

**Б.А. Шварц** 

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

e-mail: B.A.Shwartz@inp.nsk.su

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ В ИЯФ СО РАН

Статья подготовлена по материалам доклада на семинаре ИЯФ РК и ИЯФ СО РАН, прошедшего 28.05.2024 г. В статье описаны эксперименты на установках ИЯФ со встречными электрон-позитронными пучками. Установки со встречными пучками (коллайдеры) являются в настоящее время одним из основных инструментов в экспериментальной физике высоких энергий. Первые такие установки появились в начале 60-х годов прошлого века и ИЯФ был пионером в этой области. В 1967 году были опубликованы первые результаты изучения в ИЯФ рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции на первом в мире  $e+e-$  коллайдере ВЭПП-2. В настоящее время в мире существует четыре  $e+e-$  коллайдера, два из которых, ВЭПП-2000 с энергией пучков до 1 ГэВ и ВЭПП-4М с энергией до 6 ГэВ, работают в ИЯФ. В статье описаны эксперименты на этих коллайдерах, основные цели и мотивация этих исследований. Установки со встречными электрон-позитронными пучками являются в настоящее время одним из основных инструментов в экспериментальной физике высоких энергий, позволяющих получать точные данные о параметрах и взаимодействии адронов и лептонов.

**Ключевые слова:** электрон-позитронные пучки, коллайдер, элементарные частицы.

B.A. Shwartz

G.I. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

e-mail: B.A.Shwartz@inp.nsk.su

### Experiments on elementary particle physics at electron-positron colliders at the INP SB RAS

The article was prepared based on the materials of the report at the seminar of the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan and the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, held on 05/28/2024. The article describes experiments on INP installations with oncoming electron-positron beams. Facilities with colliding beams (colliders) are currently one of the main tools in experimental high-energy physics. The first such installations appeared in the early 60s of the last century and the INP was a pioneer in this field. In 1967, the first results of the INP study of the production of hadrons in electron-positron annihilation at the world's first  $e+e$  collider VEPP-2 were published. Currently, there are four  $e+e$  colliders in the world, two of which, VEPP-2000 with a beam energy of up to 1 GeV and VEPP-4M with an energy of up to 6 GeV, operate in the INP. The article describes experiments at these colliders, the main goals and motivation of these studies. Installations with oncoming electron-positron beams are currently one of the main tools in experimental high-energy physics that allow obtaining accurate data on the parameters and interaction of hadrons and leptons.

**Key words:** electron-positron beams, collider, elementary particles.

Б.А. Шварц

РФА СБ ЯФИ, Новосибирск к., Ресей

e-mail: B.A.Shwartz@inp.nsk.su

### РФА СБ ЯФИ-дағы электрон-позитронды коллайдерлердегі бөлшектер физикасы бойынша эксперименттер

Мақала 28.05.2024 ж. өткен ҚР ЯФИ және Ресей Ғылым академиясының ЯФИ семинарында баяндама материалдары бойынша дайындалды. Қарама-қарсы сәулелі қондырғылар (коллайдерлер) қазіргі уақытта эксперименттік жоғары энергетикалық физиканың негізгі құралдарының бірі болып табылады. Мұндай алғашқы қондырғылар өткен ғасырдың 60-шы жылдарының басында пайда болды және ЯФИ осы салада ізашар болды. 1967 жылы әлемдегі алғашқы  $e+e$ -коллайдер

коллайдер ЕРР - 2-де электронды-позитронды жойылуда адрондардың тууын ЯФИ-де зерттеудің алғашқы нәтижелері жарияланды. Қазіргі уақытта әлемде төрт  $e^+e^-$ -коллайдер бар, олардың екеуі, 1 ГэВ-қа дейінгі сәулелік энергиясы бар VAPP-2000 және 6 ГэВ-қа дейінгі энергиясы бар VAPP-4М ЯФИ-де жұмыс істейді. Мақалада осы коллайдерлердегі эксперименттер, осы зерттеулердің негізгі мақсаттары мен мотивациясы сипатталған. Қарама-қарсы электронды-позитронды сәулелері бар қондырғылар қазіргі уақытта адрондар мен лептондардың параметрлері мен өзара әрекеттесуі туралы нақты мәліметтер алуға мүмкіндік беретін жоғары энергиялы эксперименттік физикадағы негізгі құралдардың бірі болып табылады.

