

На правах рукописи

КАМИНСКИЙ Вячеслав Викторович

**КОМПТОНОВСКАЯ КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ
РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЕТЕКТОРА КЕДР**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

МУЧНОЙ
Николай Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЧАПОВСКИЙ
Павел Львович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

ПОТЫЛИЦЫН
Александр Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, ведущий научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна.

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2017 г. в « 15:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 18 » октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В ИЯФ СО РАН с 2003 года проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР. Коллайдер работает в диапазоне энергий от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс. Программа экспериментов включает в себя измерение полного сечения аннигиляции e^+e^- в адроны, исследование параметров и распадов Ψ и Υ мезонов, а также процессов рождения адронов в двухфотонных столкновениях. Для изучения двухфотонных процессов на детекторе КЕДР была создана система регистрации рассеянных электронов (РЭ), представляющая собой двухплечевой магнитный спектрометр и являющаяся частью магнитной структуры коллайдера ВЭПП-4М. Наличие этой системы позволяет изучать двухфотонные столкновения с регистрацией рассеянных электрона и позитрона. Система обеспечивает триггер для отбора двухфотонных событий и измеряет инвариантную массу адронов, рожденных в $\gamma\gamma$ столкновениях.

Характерное разрешение магнитного спектрометра по инвариантной массе системы адронов составляет около 10 МэВ. Таким образом, необходимо провести абсолютную калибровку энергетической шкалы спектрометра со сравнимой или лучшей точностью. Для решения этой задачи была разработана процедура калибровки системы регистрации рассеянных электронов, основанная на обратном комптоновском рассеянии лазерного излучения на электронном и позитронном пучках коллайдера ВЭПП-4М.

Основные цели работы

1. Создание лазерно-оптической системы для комптоновской калибровки спектрометра рассеянных электронов детектора КЕДР;
2. Автоматизация управления лазерно-оптической системой и процедуры калибровки в целом;
3. Разработка алгоритма определения калибровочных коэффициентов на промежутки времени между калибровками.

Научная новизна

Впервые на коллайдере ВЭПП-4М получено рассеяние лазерного излучения как на на электронном, так и на позитронном пучках. Создана автоматизированная установка для комптоновской калибровки системы регистрации РЭ. Создана модель магнитного спектрометра, позволяющая с необходимой точностью рассчитывать движение рассеянных

электронов/позитронов с большим разбросом энергий. Предложен метод расчёта орбиты равновесного пучка на произвольном азимуте с учетом известной магнитной структуры и измерений датчиков положения пучка (пикапов).

Научная и практическая значимость

Результаты работы уже используются в экспериментах на коллайдерах ВЭПП-4М, ВЭПП-2000, ВЕРС-II и на накопителе ВЭПП-3. Также они могут быть применены в экспериментах на будущих коллайдерах: супер c - τ фабрике в ИЯФ СО РАН, FCC-ee в CERN, CEPC в Китае.

Личный вклад автора

Автор внёс определяющий вклад в создание установки для комптоновской калибровки системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР, в автоматизацию управления лазерно-оптической системы установки, в разработку процедуры калибровки энергетической шкалы магнитного спектрометра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Создана установка для комптоновской калибровки системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР.
2. Разработаны система управления и программное обеспечение для автоматизации комптоновской калибровки системы регистрации РЭ.
3. Проведена прецизионная калибровка энергетической шкалы системы регистрации РЭ с помощью обратного комптоновского рассеяния.
4. Разработана методика определения калибровочных коэффициентов в промежутках между калибровками, основанная на моделировании магнитной структуры ВЭПП-4М с использованием измерений токов и полей магнитных элементов и данных с датчиков положения пучка.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах в ИЯФ СО РАН и на международных конференциях: «Instrumentation for Colliding Beam Physics» (Новосибирск, 2014, 2017), «Международной Сессии-Конференции ОНФ РАН» (Дубна, 2016), «European School

of High-Energy Physics» (Skeikampen, Норвегия, 2016). Основные результаты диссертации опубликованы в семи статьях в журналах, рекомендованных ВАК. Всего имеется 19 работ (включая препринты) по специальности по специальности «физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», из них 9 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 125 страницах, содержит 46 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает в себя 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показана практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена информация, необходимая для дальнейшего изложения материала диссертации.

