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

1.1. Шифр темы

02-0-1085-2009/2029

1.2. Шифр проекта

02-2-1085-2-2024/2029

1.3. Лаборатория

ЛЯП

1.4. Научное направление

Физика частиц

1.5. Наименование проекта

AMBER (NA66)

1.6. Руководитель(и) проекта

Гуськов А. В.

1.7. Заместитель(и) руководителя проекта

-

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

AMBER (Apparatus for Meson and Baryon Experimental Research) - новая экспериментальная установка с неподвижной мишенью на пучковой линии M2 ЦЕРН SPS. Установка предназначена для проведения множества измерений, направленных на решение фундаментальных вопросов квантовой хромодинамики, которые, как ожидается, приведут к значительному улучшению понимания КХД как современной теории сильных взаимодействий. Предлагаемые измерения охватывают физику в диапазоне от самых малых значений Q^2, как определение зарядового радиуса протона при упругом мюон-протонном рассеянии, реакций со средними значениями Q^2 для адронной спектроскопии, и з исследований адронной структуры с высоким Q2, используя жесткие процессы Дрелла-Яна, а также рождения чармониев и прямых фотонов. AMBER продолжает впечатляющую и очень успешную цепочку экспериментов: EMC - NMS - SMC - COMPASS, которые значительно обогатили наши знания о структуре и свойствах адронов.

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

Введение

Первая фаза эксперимента AMBER, одобренная ЦЕРНом, состоит из трех измерений.

Целью первого измерения является независимое прецизионное определение среднеквадратичного электрического зарядового радиуса протона с помощью упругого мюон-протонного рассеяния. Такое измерение представляется своевременным, поскольку, несмотря на многие годы интенсивной деятельности, загадка радиуса протона до сих пор остается нерешенной. В настоящее время между двумя последними точными измерениями существует расхождение в 5 стандартных отклонений: 0,841 ± 0,001 фм (CREMA) из измерений расщепления линий в лазерной спектроскопии мюонного водорода и 0,879 ± 0,008 фм из упругого электрон-протонного рассеяния (MAMI). Мы предлагаем провести годичное измерение с использованием мюонов высокой энергии, что позволит получить новый и полностью независимый результат по радиусу протона со статистической точностью 0,01 фм и значительно меньшей систематической неопределенностью. Использование мюонов вместо электронов очень выгодно, так как нескоторые экспериментальныхе и систематические эффекты, а также теоретические (радиационные) поправки значительно меньше. В измерениях будет использоваться время-проекционная камера, заполненная чистым водородом до давления 20 бар, которая одновременно служит мишенью и газом для детектора.

Основная цель предлагаемого изучения процессов Дрелл-Яна и рождения J/ψ - сделать шаг вперед в определении плохо известных функций партонных распределений (PDF) пионов и каонов. Запланированные измерения важны для проверки последних предсказаний непертурбативных расчетов КХД, таких как решеточная КХД и формализм основанный на уравнениях Дайсона-Швингера. При средних и больших значениях бьоркеновской переменной x количественное сравнение между валентными распределениями пионов и каонов имеет первостепенное значение. При меньших значениях x уточнённые знания морского и глюонного распределений в мезоне помогут в объяснении различий между глюонным содержанием пионов, каонов и нуклонов, и, как мы полагаем, дадут подсказки для понимания механизма, который отвечает за формирование масс адронов. Кроме того, сравнение сечений для положительных и отрицательных мезонных пучков, как ожидается позволит детально изучить различные механизмы рождения J/ψ, а также это альтернативный способ доступа к кварковым и глюонным распределениям в налетающем мезоне. Параллельно с измерениями структуры мезонов, наличие в установке тяжелых ядерных мишеней позволит изучать ядерные эффекты, такие как ядерные PDF и потери энергии партонами.

Целью третьего измерения является определение сечения рождения антипротонов на протонных и He-4 мишенях для энергий пучка от нескольких десятков до нескольких сотен ГэВ. В сочетании с аналогичными измерениями на LHCb в ТэВ-ном диапазоне ожидаемые результаты обеспечат фундаментальный набор данных, который значительно повысит точность предсказания естественного потока антипротонов в галактических космических лучах. Это очень важно, поскольку косвенное обнаружение темной материи (ТМ) основано на поиске продуктов аннигиляции или распада ТМ, которые, как ожидается, проявятся в виде искажений в спектрах редких компонентов космических лучей, таких как позитроны или антипротоны.

Проект также включает подготовку второй фазы эксперимента, которая включает изучение структуры и свойств каонов в широком диапазоне Q^2 с помощью адронного пучка высокой интенсивности с возможностью чистого выделения каонной компоненты.

Изучаемая физика

Динамическое возникновение большой массы протона ~1 ГэВ является одной из наиболее ярких особенностей Стандартной модели. Ее значение коррелирует с размером протона и, следовательно, с попытками объяснить конфайнмент глюонов и кварков. Сегодня существует значимая неопределённость этого размера: данные экспериментов по упругому рассеянию электронов и лазерной спектроскопии заметно расходятся. В упругом лептон-нуклонном рассеянии при малых значениях Q^2 наклон электрического формфактора G_E. В лазерной спектроскопии в электронных или мюонных атомах измеряется лэмбовский сдвиг. Многочисленные результаты, опубликованные за последнее десятилетие, все еще противоречат друг другу, составляя так называемую загадку протонного радиуса [1]. Это несоответствие может указывать на физику за пределами Стандартной модели. В любом случае, решение данной проблемы имеет важное значение для точного установления значения радиуса протона и использования этой величины в качестве строгого теста количественных предсказаний КХД. Поэтому новые экспериментальные результаты имеют первостепенное значение.

Чтобы решить проблему протонного радиуса, было предложено несколько новых экспериментов, которые все еще готовятся или уже начались: Prad в JLab [2,3], ELPH (RIKEN) [4], MAMI-A1 [5,6] и будущая установка MAGIX-MESA, (Майнц). На рис. 1 показана подборка опубликованных результатов, отсортированных по времени, и ожидаемая точность для измерения AMBER. До сих пор в экспериментах по рассеянию радиус протона изучался только с помощью электронов. Измерения с мюонными пучками являются дополнительными и позволят проверить связанные с этим систематические эффекты. Наряду с AMBER только эксперимент MUSE в PSI [7] также предлагает использовать мюонный пучок. Но он оптимизирован для проверки возможных различий между электрон-протонным и мюон-протонным рассеянием в рассеянии на достаточно большие углы. Малоугловая кинематика в эксперименте AMBER значительно подавляет эффекты кулоновского возмущения, которые в MUSE имеют существенный размер и должны учитываться в анализе. В целом, предлагаемое измерение представляется уникальным и дополняющим завершенные, текущие, планированные эксперименты.

