**Приложение 3.**

***Форма открытия (продления) Проекта /   
Подпроекта КИП***

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор Института**

**/ /**

**“ “ 202**\_ **г.**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ**

**ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА**

**ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте**

* 1. **Шифр темы** (для продлеваемых проектов) *– шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

**02-1-1096-2010 Изучение редких распадовзаряженных каонов и поисктемного сектора в экспериментах на SPS ЦЕРН**

* 1. **Шифр проекта**  (для продлеваемых проектов и подпроектов)

**02-1-1096-2-2010/2026**

* 1. **Лаборатория**

**ЛФВЭ**

* 1. **Научное направление**

**Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика**

* 1. **Наименование проекта**

**NA64 эксперимент**

* 1. **Руководитель проекта**

**В.А.Матвеев**

**1.7. Заместитель руководителя проекта**

**Д.В.Пешехонов**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Несмотря на активные поиски проявлений темной материи (DM), проводимые на БАК и в экспериментах, не задействующих ускорители, она по-прежнему остается большой загадкой. Несмотря на то, что строгие ограничения, полученные на взаимодействия DM с частицами Стандартной модели (СМ), исключили многие модели DM, мало что известно о происхождении и динамике самого темного сектора. Основная сложность на данный момент заключается в том, что единственный доказанный способ исследовать DM - это с помощью гравитационного взаимодействия. Еще одна возможность заключается в том, что в дополнение к гравитации взаимодействие между темным сектором и видимой материей, может происходить с помощью нового векторного бозона A' (темный фотон). Такой A' связанный со спонтанным нарушением симметрии U(1)D,мог бы обладать массой mA' < 1 ГэВ и взаимодействовать с СМ посредством кинетического смешивания с обычным фотоном, параметризованным силой смешивания << 1. Вышесказанное послужило толчком к тому, чтобы направить теоретические и экспериментальные усилия на поиск проявлений и порталов взаимодействия между видимым и темным секторами, сменив стратегию с высоких энергий на высокую интенсивность.

Дополнительной предпосылкой к существованию A' могут служить указания на астрофизические сигналы темной материи, а также отклонение аномального магнитного момента мюона (g-2)μ на 3,6 σ от предсказаний СМ. Возможное объяснение аномалии (g-2)μ связано с существованием нового легкого (mZ' < 1 ГэВ) векторного бозона, слабо взаимодействующего с мюоном αZ' ~ O(10-8).

Эксперимент NA64 - это эксперимент с фиксированной мишенью на SPS в ЦЕРН. Установка NA64 представляет собой герметичный детектор для поиска проявлений темного сектора (DS) при регистрации событий с недостающей энергией (missing energy) при рассеянии электронов/позитронов, адронов и мюонов на ядрах

**2.2. Научное обоснование (**цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Предложение (P348) по поиску проявлений темныого сектора на супер-протонном синхротроне SPS (ЦЕРН) [1] было одобрено комитетом SPS (SPSC) в апреле 2014 года. В 2015 году группе предоставили возможность провести пробный сеанс для ТЭО, и в марте 2016 года проект был одобрен в качестве эксперимента №64 для проведения в северной зоне (NA64) ЦЕРН. Установка NA64 представляет собой герметичный детектор общего назначения для поиска проявлений темного сектора (DS) при регистрации событий с недостающей энергией (missing energy) при рассеянии электронов/позитронов, адронов и мюонов на ядрах. Основное внимание в эксперименте NA64 уделяется легкой темной материи (LDM), взаимодействующей со Стандартной моделью (SM) через векторный (или другой) портал, такой, например, как темные фотоны (A'), а также множеству сценариев проявления Новой Физики. В *e-*-моде эксперимента (NA64e) используется пучок электронов с энергией 100 ГэВ на канале H4. Пучок формируется таким образом, чтобы получать электроны с максимальной интенсивностью порядка 107 за сброс SPS с растяжкой 4,8 с в диапазоне импульсов от 50 до 150 ГэВ/c. Измеренная примесь адронов в электронном пучке находится на уровне π/e− < 2% и K/e− < 0,3%. Эксперимент NA64 работал с 2016 по 2018 год, и после остановки БАК на модернизацию (LS2) в 2021 году мы возобновили набор данных на новом постоянном месте на канале H4 ЦЕРН. Несмотря на то, что эксперимент только начался, уже получен ряд интересных результатов [2-4] представленных в данном отчете, структурированном по исследуемым модам распада A'.

**Невидимая мода:** Коллаборация NA64 первой предложила комбинировать техники активной мишени и недостающей энергии для поиска невидимых распадов темного фотона A', образующегося в мишени ECAL (электромагнитном калориметре) в результате реакции тормозного излучения e-Z → e−ZA', в процессе взаимодействия электронов с ядрами с зарядом Z. После рождения A' может распасться на пару частиц LDM, A' → χχ не регистрируемых детекторами, таким образом сигнатурой распада является процесс с недостающей энергией. Поэтому такая мода распада называется невидимой. Пространство параметров, где т.н. сила смешивания составляет 10−6 < ε < 10−3 и масса mA' находится в субгэвном диапазоне, является областью исследования NA64, где происхождение DM объясняется следствием термического вымораживания. Эксперименты с недостающей энергией, такие как NA64, требуют знания параметров налетающего пучка (импульса и типа частицы) и точного измерения энергии, потерянной в результате взаимодействия в установке. Полезное событие идентифицируется как одиночный электромагнитный ливень в ECAL с энергией EECAL ниже заданного порога, сопровождаемый значительной недостающей энергией Emiss = EA′ = Einitial − EECAL. Рождение A' ассоциируется с событием в том случае, если есть превышение над ожидаемыйм фоном. На Рис. 1 представлена схема установки иллюструющая принцип работы NA64. Выходной сигнал при использовании техники активной мишени пропорционален ε2, таким образом, повышается чувствительность измерения в сравнении с сигналом ∝ αDε4 при сбросе пучка на обычную мишень, когда распад A' измеряется только детектором, расположенным после точки рождения.

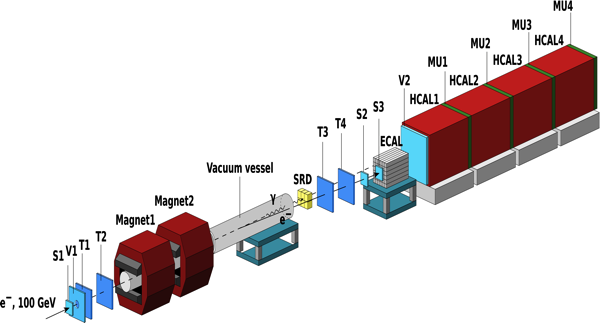


Рис. 1: Установка NA64 для поиска темных фотонов по недостающей энергии в активной мишени (ECAL). Передняя часть установки до ECAL отвечает за идентификацию частиц и измерение их импульса.

Основные результаты, полученные на данный момент в невидимой *e-*-моде:

в ходе сеансов 2016-2018 гг. суммарно было набрано 3 · 1011 EOT. Полезный сигнал не был обнаружен, однако результаты анализа данных, представленные на Рис. 2, устанавливают наиболее строгий предел для LDM в области массы А’ ниже 0,1 ГэВ для канонических контрольных параметров αD = 0,1 и mA′ = 3mχ. Кроме того, эти данные позволили исключить большую часть области пространства параметров, для объяснение мюонной аномалии g − 2 (левый плот, полоса αµ Рис. 2). После публикации результатов BABAR оставшаяся область пространства параметров, которая могла бы объяснить проблему (g-2)µ вкладом темного фотона была полностью исключена [5]. На сегодняшний день NA64 является ведущим экспериментом на выведенных пучках ускорителя в этой области энергии. Эти результаты были опубликованы как «выбор редактора» журнала PRL [6].

В дополнение к реакции тормозного излучения рассматривался резонансный канал рождения А' посредством электрон-позитронной аннигиляции в электромагнитном ливне. Комбинированный результаты анализа данных NA64 на 90% уровне достоверности представлены на Рис. 2. Включение резонансного процесса в анализ данных позволяет повысить чувствительность, что приводит к пику для массы темного фотона в районе 200 МэВ. Добавление этого процесса улучшает чувствительность NA64 в области больших масс, где выход темных фотонов подавлен зависимостью сечения тормозного излучения ~1/m2A′ (см. [6]). Использование позитронов в качестве первичного пучка увеличивает на порядок чувствительность к массе в зависимости от энергии пучка. Диапазон масс темного фотона может быть дополнительно расширен путем сканирования по энергии позитронного пучка. Недостаток заключается в том, что приходится иметь дело с примерно на порядок большей примесью адронов в пучке, поскольку вторичные частицы создаются первичными протонами SPS с энергией 400 ГэВ, и, таким образом, положительно заряженных адронов больше, чем их отрицательных. Чтобы изучить влияние примеси адронов и возможного результирующего фона, во время сеанса 2022 года был проведен первый тестовый набор данных на пучке позитронов с энергией 100 ГэВ (см. ниже). Эксперименты с пучками электронов и позитронов позволяют исследовать альтернативные сценарии гипотезы о темных фотонах. NA64 уже подтвердил свой потенциал для поиска легких скалярных, а также псевдоскалярных аксионоподобных частиц (ALPs), образующихся в результате реакции Примакова [7]. Область исследования NA64 перекрывает пробел между границами ранее проводимыми экспериментами на выведенных пучках и LEP (см. правый график на Рис. 3). Также можно было бы провести поиск обобщенного Х-бозона, связанного с электронами. Хорошим результатом является то, что чувствительность NA64 на порядок выше, чем в других прецизионных экспериментах [8]. Однако следует отметить, что в NA64 мы предполагаем, что X-бозон распадается невидимо, в то время как g-2 аномалия [9] и измерения тонкой структуры [10, 11] являются модельно-независимыми.

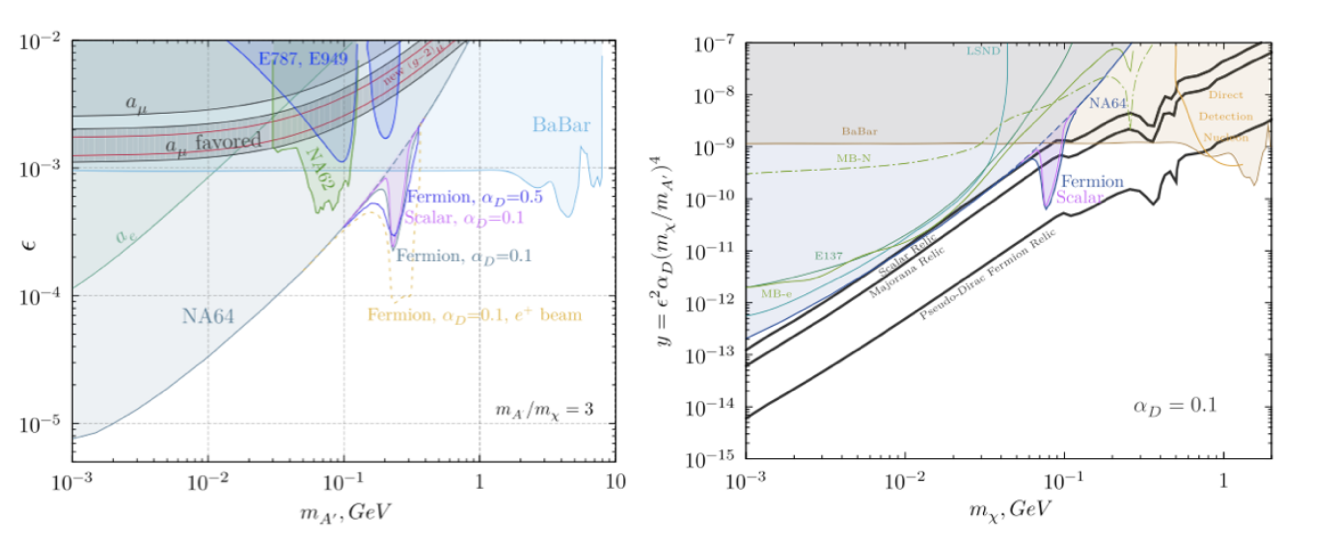


Рис. 2: Текущий статус эксперимента NA64. Результат по исключению на уровне 90% достоверности области существования невидимых распадов A’, включая как тормозное излучение, так и поиск резонансного канала рождения A’ (слева). Поиск LDM (справа) [6].