**Түйін сөздер:** электрон-позитронды сәулелер, коллайдер, элементар бөлшектер.

## Введение

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был одним из пионеров в разработке и создании установок со встречными электрон-позитронными пучками. В начале 50-х годов прошлого века, после открытия структуры протона в рассеянии электронов на протоне, было ясно, что для изучения структуры элементарных частиц следует увеличить их энергию. Большое преимущество в таких экспериментах могли дать встречные пучки частиц, в особенности при больших энергиях. Так, при столкновении релятивистской частицы с массой  $m$  с покоящейся частицей с такой же массой энергия взаимодействия, или, что то же самое, энергия в системе центра масс,  $E_{CM}$ , выражается формулой  $E_{CM} = \sqrt{2mE}$ , где  $E$  – энергия налетающей частицы, в то время как для встречных пучков эта энергия  $E_{CM} = 2E$ .

Однако, плотность частиц в пучке на много порядков меньше плотности неподвижной мишени, поэтому необходимо было создать очень интенсивные и плотные пучки частиц, которые обеспечили бы измеримую вероятность наблюдения событий изучаемых процессов, что в то время казалось практически невозможным. Тем не менее группа Г.И.Будкера в Институте ядерной физики Сибирского Отделения АН СССР решила эту задачу и в 1962 году начались первые эксперименты на установке со встречными электронными пучками ВЭП-1 с энергией пучков до 160 МэВ. Практически в то же самое время подобные эксперименты начались и в СЛАК (США).

В экспериментах на накопителе ВЭП-1 была проведена проверка справедливости квантовой электродинамики (КЭД) в процессах упругого рассеяния электронов [1], а также в процессах однократного и двукратного тормозного излучения [2]. В 1966 году в ИЯФ начал работу первый в мире накопитель с электрон-позитронными встречными пучками ВЭПП-2 с

энергией пучков до 700 МэВ. На этой установке были проведены эксперименты по наблюдению и изучению свойств векторных мезонов  $\rho$  и  $\phi$  [3, 4] и впервые наблюдалось множественное рождение адронов при энергии выше 1 ГэВ [5].

Сегодня коллайдеры со встречными пучками стали основным инструментом для экспериментов в области физики высоких энергий. Самая большая энергия частиц (протонов), 7 ТэВ, достигнута на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН. В настоящее время в мире работает четыре электрон-позитронных коллайдера, два из которых находятся в ИЯФ СО РАН. Это коллайдер ВЭПП-2000 с энергией в системе центра масс до

ГэВ и самой высокой светимостью в этом диапазоне энергий и коллайдер ВЭПП-4М с энергией  $E_{CM}$  до 12 ГэВ. Для обеспечения высокой светимости в экспериментах на обоих коллайдерах в ИЯФ создан специальный источник позитронов с высокой интенсивностью – инжекционный комплекс [6] на основе двух линейных ускорителей и кольца накопителя – охладителя.

### *Эксперименты на коллайдере ВЭПП-2000*

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 работает в ИЯФ СО РАН с 2010 года [7]. Этот коллайдер имеет уникальную особенность – пучки круглого сечения. Этот метод, разработанный в ИЯФ. Позволяет достичь высокой светимости, до  $10^{32} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $E_{CM} = 2$  ГэВ. Для реализации этой цели была разработана специальная магнитная структура кольца, включающая два фокусирующих соленоида с магнитным полем 12 Тл, установленных по обе стороны каждого из двух мест встречи пучков. Два места встречи коллайдера ВЭПП-2000 заняты детекторами КМД-3 (Криогенный Магнитный Детектор) и СНД (Сферический Нейтральный Детектор). Эксперименты проводятся в области энергии в системе центра масс от 0,3 до 2 ГэВ.

Основные характеристики коллайдера приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики ВЭПП-2000

Энергия пучков, МэВ	510	1000
Периметр, см	2235	
$I^+, I^-$ , мА	34	200
$e \cdot 10^5$ , см $\cdot$ рад	0.5	1.6
$\beta_x, \beta_z$ , см	6,3	6,3
$\xi_x, \xi_z$	0.075	0.075
Светимость, см $^{-2}$ с $^{-1}$	$1 \cdot 10^{31}$	$1 \cdot 10^{32}$

Для измерения энергии пучка используется специальная система, основанная на обратном комптоновском рассеянии лазерных фотонов [8]. Точность этих измерений составляет 30-50 кэВ. Интегральная светимость, набранная каждым из детекторов за все время экспериментов, составила около 1 фб ( $10^{39}$ см $^2$ ).

Основной целью экспериментов на ВЭПП-2000 является прецизионное изучение образования адронов в  $e^+e^-$  аннигиляции при низких энергиях, что дает важную информацию о взаимодействиях легких кварков и спектроскопии их связанных состояний. Изучение динамики конечных адронных состояний различных процессов позволяет проверять и уточнять феноменологические модели рождения адронов в данной области энергии.

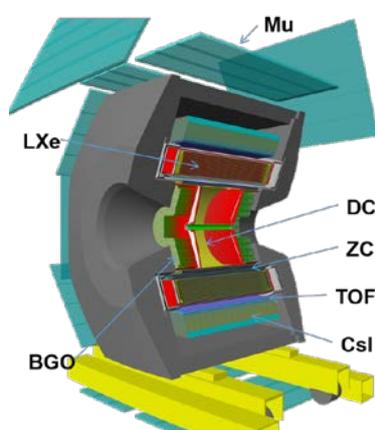
Универсальный детектор КМД-3 [9], схема которого представлена на рисунке 1, совмещает

свойства магнитного спектрометра с высоким энергетическим и пространственным разрешением для фотонов. Измерение координат и импульсов осуществляется с помощью дрейфовой камеры, находящейся в магнитном поле с индукцией 1,3 Тл, создаваемым тонким сверхпроводящим соленоидом.

Измерение координат и энергии фотонов производится с помощью комбинированного цилиндрического калориметра на основе жидкого ксенона и сцинтилляционных кристаллов CsI, а также торцевого калориметра на основе сцинтилляционных кристаллов германата висмута (BGO). Цилиндрический калориметр расположен за сверхпроводящим соленоидом толщиной около  $0,1 X_0$ .

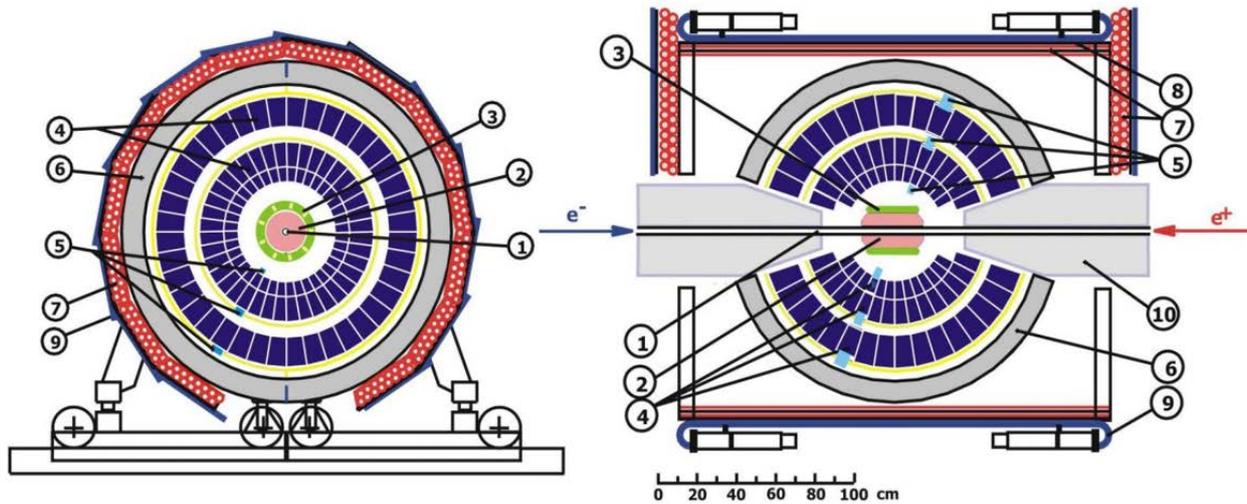
Схема детектора СНД представлена на рисунке 2.

Основной регистрирующей системой детектора СНД [10] является электромагнитный калориметр с высоким энергетическим и пространственным разрешением на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl), охватывающий телесный угол  $0.95 \times 4\pi$ . Калориметр состоит из трех слоев счетчиков, что обеспечивает высокое качество разделения электронов и пионов. В детекторе СНД имеется также дрейфовая камера для измерения координат заряженных частиц и система аэрогелевых черенковских счетчиков для разделения пионов и каонов. СНД также содержит мюонную систему, охватывающую детектор.



DC – дрейфовая камера, ZC – многопроволочная пропорциональная камера для измерения z-координаты и генерации сигнала триггера, LXe – жидко-ксеноновый калориметр, CsI – электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI, TOF – время-пролетная система, BGO – торцевой калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов BGO.

Рисунок 1 – Детектор КМД-3.



1 – вакуумная камера, 2 – трековая дрейфовая камера, 3 – аэрогелевые счетчики  $n=1.13$ ,  
 1.05 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – фототриоды, 6 – поглотитель, 7 – мюонный детектор,  
 10 – сверхпроводящие соленоиды.

Рисунок 2 – Детектор СНД.

Одной из наиболее актуальных задач на сегодняшний день является измерение полного сечения рождения адронов в области энергии от порога рождения до 2 ГэВ с относительной точностью лучше 1%. Эти данные необходимы для вычисления вклада адронной поляризации вакуума в величину аномального магнитного момента мюона, бегущей константы  $\alpha(M_Z)$  и других важных физических величин. В настоящее время значение, аномального магнитного момента мюона,  $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$ , является одной из наиболее точно измеренных величин в физике элементарных частиц. Недавний результат измерения  $a_\mu$  в эксперименте FNAL –  $a_\mu(\text{FNAL}) = 116\,592\,055(24) \times 10^{-11} (0.20 \text{ ppm})$  [11]. Сравнение экспериментального значения с теоретическим расчетом дает представление о границах применимости Стандартной Модели (СМ) и возможного ее нарушения.

Однако точность расчета  $a_\mu$  в настоящее время определяется погрешностью в определении вклада адронной поляризации вакуума,  $a_\mu^H$ , и заметно уступает точности эксперимента. Величину  $a_\mu^H$  невозможно вычислить аналитически и для ее определения используются дисперсионные соотношения и расчеты на решетках. Подробный обзор данной проблемы дан в [12]. Использование

дисперсионных соотношений приводит к следующим выражениям:

$$a_\mu^H = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{K(s)}{s} R(s), \quad (1)$$

где  $s$  – квадрат полной энергии частиц в системе центра масс,  $K(s) \sim 1$ , а  $R$  – отношение полного адронного сечения к сечению рождения пар мюонов:

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)},$$

$$\sigma_{\mu^+\mu^-} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \frac{86.85 \text{ nb}}{s [\text{GeV}^2]}. \quad (2)$$

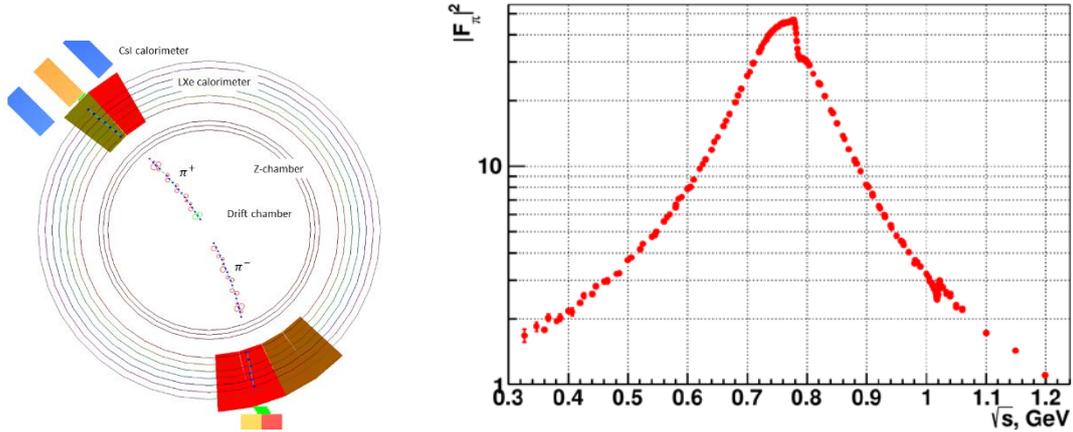
Как видно из (1) основной вклад дают низкие энергии.

За время экспериментов на ВЭПП-2000 в экспериментах КМД-3 и СНД измерены с высокой точностью сечения большого числа различных процессов аннигиляции в адроны:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-, \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0, K^+K^-, K_S K_L$  и другие. Наибольший вклад (порядка 70%) в интеграл (1) дает процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Сечение этого процесса обычно выражается через квадрат формфактора пиона, связанного с наличием внутренней структуры частицы:

$$\sigma_{\pi\pi} = \sigma_{\pi\pi}^{\text{КЭД}} |F_{\pi}|^2, \quad \sigma_{\pi\pi}^{\text{КЭД}} = \frac{\pi\alpha^2}{3s} \beta_{\pi}^3, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\pi\pi}^{\text{КЭД}}$  – сечение рождения пары пионов в рамках квантовой электродинамики (КЭД);

$s = E_{\text{CM}}^2$ ,  $\beta_{\pi}$  – отношение скорости пиона к скорости света;  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры. Результаты измерения формфактора пиона в эксперименте КМД-3, опубликованные в 2024 г. [13], представлены на рисунке 3.

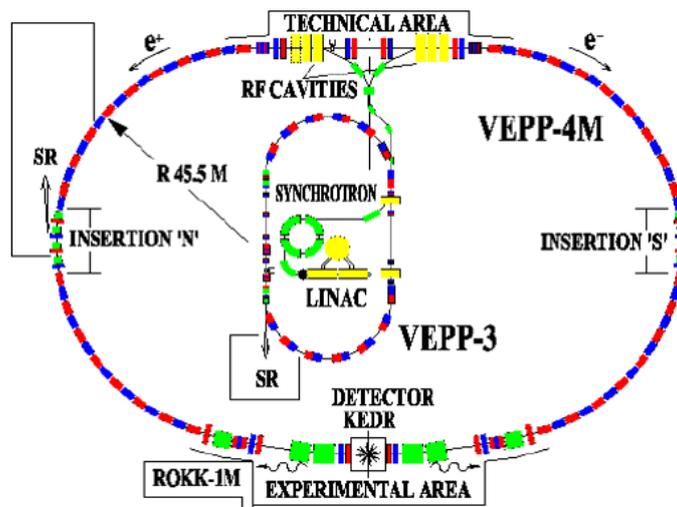


**Рисунок 3** – Слева: событие  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  на экране дисплея. Справа: формфактор пиона, измеренный в эксперименте КМД-3 [13]

Точность измерения определяется систематическими погрешностями и составляет около 0,7%. Следует заметить, что имеются заметные (до 2,5 стандартных отклонений) расхождения между результатами различных экспериментов, так что необходимы новые более точные измерения.

#### Эксперименты на коллайдере ВЭПП-4М

Ускорительно-накопительного комплекс ВЭПП-4М [14], схема которого представлена на Рисунке 4, позволяет проводить эксперименты в области энергии от 1,85 до 11 ГэВ системе центра масс.



**Рисунок 3** – Схема ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М

Комплекс включает бустерное кольцо ВЭПП-3 с периметром орбиты пучка 75 м, максимальной энергией пучка 2 ГэВ и максимальным током пучка 200 мА и коллайдер ВЭПП-4М с периметром 366 м. В настоящее время электроны и позитроны поступают в ВЭПП-3 из инжекционного комплекса. Светимость ВЭПП-4М составляет около  $2 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при энергии в системе центра масс 3-4 ГэВ и достигает  $1,5 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при максимальной энергии  $E_{CM} = 11$  ГэВ.

Хотя ВЭПП-4М по светимости заметно уступает работающим в настоящее время коллайдерам ВЕРС-II и SuperKEKB, он обладает рядом существенных особенностей, которые позволяют выполнять на нем интересные и важные эксперименты. Эти особенности – возможность работы в широком диапазоне энергии (что недоступно другим коллайдерам), прецизионное измерение энергии пучков и наличие системы регистрации рассеянных электронов для изучения процессов двухфотонного рождения адронов. Для измерения энергии пучков на ВЭПП-4М применяются два метода: разработанный в ИЯФ метод резонансной деполяризации (РД) [15], обеспечивающий относительную точность измерения энергии  $10^{-6}$ , и метод обратного комптоновского рассеяния, позволяющий измерять энергию пучков в процессе экспериментов с точностью  $3 \cdot 10^{-5}$ .

Эксперименты на коллайдере ВЭПП-4М проводятся с многоцелевым детектором КЕДР [16], схема которого представлена на рисунке 5.

Для измерения координат и импульсов заряженных частиц детектор содержит трековую систему, включающую вершинный детектор и дрейфовую камеру, находящиеся в магнитном поле с индукцией 0,6 Тл, создаваемым сверхпроводящим соленоидом. Детектор снабжен системой идентификации заряженных частиц на основе пороговых аэрогелевых счетчиков. Энергия и координаты гамма-квантов измеряются

цилиндрическим электромагнитным калориметром на основе жидкого криптона и торцевым калориметром на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Na). Имеется также пробегная система для идентификации мюонов, расположенная в железном ярме магнита.

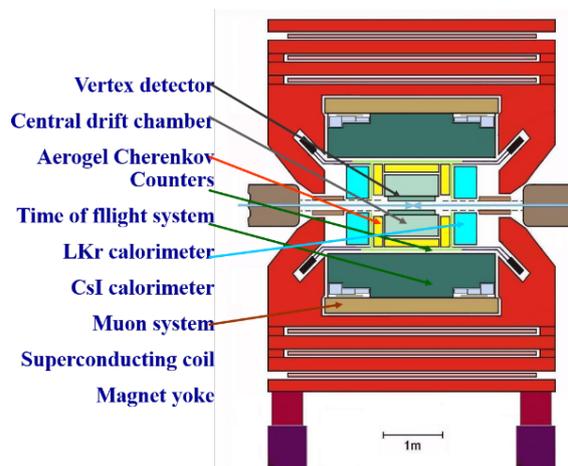


Рисунок 5 – Схема детектора КЕДР

Одним из основных направлений работ с детектором КЕДР является прецизионное измерение масс и парциальных ширин  $J/\Psi$ ,  $\Psi(2S)$ ,  $\Psi(3770)$  мезонов, а также масс  $\tau$ -лептона и D-мезонов. Многие из параметров этих частиц были измерены в экспериментах с детектором КЕДР с лучшей в мире точностью. В настоящее время проводятся прецизионные измерения параметров узких резонансов семейства  $\Upsilon$ -мезонов.

Другим важным направлением экспериментов с детектором КЕДР является измерение полного адронного сечения в доступной области энергии. На Рисунке 6 показаны результаты измерения полного адронного сечения в области энергии 1.8-4 ГэВ (выраженное в форме отношения  $R$  формулы (2)).

Описание и результаты экспериментов с детектором КЕДР в области энергии до 4 ГэВ представлены в обзоре [17].

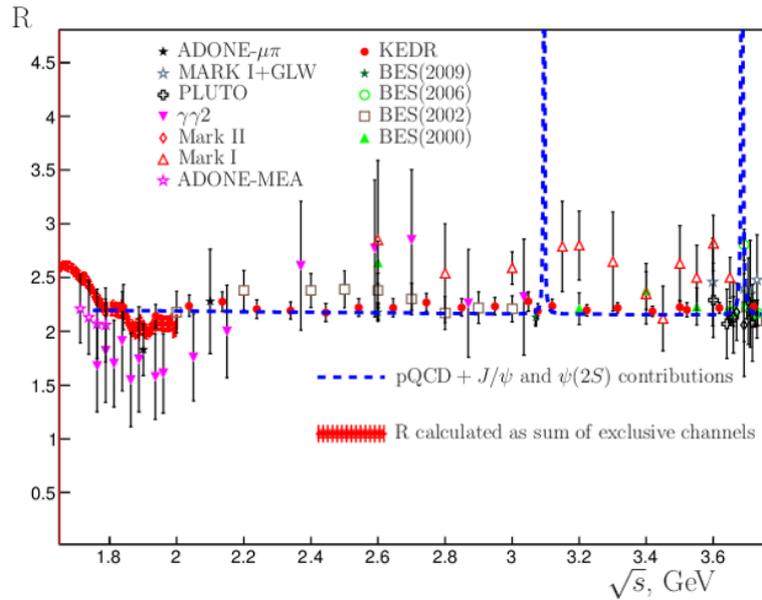


Рисунок 6 – Измерение полного адронного сечения.

## Заключение

Установки со встречными электрон-позитронными пучками являются в настоящее время одним из основных инструментов в экспериментальной физике высоких энергий, позволяющих получать точные данные о параметрах и взаимодействии адронов и лептонов.

В ИЯФ СО РАН в настоящее время работают два электрон-позитронных коллайдера, что позволяет проводить эксперименты в широкой области энергии в с.д.м. от 0.3 до 11 ГэВ. Имеется обширная программа экспериментов с этими коллайдерами.

В настоящее время в ИЯФ обсуждаются планы по созданию новых установок со встречными электрон-позитронными пучками и программа экспериментов с ними.

## Литература

1. Г.И. Будкер и др., Проверка квантовой электродинамики в рассеянии электронов на электронах. Ядерная физика, 1967, 6, 1221.
2. Г.И. Будкер и др., Рассеяние электронов на электронах при энергии 2x135 МэВ., Атомная энергия, 1967, 22, 164.
3. П.П. Голубничий, Е.А. Кушниренко, А.П. Онучин, Тормозное излучение в рассеянии электронов на электронах при энергии 2x160 МэВ, Ядерная физика, 1968, 7, 1240.
4. V.L. Auslender et al., Investigation of  $\rho$ -meson resonance with electron-positron colliding beams, Physics Letters, 1967, 25B, 433.
5. V.E. Balakin et al., Investigation of the phi-meson resonance by electron-positron colliding beams, Physics Letters, 1971, 34B, 328.
6. L.M. Kurdadze et al., Observation of multihadronic events in  $e^+e^-$  collisions at energy of 1.18-1.34 GeV, Physics Letters, 1972, 42B, 515.
7. K.V.Astrelina et al., Production of intense positron beams at the VEPP-5 injection complex, JETP, 2008, 106, 94. A.N. Skrinsky, Nucl. Instr. & Meth., 2009, A598, 1.
8. D. Berkaev et al., ICFA Beam Dyn. Newslett., 2009, 48, 235. E.V. Abakumova et al., Phys. Rev. Lett., 2013, 110, 140402.
9. E.V. Abakumova et al., Nucl.Instrum. & Meth., 2014, A744, 35.
10. B.I. Khazin, Nucl. Instr. & Meth., 2010, , 353. M.N. Achasov et al. (SND Collaboration), Nucl. Instrum. Methods, 2000, A449, 125.
11. M.N. Achasov et al., Nucl. Instrum. Methods, 2009, A598, 31.
12. D.P. Aguillard et al. (Muon g-2 Collaboration), Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm, Phys. Rev. Lett., 2023, 131, 161802.
13. T. Aoyama et al., The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, Phys. Rep., 2020, 887, 1.

- 14.F.V. Ignatov,, Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ( $g - 2$ ), Phys. Rev. Lett., 2024, 132, 231903.
15. V. Smaluk (for the VEPP-4 Team), Status of VEPP-4M Collider at BINP, Proc. of XXI Russ. Part. Accel. Conf., Zvenigorod, Russia, 2008, 79-81. <http://cern.ch/AccelConf/r08/papers/MOBAU03.pdf>,
16. А.Н. Алешаев и др., Ускорительный комплекс ВЭПП-4, Препринт ИЯФ 2011-20, Новосибирск, 2011.
17. Y.S. Derbenev et al., Accurate Calibration of the Beam Energy in a Storage Ring Based on Measurement of Spin Precession Frequency of Polarized Particles, Part. Accel., 1980, 10, 177-180.
18. В.В. Анашин и др., Детектор КЕДР, ЭЧАЯ, 2013, 44, 1263-1345.
19. В.В. Анашин и др., Эксперименты с детектором КЕДР на  $e^+ e^-$ -коллайдере ВЭПП-4М в области энергии  $\sqrt{s}=1,84-3,88$  ГэВ, ЭЧАЯ, 2023, 54, 190-262.

### References

1. G.I. Budker i dr., Proverka kvantovoj jelektrodinamiki v rassejanii jelektronov na jelektronah. Jadernaja fizika, 1967, Vol. 6, P. 1221.
2. G.I. Budker i dr., Rassejanie jelektronov na jelektronah pri jenerгии 2x135 MeV., Atomnaja jenergija, 1967, Vol. 22, P. 164.
3. P.P. Golubnichij, E.A. Kushnirenko, A.P. Onuchin, Tormoznoe iz- luchenie v rassejanii jelektronov na jelektronah pri jenerгии 2x160 MeV, Jadernaja fizika, 1968, Vol. 7, P. 1240.
4. V.L. Auslender et al., Investigation of  $\rho$ -meson resonance with electron-positron colliding beams, Physics Letters, 1967, Vol. 25B, P. 433.
5. V.E. Balakin et al., Investigation of the  $\phi$ -meson resonance by electron-positron colliding beams, Physics Letters, 1971, Vol. 34B, P. 328.
6. L.M. Kurdadze et al., Observation of multihadronic events in  $e^+ e^-$  collisions at energy of 1.18-1.34 GeV, Physics Letters, 1972, Vol. 42B, P. 515.
7. K.V.Astrelina et al., Production of intense positron beams at the VEPP-5 injection complex, JETP, 2008, 106, 94. A.N. Skrinsky, Nucl. Instr. & Meth., 2009, Vol. A598, P. 1.
8. D. Berkaev et al., ICFA Beam Dyn. Newslett., 2009, 48, 235. E.V. Abakumova et al., Phys. Rev. Lett., 2013, Vol. 110, P. 140402.
9. E.V. Abakumova et al., Nucl.Instrum. & Meth., 2014, Vol. A744, P. 35.
10. B.I. Khazin, Nucl. Instr. & Meth., 2010, , 353. M.N Achasov et al. (SND Collaboration), Nucl. Instrum. Methods, 2000, Vol. A449, P. 125.
11. M.N. Achasov et al., Nucl. Instrum. Methods, 2009, Vol. A598, P. 31.
12. D.P. Aguillard et al. (Muon  $g-2$  Collaboration), Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm, Phys. Rev. Lett., 2023, Vol. 131, P. 161802.
13. T. Aoyama et al., The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, Phys. Rep., 2020, Vol. 887, P. 1.
- 14.F.V. Ignatov,, Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ( $g - 2$ ), Phys. Rev. Lett., 2024, Vol. 132, P. 231903.
15. V. Smaluk (for the VEPP-4 Team), Status of VEPP-4M Collider at BINP, Proc. of XXI Russ. Part. Accel. Conf., Zvenigorod, Russia, 2008, P. 79-81. <http://cern.ch/AccelConf/r08/papers/MOBAU03.pdf>,
16. A.N. Aleshaev i dr., Uskoritel'nyj kompleks VJePP-4, Preprint IJaF 2011-20, Novosibirsk, 2011.
17. Y.S. Derbenev et al., Accurate Calibration of the Beam Energy in a Storage Ring Based on Measurement of Spin Precession Frequency of Polarized Particles, Part. Accel., 1980, Vol. 10, P. 177-180.
18. V.V. Anashin i dr., Detektor KEDR, JeChAJa, 2013, Vol. 44, P. 1263-1345.
19. V.V. Anashin i dr., Jeksperimenty s detektorom KEDR na  $e^+ e^-$ -kollajdere VJePP-4M v oblasti jenerгии  $\sqrt{s}=1,84-3,88$  GeV, JeChAJa, 2023, Vol. 54, P. 190-262.

#### **Сведения об авторе:**

*Борис Альбертович Шварц – доктор физико-математических наук, профессор ИЯФ СО РАН, Новосибирск, B.A.Shwartz@inp.nsk.su*

#### **Information about the author:**

*Boris Albertovich Shwartz – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, B.A.Shwartz@inp.nsk.su*

#### **Автор туралы мәлімет:**

*Борис Альбертович Шварц – физика-математика ғылымдарының докторы, РФА СБ Ядролық физика институтының профессоры, Новосибирск, B.A.Shwartz@inp.nsk.su*

*Принято к печати 12 ноября 2024 г*