



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2025-2

А.Н. Васильев, В.И. Гаркуша, В.Ю. Егорычев, А.М. Зайцев,
С.В. Иванов, С.С. Козуб, Ф.Н. Новоскольцев, В.Ф. Образцов,
В.А. Петров, Р.Н. Роголёв, С.А. Садовский, С.Р. Слабоспицкий,
А.А. Соколов, А.П. Солдатов, Л.М. Ткаченко, Н.Е. Тюрин,
Ю.В. Харлов, Ю.А. Хохлов

**Направления исследований на ускорителе протонов
с энергией 400 – 1000 ГэВ**

НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ

Протвино 2025

Аннотация

Васильев А.Н. и др. *Направления исследований на ускорителе протонов с энергией 400 – 1000 ГэВ*: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025-2. – Протвино, 2025. – 30 с., 1 рис., 7 табл.

Обсуждаются основные направления исследований по физике высоких энергий в экспериментах на выведенных пучках, которые могут быть выполнены на протонном ускорителе с энергией 400 – 1000 ГэВ, размещаемом в 21 км тоннеле УНК.

Abstract

Vasiliev A.N. et al. *Research directions at the proton accelerator with energy of 400 – 1000 GeV*: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025-2. – Protvino, 2025. – p. 30, figs. 1, tables 7.

The main directions of research in the field of high-energy physics in experiments on extracted beams, which can be performed at the proton accelerator with energy of 400 – 1000 GeV, to be installed in the 21 km tunnel of the UNK, are discussed.

Содержание

1. Ускоритель протонов с энергией до 1000 ГэВ	1
1.1. Введение	1
1.2. Основные параметры УНК	2
1.3. Направления фундаментальных исследований	4
2. Рождение очарованных и прелестных адронов	5
2.1. Рождение тяжелых c, b -кварков	5
2.2. Экспериментальные результаты	6
2.3. Актуальные направления	6
3. Физика за рамками Стандартной модели	6
3.1. Физика за рамками Стандартной модели	6
3.2. Редкие распады каонов и эксперименты с полным поглощением пучка .	7
3.3. Распад τ -лептона	8
3.4. Актуальные направления	9
4. Сильные взаимодействия, физика адронов	9
4.1. Экзотические адроны	10
4.2. Структура адронов	10
5. Исследования поляризационных эффектов	11
5.1. Актуальность направления	11
5.2. Спиновая физика на УНК	12
6. Ультрапериферические и дифракционные процессы	13
6.1. Физика ультрапериферических и дифракционных процессов	13
6.2. Исследования УПС на УНК	14
7. Сильновзаимодействующая материя при экстремальных условиях	15

8. Физика нейтрино	16
8.1. Актуальные задачи в физике нейтрино	16
8.2. Нейтринная физика на УНК.....	17
9. Развитие методики экспериментов и новые технологии	17
10. Заключение	18
11. Приложения	20
11.1. Основные параметры и каналы частиц УНК	20
11.2. Оборудование для УНК	21
11.3. Оценка светимости	22
Литература	29
Предметный указатель	30

1. Ускоритель протонов с энергией до 1000 ГэВ

1.1. Введение

Фундаментальные и прикладные исследования с использованием пучков протонов и ионов, получаемых на ускорителях, всегда были важнейшей частью реализуемой в мире научной программы в области ядерной физики, физики высоких энергий, ядерной медицины, радиационных технологий и материаловедения.

Для большого круга задач изучения фундаментальных свойств материи эксперименты на ускорителях с выведенными пучками не имеют конкурентов. Такие исследования на высокоинтенсивных ускорителях являются важнейшим элементом научного ландшафта обозримого будущего. Работы в этом направлении ведутся в России (У-70), США (FNAL, MI), Европе (SPS), Японии (J-PARC), Германии (FAIR). Сегодня очевидно, что исследования на коллайдерах очень высоких энергий (сектор «предельные энергии»), остаются за крупными международными проектами. Основным трендом в развитии ускорителей с выведенными пучками является повышение интенсивности (сектор «предельные интенсивности»).

Ускорительные установки с фиксированной мишенью обладают высоким потенциалом и востребованы актуальными и перспективными исследованиями прикладного характера, что усиливает эффект от развития данного направления. В настоящее время в категории адронных ускорителей востребованы такие прикладные направления, как протонная радиография быстропротекающих процессов в плотных средах, нейтронная резонансная спектроскопия при исследовании экстремальных состояний вещества, создание нейтронных пучков на базе реакции испарительно-скалывающего типа (spallation), радиобиологические исследования и наработки по лучевой терапии с выходом на создание отечественных установок.

В последнее время усиливается интерес к использованию инфраструктуры, созданной ранее в рамках проекта Ускорительно-накопительного комплекса (УНК), разработанного в 1980–1990 гг. [1, 2, 3]. В составе УНК был выделен проект ускорителя на энергию 400 – 600 ГэВ (I ступень УНК) и его экспериментальной базы.

Реализация имеющегося проекта и заложенных в него научно-технических решений не позволит обеспечить достаточную конкурентоспособность для решения современных научных задач. Согласно проекту УНК-1 — это медленный бустер на энергию до 400 – 600 ГэВ. Использование УНК-1 в качестве самостоятельной ускорительной установки не представляется целесообразным, и проект УНК-1 должен быть пересмотрен и адаптирован к новому назначению установки. При этом будет предусмотрено максимальное использование ранее разработанных научно-технических и инженерных решений [1, 2, 3] и имеющейся инфраструктуры, в частности второго в мире по размерам кольцевого тоннеля (20.7 км, диаметр 5–9 м). Будут предусмотрены также возможности по прикладному использованию ускоренных протонов.

Первоочередным мероприятием по адаптации проекта УНК к использованию в качестве самостоятельной ускорительной установки является изготовление обновленного комплекта базовых несверхпроводящих магнито-оптических элементов (дипольные и квадрупольные магниты), с максимальным магнитным полем 1.6–1.7 Тл, при

длительности магнитного цикла 140 с (из них 20 с – плоская вершина для медленного вывода пучка) и принципиальной способностью работать при скорости изменения ведущего магнитного поля 0.4–0.5 Тл/с, сравнимой со скоростью работы кольцевого электромагнита У-70.

В настоящей работе обсуждаются основные актуальные проблемы в физике высоких энергий и возможные направления исследований на протонном ускорителе в существующем 21-км тоннеле УНК с энергией протонов 400 – 1000 ГэВ. За основу приняты параметры УНК в консервативном варианте, поэтому далее будем продолжать использовать название УНК.

1.2. Основные параметры УНК

Предполагается, что проект, который может быть реализован на горизонте 8–10 лет, будет рассчитан на ускорение протонов до энергии 1000 ГэВ со средней интенсивностью

$$\langle \mathcal{I}_p \rangle = 5 \times 10^{12} \text{ с}^{-1} \quad (1)$$

Некоторые исходные базовые параметры ускорителя УНК-1 представлены в таблице 1 (см. [1, 2, 3]).

Таблица 1. Основные параметры УНК [1, 2, 3]

Максимальная энергия, ГэВ	600 – 1000
Энергия инжекции, ГэВ	65
Длина орбиты, м	20771.9
Максимальная напряженность магнитного поля, Тл	1.0 – 1.67
Напряженность магнитного поля при инжекции, Тл	0.108
Длительность цикла*, сек	120
<i>* Без учета плоской вершины для медленного вывода пучка</i>	
Время ускорения, сек	20
Максимальная интенсивность, протонов в импульсе	6×10^{14}
Средняя интенсивность, протонов (сек ⁻¹)	5×10^{12}

Пучок протонов в УНК будет инжектироваться из ускорителя У-70, по которому в 2024 г. принята программа развития. Для использования У-70 в качестве инжектора УНК на выходе из У-70 потребуются протонный пучок с длительностью цикла 6–8 сек и интенсивностью 5×10^{13} р/цикл. Повышение параметров У-70, замена диполей УНК на новые и создание в тоннеле УНК протонного ускорителя на энергию до

1000 ГэВ позволят увеличить мощность пучка как в У-70, так и в УНК с выходом на мегаваттный уровень, и при этом расширить класс доступных фундаментальных и прикладных задач для каждого из ускорителей. Например, заполнение в перспективе орбиты У-70 тремя импульсами 3.5 ГэВ протонного быстроциклирующего бустера (“Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков” проработан на концептуальном уровне, см. [4]) способно увеличить мощности пучков в У-70 до 0.5 МВт и в УНК до 5 МВт.

В УНК существует возможность создания различных пучков — как первичных пучков протонов, так и пучков вторичных частиц ($\pi^\pm$, $K^\pm$, e^- , $\mu^\pm$, ν , $\bar{\nu}$ с относительной интенсивностью порядка $10^{-4} \div 10^{-5}$ на падающий протон [5]).

План размещения кольцевого тоннеля УНК на местности представлен на рис.1. В кольцо предусмотрены 6 согласованных прямолинейных промежутков длиной 800 и 400 м с подавленной дисперсией СПП-1 – СПП-6. Некоторые из них, например, СПП-3, могут быть использованы для экспериментов на пучке протонов с внутренней мишенью. Вывод пучков осуществляется в СПП-4. В УНК планируется реализовать как быстрый (однооборотный), так и медленный (многооборотный, длительностью до 20 с) выводы протонного пучка. На выведенных пучках протонов будут формироваться и вторичные пучки адронов, мюонов, электронов, нейтрино.

Пучки могут быть сформированы для работы на нескольких экспериментальных установках (оптимальным количеством является 4–5 экспериментов) [5].