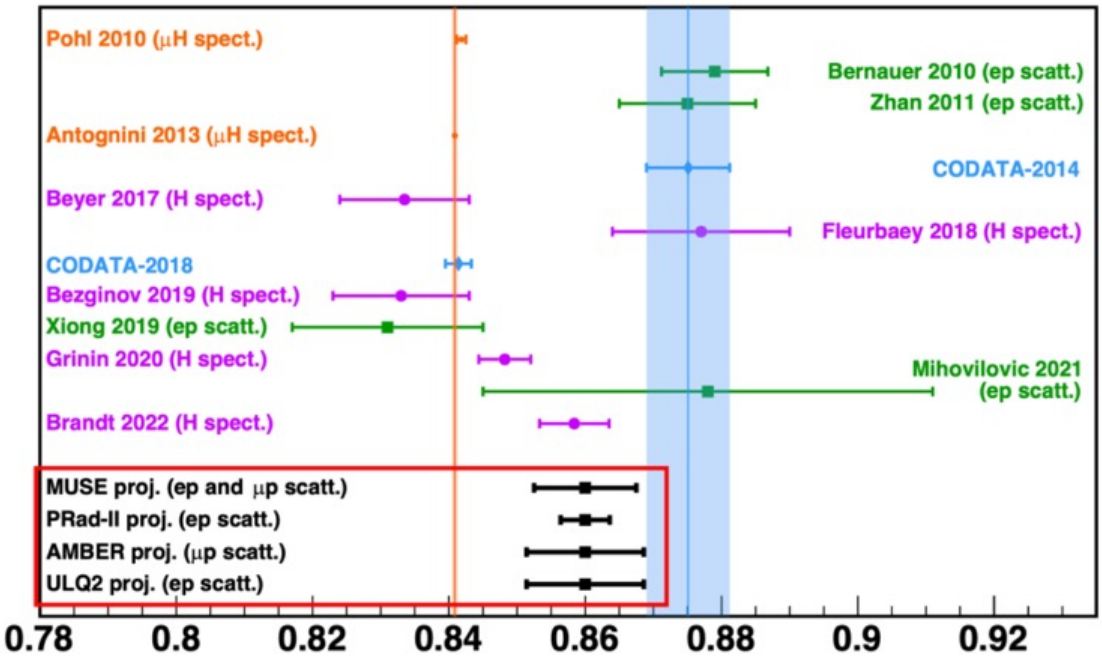

Рис. 1. Обобщение данных о загадке протонного радиуса, отсортированных по времени.

Кварк-глюонная структура легких мезонов и физическая природа их малых масс до сих пор в значительной степени неизвестны. Хотя по протону имеется много данных, экспериментальное определение структуры мезонов остается долгожданным и критически важным вкладом в теоретические усилия, которые пытаются объяснить появление массивных составных адронов, включая большую разницу масс между пионом и протоном. Два механизма Стандартной модели способствуют возникновению массы. Спонтанное нарушение электрослабой симметрии приводит к появлению механизма Хиггса, обеспечивающего фундаментальным частицам их нынешние массы. Сильно взаимодействующее нарушение киральной симметрии приводит к большим массам составных адронов. В киральной КХД с безмассовыми кварками массы адронов в лагранжиане возникают через аномалию следа тензора энергии-момента. Для протона энергия связи и масса «одетых» кварков составляют около 1 ГэВ. Совсем иначе выглядит ситуация для пиона – голдстоуновского бозона. Там энергия связи и массы «одетых» кварков аннулируют друг друга [8]. В решеточной КХД недавно предложенная Large Momentum Effective Theory (LaMET) [9] позволит количественно рассчитать функции распределения кварков и глюонов для адронов, см. например [10] и [11]. Такие расчеты значительно выигрывают от появления суперкомпьютеров Пета-масштаба. В последнее время растет интерес к теоретическим расчетам партонной структуры мезонов, основанным на таких моделях как модель Намбу-Джона-Лазинио [12,13], киральная модель конституэнтных кварков [14], конституэнтная модель на световом фронте [15], а также на основе уравнений Дайсона-Швингера в КХД [16,17].

В настоящее время вся информация о PDF пионов извлекается из довольно неопределенных экспериментов с пионным пучком, выполненных в 80-90-х годах [18-21] и результатов по рождению лидирующих нейтронов на HERA [22]. На горизонте появляется новое поколение экспериментов. Недавно было предложено изучать структуру пионов с помощью глубоко-неупругого рассеяния с меченым конечным состоянием в JLab [23], а для подготовки долгосрочных планов была оценена возможность измерения структуры пионов и каонов на будущем электрон-ионном коллайдере (EIC) [24]. Но в области экспериментов по рождению Дрелл-Яновских пар существующие высокоинтенсивные пучки

положительных и отрицательных пионов, доступные для AMBER в ЦЕРНе, уже сейчас дают уникальную возможность изучать структуру пионов через рождение димюонов при взаимодействии пионного пучка с неполяризованными ядерными мишенями.

