



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–19

**Эксперименты по Регистрации Аксионов (ЭРА)
(проект предложения эксперимента)**

Протвино 2023

Аннотация

Гочелашвили К.С. и др. Эксперименты по Регистрации Аксионов (ЭРА) (проект предложения эксперимента): Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–19. – Протвино, 2023. – 42 с., 18 рис., 1 табл., библиогр.: 66.

Эксперимент ЭРА нацелен на поиск предполагаемых частиц тёмной материи (аксионов, аксиноподобных, скрытых фотонов) и на проверку предсказаний различных моделей расширения Стандартной Модели (скрытые фотоны, минизаряженные частицы). В ИФВЭ предлагается создать установку типа LSW ((light-shining-through-walls) "свет сквозь стены"), в которой для рождения этих частиц будут использоваться: мощный источник лазерного излучения и сильные магнитные поля в 5.2Тл., созданные сверхпроводящими диполями (СП). А для регистрации одиночных фотонов будет использоваться сверхпроводящий фотодетектор (SSPD). Данная установка станет единственной в России. Планируется увеличить чувствительность измерений по поиску аксионов, примерно, в ~ 20 раз, по сравнению с проведёнными измерениями. На установке ЭРА возможно измерение двойного лучепреломления в вакууме, а также, поиск аксионов, скрытых фотонов, минизаряженных частиц не только в вакууме, но и в материальной среде. Возможности проверок выводов различных моделей для расширения Стандартной Модели усиливают уникальность проекта.

Abstract

Gochelashvili K.S. et al. Experiments on Registration of Axions (ERA) (draft experimental proposal): NRC «Kurchatov Institute» - IHEP Preprint 2023–19. – Protvino, 2023. – p. 42, fig. 18, tables 1, refs.: 66.

The ERA experiment aims to search for dark matter particles (axions, axion-like, hidden photons) and to test the predictions of various expansion models of the Standard Model (hidden photons, minicharged particles). IHEP proposes to create an LSW (light-shining-through-walls) type installation, in which to produce these particles the following will be used: a powerful source of laser radiation and strong magnetic fields of 5.2 T created by superconducting dipoles. And a superconducting photodetector (SSPD) will be used to detect single photons. This installation will be the only one in Russia. It is planned to increase the sensitivity of measurements for searching for axions by approximately ~ 20 times compared to the measurements performed. The ERA installation makes it possible to measure birefringence in a vacuum, as well as search for axions, hidden photons, and minicharged particles not only in a vacuum, but also in a material environment.

Список участников сотрудничества ЭРА

В.Н. Горячев, В.Н. Евдокимов, С.В. Ерин, М.Ю. Костин, А.В. Попов

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино

К.С. Гочелашвили, С.Л. Семёнов, А.А. Сысолятин, М.Ф. Фёдоров

Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН

ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Г.Н. Гольцман, А.В. Семёнов

ФГБОУ ВО «МПУ», Москва

А.В. Дивочий

ООО "Сверхпроводниковые технологии" - СКОНТЕЛ, Москва

Введение

Целью настоящего предложения является регистрация псевдоскалярных и скалярных бозонов (аксионов и аксионоподобных частиц), рождённых мощным пучком фотонов в сильном магнитном поле в вакууме, изучение рождения псевдоскалярных и скалярных бозонов в сильнодиспергирующих волокнах, а также изучение рождения скрытых фотонов.

Существование аксионов или похожих на них частиц позволило бы решить много проблем на стыке физики частиц и астрофизики. Аксион представляет собой нейтральную псевдоскалярную частицу, предсказанную независимо С. Вайнбергом [1] и Ф. Вильчеком [2] на основании нарушения симметрии Печчеи и Куинн [3]. Введение такой частицы, является наиболее правдоподобным решением проблемы сохранения CP-симметрии [4] в сильном взаимодействии. Аксионы и аксионоподобные частицы (ALP) предсказываются в струнных теориях [5], в суперсимметричных теориях [6], и в Стандартной Модели (СМ) [7]. Где ALP (axion like particles) могут быть как скалярными, так и псевдоскалярными, и предполагается, что они связаны с СМ посредством различных механизмов, приводя, в частности, к двухфотонной вершине. Интерес к поиску аксионов обусловлен также тем, что такие гипотетические легкие частицы с нулевым спином рассматриваются, как один из наиболее серьезных кандидатов в темную материю [8]. При определенных параметрах аксионы могут являться кандидатами в частицы холодной темной материи, образованной на ранних этапах эволюции Вселенной в результате фазового перехода. Стандартный аксион, возникающий в электрослабом взаимодействии, т. е. с массой в диапазоне кэВ, был исключен после обширных поисков в коллайдерных экспериментах [9]. Это привело к гипотезе существования «почти» невидимого аксиона, т. е. частицы с чрезвычайно маленькой массой и слабой связью с другими частицами. В недавней работе [10] с помощью вычислений на решёточных моделях показано, что масса такого аксиона может находиться в диапазоне (40- 180) мкэВ. Если масса аксиона действительно будет находиться в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-2} эВ, то эта частица может быть ответственна за ТМ нашей Вселенной и является одним из редких не суперсимметричных кандидатов. Это привело к гипотезе существования «почти» невидимого аксиона, т. е. частицы с чрезвычайно маленькой массой и слабой массой и связью с другими частицами. Астрофизические и лабораторные данные дают ограничения на массу аксиона не более 10^{-3} эВ, а космологические соображения — не менее $10^{-4} - 10^{-6}$ эВ. В недавней работе [10] с

помощью вычислений на решёточных моделях показано, что масса такого аксиона может находиться в диапазоне (40 – 180) мкэВ. Если масса аксиона действительно будет находиться в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-2} эВ, то эта частица может быть ответственна за ТМ нашей Вселенной и является одним из редких не суперсимметричных кандидатов. Схематический обзор пределов чувствительности проведённых и планируемых экспериментов, астрофизических наблюдений, теоретических предсказаний, приведен на рисунке 1.

Область существования QCD аксиона, предсказываемая моделями KSVZ, DFSZ выделена светло серым цветом. Эта область (как видно на рисунке) достигнута в эксперименте ADMX (в области масс аксиона 2.6 – 4.2 мкэВ) для обеих моделей. К сожалению, аксиона в этой области не обнаружено. Для сравнения, показаны результаты, полученные в экспериментах типа LSW: ALPS-I (область Laboratory, максимальная чувствительность $g_{a\gamma} \approx 7 \cdot 10^{-8}$ ГэВ $^{-1}$) и самые строгие в настоящее время ограничения на ALP в области Astrophysics, полученные с гелиоскопа CAST [12]. Последний результат, опубликованный в 2017 году в журнале Nature Physics, устанавливает верхний предел силы аксионно-фотонной связи $g_{a\gamma} < 0.66 \times 10^{-10}$ ГэВ $^{-1}$ с (95% CL) для всех аксионов с массой ниже 0.02 эВ.

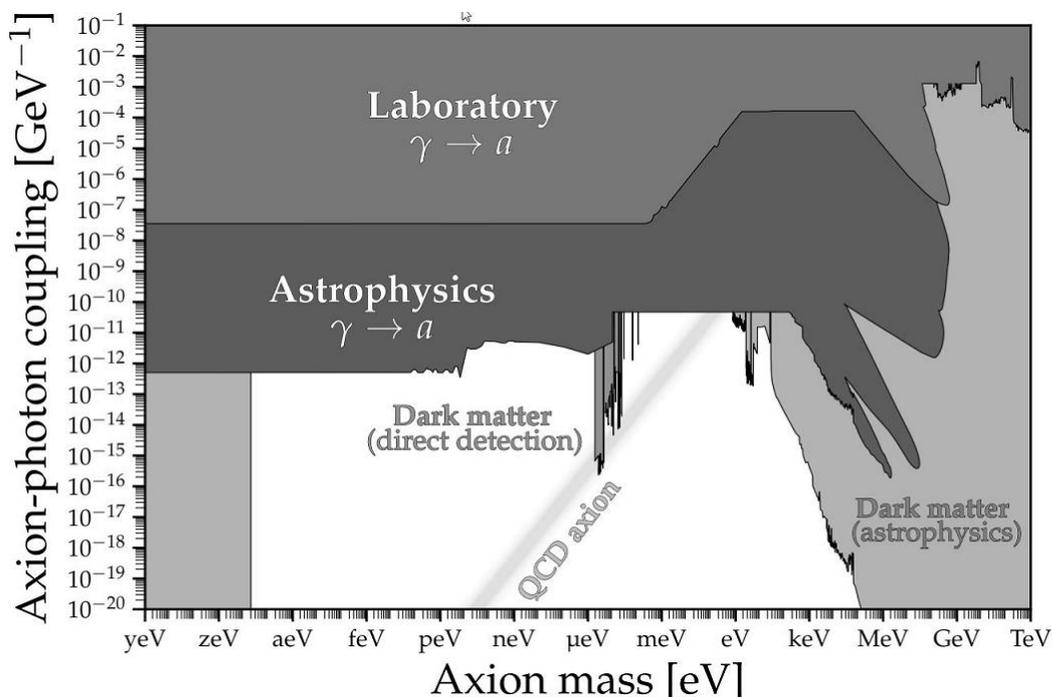


Рис. 1. Результаты экспериментов, астрофизических наблюдений, теоретических предсказаний [11].

Планируемый эксперимент ALPS-II с максимальной чувствительностью $g_{ag} \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ должен превзойти ограничения, полученные экспериментом CAST в области более низких масс. И, частично, охватит область параметров от, которых зависят ответы на фундаментальные вопросы физики элементарных частиц. Наиболее важные ограничения для рассматриваемого нами пространства параметров возникают из-за охлаждения белых карликов (WD – cooling), которое измеряется путем наблюдения за изменениями функции светимости белого карлика.

Из-за очень малой эффективности взаимодействия все попытки наблюдения фотон-парафотонной и фотон-аксионной конверсии в вакууме не увенчались успехом. Тем не менее, исследования по обнаружению этих частиц в магнитном вакууме продолжаются. Для генерации аксионов используется конверсия интенсивного лазерного излучения в аксионы в сильном статическом магнитном поле с индукцией \vec{B}_0 , перпендикулярной к направлению распространения лазерного луча. Обнаружение аксионов, образованных таким образом, осуществляется с использованием обратного процесса - реконверсии аксионов в фотоны в сильном статическом магнитном поле (рис. 2).

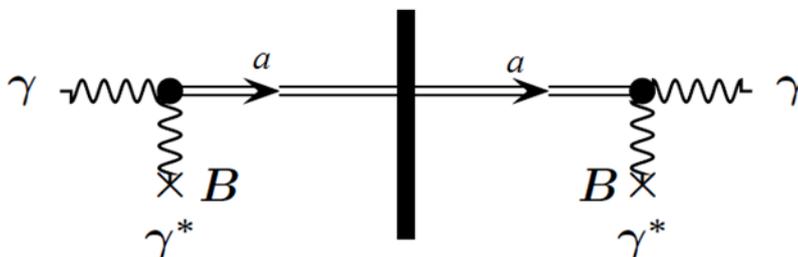


Рис. 2. Процесс регенерации фотонов в магнитном поле.

Существует возможность повышения эффективности процессов фотон-аксионной и аксион-фотонной конверсии в лабораторных условиях, за счёт перехода от режима спонтанной конверсии к стимулированному конверсионному излучению, аналогичного процессу вынужденного комбинационного рассеяния в материальных средах [13,14,15]. В таких средах эффективность фотон-фотонных параметрических процессов существенно выше, чем в вакууме. Известно, что при проникновении фотонов из вакуума в диэлектрические среды образуются гибридные (фотон-фононные) частицы, называемые поляритонами. Соответствен-

но, при проникновении вакуумного аксиона или парафотона, в среде могут возникнуть гибридные вакуумные аксионные-фононные, парафотонные-фононные скалярные или псевдоскалярные возбуждения. Экспериментальные результаты по рождению аксионов в материальной среде отсутствуют.

В настоящее время два различных эксперимента OSQAR в ЦЕРНе, а именно OSQAR-LSW4 и OSQAR-VMB5, ищут в основном ALPS посредством изучения оптических свойств квантового вакуума, пронизанного сильным магнитным полем. OSQAR-LSW является дополнением к CAST6 [16], гелиоскопу CERN, ищущему аксион и ALP, которые могут быть произведены солнцем. В 2017 году OSQAR был расширен с помощью OSQAR-CHASE7 [17] для поиска хамелеонов, особого типа частиц, масса которых, как постулируется, зависит от плотности окружающей среды для объяснения темной энергии.

Как видно из вышеизложенного, предложение эксперимента объединяет две разных опции, направленные на поиск аксионов, аксионоподобных частиц и скрытых фотонов. Все эти опции будут кратко представлены в следующих параграфах с кратким обзором их состояния и перспектив. Во всех опциях планируется использовать сильное внешнее магнитное поле, которое можно будет создать, используя сверхпроводящие диполи, изготовленные для УНК (ИФВЭ), и обеспечивающие магнитное поле ~ 5 Тл на длине 6 метров.

Наше предложение заключается в том, чтобы провести поиск аксиона и аксионоподобных частиц в области масс от 0.4 до 3 мэВ и получить оценку константы взаимодействия $g_{A\gamma\gamma}$ на уровне $\sim 10^{-9}(\text{ГэВ}^{-1})$. Мы также сможем оценить константу взаимодействия фотона со скрытым фотоном, а также вероятность возникновения мини-заряженной частицы. Полученные значения будут находиться на уровне значений, полученных в других экспериментах.