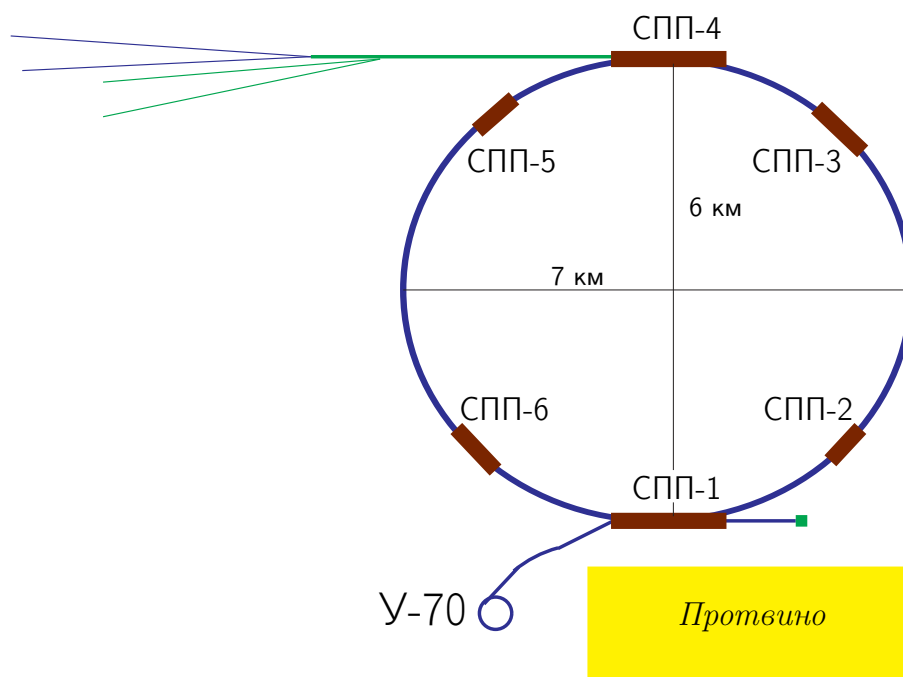


Рис. 1. Схема кольца УНК и каналов частиц.

1.3. Направления фундаментальных исследований

Спектр физических задач на УНК определяется проблемами современной физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий. Научные направления для протонного ускорителя в тоннеле УНК, несмотря на доминирующий в настоящее время интерес к исследованиям на коллайдерах, определяются рядом актуальных фундаментальных исследований и уже полученными результатами. Ускорители с выведенными пучками отличает широкий спектр доступных пучков вторичных частиц, возможность проводить поиск и изучение редких явлений и процессов как за счет достижения интенсивности первичных пучков протонов и пучков вторичных частиц (π - и K -мезонов), так и применяя более плотные мишени. Проектные параметры УНК, в частности высокая светимость, позволяют рассматривать УНК как “фабрику” очарования и тяжелых $\tau^\pm$ -лептонов, что создает уникальные возможности для исследования редких распадов и поиска новых легких объектов.

К основным направлениям научных исследований относятся

- поиск проявлений Новой Физики и новых фундаментальных взаимодействий при изучении редких распадов каонов, очарованных адронов и τ -лептонов;
- поиск новых нейтральных объектов со сверхслабой связью с частицами Стандартной модели в экспериментах с полным поглощением пучка;
- исследование рождения адронов с тяжелыми кварками (c, b), включая адронную спектроскопию, с целью исследования проблемы конфайнмента, динамики образования и свойств многокварковых систем. Проверка Стандартной модели в редких процессах с участием тяжелых ароматов;
- прецизионные исследования дифракционных (периферических) процессов при взаимодействии адронов, включая упругое рассеяние, с целью развития подходов к описанию взаимодействий на больших расстояниях;
- исследование роли спина в образовании тяжелых стабильных частиц и резонансов, спиновых структурных функций протона, измерение спиновой выстроенности резонансов, поляризации гиперонов, спиновых корреляций, а также спиновых асимметрий при взаимодействии поляризованных адронов с поляризованными мишенями;
- изучение ядерных эффектов в адрон-ядерных столкновениях адронов (p, π, K) с ядерными мишенями;
- исследование коллективных эффектов в адрон-адронных и лептон-адронных взаимодействиях (множественность, параметры потоков и корреляций);
- физика нейтрино (стерильные нейтрино, τ -нейтрино);
- исследования с мюонным пучком (проверка КЭД, поиск “мюонных” темных фотонов, поиск Z' в мюонном пучке с “мигающей” спиральностью, глубоко-неупругое рассеяние);
- создание источника нейтронов с рекордными импульсными потоками для последующих прикладных применений.

2. Рождение очарованных и прелестных адронов

2.1. Рождение тяжелых c, b -кварков

При вычислении сечений рождения тяжелых кварков, необходимо учитывать высшие порядков теории возмущений, которые могут увеличивать сечения на порядок или более по сравнению с борновским приближением. Для числа событий с образованием тяжелых кварков использовались результаты вычислений в NLO-приближении для очарованных ($c, \bar{c}$) [6, 7, 8] и прелестных ($b, \bar{b}$) кварков [9, 10]). Сечения процесса рождения лептонных пар (процесс Дрелла-Яна $(\ell^+ \ell^-)_{DY}$) вычислены в борновском приближении. Оценки числа событий с $Q\bar{Q}$ кварками и лептонными парами сделаны в предположении взаимодействия пучка протонов средней интенсивности $\langle \mathcal{I}_p \rangle = 5 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$ с вольфрамовой мишенью полной толщиной 3 мм.

Сечения рождения пар $c\bar{c}$, $b\bar{b}$, $(\ell^+ \ell^-)_{DY}$ и число событий “на один нуклон” с $c\bar{c}$, $b\bar{b}$, $(\ell^+ \ell^-)_{DY}$, $\tau^\pm$ -лептонами в pp -столкновениях при энергии E_p от 400 до 1000 ГэВ с продолжительностью набора данных за 100 дней, приведены в таблице 2. Отметим, что доминирующим источником τ -лептонов являются распады $D_s^\pm$ -мезонов.

Таблица 2. Сечения рождения на один нуклон и число событий с $c\bar{c}$, $b\bar{b}$, лептонными парами Дрелла-Яна и τ -лептонами от распадов $D_s^\pm$ -мезонов в пересчете на один нуклон за 100 дней набора данных

$E_{\text{lab}}, \text{ ГэВ}$	400	600	800	1000
$\sqrt{s}, \text{ ГэВ}$	27.39	33.55	38.74	43.31
$\sigma(c\bar{c}), \text{ мкб}$	18	31	42	54
$\sigma(b\bar{b}), \text{ мкб}$	1.8×10^{-3}	$8. \times 10^{-3}$	$2. \times 10^{-2}$	$3. \times 10^{-2}$
$\sigma(\ell^+ \ell^-)_{DY}, \text{ мкб}$	1.1×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.8×10^{-4}
$N(c\bar{c})$	2.7×10^{15}	4.7×10^{15}	6.3×10^{15}	8.1×10^{15}
$N(b\bar{b})$	2.7×10^{11}	1.2×10^{12}	3×10^{12}	4.5×10^{12}
$N(\ell^+ \ell^-)_{DY}$	1.7×10^{10}	2.6×10^{10}	3.5×10^{10}	4.2×10^{10}
$N(\tau^\pm)_{D_s}$	2.8×10^{13}	4.9×10^{13}	6.6×10^{13}	8.5×10^{13}

Рекордную статистику очарованных частиц и τ -лептонов можно использовать для поиска Новой физики и проверки Стандартной Модели.

2.2. Экспериментальные результаты

Процессы с рождением кварков тяжелых ароматов изучались ранее и исследуются в настоящее время. В частности, большое количество результатов получено сотрудничеством HERA-B [11, 12, 13, 14, 15] при энергии протонного пучка 800 – 900 ГэВ. В тоже время остается существенная теоретическая неопределенность в описании механизмов рождения таких частиц [16, 17].

• Очарованные адроны

В эксперименте HERA-B получено много результатов по измерению образования чармониев $J/\psi, \psi', \chi_{c1}, \chi_{c2}$ (см., например, [11, 18, 13, 14, 19, 18]). В частности, измеренное сечение при 920 ГэВ (HERA-B [12]) равно:

$$\sigma_{cc} = 49.1 \pm 8.7 \text{ мкб/нуклон} \quad (2)$$

• Прелестные адроны

На различных ускорителях проводились исследования образования прелестных адронов: при энергиях 800 ГэВ (ФНАЛ - E789 [20] и E771 [21]) и 920 ГэВ (HERA-B [15]). Измеренное сечение при 920 ГэВ (HERA-B [15]) равно:

$$\sigma_{bb} = 15.4 \pm 2.8 \text{ нб/нуклон} \quad (3)$$

Полные сечения образования очарованных и прелестных адронов измерены с большой ($\sim 20\%$!) ошибкой (см. (2) и (3)).

2.3. Актуальные направления

Среди актуальных направлений исследований можно указать следующие:

- прецизионные измерения сечений образования и инклюзивных спектров в широкой кинематической области очарованных адронов (D, D_s -мезонов, $\Lambda_c, \dots$ барионов) и прелестных адронов (B, B_s, B_c -мезонов, $\Lambda_b, \dots$ барионов);
- детальные измерения инклюзивных спектров чармониев: $J/\psi, \psi', \psi'', \chi_c, \dots$;
- детальные измерения инклюзивных спектров боттомониев: $\Upsilon, \chi_b, \dots$;
- измерения инклюзивных спектров тетракварков с очарованными и/или прелестными кварками.