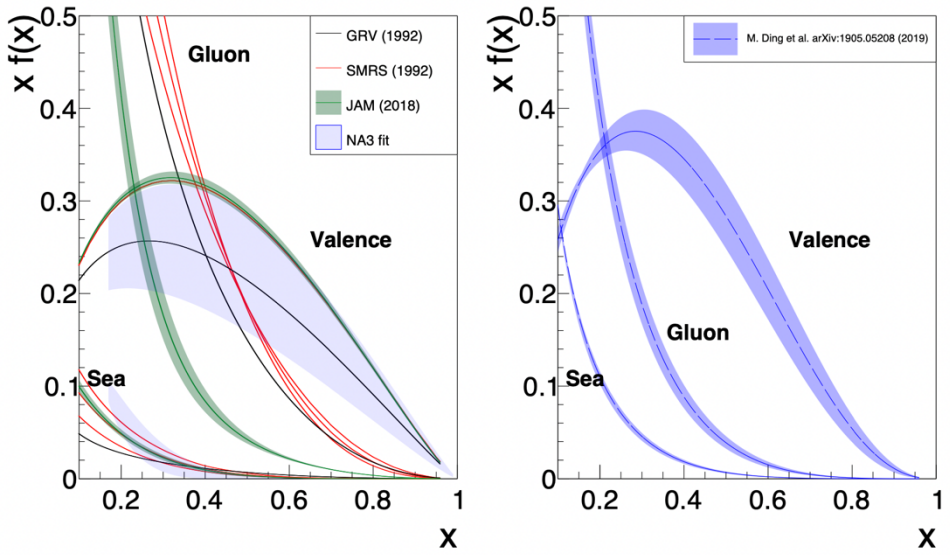

Рис. 2. Слева: кварковые и глюонные PDF для пиона из глобальных фитов GRV/S [19,20], SMRS [21], JAM [22] и извлеченные из данных NA3 [18]. Справа: то же самое, но для самого последнего расчета, основанного на анализе из [25].

AMBER намерен провести разделение вкладов валентных и морских кварков в пион с помощью комбинации данных с пучками положительных и отрицательных пионов и протестировать глюонную составляющую пиона с помощью таких ин-струментов, как рождение J/ψ и ψ' в жестких подпроцессах глюон-глюонного слияния. Механизм рождения чармония является дополнительной темой для изучения с целью проверки таких феноменологических моделей, как ICEM, NRQCD и др. Параллельно будут изучаться возможные флейвор-зависимые эффекты в ядерных мишенях.

Косвенное обнаружение темной материи (ТМ) основано на поиске продуктов ее аннигиляции или распада. Они могут проявляться как аномалии в редких компонентах космических лучей. В частности, компоненты антиматерии космических лучей, такие как антипротоны, антидейтроны и позитроны, обещают обеспечить чувствительность к продуктам аннигиляции ТМ в дополнение к стандартным астрофизическим механизмам рождения. После первых измерений на спутниковом детекторе PAMELA [26], поток антипротонов и отношение p-bar/p были измерены с беспрецедентной точностью в несколько процентов на AMS-02 [27] в диапазоне энергий от нескольких ГэВ до нескольких сотен ГэВ. Для того, чтобы получить значительную чувствительность к сигналам ТМ, очень важно иметь хорошую точность в предсказании потока космических антипротонов, образующихся при взаимодействии с межзвездной средой (в основном p-p, p-He и He-He взаимодействия). Эта неопределенность доминирует в диапазоне от 3 до 150 ГэВ, как показано на Рис. 3.

В то время как для p+p столкновений имеется несколько экспериментальных наборов данных, самый первый набор данных по p+He столкновениям был получен в конце 2015 года в эксперименте LHCb при энергии 4 и 7 ТэВ. AMBER внесет вклад в

фундаментальный поиск тёмной материи, выполнив дополнительные измерения с помощью пучка протонов с энергией в несколько сотен ГэВ/с, налетающего на мишени из жидкого водорода и жидкого гелия.

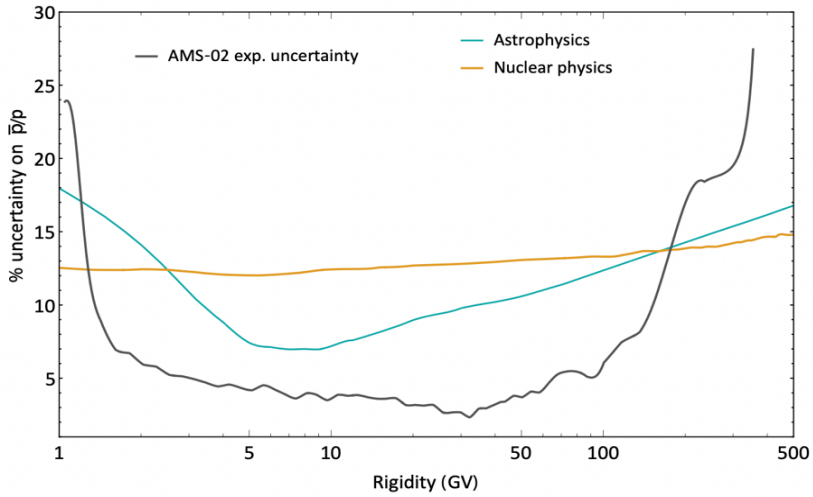

Рис. 3. Относительные неопределенности, оценки отношения p̄/p, показанные как функция от жесткости p/Ze в сравнении с неопределенностью измерений AMS-02.

Более подробную информацию о физике, планируемой к изучению, можно найти в документах AMBER [28,29].

Список литературы

[1] Gil Paz, The Proton Radius Puzzle, Contribution to: DPF2019, e-Print: 1909.08108 (2019).
[2] A. Gasparian , M. Khandaker , H. Gao , D. Dipangkar, JLab Proposal E12-11-106.
[3] W. Xiong et al., A small proton charge radius from an electron–proton scattering experiment, Nature 575 (2019) 7781, 147-150.
[4] T. Suda, Electron scattering experiment off proton at ultra-low Q2 (2016).
[5] M. Mihovilovič et al, The proton charge radius extracted from the initial-state radiation experiment at MAMI, Eur. Phys. J. A 57 (2021) 3, 107.
[6] A. Vorobyev, Precision measurement of the proton charge radius in electron proton scattering, Phys. Part. Nucl. Lett. 16 (2019) 5, 524-529.
[7] R. Gilman et al, Studying the Proton "Radius" Puzzle with μp Elastic Scattering, e-Print: 1303.2160 [nucl-ex] (2013).
[8] C. D. Roberts, Perspective on the origin of hadron masses, Few Body Syst. 58 (2017) 1, 5.
[9] X. Ji, Parton Physics on a Euclidean Lattice, Phys. Rev. Lett. 110. (2013) 262002.
[10] Jian-Hui Zhang et al., Pion Distribution Amplitude from Lattice QCD, Phys. Rev. D 95. (2017) 9, 094514.
[11] A. Abdel-Rehim et al., Nucleon and pion structure with lattice QCD simulations at physical value of the pion mass Phys.Rev.D 92 (2015) 11, 114513.
[12] Seung-il Nam, Parton-distribution functions for the pion and kaon in the gauge-invariant nonlocal chiral-quark model, Phys.Rev.D 86 (2012) 074005.
[13] Parada T.P. Hutauruk, Valence-quark distributions of pions and kaons in a nuclear medium, Phys.Rev.D 100 (2019) 9, 094011.
[14] A. Watanabe, Meson cloud effects on the pion quark distribution function in the chiral constituent quark model, Phys.Rev.D 94 (2016) 11, 114008.