Двухфотонным процессом $e^-e^+ \rightarrow \gamma^*\gamma^*e^-e^+ \rightarrow Xe^-e^+$ называется рождение системы адронов X виртуальными фотонами $\gamma^*\gamma^*$, излученными электроном и позитроном в процессе их рассеяния друг на друге. Особенностью двухфотонных процессов являются малые поперечные импульсы виртуальных фотонов, следовательно, рассеянные электроны и позитроны вылетают под малыми углами, и, как правило, распространяются внутри вакуумной камеры коллайдера и не регистрируются в центральной части универсального детектора. Если измерить энергии рассеянных электрона E^- и позитрона E^+ , то инвариантную массу адронного состояния X можно вычислить следующим образом:

$$W_{\gamma\gamma}^2 = 4\omega_1\omega_2 = 4(E_0 - E_-)(E_0 - E_+), \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 – энергии виртуальных фотонов, а E_0 – средняя энергия электронов в пучке.

На коллайдере ВЭПП-4М абсолютное значение E_0 измеряется методом резонансной деполяризации с относительной погрешностью $10^{-6} - 10^{-5}$. Для измерения энергий E_- и E_+ служит система регистрации рассеянных электронов. Для калибровки системы регистрации используются процессы обратного комптоновского рассеяния и однократного тормозного излучения.

Обратное комптоновское рассеяние (ОКР) — рассеяние низкоэнергетического фотона с энергией ω_0 на встречном ультрарелятивистском электро-не, в результате которого фотон рассеивается в направлении импульса электрона, приобретая энергию $\omega \gg \omega_0$. Максимальная энергия рассеянного фотона ω_{max} и минимальная энергия рассеянного электрона E_{min} равны, соответственно

$$\omega_{max} = \frac{E_0 \lambda}{1 + \lambda}, \quad E_{min} = E_0 - \omega_{max} = \frac{E_0}{1 + \lambda}, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{4E_0 \omega_0 \sin^2 \alpha/2}{m^2}, \quad (3)$$

где E_0 — энергия начального электрона, $\alpha \approx \pi$ — угол встречи, m — энергия покоя электрона ($c = 1$). Если рассеивать монохроматическое лазерное излучение с известной энергией фотонов ω_0 на встречном пучке электро-нов с энергией E_0 , то рождаются γ -кванты в диапазоне энергий от 0 до ω_{max} и электроны в диапазоне энергий от E_{min} до E_0 . Для каждого акта рассеяния с высокой точностью выполняется равенство: $\omega + E = E_0$, так как величиной ω_0 можно пренебречь. Теоретические спектры рассеянных электро-нов приведены на Рисунке 1.

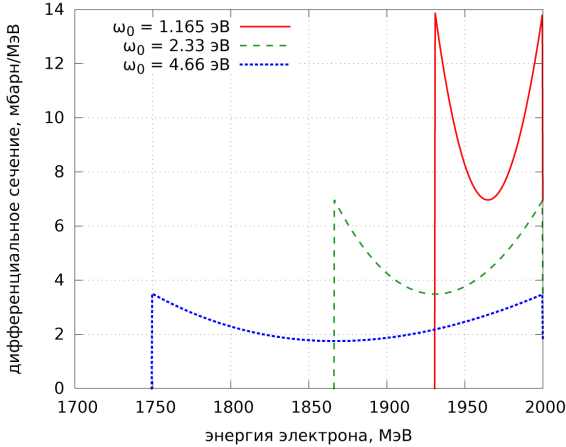


Рис. 1. Энергетические спектры рассеянных электронов при рассеянии фотонов с разными энергиями ω_0 на электро-не с энергией $E_0 = 2$ ГэВ.