3. Физика за рамками Стандартной модели

3.1. Физика за рамками Стандартной модели

Поиск “новой физики” или новой теории за рамками Стандартной модели (НФ или BSM — Beyond Standard Model) является главнейшим направлением современных исследований в физике элементарных частиц. На необходимость существования

Новой физики указывают внутренние проблемы Стандартной модели и ряд экспериментальных наблюдений.

Новая физика пытается объяснить основные “открытые” вопросы современной физики, такие как *природа темной материи, барионная асимметрия Вселенной, происхождение масс и осцилляций нейтрино, сильная CP-проблема, иерархическая структура связи Юкавы, проблема иерархии и космологической постоянной и др.*

Новая физика может проявляться как в виде новых тяжелых объектов или взаимодействий на очень малых расстояниях, пока не обнаруженных, так и в виде новых легких частиц со сверхслабым взаимодействием с частицами Стандартной модели. Таким образом, рассматриваются два взаимодополняющих сценария проявления эффектов НФ:

1-й сценарий или BSM-физика - *"новая" теория лежит выше электрослабой (EW) шкалы масс и проявляется в виде новых частиц с массами, значительно превышающими массу бозона Хиггса, которые имеют значительные взаимодействия с полями СМ.*

2-й сценарий или FIP-физика – *сценарий сверхслабо взаимодействующих (или “скрытых”) частиц (FIP — Feebly Interacting Particles), рассматривает расширения СМ, предсказывающие частицы с массами ниже EW-шкалы (так называемые “скрытые” частицы), которые взаимодействуют с полями СМ очень слабо.*

Для планируемого УНК актуальным является изучение процессов, запрещенных в СМ, таких как нарушение лептонного аромата или лептонного числа. Эти поиски обычно включают изучение адронных или лептонных распадов, запрещенных СМ. Косвенные поиски используют возможность того, что новые частицы через поправки петлевого уровня меняют предсказания СМ. “Золотые” моды для косвенных поисков — это точно вычисляемые теоретически редкие процессы в СМ, например редкие распады.

3.2. Редкие распады каонов и эксперименты с полным поглощением пучка

На УНК поиск Новой Физики можно проводить, в частности, в распадах каонов на вторичном пучке. Отметим, что предложение НИКЕ [22] по продолжению этой тематике в ЦЕРН было отклонено из-за недостатка пучков высокой интенсивности.

Единственным местом, где в обозримом будущем будет разрабатываться это направление является J-PARC в Японии. Эксперимент KOTO в J-PARC [23, 24] использует нейтральный вторичный пучок 30-ГэВ синхротрона для поиска распада $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$. Низкая энергия ускорителя и абсолютный приоритет программы исследований осцилляций нейтрино сильно ограничивает возможности этого эксперимента. *На этом фоне УНК мог бы стать мировым лидером этой области физики.*

В настоящее время в мире нет экспериментов, работающих в режиме полного поглощения пучка (beam-dump моде). Последний эксперимент этого типа — это DONUT в FNAL [25], в котором в 2000 г. было открыто τ -нейтрино. В ЦЕРН принято предложение эксперимента SHIP [26, 27], который по плану начнет работу в

2035 году. Его будет сильно ограничивать энергия протонного пучка ускорителя SPS 400 ГэВ. Использование пучка УНК с энергией до 800–1000 ГэВ позволит составить конкуренцию этому проекту.

Эксперимент такого типа предназначен для поиска любых слабовазаимодействующих долгоживущих частиц, например, тяжелых нейтральных лептонов, темных фотонов, темных скаляров, аксионоподобных частиц и легких суперсимметричных частиц — сголдстино и т. д., а также различных типов легкой темной материи.

Ниже приведены некоторые перспективные направления исследований.

- Распады $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$, ($\ell = e, \mu$) — теоретически чистые **золотые** моды. Измерение относительных вероятностей этих распадов с точностью близкой к теоретической могло бы быть сверхзадачей каонной программы УНК.

На УНК можно достичь лучшей в мире чувствительности к FIP. Причем исследования можно проводить по двум взаимодополняющим направлениям: поискам FIP в распадах каонов и в beam-dump эксперименте.

- Поиск проявления FIP-частиц возможен в распадах $K^+ \rightarrow \pi^+ X_{\text{inv}}$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 X_{\text{inv}}$, где X_{inv} — невидимая частица, например, темный скаляр, темный фотон или аксионо-подобная частица (ALP – axion-like particle); $K^+ \rightarrow \ell N$, ($\ell = e, \mu$), где N — невидимая частица, например, тяжелый нейтральный лептон с электронной или мюонной связью. Цепочка распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma A'$ (A' — темный фотон) дает информацию о темных фотонах, распадающихся в невидимые конечные состояния.
- Можно искать и другие редкие распады, например, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^- \bar{\nu}_\mu$, нарушающий правило $\Delta Q = \Delta S$.

3.3. Распад τ -лептона

Весьма актуальным направлением является поиск распадов лептонов с нарушением лептонного аромата — LFV (Lepton Flavor Violation). Новая физика предсказывает большое количество подобных реакций (см., например, [28, 29, 30, 31]).

$$\begin{aligned} \tau^- &\rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^- \\ \tau^- &\rightarrow e^- \mu^+ \mu^-, \mu^- e^+ e^-, e^- e^+ e^-, \mu^+ e^- e^-, e^+ \mu^- \mu^- \\ \tau^- &\rightarrow \bar{p} \mu^+ \mu^-, \quad \tau^- \rightarrow p \mu^- \mu^-, \quad \dots \end{aligned} \tag{4}$$

Перспективным выглядит поиск распада $\tau \rightarrow 3\mu$ [32, 33]. Доминирующим источником $\tau^\pm$ -лептонов является процесс рождения очарованных D_s -мезонов:

$$pA \rightarrow D_s^\pm X, \quad D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \quad D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau; \quad \tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \mu^+ \mu^-$$

В настоящее время верхний предел на вероятность такого распада составляет $\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \mu^+ \mu^-) < 2.1 \times 10^{-8}$ [28]. В эксперименте на УНК этот предел может быть улучшен

на несколько порядков, что представляет несомненный интерес для сценариев Новой физики.

Отметим, что ожидаемое количество зарегистрированных τ -лептонов (в редком распаде $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \mu^\mp \mu^\pm$) составляет $\mathcal{O}(10^{13})$ за 100 дней работы (оценки выполнены для W -мишени суммарной толщины 3 мм, вершиной распада τ -лептона с $\lambda_\tau > 10$ мм от точки образования $D_s^\pm$ -мезонов). Эта оценка (число событий) на УНК будет как минимум на 1-2 порядка больше, чем ожидается на SuperKEKB e^+e^- -коллайдере при $\sqrt{s} \approx 9$ ГэВ при интегральной светимости $\approx 4.3 \times 10^4$ фб $^{-1}$ [34, 35].

3.4. Актуальные направления

Таким образом, среди актуальных направлений исследований поиска проявлений Новой Физики можно указать следующие:

- эксперимент с полным поглощением пучка;
- распад $K_L \rightarrow \mu e$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$, ($\ell = e, \mu$)
- $K^+ \rightarrow \ell N$, ($\ell = 3, \mu$)
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma \mathbf{A}'$
- LFV-распады $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$, $e^- \mu^+ \mu^-$, $\dots$

4. Сильные взаимодействия, физика адронов

Несмотря на впечатляющие успехи Квантовой Хромодинамики (КХД) в описании сильных взаимодействий [36] в этой области фундаментальной физики существует обширный спектр нерешенных проблем. Наиболее яркие и обсуждаемые - это проблемы конфайнмента, спонтанного нарушения киральной симметрии, сохранения T и P четности в сильных взаимодействиях. Ввиду отсутствия регулярных методов вычислений различных эффектов и явлений в непертурбативном режиме КХД разработаны модели, предсказывающие или описывающие различные физические явления. Эта область физики высоких энергий бурно развивается и в ряде случаев обнаруживает удивительную связь физики сильных взаимодействий с другими науками, например, с классической гравитацией [37, 38, 39] и с теорией квантовой информации [40]. Развитие моделей физики сильных взаимодействий в значительной степени опирается на экспериментальные данные, получаемые на ускорителях. Далее обсуждаются направления исследований на УНК, где характеристики комплексов позволяют существенно продвинуться в исследованиях актуальных задач. Можно

быть уверенным, что с развитием теории сильных взаимодействий спектр задач будет расширяться и уникальный потенциал УНК позволит сохранить лидирующие позиции страны в этом важнейшем направлении физики высоких энергий.

Для удобства дальнейшего изложения направления исследований сгруппированы по нескольким разделам:

- свойства адронов (этот раздел);
- поляризационные эффекты (см. раздел 5);
- ультрапериферическая и дифракционная физика (см. раздел 6);
- сильновзаимодействующая материя при экстремальных условиях (см. раздел 7).

4.1. Экзотические адроны

Благодаря высокой энергии, высокой светимости и разнообразию пучков в экспериментах на УНК открываются новые возможности исследования свойств и механизмов рождения адронов с со странными, очарованными (и, возможно, прелестными) кварками. С высокой точностью будут исследованы спектры и спиновые матрицы плотности стабильных частиц и резонансов в максимально широком кинематическом диапазоне, образованных в столкновениях пучков $\pi^\pm$, $K^\pm$, p , $\bar{p}$ с протонами и ядрами. Особый интерес представляют исследования экзотических адронных состояний — тетракварков, пентакварков, глюболов, адронных молекул и др.

$$T(Q\bar{q}q\bar{q}), T(Q_1\bar{Q}_2q\bar{q}), \dots \quad (5)$$

$$P_Q(Q\bar{Q}qqq), P_Q(Q_1\bar{Q}_2qqq), \dots \quad (6)$$

В настоящее время разработаны различные модели, описывающие спектроскопию таких состояний [41, 42, 43, 44, 45]. Детальное исследование механизмов рождения позволит прояснить их структуру, что имеет первостепенное значение для развития моделей обширного семейства экзотических адронов.

