

К 60-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СО РАН

Работы со встречными электрон-позитронными пучками
в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Е.Б. Левичев, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов

Установки со встречными пучками (коллайдеры) занимают важное место в исследованиях фундаментальных свойств материи, элементарных частиц и их взаимодействий. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН является одним из пионеров создания и становления метода встречных пучков и продолжает оставаться на лидирующих позициях в применении этого метода. Рассматриваются прошлое, настоящее и будущее работ со встречными пучками в ИЯФ.

Ключевые слова: магниты, встречные пучки, синхротрон, эмиттанс, светимость, электрон, позитрон, детектор, с-т-фабрика, поляризация

PACS numbers: 01.65.+g, 14.40.Lb, 14.60.Fg, 29.20.D–

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038300>

Содержание

1. Введение (461).
 2. Начало работ со встречными пучками в ИЯФ (462).
 - 2.1. Встречные электрон-электронные пучки (ВЭП-1).
 - 2.2. Первый электрон-позитронный коллайдер ИЯФ ВЭПП-2.
 - 2.3. Высокопроизводительный электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М.
 - 2.4. Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4.
 3. Современный статус работ со встречными пучками в ИЯФ (469).
 - 3.1. Модернизация ВЭПП-4.
 - 3.2. Круглые встречные пучки — ВЭПП-2000.
 4. Супер-чарм-тау-фабрика (475).
 5. Заключение (479).
- Список литературы (479).

1. Введение

В последние годы слово "коллайдер" стало знакомым не только учёным, но и широкому кругу людей, не имеющих отношения к физике. Эксперименты на коллайдерах (которые в СССР назывались "установками со встречными пучками") за последние десятилетия стали наряду с астрофизикой одним из основных источников информации о фундаментальных свойствах материи. Преимуществом коллайдеров является возможность управления условиями проведения экспериментов, что, естественно, нельзя сделать в астрофизике. Первые установки со встречными пучками появились более 50 лет назад

(примерно 1964–1966 гг.), и Институт ядерной физики (ИЯФ) (в то время — ИЯФ Сибирского отделения Академии наук СССР, ныне — ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН) оказался в числе первых научных центров, заложивших основы этого нового направления в физике элементарных частиц.

Идея встречных пучков принадлежит норвежскому инженеру Р. Видерое, подавшему заявку на патент на использование этого метода в 1943 г. и получившему его в 1953 г. [1]. В дальнейшем метод был развит Д. Керстом [2], предложившим сталкивать протонные пучки в кольцевом фазотроне [3] (английское название метода — Fixed Field, Alternative Gradient, FFAG). Дж. О'Нил в 1956 г. на Женевской конференции по физике высоких энергий предложил электрон-электронные встречные пучки и в том же году — протон-протонные накопительные кольца [4]. Керст указал на огромный энергетический выигрыш в случае использования релятивистских встречных пучков по сравнению с зондированием ускоренными частицами неподвижной мишени — методом, принятым ранее. Дело заключается в том, что в случае двух частиц, движущихся навстречу друг другу, так что центр их инерции до и после соударения остаётся неподвижным, вся энергия сталкивающихся частиц идёт на производство "полезного" действия (например, на рождение новых частиц), тогда как в случае неподвижной мишени большая доля энергии тратится на приведение в движение системы частиц как целого и лишь малая часть — на исследуемую реакцию. Выигрыш в величине эквивалентной энергии столкновения частиц особенно значительно возрастает при релятивистских энергиях, что сильнее всего проявляется для электронов и позитронов.

В конце 1950-х годов сразу в нескольких физических лабораториях мира развернулись работы по реализации метода встречных пучков. В СССР инициатором таких работ стал Герш Ицкович Будкер — основатель и первый

Е.Б. Левичев, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов.
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск,
Российская Федерация
E-mail: levichev@inp.nsk.su, a.n.skrinsky@inp.nsk.su,
yu.m.shatunov@inp.nsk.su

Статья поступила 15 января 2018 г.,
после доработки 16 февраля 2018 г.

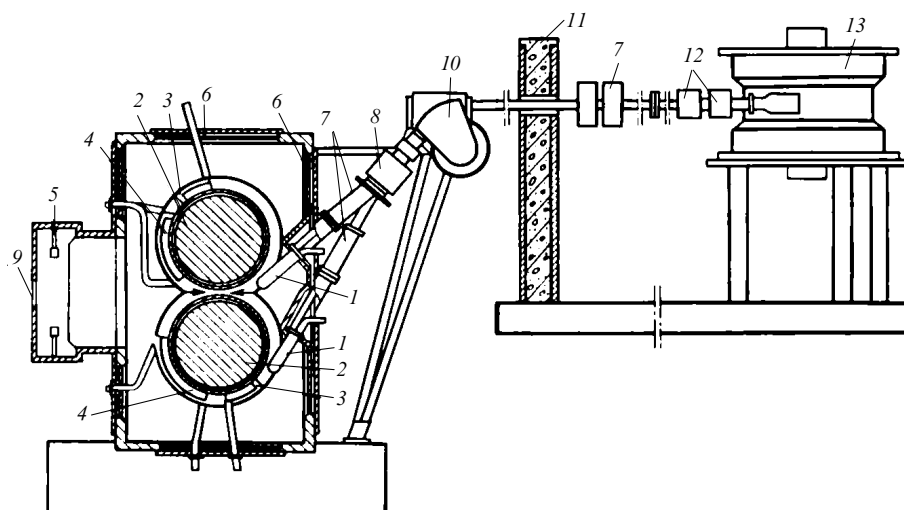


Рис. 1. Схема комплекса ВЭП-1. 1 — компенсирующие системы (аналог септум-магнитов), 2 — ярмо магнита, 3 — ускоряющий резонатор, 4 — инфлектор, 5 — вакуумный насос (азотит), 6 — внутренние фланцы, 7 — квадрупольные линзы, 8 — коммутающий магнит, 9 — окно вывода синхротронного излучения, 10 — поворотный магнит, 11 — радиационная защита, 12 — корректоры, 13 — синхротрон Б2-С.

директор ИЯФ СО РАН, в то время — руководитель лаборатории новых методов ускорения в Институте атомной энергии (ныне Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт").

Первыми коллайдерами, реализовавшими встречные пучки, были: e^+e^- -установка AdA (от итал. Anello di Accumulazione — накопительное кольцо) [5] (максимальная энергия пучков 250 МэВ), лаборатория LNF/INFN (Laboratori Nazionali di Frascati/Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) (Фраскати, Италия), ВЭП-1 (встречные электронные пучки) [6] (энергия пучков до 160 МэВ) (ИЯФ, Новосибирск) и e^+e^- -проект Princeton–Stanford Experimental Collider [7] с энергией пучков около 500 МэВ (Стэнфордский университет, США). Интерес к электрон-электронному рассеянию был связан с результатами опытов Р. Хофштадтера по рассеянию электронов на протонах [8], в которых была обнаружена внутренняя структура протона. На накопительных кольцах эксперименты по проверке квантовой электродинамики продолжались до 1967 г.; в них было доказано отсутствие внутренней структуры электрона на масштабах вплоть до $2,6 \times 10^{-15}$ см [9].

Интенсивность позитронов в AdA была мала, так что удалось лишь зафиксировать столкновения частиц и провести программу исследований по физике ускорителей. За прошедшие 60 лет метод встречных пучков развивался по нескольким направлениям. Во-первых, это расширение ассортимента сталкивающихся частиц. Накопление электронов и позитронов в кольцах стало возможным благодаря затуханию их фазовых объёмов под действием синхротронного излучения. Изобретение стохастического и электронного охлаждения сделало возможным накопление протонов и антипротонов. Установки со встречными пучками этих частиц успешно работали в предыдущем десятилетии в ЦЕРНе (Super Proton Synchrotron — SPS) и в Национальной лаборатории им. Ферми в США (Тэватрон). Сегодня — это протон-протонные и ион-ионные коллайдеры: RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) (Брукхейвенская национальная лаборатория, США) и LHC (Large Hadron Collider) (ЦЕРН). Обсуждаются проекты мюон-мюонных пучков и встречные пучки в линейных коллайдерах. Развитие тематики

встречных пучков, следуя велениям времени, вело неизбежно к возрастанию энергии частиц и увеличению светимости установок.

Результаты, полученные в ИЯФ, и целый ряд рождённых там идей существенно повлияли как на развитие метода встречных пучков, так и на программу экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах. Настоящий обзор посвящён ретроспективному взгляду на историю ИЯФ и описанию его устремлений в ближайшее будущее.

2. Начало работ со встречными пучками в ИЯФ

2.1. Встречные электрон-электронные пучки (ВЭП-1)

Основная задача установки ВЭП-1 состояла в демонстрации возможности постановки экспериментов по физике высоких энергий на встречных электронных пучках (ВЭП). Главной целью являлась проверка квантовой электродинамики на малых расстояниях в электрон-электронном рассеянии на большие углы при энергиях в несколько сотен МэВ. Для обычного ускорителя с неподвижной мишенью эквивалентная энергия равнялась бы 100 ГэВ, а сам ускоритель имел бы размеры в несколько десятков километров (размер будущего Большого электрон-позитронного коллайдера (Large Electron-Positron collider — LEP)).

Работы над ВЭП-1 начались в 1958–1959 гг. в Институте атомной энергии в Москве, но в 1962 г., в связи с основанием ИЯФ, установка была перевезена в Новосибирск.

Комплекс ВЭП-1 [10, 11] включал в себя: инжектор — электронный синхротрон с бетатронным предускорением Б2-С, соприкасающиеся накопительные кольца, обеспечивающие в месте соприкосновения орбит столкновение встречных сгустков электронов, и электронно-оптический канал для перевода ускоренных электронов из синхротрона в накопительные кольца. Схема комплекса показана на рис. 1, его внешний вид представлен на рис. 2. Параметры коллайдера ВЭП-1 приведены в табл. 1.

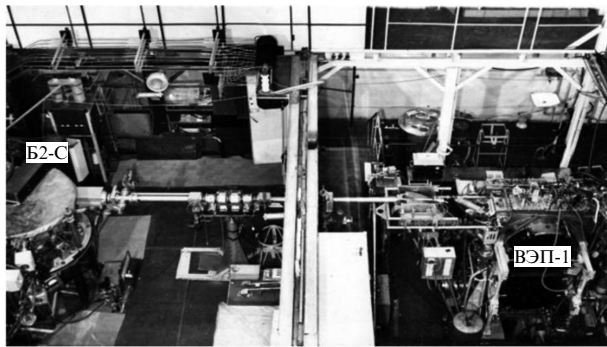


Рис. 2. Общий вид комплекса. Фотография сделана с противоположной стороны по отношению к схеме на рис. 1: слева — синхротрон Б2-С; справа — верхнее кольцо ВЭП-1.

Таблица 1. Основные параметры ВЭП-1

Энергия инжекции, МэВ	43
Максимальная энергия пучка, МэВ	160
Радиус орбиты, см	43
Кратность ускоряющего напряжения	2
Максимальное ускоряющее напряжение, кВ	6
Давление остаточного газа, мм рт. ст.	3×10^{-8}
Время жизни пучка, с	$\sim 400 - 1200$
Время затухания на энергии инжекции, с	~ 1
Ток пучка, мА	≤ 100
Пиковая светимость, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	5×10^{27}

Циркулирующий пучок на верхней дорожке накопителя был получен 20 августа 1963 г., первая светимость зарегистрирована 19 мая 1964 г. С 1965 г. по 1968 г. на коллайдере ВЭП-1 регулярно проводились исследования по физике частиц, которые подтвердили справедливость квантовой электродинамики при энергии вплоть до энергии 2×160 МэВ, т.е. электрон является точечным образованием на масштабах до 4×10^{-14} см и, в отличие от протона, не имеет внутренней структуры.

Кроме физики высоких энергий на ВЭП-1 проводилась обширная программа работ по физике ускорителей и пучков заряженных частиц, включая исследования эффектов встречи, внутрисгусткового рассеяния, нелинейных резонансов и пр. [12–16].

На рисунке 3 показано поведение пучка в процессе изучения нелинейных резонансов с использованием синхротронного излучения.

2.2. Первый электрон-позитронный коллайдер ИЯФ ВЭПП-2

Обсуждение возможности получения встречных электрон-позитронных пучков (ВЭПП) в ИЯФ восходит к 1959 г. Уже на первой стадии работ по ВЭП-1 была начата проработка первого e^+e^- -коллайдера ВЭПП-2 [17] со светимостью в 40000 раз выше, чем у AdA. Для обеспечения рождения К-мезонов была выбрана максимальная энергия установки 700 МэВ.

Надо сказать, что в конце 1950-х – начале 1960-х годов сооружение такой установки казалось не очень реаль-

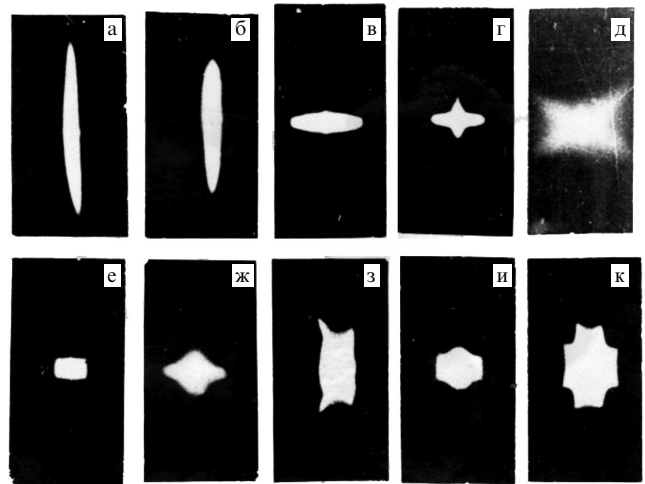


Рис. 3. Фотографии поперечного сечения пучка вблизи различных резонансов частот бетатронных и синхротронных колебаний: (а) $v_x = 2/3$, (б) $v_x = 3/4$, (в) $v_z = 3/4$, (г) $v_z = 3/4$, $3v_x - 2v_z = 2$, (д) $2v_x + v_z = 2$, (е) $2v_x + v_z - v_s = 2$, (ж) $v_z = 5/6$, (з) $v_z + 4v_x = 3$, (и) $4v_z + v_x = 4$, (к) $4v_z + v_x = 4$, $v_z + 4v_x = 3$.

ным. Первоначальный проект установки был представлен И.В. Курчатову, который направил программу встречных электрон-позитронных пучков на отзыв трём ведущим специалистам. Отзывы были разные, но все резко отрицательные. Игорь Васильевич тогда, посмеиваясь, заявил: "Значит, в этом есть что-то нетривиальное. Надо делать".

С самого начала Г.И. Будкеру было ясно, что институт не может пойти по пути использования в качестве инжектора линейного ускорителя, который мог бы обеспечить высокую интенсивность электронов и, соответственно, позитронов. В институте не было сложных технологий для создания такого ускорителя, а в стране не было мощных и надёжных клистронов. Потребовались бы, как показывает нынешний опыт, многие годы для создания такого инжектора. Однако полученный к тому времени в ИЯФ опыт создания ускорителей показал, что решение позитронной проблемы возможно при ускорении электронов в быстроточном синхротроне. Г.И. Будкер предложил конструкцию, в которой магнитное поле формируется одновитковыми токовыми шинами и магнитными полюсами, что должно обеспечить малую величину рассеянных полей и возможность достижения малого времени ускорения. Эта идея была воплощена в синхротроне Б-3М, на базе которого организована инжекционная часть комплекса ВЭПП-2.