**Видимая мода**: Метод поиска A′ → e+e− (X → e+e−) распадов описан в [1, 12]. В этом случае установку модифицируют, путем добавления дополнительного компактного электромагнитного калориметра расположенного за ECAL по пучку. A' может рождаться в процессе: e− + Z → e− + Z + A′(X); покинуть область активной мишени и впоследствии распасться на пару e+e− A′(X) → e+e−. Энергия пары должна быть равна энергии, недостающей в мишени. Таким образом, сигнатура распада A′(X) → e+e− представляет собой событие с двумя электромагнитно-подобными ливнями в детекторе: один в ECAL, другой в калориметре расположенном дальше по пучку с суммарной энергией, равной энергии пучка.

В сеансах 2017-2018 гг. года было набрано ~ 1011 EOT. Событий в сигнальной области не было обнаружено. Эти результаты устанавливают первые ограничения на связь X − e− в диапазоне 1,2 × 10−4 < εe < 6,8 × 10−4, практически исключая область пространства параметров, допускаемых для объяснения существования так называемой бериллиевой аномалии [13], существованием нового X-бозона с массой около 17 МэВ (частица X17) [14]. Установлены новые ограничения для силы смешивания фотонов с темными фотонами (A') из-за отсутствия наблюдения распада A′ → e+e− тормозного излучения A' с массой менее 23 МэВ. Результаты 2017 г. были выбраны и опубликованы как «выбор редактора» в журнале Phys. Rev. Lett. 5 [4], а также в Phys. Rev. D Rapid [15]. Недавно эти поиски были расширены для псевдоскалярной частицы, которая наблюдаемо распадается на лептонную пару; результат был опубликован в Phys. Rev. D [16].

Для завершения исследования оставшейся области параметров, планируется использовать новый меньший по размеру оптимизированный вольфрамовый WCAL и модернизированный спектрометр с возможностью восстановления инвариантной массы X17[17]. Поскольку этот эксперимент не может проводиться параллельно с исследованием в невидимой моде, он был отложен. Для сканирования оставшейся области параметров X17 NA64 необходимо около 30 дней пучкового времени, поэтому, если результаты эксперимента PADME, в котором в настоящее время ведется набор данных [18], подтвердят эту аномалию, мы сможем перепроверить это в 2024 году.

**Смешанная мода**: существуют альтернативные, расширенные, сценарии предусматривающие разделение DM по массе, которые могут привести к появлению сигнатуры, представляющей собой комбинацию описанных выше. Очень интригующая особенность этого канала связана с возможностью как поиска DM, так и объяснения (g - 2)μ аномалии, снимая существующие экспериментальные ограничения для чистых видимой и невидимой мод [19]. Эти типы моделей известны как неупругие DM, и мы называем их сигнатуры смешанным каналом. Анализ, на комбинированных данных 2016-2018 гг. [20] (см. график слева на Рис. 3) продемонстрировал потенциал установки NA64 для исследований этого класса моделей.

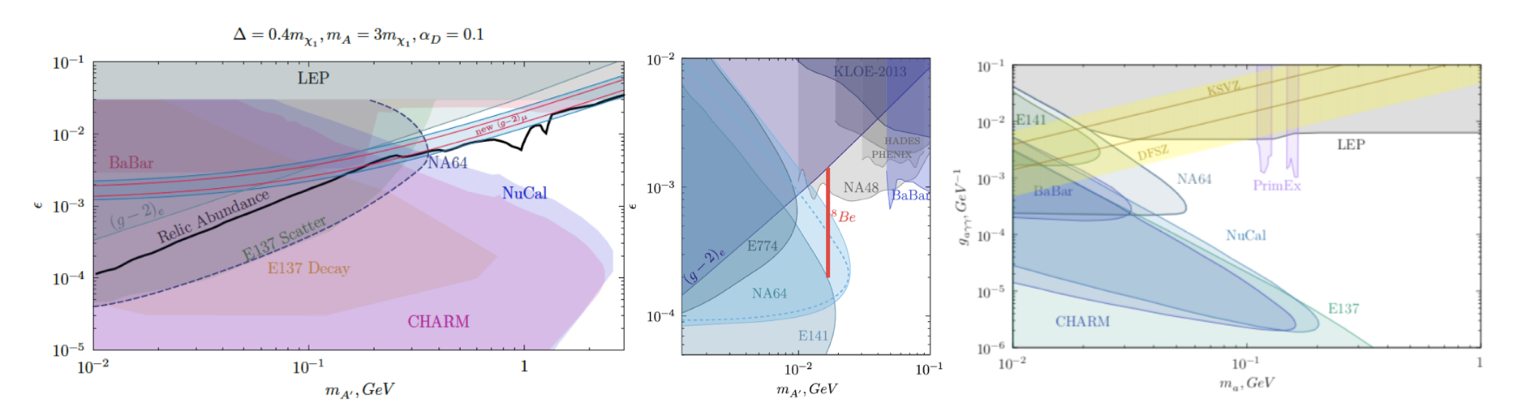


Рис. 3: Текущий статус эксперимента NA64. Результат по исключению на уровне 90% достоверности области существования смешанной моды распадов A’ [20] (слева), видимых распадов (в центре) [15] и области исследования NA64 при поиске АLP [21] (справа).

**Текущий статус и перспективы NA64**

Программа исследований NA64 была очень интенсивно продолжена после LS2 в 2021 года в новой постоянной экспериментальной зоне на канале H4 SPS. Установка отработала 6-недель в 2021 году и 10 недель в 2022, в мае 2023 г начался 8 недельный сеанс по набору данных в невидимой моде. Цель состоит в регистрации ~ 5 · 1012 EOT до остановки ускорителей ЦЕРН для LS3. В зависимости от результатов эксперимента PADME, в 2024 году возможна модернизация установки для набора данных в видимой моде и перекыртия всей области параметров существования гипотетического бозона X17.

На основе статистики, набранной в 2021 году, объединенной с данными 2016-2018 гг (3,2 · 1011 EOT), был проведен поиск нового Z' калибровочного бозона, связанного с (не)нарушенной B–L симметрией в области массы КэВ-ГэВ [22]. Событий кандидатов обнаружено не было, анализ позволил получить новые ограничения на константу связи Z′-e. Для диапазона масс 0.3 < mZ′ < 100 МэВ эти пределы являются наиболее строгими из всех, полученных ранее на основе данных в экспериментах по нейтрино-электронному рассеянию (Рис. 4). Данные также указывают на отсутсвие фона на уровне 1 × 1012. Другая модель исследуемая в настоящее время, основана на существовании легкого Z'-бозона, взаимодействующего только со 2-м и третьим поколениями лептонов. Этот гипотетический бозон связан с электроном через вершинные поправки КЭД, и его существование могло бы объяснить как аномалию (g - 2)μ, так и реликтовую DM. Такой Z' может рождаться с помощью механизма темного тормозного излучения, e−N → e−N Z′, или в резонансной аннигиляции вторичными позитронами из ливня. Используя статистику за 2016-2018 гг., изучался этот сценарий в области связанной с аномалией (g − 2)μ, до mZ′ ∼ 1 МэВ [23]. Такой легкий Z' может быть связан с мюонами, и поэтому его поиск также является одной из физических целей NA64μ, расширения NA64 с использованием высокоэнергетического мюонного пучка [24, 25].

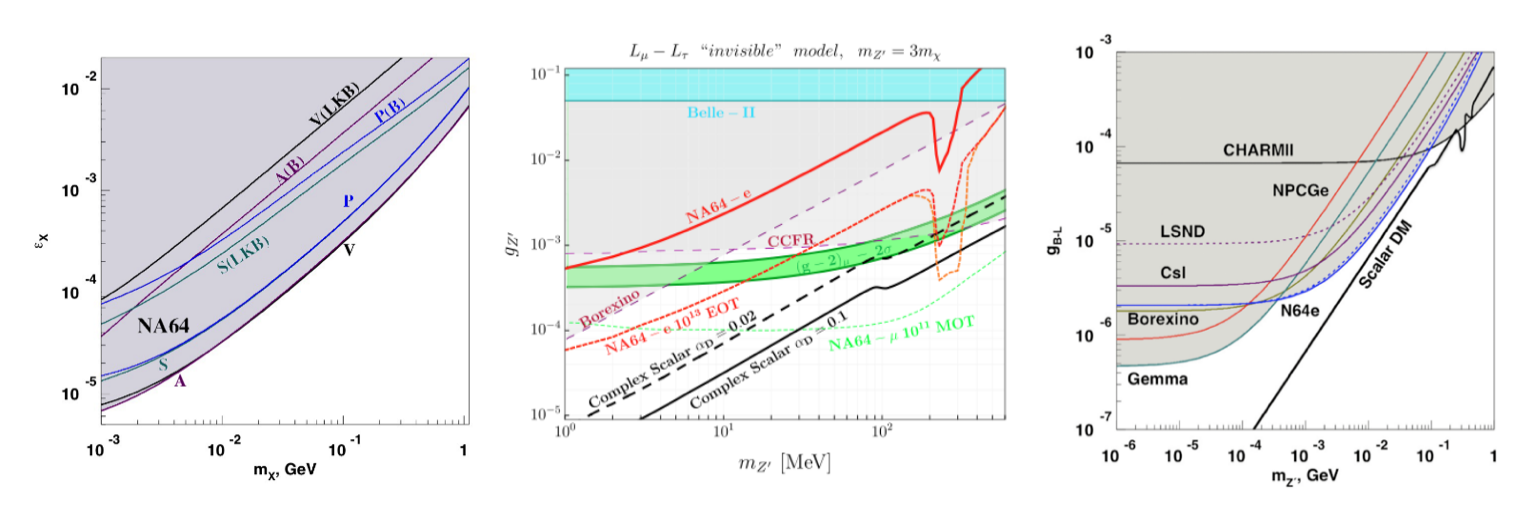


Рис. 4: Слева: Пределы NA64 для обощенного X-бозона: скалярного (S), векторного (V), псевдоскалярного (P) и аксиального векторного (A) случаев [8]. В центре: результаты NA64e по исключению области существования для L μ – Lτ (красная линия), полученные на статистике 2016-2018 гг. для моделей, где Z’ может распадаться на частицы DM [23]. Красными пунктирными линиями показаны проекции чувствительности для будущих сеансов NA64e с использованием электронного (позитронного) пучка, в общей сложности для 1013 EOT, в то время как зеленый пунктир показывает проекцию чувствительности NA64μ. Справа: результаты NA64e по исключению области существования для B-L Z’-бозона [22].

Программа NA64μ была начата в 2021 году с двух пилотных сеансов на канале M2 на уникальном мюонном пучке 160 ГэВ/c ЦЕРН. Она дополняет исследования темного сектора (DS) на канале H4 и нацелена на исследование (g − 2)μ аномалии [25]. Основное отличие экспериментального подхода, используемого в NA64μ, от NA64e заключается в том, что оно требует восстановления импульса для измерения недостающей энергии в возможном Z' или A' распаде. Это делает NA64μ намного более сложным, чем NA64e, где для этой цели используются калориметры. Во время пилотных сеансов 2021 и 2022 гг. в общей сложности было набрано 4 · 1010 MOT. Анализ все еще продолжается, но предварительные результаты указывают на тот факт, что точное определение входящего импульса имеет решающее значение для эксперимента. Это будет протестировано в 2023 году, а первые физические эксперименты ожидаются в 2024-2025 гг. Стоит отметить, что для моделирования процессов Новой Физики и для детального сравнения данных с помощью метода Монте-Карло команда NA64 разработала новый пакет на базе GEANT4 под названием DMG4 [26], который был одобрен сообществом, см. [27].

**Планы и выводы**

NA64 достиг важного этапа набрав ∼ 1012 EOT, что позволяет начать проверку целого ряда моделей LDM. Анализ продолжается, и с увеличением статистики мы ожидаем также повышения чувствительности поиска к ALPs, Lμ-Lτ и B-L Z′, неупругому DM и X-бозону. Планируется набрать как можно большее число EOT до следующей остановки ускорпителей на модернизацию (LS3), если фон будет допустимым, то более активно использовать позитроны для повышения чувствительности в области с большей массой A′. Чтобы изучить влияние примеси адронов при исследованиях на позитроном пучке в 2022 году в течение 2 дней было набрано 1010 POT (анализ продолжается).  
NA64 также начал свою программу на канале M2, предоставляющим уникальный высокой интенсивный пучок мюонов сэнергией 160 ГэВ для исследования DS, слабо связанных с мюонами. Результаты проведенных тестовых сеансов показывают, что на установке можно было бы набрать более 1011 MOT до LS3, чтобы проверить модель Lμ-Lτ Z′ бозона как объяснение мюонной аномалии g-2, и тем самым дополнить исследования на электронах (см. [28]). После LS3 эксперимент продолжит набор статистики с целью зарегистрировать ∼ 1013 MOT, чтобы позволит исследовать область с большей массой A' и процессы μ → τ и μ → e LFV [29].  
В сеансе 2022 года, в течение 1 дня было зарегистрировано ∼ 2 × 109 пионов на мишени, для оценки потенциала NA64 и метода недостающей энергии при изучении темного сектора связанного преимущественно с кварками [30, 31] и целесообразности проведения такого эксперимента, после LS3.

Раскрытие физического потенциала NA64 только началось, предлагаемые методы поиска DS с использованием лептонных и адронных пучков обеспечивают уникальную чувствительность и значительно дополняюют другие поисковые проекты.

**Риски**

* вероятность сокращения общего пучкового времени для экспериментов в ЦЕРН;
* ОИЯИ и научные институты РФ активно участвуют в эксперименте, охватывая почти все основные подсистемы установки. Команда ОИЯИ, в частности, отвечает за аппаратное обеспечение трековых детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок и принимает участие в развитии и работе системы сбора данных с установки NA64. Существует риск для выполнения ОИЯИ и научных институтов РФ своих обязательств из-за в возможных ограничений на сотрудничество.

**References**  
[1] S. Andreas, P. Crivelli, et al. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS. 2013.  
[2] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS. Phys. Rev. Lett., 118(1):011802, 2017.  
[3] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode. Phys. Rev., D97(7):072002, 2018.  
[4] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for a Hypothetical 16.7 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN. Phys. Rev. Lett., 120(23):231802, 2018.

[5] J. P. Lees et al. Search for Invisible Decays of a Dark Photon Produced in e+e− Collisions at BaBar. Phys. Rev. Lett., 119(13):131804, 2017.  
[6] D. Banerjee et al. Dark matter search in missing energy events with NA64. Phys. Rev. Lett., 123(12):121801, 2019.  
[7] D. Banerjee et al. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment. Phys. Rev. Lett.,125(8):081801, 2020.  
[8] Yu. M. Andreev et al. Constraints on New Physics in Electron g − 2 from a Search for Invisible Decays of aScalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector. Phys. Rev. Lett., 126(21):211802, 2021.  
[9] X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, and G. Gabrielse. Measurement of the Electron Magnetic Moment. 9 2022.  
[10] Richard H. Parker, Chenghui Yu, Weicheng Zhong, Brian Estey, and Holger M ̈uller. Measurement of the fine-structure constant as a test of the Standard Model. Science, 360:191, 2018.  
[11] L ́eo Morel, Zhibin Yao, Pierre Clad ́e, and Sa ̈ıda Guellati-Kh ́elifa. Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion. Nature, 588(7836):61–65, 2020.  
[12] S. N. Gninenko. Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN. Phys. Rev., D89(7):075008, 2014.  
[13] A. J. Krasznahorkay et al. Observation of Anomalous Internal Pair Creation in Be8 : A Possible Indication of a Light, Neutral Boson. Phys. Rev. Lett., 116(4):042501, 2016.  
[14] Jonathan L. Feng, Bartosz Fornal, Iftah Galon, Susan Gardner, Jordan Smolinsky, Tim M. P. Tait, and Philip Tanedo. Particle physics models for the 17 MeV anomaly in beryllium nuclear decays. Phys. Rev., D95(3):035017, 2017.  
[15] D. Banerjee et al. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e− pairs. 2019.  
[16] Yu. M. Andreev et al. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e− pairs in the NA64 experiment at the CERN SPS. Phys. Rev. D, 104(11):L111102, 2021.  
[17] E. Depero et al. Hunting down the X17 boson at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C, 80(12):1159, 2020.  
[18] Luc Darm ́e, Marco Mancini, Enrico Nardi, and Mauro Raggi. Resonant search for the X17 boson at PADME. 9 2022.  
[19] Gopolang Mohlabeng. Revisiting the dark photon explanation of the muon anomalous magnetic moment. Phys. Rev. D, 99:115001, Jun 2019.  
[20] C. Cazzaniga et al. Probing the explanation of the muon (g-2) anomaly and thermal light dark matter with the semi-visible dark photon channel. Eur. Phys. J. C, 81(10):959, 2021.  
[21] Sergei Gninenko. NA64 Status Report 2018. Technical Report CERN-SPSC-2018-015. SPSC-SR-231, CERN, Geneva, May 2018.  
[22] Yu. M. Andreev et al. Search for a New B-L Z’ Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN. Phys. Rev. Lett., 129(16):161801, 2022.  
[23] Yu. M. Andreev et al. Search for a light Z’ in the Lμ-Lτ scenario with the NA64-e experiment at CERN. Phys. Rev. D, 106(3):032015, 2022.  
[24] S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov, and V. A. Matveev. Muon g-2 and searches for a new leptophobic sub-GeV dark boson in a missing-energy experiment at CERN. Phys. Rev. D, 91:095015, 2015.  
[25] H. Sieber, D. Banerjee, P. Crivelli, E. Depero, S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, V. Poliakov, and L. Molina Bueno. Prospects in the search for a new light Z’ boson with the NA64μ experiment at the CERN SPS. Phys. Rev. D, 105(5):052006, 2022.  
[26] M. Bondi, A. Celentano, R. R. Dusaev, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, N. V. Krasnikov, L. Marsicano, and D. Shchukin. Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments. Comput. Phys. Commun., 269:108129, 2021.

[27] Tom Eichlersmith, Jeremiah Mans, Omar Moreno, Joseph Muse, Michael Revering, and Natalia Toro. Simulation of Dark Bremsstrahlung in GEANT4. 11 2022.  
[28] S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, and N. V. Krasnikov. Combined search for light dark matter with electron and muon beams at NA64. Phys. Lett. B, 796:117–122, 2019.  
[29] S. N. Gninenko and N. V. Krasnikov. Leptonic scalar portal: Origin of muon g-2 anomaly and dark matter? Phys. Rev. D, 106(1):015003, 2022.  
[30] S. N. Gninenko. Search for invisible decays of π0, η, η′, KS and KL: A probe of new physics and tests using the Bell-Steinberger relation. Phys. Rev. D, 91(1):015004, 2015.  
[31] S. N. Gninenko and N. V. Krasnikov. Invisible KL decays as a probe of new physics. Phys. Rev. D, 92(3):034009, 2015

**2.3. Предполагаемый срок выполнения**

Мы просим продлить проект на 2024-2026гг. Завершение проекта ожидается после 2030 года по завершении физической программы и набору ожидаемой статистики

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

**ЛФВЭ, ЛЯП, ЛТФ**

**2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вычислительные ресурсы** | **Распределение по годам** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
| Хранение данных (ТБ)  - EOS  - Ленты | 0 | 0 | 0 |  |  |
| Tier 1 (ядро-час) | 0 | 0 | 0 |  |  |
| Tier 2 (ядро-час) | 0 | 0 | 0 |  |  |
| СК «Говорун» (ядро-час)  - CPU  - GPU | 0 | 0 | 0 |  |  |
| Облака (CPU ядер) | 0 | 0 | 0 |  |  |

**2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Организация** | **страна** | **Город** | **Участники** | **Тип соглашения** |
| БГУ | Беларусь | Минск | A.Солин+1 | Совместные работы |
| UTFSM  UAB | Чили | Вальпарайзо  Сантьяго | С.Kулешов + 8 | Совместные работы |
| БУ | Германия | Бонн | Б.Keтцер + 2 | Совместные работы |
| ИНФИ | Италия | Генуя | A.Челентано+10 | Совместные работы |
| ИЯИ | Россия | Москва, Троицк | С.Гниненко + 9 | Совместные работы |
| ИФВЭ | Россия | Протвино | В.Поляков + 5 | Совместные работы |
| ФИАН | Россия | Москва | В.Тихомиров + 1 | Совместные работы |
| ТПУ | Россия | Томск | В.Любовитский + 4 | Совместные работы |
| ETH | Швейцария | Цурих | A.Руббиа + 4 | Совместные работы |

**2.6. Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работника** | **Основной персонал, сумма FTE** | **Ассоциированный персонал, сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 4,8 |  |
| 2. | инженеры | 1,5 |  |
| 3. | специалисты |  |  |
| 4. | служащие |  |  |
| 5. | рабочие | 0,2 |  |
|  | **Итого:** | **6,5** |  |

**3.2. Доступные кадровые ресурсы**

**3.2.1. Основной персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **ФИО** | **Подразделение** | **Должность** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники | Матвеев В.А. | Дирекция Института | Научный руководитель ОИЯИ | 0,1 |
| 2 | научные работники | Д.Пешехонов | ЛФВЭ | Наальник отделения | 0,7 |
| 3 | научные работники | Г.Кекелидзе | ЛФВЭ | Начальник сектора | 0,3 |
| 4 | научные работники | В.Крамаренко | ЛФВЭ | снс | 0,4 |
| 5 | научные работники | В.Лысан | ЛФВЭ | нс | 0,2 |
| 6 | научные работники | Т.Еник | ЛФВЭ | снс | 0,3 |
| 7 | научные работники | К.Саламатин | ЛФВЭ | нс | 0,9 |
| 8 | научные работники | П.Волков | ЛФВЭ | нс | 0,5 |
| 9 | научные работники | С.Герценбергер | ЛФВЭ | мнс | 0,5 |
| 10 | научные работники | А.Иванов | ЛФВЭ | нс | 0,3 |
| 11 | научные работники | А.Жевлаков | ЛТФ | снс | 0,4 |
| 12 | научные работники | В.Фролов | ЛЯР | нс | 0,2 |
| 13 | Инженер | Ismail Kambar | ЛФВЭ | инженер | 0,5 |
| 14 | инженер | Э.Касьянова | ЛФВЭ | инженер | 1,0 |
|  | professionals |  |  |  |  |
| 15 | рабочие | И.Жуков | ЛФВЭ | механик | 0,2 |
|  | **Итого** |  |  |  | **6,5** |

**3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **Организация-партнер** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники |  |  |
| 2. | инженеры |  |  |
| 3. | специалисты |  |  |
| 4. | рабочие |  |  |
|  | **Итого:** |  |  |

**4. Финансовое обеспечение**

**4.1. Полная сметная стоимость проекта**

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

**4.2. Внебюджетные источники финансирования**

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

**Руководитель проекта** \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

Дата представления проекта в ДНОД \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Год начала проекта \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(для продлеваемых проектов) –– год начала работ по проекту \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления   
Проекта**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименования затрат, ресурсов,**  **источников финансирования** | | | **Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах** | **Стоимость,**  **распределение по годам** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
|  | | Международное сотрудничество (МНТС) | 180 | 70 | 70 | 40 |  |  |
| Материалы | 156 | 15+37 | 15+37 | 15+37 |  |  |
| Оборудование и услуги сторонних организаций  (пуско-наладочные работы) | 60 | 20 | 20 | 20 |  |  |
| Пуско-наладочные работы |  |  |  |  |  |  |
| Услуги научно-исследовательских организаций | 30 | 10 | 10 | 10 |  |  |
| Приобретение программного обеспечения |  |  |  |  |  |  |
| Проектирование/строительство |  |  |  |  |  |  |
| Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)* |  |  |  |  |  |  |
| **Необходимые ресурсы** | **Нормо-час** | Ресурсы |  |  |  |  |  |  |
| * сумма FTE, | 19,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |  |  |
| * ускорителя/установки, |  |  |  |  |  |  |
| * реактора,….. |  |  |  |  |  |  |
| **Источники финансирования** | **Бюджетные средства** | Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)* | 426 | 152 | 152 | 122 |  |  |
| **Внебюджет (доп. смета)** | Вклады соисполнителей  Средства по договорам  с заказчиками  Другие источники финансирования |  |  |  |  |  |  |