Перспективы исследований адронной спектроскопии в эксклюзивных реакциях представлены в шестом разделе.

4.2. Структура адронов

Один из каналов УНК может быть использован для создания высокоинтенсивных пучков поляризованных мюонов (μ^+ и μ^-) с рекордной энергией ($E = 250$ ГэВ). Это позволит выполнить широкую программу исследования структуры нуклонов и ядер, а именно:

- структурные функции нуклонов и ядер (глубоко-неупругое рассеяние, DIS);
- спиновые асимметрии в глубоко-неупругом рассеянии;
- параметры адронных струй (глубоко-неупругое рассеяние, DIS);

- полуинклюзивное глубоко-неупругое рассеяние;
- обобщенные партонные структурные функции протона (глубоко виртуальное комптоновское рассеяние).

Эти исследования позволяют увидеть детали внутренней структуры нуклона (томография нуклона). В настоящее время это направление исследований активно развивается. Уникальные параметры мюонного пучка УНК позволят занять лидирующие позиции в этом направлении.

Во взаимодействиях вторичных пучков $\pi^\pm$ и $K^\pm$ мезонов с протонами и ядерными мишенями представляет интерес исследование образования лептонных пар (процесс Дрелла-Янв), а также ассоциированного образования прямых фотонов с адронной струей (jet):

$$\pi^\pm(K^\pm)A \rightarrow \ell^+\ell^- X, (\ell = e, \mu) \quad (7)$$

$$\pi^\pm(K^\pm)A \rightarrow \gamma + \text{jet } X \quad (8)$$

Изучение кинематических спектров лептонных пар и прямых фотонов позволяет измерять партонные распределения кварков и глюонов (структурные функции) в адронах. Следует отметить, что в отличие от структурных функций нуклонов, которые исследованы с высокой точностью, распределения кварков в π -мезонах и, особенно в K -мезонах, исследованы недостаточно.

5. Исследования поляризационных эффектов

5.1. Актуальность направления

Исследования последних нескольких десятков лет показали наличие значительных спиновых эффектов в различных физических процессах. Однако наблюдение больших спиновых эффектов пока не удалось объяснить в рамках стандартной теории возмущений КХД. Лагранжиан КХД обладает киральной симметрией в пределе безмассовых кварков, что для случая легких (u, d, s) кварков приводит к приближенному сохранению их спиральности и подавлению спиновых эффектов. В теории возмущений КХД односпиновые эффекты, такие, как поляризация гиперонов и односпиновая асимметрия адронов должны быть малы ($< 1\%$).

Значительные спиновые эффекты в большом диапазоне энергий могут возникать вследствие спонтанного нарушения киральной симметрии, приводящей, в частности, к появлению масс у составляющих кварков и адронов, а также, возможно, большого аномального хромо-магнитного момента у легких кварков. Актуальной проблемой является механизм формирования поляризованных адронов в соударениях как неполяризованных, так и поляризованных адронов. Предстоит раскрыть роль кварков, валентных и морских, и глюонов в этих процессах, для чего необходимы систематические экспериментальные исследования спиновых эффектов во взаимодействии

адронов, предполагающие измерение нескольких зависящих от спина наблюдаемых (односпиновая и двухспиновая асимметрии, параметры передачи спина, поляризация гиперонов, элементы спиновой матрицы векторных мезонов и др.). Данные исследования позволят провести сравнение взаимодействий частиц и античастиц с протонами и ядрами, исследовать роль цветовых сил, спиновую структуру нуклона, зависимость спиновых эффектов от изотопического спина и энергии пучка, кваркового состава частиц, атомного веса мишени и множественности частиц в событии. Важно отметить, что данные по исследованию спиновых свойств частиц, состоящих из тяжелых (c и b) кварков, крайне скудны и требуют дополнительных исследований.

5.2. Спиновая физика на УНК

Для систематического изучения спиновых эффектов, в том числе с участием тяжелых (c и b) кварков, предлагается провести эксперимент ПОЛЭКС (ПОЛЯризационный ЭКСперимент) на выведенном пучке УНК с целью изучения спиновой структуры нуклонов и спиновой зависимости сильного взаимодействия.

Предполагается создать канал частиц, обеспечивающий возможность вывода на экспериментальную установку, как поляризованных пучков, так и пучков мезонов, а вместо поляризованной мишени можно использовать неполяризованные ядерные мишени, что позволит исследовать спиновые эффекты от сорта взаимодействующих частиц, в том числе от атомного номера мишени. Поляризационный проект ПОЛЭКС на УНК отличает глобальный, систематический подход в изучении системы антипротон-протон (ядро) и протон-протон (ядро), включая проведение обзорного поляризационного эксперимента и одновременное исследование десятков реакций и нескольких физически наблюдаемых, зависящих от многих переменных. Ожидаемая высокая точность измерений, минимальные систематические ошибки в сочетании с широким набором пучков, мишеней, вторичных заряженных и нейтральных частиц выгодно отличает этот проект от других поляризационных проектов. При этом высокоэнергичные поляризованные антипротонный и протонный пучки являются поистине уникальными инструментами в этих исследованиях. Для проведения эксперимента планируется создать канал и получить пучок поляризованных протонов и антипротонов с импульсами 400-600 ГэВ/с.

Высокие энергии вторичных пучков УНК дают возможность проводить исследование роли спина в образовании частиц и резонансов с кварками второго и третьего поколений, в том числе в образовании различных очарованных частиц, как с открытым очарованием, так и чармония. В качестве первоочередной задачи будет определена величина поляризации глюонов в продольно поляризованном протоне $\Delta G/G$ через образование состояний чармония $\chi_{c2}(3555)$ со спином 2, где основной процесс образования—это глюон-глюонное слияние, и $\chi_{c1}(3510)$ со спином 1.

Программа на УНК является естественным продолжением создаваемого на канале 24 эксперимента на У-70, в котором основной акцент будет сделан на исследование частиц, состоящих из легких кварков с акцентом на изучение частиц со странным кварком.

Метод получения поляризованного пучка, основанный на распадах Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов разработан в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ и успешно применялся в российских и зарубежных экспериментах. В тоже время рассматривается альтернативный метод получения поляризованных пучков протонов и антипротонов от распада Σ^+/Σ^- -гиперонов, также предложенный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ [46, 47] и имеющий ряд преимуществ по сравнению с традиционным методом.

6. Ультрапериферические и дифракционные процессы

6.1. Физика ультрапериферических и дифракционных процессов

Энергия протонного пучка от 400 до 800 ГэВ позволяет достичь в экспериментах на фиксированной мишени энергию $\sqrt{s_{pp}} \approx 27 - 40$ ГэВ в СЦМ pp -столкновений. При такой энергии в адронных процессах становится уже существенной роль глюон-глюонных взаимодействий, ответственных за рост полных сечений. Это делает актуальным детальное изучение рождения частиц со значимой глюонной компонентой, в том числе различных глюонных состояний (глюоболов). Особый интерес в этой связи представляют *УльтраПериферические Столкновения* (УПС), когда сталкивающиеся протоны рассеиваются без возбуждения за счет обмена Померонами ($\mathcal{P}$) с образованием в центральной кинематической области адронных систем в результате $\mathcal{PP}$ -взаимодействий. Важной особенностью этих процессов является рост их сечения с энергией. Соответствующие многочисленные эксклюзивные процессы представляют большой интерес. Они изучались в коллайдерных экспериментах STAR и PHENIX на RHIC в BNL, D0 на Тэватроне в FNAL, ALICE и CMS на LHC в CERN, а также в экспериментах на фиксированных мишенях, например, WA76, WA91, WA102, COMPASS[48] на ускорителе SPS в CERN при энергиях протонного пучка до 450 ГэВ. Программа изучения ультрапериферических столкновений рассматривается и в рамках эксперимента ALICE, Run 3 [49].

Эксперименты на выведенных пучках обладают определенными преимуществами по сравнению с коллайдерными экспериментами. *Во-первых*, ускоряемые в коллайдерах частицы ограничены электронами, протонами и тяжелыми ионами, тогда как в экспериментах на фиксированных мишенях для изучения доступны дополнительно пион-ядерные $\pi^\pm A$, каон-ядерные $K^\pm A$ и мюон-ядерные $\mu^\pm A$ -взаимодействия с практически ничем не ограниченным набором ядерных мишеней. *Во-вторых*, указанные коллайдерные эксперименты заведомо не были оптимизированы для изучения ультрапериферических процессов, и поэтому эффективность регистрации соответствующих событий была сравнительно невысокой, что оказалось особенно чувствительным при изучении многочастичных конечных состояний.