Однократное тормозное излучение (ОТИ) — излучение фотона при рассеянии ультрарелятивистского электрона в поле встречного позитро-

на. Здесь также выполняется равенство $\omega + E = E_0$, однако максимальная энергия гамма-квантов ОТИ ограничена лишь величиной E_0 . Расчетный энергетический спектр фотонов ОТИ представлен на Рисунке 2.

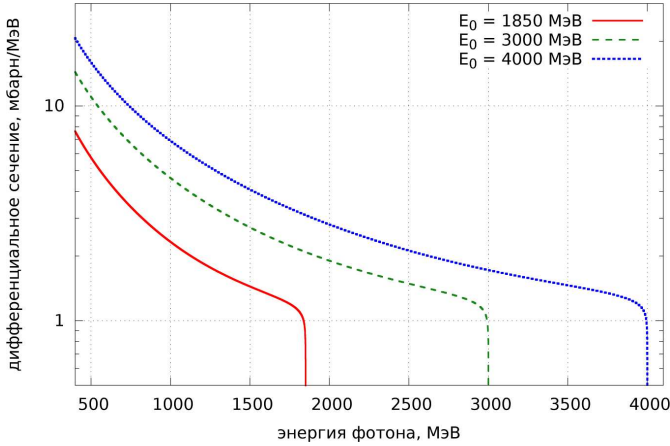


Рис. 2. Энергетические спектры однократного тормозного излучения при разных энергиях пучка.

Во второй главе описаны конструкция и параметры системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР и объяснены основные свойства фокусирующего магнитного спектрометра.

Система регистрации РЭ детектора КЕДР (Рисунок 3) представляет из себя двухплечевой фокусирующий магнитный спектрометр, встроенный в структуру коллайдера ВЭПП-4М. Спектрометр предназначен для определения энергии рассеянных электронов и позитронов в диапазоне $E \in [0.39-0.98] \cdot E_0$. Энергетическое разрешение спектрометра σ_E/E_0 составляет 0.05%–1% и сложным образом зависит от E/E_0 . Магнитная структура спектрометра образована квадрупольными линзами (NEL, SEL), дипольными магнитами (NEM, SEM), а также соленоидами, секстиполями и корректорами орбиты.

Для объяснения принципа действия системы рассмотрим схему, изображённую на Рисунке 4. Точка встречи электронного и позитронного пучков находится в центре детектора КЕДР, где поперечные размеры пучков минимальны для обеспечения высокой светимости. Электроны, покинув место встречи, проходят через магнитные линзы NEL1 и NEL2 и отклоняются дипольными магнитами NEM1 и NEM2. Разброс горизонтальных (x) координат траекторий обусловлен конечным эмиттансом

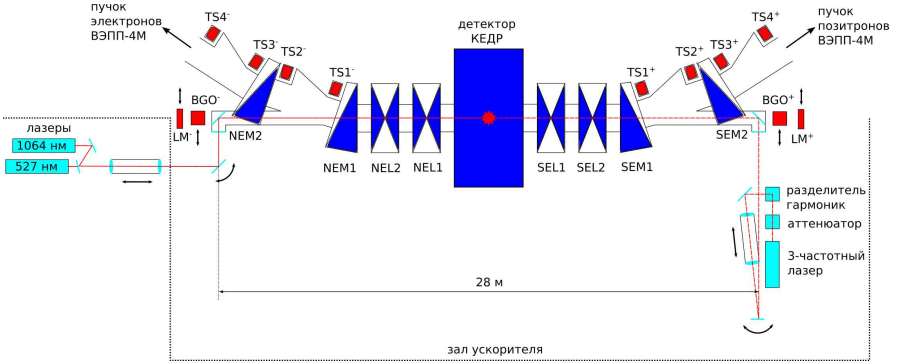


Рис. 3. Схема системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР и установки для комптоновской калибровки. NEL1, NEL2, SEL1, SEL2 – квадрупольные линзы, NEM1, NEM2, SEM1, SEM2 – поворотные магниты, TS1[±], TS2[±], TS3[±], TS4[±] – координатные детекторы, BGO[±] – калориметры на основе кристалла BGO, LM[±] – мониторы светимости.

