

РАЗВИТИЕ ПРОЕКТА «СУПЕР-ЧАРМ-ТАУ ФАБРИКА» В ИЯФ СО РАН

*П. Пиминов*¹

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН разрабатывается проект установки класса мегасайенс — электрон-позитронный коллайдер Супер-чарм-тау фабрика с энергией пучков от 1 до 2,5 ГэВ и с максимальной пиковой светимостью $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, которая достигается с использованием перспективной технологии встречи пучков Crab Waist и больших токов пучков (до 2 А). Другой особенностью проекта является наличие продольной поляризации электронов в месте встречи. Физическая программа коллайдера направлена на изучение *c*-кварка и тау-лептона, а также поиск «новой физики».

New electron–positron collider Super Charm-Tau Factory is under development at the Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk). The machine will operate in the beam energy range from 1 up to 2.5 GeV to study *c*-quark and tau-lepton physics as well as to search phenomena beyond the Standard Model. The maximum peak luminosity of the facility is expected to be $10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. To reach this luminosity we apply a perspective Crab Waist collision scheme and high beam intensity (maximum current of ~ 2 A). The longitudinal polarization of electron beam at the IP significantly extends the experimental capacity of the collider.

PACS: 29.20.db; 13.66.De; 14.60.Fg

ВВЕДЕНИЕ

Электрон-позитронный коллайдер Супер-чарм-тау фабрика (СЧТФ) [1–3] является флагманским проектом ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Эта установка, в числе других пяти крупных физических комплексов, была выбрана правительством РФ для последующей реализации в рамках развития научной инфраструктуры установок класса мегасайенс. Идет проработка проекта, детальное исследование основных физических принципов его функционирования, проектирование и изготовление прототипов ключевых систем и элементов.

1. СУПЕР-ЧАРМ-ТАУ ФАБРИКА

Физическая программа СЧТФ предполагает работу коллайдера в двух режимах [2, 3]. В первом режиме планируется сканирование с шагом в несколько МэВ в диапазоне энергий пучков от 1 до 2,5 ГэВ. Продольная поляризация электронов в точке встречи для этой

¹E-mail: piminov@inp.nsk.su

программы не требуется. Второй режим заключается в наборе статистики при выделенной энергии, соответствующей рождению нуклонов (энергия пучка 1 ГэВ), Λ -гиперона (1,12 ГэВ), τ -лептона (1,78 ГэВ), D_s -мезона (2,1 ГэВ), Λ_c -барионов (2,29 ГэВ), а также в пиках J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$. Во всех перечисленных точках требуется продольная поляризация электронного пучка в месте встречи.

Рассматриваемая физическая программа предъявляет к коллайдеру следующие требования:

- энергия пучка от 1 до 2,5 ГэВ;
- достижение максимальной пиковой светимости $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергии $\sim 2\text{--}2,5 \text{ ГэВ}$;
- продольная поляризация электронного пучка в месте встречи;
- абсолютное измерение энергии пучков с помощью обратного комптоновского рассеяния (с относительной точностью $< 10^{-4}$).

На рис. 1 представлена схема СЧТФ, которая состоит из электронного и позитронного инжекторов, доускоряющего линака, двухкольцевого коллайдера и детектора.

Высокая одногустковая светимость достигается благодаря использованию Crab Waist схемы столкновения пучков с большим параметром Пивинского и субмиллиметровой β_y в месте встречи [4, 5]. Дублет линз финального фокуса на основе компактных сверхпроводящих квадруполь размещается вблизи места встречи внутри детектора. Для реализации схемы Crab Waist требуются малый горизонтальный и вертикальный эмиттансы (на уровне современных источников СИ: $\varepsilon_x = 8 \text{ нм}$, коэффициент бетатронной связи $\kappa = 0,5\%$). Для достижения высокой светимости предполагается столкновение большого числа густков, что требует двух отдельных накопительных колец для позитронного и электронного пучков, в которых устанавливаются сверхпроводящие вигглеры-затухатели, управляющие эмиттансом и временем затухания на различных энергиях. Высокая сте-

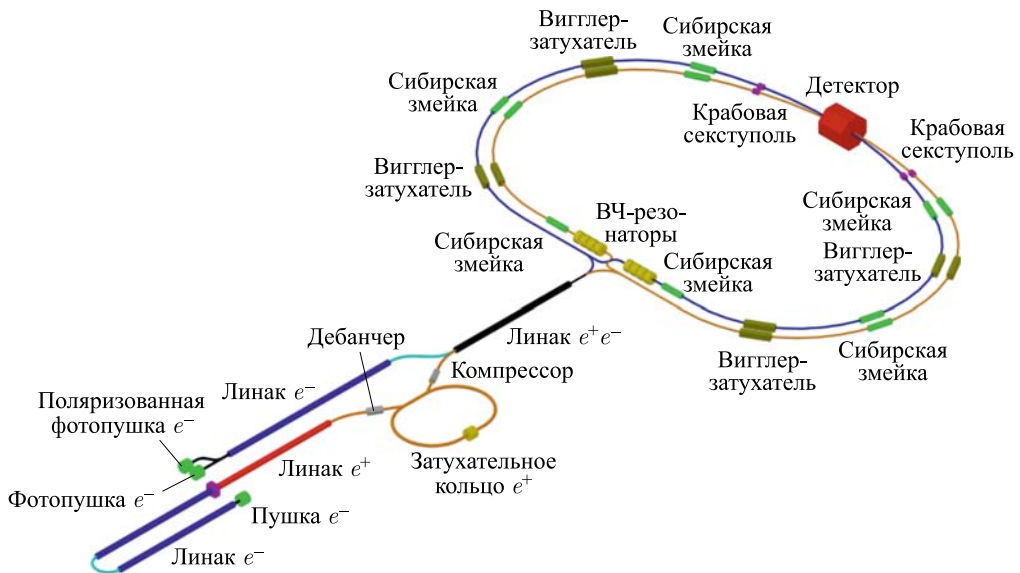


Рис. 1. Схема Супер-чарм-тау фабрики

Параметры Супер-чарм-гау фабрики

Энергия, ГэВ	1,0	1,5	2,0	2,5
Периметр П, м	813,112			
Бетатронные частоты ν_x/ν_y	43,545 / 40,580			
Синхротронная частота ν_s	$4,62 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$9,98 \cdot 10^{-3}$	$8,19 \cdot 10^{-3}$
Амплитуда поля вигглера B_w , кГс	50,0	50,0	34,8	10,2
Потери энергии на оборот U_0 , кэВ	107	271	361	452
Ускоряющее напряжение V_{RF} , МВ	0,16	1,11	1,11	0,99
Время затухания $\tau_x/\tau_y/\tau_s$, мс	51/51/25	30/30/15		
Коэффициент связи k , %	0,5			
Эмиттанс $\varepsilon_x/\varepsilon_y$, нм·рад	8/0,04			
Энергетический разброс $\sigma_{\Delta E}/E$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
Длина сгустка σ_s , см	1,8	1,2	1,0	1,0
Число частиц в сгустке N_0	$7,1 \cdot 10^{10}$			
Число сгустков	406			
Полный ток I , А	1,7			
Бета-функция в IP β_x/β_y , см	4/0,08			
Размер пучка в IP σ_x/σ_y , мкм	17,8/0,178			
Угол встречи 2θ , мрад	60			
Параметр Пивинского φ	30,3	20,2	16,8	16,8
Параметр встречи ξ_y	0,135	0,135	0,121	0,097
Пиковая светимость L , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$0,56 \cdot 10^{35}$	$0,86 \cdot 10^{35}$	$1,02 \cdot 10^{35}$	$1,02 \cdot 10^{35}$

пень поляризации и управление направлением спина в электронном кольце осуществляется спиновыми ротаторами на основе сибирских змеек (СЗ). Непрерывная инжекция на энергии эксперимента обеспечивает поддержание максимального тока и высокую интегральную светимость. В таблице представлены основные параметры СЧТФ.

2. ИНЖЕКТОР

Предполагается использовать два независимых источника электронов и позитронов, что позволяет обеспечить высокий темп инжекции в коллайдер (25–50 Гц). Интенсивность каждого инжектора $\sim 10^{11}$ частиц/с.

Позитронный инжектор состоит из высокоинтенсивной электронной пушки, линейного ускорителя электронов (2,5 ГэВ), конверсионной системы, линейного ускорителя позитронов (1,5 ГэВ) и накопителя-охладителя с энергией 1,5 ГэВ, необходимого для уменьшения фазового объема инжектируемого позитронного пучка.

Электронный инжектор имеет фотопушку с низким эмиттансом для производства неполяризованных электронов и источник поляризованных электронов, состоящий из фотопушки и системы управления спином электронов. Похожий источник поляризованных электронов и спиновый манипулятор были изготовлены в ИЯФ СО РАН для проекта NIKHEF (Амстердам) [6]. После источников происходит ускорение электронов в линейном ускорителе до энергии 1,5 ГэВ.

Финальное ускорение до энергии эксперимента электронов и позитронов (замедление до 1 ГэВ) происходит в общем линейном ускорителе.

В ИЯФ СО РАН имеется опыт создания и эксплуатации линейных ускорителей S-диапазона. В настоящее время идет разработка прототипа ускоряющей структуры СЧТФ с энергией 200 МэВ, включающей клистрон, систему умножения мощности типа SLED и две ускоряющие секции длиной по 3 м [7].

3. КОЛЛАЙДЕР

Коллайдер СЧТФ состоит из двух накопителей электронов и позитронов, пересекающихся в детекторе и в противоположной точке, где пучки разводятся по вертикали. Накопитель включает две поворотные арки (меньшего и большего радиуса), экспериментальный и технический промежутки.

В экспериментальном промежутке размещается универсальный магнитный детектор с продольным полем 10 кГс. Внутри детектора вблизи точки встречи помещена система финального фокуса (ФФ), включающая антисоленоид, компенсирующий поле детектора, дублет линз в криостате с экранирующим соленоидом, набор магнитных корректоров, вакуумное и диагностическое оборудование (рис. 2, *а*). Квадрупольные линзы являются двухапертурными и воздействуют только на один пучок. Максимальный градиент линзы ФФ –10,7 кГс/см при апертуре \varnothing 2 см. К магнитной системе ФФ предъявляются жесткие требования по компактности конструкции, чтобы обеспечить ее размещение внутри телесного угла 15° , как это требуется для экспериментов.

В ИЯФ СО РАН изготовлен одноапертурный прототип первой дефокусирующей линзы (рис. 2, *б*). Получен требуемый градиент поля [8].

Одним из ключевых аспектов СЧТФ является наличие продольной поляризации электронного пучка в месте встречи во всем диапазоне энергий. Для управления направлением спина в электронном кольце выбрана схема с пятью сибирскими змейками, каждая из которых вращает спин на 180° вокруг оси пучка. СЗ состоит из двух сверхпроводящих соленоидов и семи квадрупольных линз между ними. Такая система делает движение вне спинового ротатора несвязанным [9]. Соответствующие участки позитронного кольца

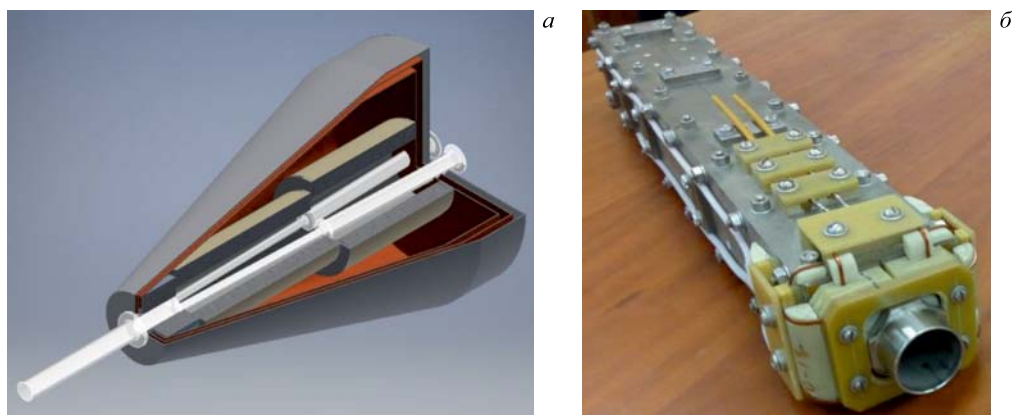


Рис. 2. Система финального фокуса (*а*) и прототип линзы ФФ (*б*)

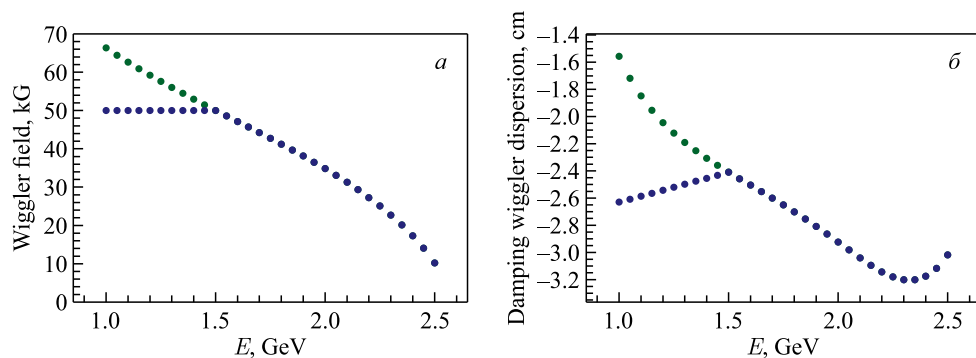


Рис. 3. Зависимость поля вигглера-затухателя (а) и дисперсии в нем (б) от энергии пучка

устроены аналогично, но не содержат соленоидов, которые, однако, могут быть вставлены при необходимости. Использование СЗ позволяет избежать спиновых резонансов, один из которых приходится на порог рождения τ -лептона, а другой на область Λ -бариона. Сверхпроводящий соленоид СЗ имеет максимальное поле 7 Тл, магнитную длину 1,85 м и апертуру \varnothing 7,6 см.

Для управления радиационными параметрами пучка в каждое накопительное кольцо устанавливаются четыре сверхпроводящих вигглера-затухателя с максимальным полем 50 кГс, длиной 1,9 м и периодом поля 25 см. Вигглеры размещаются в поворотных арках между СЗ, где модуль вектора спин-орбитальной связи минимален, и слабо влияют на поляризацию пучка. На рис. 3 показана зависимость поля вигглера-затухателя и дисперсионной функции в нем, которая создается ближайшими дипольными магнитами, от энергии пучка. Такое поведение дисперсии и поля позволяет держать эмиттанс пучка постоянным во всем диапазоне энергий. Время затухания колебаний остается постоянным ($\tau_x = 30$ мс) в диапазоне 1,5–2,5 ГэВ. Ниже 1,5 ГэВ поле вигглера достигает максимального значения (50 Тл), однако время затухания возрастает незначительно ($\tau_x = 50$ мс на 1 ГэВ). Сверхпроводящий вигглер со схожими параметрами был изготовлен в ИЯФ СО РАН для источника синхротронного излучения LSU CAMD (США) [10].

4. ДЕТЕКТОР

Универсальный магнитный детектор с продольным полем 1 Тл обладает высоким импульсным разрешением для заряженных частиц, высоким энергетическим разрешением для фотонов и системой идентификации с рекордными параметрами. Большая светимость СЧТФ предполагает создание высокоскоростной системы сбора данных и уникального триггера, способного выделять события и подавлять фон при очень высоких нагрузках. Предполагается размещать оцифровывающую электронику непосредственно внутри детектора, а для передачи данных использовать оптические линии связи. Конструкция детектора предполагает быстрый доступ к подсистемам внутри детектора (в течение 12–24 ч), а ввод-вывод поля не более 3 ч.

Конструкция универсального магнитного детектора основывается на работах ИЯФ СО РАН, а также в ней используется опыт международного сотрудничества с коллаборациями ВаВар и Belle. Общий вид детектора показан на рис. 4.

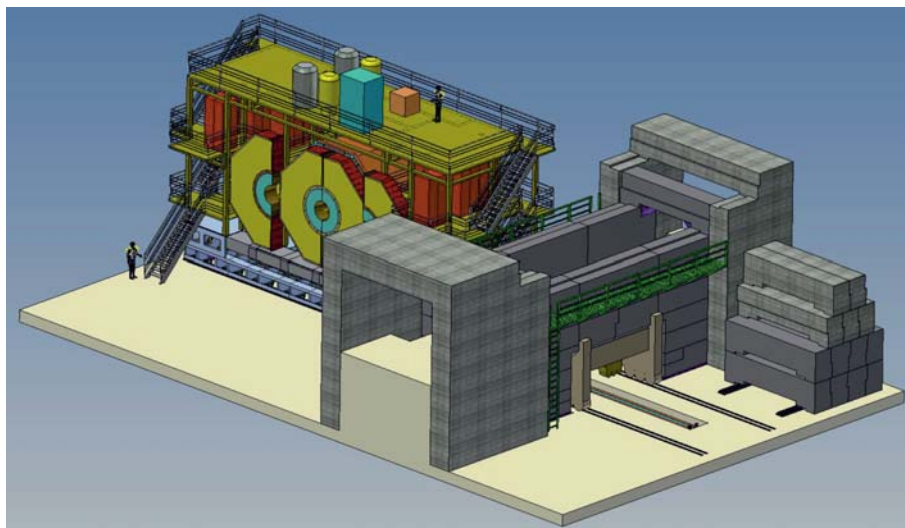


Рис. 4. Общий вид детектора СЧТФ в сдвинутом и раздвинутом состоянии

В настоящее время в ИЯФ идет создание прототипов ключевых систем детектора. В частности, разрабатывается система FARICH на основе фокусирующих черенковских счетчиков [11], которая будет использоваться в системе идентификации детектора СЧТФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проекте СЧТФ в ИЯФ СО РАН рассмотрены основные вопросы линейной оптики и динамики пучка, что позволяет получить параметры коллайдера, требуемые для выполнения запланированной экспериментальной программы, и сделать выводы о реализуемости проекта.

Продолжаются работы по коррекции хроматизма и оптимизации динамической апертуры и динамического аксептанса коллайдера с учетом широкого спектра источников нелинейного возмущения. Начаты исследования по коллективным неустойчивостям высокоинтенсивных пучков. Разрабатываются основные системы инжекционного комплекса. Концептуальное проектирование коллайдера планируется завершить к концу 2018 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080) с использованием уникальной научной установки «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000», получившей финансовую поддержку государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev E.* The Project of a Tau-Charm Factory with Crab Waist in Novosibirsk // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5, No. 7. P. 554–559.
2. *Bondar A.* Project of a Super Charm-Tau Factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk // *Phys. At. Nucl.* 2013. V. 76, No. 9. P. 1072–1085.

3. Conceptual Design Report: A Project of Super c - τ Factory in Novosibirsk. 2011.
4. *Raimondi P., Zobov M.* DAΦNE Technical Note G-58. 2003.
5. *Shatilov D., Zobov M.* // ICFA Beam Dyn. Newslett. 2005. V. 37. P. 99.
6. *Koop I. et al.* Polarized Electrons in AmPS // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 427. P. 36–40.
7. *Samoylov S.* 200 MeV S-band Accelerating Module // XII Intern. Scientific Seminar in Memory of V. P. Sarantsev, Alushta, Crimea, Russia, Sept. 3–8, 2017.
8. *Okunev I.* Superconducting Quadrupole for Final Focus. http://ias.ust.hk/program/shared_doc/2017/201701hep/HEP_20170125_Ivan_Okunev.pdf.
9. *Derbenev Ya. et al.* Radiative Polarization: Obtaining, Control, Using // Part. Accel. 1978. V. 8. P. 115–126.
10. *Mezentsev N. et al.* A Preliminary Report from Louisiana State University CAMD Storage Ring Operating with an 11 Pole 7.5 Tesla Wiggler // Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA, IPAC15-TUPJE034.
11. *Barnyakov A. et al.* Tests of FARICH Prototype with Precise Photon Position Detection // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 766. P. 88–91.