В этой связи проведение систематических исследований ультрапериферических столкновений на УНК в экспериментах на выведенных пучках с высоким уровнем статистической точности, является, безусловно, актуальной задачей. В качестве ос-

новных направлений исследований можно рассматривать:

- спектроскопию глюонных состояний (глюоболов), образующихся в Померон-Померонных взаимодействиях в центральной кинематической области адрон-протонных ($\pi^\pm p$ и $K^\pm p$) столкновений;
- спектроскопию четырехкварковых состояний (тетракварков) с тяжелыми ароматами, образующихся в $\mathcal{PP}$ -взаимодействиях в центральной кинематической области адрон-ядерных столкновений;
- изучение процессов образования тяжелых векторных кваркониев в фотон-Померонных взаимодействиях в центральной кинематической области адронных столкновений с ядрами тяжелых элементов, измерение глюонных структурных функций адронов пучка – $\pi^\pm$, $K^\pm$, p ;
- изучение эксклюзивных реакций с образованием мезонов с тяжелыми кварками в области фрагментации пучка в указанных выше адрон-ядерных столкновениях;
- измерение сечения процессов одиночной дифракции в области фрагментации пучка в адрон-ядерных столкновениях;

Отметим, что сечение ультрапериферических электромагнитных процессов взаимодействия протонов с ядрами мишени должно расти с увеличением заряда ядра как Z^2 в отличие от сечения $\mathcal{PP}$ -процессов, в которых в рамках простой геометрической модели оно растет лишь пропорционально $A^{1/3}$. В результате доминирующим механизмом в таких реакциях являются $\gamma\mathcal{P}$ -взаимодействия, причем фотоны излучаются ядрами мишени, а Помероны - протонами пучка (зеркальный процесс сильно подавлен), что существенно упрощает физический анализ событий по сравнению со случаями симметричных столкновений на протонных и ионных коллайдерах.

Кроме того, доступная в экспериментах на фиксированной мишени вариация толщины и типа ядерной мишени непосредственно в процессе самих измерений позволяет легко проводить сравнительные измерения на различных мишенях, а также менять эффективную светимость адрон-ядерных столкновений в достаточно широких пределах.

6.2. Исследования УПС на УНК

С целью реализации указанной выше программы исследований в адрон-протонных и адрон-ядерных столкновениях на УНК предлагается создать специализированную установку, взяв за основу установку GLUON, см. [1]. Установку планируется разместить на универсальном адронном канале, в который можно будет выводить как первичный протонный пучок с номинальной энергией, так и вторичные несепарированные пучки адронов различных энергий с энергетическим разрешением лучше 1%. Эксперимент должен быть оборудован широкоапертурным магнитным спектрометром, электромагнитным калориметром для регистрации многофотонных событий в

центральной кинематической области, адронным калориметром, мюонным детектором. Важными также являются детекторы регистрации заряженных частиц и фотонов вблизи нулевого угла рассеяния с целью отбора ультрапериферических столкновений.

Интерес прежде всего представляет парное рождение псевдоскалярных и векторных мезонов в $\mathcal{PP}$ -взаимодействиях, например,

$$\begin{aligned}\mathcal{PP} &\rightarrow \eta\eta, \quad \eta\eta', \quad \eta'\eta', \quad \eta\eta_c, \quad \eta'\eta_c, \quad \eta_c\eta_c, \dots, \\ \mathcal{PP} &\rightarrow \omega\omega, \quad \omega\phi, \quad \phi\phi, \quad \omega J/\psi, \quad \phi J/\psi, \quad J/\psi J/\psi, \dots,\end{aligned}$$

одионое рождение векторных мезонов в $\gamma\mathcal{P}$ -взаимодействиях

$$\gamma\mathcal{P} \rightarrow \omega, \quad \phi, \quad J/\psi, \quad \Upsilon(1S), \quad \dots$$

а также рождение многочисленных четырех-кварковых состояний. Существенно, что указанные события характеризуются сравнительно небольшой множественностью частиц в конечном состоянии, что ослабляет требования к трековым детекторам и упрощает реконструкцию таких событий.

7. Сильновзаимодействующая материя при экстремальных условиях

При дальнейшем развитии УНК могут быть ускорены тяжелые ионы. Их рассеяние на ядрах мишени открывает возможность для изучения формирования [50], эволюции [51], размеров [52] и состава [53] файерболов — сгустков сильновзаимодействующей материи, образующихся в результате столкновения ультрарелятивистских ядер. Измерение распределений файерболов по барионному числу, электрическому заряду и странности, а также изучение флуктуаций множественности различных частиц, образующихся при распаде файерболов, являются важным направлением в поисках гипотетического кирального фазового перехода при высоких барионных и изоспиновых плотностях сильновзаимодействующей материи, а также соответствующей критической точки на фазовой диаграмме КХД [54]. Такие измерения требуют большой статистики и поэтому эксперименты на фиксированной мишени предпочтительны, при этом энергия УНК дает возможность сканирования энергий вне области, покрываемой коллайдером NICA. Барионная плотность в файерболле зависит от начальной энергии сталкивающихся ядер; важно, что на УНК при энергиях $\sqrt{s_{NN}} \sim 5 \div 25$ ГэВ/нуклон может быть достигнута достаточно высокая барионная плотность файерболов (на начальных этапах его эволюции в разы больше плотности насыщения ядерной материи [55]).

Вместе с тем, в течение последнего десятилетия различные экспериментальные коллаборации (ALICE [56], ATLAS [57], CMS, PHENIX, STAR и др.) проявляют интерес не только к “большим” файерболлам, порождаемым ядро-ядерными столкновениями, но и к физике “малых систем” — каплей сильновзаимодействующей материи,

образующихся в pp и pA событиях с большой множественностью и допускающих описание гидродинамическими моделями и/или моделями статистической физики, см. обзоры [58] и [59]. **УНК уже на первой стадии даст возможность изучения физики “малых систем”**. Интерес к ней обусловлен тем, что ряд сигнатур кварк-глюонной плазмы (аномально высокий выход странных частиц [56], эллиптические потоки [60], потоки высших порядков, структура “хребта”, относительные вероятности рождения различных сортов частиц в соответствии с моделью статистической адронизации и т.д.) наблюдались в событиях с большой множественностью в pp и pA столкновениях, при этом гашение струй и подавление выхода чармониев не наблюдалось. Более детальное изучение всего набора сигнатур кварк-глюонной плазмы в малых системах позволит исследовать:

- роль внутренней кварк-глюонной структуры адронов в формировании файерболов [58];
- вопрос о минимальной порции кварк-глюонной плазмы и ее природе [61, 59];
- фундаментальные причины коллективного поведения в столкновениях тяжелых ионов [62].

8. Физика нейтрино

8.1. Актуальные задачи в физике нейтрино

В настоящее время нейтринные эксперименты на ускорителях высоких энергий сконцентрированы на точных измерениях параметров нейтринных осцилляций, определении иерархии масс нейтрино, поиске СР-нарушения в лептонном секторе Стандартной нейтринной модели и поиске переходов нейтрино в стерильные состояния.

Исследования в этих направлениях могут проводиться на существующем ускорителе У-70 после его модернизации для использования в качестве инжектора УНК. Предполагается улучшение параметров У-70 (цикл - 6-8 сек, интенсивность - 3×10^{13} протонов/цикл, мощность У-70 ~ 90 кВт) — **этап I**, а также создание более интенсивного инжектора для У-70 — проект ОМЕГА [4], (мощность У-70 ~ 450 кВт) — **этап II**. На этапах I, II возможно будет производить исследования в области физики нейтрино с использованием каналов, которые могут быть созданы на ускорителе У-70 и детекторов, расположенных на площадке НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ в Протвино: **экспериментов с короткой базой** (например, прецизионные измерения сечений, стерильные нейтрино), а также детекторов, расположенных на значительном удалении от У-70: **экспериментов с длинной базой** (например, детектор на озере Байкал, расстояние 4360 км [63]).

8.2. Нейтринная физика на УНК

Высокоинтенсивные пучки УНК предоставляют уникальные возможности для нейтринных экспериментов по двум направлениям — поиск сверхбыстрых осцилляций и исследование физики τ -нейтрино.

Стерильные нейтрино

Существует ряд указаний [64, 65, 66, 67, 68] на существование “тяжелых” ($\Delta m_\nu^2 > 1 \text{ эВ}^2$) стерильных нейтрино. Эти данные не поддаются описанию в рамках простых моделей. На УНК открывается возможность значительного продвижения в исследовании этой области масс. Специализированный нейтринный эксперимент с очень высокой энергией нейтрино ($\approx 150 \text{ ГэВ}$) и очень короткой базой ($\approx 150 \text{ м}$) позволит увидеть возможное исчезновение мюонных нейтрино на уровне точности 1% в диапазоне масс $1 \text{ эВ}^2 < \Delta m^2 < 1000 \text{ эВ}^2$.

τ -нейтрино

В эксперименте с полным поглощением пучка (beam-dump) появится уникальная возможность детального исследования взаимодействий τ -нейтрино. В настоящее время такой эксперимент планируется в ЦЕРН на SPS [26]. Эксперимент на УНК позволит еще дальше продвинуться в изучении τ -нейтрино поскольку с увеличением энергии растет сечение образования очарованных частиц (“родителей” τ -нейтрино) и растет сечение взаимодействия нейтрино с мишенью. Физика τ -нейтрино будет исследоваться также в экспериментах на БАК [69], но при совершенно иных фоновых условиях и энергетических спектрах, так что эксперименты на БАК и на УНК будут взаимно дополнять друг друга.

9. Развитие методики экспериментов и новые технологии

Проведение современных и конкурентоспособных фундаментальных исследований с необходимостью потребует разработки новых технологий и использования высокотехнологичной промышленности для производства материалов и оборудования. Особенно высокие требования предъявляются к электронным приборам и системам обработки больших объемов данных.

Многие физические задачи требуют быстродействующих радиационно-стойких координатных детекторов с высоким разрешением на основе кремниевых детекторов. Создание таких приборов потребует значительных объемов опытно-конструкторских разработок и времени.

Высокая светимость пучков УНК, регистрация событий без потери эффективности требует современной электроники сбора данных без мертвого времени и процессоров для обработки сигналов в режиме реального времени. Опыт создания такой электроники для физики высоких энергий, как и элементной базы для нее в на-

стоящее время ограничены. Задачи УНК приводят к необходимости опоры на самые передовые достижения приборостроения, создания быстродействующей электроники и развития технологий онлайн обработки больших объемов данных.