электронного пучка. Фокусное расстояние системы линз пропорционально, а угол поворота в диполе — обратно пропорционален энергии электронов. Таким образом, точки фокуса для электронов с энергией $E < E_0$ находятся с внутренней стороны орбиты пучка, образуя линию фокусировки в плоскости xz . Координатные детекторы спектрометра выгодно располагать на этой линии для обеспечения наилучшего энергетического разрешения. В системе регистрации РЭ есть четыре пары координатных детекторов (TS) на основе дрейфовых трубок и газовых электронных умножителей, из которых все, кроме TS1[±], расположены на линии фокусировки.

В диссертации показано, что зависимость горизонтальной координаты x рассеянного электрона в одном из детекторов TS (Рисунки 3, 4) от его энергии E выглядит следующим образом:

$$x = \frac{AE_0}{E} + B, \quad (4)$$

где A и B — коэффициенты, определяемые магнитной структурой спектрометра и начальными условиями. Под начальными условиями следует понимать координаты x_0, y_0 и углы x'_0, y'_0 электронного пучка в месте встречи. Таким образом, энергию РЭ можно вычислить так:

$$E = \frac{AE_0}{x - B}. \quad (5)$$

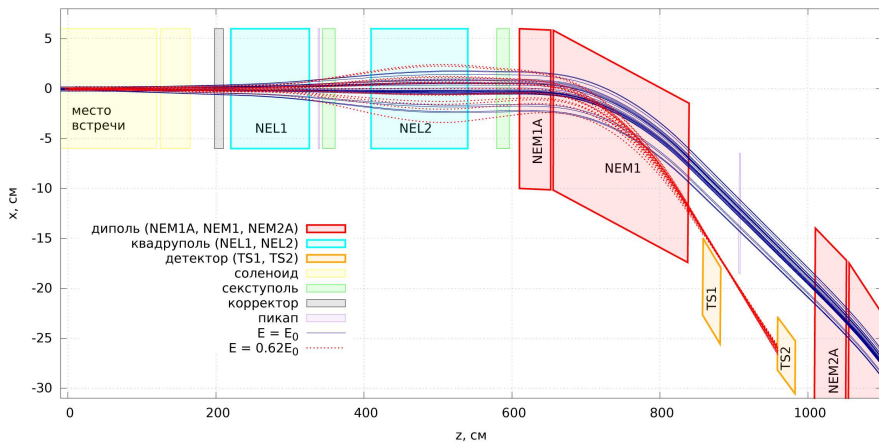


Рис. 4. Траектории движения электронов в плоскости орбиты x, z ВЭПП-4М. Синие линии соответствуют электронам с энергией E_0 , красные – электронам с энергией $E = 0.62E_0$.

Следовательно, калибровка энергетической шкалы каждого детектора TS сводится к определению индивидуальных коэффициентов A и B . Полная процедура калибровки энергетической шкалы системы регистрации РЭ выглядит следующим образом.

1. ВЭПП-4М работает в режиме встречных пучков, рождая фотоны, электроны и позитроны из места встречи в процессе ОТИ. В это же время на пучках электронов и позитронов ВЭПП-4М поочерёдно рассеивается лазерное излучение нескольких длин волн.
2. Детекторы TS регистрируют рассеянные электроны и позитроны. Энергии фотонов ОКР и ОТИ измеряются двумя сцинтилляционными калориметрами полного поглощения на основе кристаллов BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, германат висмута), установленными на концах экспериментального промежутка ВЭПП-4М на оси КЕДР (Рисунок 3). Во время калибровки калориметры перекрывают пучок фотонов из места встречи на пути к мониторам светимости, поэтому эксперименты по физике частиц на встречных пучках в таком режиме коллайдера невозможны.
3. При энергиях пучка ВЭПП-4М от 1 до 4 ГэВ и длинах волн лазерного излучения больше 500 нм комптоновские электроны регистрируются детекторами $\text{TS}4^\pm$. Координатам x краёв спектров компто-

новских электронов соответствуют минимальные энергии (2). Калибровка детекторов TS4 \pm проводится при измерении этих координат и использовании соответствующих энергий в качестве реперных точек. Так как формула (5) содержит два коэффициента, то достаточно двух реперных точек, то есть, достаточно обеспечить взаимодействие лазерного излучения только двух длин волн с электронным/позитронным пучком ВЭПП-4М.

4. При измерении энергий краёв спектров комптоновских и тормозных фотонов проводится калибровка BGO калориметров.
5. С помощью одновременно зарегистрированных пар электрон-фотон (позитрон-фотон) однократного тормозного излучения проводится калибровка детекторов TS1 \pm , TS2 \pm и TS3 \pm , используя тот факт, что $E = E_0 - \omega$.

Калибровка детекторов TS1–TS3 с помощью ОТИ не может проводиться часто, так как она занимает много времени и требует специального режима коллайдера. Однако результаты калибровок необходимы на протяжении всего времени эксперимента. В промежутках времени между экспериментальными калибровками энергетическая шкала системы регистрации определяется с помощью моделирования магнитной системы.

Третья глава посвящена моделированию системы регистрации РЭ, которое заключается в следующем:

1. Методом Монте-Карло генерируются рассеянные электроны, позитроны и фотоны в соответствии с теоретическими сечениями ОТИ, ОКР и двухфотонных процессов;
2. Рассчитывается движение рассеянных электронов и позитронов (трекинг) в магнитной структуре спектрометра. Поля и градиенты в магнитных элементах определяются на основе измерений питающих токов в текущий промежуток времени;
3. Определяются координаты рассеянных электронов в детекторах TS;
4. По полученным данным проводится процедура калибровка системы регистрации, аналогичная экспериментальной калибровке;
5. Производится коррекция расчётных калибровочных коэффициентов A и B по результатам ближайших экспериментальных калибровок.

Хронологически экспериментальные данные детектора КЕДР делятся на «заходы» (runs): промежутки времени длительностью от 20 минут

до 4 часов. При моделировании считается, что параметры ускорителя и детектора постоянны в течение одного захода. Калибровочные коэффициенты определяются индивидуально для каждого захода.

Электроны и позитроны, детектируемые в системе регистрации РЭ, обладают 60%-ным разбросом энергий относительно энергии равновесного пучка. Большинство программ расчёта динамики частиц в ускорителях не предназначены для работы с таким большим энергетическим разбросом. К тому же, в таких программах используется криволинейная система координат, связанная с равновесной орбитой пучка. В нашем случае необходим расчёт траекторий частиц прямолинейной системе координат.

Для всех элементов, кроме поворотных магнитов, используются матричный метод трекинга с размерностью 4×4 . При этом параметры элемента, характеризующие силу воздействия на частицу, содержат точную зависимость от энергии частицы. Например, силу квадрупольной линзы для частицы с энергией E определяет величина $k^2 = k_0^2 \frac{E_0}{E}$, где k_0^2 — сила линзы для электрона с энергией E_0 .

Траектории частиц в поворотных магнитах рассчитываются аналитически. Эти траектории являются дугами окружностей с радиусами, зависящими от магнитного поля и энергии частицы. Трекинг частиц через поворотный магнит сводится к поиску точек пересечения таких окружностей с гранями магнита в прямолинейной системе координат.

Чтобы найти начальные координаты и углы РЭ, необходимо знать координаты и углы равновесного пучка в месте встречи. Для решения этой задачи используем результаты измерений положения пучка пикапами (x_0, y_0) и (x_1, y_1) на входе и выходе исследуемого участка. Преобразование координат и углов пучка от начала к концу промежутка является линейным и определяется известной магнитной структурой. Это позволяет составить систему из четырёх линейных уравнений с четырьмя неизвестными углами (x'_0, y'_0) и (x'_1, y'_1) . Решив систему, находим все начальные условия для дальнейшего расчёта орбиты в данном промежутке и в некоторой окрестности вне него.

Настройка модели производилась путём сравнения расчётного поперечного положения равновесного пучка с измеренным в пяти точках спектрометра. Измеренные токи магнитных элементов пересчитывались в физические величины — поля, градиенты, углы поворота. После подстановки этих значений в проектную структуру ВЭПП-4М наблюдалось значительное отличие результатов расчёта от измерений, что говорит о несоответствии проектной структуры реальной, например, о неучтённых ошибках в выставке элементов, калибровке пикапов и т.д. Разница рас-

чётных и экспериментальных положений пучка в среднем не равна нулю из-за неопределённости абсолютного положения «нуля» пикапа. Принципиальное значение имеет стандартное отклонение этой разницы, которое и определяет точность полученной модели. Коэффициенты пересчёта токов в параметры магнитных элементов корректировались так, чтобы разница расчётных и экспериментальных положений пучка имела минимально возможное стандартное отклонение.

Положение пучка в месте встречи измерялось вершинным детектором КЕДР с точностью около 100 мкм. Было проведено сравнение измеренного положения пучка в месте встречи с расчётным: стандартное отклонение по горизонтали составило около 100 мкм. Проведено сравнение расчётного и измеренного положения пучка в четырёх пикапах спектрометра. Точность измерений орбиты пикапами оценивается в 50–100 мкм. Для пикапа между детекторами $TS1^-$ и $TS2^-$ получено стандартное отклонение около 130 мкм по горизонтали, а для пикапа между $TS3^-$ и $TS4^-$ — около 260 мкм. Для позитронного плеча спектрометра результаты аналогичные. Также проведено сравнение расчётных и экспериментальных значений координаты x края спектра комптоновских электронов. На Рисунке 5 видно, что расчётные значения синхронно с экспериментальными

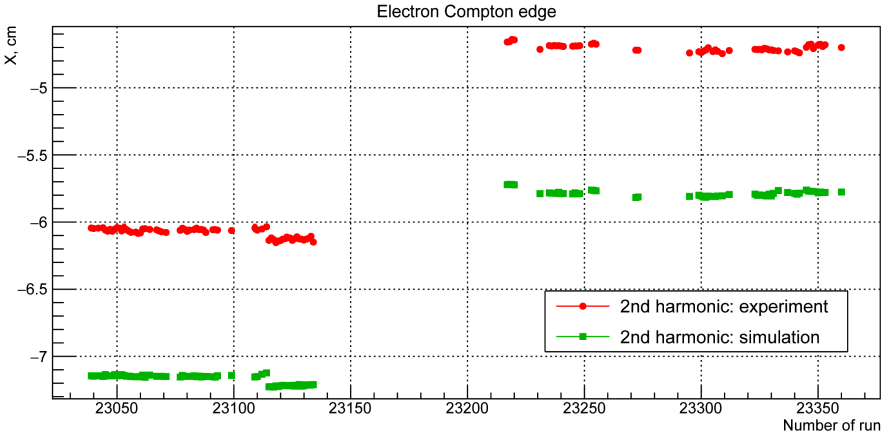


Рис. 5. Поперечное горизонтальное положение края спектра комптоновских электронов в 120 заходах детектора КЕДР. Красными кругами обозначены измерения, зелёными квадратами — результаты расчёта.

испытывают скачок, вызванный изменением энергии пучка. Кроме того, расчётные значения дрейфуют параллельно экспериментальным при

менее значительных изменениях магнитной структуры. Стандартное отклонение разницы экспериментального и расчётного значения составило примерно 260 мкм (Рисунок 6).

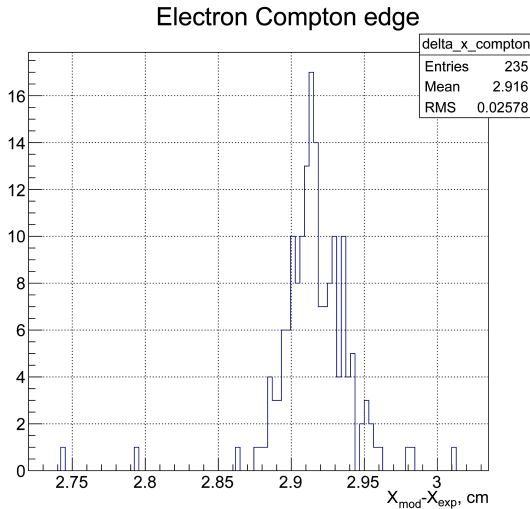


Рис. 6. Гистограмма разницы расчётного и измеренного поперечного горизонтального положения края спектра комптоновских электронов в 235 заходах детектора КЕДР.

На основе этих данных произведена оценка точности определения энергии РЭ моделью: $(2.0-3.3) \cdot 10^{-4}$ от энергии пучка. Это в 2–100 раз лучше энергетического разрешения соответствующих детекторов системы регистрации РЭ. Таким образом, созданная модель достаточно точно описывает относительные изменения энергетической шкалы спектрометра. После коррекции расчётных коэффициентов A и B с помощью экспериментальных значений, модель способна с необходимой точностью определять энергетическую шкалу между экспериментальными калибровками.

В четвёртой главе описана установка для проведения комптоновской калибровки системы регистрации РЭ.

Сформулируем основные требования к лазерам для системы калибровки. Рассеяние лазерного излучения на электронном пучке должно происходить на коротком участке орбиты вблизи места встречи. Так, длительность лазерного импульса 10 нс обеспечивает длину взаимодействия

около 1.5 м, таким образом, рассеяние происходит полностью внутри детектора КЕДР. Геометрия системы ввода лазерного излучения в вакуумную камеру ВЭПП-4М позволяет сфокусировать лазерное излучение в пятно размером около 1 мм. Энергия лазерного импульса в несколько десятков микроджоулей при токе электронного пучка в ВЭПП-4М 1 мА позволяет в среднем получать один акт рассеяния за одно столкновение. Указанным требованиям хорошо удовлетворяют импульсные Nd:YAG и Nd:YLF лазеры с диодной накачкой, работающие в режиме модуляции добротности. Для электронного пучка были выбраны два лазера с длинами волн 1064 нм и 527 нм, а для позитронного — один лазер с длинами волн 1053 нм, 527 нм и 263 нм.

Оптическая система (Рисунок 3) состоит из двух частей, для электронного и позитронного плеч магнитного спектрометра. Её задача — поочерёдно вводить лазерное излучение одной из двух длин волн в вакуумную камеру ВЭПП-4М, обеспечивая необходимые фокусировку и поперечное положение лазерного пучка в месте взаимодействия с пучком ускорителя. Эта задача решается с помощью поворотных зеркал, фокусирующих элементов, поляризационной призмы в качестве оптического аттенуатора, дисперсионной призмы для пространственного разделения гармоник лазера и прочих элементов. Настройка системы состоит в выборе длины волны и обеспечении пересечения лазерного луча с электронным или позитронным пучком. Управление частью элементов осуществляется дистанционно с помощью шаговых двигателей, что позволяет автоматизировать управление системой.

Сигнал для запуска лазеров вырабатывается путем деления частоты обращения пучка в ВЭПП-4М (819 кГц) на целое число 821, обеспечивая частоту повторения лазерных импульсов около 1 кГц. Фаза запускающего сигнала подбирается с помощью линии задержки так, чтобы импульсы лазерного излучения оказывались в центре КЕДР в тот момент, когда там пролетает встречный пучок ВЭПП-4М. Интенсивность комптоновского рассеяния измеряется по скорости счета совпадений импульсов запуска лазера с логическими импульсами регистрации рассеянных электронов в детекторе TS4.