Руководитель проекта \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА**

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА Эксперимент NA64

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА NA64

ШИФР ПРОЕКТА 02-1-1096-2-2010/2026

ШИФР ТЕМЫ 02-1-1096-2010

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА В.А.Матвеев

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | |
| СОГЛАСОВАНО |  |  |  | |
| ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ  РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО  \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА  \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
|  |  |  |  |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |

**Приложение 4.**

***Форма отчета по проекту / подпроекту КИП***

**1. Общие сведения по проекту**

**1.1. Научное направление**

Физика элементарных частиц и релятивистсая ядерная физика

**1.2. Наименование проекта**Эксперимент **NA64**

**1.3. Шифр проекта**

***Пример (04-4-1140-1-2024/2027)*** 02-1-1096-2-2010/2026

**1.4. Шифр темы**

***Пример (тема 04-4-1140-2024, КИП 02-0-1065-2007)*** 02-1-1096-2010

**1.5. Фактический срок реализации проекта / подпроекта КИП**

2020 – в процессе реализации

**1.6. Руководитель(ли) проекта**

В.А.Матвеев

**2. Научный отчет**

**2.1. Аннотация**

Несмотря на активные поиски проявлений темной материи (DM), проводимые на БАК и в экспериментах, не задействующих ускорители, она по-прежнему остается большой загадкой. Несмотря на то, что строгие ограничения, полученные на взаимодействия DM с частицами Стандартной модели (СМ), исключили многие модели DM, мало что известно о происхождении и динамике самого темного сектора. Основная сложность на данный момент заключается в том, что единственный доказанный способ исследовать DM - это с помощью гравитационного взаимодействия. Еще одна возможность заключается в том, что в дополнение к гравитации взаимодействие между темным сектором и видимой материей, может происходить с помощью нового векторного бозона A' (темный фотон). Такой A' связанный со спонтанным нарушением симметрии U(1)D,мог бы обладать массой mA' < 1 ГэВ и взаимодействовать с СМ посредством кинетического смешивания с обычным фотоном, параметризованным силой смешивания << 1. Вышесказанное послужило толчком к тому, чтобы направить теоретические и экспериментальные усилия на поиск проявлений и порталов взаимодействия между видимым и темным секторами, сменив стратегию с высоких энергий на высокую интенсивность.

Дополнительной предпосылкой к существованию A' могут служить указания на астрофизические сигналы темной материи, а также отклонение аномального магнитного момента мюона (g-2)μ на 3,6 σ от предсказаний СМ. Возможное объяснение аномалии (g-2)μ связано с существованием нового легкого (mZ' < 1 ГэВ) векторного бозона, слабо взаимодействующего с мюоном αZ' ~ O(10-8).

Эксперимент NA64 - это эксперимент с фиксированной мишенью на SPS в ЦЕРН. Концепция установки NA64 состоит в создании герметичного детектора для поиска проявлений темного сектора (DS) при регистрации событий с недостающей энергией (missing energy) при рассеянии электронов/позитронов, адронов и мюонов на ядрах.

**2.2. A detailed scientific report**

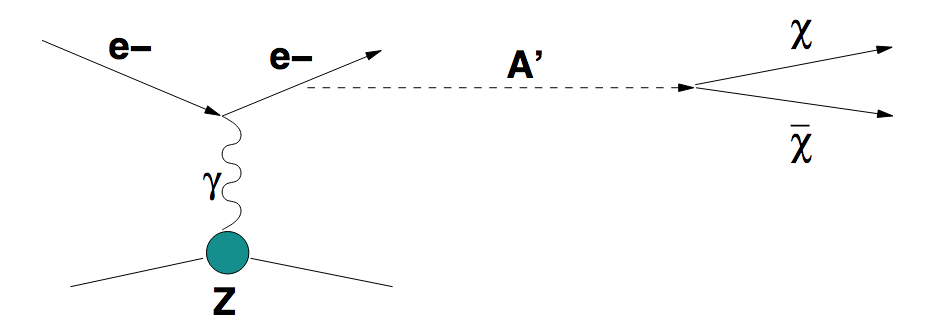
2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования (для подпроекта LRIP).

2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).

Для проведения эксперимента требуется e− пучок высокой энергии с уровнем примеси <1%. Энергия первичного пучка протонов SPS в 400 ГэВ позволяет получать вторичные электронные пучки в диапазоне энергий от 10 до 300 ГэВ с характерной интенсивностью от 107 до 105 электронов за сброс SPS. Примесь других заряженных частиц в пучке (чистота пучка) составляет меньше 10−2.

**Эксперимент по поиску распада A′ → invisible** **(невидимая мода распада на частицы DM)**

A' может распадаться на пару частиц темной материи χ ̄χ. Рождение A' в процессе e−Z → e−ZA′, A′ → invisible изображено на схеме (Рис. 1).

  
Рис. 1. Схема, иллюстрирующая рождение массивного A' в реакции e−Z → e−ZA′ рассеяния электронов на ядре (A,Z) с последующим распадом A' на пару χ ̄χ.

Предполагается, что процесс рождения темного фотона и последующего распада A' → invisible будет очень редким событием. Ожидается, что он будет происходить с частотой ≤10−10 по отношению к частоте рождения обычных фотонов. Отсюда вытекают требования к дизайну и структуре экспериментальной установки. Следовательно, конструкция детектора и его производительность недостаточны для того, чтобы наблюдать этот процесс.

Методика поиска заключается в следующем: A′ может рождаться в результате смешивания с фотонами в процессе тормозного излучения, в рассеянии электронов на ядрах в ECAL. Реакция e−Z → e−ZA′, A'→ invisible как правило будет происходить на первых нескольких радиационных длинах (X0) детектора. Далее A' распадается на две частицы темной материи, которые проходят оставшуюся часть установки без взаимодействия. Доля f энергии первичного пучка E1 = f Ee- выделится в ECAL. Остаточная энергия первичного электрона E2 = (1 − f )Ee уносится вторичными частицами распада A′ → invisible. Часть установки расположенная после ECAL предназначена для поглощения возможной остаточной энергии электромагнитного ливня, хотя толщина ECAL составляет ≃ 40 X0 (рад. длины) и вероятность утечки из ECAL пренебрежимо мала. Чтобы избежать фоновых событий из-за неэффективности детектора, он должен быть полностью герметичным по пучку, поэтому позади ECAL помещается адронный калориметр (HCAL) имеющий толщину ≃ 15 − 20 λint (Рис. 2). Калориметр ECAL в свою очередь должен обеспечивать измерение поперечного и продольного развития ливня. Для этого используется структура “сэндвич” PbSc с матрицей 6x6 и ячейками 38x38x490 мм3 с энергетическим разрешением ~9%/√E (ГэВ).

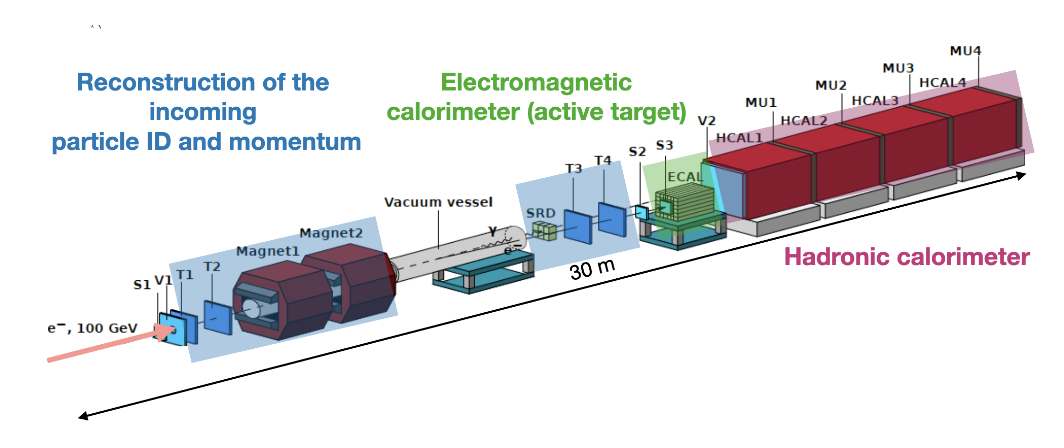


Рис. 2: Установка NА64 и ее принцип работы для поиска темных фотонов по недостающей электронной энергии в активной мишени (ECAL). Установка вплоть до ECAL отвечает за восстановление типа и импульса входящей частицы.

Факт возникновения распада A' → invisible, при взаимодействиях e−Z, будет выглядеть бы как событие с единичным e-m ливнем в ECAL и нулевым выделением энергии в остальной части детектора (не превышающим возникающих от возможных источников фона).

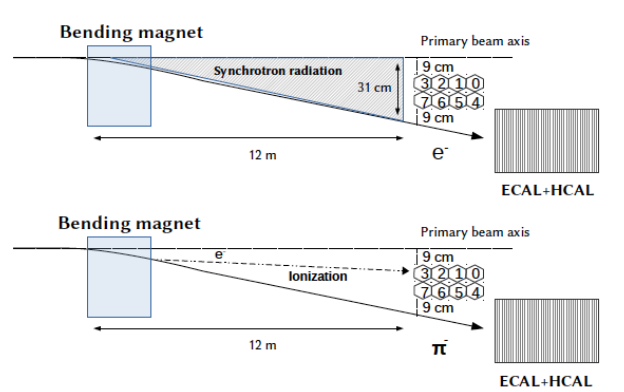


Рис. 3. Схема мечения электронов пучка высокой энергии за счет использования их синхротронного излученияв дипольном магните. Фотоны синхротронного излучения регистрируются γ- детектором с использованием LYSO кристалла (Sc), способного работать в вакууме. Кристалл просматривается с помощью фотодетектора с высокой квантовой эффективностью, например, PMT, SiPM или APD. Выход синхротронного излучения составляет ~1/m4, а подавление примеси пучка > 105.

Таким образом события-кандидаты на искомый сигнал должны удовлетворять следующим критериям отбора:

• Начальная точка (e-m) ливней в ECAL должна быть локализована в пределах нескольких пер-вых радиационных длин X0.  
• Поперечное и продольное развитие ливня в ECAL соответствуют форме электромагнитного ливня. Доля общего поглощения энергии в ECAL1 составляет f < 0,5.

• Отсутствует сигнал о поглощении энергии в HCAL.

Один из основных источников фона связан с “низкоэнергетическим хвостом” в распределении энергии электронов в первичном пучке. Происхождение “низкоэнергетического хвоста” вызвано взаимодействием электронов с пассивным веществом в пучке, таким, например, как входные окна каналов пучка, остаточный газ и т.д. Другой источник появления таких электронов связан с распадами пионов или мюонов при транспортировке пучка в канале.

Чтобы улучшить отбор электронов пучка и дополнительно подавить фон от возможного присутствия в нем электронов с низкой энергией в пучке, обычно с энергией <0,1Ee- (см. ниже), используется система мечения e− высокой энергии, путем измерения испускаемого ими синхротронного излучения (SR) в дипольном магните, как показано на Рис. 3. Идея заключается в том, что, электроны с низкой энергией могут быть отсеяны с помощью соответствующего cut поскольку энергия SR фотона ~ Ee-3.

Адронный фон может быть вызван тем, что адроны ошибочно идентифицируются как электроны. Этот источник фона связан с наличием примеси пионов, протонов и т.д. в пучке электронов. Другим источником такого рода фона является рождение адронов в ECAL. Ожидаемый консервативный вклад от различных источников фона для пучка с энергией 100 ГэВ составляет <10-12.

**Эксперимент по поиску распада A′ → e+e−**

Схема модернизации экспериментальной установки для поиска распадов A′ → e+e− представлена на Рис. 4.

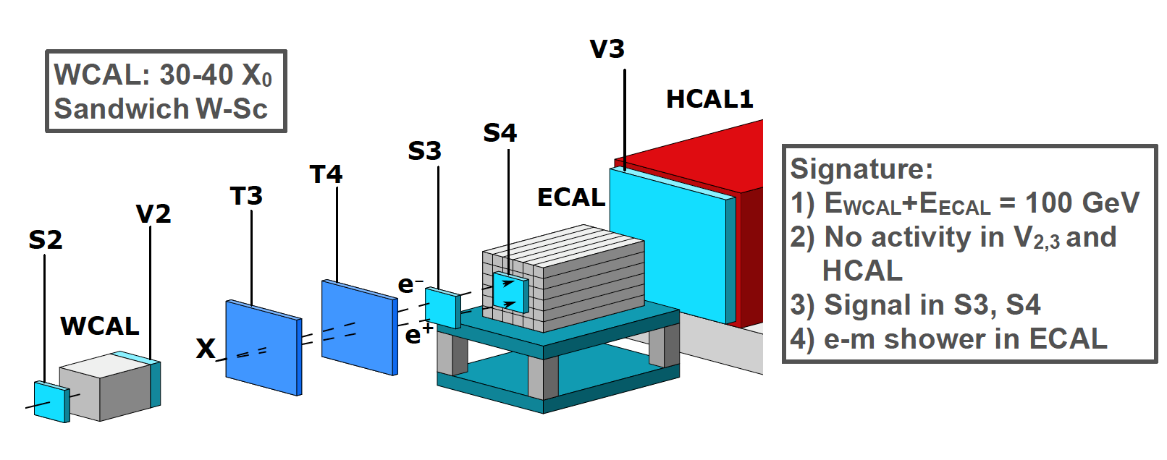


Рис. 4. Схематическое изображение модернизации установки для поиска темных фотонов в эксперименте типа "свет, проникающий сквозь стену" при высоких энергиях. Поглощение энергии электронов пучка в калориметре WCAL сопровождается излучением A′ в реакции eZ → eZA′ рассеяния электронов на ядрах из−за смешивания γ - A'. Часть энергии первичного пучка остается в WCAL, в то время как остальная часть энергии уносится A', который проходит через WCAL без взаимодействий и распадается на e+e− пару, которая генерирует второй электромагнитный ливень в ECAL, приводящий к сигнатуре из двух ливней в детекторе. Суммарная энергия, поглощенная в WCAL+ECAL, равна энергии первичного электрона пучка.

В данной моде эксперимента WCAL является активной мишенью. Остаточная энергии первичных электронов E2 = (1 − f )Ee- уносится через "стенку WCAL" A' и поглощается в расположенном дальше по пучку ECAL вследсвии распада A' на лету, как показано на Рис. 4. При высоких энергиях A' , EA′ > 30 ГэВ угол разлета Θe+e− ≃ MA′ /EA′ между частицами пары e+e− слишком мал для возможности разделения двух e-m ливней в ECAL, поэтому регистрируется единый/суммарный электромагнитный ливень. На дистаниции, превышающей 5 м от WCAL, треки электрона и позитрона могут быть разделены трековыми детекторами, поскольку расстояние между хитами треков составляет более 5 мм. Факт распада A′ → e+e−, вызванного взаимодействием e−Z, таким образом выглядел бы как появление события с двумя e-m-подобными ливнями в детекторе (Рис. 4).

**Эксперимент по поиску частиц темного сектора, слабо взаимодействующих с мюонами**

Коллаборация NA64 предлагает расширить поиск темного сектора и других редких процессов в событиях с недостающей энергией на пучках мюонов высоких энергий в герметичном детекторе на SPS в CERN. Ряд теоретических моделей предсказывает существование частиц темныого сектора преимущественно слабо связанных со вторым и, возможно, третьим поколениями частиц Стандартной Модели,. В дополнение к гравитации это новое очень слабое взаимодействие между видимым и темным секторами может быть объяснено либо скалярными (Sμ), либо U'(1) калибровочными бозонами (Zμ), взаимодействующими с обычными мюонами. В классе моделей Lμ - Lτ соответствующий Zμ может быть легким и взаимодействать в экспериментально доступной области. Если такой Zμ-переносчик существует, то это могло бы также объяснить аномалию (g - 2) μ - несоответствие между предсказанными и измеренными значениями аномального магнитного момента мюона. NA64 предложило расширение основного эксперимента новым, под названием NA64μ для поиска распадов Zμ на нейтрино, либо на легкие частицы темной материи. Схема экспериментальной установки представлена на Рис.5.

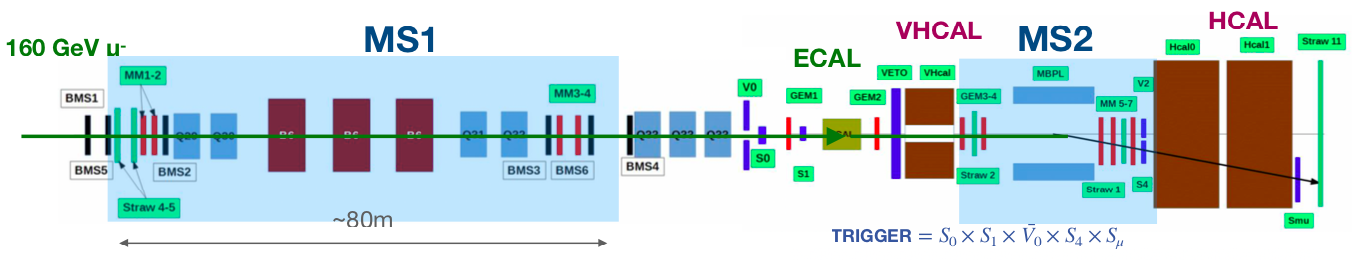


Рис. 5. Схематическое изображение установки для поиска DM с помощью мюонного пучка высоких энергий в ЦЕРН.

В детекторе, представленном на Рис. 5 используются два магнитных спектрометра до (MS1) и после (MS2) мишени. Спектрометры нужны для независимого измерения импульса налетающего и рассеянного мюона, соответственно. Трековая система состоит из детекторов Micromegas с низким содержанием вещества, GEM и строу-камер, позволяющих восстанавливать и точно измерять импульсы падающих и рассеянных мюонов. Активнаоймишенью является высокоэффективным электромагнитным калориметром (ECAL). За ней по по пучку расположен высокоэффективный вето-детектор HCAL (VHCAL) с небольшим входным отверстием и массивный герметичный адронный калориметр (HCAL) в конце установки. Все они служат для регистрации вторичных и нейтральных частиц, образующихся в результате взаимодействия мюонов с мишенью. HCAL состоит из нескольких модулей, каждый из которых имеет поперечную и продольную сегментацию. Для обеспечения герметичности установки толщина HCAL составляет ~ 30 λint (длин ядерного взаимодействия).

Метод экспериментального поиска заключается в следующем: Zμ может образоваться в реакции μ + Z → μ' + Z + Zμ, по всей длине мишени (T). Доля (f) энергии первичного пучка E'μ= fEμ уносится рассеянным мюоном, который регистрируется вторым магнитным спектрометром (Рис. 5), настроенным на эффективную регистрацию импульса рассеянного мюона p'μ < pμ. Оставшаяся часть энергии первичного мюона (1-f)Eμ уносится за пределы всех детекторов, в результате чего получаем недостающую энергию Emiss = Eμ - E'μ.

Возниковнение Zμ, рождающегося при взаимодействиях μ-Z, выглядит как появление на уровне выше ожидаемого от источников фона количества событий с одним рассеянным мюоном с энергией меньше начальной и отсутсвиес энерговыделения в детекторах установки, как показано на Рис. 5.

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Предложение (P348) по поиску проявлений темныого сектора на супер-протонном синхротроне SPS (ЦЕРН) [1] было одобрено комитетом SPS (SPSC) в апреле 2014 года. В 2015 году группе предоставили возможность провести пробный сеанс для ТЭО, и в марте 2016 года проект был одобрен в качестве эксперимента №64 для проведения в северной зоне (NA64) ЦЕРН. Установка NA64 представляет собой герметичный детектор общего назначения для поиска проявлений темного сектора (DS) при регистрации событий с недостающей энергией (missing energy) при рассеянии электронов/позитронов, адронов и мюонов на ядрах. Основное внимание в эксперименте NA64 уделяется легкой темной материи (LDM), взаимодействующей со Стандартной моделью (SM) через векторный (или другой) портал, такой, например, как темные фотоны (A'), а также множеству сценариев проявления Новой Физики. В *e-*-моде эксперимента (NA64e) используется пучок электронов с энергией 100 ГэВ на канале H4. Пучок формируется таким образом, чтобы получать электроны с максимальной интенсивностью порядка 107 за сброс SPS с растяжкой 4,8 с в диапазоне импульсов от 50 до 150 ГэВ/c. Измеренная примесь адронов в электронном пучке находится на уровне π/e− < 2% и K/e− < 0,3%. Эксперимент NA64 работал с 2016 по 2018 год, и после остановки БАК на модернизацию (LS2) в 2021 году мы возобновили набор данных на новом постоянном месте на канале H4 ЦЕРН. Несмотря на то, что эксперимент только начался, уже получен ряд интересных результатов [2-4] представленных в данном отчете, структурированном по исследуемым модам распада A'.

**Невидимая мода:** Коллаборация NA64 первой предложила комбинировать техники активной мишени и недостающей энергии для поиска невидимых распадов темного фотона A', образующегося в мишени ECAL (электромагнитном калориметре) в результате реакции тормозного излучения e-Z → e−ZA', в процессе взаимодействия электронов с ядрами с зарядом Z. После рождения A' может распасться на пару частиц LDM, A' → χχ не регистрируемых детекторами, таким образом сигнатурой распада является процесс с недостающей энергией. Поэтому такая мода распада называется невидимой. Пространство параметров, где т.н. сила смешивания составляет 10−6 < ε < 10−3 и масса mA' находится в субгэвном диапазоне, является областью исследования NA64, где происхождение DM объясняется следствием термического вымораживания. Эксперименты с недостающей энергией, такие как NA64, требуют знания параметров налетающего пучка (импульса и типа частицы) и точного измерения энергии, потерянной в результате взаимодействия в установке. Полезное событие идентифицируется как одиночный электромагнитный ливень в ECAL с энергией EECAL ниже заданного порога, сопровождаемый значительной недостающей энергией Emiss = EA′ = Einitial − EECAL. Рождение A' ассоциируется с событием в том случае, если есть превышение над ожидаемыйм фоном. На Рис. 1 представлена схема установки иллюструющая принцип работы NA64. Выходной сигнал при использовании техники активной мишени пропорционален ε2, таким образом, повышается чувствительность измерения в сравнении с сигналом ∝ αDε4 при сбросе пучка на обычную мишень, когда распад A' измеряется только детектором, расположенным после точки рождения.

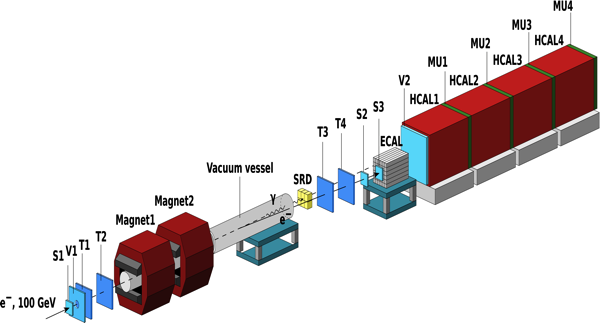


Рис. 1: Установка NA64 для поиска темных фотонов по недостающей энергии в активной мишени (ECAL). Передняя часть установки до ECAL отвечает за идентификацию частиц и измерение их импульса.

Основные результаты, полученные на данный момент в невидимой *e-*-моде:

в ходе сеансов 2016-2018 гг. суммарно было набрано 3 · 1011 EOT. Полезный сигнал не был обнаружен, однако результаты анализа данных, представленные на Рис. 2, устанавливают наиболее строгий предел для LDM в области массы А’ ниже 0,1 ГэВ для канонических контрольных параметров αD = 0,1 и mA′ = 3mχ. Кроме того, эти данные позволили исключить большую часть области пространства параметров, для объяснение мюонной аномалии g − 2 (левый плот, полоса αµ Рис. 2). После публикации результатов BABAR оставшаяся область пространства параметров, которая могла бы объяснить проблему (g-2)µ вкладом темного фотона была полностью исключена [5]. На сегодняшний день NA64 является ведущим экспериментом на выведенных пучках ускорителя в этой области энергии. Эти результаты были опубликованы как «выбор редактора» журнала PRL [6].

В дополнение к реакции тормозного излучения рассматривался резонансный канал рождения А' посредством электрон-позитронной аннигиляции в электромагнитном ливне. Комбинированный результаты анализа данных NA64 на 90% уровне достоверности представлены на Рис. 2. Включение резонансного процесса в анализ данных позволяет повысить чувствительность, что приводит к пику для массы темного фотона в районе 200 МэВ. Добавление этого процесса улучшает чувствительность NA64 в области больших масс, где выход темных фотонов подавлен зависимостью сечения тормозного излучения ~1/m2A′ (см. [6]). Использование позитронов в качестве первичного пучка увеличивает на порядок чувствительность к массе в зависимости от энергии пучка. Диапазон масс темного фотона может быть дополнительно расширен путем сканирования по энергии позитронного пучка. Недостаток заключается в том, что приходится иметь дело с примерно на порядок большей примесью адронов в пучке, поскольку вторичные частицы создаются первичными протонами SPS с энергией 400 ГэВ, и, таким образом, положительно заряженных адронов больше, чем их отрицательных. Чтобы изучить влияние примеси адронов и возможного результирующего фона, во время сеанса 2022 года был проведен первый тестовый набор данных на пучке позитронов с энергией 100 ГэВ (см. ниже). Эксперименты с пучками электронов и позитронов позволяют исследовать альтернативные сценарии гипотезы о темных фотонах. NA64 уже подтвердил свой потенциал для поиска легких скалярных, а также псевдоскалярных аксионоподобных частиц (ALPs), образующихся в результате реакции Примакова [7]. Область исследования NA64 перекрывает пробел между границами ранее проводимыми экспериментами на выведенных пучках и LEP (см. правый график на Рис. 3). Также можно было бы провести поиск обобщенного Х-бозона, связанного с электронами. Хорошим результатом является то, что чувствительность NA64 на порядок выше, чем в других прецизионных экспериментах [8]. Однако следует отметить, что в NA64 мы предполагаем, что X-бозон распадается невидимо, в то время как g-2 аномалия [9] и измерения тонкой структуры [10, 11] являются модельно-независимыми.

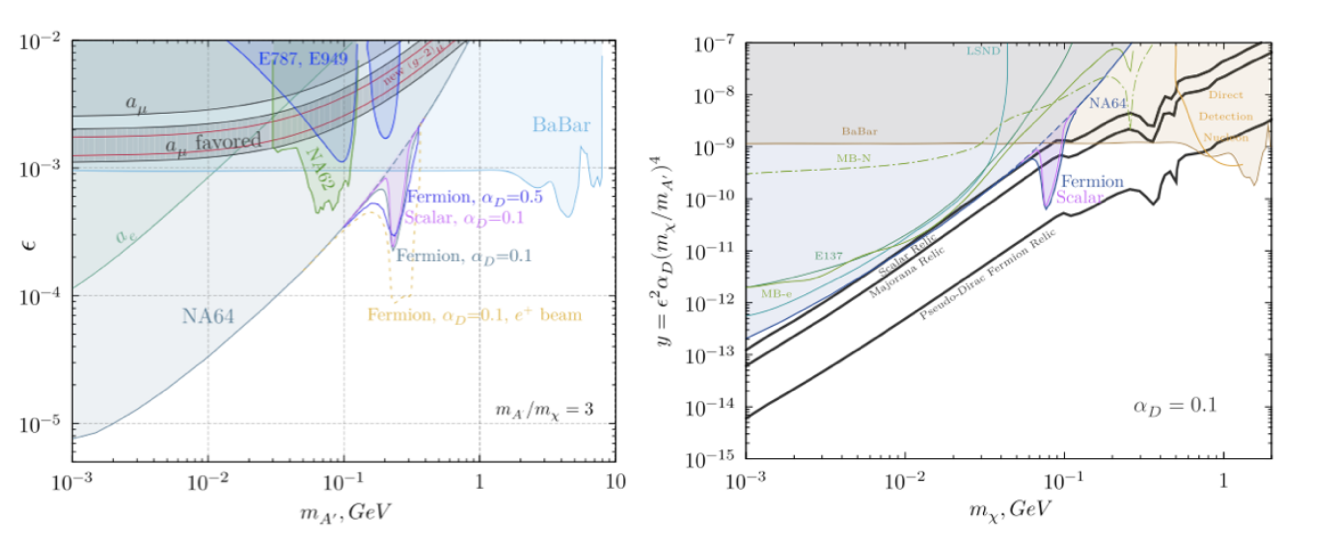


Рис. 2: Текущий статус эксперимента NA64. Результат по исключению на уровне 90% достоверности области существования невидимых распадов A’, включая как тормозное излучение, так и поиск резонансного канала рождения A’ (слева). Поиск LDM (справа) [6].

**Видимая мода**: Метод поиска A′ → e+e− (X → e+e−) распадов описан в [1, 12]. В этом случае установку модифицируют, путем добавления дополнительного компактного электромагнитного калориметра расположенного за ECAL по пучку. A' может рождаться в процессе: e− + Z → e− + Z + A′(X); покинуть область активной мишени и впоследствии распасться на пару e+e− A′(X) → e+e−. Энергия пары должна быть равна энергии, недостающей в мишени. Таким образом, сигнатура распада A′(X) → e+e− представляет собой событие с двумя электромагнитно-подобными ливнями в детекторе: один в ECAL, другой в калориметре расположенном дальше по пучку с суммарной энергией, равной энергии пучка.

В сеансах 2017-2018 гг. года было набрано ~ 1011 EOT. Событий в сигнальной области не было обнаружено. Эти результаты устанавливают первые ограничения на связь X − e− в диапазоне 1,2 × 10−4 < εe < 6,8 × 10−4, практически исключая область пространства параметров, допускаемых для объяснения существования так называемой бериллиевой аномалии [13], существованием нового X-бозона с массой около 17 МэВ (частица X17) [14]. Установлены новые ограничения для силы смешивания фотонов с темными фотонами (A') из-за отсутствия наблюдения распада A′ → e+e− тормозного излучения A' с массой менее 23 МэВ. Результаты 2017 г. были выбраны и опубликованы как «выбор редактора» в журнале Phys. Rev. Lett. 5 [4], а также в Phys. Rev. D Rapid [15]. Недавно эти поиски были расширены для псевдоскалярной частицы, которая наблюдаемо распадается на лептонную пару; результат был опубликован в Phys. Rev. D [16].

Для завершения исследования оставшейся области параметров, планируется использовать новый меньший по размеру оптимизированный вольфрамовый WCAL и модернизированный спектрометр с возможностью восстановления инвариантной массы X17[17]. Поскольку этот эксперимент не может проводиться параллельно с исследованием в невидимой моде, он был отложен. Для сканирования оставшейся области параметров X17 NA64 необходимо около 30 дней пучкового времени, поэтому, если результаты эксперимента PADME, в котором в настоящее время ведется набор данных [18], подтвердят эту аномалию, мы сможем перепроверить это в 2024 году.

**Смешанная мода**: существуют альтернативные, расширенные, сценарии предусматривающие разделение DM по массе, которые могут привести к появлению сигнатуры, представляющей собой комбинацию описанных выше. Очень интригующая особенность этого канала связана с возможностью как поиска DM, так и объяснения (g - 2)μ аномалии, снимая существующие экспериментальные ограничения для чистых видимой и невидимой мод [19]. Эти типы моделей известны как неупругие DM, и мы называем их сигнатуры смешанным каналом. Анализ, на комбинированных данных 2016-2018 гг. [20] (см. график слева на Рис. 3) продемонстрировал потенциал установки NA64 для исследований этого класса моделей.

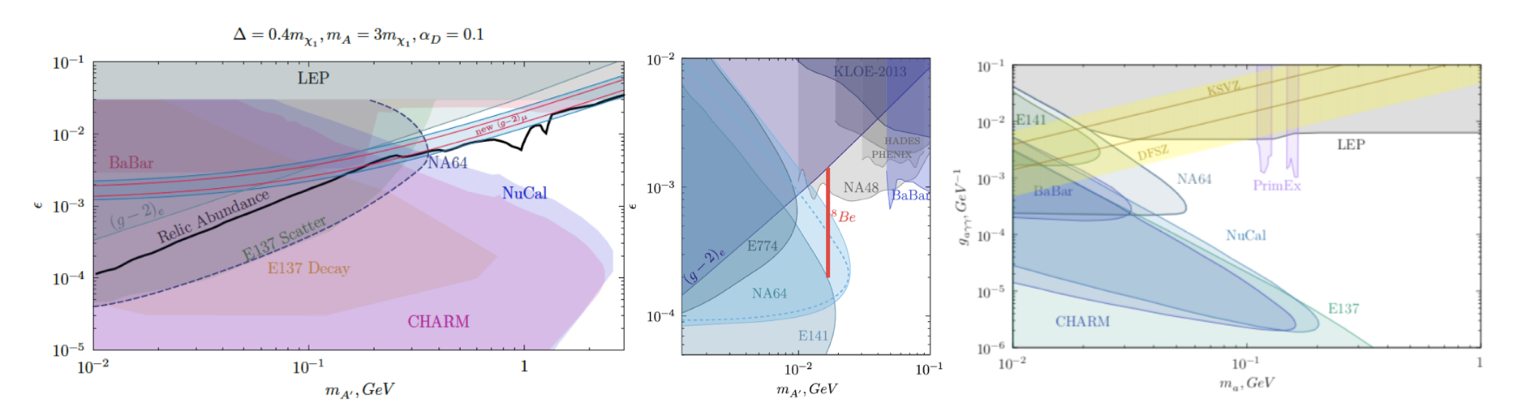


Рис. 3: Текущий статус эксперимента NA64. Результат по исключению на уровне 90% достоверности области существования смешанной моды распадов A’ [20] (слева), видимых распадов (в центре) [15] и области исследования NA64 при поиске АLP [21] (справа).

**Текущий статус и перспективы NA64**

Программа исследований NA64 была очень интенсивно продолжена после LS2 в 2021 года в новой постоянной экспериментальной зоне на канале H4 SPS. Установка отработала 6-недель в 2021 году и 10 недель в 2022, в мае 2023 г начался 8 недельный сеанс по набору данных в невидимой моде. Цель состоит в регистрации ~ 5 · 1012 EOT до остановки ускорителей ЦЕРН для LS3. В зависимости от результатов эксперимента PADME, в 2024 году возможна модернизация установки для набора данных в видимой моде и перекыртия всей области параметров существования гипотетического бозона X17.

На основе статистики, набранной в 2021 году, объединенной с данными 2016-2018 гг (3,2 · 1011 EOT), был проведен поиск нового Z' калибровочного бозона, связанного с (не)нарушенной B–L симметрией в области массы КэВ-ГэВ [22]. Событий кандидатов обнаружено не было, анализ позволил получить новые ограничения на константу связи Z′-e. Для диапазона масс 0.3 < mZ′ < 100 МэВ эти пределы являются наиболее строгими из всех, полученных ранее на основе данных в экспериментах по нейтрино-электронному рассеянию (Рис. 4). Данные также указывают на отсутсвие фона на уровне 1 × 1012. Другая модель исследуемая в настоящее время, основана на существовании легкого Z'-бозона, взаимодействующего только со 2-м и третьим поколениями лептонов. Этот гипотетический бозон связан с электроном через вершинные поправки КЭД, и его существование могло бы объяснить как аномалию (g - 2)μ, так и реликтовую DM. Такой Z' может рождаться с помощью механизма темного тормозного излучения, e−N → e−N Z′, или в резонансной аннигиляции вторичными позитронами из ливня. Используя статистику за 2016-2018 гг., изучался этот сценарий в области связанной с аномалией (g − 2)μ, до mZ′ ∼ 1 МэВ [23]. Такой легкий Z' может быть связан с мюонами, и поэтому его поиск также является одной из физических целей NA64μ, расширения NA64 с использованием высокоэнергетического мюонного пучка [24, 25].

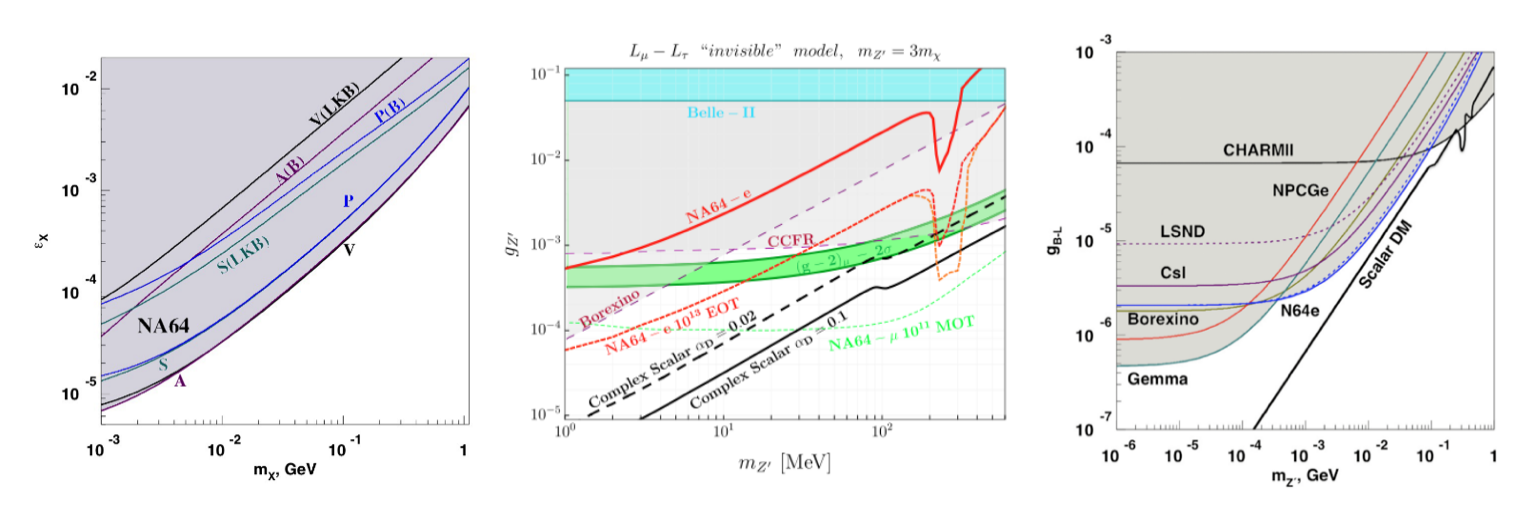


Рис. 4: Слева: Пределы NA64 для обощенного X-бозона: скалярного (S), векторного (V), псевдоскалярного (P) и аксиального векторного (A) случаев [8]. В центре: результаты NA64e по исключению области существования для L μ – Lτ (красная линия), полученные на статистике 2016-2018 гг. для моделей, где Z’ может распадаться на частицы DM [23]. Красными пунктирными линиями показаны проекции чувствительности для будущих сеансов NA64e с использованием электронного (позитронного) пучка, в общей сложности для 1013 EOT, в то время как зеленый пунктир показывает проекцию чувствительности NA64μ. Справа: результаты NA64e по исключению области существования для B-L Z’-бозона [22].

Программа NA64μ была начата в 2021 году с двух пилотных сеансов на канале M2 на уникальном мюонном пучке 160 ГэВ/c ЦЕРН. Она дополняет исследования темного сектора (DS) на канале H4 и нацелена на исследование (g − 2)μ аномалии [25]. Основное отличие экспериментального подхода, используемого в NA64μ, от NA64e заключается в том, что оно требует восстановления импульса для измерения недостающей энергии в возможном Z' или A' распаде. Это делает NA64μ намного более сложным, чем NA64e, где для этой цели используются калориметры. Во время пилотных сеансов 2021 и 2022 гг. в общей сложности было набрано 4 · 1010 MOT. Анализ все еще продолжается, но предварительные результаты указывают на тот факт, что точное определение входящего импульса имеет решающее значение для эксперимента. Это будет протестировано в 2023 году, а первые физические эксперименты ожидаются в 2024-2025 гг. Стоит отметить, что для моделирования процессов Новой Физики и для детального сравнения данных с помощью метода Монте-Карло команда NA64 разработала новый пакет на базе GEANT4 под названием DMG4 [26], который был одобрен сообществом, см. [27].

**Планы и выводы**

NA64 достиг важного этапа набрав ∼ 1012 EOT, что позволяет начать проверку целого ряда моделей LDM. Анализ продолжается, и с увеличением статистики мы ожидаем также повышения чувствительности поиска к ALPs, Lμ-Lτ и B-L Z′, неупругому DM и X-бозону. Планируется набрать как можно большее число EOT до следующей остановки ускорпителей на модернизацию (LS3), если фон будет допустимым, то более активно использовать позитроны для повышения чувствительности в области с большей массой A′. Чтобы изучить влияние примеси адронов при исследованиях на позитроном пучке в 2022 году в течение 2 дней было набрано 1010 POT (анализ продолжается).  
NA64 также начал свою программу на канале M2, предоставляющим уникальный высокой интенсивный пучок мюонов сэнергией 160 ГэВ для исследования DS, слабо связанных с мюонами. Результаты проведенных тестовых сеансов показывают, что на установке можно было бы набрать более 1011 MOT до LS3, чтобы проверить модель Lμ-Lτ Z′ бозона как объяснение мюонной аномалии g-2, и тем самым дополнить исследования на электронах (см. [28]). После LS3 эксперимент продолжит набор статистики с целью зарегистрировать ∼ 1013 MOT, чтобы позволит исследовать область с большей массой A' и процессы μ → τ и μ → e LFV [29].  
В сеансе 2022 года, в течение 1 дня было зарегистрировано ∼ 2 × 109 пионов на мишени, для оценки потенциала NA64 и метода недостающей энергии при изучении темного сектора связанного преимущественно с кварками [30, 31] и целесообразности проведения такого эксперимента, после LS3.

Раскрытие физического потенциала NA64 только началось, предлагаемые методы поиска DS с использованием лептонных и адронных пучков обеспечивают уникальную чувствительность и значительно дополняюют другие поисковые проекты.

**References**  
[1] S. Andreas, P. Crivelli, et al. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS. 2013.  
[2] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS. Phys. Rev. Lett., 118(1):011802, 2017.  
[3] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode. Phys. Rev., D97(7):072002, 2018.  
[4] D. Banerjee, P. Crivelli, et al. Search for a Hypothetical 16.7 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN. Phys. Rev. Lett., 120(23):231802, 2018.

[5] J. P. Lees et al. Search for Invisible Decays of a Dark Photon Produced in e+e− Collisions at BaBar. Phys. Rev. Lett., 119(13):131804, 2017.  
[6] D. Banerjee et al. Dark matter search in missing energy events with NA64. Phys. Rev. Lett., 123(12):121801, 2019.  
[7] D. Banerjee et al. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment. Phys. Rev. Lett.,125(8):081801, 2020.  
[8] Yu. M. Andreev et al. Constraints on New Physics in Electron g − 2 from a Search for Invisible Decays of aScalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector. Phys. Rev. Lett., 126(21):211802, 2021.  
[9] X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, and G. Gabrielse. Measurement of the Electron Magnetic Moment. 9 2022.  
[10] Richard H. Parker, Chenghui Yu, Weicheng Zhong, Brian Estey, and Holger M ̈uller. Measurement of the fine-structure constant as a test of the Standard Model. Science, 360:191, 2018.  
[11] L ́eo Morel, Zhibin Yao, Pierre Clad ́e, and Sa ̈ıda Guellati-Kh ́elifa. Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion. Nature, 588(7836):61–65, 2020.  
[12] S. N. Gninenko. Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN. Phys. Rev., D89(7):075008, 2014.  
[13] A. J. Krasznahorkay et al. Observation of Anomalous Internal Pair Creation in Be8 : A Possible Indication of a Light, Neutral Boson. Phys. Rev. Lett., 116(4):042501, 2016.  
[14] Jonathan L. Feng, Bartosz Fornal, Iftah Galon, Susan Gardner, Jordan Smolinsky, Tim M. P. Tait, and Philip Tanedo. Particle physics models for the 17 MeV anomaly in beryllium nuclear decays. Phys. Rev., D95(3):035017, 2017.  
[15] D. Banerjee et al. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e− pairs. 2019.  
[16] Yu. M. Andreev et al. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e− pairs in the NA64 experiment at the CERN SPS. Phys. Rev. D, 104(11):L111102, 2021.  
[17] E. Depero et al. Hunting down the X17 boson at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C, 80(12):1159, 2020.  
[18] Luc Darm ́e, Marco Mancini, Enrico Nardi, and Mauro Raggi. Resonant search for the X17 boson at PADME. 9 2022.  
[19] Gopolang Mohlabeng. Revisiting the dark photon explanation of the muon anomalous magnetic moment. Phys. Rev. D, 99:115001, Jun 2019.  
[20] C. Cazzaniga et al. Probing the explanation of the muon (g-2) anomaly and thermal light dark matter with the semi-visible dark photon channel. Eur. Phys. J. C, 81(10):959, 2021.  
[21] Sergei Gninenko. NA64 Status Report 2018. Technical Report CERN-SPSC-2018-015. SPSC-SR-231, CERN, Geneva, May 2018.  
[22] Yu. M. Andreev et al. Search for a New B-L Z’ Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN. Phys. Rev. Lett., 129(16):161801, 2022.  
[23] Yu. M. Andreev et al. Search for a light Z’ in the Lμ-Lτ scenario with the NA64-e experiment at CERN. Phys. Rev. D, 106(3):032015, 2022.  
[24] S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov, and V. A. Matveev. Muon g-2 and searches for a new leptophobic sub-GeV dark boson in a missing-energy experiment at CERN. Phys. Rev. D, 91:095015, 2015.  
[25] H. Sieber, D. Banerjee, P. Crivelli, E. Depero, S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, V. Poliakov, and L. Molina Bueno. Prospects in the search for a new light Z’ boson with the NA64μ experiment at the CERN SPS. Phys. Rev. D, 105(5):052006, 2022.  
[26] M. Bondi, A. Celentano, R. R. Dusaev, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, N. V. Krasnikov, L. Marsicano, and D. Shchukin. Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments. Comput. Phys. Commun., 269:108129, 2021.

[27] Tom Eichlersmith, Jeremiah Mans, Omar Moreno, Joseph Muse, Michael Revering, and Natalia Toro. Simulation of Dark Bremsstrahlung in GEANT4. 11 2022.  
[28] S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, and N. V. Krasnikov. Combined search for light dark matter with electron and muon beams at NA64. Phys. Lett. B, 796:117–122, 2019.  
[29] S. N. Gninenko and N. V. Krasnikov. Leptonic scalar portal: Origin of muon g-2 anomaly and dark matter? Phys. Rev. D, 106(1):015003, 2022.  
[30] S. N. Gninenko. Search for invisible decays of π0, η, η′, KS and KL: A probe of new physics and tests using the Bell-Steinberger relation. Phys. Rev. D, 91(1):015004, 2015.  
[31] S. N. Gninenko and N. V. Krasnikov. Invisible KL decays as a probe of new physics. Phys. Rev. D, 92(3):034009, 2015

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).

1. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e- pairs. *D. Banerjee (CERN and Illinois U., Urbana (main)), J. Bernhard (CERN), V.E. Burtsev (Dubna, JINR), A.G. Chumakov (Tomsk Pedagogical Inst.), D. Cooke (University Coll. London), P. Crivel и др.,* Phys.Rev.D, 101,7, 071101, 2020
2. Hunting down the X17 boson at the CERN SPS. *NA64 Collaboration,* The European Physical Journal C - Particles and Fields, Изд:Springer, 80, 2020
3. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e- pairs  
   *N.V.Krasnikov et al.(NA64 Collaboration),* Physical Review D, ISSN:1550-7998, eISSN:1550-2368, Изд:American Physical Society, D101, 7, 071101-071109, 2020
4. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment. *N.V.Krasnikov et al.(NA64 Collaboration),* Physical Review Letters, ISSN:0031-9007, eISSN:1079-7114, Изд:American Physical Society, 125, 081801, 2020
5. Improved exclusion limit for light dark matter from e+e- annihilation in NA64. *NA64 collaboration,* Phys.Rev.D, 104, 9, 2021
6. Constraints on New Physics in Electron g-2 from a Search for Invisible Decays of a Scalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector. *NA64 Collaboration,* Phys.Rev.Lett., 126, 21, 2021
7. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e- pairs in the NA64 experiment at the CERN SPS. *NA64 collaboration,* Phys.Rev.D, 104, 11, 2021 .
8. Search for a light *Z’* in the *Lμ - Lτ* scenario with the NA64-e experiment at CERN. Phys.Rev.D, 106, 3, 32015, 2022
9. Search for a New B - L *Z’* Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN. Phys.Rev.Lett., 129, 161801, 2022
10. MiniSPD Stand for Testing Si-Detectors**,** Published in: Nonlin.Phenom.Complex Syst. 25 (2022) 3, 254-265**,** Published: 2022
11. VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers**,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1047, February 2023, 167864

2.2.5. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).

1. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e- pairs. *D. Banerjee (CERN and Illinois U., Urbana (main)), J. Bernhard (CERN), V.E. Burtsev (Dubna, JINR), A.G. Chumakov (Tomsk Pedagogical Inst.), D. Cooke (University Coll. London), P. Crivel и др.,* Phys.Rev.D, 101,7, 071101, 2020
2. Hunting down the X17 boson at the CERN SPS. *NA64 Collaboration,* The European Physical Journal C - Particles and Fields, Изд:Springer, 80, 2020
3. Improved limits on a hypothetical X(16.7) boson and a dark photon decaying into e+e- pairs  
   *N.V.Krasnikov et al.(NA64 Collaboration),* Physical Review D, ISSN:1550-7998, eISSN:1550-2368, Изд:American Physical Society, D101, 7, 071101-071109, 2020
4. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment. *N.V.Krasnikov et al.(NA64 Collaboration),* Physical Review Letters, ISSN:0031-9007, eISSN:1079-7114, Изд:American Physical Society, 125, 081801, 2020
5. Improved exclusion limit for light dark matter from e+e- annihilation in NA64. *NA64 collaboration,* Phys.Rev.D, 104, 9, 2021
6. Constraints on New Physics in Electron g-2 from a Search for Invisible Decays of a Scalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector. *NA64 Collaboration,* Phys.Rev.Lett., 126, 21, 2021
7. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e- pairs in the NA64 experiment at the CERN SPS. *NA64 collaboration,* Phys.Rev.D, 104, 11, 2021 .
8. Search for a light *Z’* in the *Lμ - Lτ* scenario with the NA64-e experiment at CERN. Phys.Rev.D, 106, 3, 32015, 2022
9. Search for a New B - L *Z’* Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN. Phys.Rev.Lett., 129, 161801, 2022
10. MiniSPD Stand for Testing Si-Detectors**,** Published in: Nonlin.Phenom.Complex Syst. 25 (2022) 3, 254-265**,** Published: 2022
11. VMM3 ASIC as a potential front end electronics solution for future Straw Trackers**,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1047, February 2023, 16786

**Электронные публикации и препринты:**

1. Constraints on New Physics in the Electron g-2 from a Search for Invisible Decays of a Scalar, Pseudoscalar, Vector, and Axial Vector. *Yu.M. Andreev, D. Banerjee, J. Bernhard, V.E. Burtsev, A.G. Chumakov, D. Cooke, P. Crivelli, E. Depero, A.V. Dermenev, S.V. Donskov, R.R. Dusaev, T. Enik, N. Charitonidis, A.Feshchenko, V.N. Frolov, A.Gardikiotis, S.G. Gerassimov, S.N. Gninenko, M. Hosgen, V.A. Kachanov, A.E. Karneyeu, G. Kekelidze, B. Ketzer, D.V.Kirpichnikov, M.M. Kirsanov, V.N. Kolosov, I.V. Konorov, S.G. Kovalenko, V.A. Kramarenko, L.V. Kravchuk, N.V. Krasnikov, S.V. Kuleshov, V.E. Lyubovitskij, V.Lysan, V.A. Matveev, Yu.V. Mikhailov, L и др.,* CERN-EP-2021-017, 2021
2. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+ e- pairs. *NA64 Collaboration,* e-Print: 2104.13342 [hep-ex] CERN Document Server, ADS Abstract Service, 2021
3. Probing the explanation of the muon (g-2) anomaly and thermal light dark matter with the semi-visible dark photon channel. *NA64 Collaboration,* e-Print: 2107.02021 [hep-ex] ADS Abstract Service, 2021
4. Search for a new B-L *Z’* gauge boson with NA64. *NА64 collaboration,* CERN Document Server, ADS Abstract Service, 2022
5. Search for a light muon-philic *Z’* with the NA64-*e* experiment at CERN. *NA64 collaboration,* CERN Document Server, ADS Abstract Service, 2022
6. Поиск темной материи продолжается. *Пешехонов Д.В.* <http://www.jinr.ru/posts/poisk-temnoj-materii-prodolzhaetsya/>. 2022
7. Поиск темной материи в эксперименте NA64. *Пешехонов Д.В*. Новости ОИЯИ, №3, 2022
8. Search for pseudoscalar bosons decaying into e+e- pairs. *arXiv:2104.13342,* 6, NA64 Collaboration, 2021

2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).

1.«[The NA64mu experiment at the CERN SPS](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/P348/TalksMaterials/Gertsenberger_ICPPA2022.pdf)», [6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics](https://indico.particle.mephi.ru/event/275/),30 November 2022

2.["The Na64-e experiment at CERN"](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/P348/TalksMaterials/DISCRETE_2022_BADEN_BADEN.pdf), Discrete 2022, 7-11 November 2022

3.["Probing Dark Sector with KS,L invisible decays at"](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/P348/TalksMaterials/202205_NA64h.pdf)  FIPs@ECN3 (June 1st, 2022)

4.[Search for light dark matter in NA64 experiment](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/P348/TalksMaterials/2021-mipt64-Dermenev.pptx), [64th International MIPT Scientific Conference](https://conf.mipt.ru/)

5.["Recent results and plans of the NA64 experiment at the CERN SPS"](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/P348/TalksMaterials/SeminarChile2021.pdf) , SAPHIR seminar, Chile, online, December 03, 2021

6.["Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments"](https://indico.cern.ch/event/855454/contributions/4596350/attachments/2351849/4014151/535_poster.pdf)

, ACAT-2021, 20th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research

7.["Recent results and plans of the NA64 experiment at the CERN SPS"](http://mkirsano.web.cern.ch/mkirsano/QUARKS2021.pdf) , QUARKS-2020 International Seminar on HEP, June 07 2021

8.["Latest results of the NA64 experiment searching for hidden sectors at the CERN SPS"](https://indico.cern.ch/event/1039006/) , CERN EP Seminar, 25th of May 2021

9.Latest results of Na64 experiment @CERN, [Kashiwa Dark Matter symposium 2020](https://2020.kashiwa-darkmatter-symposia.org/index.html) 16-19th, November 2020

10.[Search for LDM and Vector/ALPs mediators in the sub-GeV mass range at NA64, NA62, MESA, PADME](https://indico.cern.ch/event/864648/contributions/3896902/attachments/2095051/3569628/gninenko_fips_2020.pdf), [Feebly Interacting Particles 2020](https://indico.cern.ch/event/864648/), 31 August - 4 September 2020

11.Трековые детекторы с тонкостенными трубками в физике элементарных частиц, 55-я зимняя школа Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ «Курчатовский институт», 2023

12. 57th PAC, The NA64mu experiment at the CERN SPS, poster, 2023

13.AYSS, Simulation of the straw detector in the NA64 experiment for the muon run, section report, 2022

14.AYSS New physics search, seminar, 2022

15.IV International Scientific Forum “Nuclear science and Technologies”, Straw chambers for the NA64 experiment, poster, 2022

16.AYSS, Data Acquisition System of the NA64 Experiment, section report, 2022

17**.**The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists,Online Gas Gain Monitoring System, (AYSS-2022)

2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

**2.3. Статус и стадия (TDR, СDR, ongoing project) реализации проекта / подпроекта КИП**(включая процент реализации заявленных этапов по проекту / подпроекту КИП*(если применимо))*

**2.4. Результаты сопутствующей деятельности**

2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

Две работы готовятся

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

1. 5 грантов ОМУС
2. грант РНФ № 23-22-00041
3. Грант «Базис» № 22-1-3-57-1

2.4.3. Награды и премии.

1. Поощрительная премия ОИЯИ за 2020,
2. Доклад на 57й сессии ПКК по ФЧ, The NA64mu experiment at the CERN SPS номинирован на 3-е место

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

**3. Международное научно-техническое сотрудничество**.

Фактически участвующие страны, институты и организации

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Организация** | **страна** | **Город** | **Участники** | **Тип соглашения** |
| БГУ | Беларусь | Минск | A.Солин+1 | Совместные работы |
| UTFSM  UAB | Чили | Вальпарайзо  Сантьяго | С.Kулешов + 8 | Совместные работы |
| БУ | Германия | Бонн | Б.Keтцер + 2 | Совместные работы |
| ИНФИ | Италия | Генуя | A.Челентано+10 | Совместные работы |
| ИЯИ | Россия | Москва, Троицк | С.Гниненко + 9 | Совместные работы |
| ИФВЭ | Россия | Протвино | В.Поляков + 5 | Совместные работы |
| ФИАН | Россия | Москва | В.Тихомиров + 1 | Совместные работы |
| ТПУ | Россия | Томск | В.Любовитский + 4 | Совместные работы |
| ETH | Швейцария | Цурих | A.Руббиа + 4 | Совместные работы |

**4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных**

**4.1. Кадровые ресурсы** (фактически на время подачи отчета)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работника** | **Основной персонал, сумма FTE** | **Ассоциированный персонал, сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 4,8 |  |
| 2. | инженеры | 1,5 |  |
| 3. | специалисты | 0,2 |  |
|  | **Итого:** | **6,5** |  |

**4.2. Фактическая сметная стоимость проекта / подпроекта КИП**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования** | | | **Стоимость (тыс. долл.) потребности  в ресурсах** | **Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
|  | | Международное сотрудничество (МНТС) | 95,5 |  | 31,4 | 64,1 |  |  |
| Материалы | 65,5 | 18,5 | 26 | 21 |  |  |
| Оборудование и услуги сторонних организаций | 204 | 130 | 37 | 37 |  |  |
| Пуско-наладочные работы |  |  |  |  |  |  |
| Услуги научно-исследовательских организаций | 6,8 |  | 6,8 |  |  |  |
| Приобретение программного обеспечения |  |  |  |  |  |  |
| Проектирование/строительство |  |  |  |  |  |  |
| Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)* |  |  |  |  |  |  |
| **Необходимые ресурсы** | **Нормо-час** | Ресурсы |  |  |  |  |  |  |
| * Сумма FTE, | 19,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |  |  |
| * ускорителя/установки, |  |  |  |  |  |  |
| * реактора |  |  |  |  |  |  |
| **Источники финансирования** | **Бюджетные средства** | Бюджет ОИЯИ  *(статьи бюджета)* | 371,8 | 148,5 | 101,2 | 122,1 |  |  |
| **Внебюджет**  **(доп. смета)** | Вклады соисполнителей  Средства по договорам  с заказчиками  Другие источники финансирования |  |  |  |  |  |  |

**4.3. Другие ресурсы**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вычислительные ресурсы** | **Распределение по годам** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
| Хранение данных (ТБ)  - EOS  - Ленты |  |  |  |  |  |
| Tier 1 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| Tier 2 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| СК «Говорун» (ядро-час)  - CPU  - GPU |  |  |  |  |  |
| Облака (CPU ядер) |  |  |  |  |  |

**5. Заключение**

NA64 достиг важного этапа набрав ∼ 1012 EOT, что позволяет начать проверку целого ряда моделей LDM. Анализ продолжается, и с увеличением статистики мы ожидаем также повышения чувствительности поиска. Раскрытие физического потенциала NA64 только началось, предлагаемые методы поиска DS с использованием лептонных и адронных пучков обеспечивают уникальную чувствительность и значительно дополняют другие поисковые проекты.

**6. Предлагаемые рецензенты**

**Руководитель темы**

**/ /**  
**“ “ 202\_г.**

**Руководитель проекта (02-1-1096-2-2010-2026)**

**/ /**  
**“ “ 202\_г.**

**Экономист Лаборатории**

**/ /  
“ “ 202\_ г.**