Выполнение задач исследования фундаментальных свойств материи на УНК невозможно без развития научно-промышленного комплекса и разработок передовых технологий. В дальнейшем разработки, выполненные для физики высоких энергий, найдут применение как в прикладных исследованиях, так и в индустриальном и потребительском секторе.

10. Заключение

Изучение фундаментальных свойств материи в экспериментах на ускорителях с выведенными пучками имеет ряд преимуществ по сравнению с экспериментами на коллайдерах сверхвысоких энергий, позволяя исследовать динамику процессов образования частиц в более широком кинематическом диапазоне, предоставляя доступ к более редким процессам за счет более высокой светимости эксперимента, облегчая регистрацию частиц, распадающихся по слабому взаимодействию, благодаря достижению большего значения лоренцовского буста и, соответственно, времени жизни частиц.

В данной работе рассмотрены основные проблемы и актуальные направления исследований в физике высоких энергий, которые могут быть выполнены на протонном ускорителе с энергией протонов 400 – 1000 ГэВ и экспериментах на выведенных пучках. Подобный ускоритель может быть реализован на базе имеющейся инфраструктуры в 21-км тоннеле, созданной ранее в рамках проекта ускорительно-накопительного комплекса.

Обсуждаемый ускоритель имеет несколько важных особенностей:

- большая светимость по сравнению с существующими или сооружаемыми ускорителями протонов JPARC, MI, PIP-II, SPS;
- в несколько (до 10) раз большая энергия протонного пучка;
- более широкая, по сравнению с коллайдерами, кинематическая область, доступная для измерения рожденных частиц;
- возможность одновременной работы нескольких детекторов.

Отметим, что УНК можно будет рассматривать как “фабрику” очарованных адронов и τ -лептонов с ожидаемым выходом частиц на несколько порядков больше, чем на других ускорителях с выведенными пучками.

Обсуждаемый ускоритель позволит существенно продвинуться в изучении редких распадов каонов и τ -лептонов, что, в свою очередь, позволит получить новые результаты по исследованию физики за рамками Стандартной модели. Отмечены

перспективы исследования физики сильных взаимодействий, поляризационные эксперименты, физика ультрапериферических и дифракционных процессов, а также кварк-глюонной материи.

Детализация программы исследований и постановки конкретных экспериментов, структуры экспериментальной базы, состава и параметров пучков частиц УНК должны быть рассмотрены после принятия концепции и решения о сроках реализации (возможно, этапности) проекта УНК.

Реализация проекта обеспечит сохранение и развитие существующих отечественных научных школ, а также поддержит и конкретизирует запрос к высшей школе по подготовке научных и инженерных кадров ряда важнейших для технологического прогресса специальностей.

11. Приложения

11.1. Основные параметры и каналы частиц УНК

В таблице 3 приведены параметры действующих протонных ускорителей У-70, JPARC, FNAL Main Injector (MI), FNAL proton improvement plan (PIP-II), CERN SPS и планируемого УНК.

Таблица 3. Сравнение протонных ускорителей

Ускоритель	У-70 [70]	JPARC [71]	MI [72]	PIP-II [73]	SPS [74]	UNK-1 [1, 2]
E_{lab} , ГэВ	50 – 70	30 – 50	120	60-120	400	400-600
$\sqrt{s}$, ГэВ	9.7 – 11.5	7.5 – 9.7	15	10.6-15	29.05	33.55
Интенсивность пучка, pp	$1.7 \cdot 10^{13}$	$3.3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$7.5 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{14}$
Длительность цикла, сек	9	3.6 – 6	2.4	0.8 – 1.2	7.2 – 15.6	120
Средняя интенсивность p /сек	$2 \cdot 10^{12}$	$9 \cdot 10^{13}$	$1.25 \cdot 10^{13}$	$(3.8 - 9.4) \cdot 10^{13}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$
Энергия инжекции, ГэВ	1.3	3	8	8	25	65
Число банчей	29	8	498	972	288	348
Протонов/банч	$4 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{10}$	$8.2 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^{12}$
Поле диполей, Тл	1.2	1.9	1.7	1.7		1.0
Длина орбиты, км	1.5	1.5	3.3	3.3	6.9	20.7
Мощность, кВт	22	750	240	800-1200	360	400

На планируемом УНК была предложена схема получения пучков вторичных частиц ($\pi^\pm$, $K^\pm$, e^- , $\mu^\pm$, ν , $\bar{\nu}$) [5]. Выведенный протонный пучок на станции деления разделяется на три части. Для формирования **вторичных адронных пучков** в *одном* из трех протонных пучков планировалось создать два универсальных канала, каждый из которых будет иметь также по одному ответвлению. В этой схеме предусмотрены возможности прецизионного анализа частиц по импульсам с ошибкой $\sigma_{\delta p} \simeq 0.02\%$ (см. таблицу 4).

Для исследования редких распадов каонов необходим относительно короткий канал пучков $K^\pm$ длиной порядка 100 м, интенсивность в котором составит от несколько до десятка процентов интенсивности первичного протонного пучка [75].

Для получения **нейтринных и мюонных пучков** можно иметь один канал, одновременно формирующий пучок дихроматических нейтрино с диапазоном импульсов 100 – 420 ГэВ и разрешением по импульсам $(3.0 \div 9.0)\%$ и пучок мюонов [5].

В этом канале возможно измерение импульсов мюонов со среднеквадратичной погрешностью $\sigma_{\delta p} \simeq 0.5 \%$. Интенсивности пучков приведены в таблице 5. В этом же канале можно иметь пучки **вторичных адронов** (см. таблицу 6).

Таблица 4. *Интенсивности пучков вторичных частиц на один падающий протон*

импульс, ГэВ/с	π^+	K^+	π^-	K^-	e^-
100	4.1×10^{-5}	1.9×10^{-6}	2.5×10^{-5}	9.9×10^{-7}	6.5×10^{-6}
200	7.3×10^{-5}	5.2×10^{-6}	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-6}	1.5×10^{-6}
300	5.8×10^{-5}	5.8×10^{-6}	1.6×10^{-5}	5.5×10^{-7}	2.2×10^{-7}
400	-	-	5.3×10^{-6}	8.7×10^{-8}	8.0×10^{-9}
500	-	-	4.6×10^{-7}	2.0×10^{-9}	-

Таблица 5. *Параметры мюонного пучка для $\sigma_{\delta p}^{\pi, K} = 4.5 \%$ (канал-2)*

разброс по импульсам мюонов $\sigma_{\delta p}$, %	4.0	
интенсивность μ -пучка на один протон	μ^+	μ^-
$p_\mu = 200$ ГэВ/с	3.1×10^{-5}	1.1×10^{-5}
$p_\mu = 400$ ГэВ/с	2.5×10^{-6}	5.9×10^{-7}

Таблица 6. *Интенсивности пучков вторичных частиц на один падающий протон (канал-2) при $\sigma_{\delta p}^{\pi, K} = 4.5 \%$*

импульс, ГэВ/с	π^+	K^+	π^-	K^-
210	1.6×10^{-3}	7.8×10^{-6}	6.0×10^{-4}	1.8×10^{-5}
420	4.2×10^{-4}	5.5×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-6}

11.2. Оборудование для УНК

В проекте УНК рассматривались две ступени ускорителя — “теплая” (УНК-1) и “сверхпроводящая” (УНК-2) [1, 76, 77]. Некоторые характеристики УНК-1 приведены в таблице 7 (см. таблицу 2.1 на стр. 37 в препринте [1]).

Согласно проекту «теплой» ступени УНК-1 дипольные магниты были спроектированы длиной 6200 мм, апертурой 64×190 мм² со стальным магнитопроводом массой 10 тонн и алюминиевыми катушками В настоящее время рассматривается возможность доработки дипольного магнита (диполь серии А) «теплой» ступени УНК-1:

- замена алюминиевой обмотки на медную при сохранении существующего магнитопровода позволит увеличить магнитное поле в 1.4 раза (до 1.68 Т), и соответственно энергию до 840 ГэВ;

Таблица 7. Таблица основных параметров УНК-1 (см. [1])

Параметр	УНК-1
Максимальная энергия, ГэВ	600
Энергия инъекции, ГэВ	65
Длина орбиты, м	20771.9
Количество диполей	2168
Количество квадруполов	521
Максимальная напряженность магнитного поля, Тл	1.0
Напряженность магнитного поля при инъекции, Тл	0.108
Длительность цикла, сек	120
Время ускорения, сек	20
Кратность ускоряющего поля	13860
Частота ускоряющего напряжения, МГц	200
Критическая энергия, ГэВ	42
Бетатронная частота	55.7 (А)
Максимальная интенсивность, протонов в импульсе	6×10^{14}
Средняя интенсивность, протонов (1 сек)	5×10^{12}

- для достижения энергии ≥ 1.0 ТэВ необходимо поднять величину поля до 2 Т, для чего требуется увеличивать толщину магнитопровода диполя и дорабатывать полюс (вставка из стали с высокой магнитной проницаемости, например, сплав 49КФ)

11.3. Оценка светимости

Поскольку во многих экспериментах будут использоваться ядерные мишени приведем оценку светимости экспериментов для мягких взаимодействий с нуклоном. Рассмотрим два предельных случая – тонкая мишень и полное поглощение пучка.