Схема комплекса и его внешний вид показаны на рис. 4. Инжекционная часть состояла из импульсного линейного ускорителя (ИЛУ), электронно-оптической системы транспортировки пучка, электронного синхротрона Б-3М, устройства впуска – выпуска, набора систем питания элементов комплекса, управления и контроля. ИЛУ представлял собой высокочастотный резонатор, работавший на частоте 2,5 МГц с максимальным напряжением 2,5 МВ, ускорявший пучок электронов длительностью 30 нс с током 30 А. Энергия инжектируемого в синхротрон Б-3М пучка была недостаточна для синхротронного режима, поэтому с помощью бетатронного сердечника пучок предварительно ускорялся до энергии 7 МэВ, после чего включались высокочастотная уско-

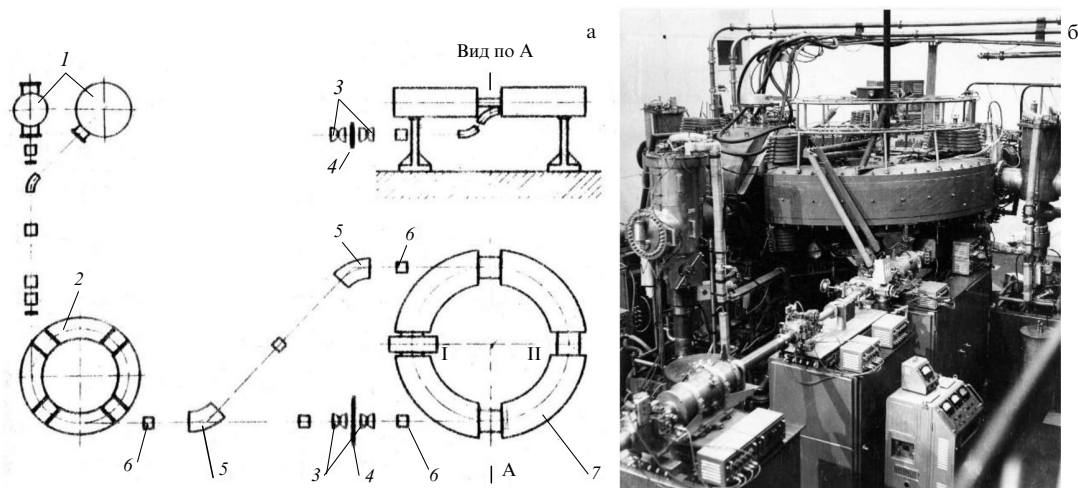


Рис. 4. (а) Схема комплекса ВЭПП-2: 1 — форинжектор ИЛУ, 2 — синхротрон Б-3М, 3 и 4 — параболические линзы и конвертор, 5 — поворотные магниты канала, 6 — квадрупольные линзы, 7 — накопитель ВЭПП-2. Промежутки ВЭПП-2: I — резонатор, II — место встречи. (б) Фотография ВЭПП-2.

ряющая система и основное ведущее магнитное поле. Инжекция и выпуск из Б-3М были однооборотными. Максимальная энергия Б-3М достигала 250 МэВ [18]. Число ускоряемых электронов составляло $3 \times 10^{11} \text{ с}^{-1}$ при частоте повторения 1 Гц. Синхротрон показал себя очень надёжной установкой, он действовал свыше 50 лет, обеспечивая работу трёх поколений коллайдеров на встречных электрон-позитронных пучках: ВЭПП-2, ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. За эти годы неоднократно подвергались модернизации инжектор, системы впуска — выпуска, высокочастотная (ВЧ) система, системы питания и электронные системы.

ВЭПП-2 (см. рис. 4) представлял собой слабо фокусирующий накопитель с четырьмя магнитными секторами и четырьмя прямолинейными промежутками, два из которых использовались для инжекции электронов и позитронов, в третьем был расположен ускоряющий резонатор и последний предназначался для установки регистрирующей аппаратуры. Время жизни пучка при малом токе составляло 10 ч, при токе 100 мА — около 4 ч.

Основным параметром накопителя со встречными пучками является его светимость, которая определяет число событий в единицу времени $\dot{n} = L\sigma$ некоего процесса, имеющего сечение σ . Если во встречающихся двух сгустках содержится N_1 и N_2 частиц, то светимость даётся выражением

$$L = \frac{N_1 N_2}{S} f, \quad (1)$$

где S — поперечная площадь сгустка, f — частота встречи, которая для случая двух сгустков совпадает с частотой вращения f_0 .

Расчётные параметры накопителя ВЭПП-2 приведены в табл. 2. Позитроны производились конверсией электронов через гамма-кванты на мишени толщиной около одной радиационной единицы. Для эффективного сбора позитронов с конвертора использовалась короткофокусная линза, состоявшая из двух выполненных из бериллия толщиной около 0,2 мм параболаидов вращения, соприкасающихся своими вершинами. Линза запитывалась импульсом тока свыше 100 кА и длительностью около 1 мкс [19].

Таблица 2. Параметры ВЭПП-2

Энергия инжекции e^+/e^- , МэВ	120/250
Максимальная энергия пучка, МэВ	670
Радиус поворота магнита, см	150
Длина прямолинейного участка, см	60
Максимальное ускоряющее напряжение, кВ	200
Частота вращения f_0 , Гц	$2,5 \times 10^7$
Длина сгустка, см	80–20 *
Ток пучка (при 510 МэВ), мА	40
Пиковая светимость, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	3×10^{28}
* Сгусток укоротился в результате модернизации системы.	

Первая инжекция электронного пучка в ВЭПП-2 была осуществлена в июне 1964 г., а первые позитроны были получены в мае 1965 г. [20].

Первые эксперименты со встречными e^+e^- -пучками начались в июне 1966 г. на энергии 2×380 МэВ. Позитронный ток составлял около 5 мА, электронный — несколько десятков миллиампер. В 1966 г. система искровых оптических камер зарегистрировала первые π -мезоны. Это стало началом физики на встречных электрон-позитронных пучках [21].

В 1968 г. была проведена модернизация ВЭПП-2. Новый резонатор с частотой 75 МГц позволил укоротить сгустки частиц до 6 см; витки коррекций на полюсах магнитов расширили область доступных частот бета-тронных колебаний и сделали возможным регулировку связи колебаний и их хроматичности. Установка распределённых магниторазрядных насосов в вакуумной камере магнитных секторов улучшила вакуум в кольце до $\sim 10^{-9}$ Торр, что позволило накапливать токи пучков до 50 мА. В результате модернизации светимость достигла расчётного значения $L = 3 \times 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Эксперименты на ВЭПП-2 продолжались до ноября 1970 г. Кроме исследования уже известных мезонных резонансов ρ , ω и ϕ на более высоких энергиях было проведено наблюдение многоадронных событий [22–24].

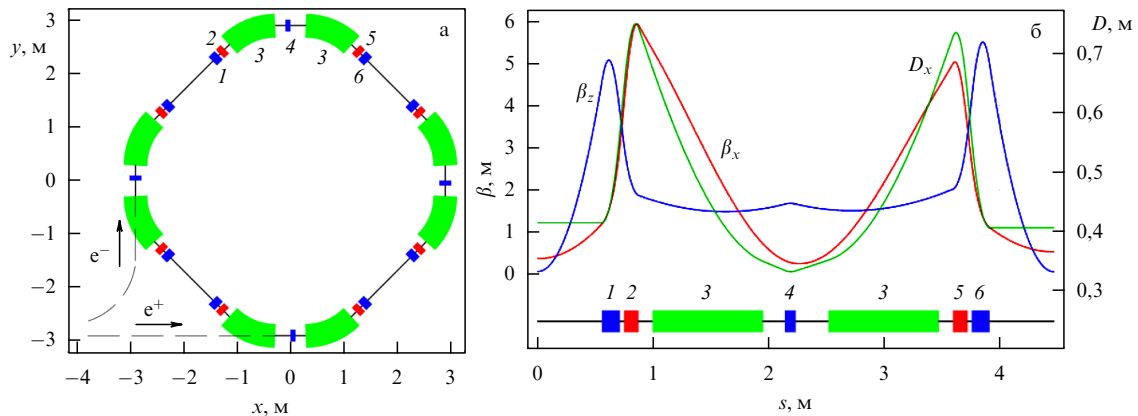


Рис. 5. (В цвете онлайн.) (а) Схема коллайдера ВЭПП-2М: 1, 2, 4–6 — квадрупольные линзы, 3 — поворотные магниты. (б) Оптические функции β_z , β_x и D_x в одном периоде накопительного кольца.

Эти результаты инициировали создание нового коллайдера, ВЭПП-2М, со значительно большей светимостью. Кольцо ВЭПП-2 было переоборудовано в бустер.

Как и на ВЭП-1, на ВЭПП-2 проводились многочисленные эксперименты по ускорительной тематике. Впервые наблюдались и исследовались многие коллективные эффекты и когерентные неустойчивости интенсивных пучков. Для оптимизации светимости изучались эффекты встречи и нелинейная динамика. Впервые в мире была обнаружена и измерена радиационная самополяризация электронов [25], предложен, обоснован и проверен экспериментально метод прецизионной калибровки энергии пучка циркулирующих частиц с помощью резонансной деполяризации. Этот метод был развит на новом накопителе ВЭПП-2М, и впоследствии он вошёл в арсенал инструментов физики высоких энергий и успешно использовался на многих накопителях мира. Самым впечатляющим применением этого метода стало изучение Z-бозона в ЦЕРНе на LEP, где была измерена не только его масса, но и ширина пика, по которой было установлено число поколений частиц в Стандартной модели — три.

2.3. Высокопроизводительный электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М

После наблюдения на ВЭПП-2 (а также на французском коллайдере ACO (Anneau de Collision d'Orsay) и итальянской установке со встречными пучками Adone) многоадронных событий в электрон-позитронных столкновениях интерес к физике высоких энергий на лептонных коллайдерах резко возрос. В то же время специалисты по ускорителям частиц накопили большой практический опыт и появилось глубокое понимание физики сталкивающихся пучков, технологии разработки различных систем установки и повышения их эффективности. Поэтому в Новосибирске в 1970 г. было принято решение о создании нового e^+e^- -коллайдера на диапазон энергий ВЭПП-2, но с существенно большей производительностью. Установка получила название ВЭПП-2М [26], хотя это был совершенно новый накопитель, а не модернизированный ВЭПП-2. В Стэнфорде на базе линейного ускорителя SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) несколько позднее началось сооружение электрон-позитронного накопителя SPEAR (Stanford Positron Electron Asymmetric Rings) на энергию до 3 ГэВ [27].

Светимость накопителя, как известно, ограничена эффектами электромагнитного взаимодействия встречных сгустков. В случае плоского пучка это взаимодействие приводит к сдвигу частоты вертикальных колебаний, которая при гауссовом распределении плотности частиц в коротком сгустке даётся выражением:

$$\xi_z = \frac{Nr_0\beta_z}{2\pi\gamma\sigma_z(\sigma_x + \sigma_z)}, \quad (2)$$

где $\sigma_{x,z}$ — стандартные отклонения частиц в сгустке, r_0 — классический радиус электрона, β_z — оптическая функция накопителя, которая является огибающей амплитуды вертикальных колебаний. Подставляя ξ_z в формулу (1), выражение для светимости можно представить в виде

$$L = \frac{N^+N^-}{4\pi\sigma_x\sigma_z} f = \frac{N^+\xi_z^+\gamma}{2r_0\beta_z^*} f. \quad (3)$$

Поскольку сдвиг частоты всегда ограничен, то основным нововведением, позволяющим увеличить светимость, является фокусировка пучка в месте встречи за счёт малой вертикальной бетатронной функции β_z^* . Для ВЭПП-2М был найден простой и надёжный вариант магнитной структуры из четырёх зеркально симметричных элементов периодичности. Каждый период имел два поворотных магнита с однородным полем, пару дублетов квадрупольных линз, позволяющих фокусировать пучок в местах встречи, и дополнительную линзу между магнитами для увеличения степеней свободы регулировки оптики. Три из четырёх длинных прямолинейных промежутков с малой β_z^* использовались для установки детекторов, четвёртый — для ускоряющего резонатора. Выбранная схема размещения магнитных элементов и структура элемента периодичности приведены на рис. 5.

Для частичной компенсации эффектов встречи были выбраны частоты бетатронных колебаний вблизи целого резонанса: $\nu_x = 3,06$, $\nu_z = 3,08$. Оптика ВЭПП-2М позволяла иметь большой горизонтальный эмиттанс и регулировать вертикальный эмиттанс подавлением связи $x-z$ колебаний. Для компактности накопителя и усиления радиационного затухания поворотные магниты имели максимальное поле 1,8 Тл. Все магниты и фокусирующие дублеты включались последовательно с источником тока до 8 кА. Параметры коллайдера приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры ВЭПП-2М

Максимальная энергия пучка, МэВ	670
Радиус поворота магнита, см	122
Длина прямолинейных промежутков, см	110,6
Максимальное поле, Тл	1,825
Частоты бетатронных колебаний (горизонтальная/вертикальная)	3,06/3,08
Коэффициент уплотнения орбит	0,167
Эмиттансы (горизонтальный/вертикальный), см рад	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-7}$
$\beta_{x,z}^+$ -функции в месте встречи (горизонтальная/вертикальная), см	45/6,5
Максимальная светимость (при 510 МэВ), $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	5×10^{30}

Высокочастотный резонатор, работавший на частоте 201 МГц, развивал ускоряющее напряжение до 300 кВ, что позволяло получать длину сгустка менее 6 см, необходимую для достижения высокой светимости. Для обеспечения времени жизни пучков в несколько часов и нормальных фоновых условий при проведении эксперимента необходим был средний вакуум порядка 10^{-9} Торр, а в экспериментальных промежутках — 10^{-10} Торр в условиях мощного синхротронного излучения. Для получения такого вакуума была создана система откачки на основе сосредоточенных и распределённых магниторазрядных насосов, которые располагались в магнитном поле на внутреннем радиусе вакуумной камеры. Синхротронное излучение "перехватывалось" специальными приёмниками с водяным охлаждением.

Инжекционная часть ВЭПП-2М включала в себя ИЛУ, Б-3М и ВЭПП-2, работавший как бустерный накопитель, в котором поочерёдно накапливались электронный и позитронный пучки. В 1989 г. ВЭПП-2, к тому времени устаревший и ненадёжный, был заменён новым бустерным накопителем БЭП [28] с существенно большим акцептансом. Конверсионная система была заменена блоками из двух литиевых линз [29], одна из которых фокусировала электроны на конвертор, а другая собирала позитроны. Эти нововведения позволили на порядок повысить скорость накопления позитронов и увеличить светимость ВЭПП-2М на высокой энергии.

