

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 621.384.6, 61

Рег. № АААА-А20-120011790116-3

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А20-120011790116-3

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ ЗА ПРЕДЕЛАМИ СТАНДАРТНОЙ
МОДЕЛИ В ПРИЛОЖЕНИИ К АСТРО- И КОЛЛАЙДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

(промежуточный за 2020 год, 2 этап)

ФЦП

Руководитель НИР,
Академик РАН, д.ф.-м.н.

И.И. Ткачев
«31» января 2021 г.

Москва 2021 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Зав. отделом, академик РАН,
д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

И.И. Ткачев
(введение, заключение,
раздел 1)

Исполнители:
К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Д.Г. Левков
(раздел 1)

К.ф.-м.н.

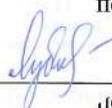


31.01.2021

подпись, дата

А.Г. Панин
(раздел 1)

Д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(раздел 2)

К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Нозик А.А.
(раздел 2)

К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Голубева Е.С.
(раздел 3)

К.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Демидов С. В.
(раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 28 с., 14 рис., 0 табл., 2 источн., 0 прил.

Ключевые слова: БЫСТРЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ, ГРАВИТАЦИОННАЯ ЛИНЗА, ЧЁРНАЯ ДЫРА, СЦИНТИЛЛЯЦИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ, АКСИОНЫ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, МЮОНЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ДЕТЕКТОР МЮОННОГО ВЕТО, НЕСОХРАНЕНИЕ БАРИОННОГО ЧИСЛА.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2020 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

1. Задача «Исследование спектров быстрых радиовсплесков»

Объектом исследования являются наблюдаемые спектры излучения быстрых радиовсплесков.

Целью работы является получение ограничений на модели происхождения FRB, в частности, на модели, в которых роль источников быстрых радиовсплесков играют экзотические объекты, такие как Бозе-звезды. Необходимым этапом работы было построение теории распространения мощного радиоизлучения в космической плазме с учетом эффектов сцинтилляций и возможного присутствия дифракционного линзирования с последующим применением в изучении спектров быстрых радиовсплесков. Построенная теория позволила разделить соответствующие виды модуляций, корректно определить параметры плазмы, приводящие к искажению первичного радиосигнала за счет эффектов распространения, и, наконец, выделить исходный сигнал источника. Такого описания раньше не существовало, это позволило объяснить неожиданные новые спектральные закономерности, которые мы обнаружили в экспериментальных данных.

Обнаружена необычная периодическая структура в спектре повторяющегося быстрого радиовсплеска FRB 121102. Эта структура повторяется от вспышки к вспышке и может является свойством присущим механизму ответственному за явление быстрых радиовсплесков. Интересно, что такая структура может также возникать при гравитационном линзировании излучения FRB на реликтовой черной дыре с массой на 4 порядка меньшей Солнечной. Существование черных дыр такой малой массы означало бы новую физику, объясняющую темную материю во Вселенной.

Обнаружен мощный узкий пик в спектре радиоизлучения повторяющегося быстрого радиовсплеска FRB 121102. От вспышки к вспышке частота пика не изменяется и составляет 7,1 GHz. В ряде вспышек практически все зарегистрированное энерговыделение сосредоточено именно в этом пике. Такая структура в спектре является естественным предсказанием модели быстрых радиовсплесков, возникающих в результате параметрического распада аксионных звезд.

С целью сравнения моделей источника с наблюдениями исследованы процессы взрывного параметрического рождения фотонов в аксионных Бозе-звездах, как находящихся в состоянии покоя, так и в коллапсирующих. Продемонстрировано, что при определенных значениях параметров модели параметрический резонанс в коллапсирующих звездах может обладать такими же энергетическими и временными характеристиками, что и наблюдаемые в настоящее время быстрые радиовсплески. Найдены параметры модели и характеристики Бозе-звезды при которых вспышки повторяются.

2. Задача «Международная Аксионная Обсерватория IAXO»

Физическая программа создаваемой Международной Аксионной Обсерватории IAXO направлена на поиск потоков аксионов и аксионо-подобных частиц в излучении Солнца. В настоящее время ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации IAXO за разработку, изготовление и наладку мюонного вето и систем сбора данных.

Важнейшей целью в экспериментах такого уровня является подавление уровня фона до максимально низких технологически достижимых значений. В частности, для этого необходимо применять пассивную и активную защиту детекторной системы эксперимента. Для активной защиты в ИЯИ РАН разработана система мюонного вето для установок IAXO-D0 и BabyIAXO, основанная на пластиковых сцинтилляционных детекторах. В ходе работы разработаны и созданы специализированные измерительные стенды для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей и сцинтилляционных пластин системы мюонного вето. С помощью этих стендов проведены тестирования, отбор и исследования параметров фотоумножителей и сцинтилляционных пластин. Показана, что эффективность регистрации мюонов космических лучей разработанными сцинтилляционными детекторами составляет 99,97%. Для установки BabyIAXO была разработана схема системы сбора данных в эксперименте и созданы прототипы отдельных элементов этой системы. Сотрудники ИЯИ РАН приняли участие в ряде рабочих совещаний коллаборации IAXO. Разработана концепция эксперимента BabyIAXO.

3. Задача «Непертурбативные нарушающие барионное число процессы на будущих коллайдерах»

Объектом исследования являются модели физики элементарных частиц как в рамках, так и за пределами Стандартной модели, в которых могут происходить процессы с нарушением барионного числа.

Цель работы — исследование редких непертурбативных процессов, планирования и создания концепции будущих ускорительных экспериментов для их поиска. Основным инструментом для исследования этих процессов являлся аппарат квантовой теории поля и квазиклассические методы. Этот аппарат был существенно развит и дополнен новыми методами позволяющими получить вероятность туннельного прохождения в задачах со сложными граничными условиями. Был разработан и использовался новый более эффективный численный алгоритм нахождения решений таких граничных задач. Показано, что сечения процессов с нарушением барионного числа в моделях с расширенным калибровочным сектором потенциально могут быть наблюдаемо большими, что представляет большой интерес для будущих коллайдеров.

Сотрудники ИЯИ РАН приняли участие в разработке новой концепции поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций (нарушение барионного числа $B = 2$) и процессов с исчезновением нейтронов (нарушение барионного числа $B = 1$) в планирующемся эксперименте NIBEAM/NNBAR на ускорительном комплексе European Spallation Source (ESS).