[15] B. Pasquini, Pion transverse momentum dependent parton distributions in a light-front constituent approach, and the Boer-Mulders effect in the pion-induced Drell-Yan process, Phys.Rev.D 90 (2014) 1, 014050.
[16] T. Nguyen et al, Pion and kaon valence-quark parton distribution functions, Phys.Rev.C 83 (2011) 062201.
[17] C. Chen et al, Valence-quark distribution functions in the kaon and pion, Phys.Rev.D 93 (2016) 7, 074021.
[18] J. Badier et al, Experimental Determination of the pi Meson Structure Functions by the Drell-Yan Mechanism, Z.Phys.C 18 (1983) 281.
[19] M. Gluck et al, Pionic parton distributions, Z.Phys.C 53 (1992) 651-656.
[20] M. Gluck et al, Pionic parton distributions revisited, Eur.Phys.J.C 10 (1999) 313-317.
[21] P.J. Sutton et al, Parton distributions for the pion extracted from Drell-Yan and prompt photon experiments, Phys.Rev.D 45 (1992) 2349-2359.
[22] P.C. Barry et al, First Monte Carlo Global QCD Analysis of Pion Parton Distributions, Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 15, 152001.
[23] A. Camsonne, et al., Measurement of Tagged Deep Inelastic Scattering (TDIS), JLAB proposal C12-14-010.
[24] A. Accardi, et al., Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier, Eur. Phys. J. A52 (9) (2016) 268.
[25] M. Ding et al., Symmetry, symmetry breaking, and pion parton distributions, Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 054014.
[26] O. Adriani et al., Measurement of the flux of primary cosmic ray antiprotons with energies of 60 MeV to 350 GeV in the PAMELA experiment, JETP Lett. 96 (2013) 621-627, Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz. 96 (2012) 693-699.
[27] M. Aguilar et al., Antiproton Flux, Antiproton-to-Proton Flux Ratio, and Properties of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 9, 091103.
[28] B. Adams et al., Letter of Intent: A New QCD facility at the M2 beam line of the CERN SPS (COMPASS++/AMBER), e-Print: 1808.00848 (2018).
[29] B. Adams et al., Proposal for Measurements at the M2 beam line of the CERN SPS (Phase-1), CERN-SPSC-2019-022 / SPSC-P-360 (2019).

Предлагаемые измерения

Экспериментальная установка AMBER основана на обновленном спектрометре COMPASS [1,2]. Установку можно разделить на четыре части вдоль оси пучка: пучковый телескоп и детекторы, которые идентифицируют частицы пучка; зона мишени которая будет изменена для нужд конкретного измерения: спектрометр больших углов (LAS), построенный вокруг дипольного магнита SM1; малоугловой спектрометр (SAS), который занимает часть установки, расположенную дальше по пучку. И LAS, и SAS включают в себя по адронному и электромагнитному калориметру и системе идентификации мюонов.

Группа ОИЯИ отвечает за модернизацию и эксплуатацию адронного калориметра HCAL1 и системы идентификации мюонов под большим углом MW1 (Muon Wall 1). Она также участвует разработке трековых детекторов Bulk Micromegas, которые заменят устаревшие проволочные камеры (MWPC) в SAS за магнитом SM2. Детекторы Micromegas с малым количеством вещества могут также быть использованы в области установки, близкой к пучку.

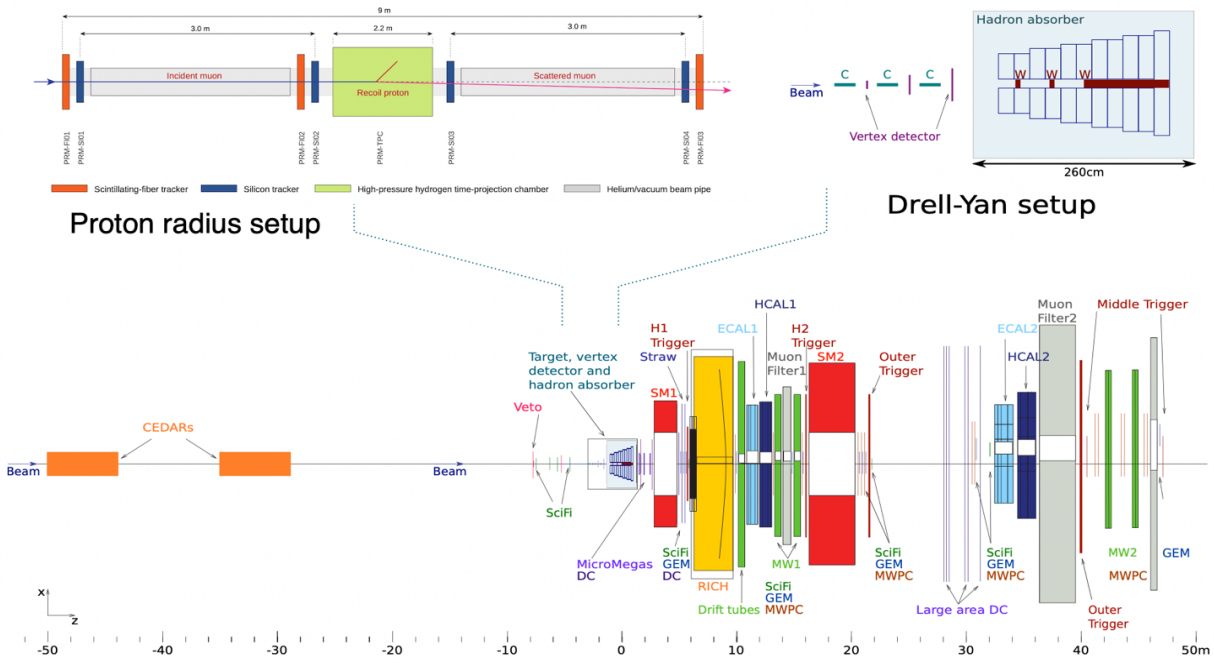

Рис. 4. Общий вид установки AMBER. Увеличены области мишеней для измерения радиуса протона (слева) и для сеанса Дрелл-Яна (справа).