При малой энергии ВЭПП-2М и достаточно большой интенсивности сгустков существенную роль в динамике частиц играло внутрисгустковое рассеяние, увеличивающее, в зависимости от тока, поперечные размеры и энергетический разброс пучков. Для дополнительного увеличения размеров пучка и светимости в один из промежутков ВЭПП-2М была установлена сверхпроводящая магнитная "змейка" с максимальным полем 7,5 Тл, что позволило существенно увеличить пиковую светимость (в пять раз на энергии 510 МэВ) [30].

Экспериментальная программа коллайдера включала в себя исследования векторных мезонов ρ , ω и ϕ , а также продуктов их распадов: нейтральных и заряженных π - и K -мезонов и т.д. Интегральная светимость, набранная на ВЭПП-2М за 25 лет его работы несколькими поколениями детекторов, обеспечила около 70 % событий рождения адронов для расчёта в рамках Стан-

дартной модели адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона [31].

На накопительном кольце ВЭПП-2М проведён большой цикл экспериментов с поляризованными пучками. Это были пионерские работы по изучению радиационной поляризации и спиновых резонансов. Время радиационной поляризации $\tau_p \sim \gamma^5$ при максимальной энергии 670 МэВ составляло 50 мин, но изобретение частичной Сибирской змейки (1975 г.) для пересечения спиновых резонансов позволило получать поляризованные пучки практически во всём диапазоне энергий накопителя. Метод резонансной деполяризации, впервые применённый на ВЭПП-2, получил на ВЭПП-2М дальнейшее развитие и позволил калибровать энергию пучка с относительной точностью 2×10^{-6} . Благодаря этому возникло новое направление в физике элементарных частиц, а именно постановка прецизионных экспериментов по измерению масс частиц, рождающихся при электрон-позитронной аннигиляции. Массы мезонов ω , ϕ , K^0 , $K^\pm$ были измерены с рекордно высокой для того времени точностью [32]. В этой серии прецизионных измерений с поляризованными пучками особо выделяется эксперимент по сравнению аномальных магнитных моментов электрона и позитрона, в котором было доказано равенство этих величин с точностью 1×10^{-6} [33].

Кроме исследований по физике высоких энергий на ВЭПП-2М была осуществлена широкая программа экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ), которое в то время набирало популярность как инструмент мультидисциплинарных исследований в области химии, биологии, физики поверхности, материаловедения и т.п. Энергия ВЭПП-2М и величина магнитного поля в поворотных магнитах позволяли работать в области ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, в диапазоне длин волн от 2000 Å до 3 Å. Первые эксперименты по изучению спектров поглощения были поставлены сотрудниками Института неорганической химии СО АН СССР в 1974 г. Установка в 1984 г. сверхпроводящей змейки с большим полем позволила использовать более жёсткое СИ с существенно большей мощностью. В двух радиационно-защищённых залах, где были установлены экспериментальные станции, могло работать одновременно несколько экспериментальных групп. Из проведённых с использованием СИ работ следует отметить эксперименты по изучению стимулированной синхротронным излучением десорбции в условиях высокого вакуума. Начало этих работ в 1991 г. было связано с проектом суперколлайдера SSC (Superconducting Super Collider) (Даллас, США), однако после закрытия этого проекта эксперименты были продолжены для коллайдера LHC (ЦЕРН, Женева). Выбор ВЭПП-2М для этих целей был обусловлен тем, что спектр излучения его электронов был близок к спектру СИ протонного пучка этих коллайдеров. Так эксперименты на малом коллайдере помогли создать Большой адронный коллайдер (LHC).

2.4. Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4

Ещё при запуске ВЭПП-2 начались обсуждения e^+e^- -коллайдера на энергию 3–3,5 ГэВ, который, естественно, получил название ВЭПП-3. В 1967 г. научному сообществу были представлены основные характеристики накопителя ВЭПП-3 [34, 35]. Сильнофокусирующая магнитная система состояла из двух полуокружност-

тей радиусом 8 м, разделённых прямолинейными промежутками длиной 12 м. Рабочая точка была выбрана недалеко от центра области устойчивости, где размеры пучка минимальны. Был выбран набег фазы бетатронных колебаний $\approx \pi/3$ на магнитную ячейку. Для получения максимального среднего поля магнитная ячейка с целью удешевления и упрощения конструкции изготавливалась единым блоком с короткими фокусирующим и дефокусирующим магнитами и двумя длинными магнитами с нулевым градиентом. Магниты полукольца подвешивались к потолку. Эта идея Г.И. Будкера позволила сэкономить на размере туннеля и удешевить его строительство. Такое же решение впоследствии было выбрано и для ВЭПП-4.

В качестве инжектора ВЭПП-3 использовались ускоритель электронов ЭЛИТ (электронный импульсный трансформатор) и синхротрон Б-4 [36]. Разработка Б-4 началась в 1967 г., а в 1969 г. он был запущен. Инжекция электронов в ВЭПП-3 была осуществлена в 1970 г., но позитронная система оказалась готова только к 1972 г. Эффективность её оказалась невысока, и попытка получить расчётную светимость не увенчалась успехом.

Примерно в те же годы в Стэнфорде (США) строился накопитель SPEAR, который по своим энергии и размерам был близок к ВЭПП-3. Мощный источник позитронов на базе линейного ускорителя SLAC и малая $\beta_z^* = 5$ см обеспечили быстрое получение светимости порядка $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в режиме по одному сгустку в каждом пучке. Такой светимости оказалось достаточно для того, чтобы сделать два фундаментальных открытия. Во-первых, это наблюдение в 1974 г. J/ψ -мезона [37], одновременно с наблюдением этого мезона на синхротроне AGS (Alternating Gradient Synchrotron) в Брукхейвене, и, во-вторых, открытие t -лептона в 1976 г. [38].

Из неудачи ВЭПП-3 в роли коллайдера был сделан вывод, что в ИЯФ нужен новый источник позитронов, а ВЭПП-3 может быть прекрасным источником СИ и одновременно бустером для строящегося в ИЯФ нового накопителя ВЭПП-4.

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4 стал преемником и наследником сразу двух проектов со встречными пучками — ВЭПП-3 и ВАПП (встречные антипротон-протонные пучки). ВАПП задумывался как протон-антипротонный коллайдер с энергией до 2×25 ГэВ. Однако в процессе работы над проектом ВАПП стало ясно, что протон-антипротонная программа ИЯФ, к сожалению, не выдерживает конкуренции с проектами ЦЕРНа, где уже имелся интенсивный источник протонов высокой энергии. Поэтому было решено превратить кольцо ВАПП в e^+e^- -коллайдер ВЭПП-4 с энергией 2×6 ГэВ, а ВЭПП-3 — в бустер-накопитель позитронов и электронов в составе нового коллайдера (рис. 6).

В ликвидации дефицита позитронов главную роль сыграла предложенная Г.И. Будкером идея импульсного гирокона, который смог обеспечить высокочастотное питание на частоте 430 МГц сильноточного линейного ускорителя электронов, ставшего основой нового инжекционного комплекса "Позитрон" [39], вошедшего в строй в 1979 г. После линейного ускорителя пучок электронов (до 10^{13} частиц в импульсе) фокусировался на вольфрамовый конвертор, а полученные позитроны при энергии 7 МэВ направлялись в синхротрон Б-4, где ускорялись до энергии 350 МэВ и инжектировались в ВЭПП-3.

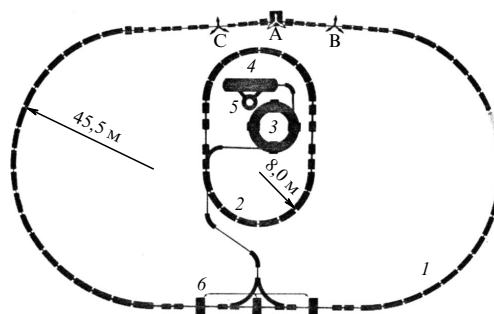


Рис. 6. Комплекс ВЭПП-4: 1 — накопительное кольцо ВЭПП-4, 2 — ВЭПП-3, 3 — синхротрон-инжектор Б-4, 4 — линейный ускоритель, 5 — импульсный высокочастотный генератор "Гирокон", 6 — ускоряющие резонаторы ВЭПП-4, А, В и С — места встречи.

Максимальная интенсивность выпущенного из синхротрона пучка позитронов в ВЭПП-3 составила $2 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$. Этой скорости накопления хватало, чтобы получать в ВЭПП-4 ускоренные токи 10×10 мА.

Существенное отличие ВЭПП-4 от ВАПП заключается в необходимости мощной, ввиду интенсивного СИ, ускоряющей ВЧ-системы. К этому времени началась разработка гирокона — генератора непрерывной высокочастотной мощности с круговой развёрткой, идея которого была предложена Г.И. Будкером. Синхротронное излучение релятивистских электронов и позитронов потребовало существенной переделки вакуумной камеры, а именно установки эффективных приёмников СИ и усиления (ввиду интенсивной десорбции из стенок) системы откачки остаточного газа.

Магнитная структура полуколец, которая первоначально была ориентирована на протон-антипротонную программу, не обеспечивала радиационного затухания радиальных бетатронных колебаний, поэтому в структуру кольца был добавлен специальный магнитный элемент — периодическая "змейка-затухатель", перераспределявшая радиационные декременты. Для того чтобы установить детектор с поперечным полем, необходимо было удалить по одному элементу периодичности в каждом полукольце на входе в экспериментальный промежуток. С обеих сторон от детектора МД-1 размещались дополнительные поворотные магниты, увеличивающие отклонение потерявших энергию частиц. Технический промежуток, противоположный экспериментальному, предназначался для размещения ускоряющих резонаторов, системы инжекции электронов и позитронов и другого оборудования.

Предварительные оценки показали, что и при максимальной энергии расчётная светимость ВЭПП-4 составляет $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при токах 2×10 мА [40]. Достижение такой светимости зависело от эффективности производства позитронов и возможности получения больших токов. Важную роль в повышении светимости сыграла возможность гибкой перестройки с помощью электронно-вычислительной машины (ЭВМ) оптики в месте встречи после накопления и ускорения пучков для уменьшения вертикальной β -функции с 46 см до 12 см. В этом варианте реально была получена светимость $5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Актуальным также являлся вопрос уменьшения влияния жёсткого СИ на фоновые условия в детекторе. Комплекс принятых мер по усилению вакуумной откачки позволил получить хороший вакуум

(порядка 10^{-9} Торр), приемлемые фоновые условия и время жизни на высокой энергии (5,5 ГэВ) несколько часов при рабочих токах 2×10 мА.

Высокочастотная система ВЭПП-4 была рассчитана на частоту 181 МГц. На первом этапе работы на низкой энергии при измерении масс ψ -мезонов использовался один ускоряющий резонатор, питаемый от лампового генератора с выходным каскадом на четырёх лампах ГИ-50А (ГИ — аббр. от "генератор импульсный") с мощностью в 130 кВт. Максимального напряжения, которое составляло 1,1 МВ, было достаточно для получения энергии 3,8 ГэВ. Ещё пять резонаторов обеспечивали энергию 5,5 ГэВ. В качестве источника высокочастотной мощности на первом этапе использовался гирокон [41], но устройство оказалось сложным и ненадёжным, и программа была временно остановлена. В 1983 г. питание всех резонаторов было переведено на лампы ГИ-50А. Суммарная мощность системы высокочастотного питания составляла около 200 кВт, что позволяло работать с током электронов и позитронов 2×10 мА при энергии до 5,3 ГэВ.

Для придания своеобразия экспериментальной программе ВЭПП-4 было решено сделать упор на двухфотонную физику [42], интерес к которой вырос после открытия на ВЭПП-2 рождения e^+e^- -пар в двухфотонном канале. Для этого магнитное поле магнитного детектора МД-1 сделали поперечным (вертикальным), что позволяло регистрировать электрон и позитрон, потерявшие энергию в двухфотонном взаимодействии. Другой "изюминкой" научной программы ВЭПП-4 стала возможность прецизионной калибровки энергии пучков методом радиационной деполяризации. Электронный пучок предварительно поляризовался в ВЭПП-3 и инжектировался в ВЭПП-4 на энергии эксперимента.

Первые эксперименты с двумя пучками были начаты на ВЭПП-4 в ноябре 1979 г. с детектором "Оля", завершившим свою программу на ВЭПП-2М и помещённым в месте встречи С (см. рис. 6). Вместе с детектором "Оля" на ВЭПП-4 была перенесена методика калибровки энергии с помощью резонансной деполяризации. В качестве поляриметра использовались сцинтилляционные счётчики, регистрирующие частицы, выбывающие из пучка вследствие внутрисгусткового рассеяния [43]. В марте 1980 г. детектором "Оля" были проведены прецизионные измерения масс J/ψ - и ψ' -мезонов, улучшившие на порядок их табличную точность. Это позволило также уточнить путём пересчёта значения масс D^+ -, D^- - и D^0 -мезонов.

Весной 1982 г. началась работа по подготовке измерения массы Υ -мезона детектором МД-1. (Первый ипсилон-мезон $\Upsilon(1S)$ открыт в Фермилаб в 1977 г.). Как и ранее, абсолютная калибровка энергии производилась методом резонансной деполяризации пучка. Способ измерения поляризации основан на асимметрии обратного комптоновского излучения на встречном поляризованном пучке. В качестве источника циркулярно поляризованных фотонов в одном поляриметре использовался импульсный твердотельный YAG-лазер [44], а в другом — синхротронное излучение от встречного пучка [45]. Величина асимметрии оказалась достаточной, чтобы надёжно провести измерения по точному определению массы Υ -мезонов [46]. В течение 1982–1985 гг. было выполнено несколько циклов сканирования различных со-

стояний ипсилон-мезонов. В итоге точность измерения массы Υ -мезона была повышена почти на два порядка, а мезонов Υ' и Υ'' — в 20 раз [47]. Эксперимент вызвал большой интерес мировой общественности, о чём говорит повторение аналогичных измерений по "Новосибирской методике" на установках CESR (Cornell Electron Storage Ring) (Корнельский университет, США) [48] и DORIS (DOuble RIng Store) (Исследовательский центр по физике частиц DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron), Германия) [49].

Эти установки, схожие с ВЭПП-4, являлись его конкурентами. Накопитель DORIS был задуман как коллайдер с двумя кольцами и пересечением электронов и позитронов под вертикальным углом в месте встречи. Однако на практике оказалось, что синхробетатронные резонансы в принципе приводят к неустойчивостям. В итоге накопитель DORIS превратился в "обычный" коллайдер с одним кольцом на энергию 5,3 ГэВ с мощным источником позитронов PIA (Positron Intensity Accumulator) и светимостью $5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Электрон-позитронный коллайдер CESR на энергию 1,75–6 ГэВ, работавший в 1979–2008 гг., был построен в одном тоннеле рядом с электронным синхротроном, который стал инжектором накопителя. В режиме "1 $\times$ 1-сгусток" на CESR была достигнута светимость $3 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на энергии 5,5 ГэВ. На CESR впервые была организована встреча большого числа сгустков благодаря специальному, получившему название "pretzel" ("кренделёк"), искажению равновесной орбиты, позволяющему избежать пересечения пучков в "паразитных" местах встречи. Перестройка фокусирующей системы на опцию с малой бета-функцией, переход на работу с многими сгустками (45 $\times$ 45 сгустков) и пересечение под углом, а также разработка и использование сверхпроводящих ВЧ-резонаторов позволили повысить светимость установки до $1,25 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В 1990-е годы, вплоть до момента запуска В-фабрик [50], CESR являлся коллайдером с наивысшей в мире светимостью.