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. Исследование спектров быстрых радиовсплесков.....	10
2. Разработка концепции международной аксионной обсерватории нового поколения IAХО.....	14
2.1. Разработка системы мюонного вето	14
2.2. Разработка специализированного измерительного стенда для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей системы мюонного вето эксперимента BabyIAХО.	16
2.3. Разработка программного обеспечения эксперимента BabyIAХО.....	19
3. Непертурбативные нарушающие барионное число процессы на будущих коллайдерах 22	
3.1. Теоретические исследования.....	22
3.2. Разработка предложения эксперимента NIBEAM/NNBAR на ESS.....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	27
ПУБЛИКАЦИИ.....	28

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Исследование спектров быстрых радиовсплесков»

Быстрые радиовсплески (fast radio bursts) — мощные радиоимпульсы миллисекундной длительности, регистрируемые радиотелескопами от источников неизвестной природы, находящихся на космологических расстояниях. Их яркость сравнима с яркостью, достигаемой при взрыве сверхновой, однако никакого другого типа излучения от быстрых радиовсплесков, кроме радио, ни во время вспышки ни после неё пока не обнаружено. На сегодняшний день зарегистрировано порядка 100 источников быстрых радиовсплесков, несколько из них — повторяющиеся. Хорошее временное и спектральное разрешение современных телескопов позволяет установить, что многие вспышки обладают нетривиальной частотно-временной структурой. Исследование их спектров может пролить свет на природу источников быстрых радиовсплесков, которая может быть проявлением новой физики. Целью работы является детальное изучение наблюдаемых спектров, отделение в них эффектов распространения в космической плазме с последующим определением параметров среды и источника излучения, построение соответствующей теории.

2. Задача «Разработка концепции международной аксионной обсерватории нового поколения IAXO»

Задача идентификации частиц темной материи является одной из приоритетных в физике частиц, космологии и астрофизике. Одним из наиболее естественных и изучаемых кандидатов на роль этих частиц является аксион. Примечательно, что аксион был предложен для решения совсем другой проблемы в физике частиц – проблемы нарушения комбинированной четности (CP симметрии) в сильных взаимодействиях. Аксионоподобные частицы естественным образом появляются также в суперсимметричных теориях. Таким образом, обнаружение аксионов решит сразу ряд фундаментальных проблем физики. Аксионы и аксионоподобные частицы обладают малым, но чрезвычайно важным для феноменологии электромагнитным взаимодействием. Это позволяет вести поиск аксионов в разнообразных экспериментальных подходах. Одним из таких подходов является регистрация возможного потока аксионов от Солнца. К настоящему времени наиболее сильные ограничения в таком подходе были получены экспериментом CAST в ЦЕРНе. Однако этот эксперимент уже исчерпал свои возможности и сейчас готовится новый, существенно более чувствительный, см. рисунок 1, международный эксперимент “International Axion Observatory” (IAXO - Международная

аксионная обсерватория). Как промежуточный экспериментальный этап эксперимента IAXO разрабатывается в настоящее время проект BabyIAXO. Зонами ответственности ИЯИ РАН являются изготовление сверхпроводящих магнитов, мюонного вето и программного обеспечения.

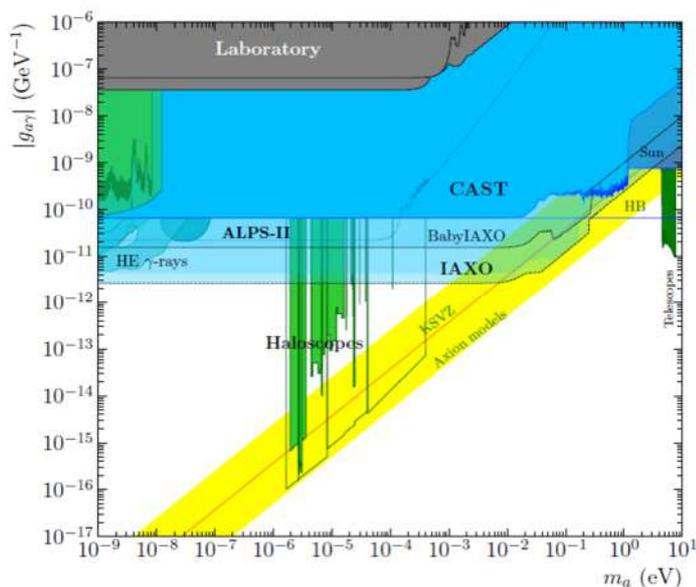


Рисунок 1 – Чувствительности экспериментов BabyIAXO и IAXO в сравнении с ограничениями экспериментов предыдущего поколения и теоретическими предсказаниями аксионных моделей

3. Задача «Непертурбативные нарушающие барионное число процессы на будущих коллайдерах»

Несохранение барионного и лептонных чисел в Стандартной модели имеет непертурбативный характер; его не видно на уровне диаграмм теории возмущений. Нарушение барионного числа B является необходимым условием для объяснения барионной асимметрии Вселенной. Однако такой процесс до сих пор экспериментально не наблюдался. Наблюдение нарушения барионного числа (BNV) в лабораторном эксперименте было бы открытием фундаментальной важности. В связи с обсуждением в научном сообществе физической программы будущих коллайдеров представляет интерес вычисление вероятностей процессов с нарушением барионного числа в столкновениях частиц высоких энергий. Переход нейтрона в антинейтрон также является важным и сравнительно неисследованным явлением, в котором нарушающие барионное число процессы могут быть обнаружены. За последние годы появились новые технологические возможности для задач такого рода в ускорительных экспериментах. Это прежде всего European Spallation Source (ESS) – высоко интенсивный источник нейтронов на базе протонного ускорителя, где поиск осцилляций свободных нейтронов может

осуществляться с очень высокой чувствительностью, возможно, более чем на три порядка выше, чем предыдущие экспериментальные поиски.

1. Исследование спектров быстрых радиовсплесков

В 2020 году изучались эффекты распространения мощного радиоизлучения в космической плазме, соответствующего явлению быстрых радиовсплесков. Рассматривалось прохождение сигнала через плазму с колмогоровским спектром неоднородностей, а также через одиночные плазменные облака с различными регулярными профилями плотности. При прохождении через среду из случайных мелких неоднородностей возникают сцинтилляции сигнала. При прохождении через плазменное облако может возникнуть рефракционное линзирование сигнала, которое можно объяснить в приближении геометрической оптики. Эти случаи рассматривались в литературе ранее. Мы систематизировали их теоретическое описание, и развили его на случай дифракционного линзирования. Построенная нами теория описывает и ситуацию, когда модуляция сигнала за счет сцинтилляций и дифракционного линзирования присутствует в сигнале одновременно. За счет этого наше аналитическое описание позволяет разделить соответствующие виды искажений исходного сигнала и корректно выделить параметры плазмы. Такого описания раньше не существовало, построенная теория позволила нам объяснить неожиданные спектральные закономерности, которые мы обнаружили в экспериментальных данных.

