015) 38-49
52. LHCb Collaboration, “Measurement of the Z+b-jet cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV in the forward region”, JHEP 1501 (2015) 064
53. LHCb Collaboration, “Study of  $\eta$ - $\eta'$  mixing from measurement of  $B^0_{(s)} \rightarrow J/\psi \eta^{(\prime)}$  decay rates”, JHEP 1501 (2015) 024
54. LHCb Collaboration, “Search for CP violation in  $D^0 \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^0$  decays with the energy test”, Phys.Lett. B740 (2015) 158
55. LHCb Collaboration, “Measurement of the semileptonic CP asymmetry in  $B^0$ - $\overline{B}^0$  mixing”, Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 041601
56. LHCb Collaboration, “Search for the lepton flavour violating decay  $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$ ”, JHEP 1502 (2015) 121

57. LHCb Collaboration, “Measurement of the  $\eta_c(1S)$  production cross-section in proton-proton collisions via the decay  $\eta_c(1S) \rightarrow p \bar{p}$ ”, Eur.Phys.J. C75 (2015) 7, 311
58. LHCb Collaboration, “Determination of  $\gamma$  and  $-2\beta_s$  from charmless two-body decays of beauty mesons”, Phys.Lett. B741 (2015) 1-11
59. LHCb Collaboration, “Measurement of the track reconstruction efficiency at LHCb”, JINST 10 (2015) 02, P02007

### 4.3 Тёмная материя и темная энергия в астрофизике космических лучей

Научный руководитель Вячеслав Иванович Докучаев

Исполнитель Ю.Н.Ерошенко

Обсуждается перспективный метод измерения полной массы темной материи вблизи сверхмассивной черной дыры в центре Галактики на основе наблюдений нерелятивистской прецессии орбит быстрых S0 звезд совместно с ограничениями на аннигиляционный сигнал от частиц темной материи. Получено аналитическое выражение для угла прецессии в предположении степенного профиля плотности темной материи. Современные телескопы уже в ближайшие несколько лет смогут измерить или получить сильное ограничение на прецессию орбит S0 звезд. Вычислена масса темной материи, необходимая для объяснения наблюдаемого избытка гамма-излучения за счет аннигиляции частиц темной материи с учетом эффекта Зоммерфельда.

#### 4.3 СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ

1. В. И. Докучаев и Ю. Н. Ерошенко / Взвешивание темной материи в центре Галактики // Письма ЖЭТФ **101**, 875-880 (2015).
2. В. И. Докучаев и Ю. Н. Ерошенко / Физическая лаборатория в центре Галактики // УФН **185**, 829–843 (2015).
3. A. V. Grobov, A. E. Dmitriev, V. I. Dokuchaev, S. G. Rubin / Soliton Dark Matter // Physics Procedia **74**, 28–31 (2015).
4. V. I. Dokuchaev, Yu. N. Eroshenko, K. S. Klimkov / Precession of fast S0 stars in the vicinity of supermassive black hole in the Galactic center // Physics Procedia **74**, 292–296 (2015).
5. V. Berezhinsky, V. Dokuchaev and Yu. Eroshenko // SUSY dark matter annihilation in the Galactic halo // J. Phys.: Conf. Ser. **607**, 012015 (2015).
6. V. Dokuchaev, Yu. Eroshenko / Stationary quantum states of the Dirac fermions in the Reissner-Nordstrom metric // Proc. 16th Lomonosov Conf. on elementary particle. Particle physics at the year of centenary of Bruno Pontecorvo. Ed. A. I. Studenikin. Moscow State University, Moscow, August 22-28, 2013. (World Scientific, Singapore, 2015), pp 381-383. [http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814663618\\_0074](http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814663618_0074)

#### *Доклады на конференциях*

1. V. I. Dokuchaev, Yu. N. Eroshenko / Dark matter distribution and annihilation at the Galactic center // Intern. Conf. on particle phys. and astrophys (ICPPA-2015). 5-10 Oct. 2015. Center of Basic Research and Particle Physics of National Research Nuclear University “MEPhI”. <http://indico.cfr.mephi.ru/event/2/session/33/contribution/19>
2. V. I. Dokuchaev and Yu. N. Eroshenko / Weighing of dark matter in the Galactic center // XVII Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц. 20-26 августа 2015 г. МГУ им. М. В. Ломоносова; 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. Moscow State University (Moscow, Russia) Aug. 20-26, 2015. [http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon\\_programme.htm](http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm)

3. V. A. Berezin, V. I. Dokuchaev, Yu. N. Eroshenko / Spherically symmetric conformal gravity and "gravitational bubbles" // The Ninth Alexander Friedmann Intern. Seminar on Gravitation and Cosmology and Third Satellite Symposium on the Casimir Effect, June 21-27, 2015, Saint Petersburg, Russia. <http://friedmann-2015.org/> ; 2015

4. V. A. Berezin, V. I. Dokuchaev & Yu. N. Eroshenko / Conformal gravity, gravitational bubbles and all that // XIIth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology ICGAC-12. Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), Moscow, Russia, June 28 - July 5, 2015; (устный секционный доклад). <http://rgs.vniims.ru/icgac12.htm>

5. V. I. Dokuchaev / Spin and mass of the supermassive black hole at the Galactic center // XIIth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology ICGAC-12. Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), Moscow, Russia, June 28 - July 5, 2015. <http://rgs.vniims.ru/icgac12.htm>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Открытие осцилляций мюонного нейтрино в тау нейтрино. По данным 2008 – 2012 гг. зарегистрировано 5 событий - кандидатов на взаимодействие тау нейтрино. Обнаруженные кандидаты позволяют оценить открытие осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  на уровне 5 стандартных отклонений. ИЯИ РАН в коллаборации OPERA.

Проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи. В ЦЕРНе проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи на пучке H4 ускорителя SPS. В основу предложения эксперимента были положены теоретические и экспериментальные работы, выполненные сотрудниками ИЯИ РАН. Разработка и создание детектора были осуществлены в основном силами российских институтов ИЯИ, ИФВЭ и ОИЯИ в сотрудничестве с научными центрами из Германии, Греции, Швейцарии и Чили. Результаты сеанса были рассмотрены на недавнем заседании комитета SPSC ЦЕРН и получили высокую оценку. P348 является одним из наиболее конкурентоспособных экспериментов по поиску скрытого сектора, обладающий также значительным потенциалом открытия новых частиц, связанных с g-2 аномалией магнитного момента мюона, редкими распадами нейтральных каонов, и другими распадами и реакциями адронов и лептонов. ИЯИ РАН в коллаборации P348.

Первое наблюдение очарованного пентакварка. В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. опубликованы результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ , в которых в спектре инвариантной массы ( $J/\psi, p$ ) пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , с уровнем значимости 9 и 12 стандартных отклонений. Их состав может быть объяснен только минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{c}uudd$ , это так называемый очарованный пентакварк. Таким образом предсказанные более 50 лет назад частицы наконец находят своё подтверждение. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Получено лучшее в мире ограничение на массу адронного аксиона. В различных моделях при решении CP-проблемы в рамках Квантовой хромодинамики возникает голдстоуновский бозон – аксион, который может рождаться в результате снятия возбуждения ядра K<sub>g</sub>-83, присутствующего в Солнце. Эксперимент основан на

использовании образца криптона (содержащего изотоп  $Kr-83$ ) в качестве мишени для аксионов, летящих от Солнца, и в тоже время рабочей среды большого пропорционального счётчика. При наличии эффекта на энергетическом спектре фона счётчика должен быть пик в области 9.4 кэВ. Величина этого пика определяется константой связи аксионов с нуклонами, которая пропорциональна массе аксиона. Завершён первый этап измерений с образцом, обогащённым по изотопу  $Kr-83$  до 58.2%. По данным полученным за время измерений 188.33 сут. получен лучший в мире предел на массу адронного аксиона на уровне 100 эВ (95% у.д.). ИЯИ РАН.

Измерена вероятность распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$ . Величины вероятностей таких распадов являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели. После обработки полного набора данных, полученных в 2011 и в 2012 гг. опубликован результат по первому в мире наблюдению распада  $B_s0 \rightarrow \mu\mu$  и по первому в мире экспериментальному измерению вероятности распада  $B_0 \rightarrow \mu\mu$  со статистической достоверностью  $6\sigma$  и  $3\sigma$  соответственно. Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям Стандартной модели и позволяют ограничить возможные параметры её расширения. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Эксперимент NOvA наблюдает изменения в потоках нейтрино на расстоянии 810 км. Были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино. В отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино. Это является неоспоримым доказательством того, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества. ИЯИ РАН в коллаборации NOvA.

Измерен угол смешивания  $u$  и  $b$  кварков. Закончен анализ данных 2011-2012 гг. по измерению отношения вероятностей эксклюзивных распадов  $\Lambda_b0 \rightarrow \mu\nu$  и  $\Lambda_b0 \rightarrow \Lambda c + \mu\nu$ , что позволило измерить отношение углов смешивания  $u$ ,  $b$  и  $s$ ,  $b$  кварков:  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$ . Эти моды распадов не были доступны на В-фабриках, в то время как на Большом адронном

коллайдере предоставляется возможность использовать большое количество сигнальных событий, до 20% от производимых  $b$ -адронов. Используя мировое среднее для величины  $|V_{cb}|$ , было получено прецизионное значение для угла  $|V_{ub}|$ , которое хорошо согласуется с условиям унитарности матрицы смешивания. Полученный результат является наиболее точным единичным измерением в мире и даёт важный вклад в глобальный список значений параметров матрицы смешивания кварков. ИЯИ РАН в коллаборации LHCb.

Измерен период двухнейтринного бета распада Ge-76 и найдена граница распада на возбуждённые уровни. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA, с участием учёных ИЯИ РАН, получен с высокой точностью период полураспада двухнейтринного бета распада Ge-76:  $(1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$  лет. Выполнен поиск двухнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 на три возбуждённых уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам, обогащённым по изотопу Ge-76, погруженным в жидкий азот. Получен верхний предел для искомого распада:  $3.7 \cdot 10^{23}$  лет, который превосходит более чем в 100 раз значения, известные из предыдущих аналогичных экспериментов. ИЯИ РАН в коллаборации GERDA.