Помимо физической программы, также имеется значительная методологическая часть:

- 1.) Отработка и получение опыта работы с установкой, схема которой представлена на рис. 6. Целью является изучение возможности увеличения количества СП диполей УНК в установке до 24 шт. (которые имеются в ИФВЭ) (в дальнейшем) для увеличения чувствительности эксперимента по $g_{A\gamma\gamma}$ до $\sim 10^{-12}(\text{ГэВ}^{-1})$ и сдвинуть массу аксиона к более низким значениям.

2.) Отработка и получение опыта работы с установкой, схема которой представлена на рис. 6, где вместо вакуума фотоны будут распространяться в нелинейном оптическом волокне с модулируемой дисперсией.

Технология получения таких световодов была разработана в ИОФРАН [64]. Экспериментально установлено, что в керровских волноводных средах с осциллирующей дисперсией имеет место эффект мультипликативной модуляционной неустойчивости (ММИ). В таких световодах наблюдается параметрический резонанс, позволяющий контролировать фазовый синхронизм в четырехволновых нелинейных процессах в широких пределах [65]. Этот эффект позволяет также генерировать многофотонные связанные ЭПР состояния (Эйнштейн-Подольский-Розен, quantum entangled), имеющих важное значение для развития высокочувствительных методов квантовой метрологии [66]. Данная схема рассматривается впервые.

3.) Улучшение характеристик фотодетекторов на основе сверхпроводящих плёнок. И разработка на их основе систем регистрации отдельных фотонов с собственным шумом меньше 10^{-4} Гц. Сравнение двух схем установки позволит отобрать наиболее эффективный вариант регистрации аксионов.

1. Физическая программа эксперимента

В последние годы стало ясно, что аксион может быть лишь одним примером многих различных «слабо взаимодействующих суб-эВ частиц» (WISP). Сегодня реализуются три основные стратегии поиска [48]:

1. Так называемые "галоскопы", которые работают исходя из предположения, что аксионы, ALP или HP составляют большую часть гало темной материи, также присутствующей в нашей Солнечной системе. Если это так, то значительное количество аксионов, ALP или HP темной материи присутствует в современных детекторах галоскопов, что позволяет обнаруживать WISP с помощью процесса преобразования WISP-фотонов.

2. "Гелиоскопы", которые используют поток частиц WISP. Этот поток должен доходить до нас от Солнца. Наиболее ярким примером такой установки является «Cern Axion Solar». Телескоп» (CAST).

3. Установки LSW (light-shining-through-walls) "свет сквозь стены", стали незаменимым инструментом в поиске WISP. Несмотря на то, что эксперименты типа LSW, такие как ALPS-I, OSQAR сегодня менее чувствительны, чем галоскопы и гелиоскопы (рис. 3), их характери-

стики будут улучшены в новых экспериментах, таких как: ALPS-II, JURA, ЭРА. Необходимо подчеркнуть, что такие эксперименты единственные, полностью независимые от модели.

Можно различать WISP с теми же квантовыми числами, что и у фотонов (с учетом кинетического смешивания с фотонами), и псевдоскалярные или скалярные бозоны, которые требуют двухфотонного взаимодействия.

Предлагаемый эксперимент ЭРА (типа LSW) будет чувствителен к диапазонам параметров разных WISP, в частности, к «аксионоподобным частицам» (ALP), скрытым фотонам (HP), минизаряженным частицам (MCP).

Виртуальное или реальное рождение WISP может привести к таким экспериментальным наблюдениям, как эффект поляризации или внезапным появлением света в идеально защищенной среде.

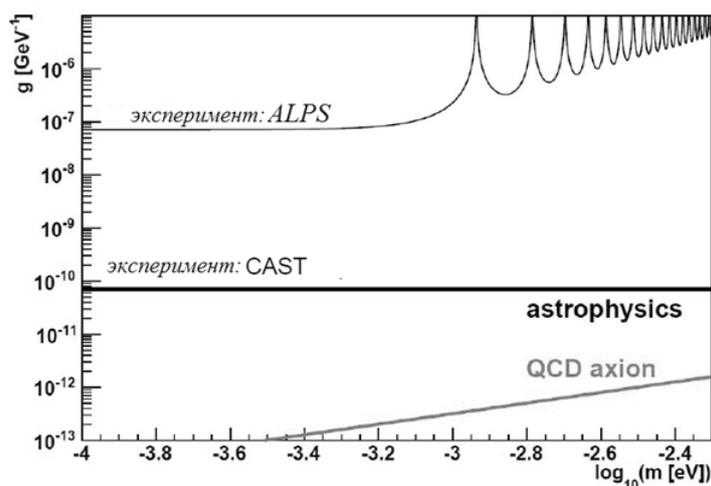


Рис. 3. Достигнутые оценки значений константы взаимодействия $g_{\gamma\gamma}$ в зависимости от массы аксиона в экспериментах ALPS и CAST и теоретические предсказания для QCD аксиона.

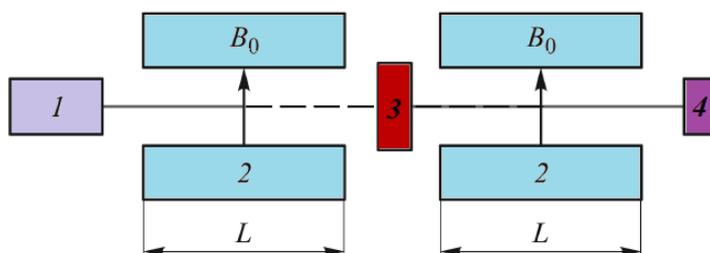


Рис. 4. Принципиальная схема эксперимента типа LSW, где: 1 - лазер; 2 - магнит; 3 - стенка; 4 – фотодетектор; L- длина магнита.

Принципиальная схема эксперимента изображена на рис. 4. Обычно в таком эксперименте один из двух фотонов обеспечивается лазерным лучом, а другой – сильным магнитным полем. Аксионоподобные частицы будут проникать через барьер, в конечном итоге, вновь превращаясь в фотоны внутри второго магнита. Затем регенерированные фотоны обнаруживаются с помощью фотонного детектора вне магнита. У такой схемы эксперимента есть два преимущества: они (преимущества) особенно гибки в том смысле, что они сохраняют полный доступ и контроль над областями рождения и регенерации WISP. Например, контроль и изменение поляризации лазера, а также напряженности магнитного поля обеспечивает доступ к большему количеству видов частиц. Кроме того, настройки LSW чувствительны независимо от того, являются ли WISP только частью Темной Материи или не являются Темной Материей.

1.1 Регистрация аксионов и аксионоподобных частиц

Как было отмечено ранее, легкие частицы возникают, если существует глобальная непрерывная симметрии, которая спонтанно нарушается в вакууме – ярким примером является аксион [1]. Этот бозон является псевдоскалярной частицей, возникающей в результате нарушения U(1)-симметрии Печчи – Куинна [3], введенной для объяснения отсутствия CP-нарушение в сильных взаимодействиях. Связь аксионоподобного псевдоскаляра с двумя фотонами имеет следующий вид:

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B} \quad (1)$$

где $g_{a\gamma\gamma}$ – постоянная константа связи между аксионоподобным псевдоскаляром и двумя фотонами, a – поле, соответствующее частице, $F_{\mu\nu}$ ($\tilde{F}^{\mu\nu}$) представляет собой (дуальный) тензор напряженности электромагнитного поля, а \vec{E} и \vec{B} – электрическое и магнитное поле, соответственно. В случае связи скалярной частицы с двумя фотонами взаимодействие имеет вид:

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} = \frac{1}{2} g_{a\gamma\gamma} a (\vec{E}^2 - \vec{B}^2) \quad (2)$$

В большинстве аксионных моделей, связанных с квантовой хромодинамикой (КХД), связь (1, 2) возникает из-за смешивания аксиона с π -мезоном и связана с массой аксиона m_a соотношением:

$$g_{a\gamma\gamma} = 10^{-12} GeV^{-1} \left[\frac{m_a}{1 neV} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Оба эффективных взаимодействия приводят к сходным наблюдаемым последствиям. Например, при наличии внешнего магнитного поля фотон частоты ω может превращаться в легкую частицу с нулевым спином малой массы $m_a < \omega$, и наоборот. Заметное различие между псевдоскаляром и скаляром заключается в том, что при взаимодействии с магнитным полем, в случае псевдоскаляра, компонент поляризации фотона параллелен магнитному полю, тогда как во втором случае это перпендикулярная составляющая. Использование этого механизма является основной идеей экспериментов по регенерации фотонов (иногда называемых «светом сквозь стены») или LSW [18-21], см. рис. 4. Часть фотонов при этом превратится в (псевдо) скаляры. Этот (псевдо)скалярный пучок свободно проходит через стену или другое препятствие, не поглощаясь. Другое магнитное поле, расположенное по другую сторону стены, трансформирует некоторые из этих (псевдо)скаляров в фотоны. Пилотный эксперимент такого типа был проведен в Брукхейвене с использованием двух прототипов магнитов для ускорителя встречных пучков [22]. Из отсутствия наблюдения регенерации фотонов коллаборация Брукхейвен-Фермилаб-Рочестер-Триест (BFRT) исключила значения связи $g < 6.7 \times 10^{-7} \text{ ГэВ}^{-1}$, для $m_a \leq 10^{-3} \text{ эВ}$ на уровне достоверности 95%. Такой результат был достигнут с двумя магнитами, имеющими параметры: длина-4.4 м, магнитная индукция – 3.7 Тл (каждый). На рисунке 5 представлены результаты, полученные в более поздних экспериментах:

1. ALPS-I [23–25]. Была установлена верхняя граница аксионно- фотонной связи $g_a < 6.5 \times 10^{-8} \text{ ГэВ}^{-1}$.
2. LIPSS [26] в Jefferson Lab, использовались импульсный лазер на свободных электронах и два идентичных магнита (1,77 Тл, 1 м) и достигли предела, аналогичного пределу BMV.
3. GammeV [27, 28] в Fermilab, В этом эксперименте использовался одиночный диполь Тэватрон (6 м, 5 Тл) с подвижным оптическим барьером посередине, разделяющим магнит на зону образования и регенерации аксионов. Была установлена верхняя граница аксионно-фотонной связи $g_a < 3.5 \times 10^{-7} \text{ ГэВ}^{-1}$.
4. OSQAR [29, 30] в CERN. Верхний предел $g_a < 3.5 \times 10^{-8} \text{ ГэВ}^{-1}$ при 95% CL для $m_a \leq 0.3 \text{ мэВ}$ был достигнут в эксперименте OSQAR с использованием аргонового лазера

непрерывного действия, излучающего на длине волны 532 нм с мощностью 18.5 Вт и двух дипольных магнитов LHC (9.5 Тл, 14.3 м).

5. BMV [31]. БМВ сотрудничество использовало короткий импульсный магнит с сильным полем (0.37 м, 12.3 Тл) и импульсные лазерные поля ($\omega = 1.17$ эВ, 1.5 кДж/импульс, 4.8 нс, срабатывание каждые 2 часа), достигнув предела $g_a < 1.25 \times 10^{-6}$ ГэВ $^{-1}$.

Штриховые и пунктирные линии показывают границы ALP-индуцированного дихроизма и двойного лучепреломления из эксперимента PVLAS [32]. Эти пределы действительны только для масс аксионов ниже примерно одного мэВ, при этом полная чувствительность эксперимента BMV простирается до $m_a \approx 2$ мэВ из-за меньшей длины магнита; см. рис. 5. Другие эксперименты находятся на разных стадиях подготовки.

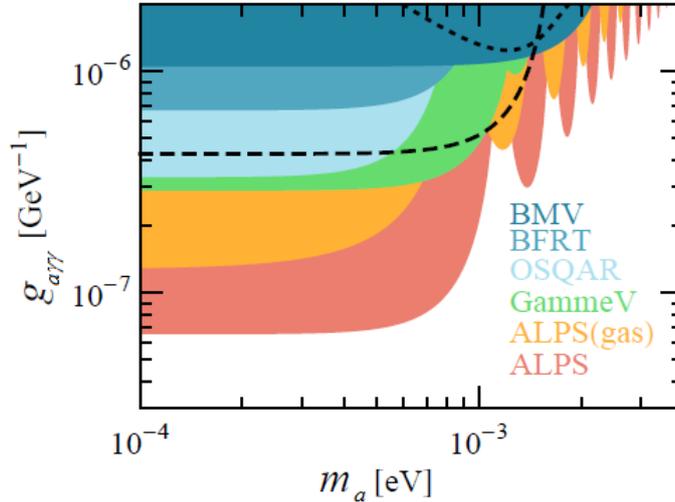


Рис. 5. Пределы чувствительности для псевдоскалярных бозонов из экспериментов [33].