Комплекс ВЭПП-4 был уже достаточно крупной установкой, на которой имелось несколько тысяч каналов управления сложным электрофизическим оборудованием и контроля над ним. Было очевидным, что работа такого комплекса невозможна без автоматизированной системы управления. Для построения такой системы использовались цифровые ЭВМ серии ОДРА-1300 польского производства с оперативной памятью 16/32 килобайт, внешней памятью до 256 килобайт и быстродействием 10^4 операций в 1 с. Ввиду уникальности стоящих задач всё остальное: полный набор измерительных и управляющих устройств, системы быстрой (наносекундного интервала) синхронизации процессов, устройства локальной сети, программное обеспечение (включая операционную систему, язык программирования, трансляторы, редакторы и т.п.) — пришлось разрабатывать самим [51]. В конце 1970-х годов, когда в системах управления начал внедряться магистрально-модульный стандарт КАМАК (от англ. CAMAC — Computer Automated Measurement and Control), позволяющий интегрировать в одном крейте блоки различного назначения, появилась возможность формировать локальные многофункциональные управляющие и измерительные системы. Это в свою очередь потребовало создания интеллектуального контроллера-микрокомпьютера, кото-

рый и был разработан в начале 1980-х годов. Этот микрокомпьютер производительностью, примерно эквивалентной производительности выпускавшегося тогда персонального компьютера IBM PC-XT 286, обеспечивал как универсальные, так и специфические для управления сложными электрофизическими установками функции, включая ряд протоколов межмашинного обмена данными, синхронизацию процессов с работой подсистем комплекса и т.п.

Кроме экспериментов по физике высоких энергий на комплексе ВЭПП-4 было выполнено большое количество интересных и красивых работ в области физики частиц и ускорителей. Ниже кратко перечислим лишь некоторые из них; подробности могут быть найдены в приводимых ссылках.

Впервые в мире наблюдалось и исследовалось излучение релятивистского электрона в магнитном поле, вызванное наличием у частицы спина ("спиновый свет") [52]; эти эксперименты до сих пор никем не повторены. Изучены спектр и сечение однократного тормозного излучения на встречном пучке и открыт эффект уменьшения сечения, связанный с ограничением прицельных параметров поперечным размером сгустка [53]. Созданная лазерная система позднее послужила базой для экспериментов по ядерной физике [54]. На накопителе ВЭПП-3 впервые в мире был запущен предложенный в ИЯФ уникальный источник когерентного электромагнитного излучения "оптический клистрон" [55], являющийся модификацией лазера на свободных электронах с высоким коэффициентом усиления. Здесь же, на установке ВЭПП-3, проводились регулярные эксперименты с использованием СИ из первой в мире многополюсной сверхпроводящей змейки [56] и исследования по ядерной физике на внутренней газовой мишени (в том числе поляризованной) [57]. Оба накопителя (ВЭПП-3 и ВЭПП-4) использовались для изучения различных аспектов физики ускорителей, включая эффекты встречи, нелинейную динамику пучков, когерентные неустойчивости, динамику поляризованных электронов и позитронов и др.

Успешная работа ВЭПП-4 была прервана пожаром, случившимся в ночь на 16 августа 1985 г. Из-за короткого замыкания загорелся блок питания высоковакуумного насоса. Огонь, распространившийся по кабельным трассам, затронул практически все помещения комплекса и уничтожил большую часть оборудования.

3. Современный статус работ со встречными пучками в ИЯФ

3.1. Модернизация ВЭПП-4

Огненная стихия вывела из строя практически все системы комплекса ВЭПП-4. Часть из них была восстановлена в прежнем виде, однако большинство установок подверглось существенным изменениям. Ещё до пожара рассматривалось несколько вариантов модернизации коллайдера, в первую очередь для таких задач, как монохроматизация энергии взаимодействия или получение встречных пучков с продольной поляризацией. Ранее предполагалось ещё в течение нескольких лет использовать детектор МД-1, хотя уже были начаты работы по созданию нового детектора с продольным магнитным полем. Пожар спутал и ускорил все планы. Надо было срочно решать, что делать дальше. После многих обсуждений было принято решение: в физической программе оставить и улучшить пункты, касающиеся проведения экспериментов по двухфотонной физике при существенном повышении светимости [58]. Повышение светимости могло обеспечить также проведение и других экспериментов, в частности прецизионных, основанных на использовании поляризованных пучков. Прежде всего существенной переделке подверглась магнитная структура промежуток встречи, которая теперь могла регистрировать рассеянные электроны (позитроны) с измерением их энергии, не требуя наличия детектора с поперечным магнитным полем типа МД-1 [59]. Детектор "Кедр" с продольным магнитным полем позволил приблизить фокусирующие линзы к месту встречи. Эти линзы и установленные после них поворотные магниты представляют собой спектрометры, измеряющие с помощью расположенных в них систем регистрации спектр рассеянных в двухфотонном процессе электронов (рис. 7).

Важнейшим моментом модернизации стала симметрия магнитной структуры ВЭПП-4М относительно центра промежутков. Новый детектор "Кедр" был поставлен в центр экспериментального промежутка, в то время как прежний детектор МД-1 был смещён от центра на 2,3 м.

Установка линз финального фокуса ближе к точке пересечения позволила уменьшить вертикальную бета-функцию до 5 см и увеличить светимость. Благодаря магнитам спектрометра рассеянных электронов дисперсионная функция на азимуте встречи не равнялась нулю и

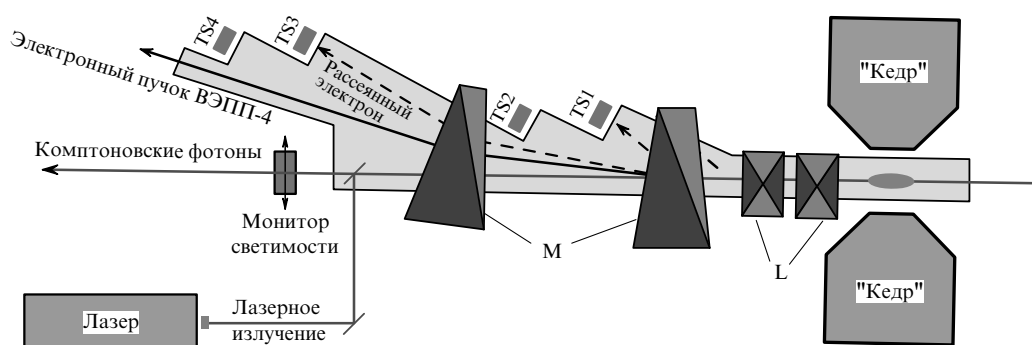


Рис. 7. Схема электронной части спектрометра: L — линзы финального фокуса, М — магниты спектрометра, TS1–TS4 — координатные счётчики для регистрации рассеянных электронов, "Кедр" — универсальный детектор с продольным полем. Позитронная часть спектрометра зеркально симметрична относительно центра детектора (точки встречи).

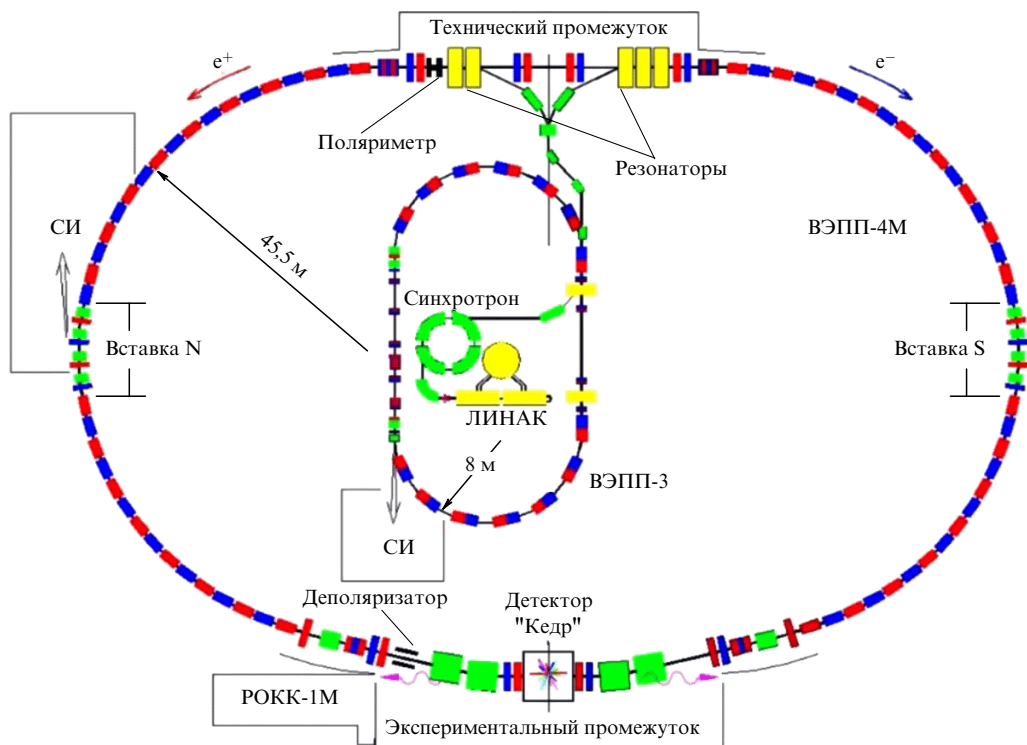


Рис. 8. Схема комплекса ВЭПП-4М: СИ — экспериментальные залы для исследований с синхротронным излучением, РОКК-1М — установка для работы с выведенными пучками и рассеянными назад комптоновскими гамма-квантами, ЛИНАК — линейный акселератор.

энергетический размер там превышал бетатронный, что также способствовало повышению светимости при увеличении интенсивности сгустка. В середине полуколец два элемента периодичности были заменены вставками, состоящими из четырёх магнитов и линз с увеличенной апертурой. Установленные здесь электроды разведения позитронного и электронного пучков позволили реализовать режим столкновения "2 × 2-сгустка". К сожалению, из-за малой апертуры на ВЭПП-4М не удалось осуществить многосгустковый режим, как это было сделано в CESR.

Кроме магнитной системы накопителя ВЭПП-4 глубокой модернизации подверглись ускоряющая высокочастотная система, инжекционный комплекс "Позитрон", канал транспортировки пучков от ВЭПП-3 к ВЭПП-4, устройства впуска/выпуска частиц, системы управления, контроля и диагностики пучков и т.д. Первый этап восстановления комплекса был завершён к концу 1991 г. и 27 ноября 1991 г. впервые после пожара пучок электронов был захвачен в накопитель ВЭПП-4М. Подробное описание детектора "Кедр" и ускорительного комплекса ВЭПП-4М с обширной библиографией дано в [60, 61] соответственно.

Схема комплекса ВЭПП-4М показана на рис. 8. Его основные параметры приведены в табл. 4. До 2016 г. инжекционная часть состояла из тех же установок, что и у ВЭПП-4: линейного ускорителя, питаемого импульсным гироконом, синхротрона Б-4 и накопителя-бустера ВЭПП-3. На рисунке 9 показан тоннель ВЭПП-4М с накопителем, подвешенным к потолку, и детектор "Кедр".

Основное назначение коллайдера ВЭПП-4М — экспериментальное изучение свойств элементарных частиц, параметров резонансных состояний и сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции. Расчётная свети-

Таблица 4. Основные параметры ВЭПП-4М

Периметр P , м	366,075
Частота обращения f_0 , кГц	818,924
Кратность ВЧ-системы	222
Период обращения T_0 , нс	1221
Максимальная энергия E , ГэВ	5,5
Коэффициент уплотнения орбит α	0,017
Бетатронные частоты Q_x/Q_z	8,54/7,58
β - и ψ -функции в месте встречи $\beta_x/\beta_z/\psi_x$, см	75/5/80
Рабочие параметры на энергии 1,8 ГэВ *	
Время затухания колебаний: $\tau_z/\tau_x/\tau_s$, мс	70/35/70
Горизонтальный эмиттанс ϵ_x , нм рад	17
Энергетический разброс σ_E/E	4×10^{-4}
Продольный размер σ_L , см	6
Количество сгустков e^+e^-	2, 2
Кратность ВЧ-системы	222
Светимость, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	3×10^{30}
* Максимальное время набора статистики в сезоне 2000–2010 гг. соответствовало энергии рождения ψ -мезонов и τ -лептона.	

мость ВЭПП-4М варьируется в диапазоне $(1-80) \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в зависимости от энергии пучков. На низкой энергии светимость ограничена эффектами встречи, а на высокой — скоростью производства позитронов и возможностью получения и ускорения больших токов в энергетическом диапазоне от энергии инжекции (1,8 ГэВ) до энергии эксперимента.

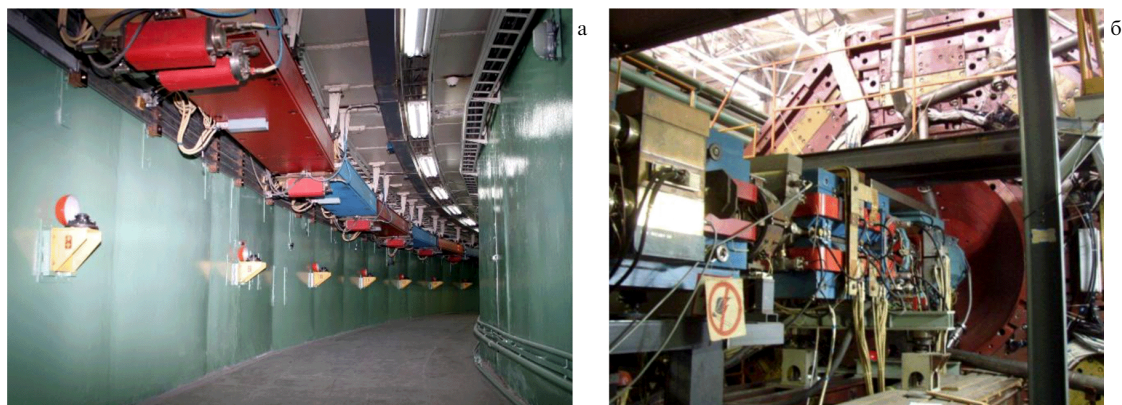


Рис. 9. (а) Размещение ВЭПП-4М под потолком тоннеля. (б) Элементы финального фокуса и детектор "Кедр".

Несмотря на невысокую светимость по сравнению со светимостью современных коллайдеров, ВЭПП-4М с детектором "Кедр" обладает рядом преимуществ, позволяющих проводить уникальные исследования по физике высоких энергий:

- широкий диапазон энергий в пучке — от 0,9 ГэВ до 5,5 ГэВ;
- возможность измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации с рекордно высокой абсолютной точностью — 10^{-6} ;
- возможность непрерывного мониторинга энергии пучка с относительной точностью 5×10^{-5} и энергетического разброса с точностью 10 % по измерению положения края комптоновского спектра обратно рассеянных монохроматических лазерных фотонов;
- наличие универсального магнитного детектора "Кедр", сравнимого по параметрам с современными детекторами для экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах;
- наличие системы регистрации электронов, рассеянных при взаимодействии двух пучков, с высоким импульсным разрешением 2γ -состояния ($\sim 10^{-3}$), позволяющей проводить уникальные исследования двухфотонных процессов.