Идея определения радиуса протона основана на измерении наклона электрического форм-фактора $G_E(Q2)$ при Q2=0:

$$\langle r_E^2 \rangle = -6\hbar^2 \left. \frac{\mathrm{d}G_E(Q^2)}{\mathrm{d}Q^2} \right|_{Q^2=0}$$

Форм-фактор GE(Q2) может быть определен из сечения упругого мюон-протонного рассеяния:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{\pi\alpha^2}{Q^4\, m_p^2\, \vec{p}_\mu^{\,2}} \left[\left(G_E^2 + \tau\, G_M^2\right) \frac{4E_\mu^2 m_p^2 - Q^2(s-m_\mu^2)}{1+\tau} - G_M^2 \frac{2m_\mu^2 Q^2 - Q^4}{2} \right]$$

$$= \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\, R \left(\varepsilon\, G_E^2 + \tau\, G_M^2\right),$$

где

$$R = \frac{\vec{p}_\mu^{\,2} - \tau(s - 2m_p^2(1+\tau))}{\vec{p}_\mu^{\,2}(1+\tau)}, \qquad \varepsilon = \frac{E_\mu^2 - \tau(s-m_\mu^2)}{\vec{p}_\mu^{\,2} - \tau(s - 2m_p^2(1+\tau))}$$

переменные отдачи и продольной поляризации, соответственно, $\tau = Q^2/(2m_p)^2$ и s - энергия центра масс. При малых значениях Q^2 (т.е. малых τ) вклад от магнитного форм-фактора $G_M(Q2)$ мал и может быть учтен путем принятия некоторой формы для G_M, так что только G_E остается свободным параметром. Такой подход вводит неопределенность для измерения G_E намного ниже 0,1%.

AMBER предлагает измерять упругое мюон-протонное рассеяние с помощью мюонного пучка с энергией 100 ГэВ и газовой мишени из водорода под давлением. Для точного измерения радиуса протона соответствующая область передачи импульса составляет $0{,}001 < Q^2/(\mathrm{GeV}^2/c^2) < 0{,}04$, что требует использования мишени в качестве TPC для реконструкции трека протона отдачи. Рассеянный мюон будет измерен с помощью спектрометра. Кремниевые телескопы, окружающие TPC, будут использоваться для измерения угла рассеяния мюонов с высокой точностью. Давление газа будет оптимизировано таким образом, чтобы, с одной стороны, иметь достаточно низкую тормозную способность, чтобы трек отдачи протона был различим, а с другой стороны, чтобы он все еще останавливался в объеме TPC. Кроме того, электромагнитный калориметр обнаруживает (редкие) радиационные события, при которых испускаются мягкие фотоны с

энергией до 2 ГэВ. Идентификация мюонов осуществляется с помощью мюонного фильтра и годоскопов. Поскольку срабатывание только на отдачу протонов привело бы к изменениям эффективности в зависимости от Q^2, которые невозможно контролировать с помощью самих данных, необходимо добавить компонент триггера, использующий трек мюона. Поскольку интенсивность пучка слишком высока для регистрации всех событий, пучковый триггер придется дополнить новым компонентом, который позволит накладывать вето на мюоны с углом рассеяния менее 5 мкрад. Планируется, что система сбора данных, работающая в непрерывном режиме, решит проблемы, связанные с возможностями скорости приёма данных и позволит реализовать описанный выше отбор событий элегантным и эффективным способом.

В течение двух лет планируется набрать данные с различным давлением TPC и обоими зарядами, а также с различными импульсами пучка мюонов для оценки систематики (см. Таб. 1). Для достижения статистической неопределенности измерения ниже 1% необходимо набрать не менее 50 миллионов событий в соответствующем диапазоне Q^2. Что касается систематики, то основные вклады в измерение формы сечения мюон-протонного рассеяния от бина к бину представлены в Таб. 2., и общее значение должно быть ниже 0,6%. Таким образом, общая неопределенность измерения радиуса протона на установке AMBER может быть уменьшена примерно до 0,01 фм.

Таб. 1. Условия, предложенные для измерения радиуса протона.

Beam setting	**TPC pressure setting**	**Duration**	**Purpose**
μ^+, 100 GeV	20 bars	92 days	$2.5 < Q^2/(10^{-3}\text{GeV}^2) < 40.0$
μ^+, 100 GeV	4 bars	67 days	$1.0 < Q^2/(10^{-3}\text{GeV}^2) < 8.0$
μ^-, 100 GeV	4 bars	67 days	control of charge dependence
μ^+, 60 GeV	4 bars	34 days	control of energy dependence

Таб. 2. Ожидаемые систематические неопределенности измерения формы сечения.

uncertainty source	**estimate in %**
Monte-Carlo acceptance correction	0.2
Q^2 resp. beam energy calibration	0.2
radiative corrections	0.1
fitting procedure	0.1
(linear) sum	<0.6

Процесс Дрелла-Яна с пионным пучком (πp→μ+μ-X) с Mμμ>4.3 ГэВ будет использоваться для разделения морских и валентных кварков в пионе. Вклад валентных кварков в пионе определяются как:

$$u_{val}^{\pi^+} = u^{\pi^+} - \bar{u}^{\pi^+} \quad \text{и} \quad d_{val}^{\pi^-} = d^{\pi^-} - \bar{d}^{\pi^-}$$

Предполагая зарядовую и SU2 симметрии: $u_{val}^{\pi^+} = \bar{d}_{val}^{\pi^+} = \bar{u}_{val}^{\pi^-} = d_{val}^{\pi^-}$

Кроме того, для морских кварков в пионе предполагается SU(3) симметрия:

$$\bar{u}_{sea}^{\pi} = u_{sea}^{\pi} = \bar{d}_{sea}^{\pi} = d_{sea}^{\pi} = \bar{s}_{sea}^{\pi} = s_{sea}^{\pi}$$

Таким образом, имея изоскалярную мишень (D), можно построить две линейные комбинации пион-индуцированного сечения Дрелла-Яна:

$$\Sigma_{val}^{\pi D} = -\sigma^{\pi^+ D} + \sigma^{\pi^- D} \quad \text{и} \quad \Sigma_{sea}^{\pi D} = 4\sigma^{\pi^+ D} - \sigma^{\pi^- D}$$

где первая комбинация содержит только валентно-валентные члены, а вторая - только морско-валентные и валентно-морские члены.