Разработанное программное обеспечение позволяет дистанционно управлять всеми необходимыми настройками оптической системы. Реализована возможность работы системы управления в полностью автоматическом режиме для проведения процесса калибровки в соответствии с разработанным сценарием.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Создана установка для комптоновской калибровки системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР.
2. Создана система управления и программное обеспечение для автоматизации комптоновской калибровки системы регистрации РЭ.
3. Получено рассеяние лазерного излучения двух длин волн на электронном и позитронном пучках ВЭПП-4М. Проведена калибровка системы регистрации РЭ с помощью обратного комптоновского рассеяния.
4. Накоплен опыт разработки сложных автоматизированных оптических систем для экспериментов, связанных с обратным комптоновским рассеянием (ВЭПП-4М, ВЭПП-3, ВЭПП-2000, ВЕРС-II).
5. Проведено исследование свойств фокусирующего магнитного спектрометра в приближении тонких элементов. Проведён анализ факторов, влияющих на разрешение по энергии электронов и фотонов, выявлен характер зависимости от энергии.
6. Разработана методика определения энергетической шкалы системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР между экспериментальными калибровками. В её основе лежит моделирование магнитной системы с использованием измерений токов и полей магнитных элементов и измерений орбиты. Оценка точности определения энергии РЭ в разных подсистемах — $(2.0-3.3) \cdot 10^{-4}$ от энергии пучка, что в 2–100 раз лучше энергетического разрешения.
7. Рассчитано энергетическое разрешение системы регистрации РЭ.
8. Разработана методика трекинга электронов и позитронов с энергиями, сильно отличающимися от равновесной энергии пучка.
9. Разработана методика вычисления орбиты равновесного пучка на произвольном азимуте циклического ускорителя с помощью двух пикапов и известной магнитной структуры между ними. Это позволило рассчитать координаты области встречи электронного и позитронного пучков ВЭПП-4М с точностью около 100 мкм.
10. Создана модель магнитной системы экспериментального промежуточного ВЭПП-4М.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Blinov V.E., Kaminskiy V.V. et al. Beam Energy and Energy Spread Measurement by Compton Backscattering of Laser Radiation at the VEPP-4M Collider // *ICFA Beam Dynamics Newsletter*. – 2009. – April. – no. 48. – Pp. 195–207. – http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_48.pdf.
2. Abakumova E.V., Kaminsky V.V. et al. The beam energy measurement system for the Beijing electron-positron collider // *NIM A*. – 2011. – Vol. 659. – Pp. 21–29. – <http://doi.org/10.1016/j.nima.2011.08.050>.
3. Abakumova E.V., Kaminsky V.V. et al. A system of beam energy measurement based on the Compton backscattered laser photons for the VEPP-2000 electron-positron collider // *NIM A*. – 2014. – Vol. 744. – Pp. 35 – 40. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.01.020>.
4. Kaminskiy V.V. et al. Beam energy measurements for an experiment on elastic $e^{\pm}p$ scattering at the VEPP-3 storage ring // *JINST*. – 2014. – Vol. 9. – P. T06006. – <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/06/T06006>.
5. Bobrovnikov V.S., Kaminskiy V.V et al. The energy calibration system of the KEDR tagger // *JINST*. – 2014. – Vol. 9. – P. C10017. – <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/C10017>.
6. Kaminskiy V.V., Muchnoi N.Yu., Zhilich V.N. Compton backscattering for the calibration of KEDR tagging system // *JINST*. – 2014. – Vol. 9. – P. C08021. – <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/08/C08021>.
7. Kaminskiy V.V., Muchnoi N.Yu., Zhilich V.N. Energy scale calibration of KEDR detector tagging system // *JINST*. – 2017. – Vol. 12, no. 08. – P. C08002. – <http://doi.org/10.1088/1748-0221/12/08/C08002>.

КАМИНСКИЙ Вячеслав Викторович

**Комптоновская калибровка системы регистрации
рассеянных электронов детектора КЕДР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 9.10.2017 г.

Подписано к печати 10.10.2017 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 11

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.