Система измерения энергии частиц методом резонансной деполяризации и отработанная процедура восстановления энергии между калибровками с использованием измеряемых параметров ВЭПП-4М позволяет определять массу элементарных частиц с чрезвычайно высокой точностью. В экспериментах, проводившихся на ВЭПП-4М с 2000 г., с рекордно высокой точностью измерены массы мезонов J/ψ , $\psi(2s)$ и $\psi(3770)$, а также масса τ -лептона. Массы J/ψ - и $\psi(2s)$ -мезонов, измеренные на ВЭПП-4М с точностью, в 3–4 раза лучшей среднемировой, входят в десятку наиболее точно известных масс элементарных частиц за всю историю физики. В настоящее время точнее измерены только массы электрона, протона, нейтрона, мюона и $\pi^\pm$ -мезонов. В 2008 г. закончен эксперимент по измерению массы τ -лептона, внесший значительный вклад в установление пределов применимости Стандартной модели — теории, которая на сегодняшний день наиболее полно описывает фундаментальные свойства материи и элементарных частиц.

Научная программа коллайдера ВЭПП-4М на ближайшие годы связана с повышением энергии сталкивающихся пучков для измерения сечения аннигиляции

электрон-позитронных пар в адроны в диапазоне $2E = 4\text{--}11$ ГэВ, исследования двухфотонных процессов (таких как $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны), измерения лептонной ширины и уточнения массы Υ -мезонов и пр. Для получения светимости, адекватной высокой энергии, необходимо увеличивать интенсивность сталкивающихся сгустков, что было затруднительно (особенно это касается позитронов) с предыдущим инжекционным комплексом "Позитрон". Поэтому в 2016 г. ВЭПП-4М был переведён на снабжение электронами и позитронами от нового инжекционного комплекса (ИК), введённого в эксплуатацию в 2013 г. [62]. ИК состоит из двух линейных ускорителей (с проектной энергией 300 и 510 МэВ) с позитронным конвертором между ними и накопителя-охлаждителя с максимальной энергией до 510 МэВ. Сейчас пучки электронов и позитронов из нового ИК транспортируются по длинному (≈ 300 м) электронно-оптическому каналу в ВЭПП-3. Скорость накопления позитронов в ВЭПП-3 с новым ИК возросла в 10 раз. Это позволит получить светимость на энергии 5,5 ГэВ, близкую по эффектам встречи к предельной.

ВЭПП-4М — многофункциональный мультидисциплинарный ускорительный комплекс. Здесь ведутся исследования на пучках синхротронного излучения (15 экспериментальных станций, использующих СИ из накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М) [63]. Основные направления исследований: LIGA-технология¹, наносекундная диагностика быстропротекающих процессов, прецизионная дифрактометрия и аномальное рассеяние, локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ, дифрактометрия при высоких давлениях, рентгеновская микроскопия и томография, дифрактометрия с временным разрешением, малоугловое рассеяние, спектроскопия протяжённой тонкой структуры рентгеновского поглощения (Extended X-Ray Absorption Fine Structure — EXAFS), метрология в вакуумном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах.

В течение ряда лет проводятся исследования электромагнитной структуры дейтрона в экспериментах с тензорно-поляризованной внутренней газовой мишенью в

¹ LIGA — аббр. от немецких названий основных стадий этой технологии: рентгеновская литография на синхротронном излучении (Lithographie), гальванопластика (Galvanoförmung) и формовка (Abförmung).

электронном накопителе ВЭПП-3 [64]. Такие исследования играют ключевую роль в ядерной физике, поскольку результаты экспериментов с этой простейшей ядерной системой могут быть интерпретированы исходя непосредственно из современных представлений о нуклон-нуклонном взаимодействии, мезонных обменных токах и других ненуклонных степенях свободы и, следовательно, могут служить проверкой этих представлений. Довольно большой ток накопителя ВЭПП-3 (≈ 100 мА) и плотная мишень обеспечивают высокую светимость эксперимента.

Для проведения методических работ по разработке перспективных детекторов для физики высоких энергий и ядерных исследований создан экспериментальный стенд, использующий выведенный из вакуумной камеры ВЭПП-4М тестовый пучок электронов. Для получения последнего в гало пучка коллайдера вводится подвижный конвертор, в котором образуются тормозные гамма-кванты. Обратная конверсия тормозных гамма-квантов в электрон-позитронные пары производится в экспериментальном зале установки на конверсионной мишени. Для отбора электронов с определённым импульсом используется дипольный поворотный магнит. Тестовый пучок электронов имеет следующие параметры: диапазон энергий 100–3500 МэВ, энергетический разброс 7,8 % для энергии 100 МэВ и 2,6 % для энергии 3000 МэВ, средняя скорость счёта 50 Гц. Установка оснащена всем необходимым оборудованием для организации триггерного сигнала, измерения координат треков и энергии тестового пучка. Используемая для этого система сбора данных обеспечивает также регистрацию данных с тестируемых прототипов детекторов. Начиная с 2011 г. на тестовом пучке электронов проводятся измерения детекторов для регистрации черенковских колец (перспективная система идентификации частиц для проекта Супер-чарм-тау-фабрика), приборов на основе микроканальных пластин для времяпролётных систем с предельным временным разрешением, координатных детекторов на основе газовых электронных умножителей и т.д.

3.2. Круглые встречные пучки — ВЭПП-2000

К концу 1990-х годов коллайдер ВЭПП-2М выполнил свою физическую программу. В диапазоне энергий от 180 до 700 МэВ в пучке несколькими поколениями детекторов был набран суммарный интеграл светимости ~ 100 пб $^{-1}$, который обеспечил около 70 % точности расчёта вклада адронов в аномальный магнитный момент мюона. Установка была успешной, отработала четверть века, но для получения новых интересных результатов необходимо было совершить качественный рывок по светимости либо поставить новые физические задачи.

В это время в Италии запускалась Ф-фабрика DAΦNE (Double Annular Φ factory for Nice Experiments), использующая все современные подходы к созданию высокопроизводительных коллайдеров (два кольца, пересечение под углом, многосгустковый режим, токи пучков ~ 1 –2 А), с проектной светимостью выше 10^{32} см $^{-2}$ с $^{-1}$. В США и Японии завершалось строительство В-фабрик в другом диапазоне энергий, но со сверхвысокой светимостью. На этом фоне эксплуатировать устаревший во всех отношениях ВЭПП-2М становилось бессмысленным.

В то же время стало понятно, что финансово-экономическая модель в стране изменилась навсегда и рассчитывать на реализацию больших и дорогих проектов в обозримом будущем не приходится. С конца 1980-х годов в ИЯФ развивался смелый проект Ф-фабрики [65], который включал в себя целую "россыпь" необычных решений: "кольцо" в форме восьмёрки с одним местом встречи ("сибирская бабочка"); сильные сверхпроводящие диполи для увеличения радиационного затухания; финальную фокусировку соленоидами и др. Краеугольным камнем проекта являлась концепция круглых встречных пучков [66].

В планарном накопителе сгусток электронов формируется СИ, причём его вертикальный размер много меньше горизонтального, который в свою очередь много меньше продольного. Светимость коллайдера ограничена эффектами встречи — взаимодействием частиц с коллективным электромагнитным полем встречного сгустка. Это поле, являясь нелинейным, создаёт как густую двумерную сетку нелинейных резонансов, так и разброс бетатронных частот в пучке, накрывающий сетку. Движение частицы в таком поле становится стохастическим. Как мы видели, на ВЭПП-2М достижимый параметр встречных пучков не превышает $\xi_z \approx 0,06$ и слабо возрастает с увеличением энергии вследствие усиления затухания, достигая на ЛЕР величины $\xi \approx 0,083$ при энергии около 100 ГэВ.

Впервые использование круглого пучка для подавления эффектов встречи было рассмотрено в 1979 г. в ИЯФ [67]. Для достижения максимальной светимости на ВЭПП-2000 в проект машинной оптики была заложена концепция круглых пучков [68]. Симметрия x – z транспортной матрицы бетатронного движения между местами встречи привела к сохранению углового момента ($M = xz' - zx' = \text{const}$). Отсюда вытекают требования к магнитной системе коллайдера с круглыми пучками: а) равные поперечные эмиттансы пучков; б) равенство вертикальной и горизонтальной бета-функций в месте встречи; в) одинаковая нецелая часть бетатронных частот [69]. Как следствие, при этом возрастает стабильность движения частиц даже с учётом нелинейных эффектов от взаимодействия встречных сгустков [70].

Для круглых встречных пучков формула светимости (3) преобразуется в следующую:

$$L = \frac{4\pi\gamma^2 \xi_{\text{max}}^2 \varepsilon f}{r_0^2 \beta^*}, \quad (4)$$

где ε — эмиттанс пучков.

Компьютерное моделирование подтверждало эти ожидания как для варианта взаимодействия "слабый – сильный", так и для варианта "сильный – сильный" и давало достижимое значение параметра встречи $\xi = 0,1$ [71].

Уже в первых измерениях эффектов встречи на ВЭПП-2000 была продемонстрирована большая устойчивость круглых пучков к эффектам встречи и был получен параметр $\xi = 0,1$ [72].

Поскольку дополнительного финансирования ново-сибирской Ф-фабрики получить не удалось, вначале рассматривался минималистский вариант модернизации ВЭПП-2М, предусматривавший замену квадруполов финального фокуса сверхпроводящими соленоидами с полем 8,5 Тл. Однако экспериментаторы настояли

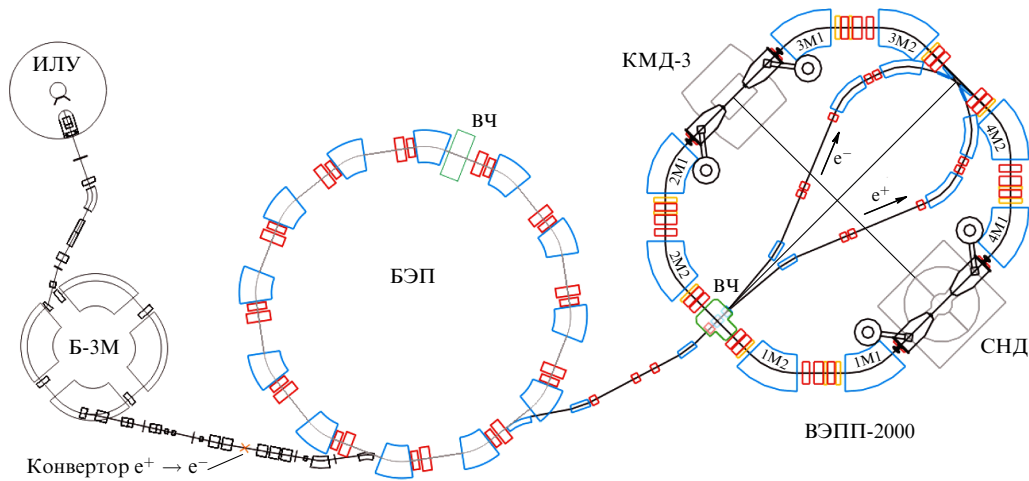


Рис. 10. Схема коллайдера ВЭПП-2000 со старым инжектором.

на увеличении энергии пучка до 1 ГэВ, что позволяло не только в 10 раз улучшить данные ВЭПП-2М по e^+e^- -аннигиляции в адроны, но и исследовать эти процессы в области энергий, где прежде работали лишь старые установки Adone и DCI (от франц. Dispositif de Collisions dans l'Igloo) с очень скромной по современным представлениям светимостью, $\sim 3 \times 10^{29} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Кроме того, с повышением энергии открывалась возможность рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар, а диапазон энергий нового коллайдера сомкнулся бы с энергетическим диапазоном данных ВЭПП-4М. В итоге было решено полностью разобрать накопитель ВЭПП-2М и на его месте построить новый, ВЭПП-2000, с максимальным использованием инфраструктуры старого комплекса [69]. В конце 2000 г. ВЭПП-2М был остановлен.

Для удешевления и ускорения создания нового коллайдера планировалось максимально использовать существующие помещения и инфраструктуру, а также, по крайней мере на начальном этапе, инжекционный комплекс ВЭПП-2М. Схема ВЭПП-2000 приведена на рис. 10, основные параметры представлены в табл. 5.

Основной проблемой проектирования и сооружения нового коллайдера стала весьма небольшая площадь для его размещения. Магнитная структура кольца в целом напоминает ВЭПП-2М: четыре квадранта, два экспериментальных промежутка (в которых расположены детекторы КМД-3 [73] и СНД [74]²) и два технических. Однако повороты сделаны ахроматическими, чтобы обнулить дисперсионную функцию в промежутках встречи и ВЧ-резонатора. Финальная фокусировка осуществляется сверхпроводящими соленоидами с полем до 13 Тл. Периметр кольца 24,39 м. Поворотные магниты секторные, Ш-образные, с радиусом кривизны 140 см и большой (для такой компактной установки) величиной магнитного поля, до 2,4 Тл, при межполюсном зазоре 40 мм. Особое внимание при разработке уделялось подбору профиля концентратора полюса и торцевых фасок, учёту разнообразных эффектов, связанных с сильным насыщением железа, например зависимости эффективной длины магнита от тока питания.

Таблица 5. Основные проектные параметры ВЭПП-2000

Энергия, МэВ	500	1000
Периметр, м	24,39	
Частота (ВЧ), МГц	172	
Номер гармоники	14	
Напряжение ВЧ, кВ	100	
Частота обращения, МГц	12,2915	
Бета-функции в местах встречи, см	5	10
Бетатронные частоты	4,1; 2,1	
Эмиттансы, см рад	$6,8 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-5}$
Поперечный размер пучка в месте встречи, мм	0,058	0,12
Коэффициент уплотнения орбит	0,036	
Разброс энергий в пучке	$3,5 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$
Длина сгустка, см	1,2	3,5
Потери энергии за оборот, кэВ	4	63
Времена радиационного затухания, мс	21,8	2,7
	9,8	1,2
Ток пучка, мА	50	200
Число частиц в пучке	$2,5 \times 10^{10}$	1×10^{11}
Параметр встречи	0,1	
Светимость, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$1,8 \times 10^{31}$	1×10^{32}

Самый сложный элемент магнитной системы — сверхпроводящий соленоид финального фокуса. Каждый соленоид представляет собой блок из пяти катушек, заключённых в общий обратный магнитопровод. Получение необходимого для работы на энергии 1 ГэВ поля 13 Тл потребовало использования внутренних катушек из ниобий-оловянного провода.

Вакуумная камера соленоидов, охлаждаемая жидким гелием, является мощным крионасосом, производящим откачку экспериментальных промежутков сквозь перфорированный лайнер. В технических промежутках и в дипольных магнитах вакуумная камера, выполненная из

² КМД — криогенный магнитный детектор, СНД — сферический нейтральный детектор.