Глюон-глюонный синтез и q-qbar аннигиляция - два основных жестких процесса, вносящих вклад в рождение J/ψ. Сравнение различных моделей с измеренным распределением x_F в различных диапазонах поперечного импульса (p_T) и поляризацией J/ψ (также как функция x_F) будет представлять собой тщательную проверку теории рождения кваркониев в области низких p_T. Это касается, с одной стороны, идеи факторизации и глюонных PDF, а с другой стороны, двух моделей адронизации с их (возможно, различными) предсказаниями для q-q-bar и g-g вкладов в выход J/ψ. Эта цель может быть достигнута с помощью измерения с большой статистикой , чувствительного к различиям в форме между q-q и g-g x_F-дифференциальными сечениями и к различиям между соответствующими угловыми распределениями распада.

Положительные и отрицательные адронные пучки будут взаимодействовать с сегментированной углеродной мишенью, где элементы будут разделены вершинным детектором. Два пороговых черенковских детектора CEDAR будут отвечать за идентификацию пионов. Прецизионные кремниевые детекторы будут восстанавливать треки пучка. Поглотитель адронов из оксида алюминия и нержавеющей стали с вольфрамовой заглушкой должен останавливать все адроны за мишенью, чтобы уменьшить фон от лептонных распадов пионов и каонов. Две дополнительные вольфрамовые мишени для изучения ядерных эффектов будут установлены в отверстии поглотителя. События процесса Дрелл-Яна будут запускаться триггером на основе годоскопа, а импульсы мюонов будут реконструироваться как в LAS, так и в SAS. Ожидаемое разрешение по массе димюона составляет 115 МэВ для пика J/ψ. За 2 года набора данных, 213 дней с положительным ($1{,}7\times10^7$ ч./с) и 67 дней с отрицательным ($6{,}8\times10^7$ ч./с) AMBER соберет $21{,}7\times10^3$ и $67{,}0\times10^3$ событий Дрелл-Яна для диапазона масс 4,3-8,5 ГэВ, соответственно, для основной углеродной мишени. Это примерно на порядок выше статистики всех предыдущих экспериментов с изоскалярной мишенью.

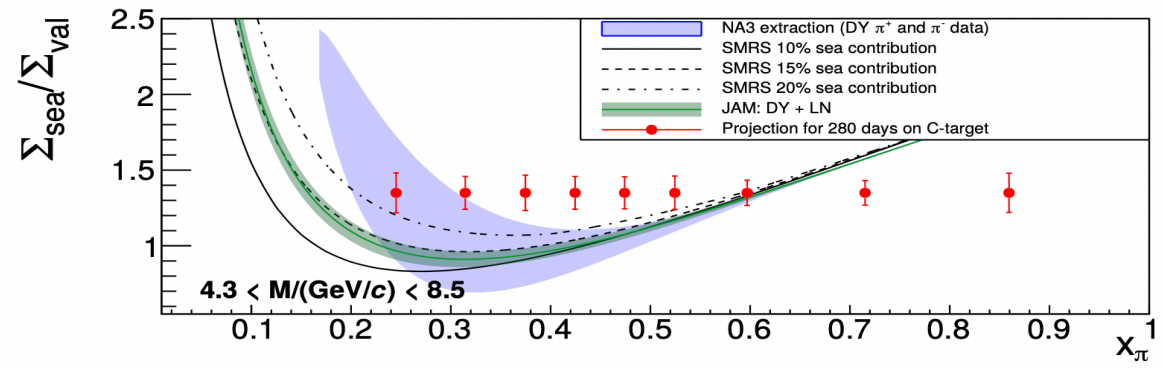

Рис. 5. Отношение ∑sea/∑val. как функция x_π, с использованием трех различных распределений морских кварков и ожидаемых статистических ошибок.

Соответствующая статистика для мюонных распадов J/ψ составляет $1{,}2\times10^6$ и $1{,}8\times10^6$ событий. Сопоставимая статистика будет также собрана для протонов. Для вольфрамовых мишеней будет собрана дополнительная статистика, в 2,5 раза меньшая. Оценки точности разделения валентных/морских вкладов для процесса Дрелла-Яна, измерения дифференциальных сечений dσ/dxF для производства J/ψ и поляризации J/ψ в системе отсчета Коллинза-Сопера представлены на рис. 5, 6 (слева) и 6 (справа), соответственно.