В экспериментах с тонкой мишенью, например, бериллиевой мишенью длиной $h = 3$ см (0.07 ядерной длины λ_I), будет достигаться следующая светимость на один нуклон:

$$\mathcal{L} = \mathcal{I}_p \frac{h}{\lambda_I \sigma_{\text{tot}}} = 8.9 \times 10^{36} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

где для бериллия $\lambda_I = 42.1$ см, $\sigma_{\text{tot}} \approx 40$ мб – полное сечение pN взаимодействий, что отвечает интегральной светимости за 100 дней эффективного времени набора данных

$$L_{\text{int}} = 80 \text{ аттобарн}^{-1}$$

В экспериментах с полным поглощением пучка соответствующие светимости на один нуклон равны:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \mathcal{I}_p \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} = 1.25 \times 10^{38} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \Rightarrow L_{\text{int}} = 1 \text{ зептобарн}^{-1} \text{ за 100 дней}$$

Такое значение предельной интегральной светимости (на нуклон) $L_{\text{int}} = 1 \text{ зб}^{-1}$ можно рассматривать в качестве нижнего предела, поскольку для жестких процессов сечение дополнительно растет как $A^{1/3}$, а для мягких процессов в ряде случаев возникает дополнительный вклад в образование искомым объектов благодаря адронным каскадам в толстых мишенях.

Вместе с тем, при работе нескольких экспериментов на первичном и вторичных пучках УНК интенсивность пучка $\mathcal{I}_p$ будет делиться между несколькими потребителями, поэтому эффективная интенсивность пучка и соответствующая светимость эксперимента окажется ниже.

Список литературы

- [1] Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ, (1993), Препринт ИФВЭ-93-27.
- [2] К. Р. Музников, *600 GeV accelerating storage Complex*, Материалы рабочего совещания 'УНК-600', 1994, р. 3, <https://inis.iaea.org/records/pxr4n-05y44>.
- [3] К. Р. Музников, *Status report on the IHEP Accelerating-Storage Complex (UNK)*, Workshop on the Experimental Program at UNK, 1996.
- [4] Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков, Новости и проблемы фундаментальной физики **2(9)** (2010), Под ред. Н.Е. Тюрин, А.М. Зайцева, С.В. Иванова, В.А. Петрова, Ю.Г. Рябова.
<http://ihep.ru/files/IHEP-2-10.pdf>.
- [5] П.И. Галкин и др., *Каналы частиц на ускорителе У-600*, Материалы рабочего совещания 'УНК-600', 1994, р. 9, <https://inis.iaea.org/records/pxr4n-05y44>.
- [6] C. Lourenco and H. K. Wohri, *Heavy flavour hadro-production from fixed-target to collider energies*, *Phys. Rept.* **433** (2006), 127–180, [arXiv:hep-ph/0609101](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609101).
- [7] S. Frixione, M. L. Mangano, P. Nason, and G. Ridolfi, *Heavy quark production*, *Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.* **15** (1998), 609–706, [arXiv:hep-ph/9702287](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9702287).
- [8] P. Nason, S. Dawson, and R. K. Ellis, *The One Particle Inclusive Differential Cross-Section for Heavy Quark Production in Hadronic Collisions*, *Nucl. Phys. B* **327** (1989), 49–92, [Erratum: *Nucl.Phys.B* 335, 260–260 (1990)].
- [9] R. Bonciani, S. Catani, M. L. Mangano, and P. Nason, *NLL resummation of the heavy quark hadroproduction cross-section*, *Nucl. Phys. B* **529** (1998), 424–450, [arXiv:hep-ph/9801375](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9801375), [Erratum: *Nucl.Phys.B* 803, 234 (2008)].
- [10] N. Kidonakis and R. Vogt, *Threshold corrections in bottom and charm quark hadroproduction at next-to-next-to-leading order*, *Eur. Phys. J. C* **36** (2004), 201–213, [arXiv:hep-ph/0401056](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0401056).
- [11] R. Spighi, *Recent Results on Charmonium Production at HERA-B*, 17th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (Berlin, Germany), Science Wise Publ., 2009, p. 148, <https://inspirehep.net/files/a1bf59f22a845f3b2da6e369b9a7cd12>.
- [12] I. Abt et al., *Measurement of $D0$, D^+ , $D^+(s)$ and D^{*+} Production in Fixed Target 920-GeV Proton-Nucleus Collisions*, *Eur. Phys. J. C* **52** (2007), 531–542, [arXiv:0708.1443 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0708.1443).

- [13] I. Abt et al., *Angular distributions of leptons from J/ψ 's produced in 920 GeV fixed-target proton-nucleus collisions*, *Eur. Phys. J. C* **60** (2009), 517–524, [arXiv:0901.1015 \[hep-ex\]](#).
- [14] V. Egorychev, *Selected HERA-B results*, *Acta Phys. Polon. B* **38** (2007), 925–930, <https://www.actaphys.uj.edu.pl/R/38/3/925/pdf>.
- [15] I. Abt et al., *Bottom production cross-section from double muonic decays of b -flavoured hadrons in 920-GeV proton-nucleus collision*, *Phys. Lett. B* **650** (2007), 103–110, [arXiv:hep-ex/0612024](#).
- [16] A. K. Likhoded and A. V. Luchinsky, *Charmonium production in hadronic experiments at the energy 70 GeV*, *Phys. Atom. Nucl.* **71** (2008), 294–308, [arXiv:hep-ph/0703091](#).
- [17] А. К. Лиходед, А. В. Лучинский, С. В. Пославский, *Рождение тяжелых кварконов в адронных экспериментах*, *Письма в ЖЭТФ* **105** (2017), no. 11, 707–720.
- [18] I. Abt et al., *A Measurement of the ψ' to J/ψ production ratio in 920-GeV proton-nucleus interactions*, *Eur. Phys. J. C* **49** (2007), 545–558, [arXiv:hep-ex/0607046](#).
- [19] I. Abt et al., *Production of the Charmonium States χ_{c1} and χ_{c2} in Proton Nucleus Interactions at $\sqrt{s} = 41.6$ -GeV*, *Phys. Rev. D* **79** (2009), 012001, [arXiv:0807.2167 \[hep-ex\]](#).
- [20] D. M. Jansen et al., *Measurement of the bottom quark production cross-section in 800-GeV/c proton - gold collisions*, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995), 3118–3121.
- [21] T. Alexopoulos et al., *A Measurement of the b anti- b cross-section in 800-GeV/c proton silicon interactions*, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999), 41–44.
- [22] R. Fiorenza, *High Intensity Kaon Experiments (HIKE) at CERN SPS*, *Nuovo Cim. C* **47** (2024), no. 3, 86.
- [23] H. Nanjo, *Status of the KOTO experiment to search for kaon rare decays*, *PoS DISCRETE2022* (2024), 002.
- [24] J. K. Ahn et al., *Proposal of the KOTO II experiment*, (2025), [arXiv:2501.14827 \[hep-ex\]](#).
- [25] K. Okada, *Results from DONUT*, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **100** (2001), 256–260.
- [26] M. Anelli et al., *A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS*, (2015), [arXiv:1504.04956 \[physics.ins-det\]](#).
- [27] M. Cristinziani, *The SHiP experiment at CERN*, 3rd World Summit on Exploring the Dark Side of the Universe, 2020, pp. 175–182, [arXiv:2009.06003 \[physics.ins-det\]](#).

- [28] S. Banerjee et al., *Averages of b -hadron, c -hadron, and τ -lepton properties as of 2023*, (2024), [arXiv:2411.18639 \[hep-ex\]](#).
- [29] W. J. Marciano, T. Mori, and J. M. Roney, *Charged Lepton Flavor Violation Experiments*, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **58** (2008), 315–341.
- [30] G. Frau and C. Langenbruch, *Charged Lepton-Flavour Violation*, *Symmetry* **16** (2024), no. 3, 359.
- [31] S. Banerjee et al., *Snowmass 2021 White Paper: Charged lepton flavor violation in the tau sector*, (2022), [arXiv:2203.14919 \[hep-ph\]](#).
- [32] G. Wilkinson, *TauFV: a fixed-target experiment to search for flavour violation in tau decays*, Physics Beyond Colliders Working Group Meeting. CERN, 2018, June 13–14, online; accessed: <https://indico.cern.ch/event/706741/contributions/3017537/>.
- [33] G. Wilkinson, *TauFV - $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ and more: a fixed-target flavour-physics experiment at the Beam Dump Facility (BDF)*, Physics Beyond Colliders Annual Workchop. CERN, 2021, March 1–4, online; accessed: <https://indico.cern.ch/event/1002356/contributions/4229592/>.
- [34] H. Hyun, *Rare and forbidden B and tau decays in the Belle*, *J. Phys. Conf. Ser.* **556** (2014), no. 1, 012049.
- [35] J. Wiechczynski, *Future Belle II experiment at the KEK laboratory*, 52nd Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions, 2017, pp. 95–98, <https://inspirehep.net/files/42789a7d55c88a4f0910460e0ddce9be>.
- [36] F. Gross et al., *50 Years of Quantum Chromodynamics*, *Eur. Phys. J. C* **83** (2023), 1125, [arXiv:2212.11107 \[hep-ph\]](#).
- [37] J. M. Maldacena, *The Large N limit of superconformal field theories and supergravity*, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** (1998), 231–252, [arXiv:hep-th/9711200](#).
- [38] S. S. Gubser, I. R. Klebanov, and A. M. Polyakov, *Gauge theory correlators from noncritical string theory*, *Phys. Lett. B* **428** (1998), 105–114, [arXiv:hep-th/9802109](#).
- [39] E. Witten, *Anti-de Sitter space and holography*, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** (1998), 253–291, [arXiv:hep-th/9802150](#).
- [40] J. Datta, A. Deshpande, D. E. Kharzeev, C. J. Naïm, and Z. Tu, *Entanglement as a Probe of Hadronization*, *Phys. Rev. Lett.* **134** (2025), no. 11, 111902, [arXiv:2410.22331 \[hep-ph\]](#).

- [41] J. Chen, F.-K. Guo, Y.-G. Ma, C.-P. Shen, Q. Shou, Q. Wang, J.-J. Wu, and B.-S. Zou, *Production of exotic hadrons in pp and nuclear collisions*, 2024, [arXiv:2411.18257 \[hep-ph\]](#).
- [42] C.-Y. Wong, *On the question of quark confinement in the Abelian $U(1)$ QED gauge interaction*, *Front. Phys. (Beijing)* **18** (2023), no. 6, 64401, [arXiv:2208.09920 \[hep-ph\]](#).
- [43] N. Hüsken, E. S. Norella, and I. Polyakov, *A Brief Guide to Exotic Hadrons*, (2024), [arXiv:2410.06923 \[hep-ph\]](#).
- [44] L. Maiani and A. Pilloni, *GGI Lectures on Exotic Hadrons*, 7 2022, [arXiv:2207.05141 \[hep-ph\]](#).
- [45] D. Vadicchino, *A review on Glueball hunting*, 39th International Symposium on Lattice Field Theory, 5 2023, [arXiv:2305.04869 \[hep-lat\]](#).
- [46] V. A. Maisheev, R. A. Rzaev, and A. M. Frolov, *Possibility of obtaining high-energy polarized proton - anti-proton beams from anti-Sigma+ / Sigma+ hyperons decays*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **280** (1989), 7.
- [47] V. V. Abramov et al., *Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment*, *Phys. Part. Nucl.* **54** (2023), no. 1, 69–184.
- [48] P. Abbon et al., *The COMPASS experiment at CERN*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **577** (2007), 455–518, [arXiv:hep-ex/0703049](#).
- [49] A. Khatun, *UPC physics with ALICE in Run 3*, 1st International Workshop on the physics of Ultra Peripheral Collisions, 5 2024, [arXiv:2405.19069 \[hep-ex\]](#).
- [50] L. McLerran, *What have we learned from RHIC?*, *Pramana* **60** (2003), 765–786, [arXiv:hep-ph/0202025](#).
- [51] W. Busza, K. Rajagopal, and W. van der Schee, *Heavy Ion Collisions: The Big Picture, and the Big Questions*, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **68** (2018), 339–376, [arXiv:1802.04801 \[hep-ph\]](#).
- [52] D. Teaney, *The Effects of viscosity on spectra, elliptic flow, and HBT radii*, *Phys. Rev. C* **68** (2003), 034913, [arXiv:nucl-th/0301099](#).
- [53] A. Andronic, P. Braun-Munzinger, K. Redlich, and J. Stachel, *Decoding the phase structure of QCD via particle production at high energy*, *Nature* **561** (2018), no. 7723, 321–330, [arXiv:1710.09425 \[nucl-th\]](#).
- [54] A. Bzdak, S. Esumi, V. Koch, J. Liao, M. Stephanov, and N. Xu, *Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics with Beam Energy Scan*, *Phys. Rept.* **853** (2020), 1–87, [arXiv:1906.00936 \[nucl-th\]](#).

- [55] I. C. Arsene, L. V. Bravina, W. Cassing, Y. B. Ivanov, A. Larionov, J. Randrup, V. N. Russkikh, V. D. Toneev, G. Zeeb, and D. Zschesche, *Dynamical phase trajectories for relativistic nuclear collisions*, *Phys. Rev. C* **75** (2007), 034902, [arXiv:nucl-th/0609042](#).
- [56] S. Acharya et al., *Multiplicity dependence of (multi-)strange hadron production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, *Eur. Phys. J. C* **80** (2020), no. 2, 167, [arXiv:1908.01861 \[nucl-ex\]](#).
- [57] *Exploring the nature of the “ridge” in small systems*, 2017, online; accessed: <https://atlas.cern/updates/briefing/exploring-nature-ridge-small-systems>.
- [58] J. F. Grosse-Oetringhaus and U. A. Wiedemann, *A Decade of Collectivity in Small Systems*, (2024), [arXiv:2407.07484 \[hep-ex\]](#).
- [59] J. Noronha, B. Schenke, C. Shen, and W. Zhao, *Progress and Challenges in Small Systems*, *Int. J. Mod. Phys. E* **33** (2024), no. 06, 2430005, [arXiv:2401.09208 \[nucl-th\]](#).
- [60] J. L. Nagle and W. A. Zajc, *Small System Collectivity in Relativistic Hadronic and Nuclear Collisions*, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **68** (2018), 211–235, [arXiv:1801.03477 \[nucl-ex\]](#).
- [61] Z. Conesa Del Valle et al., *PROSPECTIVES QGP - SMALL SYSTEMS*, 2018, online; accessed: https://indico.cern.ch/event/706294/contributions/3062384/attachments/1682543/2703642/QGP-France_Small_Systems.pdf.
- [62] L. A. Tarasovičová, *Flow and correlations measurements in small and large systems*, *PoS LHCP2023* (2024), 125, [arXiv:2401.09015 \[nucl-ex\]](#).
- [63] *Байкальская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН*, online; accessed: <https://www.inr.ru/rus/unu/baikal.html>.
- [64] C. Giunti and M. Laveder, *Statistical Significance of the Gallium Anomaly*, *Phys. Rev. C* **83** (2011), 065504, [arXiv:1006.3244 \[hep-ph\]](#).
- [65] A. A. Aguilar-Arevalo et al., *A Combined $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ and $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ Oscillation Analysis of the MiniBooNE Excesses*, 7 2012, [arXiv:1207.4809 \[hep-ex\]](#).
- [66] M. A. Acero, C. Giunti, and M. Laveder, *Limits on $\nu(e)$ and anti- $\nu(e)$ disappearance from Gallium and reactor experiments*, *Phys. Rev. D* **78** (2008), 073009, [arXiv:0711.4222 \[hep-ph\]](#).
- [67] G. Mention, M. Fechner, T. Lasserre, T. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Cribier, and A. Letourneau, *The Reactor Antineutrino Anomaly*, *Phys. Rev. D* **83** (2011), 073006, [arXiv:1101.2755 \[hep-ex\]](#).

- [68] A. P. Serebrov et al., *Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results*, *Phys. Rev. D* **104** (2021), no. 3, 032003, [arXiv:2005.05301 \[hep-ex\]](#).
- [69] L. A. Anchordoqui et al., *The Forward Physics Facility at the Large Hadron Collider*, 3 2025, [arXiv:2503.19010 \[hep-ex\]](#).
- [70] *Техническая спецификация У-70*, online; accessed: <http://www.oku.ihep.su/index.php/osnovnoj-protonnyj-sinkhrotron-u-70/tekhnicheskaya-spetsifikatsiya>.
- [71] Y. Yamazaki et al., *Accelerator technical design report for J-PARC*, 2003, online; accessed: <https://cds.cern.ch/record/747209>, KEK-REPORT-2002-13, JAERI-TECH-2003-044, J-PARC-03-01.
- [72] *Title I Design Report: Fermilab Main Injector, Volume I - Technical Components (Revision 0)*, 1992, online; accessed: <https://lss.fnal.gov/archive/design/fermilab-design-1992-07.shtml>, FERMILAB-DESIGN-1992-07.
- [73] P.-I. project, *The PIP-II Reference Design Report*, 2015, online; accessed: <http://lss.fnal.gov/archive/design/fermilab-design-2015-01.pdf>.
- [74] *The SPS beam parameters, the operational cycle, and proton sharing with the SHiP facility*, 2015, online; accessed: <https://cds.cern.ch/record/2063023>, CERN-SHiP-NOTE-2015-004.
- [75] Ю.М. Антипов и др., *Программа исследований редких распадов заряженных каонов и пионов на пучках частиц высоких энергий*, Материалы рабочего совещания 'УНК-600', 1994, p. 212, <https://inis.iaea.org/records/pxr4n-05y44>.
- [76] *Таблица основных параметров УНК*, online; accessed: <http://www.oku.ihep.su/index.php/unk/tablitza-osnovnykh-parametrov-unk-1-unk-2>.
- [77] *Оборудование УНК-1*, online; accessed: <http://www.oku.ihep.su/index.php/unk/oborudovanie-unk-1>.

Предметный указатель

ГР-частицы, [7](#)
Каналы частиц УНК, [20](#)
Кварк-глюонная материя, [15](#)
Магниты, [21](#)
Многокварковые состояния, [10](#)
Направления исследований, [4](#)
Новая физика, [6](#)
Основные параметры УНК, [2](#)
Оценка светимости, [22](#)
Партонные распределения, [11](#)
Поляризационные эксперименты, [11](#)

Распад $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$, [8](#)
Распады τ -лептонов, [8](#)
Рождение $b\bar{b}$, [6](#)
Рождение $c\bar{c}$, [6](#)
Рождение лептонных пар, [11](#)
Рождение очарованных частиц, [6](#)
Скрытые частицы, [7](#)
Темный фотон, [8](#)
Ультрапериферические столкновения, [13](#)
Физика за рамками СМ, [6](#)
Экзотические адроны, [10](#)

Рукопись поступила 24 апреля 2025 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Васильев А.Н. и др.

Физическая программа исследований на ускорителе с фиксированной мишенью и энергией пучков 400-1000 ГэВ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 01.04.2025 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 2,25. Уч.-изд.л. 3,3. Тираж 135. Заказ 2. Индекс 3649.

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

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

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2025–2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