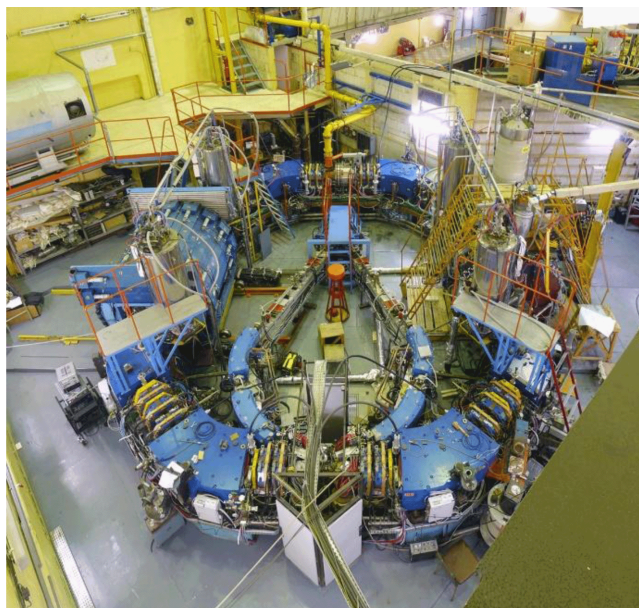


Рис. 11. Общий вид ВЭПП-2000.

нержавеющей стали, оснащена охлаждаемыми водой приёмниками СИ. Все сварные фланцы и сильфоны закрыты изнутри высокочастотными контактами для обеспечения электромагнитной "гладкости" во избежание коллективных неустойчивостей. Откачка производится 16 насосами ПВИГ-100 (ПВИГ — пост вакуумный ионно-геттерный), расположенными на краях диполей, где также установлены титановые испарители.

Общий вид накопителя ВЭПП-2000 с двумя детекторами показан на рис. 11. Каналы транспортировки пучков из БЭП проходят ниже медианной плоскости ВЭПП-2000, заходят внутрь кольца, разветвляются и поворачиваются к дальнему техническому промежутку магнитами с полем до 2,6 Тл. Питание этих магнитов организовано последовательно с магнитными элементами БЭП. Импульсные впускные магниты разделены на более сильный доворачивающий магнит с полем выше 3 Тл и совсем малоапертурный септум-магнит с зазором для пучка 5,4 мм и полем выше 2 Тл. Инжекция электронов и позитронов в ВЭПП-2000 осуществляется по однооборотной схеме с помощью радиальных пластин инфлекторов, расположенных в ближайших к промежутку инжекции поворотных магнитах. На кольце ВЭПП-2000 установлен резонатор 14-й гармоники частоты обращения (172,081 МГц) с напряжением 120 кВ и с подавлением высших мод в нагрузке из слабопроводящей керамики.

Первые обороты в кольце ВЭПП-2000 электронный пучок сделал в сентябре 2006 г. на энергии 140 МэВ, но полноценный захват в специальном режиме, без использования соленоидов финального фокуса, произошёл 14 октября 2006 г. В июне 2007 г. пучок позитронов впервые был захвачен в ВЭПП-2000, и в конце 2007 г. светимость была зарегистрирована калориметром детектора СНД [74].

В 2010–2013 гг. ВЭПП-2000 набирал статистику в диапазоне энергий в пучке 160–1000 МэВ [75]. В области высоких энергий (более 500 МэВ) светимость была ограничена недостатком позитронов из старого инжекционного комплекса. На средних энергиях ограничение накла-

дывается лишь эффектами встречи. При низкой энергии вследствие слабого затухания обостряются проблемы с динамической апертурой и временем жизни. Рекордные значения параметра встречи на одно место встречи были достигнуты в режиме удлинения сгустка за счёт коллективных эффектов при сниженном напряжении ускоряющего резонатора.

С самого начала проекта ВЭПП-2000 было ясно, что старый инжекционный комплекс на основе синхротрона Б-3М не сможет обеспечить достаточным числом позитронов установку со светимостью, возросшей в 30 раз по сравнению с таковой в ВЭПП-2М. В 2002 г. были начаты строительство 250-метрового тоннеля от нового инжекционного комплекса ИК и проектирование соответствующего электронно-оптического канала транспортировки. Для получения расчётной светимости на высокой энергии понадобились и другие усовершенствования инжекционной части коллайдера (в основном связанные с увеличением диапазона энергии БЭП (бустера электронов и позитронов) и перепускных каналов), и в 2013 г. ВЭПП-2000 был остановлен на реконструкцию. Поскольку ИК поставляет затухшие хорошо сформированные пучки малого размера, апертура поворотных магнитов БЭП была уменьшена и в зазоре было получено практически беспрецедентно большое для резистивных магнитов поле 2,6 Тл. Был изготовлен новый ускоряющий резонатор с увеличенным напряжением в зазоре, модернизированы магниты каналов перепуска, доработаны ввиду повышения энергии квадрупольные линзы.

2016 г. был посвящён запуску и отладке совместной работы ИК и ВЭПП-2000 [76]. В 2017 г. возобновилась работа с детекторами в диапазоне энергий 640–1003 МэВ в пучке [77]. Скорость накопления позитронов в БЭП составила $2 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, что на порядок превосходит возможности старого инжектора. Светимость в области высокой энергии возросла в несколько раз, пиковая светимость достигла величины $4 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Набранный за сезон интеграл превысил рекордную величину 50 пб^{-1} на каждый детектор. В конце 2017 г. был произведён набор светимости в области энергии 300–500 МэВ.

Полная картина измеренной светимости во всём диапазоне энергий ВЭПП-2000 в течение 2010–2013 гг. и 2016–2017 гг. представлена на рис. 12.

Во время прогона 2016–2017 гг. был зарегистрирован новый мировой рекорд параметра встречных пучков: $\xi = 0,145$ на энергии 350 МэВ.

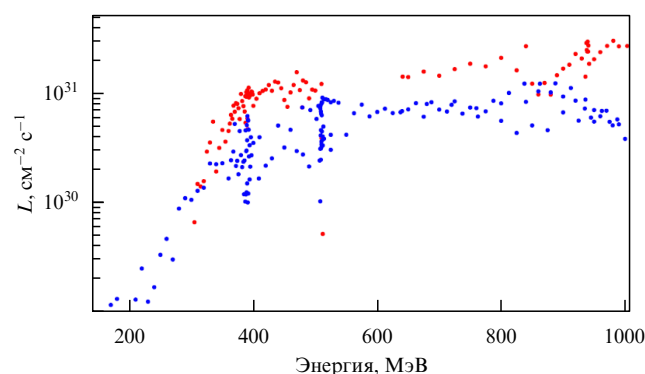


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Светимость накопителя ВЭПП-2000. Синими кружками показаны результаты, полученные со старой системой инжекции, красными — после модернизации.

В ближайшие годы ВЭПП-2000 останется основной ускорительной установкой ИЯФ, поставляющей данные для физики элементарных частиц, с целью набрать интегральную светимость не менее 1 фб^{-1} в области энергий $0,35\text{--}2,0 \text{ ГэВ}$.

4. Супер-чарм-тау-фабрика

Метод встречных пучков является одним из основных инструментов в физике высоких энергий, и именно эксперименты на встречных пучках позволили создать современную теорию микромира — Стандартную модель (СМ). На встречных пучках в основном и проходила проверка этой теории. Логическим завершением СМ стало открытие бозона Хиггса в 2012 г. на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. В настоящее время нет ни одного эксперимента в физике частиц, в котором наблюдалось бы отклонение от СМ. Несмотря на триумф Стандартной модели, в фундаментальной физике существует целый ряд нерешённых проблем: иерархия масс частиц (менее 1 эВ у нейтрино и почти 200 ГэВ у t -кварка), вопрос о барионной асимметрии Вселенной, проблема тёмной материи и др. Традиционно надежды на наблюдение отклонений от СМ (так называемая новая физика) связываются с экспериментами на встречных пучках при сверхвысоких энергиях (Большой адронный коллайдер), однако пока никаких указаний на "новую физику" в таких экспериментах не обнаружено. Существует также ряд фундаментальных проблем, которые решаются и будут решаться на установках со встречными электрон-позитронными пучками при сравнительно низких энергиях ($E = 0,3\text{--}10 \text{ ГэВ}$), но с высокой светимостью. Такие установки получили название "фабрик" (s - t -, Φ - и V -фабрики); на них изучается физика кварков, CP -нарушение или, другими словами, асимметрия свойств вещества и антивещества и др. Не исключено, что именно здесь могут быть обнаружены явления за рамками СМ.

В 1990-е годы в разных лабораториях, проводящих исследования по физике высоких энергий, обсуждались несколько проектов супер-чарм-тау-фабрик (называемых также s - t -фабриками) (в том числе в ИЯФ — с использованием круглых пучков [78, 79]). Для изучения узких резонансов рассматривались различные варианты монохроматизации столкновения частиц, для точной калибровки энергии — возможность работы с поперечно поляризованными пучками и т.д. Единственным состоявшимся проектом из той эпохи стал коллайдер BEPC II (Beijing Electron-Positron Collider II), запущенный в 2009 г. в Институте физики высоких энергий (Institute of High Energy Physics — IHEP) в Пекине [80]. Пиковая светимость BEPC II $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Возрождение интереса к рассматриваемой тематике и начало работ по проекту s - t -фабрики в ИЯФ связаны, во-первых, с выдающимися результатами, которые получены на V -фабриках в Организации по исследованию высокоэнергетических ускорителей (КЕК) (Япония) и Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США). Несмотря на то что высокая светимость V -фабрик позволила, используя метод радиационного возврата (предложенный и развитый в ИЯФ [81]), получить интересные результаты и в области низких энергий, создание коллайдера-фабрики, ориентированного на изучение физики очарованных частиц и тау-лептона, по-прежнему чрез-

вычайно актуально. Во-вторых, рост интереса к созданию s - t -фабрики следующего поколения был вызван появлением принципиально новой схемы столкновения пучков в e^+e^- -коллайдерах, которая позволяет повысить светимость на один-два порядка без существенного увеличения интенсивности пучков, размеров установки или уменьшения длины сгустка. Идея была высказана итальянским физиком Панталео Раймонди в 2006 г. в связи с изучением возможности создания V -фабрики с высокой светимостью [82, 83].

В новой схеме пучки встречаются под довольно большим углом, в несколько десятков миллирадиан. Если при этом горизонтальный эмиттанс и размер пучка в месте встречи малы, то продольный размер области взаимодействия (перекрытия) двух сгустков становится существенно меньше их длины. Это позволяет уменьшить вертикальную бета-функцию в месте встречи до субмиллиметровых значений, не оказывая влияния на так называемый эффект песочных часов ("hourglass" effect), и тем самым увеличить светимость более чем на порядок. Встреча под небольшим углом применялась в первом поколении фабрик (DAΦNE, PEP-II (Positron Electron Project II), КЕКВ, BEPC-II), что позволило им работать в многосгустковом режиме. При этом вертикальная бета-функция была порядка длины сгустка, а усилившиеся (из-за угла) синхробетатронные резонансы связи [84] препятствовали дальнейшему возрастанию светимости. Однако в схеме столкновения с большим углом и малой бета-функцией механизм возбуждения резонансов связи становится другим и главную роль начинает играть модуляция вертикальной бетатронной фазы горизонтальными бетатронными колебаниями. Проблему удалось элегантно решить с помощью двух секступольных линз, симметрично расположенных по обе стороны от места встречи на определённых азимутах. Смысл этого шага состоит в том, чтобы сделать вертикальную бетатронную фазу частицы в точке, где она пересекает ось встречного пучка, не зависящей от её горизонтальной координаты. При этом подавляются бетатронные и синхробетатронные резонансы связи [85, 86], что позволяет получить очень большие значения параметра встречи и увеличить светимость ещё в 2–3 раза. Можно показать, что при таком преобразовании линия минимума вертикальной бета-функции (перетяжка пучка — waist) перестаёт быть перпендикулярной оси пучка: она разворачивается и становится параллельной оси встречного сгустка. Этот разворот перетяжки и дал название всей схеме — *крабовая перетяжка* (Crab Waist — CW), а задействованные в ней секступоли получили, соответственно, название "крабовых". На рисунке 13 приведены результаты численного моделирования [87], демонстрирующие "работу" крабовых секступолей.

Новый метод устраняет проблему паразитных мест встречи (поскольку пучки быстро расходятся) и не требует коротких сгустков (что уменьшает опасность коллективных эффектов). Параметры пучков, требуемые для новых фабрик частиц, не выходят за границы уже достигнутых либо в источниках СИ (малый эмиттанс, малый коэффициент бетатронной связи), либо в коллайдерах предыдущих поколений (ток пучка $\sim 1\text{--}2 \text{ А}$). Начиная с 2008 г. CW успешно действует на Φ -фабрике DAΦNE (Италия); результаты экспериментов подтверждают перспективность метода и находятся в хорошем согласии с теорией [88]. На новом подходе основаны,

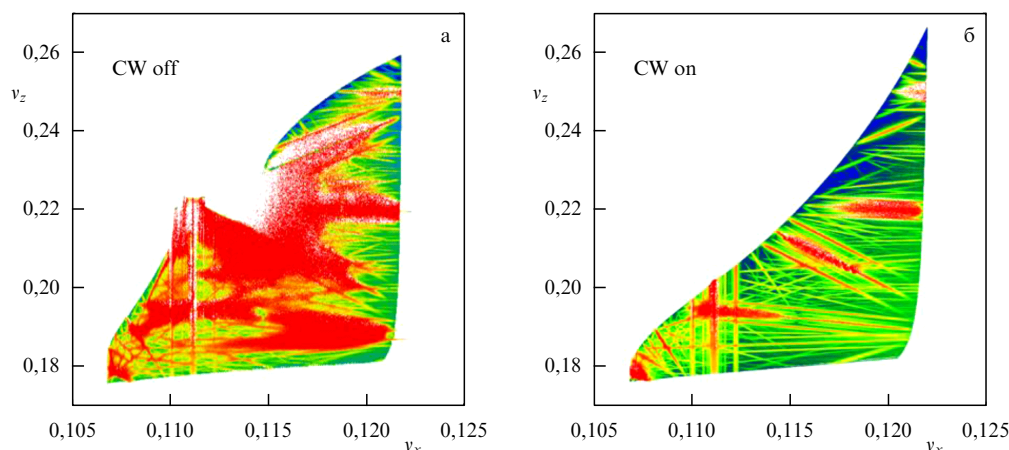


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Разброс бетатронных частот в пучке, вызванный нелинейным взаимодействием со встречным сгустком, в отсутствие краевой перетяжки (а) и при её наличии (б). Динамические характеристики различных траекторий показаны разными цветами: красный соответствует стохастическому движению, синий — регулярному. Видно, как в области перекрытия сильных резонансов возникают стохастические области и как они уменьшаются при включении краевых секступолей.

кроме с-т-фабрики в Новосибирске, проекты e^+e^- -коллайдеров, предусматривающие сверхвысокую светимость: FCC-ee (FCC — Future Circular Collider) [89] в ЦЕРНе и CEPС (Circular Electron Positron Collider) [90] в Китае.

Исходя из физической программы с-т-фабрики были сформулированы следующие основные требования к ускорительному комплексу.

- Диапазон энергии в системе центра масс должен быть от 2 до 5 ГэВ, что позволит проводить эксперименты при энергиях от порога рождения нуклонов и антинуклонов до области семейства ψ -мезонов и очарованных барионов и использовать результаты ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М.

- Светимость фабрики должна быть не ниже $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в области высоких энергий и не ниже $\sim 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в области низких.

- Электронный пучок должен быть продольно поляризован в точке встречи.

- Пучки сталкиваются с равными энергиями, асимметрия энергий не требуется.

- Монохроматизации встречи не требуется, поскольку соответствующие схемы сложны и существенно уменьшают светимость, тем более что высокая светимость позволяет эффективно исследовать узкие состояния и без монохроматизации.

- Поперечная поляризация пучков для калибровки энергии не нужна; достаточно измерять энергию с помощью обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на частицах циркулирующего пучка [91]. Эта методика, впервые применённая к e^+e^- -коллайдерам в ИЯФ, даёт относительную точность, лучшую чем 10^{-4} , что достаточно для задач с-т-фабрики.

Супер-чарм-тау-фабрика схематично показана на рис. 14, где также изображены остальные установки ИЯФ, имеющие отношение к тематике встречных пучков: ВЭПП-2000 с бустером БЭП, ВЭПП-4М с накопителем ВЭПП-3, инжекционный комплекс с синхротроном для подготовки пучков для новой фабрики частиц.

Коллайдер Супер-с-т-фабрики [92] включает в себя два независимых накопительных кольца длиной около 800 м каждое с одним местом встречи, в котором раз-

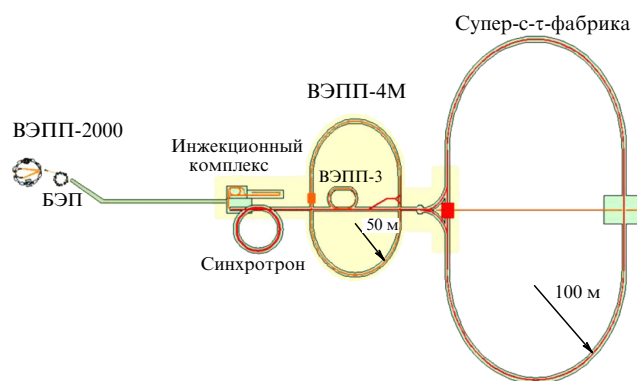


Рис. 14. Супер-с-т-фабрика и другие установки ИЯФ для экспериментов со встречными пучками.

мещается детектор (во втором месте встречи пучки разводятся по вертикали). Пересечение пучков происходит под углом 60 мрад. Вертикальная бетатронная функция в точке встречи 0,8 мм. Основные параметры коллайдера приведены в табл. 6, промежуток встречи Супер-с-т-фабрики с детектором показан на рис. 15.

При изменении энергии пучка будут изменяться и его параметры, влияющие на светимость (эмиттанс, время затухания, длина сгустка и т.п.). Для оптимизации светимости запланирована установка на оба кольца нескольких сверхпроводящих магнитных змеек, которые поддерживают постоянными горизонтальный эмиттанс и декременты затухания во всём диапазоне энергий коллайдера.

Одним из ключевых преимуществ с-т-фабрики является возможность продольной поляризации электронного пучка в месте встречи. Для этого будет использован источник поляризованных электронов, на выходе которого можно получить любое направление спина, так что с учётом всех дальнейших поворотов в точке инжекции впускаемый пучок будет иметь правильное направление спина. Для получения продольной поляризации в месте встречи основного кольца принята схема с использованием пяти "сибирских змеек" [93], обеспечивающая вы-

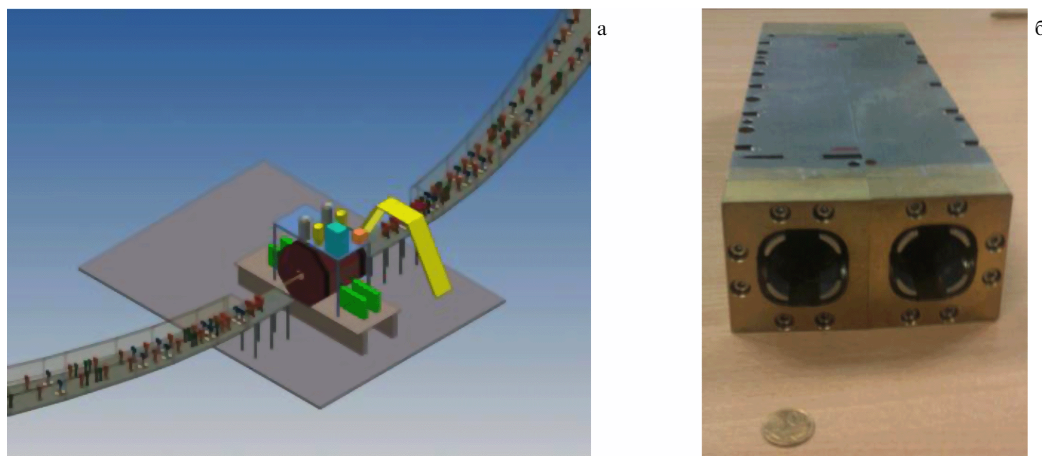


Рис. 15. (а) Промежуток встречи с-т-фабрики с детектором. (б) Ярмо двухапертурной сверхпроводящей линзы финального фокуса.

Таблица 6. Основные проектные параметры с-т-фабрики

Энергия, ГэВ	1,0	1,5	2,0	2,5
Периметр P , м	766,6			
Коэффициент уплотнения орбит α	9×10^{-4}			
Ускоряющее напряжение V_{RF} , кВ	310	900	990	1000
Потери энергии на оборот U_0 , кэВ	170	256	343	434
Энергетический разброс $\sigma_E \times 10^4$	1,009	9,953	8,435	7,378
Длина сгустка σ_s , см	1,6	1,06	1	1
Время затухания, $\tau_x/\tau_z/\tau_s$, мс	30/30/15			
Коэффициент связи k , %	0,5			
Горизонтальный эмиттанс ε_x , нм рад	8			
Вертикальный эмиттанс ε_z , нм рад	40			
Число частиц в сгустке N_0	7×10^{10}			
Число сгустков N_b	390			
Полное число частиц N	$2,73 \times 10^{13}$			
Полный ток I , А	1,7			
Бета-функции в месте встречи, β_x/β_z , см	4/0,08			
Угол встречи 2θ , мрад	60			
Параметр встречи ξ_z	0,15	0,15	0,12	0,095
Светимость L , $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	0,63	0,95	1,00	1,00

сокую степень поляризации ($\geq 80\%$) во всём диапазоне энергий.

Серьёзной проблемой для любого коллайдера с ненулевым углом пересечения пучков является сложная магнитовакуумная система финального фокуса. Для схемы встречи CW эта проблема усугубляется — из-за предельно малой вертикальной бетатронной функции в точке встречи (менее 1 мм) финальные линзы должны быть предельно короткофокусными, с большим значением градиента и размещаться вблизи точки встречи внутри детектора [94]. В то же время ввиду необходимости обеспечения максимального приёмного угла детектора, а также с учётом того, что в непосредственной близости к точке взаимодействия пучков размещается

много другого оборудования (соленоиды для компенсации поля детектора, мониторы светимости, датчики и корректоры положения пучка и т.д.), конструкция линз финального фокуса должна быть очень компактной.

В ИЯФ для проекта с-т-фабрики разработана уникальная двухапертурная сверхпроводящая линза [95], которая может быть установлена на расстоянии 0,6 м от точки встречи и развивает градиент поля 100 Тл м^{-1} при апертуре 26 мм. Ярмо линзы (рис. 15б) выполнено из магнитомягкого железа, что позволяет получить поле высокого качества на оси пучков, предотвращает взаимное влияние соседних линз и "перехватывает" рассеянное за пределы линзы поле. Изготовленный прототип линзы успешно прошёл испытания при криогенной температуре.

Для обеспечения высокой светимости фабрики производительности существующего инжекционного комплекса недостаточно. Планируемый инжекционный комплекс с-т-фабрики (не показан на рис. 14) включает в себя несколько интенсивных источников электронов (в том числе поляризованных), накопитель-охладитель с малым временем затухания и несколько линейных ускорителей для электронных и позитронных пучков. Инжекция планируется только на энергии эксперимента без последующего доускорения пучков в коллайдере (top-up injection).

При электрон-позитронной аннигиляции в диапазоне энергий с-т-фабрики рождаются связанные состояния с-кварка и с-антикварка (чармонии), очарованные мезоны, состоящие из с-кварка и одного из лёгких (u, d или s) антикварков, а также очарованные барионы, имеющие в своём составе два лёгких кварка и с-кварк. При энергии в системе центра масс более 3,6 ГэВ начинают рождаться пары τ -лептонов. Основной целью экспериментов на Супер-с-т-фабрике является изучение процессов с участием с-кварков и τ -лептонов со статистикой, которая на несколько порядков превышает как уже набранную в этом диапазоне энергии, так и набираемую на китайской с-т-фабрике BEPC II (учитывая, что светимость новосибирского проекта в 100 раз больше светимости китайского коллайдера). На Супер-с-т-фабрике в течение полугодия можно будет накопить интегральную светимость $\sim 1 \text{ аб}^{-1}$ и произвести примерно 3×10^9 τ -лептонов, 7×10^9 D-мезонов и фантастически огромное число J/ψ -мезонов — 3×10^{12} . Такая статистика позволит система-

тически изучить практически все состояния, образованные кварками первых двух поколений, включая экзотические. Большая статистика D-мезонов и τ -лептонов даст возможность непосредственно подступить к исследованию принципиально новых явлений, таких как CP -нарушение в распадах очарованных адронов и τ -лептонов, несохранение лептонного числа и др.

Для реализации всех возможностей предлагаемого проекта Супер-с- τ -фабрики необходим универсальный магнитный детектор. Причём детектор должен обладать рядом уникальных характеристик и иметь следующие параметры:

- высокое импульсное разрешение для заряженных частиц и хорошее энергетическое разрешение для фотонов;
- рекордные параметры системы идентификации частиц по сравнению с соответствующими параметрами существующих и разрабатываемых детекторов;
- оцифровывающая электронная аппаратура и система сбора данных должны быть способны считывать события с частотой 300–400 кГц при средней длине события 30 кБ;
- оцифровывающее электронное оборудование должно находиться внутри детектора, для передачи данных необходимы оптические линии связи со скоростью 10 гигабит в 1 с;
- конструкция детектора должна обеспечивать быстрый доступ к внутренним системам для ремонта и замены оборудования: время, требуемое на процедуру разборка–ремонт–сборка, не должно превышать 12–24 ч;
- ввод (вывод) магнитного поля детектора должен быть не более 2–3 ч;

Схема детектора показана на рис. 16. Детектор имеет классическую компоновку для экспериментов на встречных пучках.

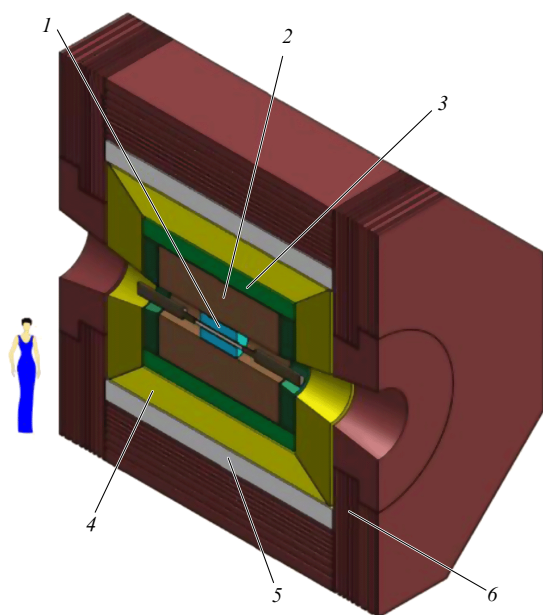


Рис. 16. Универсальный магнитный детектор: 1 — вершинная камера, 2 — дрейфовая камера, 3 — система идентификации на основе аэрогелевых черенковских счётчиков ФАРИЧ (от англ. FARICH — Focusing Aerogel Ring Imaging CHerenkov), 4 — калориметр на основе кристаллов CsI, 5 — сверхпроводящий соленоид, 6 — ярмо магнита и мюонная система.

Следует отметить, что практически все методики и подходы, необходимые для реализации проекта детектора для Супер-с- τ -фабрики, уже опробованы при сооружении других детекторов, эксплуатируемых или создаваемых в мире для проведения экспериментов по физике высоких энергий.

Наибольшие трудности ожидаются при проектировании и создании уникальной системы идентификации с рекордными параметрами на основе детектора черенковских колец с радиатором из многослойного фокусирующего аэрогеля и регистрацией фотонов с помощью кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ). Данная методика пока не применялась при создании больших детекторов и поэтому требует проведения масштабных методических исследований с прототипами системы. Кроме того, в настоящее время стоимость КФЭУ крайне высока, однако сегодня технология их изготовления находится в фазе быстрого развития [96]. Так, например, за последние пять лет собственные шумы КФЭУ при комнатной температуре (25 °C) удалось снизить на порядок и достичь эффективности регистрации фотонов более 40 % в широком оптическом диапазоне (300–700 нм) [97, 98].

Здесь необходимо отметить, что ИЯФ СО РАН имеет большой опыт в применении аэрогеля для целей идентификации. В Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН налажено производство аэрогеля с лучшим в мире качеством. Аэрогель новосибирского производства используется в детекторе LHCb (LHC beauty experiment), работающем на Большом адронном коллайдере, детекторе AMS02 (AMS — Alpha Magnetic Spectrometer), недавно установленном на Международной космической станции, и в ряде других экспериментов как внутри Института (детекторы "Кедр" и СНД), так и за рубежом [99]. В ИЯФ СО РАН с применением аэрогеля изготовлен прототип детектора черенковских колец для системы идентификации и на пучках заряженных частиц продемонстрировано превосходное качество μ/π -разделения при импульсе частиц 1 ГэВ/с, недостижимое ни одним другим известным на данный момент методом идентификации частиц, развитым для экспериментов со встречными пучками [100].

Создание такого уникального комплекса, как Супер-с- τ -фабрика, — это сложная, многолетняя задача, и ИЯФ СО РАН начал закладывать основу для реализации этого проекта ещё в советские времена. Начиная с 1992 г. было открыто государственное финансирование проекта: до 2002 г. это был проект ВЛЭПП-100 создания установки со встречными линейными электрон-позитронными пучками (ВЛЭПП), с 2007 г. — проект комплекса ВЭПП-5. В 2015 г. завершилось финансирование данного проекта и Институт существенно обновил и улучшил инженерную и научную инфраструктуру. Завершено создание, осуществлён ввод в эксплуатацию ряда дорогостоящих объектов недвижимого (объекты капитального строительства) и движимого имущества (электрофизические установки: Инжекционный комплекс с каналами транспортировки электронных и позитронных пучков; коллайдер ВЭПП-2000 с детекторами КМД-3 и СНД; станции СИ на накопителе ВЭПП-4) — и оформлено на них право собственности РФ. К настоящему времени общая стоимость сданных в эксплуатацию объектов, созданных в рамках Федеральной адресной инвестиционной программы, составляет около 700 млн рублей (в текущих ценах).

Введённый в строй в конце 2015 г. новый инжекционный комплекс института, обладающий высокой производительностью получения позитронов, интегрирован в ускорительную инфраструктуру ИЯФ, что привело к улучшению параметров и повышению результативности экспериментов на действующих коллайдерах — ВЭПП-4 и ВЭПП-2000, в частности экспериментов с СИ. Параметры и надёжность инжекционного комплекса постоянно улучшаются.

5. Заключение

Проект Супер-с-т-фабрики является большим вызовом для нашего Института. За 55 лет развития метода встречных пучков ИЯФ накопил большой научный и технологический потенциал, позволяющий решать многие вопросы в области физики ускорителей и элементарных частиц. Сотрудники ИЯФ, включая авторов настоящего обзора, принимали участие во многих проектах в различных научных центрах мира. На основании этого опыта мы считаем, что объём задач, которые необходимо решить при создании Супер-с-т-фабрики, существенно превосходит масштаб одного института, поэтому проект может быть реализован только в коллаборации с российскими и зарубежными лабораториями.

Летом 2011 г. правительственная комиссия отобрала шесть проектов класса меганаука для реализации на территории Российской Федерации: ПИК (Пучковый исследовательский комплекс), НИКА (Nuclotron-based Ion Collider fAcility — NICA), "Игнитор" (IGNITOR), ИССИ-4 (специализированный источник СИ четвёртого поколения), XCELS (Exawatt Center for Extreme Light Studies) и Супер-с-т-фабрика. Проект ИЯФ Супер-с-т-фабрики одобрен Европейским комитетом по ускорителям будущего (European Committee for Future Accelerators) и получил высокую оценку многих видных экспертов в области физики элементарных частиц.

1 декабря 2016 г. указом Президента РФ была утверждена "Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации". Важным пунктом этой стратегии является поддержка создания и развития уникальных научных установок класса меганаука, крупных исследовательских инфраструктур на территории России. В соответствии с планом реализации этой стратегии к концу 2019 г. должна быть проведена подготовка к принятию решения о реализации проекта Супер-с-т-фабрики. Завершение формирования международной коллаборации проекта Супер-с-т-фабрики — одна из важнейших и трудных задач, которую необходимо решить для принятия положительного решения по реализации проекта.

Возможности по привлечению ресурсов для реализации определённых этапов проекта Супер-с-т-фабрики, а также принятие правительством РФ решения о реализации проекта в целом в значительной степени зависят от нашей собственной убеждённости в необходимости реализации этого проекта, уверенности в его осуществимости, способности правильно расставить приоритеты, сконцентрировать усилия и консолидировать работу внутри Института, организовать продуктивное взаимодействие с партнёрами и потенциальными участниками проекта.

Список литературы

1. Wideroe R "Anordnung zur Herbeiführung von Kernreaktionen", Deutsches Patentamt, Patentschrift No. 876279, Klasse 21g, Gruppe 36, Mai 11, 1953

2. Kerst D W et al. *Phys. Rev.* **102** 590 (1956)
3. Коломенский А А, Петухов В А, Рабинович М С *ПТЭ* (2) 26 (1956)
4. O'Neill G K *Phys. Rev.* **102** 1418 (1956)
5. Haïssinski J, Thèse Univ. de Paris. Orsay, Ser. A (1965)
6. Будкер Г И, Ерозалинский Б Г, Наумов А А, в сб. *Материалы совещания по физике и технике метода встречных пучков* Т. 2 (Харьков: ФТИ АН УССР, 1962) с. 5
7. O'Neil G K, in *Proc. of Summer Study on Storage Rings, Accelerators and Experimentation at Super High-Energies, Upton, New York, USA, 10 June – 19 July, 1963* p. 209
8. Hofstadter R *Phys. Rev.* **28** 214 (1956); Хофстадтер Р *УФН* **63** 693 (1957)
9. Budker G I et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **6** 889 (1968)
10. Байер В Н и др., в сб. *Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963* (М.: Атомиздат, 1964) с. 274
11. Будкер Г И и др. *Атомная энергия* **19** 497 (1965); Budker G I et al. *Sov. Atom. Energy* **19** 1465 (1965)
12. Ауслендер В Л и др. *Атомная энергия* **22** 200 (1967); Auslender V L et al. *Sov. Atom. Energy* **22** 242 (1967)
13. Ауслендер В Л и др. *Атомная энергия* **20** 210 (1966); Auslender V L et al. *Sov. Atom. Energy* **20** 240 (1966)
14. Ауслендер В Л и др. *Атомная энергия* **22** 179 (1967); Auslender V L et al. *Sov. Atom. Energy* **22** 217 (1967)
15. Кулипанов Г Н, Мишнев С И, Скринский А Н, в сб. *Труды Международной конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Ереван, 1969* Т. 2 (М.: Атомиздат, 1970) с. 300
16. Диканский Н С и др., в сб. *Труды Международной конф. по ускорителям, Ереван, 1969* Т. 2 (М.: Атомиздат, 1970) с. 308
17. Будкер Г И, Ерозалинский Б Г, Наумов А А, в сб. *Труды Международной конф. по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1963* (М.: Атомиздат, 1964) с. 274
18. Петров В В, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 1969)
19. Данилов Л Л, Родионов С Н, Сильвестров Г И *ЖТФ* **37** 914 (1967)
20. Ауслендер В Л и др. *Атомная энергия* **22** 206 (1967)
21. Ауслендер В Л и др. *ЯФ* **9** 114 (1969)
22. Balakin V E et al. *Phys. Lett. B* **34** 328 (1971)
23. Balakin V E et al. *Phys. Lett. B* **41** 205 (1972)
24. Kurdadze L M et al. *Phys. Lett. B* **42** 515 (1972)
25. Байер В Н *УФН* **105** 441 (1971); Baier V N *Sov. Phys. Usp.* **14** 695 (1972)
26. Будкер Г И и др., в сб. *Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц* Т. 1 (М.: Наука, 1973) с. 318
27. Richter B "The Stanford Storage Ring", SPEAR, SLAC-PUB-0780 (1970)
28. Анашин В В и др., в сб. *Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985*, Т. 2, с. 239
29. Баянов Б Ф, Всеволожская Т А, Сильвестров Г И, в сб. *Труды VI Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978*, с. 81
30. Вассерман И Б и др., в сб. *Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1987*, Т. 1, с. 347
31. Akhmetshin R R et al. (Muon g-2 Collab.) *Phys. Rev. D* **73** 96 (2006)
32. Скринский А Н, Шатунов Ю М *УФН* **158** 315 (1989); Skrin-skii A N, Shatunov Yu M *Sov. Phys. Usp.* **32** 548 (1989)
33. Vasserman I B et al. *Phys. Lett. B* **187** 172 (1987)
34. Budker G I, Protopopov I Y, Skrin-sky A N, in *Proc. of 6th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, HEACC, Cambridge, Mass., 11 – 15 Sep. 1967*, p. 102
35. Будкер Г И и др., в сб. *Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц* Т. 1 (М., 1970) с. 270
36. Лившиц А А, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 1970)
37. Abrams G S et al. *Phys. Rev. Lett.* **33** 1453 (1974)
38. Perl M L, in *Proc. of Intern. Conf. on History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics, Erice, Italy, July 29 – August 4 1996*, p. 277
39. Нейфельд В В, Петров В В, Препринт 2015-15 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2015)
40. Жоленц А А, Протопопов И Я, Скринский А Н, в сб. *Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц* Т. 1 (М.: Наука, 1977) с. 270

41. Будкер Г И и др., в сб. *Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц* Т. 1 (М.: Наука, 1977) с. 284
42. Блинов А Е и др. *ЯФ* **44** 626 (1986)
43. Байер В Н, Хоже В А *Атомная энергия* **25** 440 (1968); Baier V N, Khoze V A *Sov. J. Atom. Energy* **25** 1256 (1968)
44. Воробьев П В и др., в сб. *Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна. 1983, Т. 2, с. 272
45. Blinov A E et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **241** 80 (1985)
46. Artamonov A S et al. *Phys. Lett. B* **118** 225 (1982)
47. Artamonov A S et al. *Phys. Lett. B* **137** 272 (1984)
48. MacKay W W et al. (CUSB Collab.) *Phys. Rev. D* **29** 2483 (1984)
49. Barber D P et al. (ARGUS and Crystal Ball Collab.) *Phys. Lett. B* **135** 498 (1984)
50. Temnykh A, in *Talk at 40th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Luminosity e^+e^- Factories*, Novosibirsk, Russia, April 14–16, 2008; http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/fac08/TALKS/MOACH04_TALK.PDF
51. Белов С Д и др., в сб. *Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц* Т. 2 (М.: Наука, 1977) с. 291
52. Belomestnykh S A et al. *Nucl. Instrum. Meth. A* **227** 173 (1984)
53. Тихонов Ю А, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 1982)
54. Казаков А А и др. *Письма в ЖЭТФ* **40** 445 (1984); Kazakov A A et al. *JETP Lett.* **40** 1271 (1984)
55. Винокуров Н А и др., Препринт 89-118 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1989)
56. Барков Л М и др., в сб. *Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, 1979, Т. 2, с. 267
57. Попов С Г *Yad. Fiz.* **62** 291 (1999)
58. Анашин В В и др., в сб. *Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*, Дубна, 1992, Т. 1, с. 295
59. Бондарь А Е, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 1994)
60. Анашин В В и др., Препринт 2010-40 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2010)
61. Алешаев А Н и др., Препринт 2011-20 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2011)
62. Астрелина К В и др. *ЖЭТФ* **133** 94 (2008); Astrelina K V et al. *JETP* **106** 77 (2008)
63. Золотарев К В, Пиминов П А *Наука из первых рук* (2) 10 (2015)
64. Николенко Д М и др. *ЯФ* **73** 1365 (2010); Nikolenko D M et al. *Phys. Atom. Nucl.* **73** 1322 (2010)
65. Barkov L M et al., in *Proc. of IEEE 1991 Particle Accelerator Conference, San Francisco, California, USA, 6–9 May 1991*, p. 183
66. Danilov V V et al., in *Proc. of 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC 96), Sitges, Spain, 10–14 June 1996*, p. 1149
67. Вассерман И Б, Израйлев Ф М, Тумайкин Г М, Препринт 79-74 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1979)
68. Danilov V V, Perevedentsev E A, in *Proc. of 14th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop: Beam Dynamics Issues for e^+e^- Factories (ICFA 97), Frascati, Italy, 20–26 Oct. 1997*, p. 321
69. Shatunov Y M et al., in *Proc. of 7th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2000), Vienna, Austria, 26–30 June 2000*, p. 439
70. Danilov V V, Perevedentsev E A, in *Proc. of VII ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam-Beam Issues for Multibunch, High Luminosity Circular Colliders, 18–20 May 1995*, p. 167
71. Valishev A A, Perevedentsev E A, Ohmi K, in *Proc. of PAC 2003*, p. 3398
72. Berkaev D E et al., in *Proc. of IPAC'11, 2011*, p. 3
73. Akhmetshin R R et al. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **225–227** 43 (2012)
74. Korol A A et al. *EPJ Web Conf.* **142** 01017 (2017)
75. Шварц Д Б, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 2013)
76. Shwartz D et al., in *Proc. of 38th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP2016), Chicago, USA, 3–10 Aug. 2016, PoS (ICHEP2016) 054*
77. Shatunov P et al., in *Proc. of 8th International Particle Accelerator Conf. (IPAC 2017), Copenhagen, Denmark, 14–19 May 2017*, p. 298
78. Skrinksky A N "Studies for a Tau-Charm Factory", SLAC-Report-451, 1994
79. "C-Tau in Novosibirsk", Conceptual Design Report (Novosibirsk: Budker Institute of Nuclear Physics, 1995)
80. Zweber P (BESIII Collab.) *AIP Conf. Proc.* **1182** 406 (2009)
81. Druzhinin V P et al. *Rev. Mod. Phys.* **83** 1545 (2011)
82. Raimondi P, presentation at the 2nd Workshop on Super-B Factory, LNF-INFN, Frascati, Italy, 2006
83. Bona M et al. (Super-B Collab.) "Conceptual Design Report", SLAC-R-856, INFN-AE-07-02, LAL-07-15, 2007; arXiv:0709.0451
84. Pestrikov D V *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **336** 427 (1993)
85. Raimondi P, Shatilov D, Zobov M, physics/0702033
86. Raimondi P, Shatilov D, Zobov M, in *Proc. of EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23–28, 2008*, p. 2620
87. Shatilov D, Levichev E, Simonov E, Zobov M *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14** 014001 (2011)
88. Zobov M et al. *Phys. Rev. Lett.* **104** 174801 (2010)
89. Future Circular Collider Study, <https://fcc.web.cern.ch/Pages/default.aspx>
90. Circular Electron Positron Collider, <http://cepc.ihep.ac.cn/>
91. Muchnoi N Y, Nikitin S A, Zhilich V N, in *Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, UK, June 26–30, 2006*, Vol. C060626, p. 1181
92. Levichev E *Phys. Part. Nucl. Lett.* **5** 554 (2008)
93. Koop I A, Bogomyagkov A V, Otboev A V, in *Proc. of 19th International Spin Physics Symposium (SPIN 2010), 27 Sep.–2 Oct. 2010, Juelich, Germany* (2011) p. 012160
94. Bogomyagkov A V, Levichev E B, Piminov P A, in *Proc. of PAC'11, New York, USA, March 28–April 1, 2011*, p. 2264
95. Okunev I et al., in *Proc. of EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23–27, 2008*, p. 2623
96. Renker D, Lorenz E *JINST* **4** P04004 (2009)
97. Otte A N, Garcia D, in *Proc. of Intern. Conf. on New Photo-detectors (Photodet2015), Moscow, Troitsk, Russia, July 6–9, 2015*, p. 11
98. Otte A N et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **846** 106 (2017)
99. Данилюк А Ф и др. *УФН* **185** 540 (2015); Danilyuk A F et al. *Phys. Usp.* **58** 503 (2015)
100. Barnyakov A Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **732** 352 (2013)

Electron–positron beam collision studies at Budker Institute of Nuclear Physics

E.B. Levichev, A.N. Skrinksky, G.M. Tumaikin, Yu.M. Shatunov

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: levichev@inp.nsk.su, a.n.skrinsky@inp.nsk.su, yu.m.shatunov@inp.nsk.su

Beam-colliding facilities (aka colliders) are key to exploring the fundamental properties of matter and understanding elementary particles and their interactions. The Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, co-pioneered the development and remains the leading developer and user of electron-positron colliding beams. This paper reviews the past, present, and future of colliding beam work at BINP.

Keywords: magnets, colliding beams, synchrotron, emittance, luminosity, electron, positron, detector, c- τ -factory, polarization

PACS numbers: **01.65. + g**, 14.40.Lb, 14.60.Fg, 29.20.D–

Bibliography — 100 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (5) 461–480 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.01.038300>

Received 15 January 2018, revised 16 February 2018

Physics – Uspekhi **61** (5) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.01.038300>