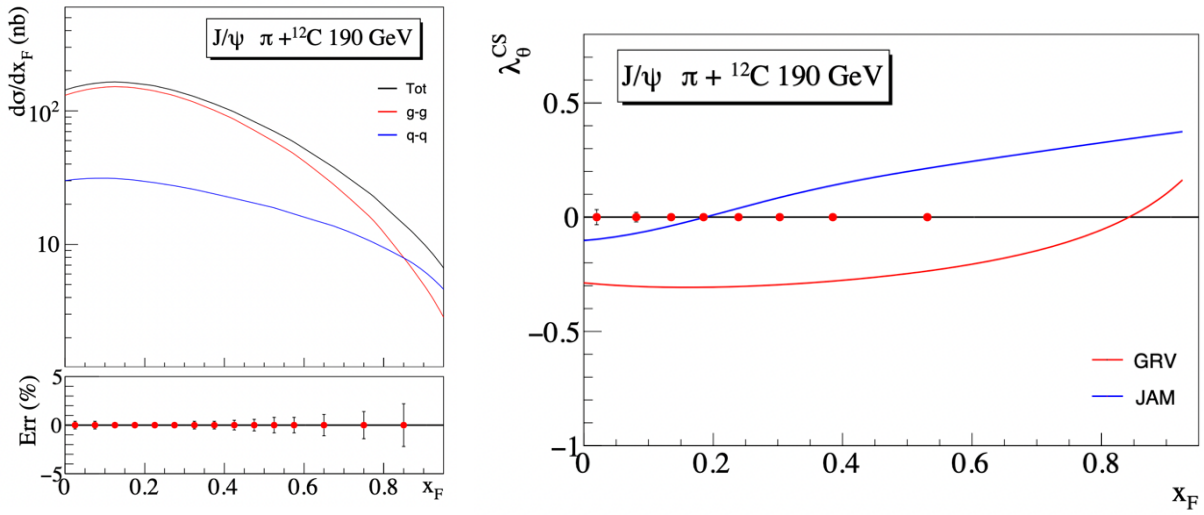

Рис. 6. (слева) Предсказание сечения J/ψ, для пионов и углеродной мишени, рассчитанное в рамках ICEM (черная линия). Красная и синяя линии показывают вклады qqbar и gg. Оценки относительных неопределенностей предлагаемого измерения представлены ниже. (справа) Пион-индуцированная J/ψ поляризация как функция x_F, рассчитанная в ICEM для различных пионных PDF. Также показана статистическая точность измерений

Основными источниками систематических неопределенностей являются: i) определение потока, ii) идентификация частиц пучка, iii) вторичное взаимодействие (доля таких ДЯ-событий в углеродной мишени может достигать 5%), iv) оценка эффективности триггера, v) ядерные эффекты. Тем не менее, систематическая неопределенность предложенных измерений Дрелл-Яна и рождения чармониев, как ожидается, будет намного меньше, чем оцененная статистическая неопределенность.

Для измерения сечения рождения антипротонов планируется использовать вторичный положительный адронный пучок с импульсом 50, 100, 150, 200 и 280 ГэВ/с, выведенный на мишень из жидкого водорода и жидкого гелия. Детекторы CEDAR будут использоваться для идентификации протонов пучка. AMBER планирует измерять это сечение как двойное дифференциальное по импульсу и полярному углу вылета антипртонов. Спектрометр будет отслеживать вторичные заряженные частицы и измерять их импульс, а их скорость будет измеряться детектором RICH, что позволит идентифицировать частицы и, в частности, отобрать антипротоны. В диапазоне импульсов 18-45 ГэВ/с RICH будет идентифицировать антипротоны по их массе, а в диапазоне 10-18 ГэВ/с отсутствие сигнала RICH, т.е. режим вето, будет использоваться для идентификации частицы как не π или не K.

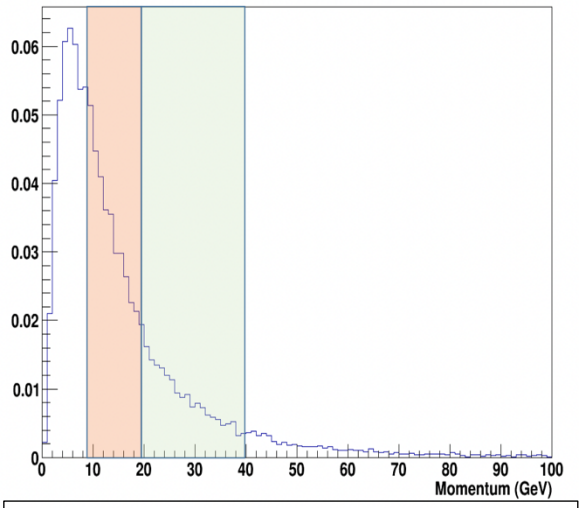

Рис. 7. Ожидаемый спектр импульса антипротона для 190 ГэВ. Оранжевый диапазон соответствует идентификации антипротона в режиме вето, в то время как зеленый диапазон показывает нормальный режим идентификации.

Рассматривая измерение двухдифференциального сечения с 10 бинами по импульсу и псевдобыстроте каждый, статистическая неопределенность ≈ 0,5% на точку данных будет достигнута за 1 день набора данных. Статистическая погрешность является лишь небольшим вкладом в общую погрешность. Для получения точных измерений необходимо несколько поправок к отсчетам событий и триггеров. Некоторые из этих факторов уже были изучены в адронной программы COMPASS. Наконец, общая систематическая неопределенность оценивается как не превышающая 5%.

Что касается планов на будущее, то на 2022 год уже проведён короткий тестовый сеанс За ним последует основной период сбора данных.

Ответственность группы ОИЯИ за субдетекторы

Система Muon Wall 1 (MW1) обеспечивает возможность идентификации рассеянных мюонов в LAS и является одним из наиболее важных детекторов для программы изучения процесса Дрелла-Яна. Система состоит из двух станций, разделенных железным поглотителем толщиной 60 см. Каждая станция имеет четыре детектора с двумя плоскостями с обеих сторон, основанные на мини дрейфовых трубках, работающих в пропорциональном режиме. Вертикальная и горизонтальная трубки обеспечивают координаты X и Y. Детекторы имеют пространственное разрешение 3 мм и эффективность около 90%, что близко к их геометрической эффективности. Время дрейфа в Ar/CO_2 составляет менее 150 нс. Фронтальная часть детектора должна быть модернизирована для обеспечения совместимости с новой системой DAQ.

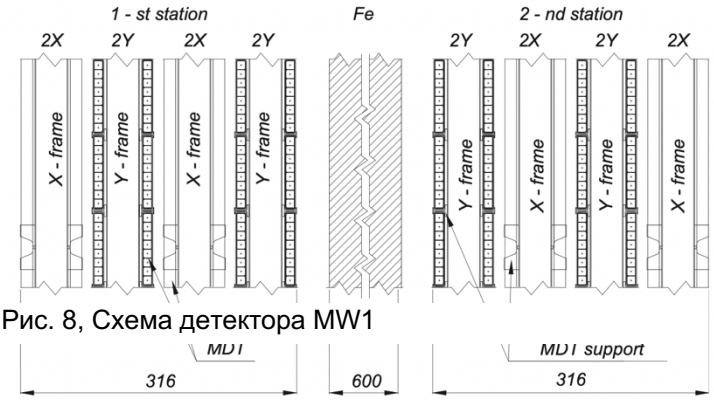

Рис. 8, Схема детектора MW1

Адронный калориметр 1 (HCAL1) размещен перед MW1. HCAL1 имеет модульную структуру, каждый модуль состоит из 40 слоев железа и пластин сцинтиллятора толщиной 20 и 5 мм соответственно, что составляет 4,8 длины ядерного взаимодействия. Он имеет энергетическое разрешение около $50\%/\sqrt{E} \oplus 8\%$ и обеспечивает разделение адронов и мюонов в диапазоне от 5 до 100 ГэВ. Электронная часть детектора также должна быть заменена.