Рассмотрим вероятность регенерации фотонов в магнитном поле диполей. В этом случае, вероятность $P_{\gamma \rightarrow a \rightarrow \gamma}$ того, что исходный фотон с энергией ω преобразуется в области магнитного поля размером B_1 и длиной l_1 перед стеной, в аксионоподобную частицу, и затем снова превращается в области магнитного поля размером B_2 и длиной l_2 на другой стороне стены, в фотон будет:

$$P_{\gamma \rightarrow a \rightarrow \gamma} = P_{\gamma \rightarrow a}(B_1, l_1, q_1) \cdot P_{a \rightarrow \gamma}(B_2, l_2, q_2) \quad (4)$$

где: $P_{\gamma \rightarrow a} \equiv P_{a \rightarrow \gamma}$ вероятность того, что фотон конвертирует в аксионоподобную частицу,

$$P_{\gamma \rightarrow a}(B, l, q) = \frac{1}{4} \frac{\omega}{k_a} (g_{a\gamma} B l)^2 |F(ql)|^2 \quad (5)$$

где: $k_a = \sqrt{\omega^2 - m_a^2}$, а - $q = n\omega - \sqrt{\omega^2 - m_a^2} \approx \omega(n - 1) + \frac{m_a^2}{2\omega}$ передача импульса магнитному полю, т.е. модуль разности импульсов фотона и аксионоподобной частицей, n - показатель преломления среды.

$$F(ql) = \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}ql\right)}{\frac{1}{2}ql} \right]^2 \quad (6)$$

Форм-фактор $F(ql)$, сводится к единице при малой передаче импульса $ql \ll 1$. Для больших ql эффекты некогерентности возникают между (псевдо)скаляром и фотоном, форм-фактор становится намного меньше единицы, и сильно снижает вероятность конверсии. Оценим вероятность возникновения аксионов N_a в результате конверсии N_γ квантов (фотонов) возбуждающего излучения, предполагая при этом, что

$$F(0) = 1 \text{ и } \frac{\omega}{k_a} \approx 1: g_{a\gamma} = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}, B=5 \text{ Тл}, l=2 \text{ м.}$$

$$P_{\gamma \rightarrow a} = \frac{N_a}{N_\gamma} = \frac{1}{4} \frac{\omega}{k_a} (g_{a\gamma} B l)^2 \approx 10^{-18} \quad (7)$$

Как видно из числовой оценки, вероятность образования аксиона очень мала. Поэтому для увеличения вероятности образования аксиона используют не только увеличение мощности лазера, но и оптические резонаторы на основе интерферометра Фабри – Перо. Если добротность резонатора равна $Q \approx 10^4$, то вероятность процесса возрастает следующим образом:

$$P_{\gamma \rightarrow a} = \frac{N_a}{N_\gamma} = \frac{1}{4} \frac{Q}{\pi} \frac{\omega}{k_a} (g_{a\gamma} B l)^2 \quad (8)$$

Теоретически показано [34], что второй резонатор, установленный в конверсионном магните и согласованный с первым, дает дальнейшее увеличение общей скорости обнаружения. Этот подход, называемый резонансной регенерацией, никогда не был реализован на практике, но его планируется реализовать в эксперименте ALPS-II [35] и в нашем эксперименте.

Установка второго резонатора Фабри-Перо (резонатор регенерации фотонов) расположенного симметрично первому, как показано в правой части рис. 6. позволит повысить чувствительность эксперимента.

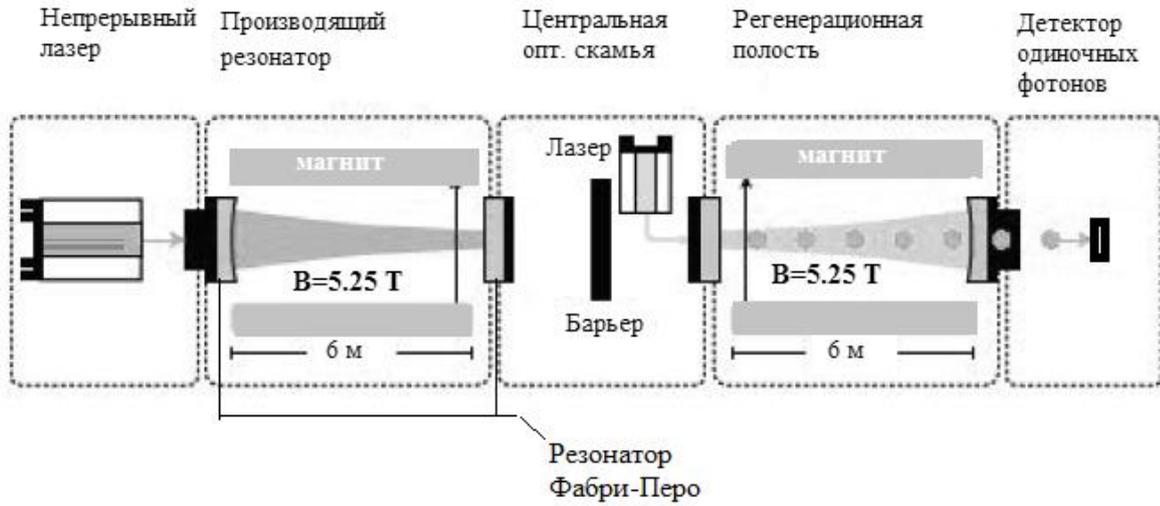


Рис. 6. Резонансная регенерация фотонов с использованием согласованных резонаторов Фабри-Перо [34, 35].

Полагая, что $P_{\gamma \rightarrow a} = P_{a \rightarrow \gamma}$, количество образованных фотонов на входе фотодетектора будет:

$$N_s = \frac{1}{16} \eta^2 \beta_g \beta_r \frac{\langle P_l \rangle}{\omega} P_{\gamma \rightarrow a}^2 \tau \quad (9)$$

где: $\langle P_l \rangle$ – усреднённая мощность лазера, ω – частота лазерного излучения, τ – время измерения, $P_{\gamma \rightarrow a}$ – вероятность рождения аксиона, η – параметр, который описывает связь поля ALP с собственной модой регенеративной полости и равен $\sim 90\%$, $\beta_g \beta_r$ – параметры мощности генерирующей и регенеративной полости соответственно.

Предположительные параметры предлагаемой установки:

$L=6\text{ м}$ (длина СП диполя), $B=5.25\text{ Тл}$ (величина магнитной индукции в диполе), $P=20\text{ Вт}$ (мощность лазера), $\lambda=1550\text{ нм}$ (длина волны лазера), эффективности детектора $\varepsilon \sim 0.6$, шум детектора $\sim 10^{-4}\text{ Гц}$, $\eta = 0.90$, $\beta_g = 10^4$, $\beta_r = 10^2$.

Оценённый верхний предел зависимости константы связи при доверительном уровне 95% и $\text{SNR}=1$ в зависимости от массы аксиона для времени набора 24 часа, представлен на рис. 7.

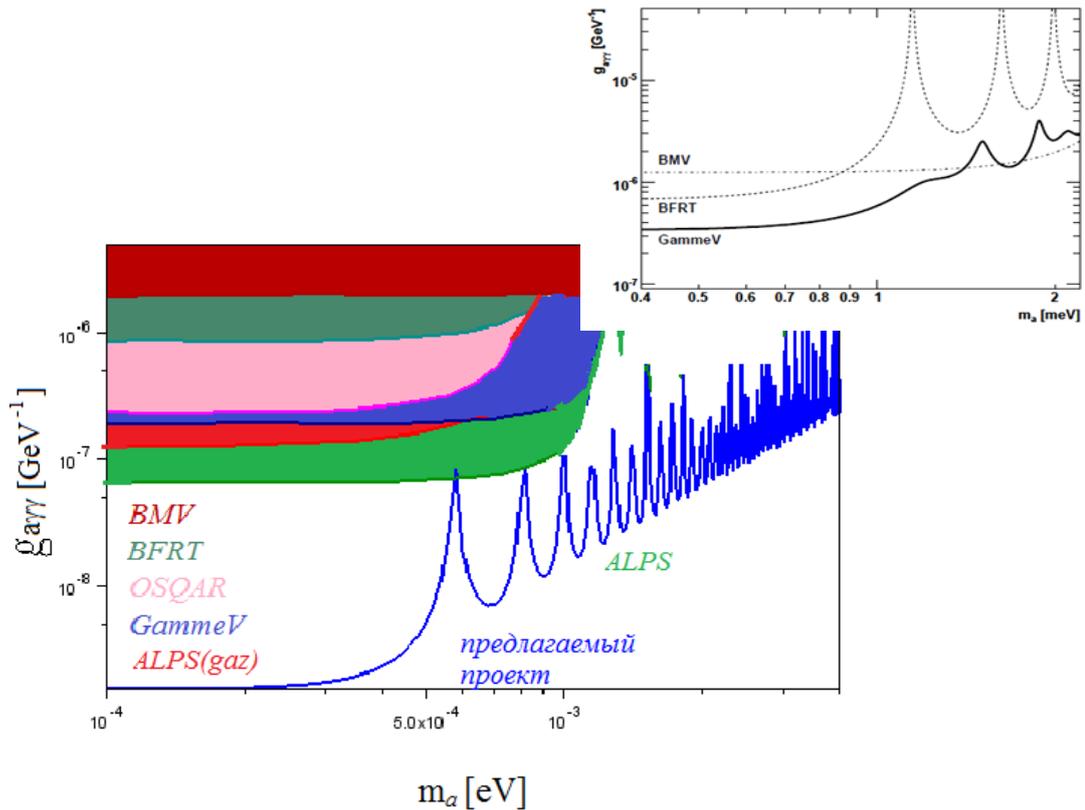


Рис. 7. Зависимость константы связи проведённых экспериментов и предлагаемого эксперимента от массы аксиона в вакууме.

Для ожидаемого верхнего предела константы связи, количество зарегистрированных фотонов за одни сутки экспозиции составит:

$$N \approx 3 \text{ фот./сут. при массе аксиона } m_a \geq 4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ при фоне } 10^4 \text{ Гц.}$$

ALP вполне могут находиться в тех областях, где чувствительность снижена. Чтобы восполнить эти пробелы в чувствительности, можно варьировать передачу импульса q между лазерным фотоном и аксионоподобной частицей (5) путем введения газа в оба резонатора. Для этого можно ввести газ (гелий с давлением от 10^{-3} до 0.5 мбар) в область образования аксионов и область регенерации фотонов. Изменение давления в сторону более высоких значений (до 0.5 мбар) сместит положение спайков (рис. 7) и, таким образом, приведет к плавному охвату диапазона масс ALP. Этот метод уже доказал свою эффективность в ALPS-I с использованием аргона [24].

1.2 Массивные фотоны скрытого сектора

Скрытые сектора, т. е. частицы, характеризующиеся очень слабым взаимодействием с обычным веществом, являются характерной чертой полевых и струнных дополнений Стандартной модели. Например, скрытый сектор является жизнеспособным инструментом для реализации нарушения суперсимметрии. Подобно фотонам, являющимися калибровочными бозонами электромагнитной калибровочной группы $U(1)$, скрытые фотоны (НР)- являются калибровочными бозонами внешней локальной абелевой $U(1)$ калибровочной симметрии в скрытом секторе. Скрытые фотоны соединяются с видимым сектором посредством кинетического смешивания [9,35]. Мотивация поиска темных фотонов исходит также из нескольких наблюдаемых аномалий в астрофизике (например, в космических лучах), которые могут быть связаны с тем, что темная материя взаимодействует с темным фотоном. Возможно, наиболее интересное применение темных фотонов связано с объяснением несоответствия между измеренным и рассчитанным аномальным магнитным моментом мюона [9]. Это несоответствие обычно рассматривается, как постоянный намек на физику за пределами Стандартной модели, и его следует учитывать в общих новых физических моделях. Помимо воздействия на электромагнетизм, посредством кинетического перемешивания и возможных взаимодействий с частицами темной материи, темные фотоны (если они массивны) также могут сами играть роль кандидата в темную материю.

В итоге, отметим две ключевые особенности скрытых фотонов, а именно то, что они имеют ненулевую массу, и лишь слабо взаимодействуют с частицами СМ через кинетическое смешивание с фотонами. Из этого вытекают три важных следствия:

1. Их ненулевая масса означает, что скрытые фотоны могут иметь такие характеристики, чтобы вести себя, как холодная темная материя [26, 37].
2. Их кинетическое смешение с фотонами означает, что скрытые фотоны могут слабо возбуждать электромагнитные системы.
3. Их слабая связь с частицами Стандартной модели и макроскопическая длина волны Комптона позволяют скрытым фотонам иметь большую глубину проникновения в проводники и сверхпроводники.

Чувствительность при поиске скрытых фотонов отличается от случая фотон-ALP-колебаний тем, что рождение скрытых фотонов происходит без внешнего магнитного поля (обе частицы имеют одинаковый спин). Если НР имеют массу, то кинетическое смешивание

ведет себя как массовое смешивание, и, таким образом, возникают фотонно-НР осцилляции (по аналогии с осцилляциями между различными ароматами нейтрино) [9,35,37]. Это приводит к исчезновению и регенерации фотонов по мере их распространения в вакууме. Поэтому для открытия и изучения НР удобнее всего использовать установки типа LSW. Осцилляции фотонов в НР в LSW-экспериментах рассмотрены в [38], а вероятность осцилляции имеет вид:

$$P_{\gamma' \rightarrow \gamma} = 4\chi^2 \frac{m_{\gamma'}^4}{M_{\gamma'}^4} \sin^2 \left(\frac{M_{\gamma'}^2}{4\omega} L \right) \quad (10)$$

где : $M_{\gamma'}^2 = (m_{\gamma'}^2 + 2\omega^2(n - 1))$, n - коэффициент преломления среды, $m_{\gamma'}$ — масса скрытого фотона, χ - параметр смешивания (константа взаимодействия фотон-НР). Вероятность, что фотоны проникнут через непрозрачный барьер будет выглядеть:

$$P_{\gamma} = P_{\gamma \rightarrow \gamma'} P_{\gamma' \rightarrow \gamma} = 16\chi^4 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2}{4\omega} L \right) \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2}{4\omega} L \right) \quad (11)$$

Как видно из формулы (10), вероятность осцилляции не зависит от магнитного поля. Используя экспериментальную установку с выключенным магнитным полем (рис. 6), можно будет измерить оценку границы для параметра смешивания. Например, тестирование скрытых фотонов с $\chi \leq 10^{-8}$ для $10^{-6} \leq m_{\gamma'} \leq 10^{-2}$ означало бы вхождение в область, где скрытые фотоны могли бы сигнализировать о свойствах дополнительных измерений, предсказанных теорией струн [10]. Для вышеприведённых параметров установки, получим оценку верхней границы чувствительности в зависимости от массы скрытого фотона (рис. 8Б).

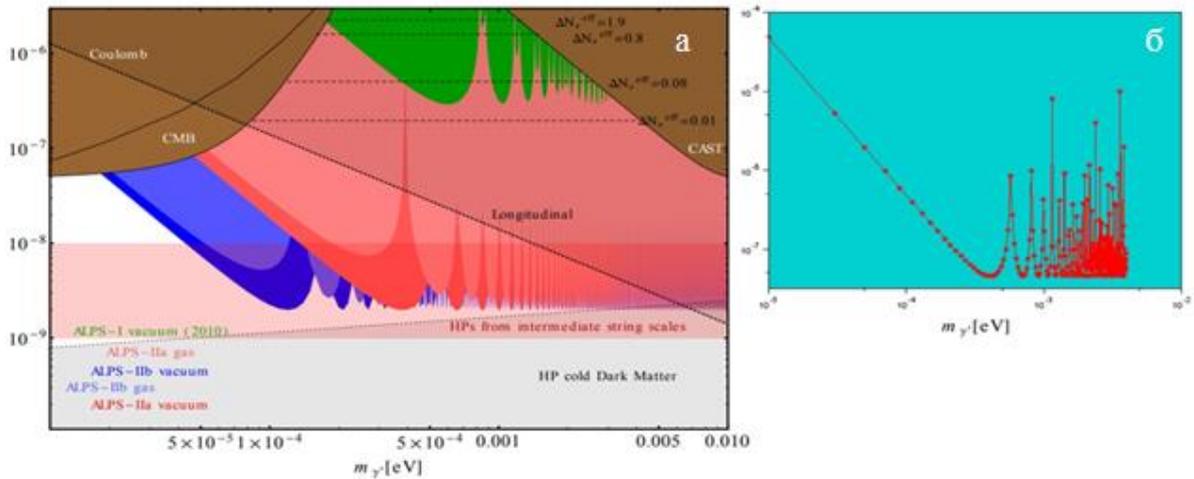


Рис. 8. Исключенная область пространства параметров χ - m_γ . На рисунке а) заштрихованные области указывают на планируемые достижения параметров χ, m_γ в строящихся установках ALPS-IIa с регенеративной полостью и ALPS-IIb с вакуумным и газовым наполнением. Самая верхняя кривая колебаний обозначает результаты, полученные ALPS-I в вакуумном случае. Ниже, обозначены параметры, которые будут достигнуты для ALPS-IIa и ALPS-IIb с полостью регенерации и газом/без газа. Нижняя область, заштрихованная серым цветом, указывает, где HP могут быть холодной тёмной материей. На рис. б) представлены результаты, которые могут быть получены в эксперименте ЭРА.

Для вышеприведённых параметров установки, получим оценку верхней границы чувствительности в зависимости от массы скрытого фотона (рис. 8Б).

Количество зарегистрированных скрытых фотонов за сутки (24 часа) зависит от массы самих фотонов и меняется от $N=0.06$ фот./сутки при массе фотона 10^4 эВ до $N=800$ фот./сут. при массе скрытого фотона $m_\gamma \geq 4 \cdot 10^4$ эВ при фоне 10^4 Гц.

1.3 Фотоны скрытого сектора и минизаряженные частицы

В результате кинетического перемешивания могут возникнуть минизаряженные частицы (MCP). Такие частицы обычно возникают из-за кинетического смешивания в теориях, содержащих, по крайней мере, два калибровочных фактора U (1). Поиск этих частиц имеет большое значение, т.к. поиски MCP предоставляют альтернативное окно наблюдения для скрытых секторов и, в частности, могут дать представление, если скрытый фотон окажется

безмассовым и, следовательно, не может быть отслежен напрямую. Существует ряд экспериментальных и наблюдательных ограничений относительного электрического заряда ϵ и массы m_ϵ гипотетических миллиардных частиц, полученных из лабораторных экспериментов, астрофизики и космологии [39]. В субэлектронной области масс, $m_\epsilon < m_e$, наилучшие лабораторные оценки миллиардных фермионов $\epsilon < 10^{-4}$, получены в результате поиска невидимого распада ортопозитрония [40] и сравнения измерений лэмбовского сдвига [41] с предсказаниями квантовой электродинамики (КЭД) (см. рис. 9). Более сильные, хотя и более зависящие от модели ограничения возникают из астрофизических и космологических соображений. Например, ограничения звездной эволюции [42] дают ограничение $\epsilon < 10^{-14}$ при $m_\epsilon < 10$ кэВ, тогда, как нуклеосинтез Большого взрыва приводит к ограничению $\epsilon < 10^{-9}$ при $m_\epsilon < 1$ МэВ. Инициированное фотоном образование пар миллиардных фермионов во внешнем магнитном поле будет проявляться, как вакуумный магнитный дихроизм. Лазерные поляризационные эксперименты по поиску этого эффекта дают в диапазоне масс ниже 0.1 эВ гораздо более сильные ограничения на миллиардные фермионы, чем ранее рассмотренные лабораторные исследования. Такие эксперименты с поляризацией дают дополнительную информацию (см. рис. 10). Они особенно чувствительны к моделям чистых минизаряженных частиц, для которых в экспериментах с LSW не ожидается никакого сигнала. Однако в парафотонных моделях их чувствительность ограничена. Эксперименты LSW также идеально подходят для различения различных моделей, таких как модели с участием ALP или парафотонов. Одним из важных признаков, позволяющего отличить ALP от парафотонов, является зависимость от поляризации лазерного луча. Для ALP ожидается сигнал только для одной поляризации, параллельной или перпендикулярной магнитному полю. В парафотонных моделях ожидается сигнал LSW для обеих поляризаций. Кроме того, зависимость скорости регенерации от экспериментальных параметров, таких как частота лазера и магнитное поле, различна для разных моделей и, таким образом, обеспечивает дополнительные решающие критерии различия. В заключение, регенерация фотонов из скрытого сектора позволяет протестировать большой класс естественных расширений стандартной модели.

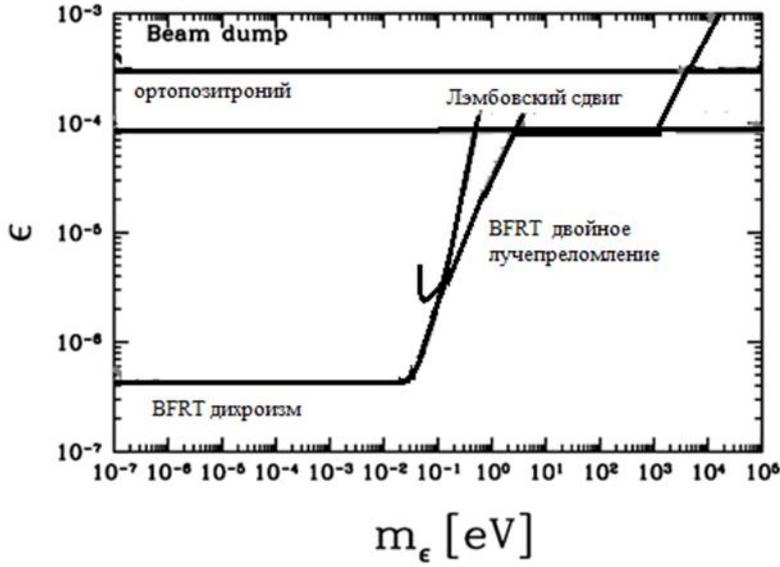


Рис. 9. Лабораторные верхние пределы относительного электрического заряда $\epsilon = Q\epsilon/e$ гипотетического миллизарядного фермиона с массой m_ϵ .

Если фотон скрытого сектора не имеет массы, колебания фотон \leftrightarrow фотон (скрытого сектора) не могут происходить через массовый член. Однако из-за наличия дополнительных (легких) минизаряженных скрытых фермионов это может происходить по петлевой диаграмме, как показано на рис. 10.

Вероятность перехода через расстояние z равна [7]:

$$P_{\gamma \rightarrow \gamma'}^i(z) = P_{\gamma' \rightarrow \gamma}^i(z) = \chi^2 \left[1 + \exp\left(-\frac{k_i}{\chi^2} z\right) - 2 \exp\left(-\frac{k_i}{2\chi^2} z\right) \cos\left(\frac{\Delta n_i \omega z}{\chi^2}\right) \right] \quad (12)$$

$i = \parallel, \perp$ обозначает поляризацию, параллельную или перпендикулярную магнитному полю.

Тогда полная вероятность прохождения света через стену:

$$P_{\text{trans}} = (N_{\text{pass}} + 1)/2 \cdot P_{\gamma \rightarrow \gamma'}(\ell 1) \cdot P_{\gamma' \rightarrow \gamma}(\ell 2) \quad (13)$$

где: $\ell 1, \ell 2$ – длина пути фотонов до барьера и от барьера до детектора в магнитном поле, в нашем случае они равны n_i – вакуумный магнитный показатель преломления и k_i – коэффициент поглощения в замагниченном вакууме, N_{pass} – количество отражений фотонов в оптическом резонаторе.



Рис. 10. На диаграмме показано, как минизаряженные частицы служат промежуточным звеном при переходах между фотонами и фотонами скрытого сектора γ' .

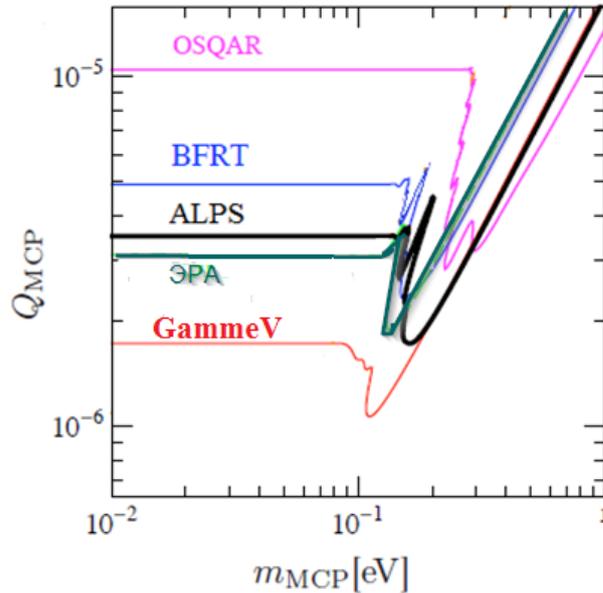


Рис. 11. Верхние пределы поиска MCP. Предполагаемый предел исключения (95% CL) для ЭРА.

В качестве сравнения, с нашим предложением (ЭРА), на рис. 11 показаны пределы исключения, полученные в предыдущих экспериментах LSW: BFRT [22], GammeV [27], и ALPS [23].

2. Экспериментальная установка

Мы предлагаем эксперимент по регистрации аксионов, с использованием сверхпроводящих диполей (СП), изготовленных для проекта УНК (ИФВЭ). Повышенная чувствительность ЭРА (на порядок по сравнению с ALPS-I) будет обусловлена увеличенной магнитной длиной, оптическими резонаторами на сторонах рождения и регенерации, и внедрением квантовых детекторов для обнаружения фотонов.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6. Как отмечалось выше, в нашем эксперименте будет использоваться схема с резонансной регенерацией фотонов. Для этого будут применяться согласованные резонаторы Фабри-Перо. Причём, будет, выполняться важное условие, чтобы аксионная волна и, следовательно, мода Фабри-Перо в резонаторе регенерации фотонов следовала моде гипотетически беспрепятственной фотонной волны из моды Фабри-Перо в магните генерации аксионов. Между лазером и резонатором находится инжекционная оптика (ИО), которая управляет согласованием мод лазера с резонатором, накладывает боковые радиочастотные полосы для синхронизации отражения лазера с резонатором и обеспечивает изоляцию лазера. Детекторам фотонов также предшествует согласующая и направляющая луч оптика. Планировка только схематична. Скорее всего, ИО будет располагаться между диполями.

Согласованные резонаторы Фабри-Перо, встроенные в производящий аксионы и регенерирующий магниты, улучшат чувствительность аксионно-фотонной связи, $g_{a\gamma\gamma}$, на квадратный корень из $F^{1/2}$ (параметр, характеризующий добротность резонатора). Этот коэффициент может быть равен $10^{(2,5-3)}$.

2.1 СП- диполи УНК и криогенная система

Магнитное поле будет создаваться сверхпроводящими диполями с "холодным железом", разработанными для протонного ускорителя УНК (рис. 12) [43-45]. При номинальном токе 5600А, магнитная индукция поля диполя достигает значения 5.25 Тл при общей магнитной длине 6 м. Устройство находится на стенде магнитных испытаний (рис. 13). В результате отдельных испытаний (при стабильной работе диполя) достигалась величина магнитной индукции $B \approx 6.2$ Тл. Использование этого факта, позволит слегка увеличить чувствительность нашего эксперимента. Внутренний диаметр ионпровода в диполе составляет 80 мм. Для обеспечения необходимых условий при измерениях в ионпровод будет вставлен тёплый антикриостат, представляющий собой хорошо изолированную "инструментальную" титановую трубу (ИТ), поддерживаемую при температуре окружающей среды с помощью низковольтного коаксиального нагревательного провода.

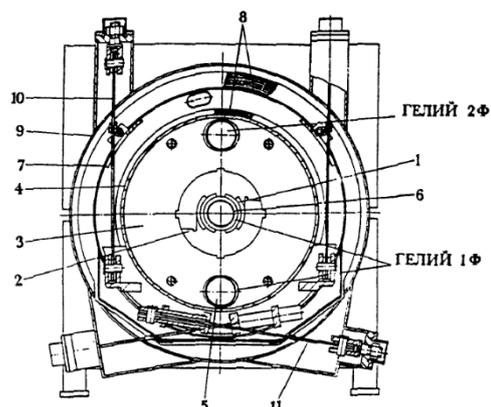


Рис. 12. Общий вид полномасштабного СП диполя УНК (ИФВЭ) [43]. Поперечное сечение модели СП-диполя с холодным магнитным экраном в сборе с прокачным криостатом [44]: 1– обмотка; 2 – бандаж; 3 – магнитный экран; 4 – оболочка гелиевого объема; 5 – труба двухфазного гелия; 6 – ионопровод; 7 – азотный экран; 8 – супер-изоляция; 9 – вакуумный кожух; 10 – подвески; 11 – растяжки.



Рис. 13 Стенд для испытания СП магнитов УНК (ИФВЭ) [43].

ИТ представляет собой тонкостенную трубу с внешним диаметром 70 мм и толщиной стенки 1 мм, в которую будут, также, вставлены оптическое окно и диэлектрическое зеркало для создания оптического резонатора. Во время работы она будет обдуваться сухим азотом при температуре 300°К для стабилизации внутренней температуры, так как магнит будет охлаждён до температуры 4.2° К. Основная цель ИТ – обеспечить внутри необходимое низкое давление, в которой лазерный луч проходит по пути к зеркалу и обратно. Для этого нужно выполнить несколько требований:

1. Пространство между ионопроводом и ИТ должно обеспечивать достаточно большой поток азота. Необходимо поддерживать температуру стенок внутренней измерительной трубы везде на несколько градусов выше комнатной температуры и отводить тепло, выделяющееся в отражающее зеркало.
2. Давление газов внутри ИТ должно варьироваться от 1 мкбар до 10 мбар. Перед установкой, ИТ должна быть нагрета и вакуумированна, чтобы свести к минимуму загрязнения.
3. Другим важным граничным условием является механическая устойчивость и жёсткость ИТ, обеспечивающая высокую точность юстировки оптических элементов резонатора и ограничивая тепловые потери на теплопроводность.

Для эксплуатации диполей планируется использовать криогенную систему, разработанную в ИФВЭ для коллайдера УНК [45].

2.2 Вакуумная система

Рассмотрим вакуумную систему для оптических резонаторов эксперимента и изолирующую вакуумную системы для сверхпроводящих магнитных диполей. Три вакуумных сосуда, при комнатной температуре, содержат оптические элементы установки на концах диполей и посередине между диполями. Суммарная длина оптических резонаторов составит ≈ 12 метров. Вакуумная система будет оснащена ионными геттерными и титановыми сублимационными насосами, которые позволят получить очень низкое вакуумметрическое давление в оптических резонаторах $\sim 10^{-8}$ мбар. Для полости регенерации работа ионно-геттерных насосов проблематична, поскольку они являются потенциальным источником света от тлеющих разрядов в насосах. Поэтому они будут отключены во время измерений в поисках скрытых фотонов. Однако давление в трубе можно легко поддерживать на уровне около 10^{-8} мбар с помощью турбомолекулярных насосов.

В каждом сосуде оптические элементы опираются на оптический стол в трех точках. Опоры механически отделены от вакуумных сосудов мягкими сильфонами. Сосуды будут поддерживаться с пола чистых помещений. Фланцы на сосудах с электрическими вводами позволят подключать электрооптические элементы и датчики. А фланец в центральном сосуде позволит работать затвору с «светонепроницаемой стенкой».

Чтобы изменить диапазон чувствительности эксперимента к постоянной связи и к массе аксиноподобной частицы, необходимо изменить передачу импульса между лазерным

фотоном и аксионоподобной частицей. Это можно достичь путем изменения показателя преломления n в обеих ИТ. Величина передачи импульса $q = n\omega - \sqrt{\omega^2 - m_a^2}$, как можно видеть зависит от показателя преломления среды, в которой происходит образование и регенерация фотонов. Для изменения передачи импульса q давление гелия будет изменяться в диапазоне от 0.001 мбар до 0.5 мбар. Потери мощности излучения в оптических полостях из-за рассеяния Рэлея от атомов гелия будут очень малы ($2 \cdot 10^{-9}$ при 0.5 мбар), что не приведет к снижению мощности полостей. Дополнительная тепловая нагрузка на СП диполи из-за рассеянных фотонов незначительна и будет меньше 0,01 Вт.

2.3 Лазер и оптическая система

Основная цель оптической схемы установки ЭРА состоит в том, чтобы создать на одной стороне светового барьера (стены) электромагнитное поле от лазерного луча, как можно большей мощности, и обнаружить, возможно, регенерированное поле на другой стороне с очень высокой чувствительностью. Обе задачи можно решить, используя оптические резонаторы типа Фабри-Перо. На стороне перед стеной, производящий резонатор (ПР) ЭРА может увеличить оптическую мощность светового луча, направленного к стене, в 5000 раз по сравнению с мощностью инжектируемого лазера. Регенерационная полость (РП) за стеной увеличивает вероятность образования фотонов из аксионного поля [34] в 40000 раз. Для работы с полостями требуется использование лазера с непрерывным излучением.

2.3.1 Требования к оптической системе.

Для достижения вышеприведённых целей необходимо выполнение нескольких требований к оптической системе:

1. Два высокоточных оптических резонатора должны работать в пределах небольшой апертуры, обеспечиваемой двумя СП-диполями с идентичными оптическими осями. Обе полости должны быть резонансными для одной и той же частоты света.
2. Зеркала резонаторов необходимо контролировать, чтобы формировать устойчивые собственные моды, коллинеарные центральным осям магнитов. Лазерный луч должен быть согласован с этими модами пространственно, а также по своей частоте.
3. В то время как, управление лазером и ПР отработано в нескольких областях современной оптики [47], в управлении РП возникает проблема. Этот резонатор должен оставаться геометрически выровненным с ПР и сохранять резонанс для регенериро-

ванного света, без использования какого-либо управляющего света в пространственном и спектральном диапазоне приема детектора ЭРА.

2.3.2. Требования к конструкции и оптическим элементам

Основные ограничения для оптической конструкции определяются апертурой СП диполей, долговечностью и потерями имеющихся диэлектрических покрытий зеркал, а также возмущениями окружающей среды, вибраций, колебаниями зеркал в резонаторах. Лазерная установка, построенная на твердом оптическом столе внутри лазерного домика, позволит регулировать интенсивность и поляризацию луча. Из-за малой апертуры магнита и необходимости фокусировать луч на сенсоре детектора требуется малая ширина лазерного луча с очень хорошим коэффициентом качества луча M^2 . Как расходимость луча, так и минимальный размер пятна пропорциональны M^2 . Кроме этого, желательна управляемая линейная поляризация для различения скалярных и псевдоскалярных аксионоподобных частиц, а также необходимость проведения систематических тестов.

Планируется использовать одномодовую одночастотную лазерную систему мощностью 20 Вт, работающую на длине волны 1550 нм (Azurlight Systems). Конструкция усилителя мощности задающего генератора позволяет увеличить мощность задающего лазера мощностью 2 Вт до 20 Вт при сохранении стабильности частоты малошумящего задающего лазера [48]. Системы стабилизации мощности пучка, его управлением, контроля стабильности в обеих полостях будут аналогичны системе, предложенной в [49,50]. С помощью такой схемы можно будет стабилизировать мощный лазерный луч, чтобы он соответствовал собственной моде резонатора и поддерживал резонанс лазера и резонатора. Кроме того, эта система поможет сохранить оставшиеся пространственные и частотные флуктуации достаточно малыми, чтобы ограничить флуктуации нарастания мощности в резонаторе до уровня менее 5% (среднеквадратичное значение).

Оптические параметры ПР и РП рассчитаны на высокие коэффициенты накопления. Но, для снижения риска повреждения зеркал, максимальная интенсивность на зеркалах из поликарбоната будет снижена до уровня 500 кВт/см², что значительно ниже порога повреждения примерно в несколько раз. При таком уровне, зеркала эксплуатируются в течение длительного времени без деградации в экспериментах по поиску гравитационных волн. Зеркала РП не будут подвержены действию от слишком высоких интенсивностей, так что наращивание мощности в РП будет ограничиваться оптическими потерями. Если взять типичное

значение потерь - 8 фотонов на миллион на зеркале, и допустить такое же количество потерь на отсечение туда и обратно, то накопление мощности в резонаторе с согласованным импедансом составит 40000 раз. Коэффициенты усиления мощности в ПР и РП были выбраны, основываясь на приведенных выше аргументах. Собственная мода в РП должна быть расширением собственной моды ПР, чтобы соответствовать параметрам гауссова пучка регенерируемого поля.

Чтобы достичь уровня световой мощности ~ 100 кВт, движущегося пучка фотонов в направлении «стены», и повысить эффективность обнаружения регенерированных фотонов с помощью РК с накоплением мощности 40000, необходимо выполнить несколько требований:

1. Общий латеральный и угловой сдвиг луча, вносимый в пучок оптическими компонентами между двумя полостями на центральной макетной плате, должен быть меньше 1 мм и 10 мрад соответственно, поскольку любой сдвиг луча не виден частицам, пересекающим стены и, следовательно, воспроизводимый свет не будет соответствовать собственной моде РП.
2. Чтобы обеспечить параллельное выравнивание оптических резонаторов, центральные зеркала должны быть параллельны с точностью до 10 мрад.
3. Дрейф (например, вызванный температурным градиентом) компонентов на центральной плате должен быть достаточно мал, чтобы соответствовать требованиям по наведению, указанным в 1.
4. Диапазон исполнительного механизма различных контуров управления должен быть достаточно большим, чтобы компенсировать свободные размахи колебаний соответствующих степеней свободы.
5. Уменьшение возмущений контура управления должно быть достаточно большим, чтобы уменьшить отклонение полостей от их рабочих точек, чтобы можно было поддерживать коэффициент нарастания мощности на уровне, превышающем максимальное нарастание в 0.95 раза. Все требования могут быть удовлетворены с помощью современной оптики, электроники и производственных процессов. Все оптические элементы системы контроля, создания пучка, поддержание стабильности резонаторов и лазерных пучков будут размещены на трёх оптических столах.

2.3.3. Система стабилизации частоты лазерного излучения

Для регенерации фотонов с резонансным усилением необходимо, чтобы полости для генерации аксионов и регенерации фотонов находились в резонансе с лазерным полем, генерирующим аксионы. Принципиальная схема для достижения этих условий предложена в статье [46]. Частота лазера, который резонирует внутри полости генерации аксионов, будет стабилизирована на собственной частоте полости ПР с помощью метода модуляции/демодуляции, широко известного, как метод Паунда-Древера-Холла (ПДХ) [51]. Метод позволяет стабилизировать частоту света, излучаемого лазером, используя привязку к стабильному резонатору (ПР). Это обеспечивает средства для управления и уменьшения ширины линии лазера при условии, что оптический резонатор более стабилен, чем лазерный источник. Если доступен стабильный лазер, можно использовать метод ПДХ для стабилизации и/или измерения нестабильности в длине оптического резонатора.

2.3.4. Требования к помещениям установки

Установка оптических компонентов эксперимента должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Оптические компоненты снаружи и внутри вакуума должны быть защищены от частиц пыли в процессе монтажа и во время экспериментальных запусков. Оптические компоненты, особенно торцевые зеркала резонатора, наиболее чувствительны к загрязнению частицами пыли. Ухудшение отражательной способности торцевого зеркала, даже, на несколько частей на миллион приведет к недопустимому снижению производительности регенерационного резонатора.
2. Во время проведения эксперимента должны поддерживаться механически и термически стабильные условия. Допускаются лишь минимальные изменения положения оптических компонентов из-за ограниченного диапазона расширения держателей зеркал с пьезоэлектрическим приводом. Смещение торцевого зеркала более, чем на несколько миллиметров в направлении луча, не может быть компенсировано контуром обратной связи для стабилизации длины резонатора.
3. Для работы инфракрасного лазера (выходная мощность непрерывного излучения: 20 Вт при 1550 нм) необходимо создать и постоянно поддерживать безопасную рабочую среду, уделяя особое внимание этапу настройки эксперимента.

3. Система регистрации фотонов. Детектор.

Обнаружение возможных регенерированных фотонов на установке ЭРА очень сложно, в основном из-за их ожидаемой низкой энергии и низкой скорости. В связи с низкими скоростями наиболее важным требованием к детекторной системе установки является чрезвычайно низкая скорость темнового счета (по крайней мере, менее 10^{-4} с^{-1}), которая должна сочетаться с высокой эффективностью обнаружения фотонов. Для эксперимента ЭРА рассматриваются два варианта детектора:

1. Сверхпроводящий фотодетектор (SSPD)[56] – основной вариант
2. CCD-камера PIXIS 1024В (как страховочный вариант) (Камера CCD использовалась в эксперименте ALPS-I [23]).

Основные схемы обнаружения фотонов описаны в работах [52-55].

В качестве основного фотоприёмника для обнаружения фотонов планируется использовать квантовый сверхпроводящий фотодетектор SSPD.

Сверхпроводящий фотодетектор одиночных фотонов с нанопроволокой (SSPD), оптимизированный для обнаружения одиночных фотонов с низким фоном и высокой квантовой эффективностью, производится компанией Сконтел [56]. В настоящее время, коллаборация планирует улучшить характеристики SSPD по снижению темнового счёта, чтобы использовать в эксперименте ЭРА. На первом этапе в эксперименте Эра будет использоваться схема с гетеродином [49-52]. Затем, для проверки и подтверждения результатов, полученных с помощью первой схемы, будет использоваться схема с фотодетектором (SSPD), который будет считать отдельные фотоны.

Фотодетекторы SSPD [56] используют быстрое изменение сопротивления при сверхпроводящем фазовом переходе. Это позволяет им достигать высокой чувствительности [57] и достигать наибольшей квантовой эффективности и хорошего временного разрешения. По сравнению с Si-CCD квантовая эффективность SSPD на 1550 нм выше, примерно, на два порядка, а кроме того, скорость счета в темноте значительно снижена.

Синхронизация позволяет точно определить хорошие временные интервалы, когда полость закрыта. Таким образом, нестабильная работа резонатора не представляет проблемы для детектора SSPD. Однако создание и эксплуатация установки SSPD сложнее, чем использование CCD -камеры. Важнейшими моментами для успеха являются контроль окружающей среды (например, магнитного поля и т. д.) при температуре несколько кельвинов и доста-

точное подавление различных возможных фонов. В области экспериментального поиска редких событий (например, прямые эксперименты с темной материей) сверхпроводящие детекторы стабильно работают в течение нескольких месяцев (см., например, CRESST II).

3.1. Принцип регистрации фотонов и структура фотодетектора SSPD

На рис. 14 показан принцип регистрации одиночного фотона сверхпроводящим фотодетектором SSPD [58].

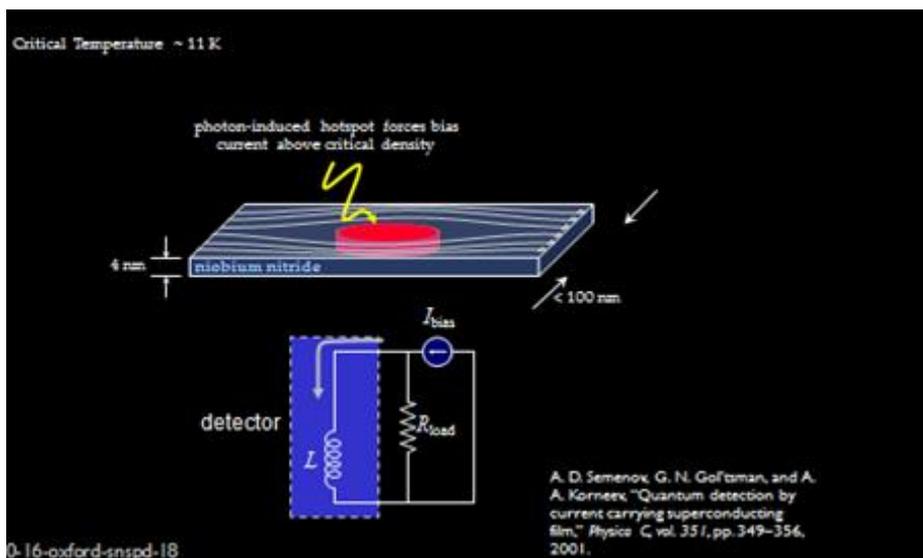


Рис. 14. Принцип регистрации фотона сверхпроводящим детектором.

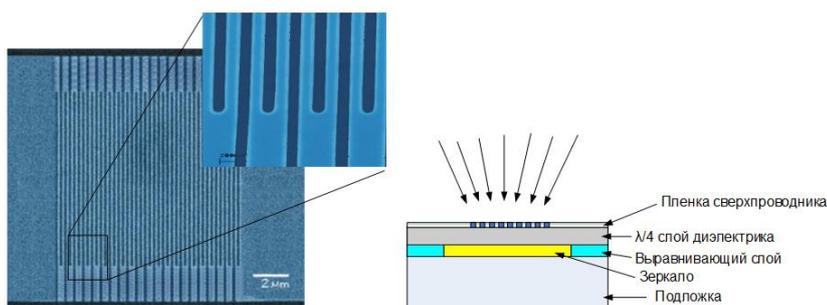


Рис. 15. Микроскопическое изображение чувствительной части фотодетектора (слева), структура детектора (справа).

Чувствительная часть фотодетектора выполнена из тонкой NbN пленки. Справа показана структура детектора, которая включает (в направлении снизу-вверх): Sr подложку, зеркальный слой Au, четвертьволновый слой диэлектрика образующий резонатор и структури-

рованную сверхпроводящую NbN пленку. Размеры чипа фотодетектора (3x4) мм. Чувствительная область фотодетектора имеет размеры (10x10) мкм.

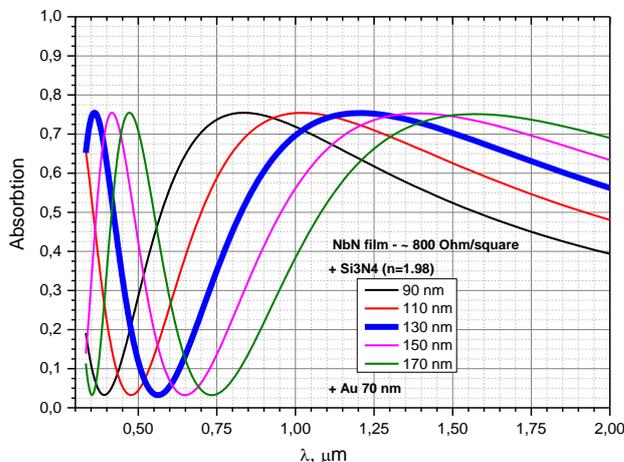


Рис. 16. Спектральный коэффициент поглощения фотонов в сверхпроводящей плёнке NbN. Показан для разной толщины $\lambda/4$ -слоя диэлектрика Si_3N_4 [56].

Исследования, разработки и производство SSPD для обнаружения оптических/инфракрасных фотонов активно проводятся в Московском педагогическом государственном университете (МПГУ) и компании Сконтел (Москва). Коллаборация ЭРА установила контакты с этими организациями и сотрудничество по изготовлению, настройке детекторной системы SSPD и чипов SSPD. В 2021 г. в результате сотрудничества с компанией Сконтел был получен первый опыт регистрации черенковского излучения в кварцевом одномодовом волокне Corning SMF-28e от протонов с импульсом 9 ГэВ/с на ускорителе У-70 с использованием фотодетектора SSPD. Для установки SSPD необходимы четыре основных компонента:

1. Детектор SSPD,
2. Блок электроники для работы с однофотонным приёмником, позволяющим выводить SSPD в рабочий режим, и усиливающим электрический сигнал фотодетектора,
3. Охлаждающая система для достижения и поддержания достаточно низкой температуры,
4. Оптика для подачи светового сигнала на датчик.

Для решения этих задач планируется использовать коммерческие решения, предлагаемые Сконтел и наработки МГПУ.

Самое главное, сигнальные фотоны необходимо ввести в одномодовое вол окно для дальнейшей их регистрации фотодетектором. Диаметр пучка на входном зеркале ПР составит 10 мм. В этой области будет содержаться 86,5 % полной мощности (т. е. 2σ профиля гауссового луча). Таким образом, для улавливания около 98,9 % общей мощности подходит оптика, которая коллимирует пучок диаметром 15.5 мм в одномодовое волокно диаметром около 8 мкм. Простая коллиматорная линза позволяет легко достигнуть эффективности связи ~ 60 %. SSPD мог бы регистрировать фотоны и из многомодового волокна, однако использование, именно, одномодового волокна необходимо для фильтрации шума тепловых фотонов. SSPD чувствителен к фотонам с длиной волны вплоть до 7-10 мкм. Хотя его эффективность экспоненциально падает с ростом длины волны, число тепловых фотонов с увеличением длины волны экспоненциально растет. В результате, скорость темновых отсчетов в отсутствии фильтрации теплового фона имеет порядок 100 Гц. Одномодовое волокно, благодаря наличию длины волны отсечки, работает в качестве фильтра для тепловых фотонов: размещение участка волокна достаточной длины при температуре 4.2° К позволяет эффективно избавиться от теплового фона и выйти на ограничение собственными шумами детектора.

3.2. Криогенная система

В отличие от однофотонного детектора TES (transition-edge sensors), который работает при температуре ~ 100 мК, фотодетектор SSPD работает при температуре жидкого гелия ~ 4 К. Поэтому можно воспользоваться коммерческим криогенным оборудованием (Сконтел) [56] для обеспечения работы детектора. Для достижения уровня шума фотодетектора $\sim 10^{-4}$ Гц требуется подавление фона тепловых фотонов, поэтому необходимо, чтобы оптоволокно, по которому передаётся сигнал в SSPD, также находилось при температуре ~ 4 К. Что, достаточно просто обеспечить, используя криогенную систему для диполей.

3.3. Ожидаемые характеристики детектора

SSPD рассматривается, как основной фотодетектор для регистрации одиночных фотонов в эксперименте ЭРА. Параметры коммерчески доступных детекторов приведены в следующей таблице № 1 [54]:

Таблица 1.

Characteristics	Short-Wave (0.7-1.3 μm)	Telecom-Wave (1.3-1.6 μm)	Long-Wave (1.6-2.3 μm)	Detector type
System efficiency (%)	85*	75*	-	Low-noise
Spectral width (nm)	50	20		
Dead time (ns)	10	15		
Dark count rate (cps)	0.5*	1*		
Minimal jitter (ps)	50	60		
System type	Closed cycle; LHe dipstick			

Наилучший результат по величине темнового счёта для коммерческих фотодетекторов составил 0.1 Гц. Для наиболее распространенных применений коммерческих детекторов - это очень хороший результат, и задача дальнейшего уменьшения темновых отсчетов не ставится. В отличие от квантовой эффективности, темновые отсчеты экспоненциально падают с уменьшением тока смещения детектора. Благодаря этому, для существующих коммерческих детекторов, скорость темнового счета может быть уменьшена до $\sim 10^{-4}$ Гц с сохранением квантовой эффективности порядка 60 %. В недавнем эксперименте LAMPOST (Light A' Multilayer Periodic Optical SNSPD Target) [59], была продемонстрирована скорость темновых отсчетов SSPD на уровне $6 \cdot 10^{-6}$ Гц при квантовой эффективности 17.5%.

Как страховочный вариант, в качестве фотодетектора рассматривается CCD -камера PIXIS 1024B. Темновой ток CCD -камеры известен из таблицы данных и опыта в ALPS-I и составляет $8 \cdot 10^{-4}$ е/с на пиксель, где пиксель имеет размер 13 x 13 мкм. При скорости считывания 100 кГц шум считывания составляет 4.09 е. Квантовая эффективность была измерена для длины волны 1066.7 нм, температуры чипа -70°C и составила 1.2 % [35,60]. Очевидно, что для планируемой длины волны 1550 нм, квантовая эффективность будет меньше процента. Что значительно увеличит время набора статистики и снизит чувствительность эксперимента. На рис. 17 показана квантовая эффективность [60].

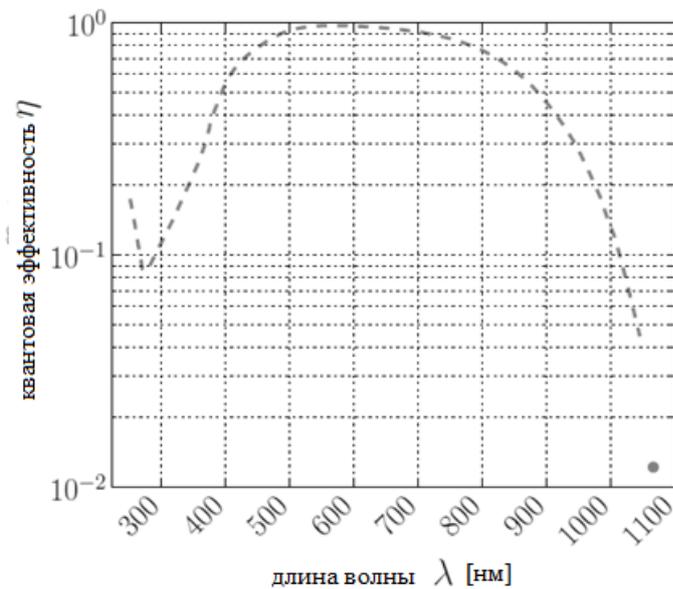


Рис. 17. Измерение квантовой эффективности PIXIS 1024В: Штриховая линия квантовая эффективность, измеренная при температуре $T=25^{\circ}\text{C}$, [35]. Экспериментальная точка – измерение квантовой эффективности при $T=-70^{\circ}\text{C}$.

Испытания показали, что при времени экспозиции до 6000с CCD – камера надежно работает. При более длительных временах наблюдения вероятность загрязнения кадра фоном заряженных частиц (космоса и продуктов распада) приводит к потере кадров. При фиксированном положении области сигнала ожидается, что область сигнала будет размером 1 x 1 пиксель.

В эксперименте ALPS-II планируется использовать фотодетектор TES, собственный фоновый уровень, которого может быть меньше 10^{-4} Гц. Предполагается, что уровень собственных шумов у такого сенсора может быть снижен вплоть до 10^{-7} импульсов в секунду. Было показано, что квантовая эффективность датчика TES достигает 98 %, а всей установки обнаружения — 95 %, если она оптимизирована. Однако, использование соединительного оптоволоконна снижает эффективность регистрации фотонов от 60 до 80 %. Возможность измерения выделенной энергии во время регистрации фотонов, в принципе, может улучшить режекцию фона. Временное разрешение около 1 мкс позволит улучшить временную режекцию событий. Как отмечалось выше, в качестве основного фотодетектора в ЭРА планируется использовать SSPD. В отличие от TES этот фотодетектор не требует температуры ниже 1°K ,

что значительно снижает стоимость криогенного оборудования. Кроме того, SSPD является коммерческим продуктом, для которого разработаны: необходимые модули регистрирующей электроники, криогенное оборудование, программное обеспечение. По своим техническим характеристикам SSPD не уступает TES, проигрывая немного только по величине квантовой эффективности. До сих пор в большинстве применений SSPD не стояла задача его уменьшения до величины ниже 0.1-10 Гц. Но, нет принципиальных проблем с его уменьшением, и производитель готов разработать SSPD с нужными нам параметрами. Применение схемы считывания сигнала с гетеродином позволит также режектировать события по выделенной энергии в фотодетекторе. Временное разрешение SSPD составляет 60 пкс, что значительно позволит улучшить временную режекцию событий по сравнению с TES.

4. Сбор данных

Система сбора данных (DAQ) обеспечит интерфейс для считывания детектора и различных подсистем (включая медленное управление). Интерфейсная часть будет включать в себя управление различными подсистемами и запись информации мониторинга во время работы эксперимента в режимах сбора данных и калибровки. Различные потоки данных от детектора и систем мониторинга будут собираться и сохраняться для последующего анализа.

4.1 Технические проблемы

DAQ должен быть масштабируемым для различных этапов эксперимента ЭРА и быть гибким для изменений в детекторе фотонов во время различных настроек. Объем данных, которые необходимо считывать и обрабатывать,

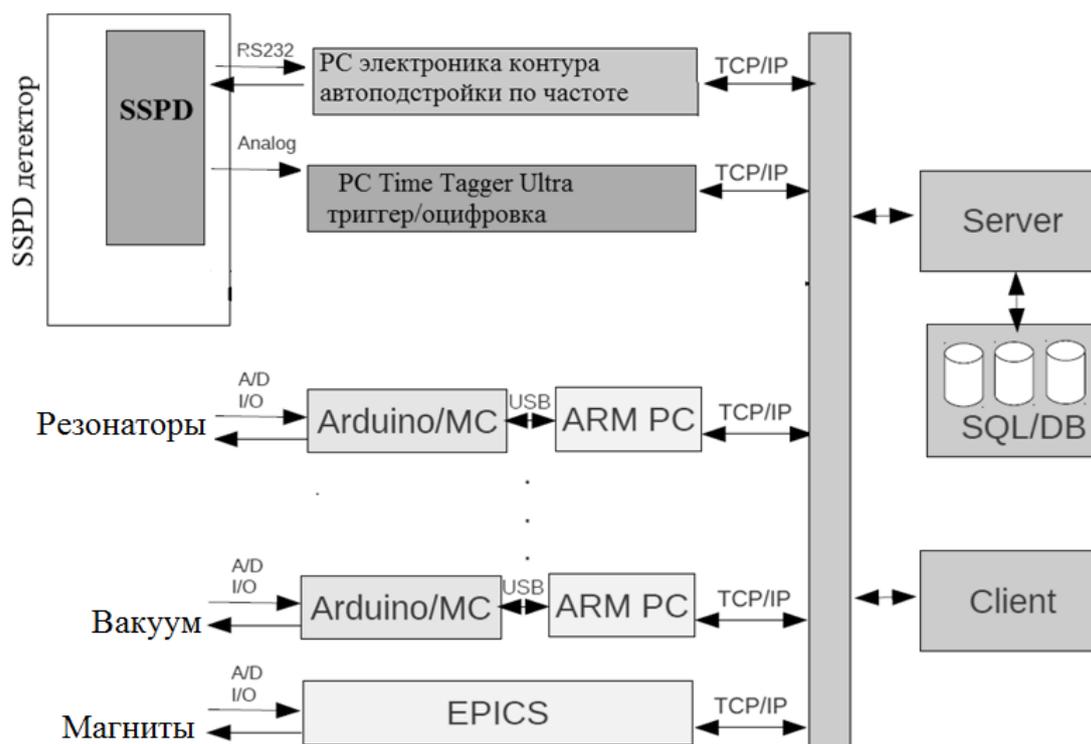


Рис. 18. Схема распределенной системы сбора и управления данными.

небольшой и находится в пределах производительности доступной технологии. Ожидается, что частота событий будет значительно ниже кГц в режиме запуска (в основном во время калибровки) для SSPD, ниже Гц для калибровки установки и даже меньше для сбора данных.

4.2. Концептуальный дизайн

Для снятия физических данных с SSPD планируется использовать коммерчески разработанную систему оцифровки Time Tagger Ultra [61]. Плата оцифровки позволяет сэмплировать и оцифровывать до 512 млн отсчетов с частотой 475 млн отсчетов/с. Эта плата на основе PCIe использовалась для оцифровки сигналов SSPD в тестовом сеансе на ускорителе У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Для первоначальной настройки и испытаний также можно использовать, уже имеющуюся плату, CAEN mod. V1742. В случае использования ПЗС-камеры, в качестве детекторной системы камера может быть подключена напрямую через USB-интерфейс к считывающему ПК. Узел (детектор и считыватель) обрабатывает связь и передачу данных в серверную систему. Там данные собираются и хранятся в системе реляционной базы данных (предпочтительно MySQL). Межпроцессное взаимодействие будет ре-

ализовано на системе конечного автомата, которая определяет состояния (например, неактивен, настраивается, готов) и разрешенные переходы между состояниями. Единый подход с использованием конечного автомата обеспечит четко определенный доступ и контроль над различными подсистемами. Фактический протокол для межпроцессного взаимодействия и управления основан на XML (например, XML-RPC [62]) (см. рис. 18 для схемы системы сбора данных). Аналогичным образом будет включен интерфейс к дополнительным системам медленного управления, в том числе управление магнитом. Сверхпроводящие магниты будут контролироваться криогруппой ФТО ИФВЭ. Среда управления основана на системе EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System), которая широко используется на ускорительных установках, и на системе, разработанной для криогенного комплекса ИФВЭ [63]. Параметры, передаваемые в DAQ, будут включать электрический ток, температуру, а также сообщения об ошибках для диагностики гашения магнитного поля диполя.

Комбинация компьютерных узлов на базе ARM (например, Plug-PC или RASPBERRY PI) с микроконтроллерами (например, платы Arduino: эти платы обеспечивают 14 портов ЦАП и 6 портов ЦАП, доступ через интерфейс USB) позволяют создавать системы медленного контроля с удобными интерфейсами. Использование таких связей представляет собой удобное, недорогое и очень гибкое решение.

Отдельные подсистемы будут логически доступны, как конечный автомат с сервера. Потоки данных будут храниться в базе данных. Фактическое количество систем мониторинга ограничено либо адресным пространством стека TCP/IP (что маловероятно), либо требуемой пропускной способностью, которую может обрабатывать сервер, используемый для связи. Внешний интерфейс для пользователя будет доступен через клиентскую программу, которую можно запустить на любом компьютере в пределах одного поддомена адресного пространства. На более позднем этапе будет реализована удаленная работа по защищенным сетевым протоколам (с более низким приоритетом). Клиент будет контролировать тип, выполняемого сбора данных (обычный сбор данных и сбор данных калибровки), сможет установить параметры сбора данных (например, время экспозиции ПЗС, порог срабатывания для SSPD), а также доступ ко всем подсистемам и управление ими. Параметры будут храниться в базе данных, чтобы в любой момент восстановить состояние всей системы. Фактический поиск данных для анализа будет осуществляться через доступ к базе данных MySQL. Ряд про-

стных клиентских сценариев позволяет выбирать и извлекать данные и информацию о калибровке предпочтительно в файлах типа FITS.

4.2.1 Защитная петля для лазера

Защитная петля будет контролировать состояние дверей, соединяющих серую комнату снаружи, кнопки аварийного отключения, а также целостность защитных кожухов лазера (персональная блокировка). Техническая блокировка прервет работу, если температура в помещении превысит определенный предел, давление в трубах слишком велико (вакуумная система) или сверхпроводящий магнит гаснет. Дополнительные предупреждения будут предоставлены, если какая-либо другая система находится в неготовом состоянии. Из соображений безопасности любые нарушения системы блокировки должны привести к немедленному отключению лазерной системы.

4.2.2. Ожидаемая производительность

Требуемая производительность системы сбора данных хорошо соответствует предлагаемой системе. В случае детекторной системы, наиболее сложным компонентом является считывание данных во время калибровки. В этом конкретном случае может оказаться необходимым оцифровывать сигнал с высокой частотой дискретизации, в идеальном случае, непрерывно в течение долей секунды. При регулярном сборе данных ожидаемая фоновая частота SSPD будет небольшой (10^{-4} Гц) и не вызовет проблем. Предлагаемая система дигитайзера на основе PCIe позволит, как непрерывный сбор данных в течение нескольких секунд для точного контроля базовой линии, так и триггерную операцию с дополнительным цифровым формированием импульсов. Другие системы будут иметь скромную скорость считывания ниже кГц. Таким образом, трафик десятков узлов может быть легко обработан при обычной пропускной способности сети.

5. План-график реализации, оценка стоимости проекта, возможное развитие экспериментальной программы

Для выполнения намеченной экспериментальной программы необходимо создание системы из двух сверхпроводящих магнитов (СП) и криогенной системы к ним. СП-диполи имеются в наличии (программа УНК) в количестве 24 шт., и более того 2 диполя были недавно успешно протестированы. Существует проблема с криогенной гелиевой установкой. В институте, в настоящее время эксплуатируются 2 установки (ОКА и в ИФО). Можно, либо

закупить еще 1 шт. (цена ~200 млн. руб.), либо договориться об использовании существующих. Проведены успешные переговоры о совместном использовании существующей криогенной гелиевой установки.

Один из важнейших узлов установки – сверхпроводниковый фотодетектор с криогенной системой и электроникой считывания, который позволит регистрировать одиночные фотоны с высокой эффективностью. Такой типа фотодетектора, впервые, был создан в МПГУ. И, теперь, производится коммерчески российской фирмой СКОНТЕЛ. Его цена составляет ~10 млн.руб.

Для снятия физических данных с SSPD планируется использовать коммерчески разработанную систему оцифровки Time Tagger Ultra [61]. Плата оцифровки позволяет сэмплировать и оцифровывать до 512 млн отсчетов с частотой 475 млн отсчетов/с. Цена такой системы ~5млн.руб. Другой путь, использовать 32 канальный модуль преобразователей АВЦП (фирмы CAEN) с крейтом VME с контроллером и интерфейсной платой для ПК (есть в наличии).

Следующей по стоимости и трудоемкости являются лазер и оптические системы (резонаторы Фабри-Перо и оптические элементы для управления пучком лазера). Стоимость подобного лазера (Azurlight Systems) составляет ~10млн. руб. Найден производитель подобного лазера в России. В оптических системах предполагается использовать коммерчески доступные оптические элементы. Общая стоимость элементов оптических систем составит ~5млн. руб.

Предстоит выполнить работы по моделированию, расчету и эскизному проектированию установки. Для выполнения работ по созданию установки потребуется ~10 млн. руб.

5.1 Сроки создания установки и проведения эксперимента

Такая установка может быть создана за 2-3 года, при наличии должного финансирования. Установка будет расположена в ИФВЭ.

На первом этапе, эксперимент по поиску массовых скрытых фотонов, в котором не требуется использовать сверхпроводящие магниты, можно провести достаточно быстро (по существу, это "лабораторный эксперимент"). Первые результаты по рождению скрытых фотонов можно будет получить в 2026 г., при этом, постепенно, вводя в строй сверхпроводящие магниты и криогенное оборудование.

5.2 Возможное развитие экспериментальной программы

Дальнейшее развитие программы по поиску аксионов и аксионоподобных частиц будет зависеть от введении в состав установки СП-диполей.

Чрезвычайно важной проверкой КЭД и лежащих в ее основе основ является также обнаружение VMB эффекта (двойное лучепреломление в магнитном вакууме). Это также продемонстрирует правомерность использования фотонов низкой энергии для физики элементарных частиц в диапазоне эВ-суб-эВ. Эти данные будет возможно получить на предлагаемой установке.

Другим естественным развитием программы было бы обнаружение рождения аксионов, ALP-частиц, скрытых фотонов в материальной среде (оптические волокна, нелинейные волокна).

Что, чрезвычайно важно, для всех вышеизложенных задач, их изучение можно производить на одной установке.

Заключение

Предлагается в течение примерно 3^x лет создать установку типа LSW для поиска частиц тёмной материи: аксионов, аксионоподобных частиц, скрытых массовых и безмассовых фотонов и проверки основ КЭД в вакууме и материальной среде. Установка позволит регистрировать аксионы и аксионоподобные частицы в области масс от 10^{-4} до 0.8 эВ с чувствительность $g_{\gamma\gamma} \sim 10^{-9} \text{ ГэВ}^{-1}$.

Список литературы

- [1] S. Weinberg, A New Light Boson?. Phys. Rev. Lett. 40. 223-226 (1978).
- [2] F. Wilczek, Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons. Phys. Rev. Lett. 40. 279-282 (1978).
- [3] R.D. Peccei, Quinn, H. R. Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles. Phys. Rev. D 16 1791–1797 (1977).
- [4] L. Covi, J.E. Kim, J.E., L. Roszkowski, Phys. Rev. Lett. 82, 4180 (1999) [ArXiv: hep-ph/9905212].
- [5] P. Svrcek, E. Witten, JHEP 0606, 051 (2006) [ArXiv: hep-th/0605206].

- [6] M. Cicoli, M. Goodsell, A. Ringwald, J. High Energy Phys. 2012, (10) 146 (2012) [arXiv:hep-th/1206.0819].
- [7] K.A. Meissner, H. Nicolai, Phys. Lett. B660, 260 (2008) [ArXiv: hep-ph/0710.2840].
- [8] R. Bradley, et al. Microwave cavity searches for dark-matter axions. Rev. Mod. Phys. 75 777-817 (2003).
- [9] C. Hagmann, van Bibber, K., Rosenberg, L. J. Axions and other very light bosons, Part III, Experimental limits. J. Phys. G 33, 1 421-432 (2006).
- [10] M. Buschmann¹, J. W. Foster, A. Hook, A. et al. Dark matter from axion strings with adaptive mesh refinement Nat. Commun 13, 1049 (2022) arXiv:2108.05368v1 [hep-ph] 11 Aug 2021.
- [11] I. Batkovi'c, A. De Angelis, M. Doro, M. Manganaro Axion-like Particle Searches with IACTs, Universe 2021, 7, 185. <https://doi.org/10.3390/universe7060185>.
<https://cajohare.github.io/AxionLimits/docs/ap.html>
- [12] V. Anastassopoulos ; et al. (CAST Collaboration) (2017). New CAST limit on the axion-photon interaction. *Nature Physics*. **13** (6): 584590. [arXiv:1705.02290](https://arxiv.org/abs/1705.02290).
- [13] V.S. Gorelik, Laser excitation of the dark bound photonic states during parametric processes in dielectric media J. Phys.: Conf. Ser. 1051- 012032 (2018).
- [14] V.S. Gorelik, Generation of Pseudoscalar Bosons by Stimulated Raman scattering of Light in Dielectric Media, EPJ Web of Conferences 103, doi:10.1051/epjconf/2015.
- [15] В.С. Горелик 2014. О возможности регистрации элементарных частиц тёмной материи Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 6 Сер. “Естественные науки”. 2014. ISSN 1812-3368.
- [16] OSQAR Collaboration, P. Pugnati et al., First results from the OSQAR photon regeneration experiment: No light shining through a wall, Phys.Rev. D78 (2008) 092003, [arXiv:0712.3362].
- [17] OSQAR Collaboration, M. Schott et al., First results of the full-scale OSQAR photon regeneration experiment, arXiv:1110.0774.

- [18] P. Sikivie, “Experimental Tests of the ‘Invisible’ Axion,” *Phys. Rev. Lett.* **51**, 1415 (1983) [Erratum-ibid. **52**, 695 (1984)].
- [19] A.A. Anselm, “Axion \longleftrightarrow Photon Oscillations in a Steady Magnetic Field. (In Russian),” *Yad. Fiz.* **42**, 1480 (1985).
- [20] M. Gasperini, Axion Production by Electromagnetic Fields, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 396 (1987).
- [21] K. Van Bibber, N.R. Dagdeviren, S.E. Koonin, A. Kerman and H.N. Nelson, An Experiment to Produce and Detect Light Pseudoscalars, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 759 (1987).
- [22] G. Ruoso, R. Cameron, G. Cantatore, A. Melissinos, Y. Semertzidis, H. Halama, D. Lazarus, A. Prodell, F. Nezzrick, C. Rizzo, E. Zavattini, Search for photon regeneration in a magnetic field. *Z. Phys.* **56**, 505–508 (1992).
- [23] K. Ehret, M. Frede, E.-A. Knabbe, D. Kracht, A. Lindner, et al., Production and detection of axion-like particles in a HERA dipole magnet: Letter-of-intent for the ALPS experiment, hep-ex/0702023.
- [24] K. Ehret, M. Frede, S. Ghazaryan, M. Hildebrandt, E.-A. Knabbe, et al., New ALPS results on hidden-sector lightweights, *Phys.Lett. B* **689** (2010) 149–155, [arXiv:1004.1313].
- [25] ALPS collaboration Collaboration, K. Ehret et al., Resonant laser power build-up in ALPS: A ‘Light-shining-through-walls’ experiment, *Nucl.Instrum.Meth. A* **612** (2009) 83–96, [arXiv:0905.4159].
- [26] A. Afanasev, O. Baker, K. Beard, G. Biallas, J. Boyce, et al., New experimental limit on optical photon coupling to neutral, scalar bosons, *Phys.Rev.Lett.* **101** (2008) 120401, [arXiv:0806.2631].
- [27] GammeV (T-969) Collaboration, A.S. Chou et al., Search for axion-like particles using a variable baseline photon regeneration technique, *Phys.Rev.Lett.* **100** (2008) 080402, [arXiv:0710.3783].
- [28] J.H. Steffen and A. Upadhye, The GammeV suite of experimental searches for axion-like particles, *Mod.Phys.Lett. A* **24** (2009) 2053–2068, [arXiv:0908.1529].

- [29] OSQAR Collaboration, P. Pognat et al., First results from the OSQAR photon regeneration experiment: No light shining through a wall, *Phys.Rev. D*78 (2008) 092003, [arXiv:0712.3362].
- [30] OSQAR Collaboration, M. Schott et al., First results of the full-scale OSQAR photon regeneration experiment, arXiv:1110.0774.
- [31] M. Fouche, C. Robilliard, S. Faure, C. Rizzo, J. Mauchain, et al., Search for photon oscillations into massive particles, *Phys.Rev. D*78 (2008) 032013, [arXiv:0808.2800].
- [32] A. Ejlli, F. Della Valle, U. Gastaldi, et.al., The PVLAS experiment: a 25 year effort to measure vacuum magnetic birefringence, arXiv:2005.12913.
- [33] K. Ehret, M.Frede, S. Ghazaryan et.al. New ALPS Results on Hidden-Sector Light weights, DESY 10-030, MPP-2010-27 arXiv:1004.1313v1 8 Apr 2010.
- [34] P. Sikivie, D.B. Tanner and K. van Bibber, Resonantly enhanced axion-photon regeneration, *Phys. Rev. Lett.* 98, 172002 (2007) 26 April 2007 *Phys.*, arXiv:hep-ph/0701198.
- [35] R. Bahre et al., Any light particle search II -Technical Design Report, JINST 8 (2013) T09001, arXiv:1302.5647 [physics.ins-det].
- [36] J. Jaeckel, J. Redondo, Searching hidden-sector photons inside a superconducting box , [Europhysics Letters](#), [Vol. 84](#), [N. 3](#), (2008).
- [37] S. Villalba-Chavez, C. Muller *JHEP*06(2015)177, ArXiv ePrint: 1412.4678.
- [38] M. Ahlers, H. Gies, J. Jaeckel, J. Redondo and A. Ringwald, Light from the Hidden Sector, arXiv:0706.2836v1 [hep-ph] 19 Jun 2007.
- [39] C. Burrage, J. Jaeckel, J. Redondo and A. Ringwald, Late time CMB anisotropies constrain mini-charged particles, *JCAP* 0911:002, 2009 arXiv:0909.0649 [astro-ph.].
- [40] B.Holdom, Two U(1)'s and Epsilon Charge Shifts, *Phys. Lett. B.* 1986. V. 166. P. 196.
- [41] M. Gluck, S. Rakshit, E. Reya, The Lamb shift contribution of very light millicharged particles, *Phys. Rev. D* 76 (2007) 091701, arXiv:0703140.
- [42] S. Davidson, S. Hannestad, G. Raffelt, Updated Bounds on Milli-Charged Particles, *JHEP* 0005 (2000) 003, arXiv:hep-ph/0001179.

- [43] <http://www.oku.ihep.su/index.php/unk/proekt-unk>
- [44] А.И. Агеев, Н.И. Андреев, В.И. Балбеков и др., Superconducting Cold Iron Dipole Magnet for UNK. - В сб.: "Proceeding of Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics", ICF A, стр. 41-43, Brookhaven, U SA, 1986.
- [45] А.И. Агеев, Экспериментальные и теоретические исследования криогенных систем сверхпроводящих ускорителей, Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Препринт ИФВЭ – 98-6.
- [46] G. Mueller, P. Sikivie, D.B. Tanner, K. Bibber, Detailed design of a resonantly-enhanced axion-photon regeneration experiment, Phys.Rev.D80:072004, 2009, arXiv:0907.5387v2.
- [47] D. G. Blair, Advanced gravitational wave detectors, edited by David G. Blair, et al., Cambridge University Press, Cambridge, England, 2012.
- [48] https://azurlight-systems.com/portfolio_page/1560-nm-high-power-fiber-lasers-amplifiers-15w-single-mode-single-frequency/
- [49] R. Bahre, B. Dobrich, J. Dreyling-Eschweiler et. all., Any light particle search II – Technical Design Report," Journal of Instrumentation 8 (9), T09001 (2013).
- [50] G. Mueller, P. Sikivie, D.B. Tanner, K. Bibber, Detailed design of a resonantly-enhanced axion-photon regeneration experiment Phys.Rev.D80:072004,2009, arXiv:0907.5387v2.
- [51] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, et al, Appl. Phys. B 31, 97 (1983).
- [52] Yu. Lobanov, M. Shcherbatenko, A. Semenov et al, Superconducting Nanowire Single Photon Detector for Coherent Detection of Weak Signals, IEEE Transac. on Appl. Superconductivity, vol. 27, N. 4, June 2017.
- [53] A. Hallal, G. Messineo, M. Diaz Ortiz et al, The heterodyne sensing system for the ALPS II search for sub-eV weakly interacting particles, Physics of the Dark Universe <https://doi.org/10.1016/j.dark.2021.100914>.
- [54] M.L. Shcherbatenko, M.S. Elezov, G.N. Goltsman, D.V. Sych, Sub-shot-noise-limited fiber-optic quantum receiver Phys. Rev A 101, 032306 (2020).
- [55] M. Elezov, M. Scherbatenko, D. Sych, G. Goltsman, Towards the fiber-optic Kennedy

quantum receiver, EPJ Web of Conferences 220, 03011 (2019)

- [56] <https://www.scontel.ru/ru/sspd/>
- [57] <https://www.scontel.ru/data/uploads/manuals/sspd-configurations.pdf>
- [58] A.D. Semenov, Gol'tsman G.N., Korneev A.A. Quantum detection by current carrying superconducting film, Physica C: Superconductivity. 2001, V. 351, n 4, p. 349–356.
- [59] J. Chiles, I. Charaev, et. all, New constraints on dark photon dark matter with superconducting nanowire detectors in an optical haloscope, Phys. Rev. Letters, 128(23), 231802 (2022).
- [60] P. Instruments, Pixis: 1024, 2011.
<http://www.princetoninstruments.com/products/imcam/pixis/dsheet.aspx>
- [61] Swabian Instruments GmbH Stammheimer Str. 41 70435 Stuttgart Germany56.
<https://www.swabianinstruments.com/company/#about>
- [62] xmlrpc homepage <https://Xmlrpc.com>
- [63] A.I. Ageev, et al. U-70 IHEP NRC «Kurchatov Institute» cryogenic complex for physical experiments, IHEP Preprint 2016–9. – Protvino, 2016.
- [64] V.A. Bogatyryov , Bubnov M.M., Dianov E.M., Kurkov A.S., Mamyshev P.V., Prokhorov A.M., Romyantsev S.D., Semenov V.A., Semenov S.L., Sysoliatin A.A., Chernikov S.V., Gur'anov A.N., Devyatykh G.G., Miroshnichenko S.I. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length, IEEE J. of Lightwave Tech., vol.9, pp.561-566, 1991.
- [65] Fang Feng, Philippe Morin, Yanne K. Chembo, Alexej Sysoliatin, Stefan Wabnitz, Christophe Finot, 'Experimental demonstration of spectral sideband splitting in strongly dispersion oscillating fibers', Optics Letters Vol. 40, No. 4, pp.455- 458 (2015).
- [66] M.V. Fedorov, Entanglement of multiphoton states in polarization and quadrature variables, Laser Phys. 29 (2019) 124006, pp.7.

Рукопись поступила 11 декабря 2023 г.

Гочелашвили К.С. и др.

Эксперименты по Регистрации Аксионов (ЭРА) (проект предложения эксперимента).

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 15.12.2023 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 2, 9. Уч.– изд.л. 4, 2. Тираж 60. Заказ 23. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2023-19,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023
