



*Физика Частиц при
Средних и Высоких
Энергиях*

Протвино, 2-5 июня 2026



Направления исследований на протонном ускорителе с энергией до 1 ТэВ

Слабоспицкий С.Р. и Харлов Ю.В.

НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ,
Протвино

2 июня 2026



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

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

Препринт 2025-02

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

Обоснование

Тоннель УНК и его инфраструктура были реализованы в 1980–1990-х гг. в рамках проекта ускорительно-накопительного комплекса.¹

Эта структура может быть основой для нового ускорителя протонов с энергий до 1000 ГэВ (**У-1000**) в НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ

– уникальной машины для исследований как в поисках **Новой физики**, так и в области **сильных взаимодействий** и позволяющей проводить исследования недоступные для коллайдеров:

- высокая интенсивность пучков при сбросе на мишени обеспечивает светимость, как минимум на 2 порядка превышающую светимость на протонных коллайдерах;
- различные пучки вторичных частиц: p , π , K , гипероны, мюоны и нейтрино.

У-1000, в случае реализации, по своим планируемым параметрам не будет иметь конкурентов среди существующих и планируемых адронных ускорителей с выведенными пучками

	JPARC КЕК	MI FNAL	PIP-II FNAL	SPS CERN	У-1000 НИЦ КИ-ИФВЭ
E (лаб), ГэВ	30-50	120	60-120	120 – 450	600 – 1000
\sqrt{s} , ГэВ	7.5 – 9.7	15	10.6 – 15	< 29.05	33.6 – 43.4
интенсивность p /сек	$9 \cdot 10^{13}$	$1.25 \cdot 10^{13}$	$(4 - 10) \cdot 10^{13}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$

¹“Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ”, Препринт ИФВЭ-93-27, 1993

Основные параметры У-1000 (на базе УНК)

Оценка научного потенциала У-1000 для исследований фундаментальных свойств материи основана на предположении некоторых исходных базовых параметров ускорителя ²

Максимальная энергия, ГэВ	600 – 1000
Длина орбиты, м	20771.9
Средняя интенсивность, протонов (сек ⁻¹)	5×10^{12}

- На У-1000 возможно проведение экспериментов на первичном пучке протонов с внутренними мишенями;
- На У-1000 возможно формирование пучков вторичных частиц $\pi^{\pm}, K^{\pm}, e^{-}, \mu^{\pm}, \nu, \bar{\nu}$ с энергиями от ~ 10 до ~ 500 ГэВ;
- Возможно одновременно проводить эксперименты на нескольких (4–5) установках.

²“Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ”, Препринт ИФВЭ-93-27, 1993

Основные направления физических исследований на У-1000

У-1000 откроет возможности проводить исследования широкого круга задач в области физики частиц как в рамках Стандартной Модели, так и в поиске Новой физики за пределами СМ:

- поиск Новой физики при изучении редких распадов адронов и τ -лептонов;
- поиск новых нейтральных объектов со сверхслабой связью с частицами СМ;
- исследование рождения и спектроскопии адронов с тяжелыми кварками (c , b), динамики образования и свойства многокварковых систем (тетра- и пентакварков);
- исследование спиновых эффектов при взаимодействии поляризованных пучков с поляризованными мишенями;
- прецизионные исследования дифракционных (периферических) процессов при взаимодействии адронов, включая упругое рассеяние;
- исследование свойств кварк-глюонной материи при столкновении адронных пучков (p , π , K) и ядерных мишеней;
- исследования с использованием интенсивных нейтринных и мюонных пучков.

Физика за рамками Стандартной модели

Поиск Новой физики (НФ) за рамками СМ — наиболее актуальное направление современных исследований в физике элементарных частиц.

Два взаимодополняющих сценария проявления эффектов НФ:

- (1) новые тяжелые объекты X (существенно выше электрослабой шкалы масс: $M_X \gg M_H$) или взаимодействия на очень малых расстояниях
- (2) новые легкие частицы со сверхслабым взаимодействием с частицами СМ (FIP — Feebly Interacting Particles)

Возможные направления экспериментальных исследований по поиску НФ на У-1000:

- редкие распады странных и очарованных адронов;
- поиск FIP в эксперименте с полным поглощением пучка;
- редкие или запрещенные в рамках СМ распады τ -лептона

Физика за рамками СМ

Новые тяжелые объекты X можно искать напрямую (А) и опосредованно (В):

(А) образование новых тяжелых объектов X при сверхвысоких энергиях:

- рождение $X \rightarrow$ частицы СМ ($X \rightarrow HH, X \rightarrow t\bar{b}, \dots$), $M_X > \mathcal{O}(1 \div 10)$ ТэВ
- $M_X \sim \mathcal{O}(0.1 \div 1)$ ТэВ - вклад X в распады тяжелых СМ частиц ($t \rightarrow bH^+ (\rightarrow c\bar{b}, \tau^+\nu_\tau)$)
- LHC $\Rightarrow M_X > \mathcal{O}(1)$ ТэВ

(В) при низких и средних энергиях:

- $M_X \sim \mathcal{O}(0.01 \div 1)$ ТэВ - вклад X в редкие распады K, D, B -мезонов

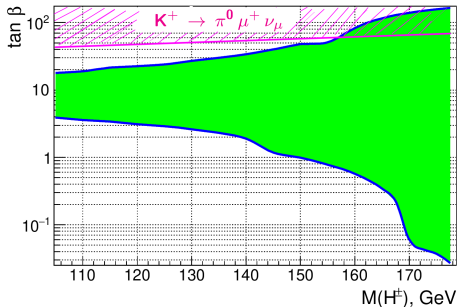
(А) и (В) дополняют друг друга

Например:

$$t \rightarrow bH^+ (\rightarrow c\bar{b}, \tau^+\nu_\tau)$$

$$\text{и } K^+ \rightarrow \pi^0(W^+ + H^+)\mu^+\nu_\mu,$$
$$\Rightarrow \tan\beta / M_H < 0.39 \text{ ГэВ}^{-1} \text{ (ОКА)}^3$$

$$m_t/m_K = 350 !$$



³ОКА: arXiv:hep-ph/0202061v1

Физика за рамками СМ - редкие распады каонов

Поиски НФ в распадах каонов на вторичном пучке:

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$, ($\ell = e, \mu$) — теоретически чистые **золотые** моды (характеристики надежно вычисляются в рамках СМ). Измерение относительных вероятностей этих распадов с точностью близкой к теоретической — сверхзадача каонной программы У-1000;
 - поиск FIP (X_{inv}) в распадах: $K^+ \rightarrow \pi^+ X_{\text{inv}}$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 X_{\text{inv}}$, X_{inv} — темный скаляр, темный фотон, аксион, ...;
 - поиск FIP: $K^+ \rightarrow \ell N$, ($\ell = e, \mu$), где N — невидимая частица, например, тяжелый нейтральный лептон с электронной или мюонной связью;
 - поиск FIP-частиц: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma A'$ — A' — темный фотон.
- В обозримом будущем это направление будет разрабатываться в J-PARC (Японии). Эксперимент КОТО 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.

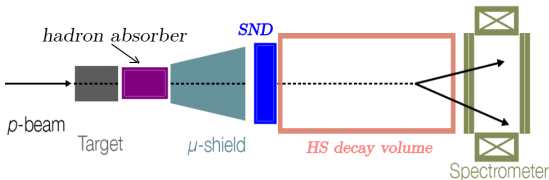
⇒ У-1000 мог бы стать мировым лидером этой области физики

Эксперименты с полным поглощением пучка

Эксперимент с полным поглощением пучка на У-1000 с $E_p \leq 1000$ ГэВ (типа SHiP в ЦЕРНе или “Beam Dump Facility at PIP-II at Fermilab”)

предназначен для поиска слабо взаимодействующих долгоживущих частиц на масштабе $0.5 \div 5$ ГэВ

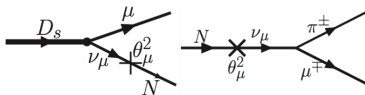
- тяжелые нейтральные лептоны (N)
- темные скаляры и темные фотоны (A');
- аксиноподобные частицы (ALP);
- легкая темная материя;
- SUSY (нейтралино, ...);
- миллизаряженные частицы



В таком эксперименте возможно изучать также физику нейтрино.

Эксперименты с полным поглощением пучка

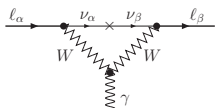
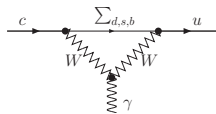
- FIP частицы могут образовываться за счет неупругих процессов, электромагнитных процессов и распадов легких и тяжелых (D , B) мезонов с последующими распадами:
 - ◇ N , нейтралино: $\rightarrow e\mu, \ell^\pm + (\pi^\mp, K^\mp, \dots)$
 - ◇ скаляр (S): $\rightarrow ee, \mu\mu, \pi\pi, KK$
 - ◇ темный фотон: $A' \rightarrow ee, \mu\mu$
 - ◇ ALP (a): $a \rightarrow \gamma\gamma$
 - ◇ рассеяние FIP на электронах, ...



- Переход от $E_p = 400$ ГэВ (SPS) к $E_p = 1000$ ГэВ (**У-1000**) за счет роста сечения образования очарованных (~ 3 раза) и прелестных (~ 15 раз) адронов приведет к увеличению в несколько раз выхода FIP и τ -нейтрино

Физика за рамками СМ - распады τ -лептонов

- В рамках СМ *запрещены* нейтральные токи с нарушением лептонного аромата — LFV (Lepton Flavor Violation). Но, $m_\nu \neq 0 \Rightarrow$ LFV *разрешен* за счет петлевых вкладов



$$\frac{\Gamma(l_\alpha \rightarrow l_\beta \gamma)}{\Gamma(l_\alpha \rightarrow \nu_\alpha l_\beta \bar{\nu}_\beta)_{SM}} = \frac{3\alpha_{EM}}{32\pi} \left| \frac{(M_\nu M_\nu^\dagger)_{\alpha\beta}}{M_W^2} \right|^2 < 5 \times 10^{-53}$$

- Различные расширения СМ $\Rightarrow \mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) = 10^{-10} - 10^{-8}$

Текущие ограничения Belle / BaBar / CMS: $\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) < (2.1 / 3.3 / 2.9) \times 10^{-8}$ (90% CL)

- Y-1000 : поиск LFV в распадах τ^\pm -лептонов: $pA \rightarrow D_s^\pm X$, $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$, $D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-, \quad \tau^- \rightarrow e^- \mu^+ \mu^- / \mu^- e^+ e^- / e^- e^+ e^- / \bar{p} \mu^+ \mu^- / p \mu^- \mu^-, \dots$$

Y-1000 - верхний предел $\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) < 2.1 \times 10^{-8}$ может быть улучшен на несколько порядков.

Ожидаемое количество зарегистрированных событий $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \mu^- \mu^+$ составляет $\mathcal{O}(10^{13})$ за 100 дней (W -мишень суммарной толщины 3 мм, вершина распада τ^\pm с $\lambda_\tau > 10$ мм от точки образования D_s^\pm -мезонов).

Возможное число событий на Y-1000 будет как минимум на **1-2 порядка больше**, чем ожидается на SuperKEKB e^+e^- -коллайдере при $\sqrt{s} \approx 9$ ГэВ и $\mathcal{L}_{int} \approx 4.3 \times 10^4 \text{ фб}^{-1}$

Сильные взаимодействия — адроны с **c** и **b** кварками

Высокая энергия, высокая светимость и разнообразные пучки на У-1000 позволят изучать различные тематики физики сильных взаимодействий.

Сечения рождения очарованных и прелестных адронов при $E_p = 400 \div 1000$ ГэВ

$$\sigma(c\bar{c}) = (18 \div 54) \text{ мкб}$$

$$\sigma(b\bar{b}) = (1.8 \div 30) \text{ нб}$$

Среди актуальных направлений исследований можно указать следующие:

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

Сильные взаимодействия — адроны с легкими кварками

У-1000 позволит изучать различные тематики физики сильных взаимодействий в секторе легких (u, d, s) кварков:

- исследование с высокой точностью спектров и спиновых матриц плотности стабильных частиц и резонансов в столкновениях $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ с протонами и ядрами;
- исследования свойств и механизмов образования экзотических адронных состояний — тетракварков, пентакварков, глюболов, адронных молекул и др.;
- партонные распределения кварков и глюонов в π^\pm и K^\pm мезонах:

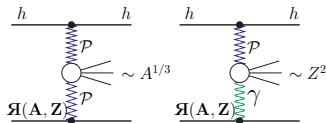
$$\pi^\pm(K^\pm) A \rightarrow \ell^+\ell^- X, \quad (\ell = e, \mu), \quad \rightarrow \gamma + \text{jet } X$$

На У-1000 возможно также создание высокоинтенсивных пучков поляризованных мюонов с энергией ($E > 250$ ГэВ), что позволит выполнить широкую программу исследований структуры нуклонов и ядер в глубоко-неупругом рассеянии:

- структурные функции нуклонов и ядер;
- спиновые асимметрии;
- параметры адронных струй;
- полуинклюзивное глубоко-неупругое рассеяние.

Ультрапериферические и дифракционные процессы

На У-1000 ($\sqrt{s_{pp}} \approx 27 - 40$ ГэВ) возможно детально исследовать образование в центральной области адронных систем в результате $\mathcal{P}\mathcal{P}$ или $\mathcal{P}\gamma$ -взаимодействий



По сравнению с коллайдерами на У-1000 возможно изучать дополнительно $\pi^\pm A$, $K^\pm A$ и $\mu^\pm A$ -взаимодействия с широким набором ядерных мишеней

- рождение псевдоскалярных и векторных мезонов в $\mathcal{P}\mathcal{P}$ -взаимодействиях:

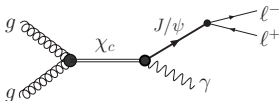
$$\mathcal{P}\mathcal{P} \rightarrow \eta\eta, \eta\eta', \eta\eta_c, \eta'\eta_c, \eta_c\eta_c, \omega\omega, \omega\phi, \phi\phi, \omega J/\psi, \phi J/\psi, J/\psi J/\psi, \dots$$

- спектроскопию глюонных состояний (глюболов), а также четырехкварковых состояний (тетракварков) с тяжелыми ароматами;
- изучение образования тяжелых векторных кваркониев в фотон-Померонных ($\gamma\mathcal{P}$)-взаимодействиях: $\gamma\mathcal{P} \rightarrow \omega, \phi, J/\psi, \Upsilon(1S), \dots$
- изучение эксклюзивных реакций с образованием мезонов с тяжелыми кварками в области фрагментации пучка в адрон-ядерных столкновениях;
- измерение сечения процессов одиночной дифракции в области фрагментации пучка.

Исследования поляризационных эффектов

Ну У-1000 предлагается широкая программа изучения спиновых эффектов в рассеянии поляризованных протонов и вторичных адронных пучков с различными мишенями (включая поляризованные):

- зависимость спиновых эффектов от сорта взаимодействующих частиц, в том числе от атомного номера мишени;
- односпиновая и двухспиновая асимметрии;
- поляризация гиперонов и элементы спиновой матрицы векторных мезонов,
- спиновые эффекты в образовании различных очарованных частиц, как с открытым очарованием, так и чармония
- поляризация глюонов в поляризованных протонах, изучая образование $\chi_{c2}(3555)$



- спиновые эффекты в образовании прелестных адронов.

Физика нейтрино на У-1000

Высокоинтенсивные пучки У-1000 предоставляют уникальные возможности для нейтринных экспериментов по двум направлениям — поиск сверхбыстрых осцилляций и исследование физики τ -нейтрино.

Стерильные нейтрино

Существует ряд указаний на существование “тяжелых” ($\Delta m_{\nu}^2 > 1 \text{ эВ}^2$) стерильных нейтрино. Эксперимент с высокой энергией нейтрино ($\approx 150 \text{ ГэВ}$) и очень короткой базой ($\approx 150 \text{ м}$) позволит увидеть возможное исчезновение мюонных нейтрино на уровне точности $\mathcal{O}(1\%)$ в диапазоне масс $1 \text{ эВ}^2 < \Delta m^2 < 1000 \text{ эВ}^2$.

τ -нейтрино

Эксперимент с полным поглощением пучка (beam-dump) — детальное исследования взаимодействий τ -нейтрино.

Эксперимент на У-1000 позволит еще дальше продвинуться в изучении τ -нейтрино — с увеличением энергии (по сравнению с ЦЕРН SPS) растет сечение образования очарованных частиц (“родителей” τ -нейтрино) и растет сечение взаимодействия нейтрино с мишенью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У-1000 может быть реализован на базе имеющейся инфраструктуры в 21-км тоннеле в НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ.

У-1000 имеет несколько важных особенностей:

- существенно большей энергией протонного пучка по сравнению с существующими или сооружаемыми ускорителями протонов JPARC, MI, PIP-II, SPS;
- более широкая, по сравнению с коллайдерами, кинематическая область, доступная для регистрации образованных частиц;
- возможность одновременной работы нескольких детекторов.

В случае реализации:

- **У-1000** позволит существенно продвинуться в поисках Новой физики (FIP, редкие распады каонов и τ -лептонов, ...);
- **У-1000** позволит получить новые результаты в физике сильных взаимодействий, спиновых эффектов, физике ультрапериферических и дифракционных процессов, кварк-глюонной материи и др.;
- **У-1000** может стать “фабрикой” очарованных адронов и τ -лептонов — $N(s, \tau)$ на несколько порядков больше, чем на других ускорителях с выведенными пучками.

Искренняя благодарность

нашим коллегам-соавторам Препринта ИФВЭ-2025-02
за многочисленные и полезные обсуждения

Благодарим за внимание !