Построенная теория была применена к исследованию спектров повторяющегося источника FRB 121102. Эти спектры были измерены телескопом Грин-Бэнк в проекте Breakthrough Listen на частотах 4-8 ГГц. Мы получили интересные нас спектры выделив сигнал из сырых данных отфильтровав шумы и оценив ошибки измерений. В найденном спектре мы обнаружили ряд новых необычных закономерностей, которые повторяются от вспышки к вспышке.

Во первых, мы обнаружили необычную периодическую спектральную структуру. Эта структура, для одной из вспышек FRB 121102 показана на рисунке 2.

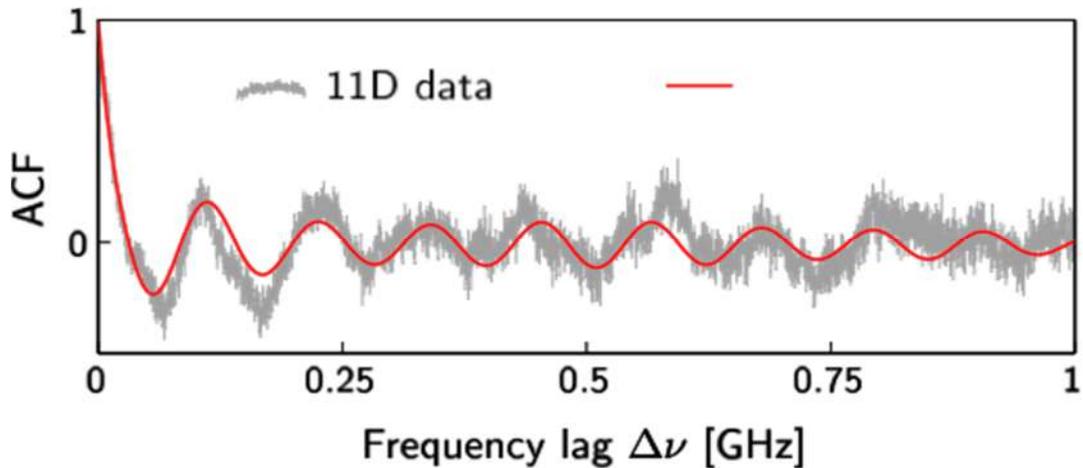


Рисунок 2 – Открытое новое явление – периодическая структура в спектрах быстрого радиовсплеска – показано в автокорреляционной функции светимости одной из вспышек FRB 121102. Серая линия соответствует обнаруженному сигналу, красная – модельной аппроксимации периодической функции

Обнаруженная структура повторяется от вспышки к вспышке и поэтому может являться свойством характеризующим физический механизм излучения в источнике. Ни один известный механизм к такой структуре не приводит, поэтому, в таком случае, это открытие может сигнализировать новую физику. Альтернативно, как мы показали, такая структура возникает при гравитационном линзировании излучения FRB первичной черной дырой с массой на 4 порядка меньшей Солнечной. Существование черных дыр такой малой массы также означало бы новую физику, объясняющую темную материю во Вселенной. Наконец, обнаруженное свойство может быть объяснено с помощью еще одного явления: дифракции сигнала FRB плазменном облаком с регулярным профилем. Это явление, предложенное в ходе решения задачи, является новым в контексте распространения сигналов FRB. Наконец, обнаруженная периодическая структура искажается беспорядочными межзвездными сцинтилляциями. Разработка методов выделения такой структуры и параметров сцинтиллирующей плазмы из наблюдательных данных является еще одним результатом решения поставленной задачи.

Далее, в ряде вспышек практически все зарегистрированное энерговыделение находится в узком спектральном пике на фиксированной частоте 7,1 GHz. Такой спектр очень трудно объяснить в рамках Стандартной модели, если он отражает первичное излучение источника. Однако, такая структура в спектре является естественным предсказанием модели быстрых радиовсплесков, возникающих в результате параметрического распада аксионных Бозе-звезд. Положение пика в этом случае определяется фундаментальной константой теории – массой аксиона, а не переменчивыми астрофизическими условиями. Это объясняет стабильность положения пика.

Спектральная же узость генерируемого излучения присуща процессам параметрического распада.

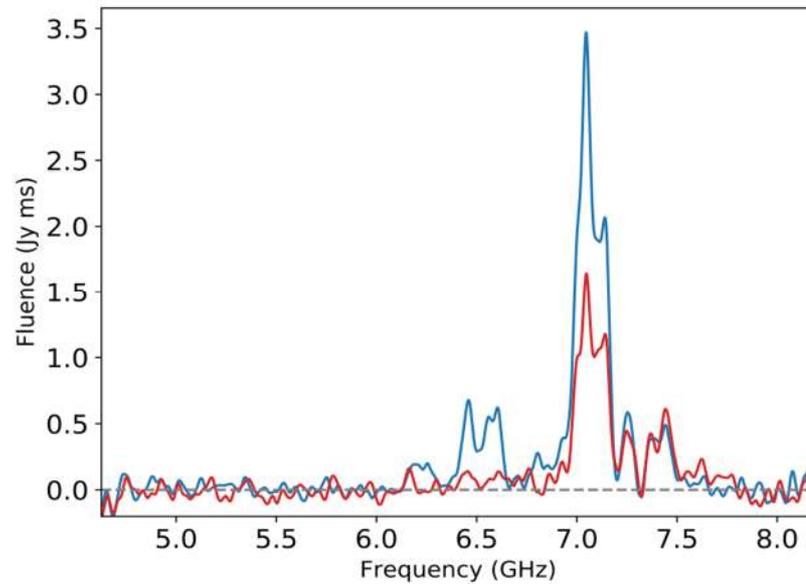


Рисунок 3 – Спектральная плотность излучения для двух вспышек источника FRB 121102 произошедших в разное время показана красной и синей линиями. Обнаруженный стабильный узкий пик на частоте 7,1 GHz доминирует в обеих вспышках

Для сравнения наблюдаемого спектра и предсказаний аксионной модели мы провели детальное исследование параметрического распада аксионных Бозе-звезд. Были аналитически получены общие уравнения, описывающие параметрическое резонансное рождение радиофотонов в конечном объеме аксионных Бозе-звезд. Получены условия и параметры модели, при которых рождение радиофотонов в этих объектах приводит к появлению экспоненциально растущих мод неустойчивости. Изучен резонанс в группах из нескольких Бозе-звезд, как статических, так и движущихся друг относительно друга, а также в коллапсирующих звездах. Выведены условия возникновения параметрической неустойчивости во всех этих объектах. Для всех вышеперечисленных случаев определены неустойчивые резонансные фотонные моды, найдены показатели их роста и получена светимость Бозе звезды как функция времени в зависимости от ее массы и параметров теории. Особый интерес представляет взрывной характер рождения фотонов возникающий при коллапсе Бозе-звезд. Найдена форма спектра излучения Бозе-звезд в этом режиме и показано, что излучение сосредоточено в узком пике на частоте равной половине массы аксиона. При этом значительная доля массы звезды может превращаться в излучение, а энерговыделение и длительность вспышки в определенном интервале параметров аксионной модели совпадает с наблюдаемыми характеристиками быстрых радиовсплесков.

Список выступлений в 2020 г. на международных конференциях по тематике задачи

1. D.G. Levkov, приглашенный доклад “Formation of axion stars”, international workshop “Axion cosmology” (17 February - 13 March 2020, Munich), <https://www.munich-iapp.de/activities/activities-2020/2020-1>.
2. I.I. Tkachev, приглашенный доклад “Theory and phenomenology of axion miniclusters”, international workshop “Axion cosmology” (17 February - 13 March 2020, Munich), <https://www.munich-iapp.de/activities/activities-2020/2020-1>.
3. D.G. Levkov, приглашенный доклад “Cold birth and bright death of Bose stars”, Fuzzy Dark Matter Workshop 2020 (20-23 July 2020, Göttingen/Online), <https://indico.desy.de/event/25188/>.
4. I.I. Tkachev, приглашенный доклад, "Axion stars and their possible astrophysical manifestations", workshop "Less travelled path of dark matter: axions and primordial black holes", 9 – 13 November 2020, Bengaluru, India (online) <https://www.icts.res.in/program/ltpdm2020/talks>.

2. Разработка концепции международной аксионной обсерватории нового поколения IAXO

Установка BabyIAXO разрабатывается как прототип эксперимента IAXO, на котором будут отрабатываться все компоненты (детекторы, оптические системы, магниты, криогенные системы и т.д.) полномасштабного эксперимента IAXO. Тем не менее, BabyIAXO планируется как и вполне самостоятельный эксперимент, который будет работать в ранее неисследованной области параметров $g_{a\gamma}$ до $\sim 1,5 \times 10^{-11}$ ГэВ⁻¹ и масс аксионов до 0,25 эВ, захватывая область КХД-аксионов, см. рисунок 1. Установка BabyIAXO будет располагаться в экспериментальном комплексе DESY в Гамбурге.

Для отработки детекторных систем, в качестве первого этапа проекта BabyIAXO, коллаборацией IAXO создается установка IAXO-D0. Для достижения требуемого уровня фона ($\sim 10^{-8}$ кэВ⁻¹см⁻²с⁻¹, а в перспективе и 10^{-9} кэВ⁻¹см⁻²с⁻¹) установка должна быть снабжена как пассивной защитой, так и активной системой мюонного вето. Таким образом, разработка и создание эффективной системы мюонного вето является одним из ключевых моментов для успеха эксперимента IAXO.

2.1. Разработка системы мюонного вето

Детекторная система установки IAXO-D0 плотно обложена пассивной защитой из свинца, рисунок 4. Пассивная защита должна быть окружена активной вето системой со всех сторон.



Рисунок 4 – Детекторная система IAXO-D0 в пассивной свинцовой защите

Система мюонного вето разрабатывалась на основе полистирольных пластиковых сцинтилляционных пластин размерами 300x20x5 см³ производства компании Eljen

Technologies. Обрезка пластин до необходимых размеров велась на станках с обеспечением допустимых температурных режимов. Большая часть пластин имеет размеры $100 \times 20 \times 5$ см³. Для технологического выхода детекторной системы установки D0 в вето системе существует отверстие размером 20×20 см², которое осуществлено двумя пластинами длиной 25 см каждая. После обрезки пластин все поверхности пластин полируются с помощью оптических паст. Все стороны обертываются двумя слоями диффузной светоотражающей пленки TYVEK 3M и одним слоем плотной черной полиэтиленовой пленки. Для регистрации сцинтилляционных сигналов используются фотоумножители XR2312B. Фотографии этого фотоумножителя и его делителя напряжения питания показаны на рисунке 5.



Рисунок 5 – Фотоумножитель XR2312B и делитель напряжения питания

Для компактности вето системы выбран прямой контакт фотоумножителя с торцевой стороной сцинтилляционной пластины без использования световодов. Оптический контакт фотоумножителя и сцинтилляционной пластины осуществляется с помощью оптического клея EJ-500, тестируются и отечественные образцы оптического клея. Каждая пластина просматривается фотоумножителем только с одного торца. Относительно небольшие длины сцинтилляционных пластин и их высокий световыход обеспечивают высокую эффективность регистрации мюонов сцинтилляционными пластинами при такой схеме, даже для пластин с вырезами. На рисунке 6 показан инженерный эскиз системы вето в сборе. Система вето состоит из 19 сцинтилляционных пластин и 19 фотоумножителей XR2312B.

В настоящее время установка IAXO-D0 собрана и начала свою работу в экспериментальном комплексе Университета Сарагоса в Испании. Сборка системы мюонного вето в 2020 г. велась под нашим руководством в удаленном режиме.

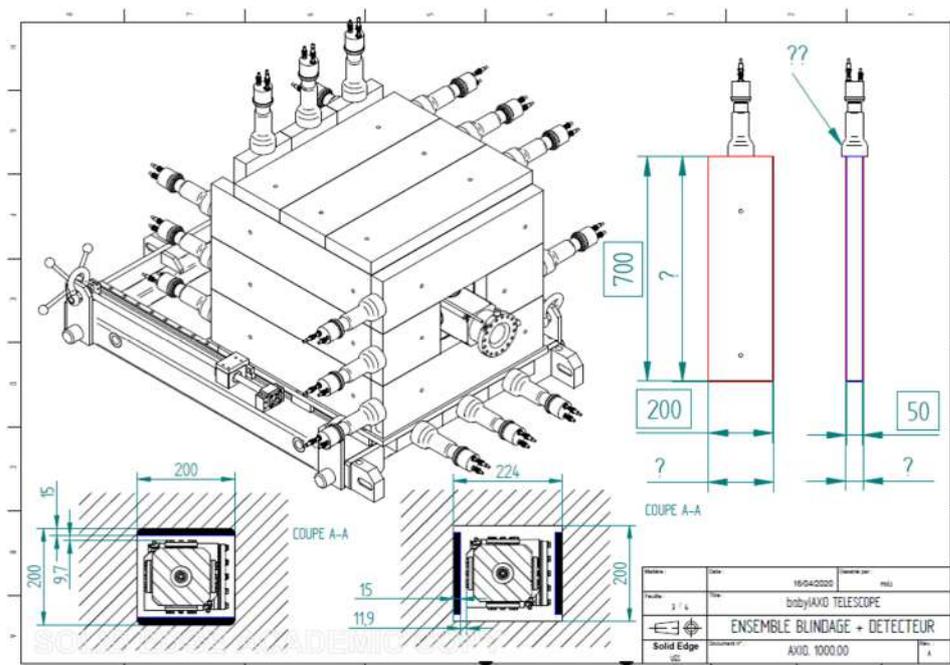


Рисунок 6 – Инженерный эскиз установки IAXO-DO с системой мюонного вето



Рисунок 7 – Детекторная установка IAXO-DO с мюонным вето

2.2. Разработка специализированного измерительного стенда для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей системы мюонного вето эксперимента BabyIAXO.

Для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителя XP2312B был разработан и создан специализированный измерительный стенд. На рисунках 8, 9 и 10 представлены типичные для исследованных образцов XP2312B зависимости квантовой эффективности фотокатода от длины волны, зарядовый спектр однофотонных импульсов и спектр времен пролета фотоэлектронов при однофотонной засветке

фото катода фотоумножителя (jitter). Основные результаты исследований параметров фотоумножителей XR2312B:

- усиление $G \sim 2 \times 10^6$ достигается при напряжениях питания < 1800 В;
- квантовая эффективность фото катода на длине волны 410 нм $> 23\%$;
- отношение пик/долина однофотозлектронного спектра > 2 ;
- разброс времени пролет фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фото катода не превышает 3 нс (jitter FWHM);
- вероятность появления послеимпульсов на один фотоэлектрон $< 5\%$;
- скорость счета импульсов темнового тока при 20°C < 3 кГц;
- линейность анодного тока > 100 мА.

Полученные результаты исследований подтверждают обоснованность выбора фотоумножителя XR2312B для системы мюонного вето.

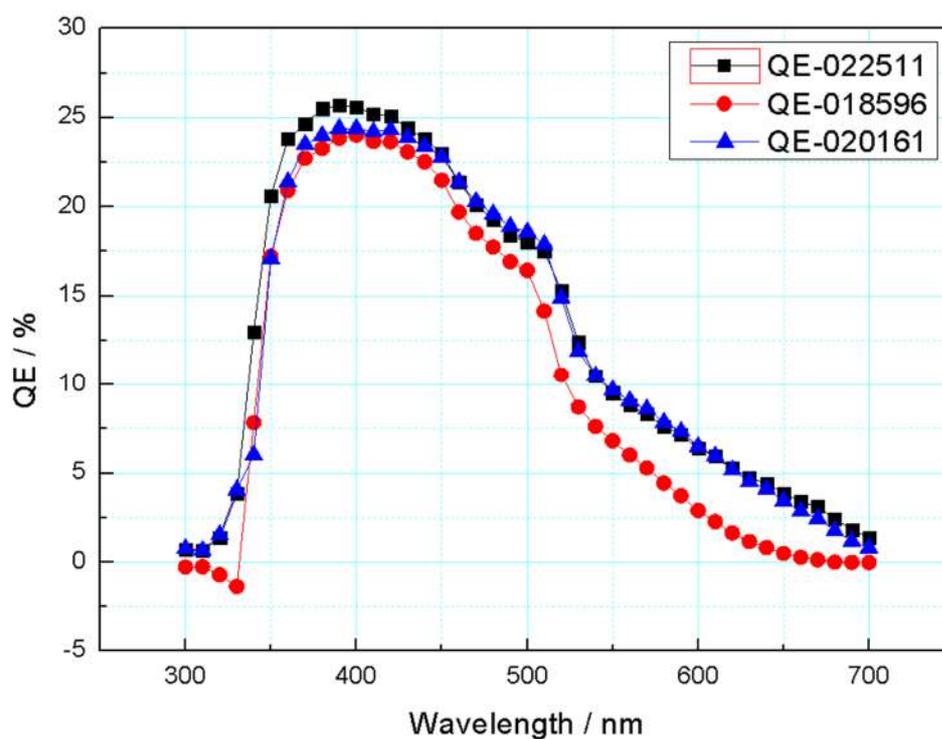


Рисунок 8 – Зависимость квантовой эффективности фото катода фотоумножителей XR2312B от длины волны света

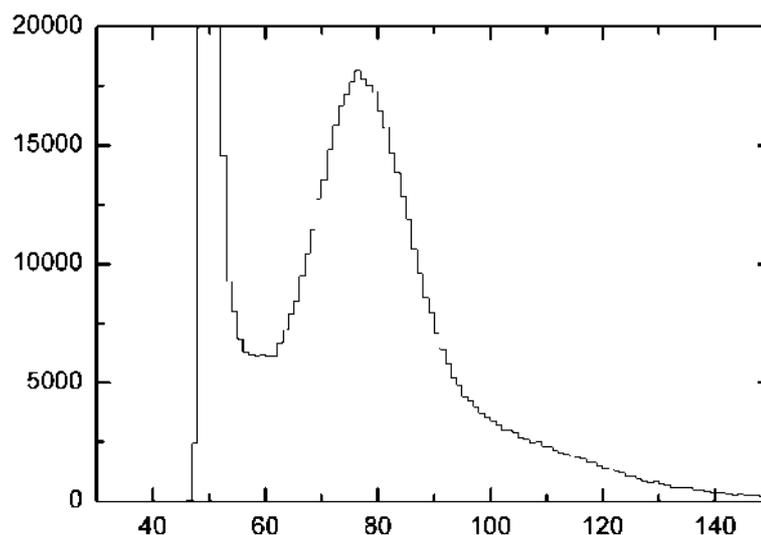


Рисунок 9 – Зарядовый спектр однофотозлектронных импульсов фотоумножителя XP2312B

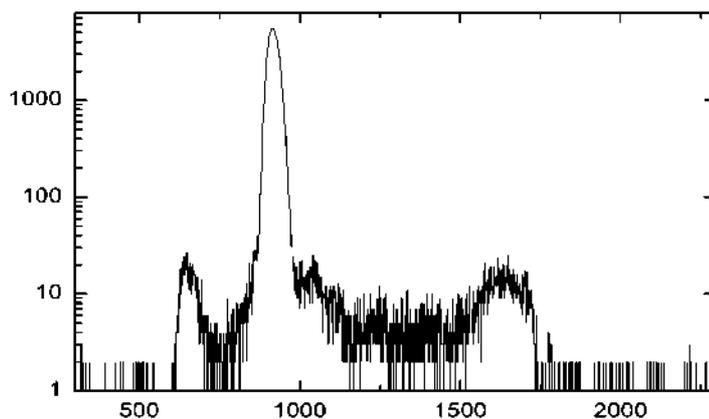


Рисунок 10 – Спектр времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода фотоумножителя XP2312B

Начаты работы по разработке новых компактных пластиковых сцинтилляционных детекторов со считыванием сигнала с помощью кремниевых фотоумножителей и спектросмещающих волокон. При этом, основным требованием к сцинтилляционным детекторам является высокая эффективность регистрации мюонов. Ведутся работы по выбору типа кремниевого фотоумножителя с различными размерами чувствительных поверхностей: $6 \times 6 \text{ мм}^2$, $5 \times 5 \text{ мм}^2$, $3 \times 3 \text{ мм}^2$ производства Hamamatsu, SensL, KETEK, FBK и

др., а также по выбору типа пластикового скинтиллятора (полученного методом экструзии или традиционными методами) и по выбору типа спектросмещающего волокна.

2.3. Разработка программного обеспечения эксперимента BabyIAXO

В 2020 году в рамках совместных работ по соглашению об академическом сотрудничестве между МФТИ и ИЯИ РАН в рамках коллаборации BabyIAXO была проведена разработка схемы системы сбора данных в эксперименте и созданы прототипы отдельных элементов этой системы.

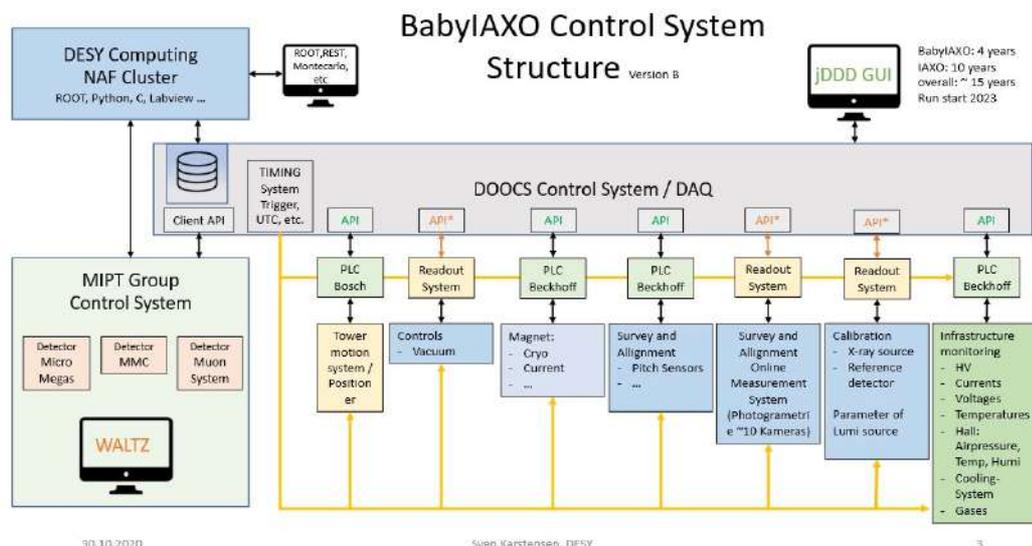


Рисунок 11 – Общий вид системы сбора данных IAXO

На рисунке 11 показаны подсистемы эксперимента и способы их подключения к основной шине сбора данных. Коллаборацией было решено использовать систему DOOCS для сбора данных и управлением основными техническими аспектами работы установки, такими как криогенная система, система движения телескопа и так далее. Эту систему сложно использовать для подключения система сбора данных и медленного контроля на детекторах в силу того, что эти системы постоянно меняются и требуют более гибких инструментов. Для этого совместно со специалистами из HZG-DESY была разработана концепция сервисной архитектуры для создания легковесных серверов устройств, удобных для применения в физике частиц и конкретно для детекторов IAXO. Схема этой системы изображена на рисунке 12. Суть работы состоит в том, что система организует обмен сообщениями между разными частями установки. В отличие от принятого в большинстве SCADA систем общения один на один, здесь используется общая распределенная шина данных. Еще одним отличием разработанной системы является использование открытого текстового формата JSON вместо специальных бинарных протоколов передачи данных. Использование текстового формата незначительно

ухудшает производительность работы системы, но существенно упрощает разработку и поддержку программного кода. Прототипы элементов системы обмена сообщениями на разных языках доступны в репозитории [1].

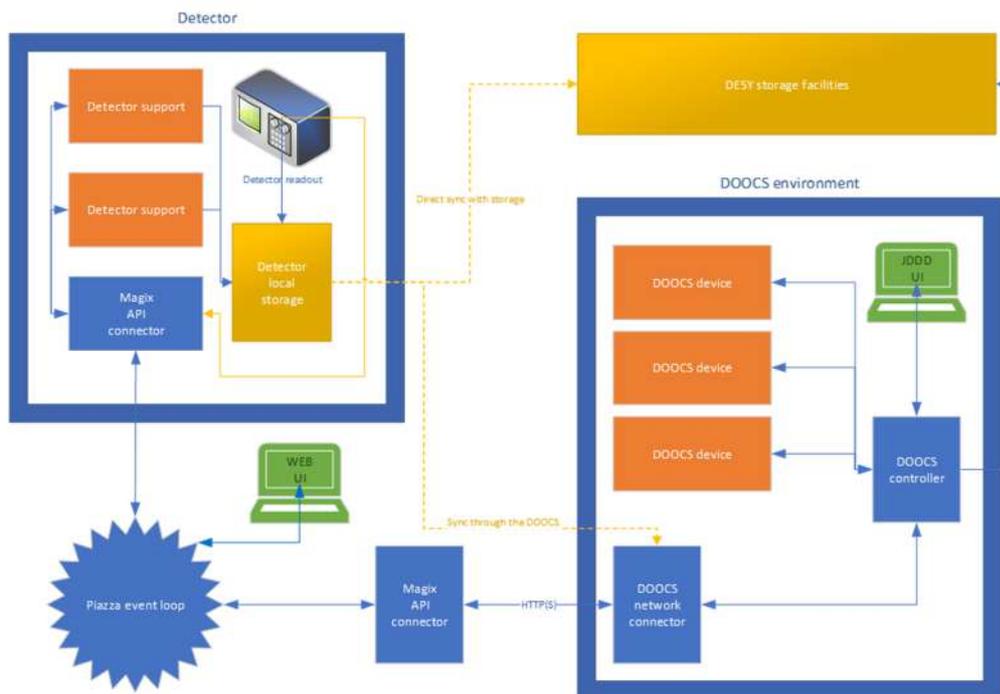


Рисунок 12 – Схема обмена сообщений с внешними устройствами

Совместно с лабораторией методов ядерно-физических экспериментов МФТИ был также разработан прототип платформы для создания серверов устройств, то есть программных элементов, напрямую взаимодействующих с оборудованием. Прототип написан с использованием технологии Kotlin-multiplatform, что позволяет обеспечить работу сразу тремя платформами: JVM, browser и native compilation, с использованием одного и того же кода. Код прототипа доступен по ссылке [2]. На рисунке 13 показана схема работы отдельного сервиса устройства. В нем описывается набор свойств (properties) устройств, которые обеспечивают синхронизацию логического (в программе), физического (на устройстве) и глобального состояния параметров устройств и данных.

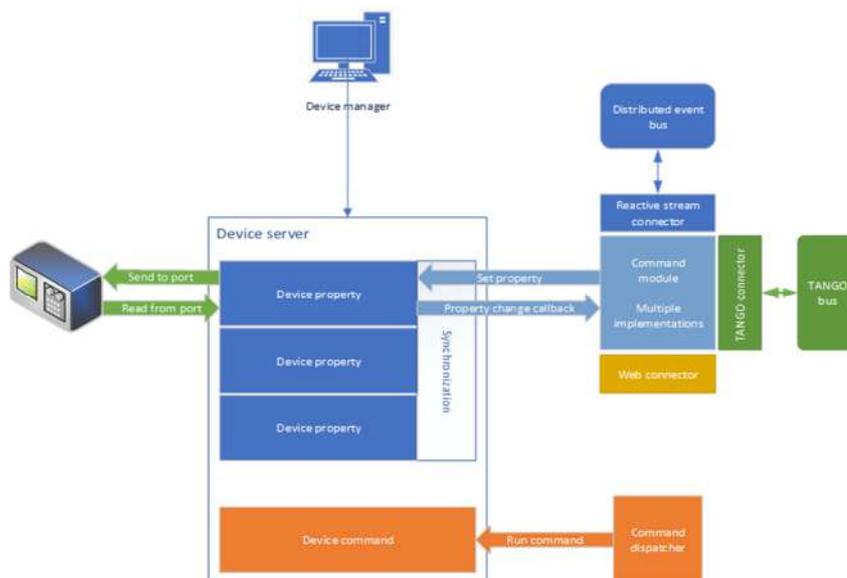


Рисунок 13 – Схема потоков данных для внешних устройств

В рамках проекта было сделано два доклада на собраниях коллаборации IAXO:

1. Alexander Nozik, Timur Hamitov, 11th IAXO Collaboration Meeting, Preliminary Slow Control system design, CERN
2. Alexander Nozik, 12th IAXO Collaboration Meeting, Confluence, Mattermost and Software coordination, online

3. Непертурбативные нарушающие барионное число процессы на будущих коллайдерах

3.1. Теоретические исследования

На предыдущем этапе работ в задаче изучения непертурбативных нарушающих барионное число процессов на будущих коллайдерах численно была найдена экспонента подавления таких процессов вплоть до энергий порядка $4E_{\text{sph}}$, где E_{sph} – энергия электрослабого сфалерона, т.е. высота потенциального барьера, разделяющего топологически неэквивалентные вакуумы. Численные результаты показывают, что экспонента подавления падает с ростом энергии (т.е. вероятность процесса растет), но при высоких энергиях это падение замедляется. В 2020 году велась работа по проверке гипотезы о том, что экспонента подавления при некоторой конечной энергии выходит на константу и остается постоянной при более высоких энергиях. Такое поведение было обнаружено для ряда непертурбативных процессов в более простых моделях (рождение солитонов и распад ложного вакуума в двумерных теориях скалярного поля) и было связано с существованием определенных решений классических уравнений поля – так называемых инстантонов действительного времени. Такие решения, если они существуют, находятся в области высоких энергий, где сильна зависимость численных результатов от параметров решетки и для их поиска необходимо ее увеличение. Именно таким методом удавалось численно продемонстрировать существование инстантонов действительного времени для процесса распада ложного вакуума в двумерной модели скалярного поля. Для уменьшения времени численного нахождения решения при таких частых пространственно-временных решетках, которые нужны для нахождения экспоненты подавления, программа нахождения квазиклассических решений была переписана для работы на графических процессорах (GPU). С использованием этой программы были проведены расчеты экспоненты подавления при очень мелких решетках на больших энергиях. Предварительно, проанализированные численные результаты указывают на отсутствие существования инстантонов действительного времени и отсутствие предельной энергии, выше которой экспонента подавления остается постоянной.

Кроме того, было показано, что результаты для вероятности процессов с нарушением барионного числа в столкновениях частиц, полученные в рамках Стандартной модели, могут применяться для расчетов вероятностей подобных процессов в моделях с расширенным калибровочным сектором. Был изучен вариант с расширенной электрослабой калибровочной группой $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$ и некоторым набором скалярных полей приводящих к спонтанному нарушению электрослабой симметрии. Было

показало, что при иерархии, в которой калибровочная константа одной неабелевой подгруппы много больше, чем другой, в лидирующем порядке по меньшей калибровочной константе вероятность непertурбативных процессов с нарушением барионного числа будет определяться той же экспонентой подавления, что и для Стандартной модели, которая будет подавлена большей константой связи. Тем самым сечения процессов с нарушением барионного числа в таких моделях потенциально могут быть наблюдаемо большие, что представляет большой интерес для будущих суперколлайдеров.

3.2. Разработка предложения эксперимента NIBEAM/NNBAR на ESS

В 2020 году ИЯИ РАН принимал активное участие в подготовке эксперимента NIBEAM/NNBAR на ускорительном комплексе European Spallation Source (ESS) и разработке концепции поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций (нарушение барионного числа $B = 2$) и процессов с исчезновением нейтронов (нарушение барионного числа $B = 1$). Непосредственным и важным вкладом явилось участие в моделировании ключевого элемента эксперимента – углеродного детектора антинейтронов, образовавшихся в результате нейтрон-антинейтронных осцилляций. Так, с использованием модели аннигиляции медленных антинейтронов на ядре углерода, учитывающей внутриядерные потенциалы и “off-shell” эффект было определено распределение конечных наблюдаемых продуктов аннигиляции (мезонов и фотонов) в двумерном пространстве Total momentum vs. Invariant Mass (рисунок 14). Сгенерировано 10^5 событий, с использованием которых ведется моделирование и проектирование углеродного детектора для эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций международной коллаборацией NNbar на ESS.

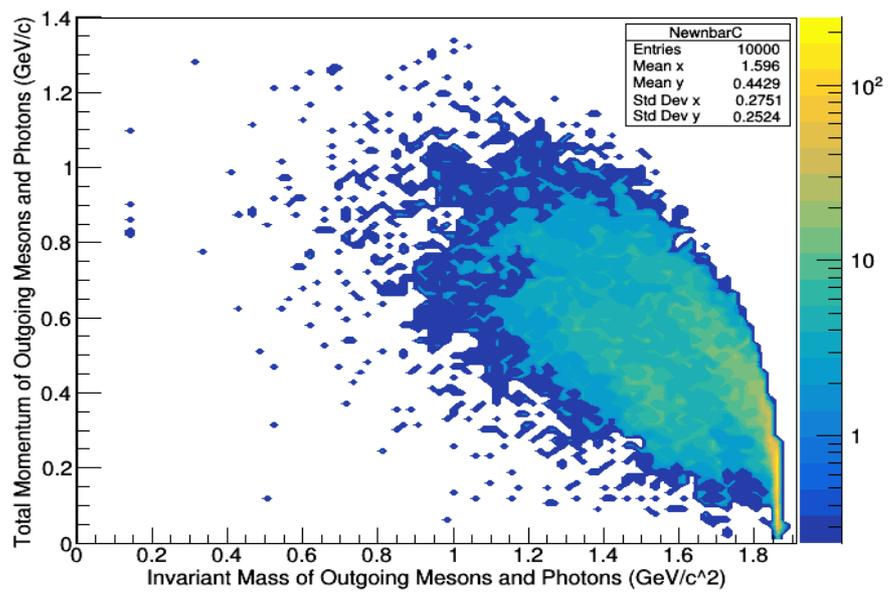


Рисунок 14 – Конечное двухмерное распределение мезонов и фотонов, вылетевших из ядра углерода после аннигиляции медленных антинейтронов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

1. Задача «Исследование спектров быстрых радиовсплесков»

Построена теория распространения мощного радиоизлучения в космической плазме с учетом эффектов сцинтилляций и возможного присутствия дифракционного линзирования. Теория применена для изучения наблюдаемых спектров быстрых радиовсплесков. Открыта новая необычная периодическая структура в спектре быстрого повторяющегося радиовсплеска FRB 121102. Интересно, что такая структура может возникать при гравитационном линзировании излучения FRB на реликтовой черной дыре с массой на 4 порядка меньшей Солнечной. Существование черных дыр такой малой массы означало бы новую физику, объясняющую темную материю во Вселенной. Исследованы процессы взрывного параметрического рождения фотонов в аксионных Бозе-звездах. При определенных значениях параметров модели параметрический резонанс в коллапсирующих звездах может обладать такими же энергетическими и временными характеристиками, что и наблюдаемые в настоящее время быстрые радиовсплески. Найдены параметры модели и характеристики Бозе-звезды при которых вспышки повторяются.

2. Задача «Разработка концепции международной аксионной обсерватории нового поколения IAXO»

Разработаны концепции экспериментов BabyIAXO и IAXO-D0. Созданы специализированные измерительные стенды для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей и сцинтилляционных пластин для системы мюонного вето установок IAXO-D0 и BabyIAXO. Показана, что эффективность регистрации мюонов космических лучей разработанными сцинтилляционными детекторами составляет 99,97%. Разработана и создана система мюонного вето установок IAXO-D0 и BabyIAXO. Разработана схема системы сбора данных в эксперименте и созданы прототипы отдельных элементов этой системы.

3. Задача «Непертурбативные нарушающие барионное число процессы на будущих коллайдерах»

Показано, что сечения процессов с нарушением барионного числа в моделях с расширенным калибровочным сектором потенциально могут быть наблюдаемо большими, что представляет большой интерес для будущих коллайдеров.

Сотрудники ИЯИ РАН приняли участие в разработке новой концепции поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций (нарушение барионного числа $B = 2$) и процессов с

исчезновением нейтронов (нарушение барионного числа $B = 1$) в планирующемся эксперименте NIBEAM/NNBAR на ускорительном комплексе European Spallation Source (ESS). Выполнено моделирование ключевого элемента эксперимента – углеродного детектора антинейтронов, образовавшихся в результате нейтрон-антинейтронных осцилляций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. I. Khokhriakov, H. Mond, and A. Nozik, Waltz-Controls: A general purpose web application that provides the interface between SCADA(s) system and the scientific users who define and calibrate their experiments [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://github.com/orgs/waltz-controls/people> – Загл. с экрана.
2. A. Nozik and P. Klimai, Controls.kt: Data acquisition framework based on DataForge [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://github.com/mipt-npm/controls.kt> – Загл. с экрана.

ПУБЛИКАЦИИ

1. D.G. Levkov. Radio-emission of axion stars / D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev // Phys. Rev. D – 2020. – 102, №2. – 023501.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.023501>.