Детекторы Bulk Micromegas с малым количеством вещества в рабочей области будут разработаны в ОИЯИ для улучшения трекинговых характеристик спектрометра. Ряд прототипов камер Micromegas уже был изготовлен в ОИЯИ и испытан в 2021–2026 годах.

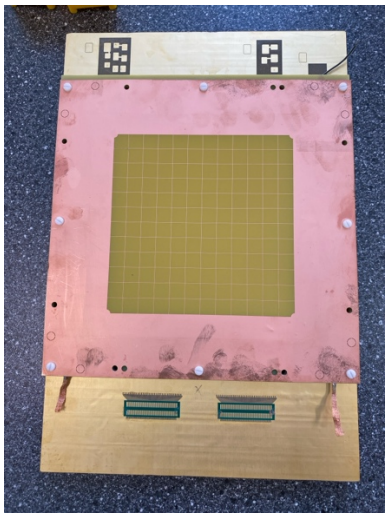

Рис.9. Двусторонний прототип камеры Micromegas, изготовленный в ОИЯИ в 2026.

Список литературы

[1] P. Abbon et al., Эксперимент COMPASS в ЦЕРНе, NIM. A 577 (2007) 455-518.

[2] P. Abbon et al., The COMPASS Setup for Physics with Hadron Beams, NIM A 779 (2015) 69-115.

Основным риском для реализации проекта является осложнение геополитической ситуации и прекращение участия ОИЯИ в работах ЦЕРН.

2.3. Предполагаемый срок выполнения

2030+

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛФВЭ

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	-	-	-	-	-
Tier 1 (ядро-час)	-	-	-	-	-
Tier 2 (ядро-час)	-	-	-	-	-
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	-	-	-	-	-
Облака (CPU ядер)	-	-	-	-	-

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**
Университет Альберта Людвига	**Германия**	Фрайбург	**Х. Фишер +3**	**MoU**
Чешский технический университет в Праге	Чехия	Прага	Й. Новый +11	MoU
Карлов университет	Чехия	Прага	Я. Матушек +5	MoU
Университет Бонна	Германия	Бонн	Б. Кетцер +10	MoU
Институт экспериментальной физики	Польша	Варшава	Б. Баделек	MoU
Лаборатория инструментариев и экспериментальной физики частиц	Португалия	Лиссабон	К. Квинтанс+2	MoU

Лос Аламосская национальная лаборатория	США	Лос Аламос	И. Баудино	MoU
Национальный центр ядерных исследований	Польша	Варшава	А. Сандач +1	MoU
Школа физики и астрономии	Великобритания	Глазго	Б. Зейц +1	MoU
Мюнхенский технический университет	Германия	Мюнхен	С. Пауль +7	MoU
Университет Тель Авива	Израиль	Тель Авив	Й. Лихтенштадт	MoU
Институт экспериментальной и прикладной физики	Италия	Тренто	П. Зуккон + 3	MoU
Туринский университет и ИНФН	Италия	Турин	Д. Панциери +3	MoU
Триестский университет и ИНФН	Италия	Триест	А. Мартин+4	MoU
Университет Авиеро	Португалия	Авиеро	К. Азеведо +1	MoU
Университет Ямагата	Япония	Ямагата	Й. Хирума	MoU
Варшавский технологический унив.	Польша	Варшава	Р. Курята	MoU

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)*

ЦЕРН

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	8	
2.	инженеры	2	
3.	специалисты	2	
4.	служащие		
5.	рабочие		
	Итого:	**12**	**0**

3.2. Доступные кадровые ресурсы
3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/а	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные	Алексеев Г.Д.	ЛЯП	Начальник сектора	11.0
2.	работники	Дедович Д.В.	ЛЯП	Нс	
3.		Денисенко И.И.	ЛЯП	Начальник сектора	
4.		Фролов В.Н.	ЛЯП	Нс	
5.		Гаврищук О.П.	ЛФВЭ	Внс	
6.		Гонгадзе А.	ЛЯП	Начальник сектора	
7.		Гридин А.О.	ЛЯП	Нс	
8.		Гуськов А.В.	ЛЯП	Начальник отдела	
9.		Гущерски Р.	ЛФВЭ	Нс	
10		Ковязина Н.А.	ЛЯП	Мнс	
11.		Кузнецов О.М.	ЛФВЭ	Внс	
12.		Ляшко И.В.	ЛЯП	Мнс	
13.		Мальцев А.	ЛЯП	Нс	
14.		Парсамян	ЛЯП	Снс	
15.		Земляничкина Е.В.	ЛФВЭ	Начальник сектора	
16.		Журавлёв Н.И.	ЛЯП	Снс	
17.		Абазов В.М.	ЛЯП	Нс	
18.		Селюнин А.С.	ЛЯП	Мнс	
19.		Анфимов Н.В.	ЛЯП	Начальник сектора	
20.		Пискун А.А.	ЛЯП	Мнс	
21.	инженеры	Аносов В.А.	ЛФВЭ	Ведущий инженер	1.8
22.		Шунько А.А.	ЛФВЭ	Инж.-констр. 1 кат.	
23.		Серюбин С.С.	ЛЯП	Инженер	
24.					
25.	специалисты				0
26.					
27.					
	рабочие				
	Итого:	**23**			**11.8**

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	Итого:	**0**	**0**

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП). Детализация приводится в отдельной форме.

667 000 $ за 3 года

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта _____/_____/

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД _____
Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____
Год начала проекта / подпроекта КИП _____

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту _____

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта / Подпроекта КИП

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
				2027 год	2028 год	2029 год		
		Международное сотрудничество (МНТС)	312	106	117	89		
		Материалы	185	15	80	90		
		Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	170	15	65	90		
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– сумма FTE,	39	13	13	13		
		– ускорителя/установки,						
		– реактора,…..						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	667	136	262	269		
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

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	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА