

На правах рукописи

МУЧНОЙ НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ

**КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В  
ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ  
КОЛЛАЙДЕРАХ**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- СЕРБО Валерий Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
- ВИНОГРАДОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
- МИГИНСКИЙ Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск
- ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Российский научный центр «Курчатовский институт», г. Москва

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук



Иванов А.А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы диссертации

В области естественных наук отдельное важное значение имеет возможность проведения точных измерений различных величин в абсолютных единицах. В любом справочнике представлены значения фундаментальных констант, точному определению которых, как правило, посвящено огромное количество работ, выполненных в течение всего времени существования того или иного научного направления или науки как таковой. Поэтому тема прецизионных абсолютных измерений параметров и констант в любой точной науке не перестаёт быть востребованной. В диссертации рассматриваются различные способы применения Обратного Комптоновского Рассеяния (ОКР) монохроматического лазерного излучения на релятивистском электронном пучке для калибровки энергетической шкалы ускорителей и/или детекторов. Если говорить о прецизионных измерениях энергии релятивистских электронов в коллайдерах, то такие измерения востребованы в экспериментальной физике для точного измерения масс рождающихся частиц. Кроме того, решив задачу об измерении энергии пучка, уже сам этот пучок может использоваться как откалиброванный генератор вторичных частиц. В данном случае речь может идти об источниках синхротронного излучения, генерации фотонов и электронов путём комптоновского рассеяния и т.д. Актуальность темы диссертации обусловлена как устойчивым научным интересом к данной области исследований, так и практической значимостью разработанных методов измерений для планирования и проведения новых экспериментов.

### Цель работы

- Создание системы прецизионного измерения энергии электронного пучка ВЭПП-4М методом ОКР для проведения экспериментов с детектором КЕДР.
- Разработка и применение алгоритма абсолютной калибровки энергетической шкалы HPGe детектора для регистрации гамма квантов с энергиями до 7 МэВ.
- Развитие метода ОКР для непрерывного измерения энергии пучков в ускорителях, для проведения экспериментов по физике частиц и ядерной физике. Развитие метода подразумевает улучшение точности, анализ и минимизацию систематических погрешностей, обеспечение возможности измерения энергии в течение длительных экспериментов.
- Получение и использование выведенных пучков комптоновских гамма

квантов и рассеянных электронов для проведения калибровок различных детекторов.

- Разработка новых методов измерения энергии и энергетического разброса электронного пучка в ускорителях.

### **Научная новизна**

Работа целиком и полностью основана на экспериментальных применениях классического эффекта квантовой электродинамики – комптоновского рассеяния. Несмотря на то, что квантовая физика была «новой» наукой 100 лет назад, комптоновское рассеяние продолжает находить себе новые применения в физическом эксперименте. Прогресс в этом направлении связан с развитием лазерных и ускорительных технологий, а так же методов детектирования рассеянных частиц.

Что касается самого процесса ОКР лазерного излучения на релятивистском электронном пучке, обнаружена его новая нетривиальная особенность. Если после рассеяния электронный пучок проходит через дипольный магнит, разница углов поворота пучка и рассеянных электронов, потерявших максимально возможную энергию, не зависит от начальной энергии электронов (см. Рис. 2). Это обстоятельство позволило предложить новый метод измерения энергии пучка в ускорителе.

Для решения задачи об абсолютной калибровке энергии электронного пучка методом ОКР разработана оригинальная методика прецизионных измерений энергий гамма квантов в диапазоне до 7 МэВ с помощью детектора из высокочистого германия. Калибровка шкалы спектрометра осуществляется с помощью монокроматических гамма квантов от радиоактивных изотопов, таким образом определяются параметры функция отклика спектрометра, которая используется при измерении максимальной энергии комптоновского спектра рассеянных гамма квантов.

Впервые в экспериментах во физике частиц на ускорителях применён метод ОКР для непрерывного измерения средней энергии пучка с высокой точностью в абсолютных единицах. Созданные системы измерения энергии пучка способны работать в автономном режиме в течение длительных экспериментов.

### **Практическая значимость работы**

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке, совершенствовании и практическом применении методов калибровки энергетической шкалы ускорителей и детекторов, основанных на комптоновском рассеянии лазерного излучения.

Разработанный оригинальный алгоритм калибровки энергетической шкалы детектора из сверх-чистого германия может быть применён для измерений

энергий гамма квантов с высокой точностью в абсолютных единицах.

Метод измерения энергии электронного пучка с помощью ОКР доведён до состояния автономно работающей диагностики, кроме того, детально изучены источники систематических погрешностей метода, экспериментально полученная точность измерений, по всей видимости, близка к предельно возможной для такого типа установок. Полученные результаты могут быть использованы при планировании новых экспериментов на различных ускорителях.

В своём текущем виде установка РОКК-1М позволяет проводить различные эксперименты с использованием выведенного пучка гамма квантов высоких энергий.

Описанный в работе новый метод калибровки энергии пучка снимает ограничения на максимальную измеряемую энергию электронов.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в создании и развитии установки РОКК-1М [1] на коллайдере ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН, а так же в проведённых на ней экспериментах [2–7]. Автором диссертации было предложено создание на ВЭПП-4М системы измерения энергии пучка методом ОКР [8–14], которая была запущена в эксплуатацию в 2005 году. Система зарекомендовала себя надёжным и практичным инструментом диагностики параметров ускорителя в экспериментах с детектором КЕДР [15–23]. С учётом полученного опыта, были разработаны и осуществлены проекты по созданию систем измерения энергии пучков на накопителях ВЭПП-3 [24] и ВЕРС-II [25, 26]. Предложены проекты систем измерения энергии пучков для коллайдеров ВЭПП-2000 [27] и ILC [28–30].

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. На установке РОКК-1М развита техника проведения прецизионных экспериментов с использованием обратного комптоновского рассеяния монохроматического лазерного излучения на релятивистском электронном пучке коллайдера ВЭПП-4М.
2. Разработана оригинальная методика измерений абсолютных энергий гамма квантов с помощью HPGe детектора в диапазоне 1–10 МэВ.
3. Создана система прецизионной калибровки энергии электронного пучка ВЭПП-4М, основанная на измерении максимальной энергии гамма квантов обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения.
4. Аналогичные системы были разработаны и запущены на накопительном кольце ВЭПП-3 в ИЯФ и на электрон-позитронном коллайдере ВЕРС-II

в ИФВЭ Академии наук КНР.

5. Разработан проект системы измерения энергии пучков для коллайдера ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН.
6. Проведена калибровка энергетической шкалы системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР. Проведены эксперименты по измерению энергетического и пространственного разрешения прототипов жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР и CsI калориметра детектора BELLE.
7. Предложен новый метод измерения абсолютной энергии пучка для проекта международного линейного коллайдера.

### **Апробация работы**

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН, Объединенный институт ядерных исследований (г.Дубна), Лаборатория DESY (Zeuthen, Германия), Институт экспериментальной и теоретической физики РАН (г. Москва), Институт физики высоких энергий китайской академии наук (г.Пекин, КНР).

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и совещаниях, включая: 11th International Symposium on High-energy Spin Physics and the 8th International Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics (Блумингтон, 1994), 6th International Conference on Instrumentation for Experiments at  $e^+e^-$  Colliders (Новосибирск, 1996), 6th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics (Рим, 1996), IEEE Particle Accelerator Conference (Чикаго, 2001), 19th Russian Accelerator Conference (Дубна, 2004), Particle Accelerator Conference (Тенесси, 2005), EPS International Europhysics Conference on High Energy Physics (Лиссабон, 2005), 9th International Workshop on Tau Lepton Physics (Пиза, 2006), 10th European Particle Accelerator Conference (Эдинбург, 2006), 2007 International Linear Collider Workshop (Гамбург, 2007), 11th European Particle Accelerator Conference (Генуя, 2008), 10th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (Новосибирск, 2008), 10th International Workshop on Tau Lepton Physics (Новосибирск, 2008), International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from  $\phi$  to  $\psi$  (Пекин, 2009).

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 38 печатных работах, из них 27 статей в рецензируемых журналах [1–6, 12, 14–26, 30–36], 2 препринта [27, 29] и 9 статей в сборниках трудов конференций [7–11, 13, 28, 37, 38].

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи основных глав и заключения. Материал работы, изложенный на 216 страницах, включает 112 рисунков, 5 таблиц и список литературы, содержащий 125 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** рассмотрены основные свойства обратного эффекта Комптона, причём акцент сделан на рассеянии фотона малой энергии на ультрарелятивистском электроны. Сохранение полного импульса системы электрон + фотон определяет однозначную связь между импульсами электрона и фотона до и после рассеяния:  $\vec{p} + \vec{k}_0 = \vec{p}' + \vec{k}$ .

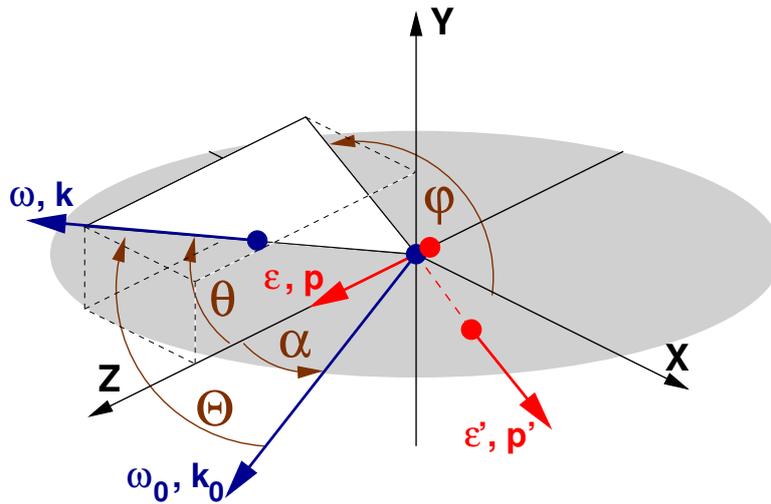


Рис. 1. Кинематика комптоновского рассеяния.  $\alpha$  – угол между импульсами электрона и фотона до рассеяния,  $\theta$  – угол между импульсами начального электрона и рассеянного фотона,  $\Theta$  – угол между импульсами начального и рассеянного фотонов.

В случае встречного ( $\alpha = \pi$ ) рассеяния фотонов малой энергии,  $\omega_0$ , на ультрарелятивистском электроны (энергия электрона  $\varepsilon \gg m \gg \omega_0$ ), значительная доля энергии электрона передаётся рассеянному фотону, так что энергия начального фотона играет пренебрежимо малую роль в энергетическом балансе системы:  $\omega = (\varepsilon - \varepsilon')$ . Фотоны, рассеявшиеся строго по направлению начального импульса электрона, получают максимально возможную

энергию:

$$\omega_{max} \simeq \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon + \frac{m^2}{4\omega_0}}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что существует однозначная связь между тремя основными параметрами задачи –  $\omega_0$ ,  $\omega_{max}$  и  $\varepsilon$ , с точностью до известного значения массы покоя электрона  $m$ . Легко заметить, что из трёх параметров задачи один – энергия лазерного фотона, как правило, тоже является хорошо известной величиной, которая может быть измерена с высокой абсолютной точностью оптическими методами.

Таким образом, в результате комптоновского рассеяния фотона на релятивистском электроном, электрон может передать значительную долю своего импульса рассеянному фотону. При максимально возможной передаче импульса обе рассеянные частицы строго коллинеарны с импульсом электрона до рассеяния. Сочетание этих обстоятельств привело к появлению большого количества экспериментальных установок, на которых комптоновское рассеяние монохроматического лазерного излучения на релятивистском электронном пучке применяется для решения широкого круга задач современной физики. В самом общем случае подобные установки выглядят так, как это показано на Рис. 2. Излучение лазера вводится в вакуумную камеру ускорителя,

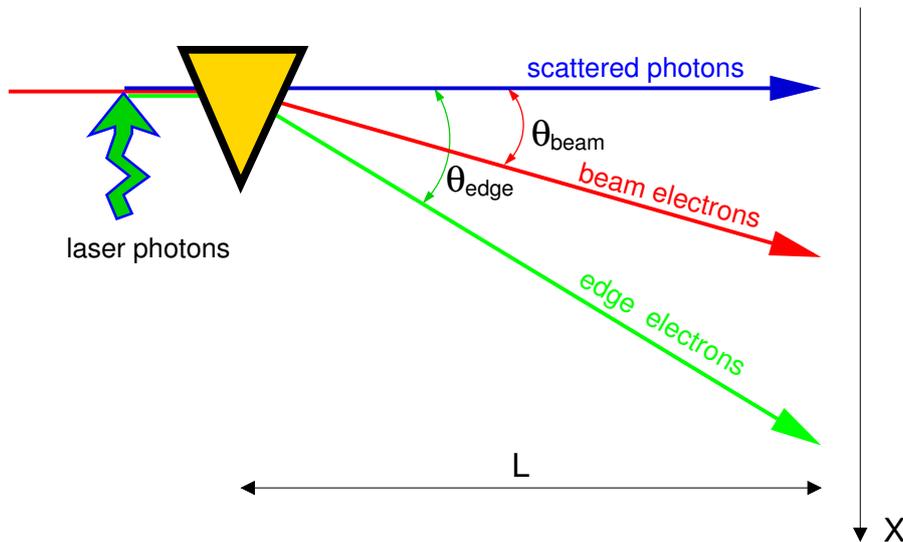


Рис. 2. Схема разделения пучков.

где рассеивается на электронном пучке. Угол встречи, как правило, близок к  $2\pi$ , что позволяет осуществить максимально возможную передачу импульса в соответствии с выражением (1) на странице 8. Применение импульсных лазеров позволяет локализовать область электрон-фотонного взаимодействия на коротком прямолинейном участке траектории электронного пучка. На Рис. 2

также изображён магнит, который осуществляет пространственное разделение заряженных и нейтральных частиц. После прохождения магнита, имеется три класса частиц:

- рассеянные фотоны, распространяющиеся в узком конусе вдоль направления импульса электронного пучка до рассеяния,
- нерассеянный пучок электронов, который поворачивается магнитом на угол  $\theta_{beam}$  и продолжает своё движение в ускорителе,
- рассеянные электроны, которые, отдавая часть своего импульса фотонам, поворачиваются в магнитном поле на больший угол. Максимальный угол поворота  $\theta_{edge}$  – у электронов, потерявших больше всего энергии. При этом

$$\theta_{edge} - \theta_{beam} = A \cdot \frac{4\omega_0}{m^2}, \quad (2)$$

где параметр  $A$  имеет размерность энергии и характеризует силу магнита (интеграл магнитного поля). *Разница углов поворота  $\theta_{edge} - \theta_{beam}$  не зависит от энергии электронного пучка.*

**Во второй главе** рассмотрены основные характеристики лазерного излучения с точки зрения его использования как источника монохроматических фотонов для рассеяния на электронном пучке.

Кинематика комптоновского рассеяния, рассмотренная в Главе 1, определяет однозначную связь между величинами  $\omega_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\omega_{max}$ . Это обстоятельство можно использовать для измерения, например, энергии электрона  $\varepsilon = f(\omega_0, \omega_{max})$ . Если же энергия электрона известна, то можно определить  $\omega_{max} = g(\omega_0, \varepsilon)$ . В каждом из этих случаев было бы удобно, с экспериментальной точки зрения, считать энергию лазерного фотона  $\omega_0$  хорошо известной константой. Основные принципы устройства лазеров рассмотрены на примере молекулярного газового лазера на диоксиде углерода, а именно GEM Select 50 фирмы Coherent Radiation Inc, использующегося в экспериментах на коллайдере ВЭПП-4М.

Для оценки стабильности средней энергии фотонов, излучаемых лазером, была проведена следующая процедура: для заданного длиной резонатора расстояния между продольными модами  $\Delta\nu = c/2L \simeq 85$  МГц производилось численное сканирование модовой структуры относительно контура усиления лазерного перехода. Для экспериментальной проверки справедливости такой модели было проведено одновременное измерение генерируемой лазерной мощности и медленно меняющейся температуры резонатора. Идея этих измерений состояла в том, что длина резонатора меняется за счёт термического расширения материалов его конструкции. Мощность излучения

измерялась болометрическим измерителем мощности, датчик температуры был установлен в контур жидкостного охлаждения резонатора. Измеренная и расчётная зависимости мощности излучения от температуры резонатора представлена на Рис. 3 (вверху).

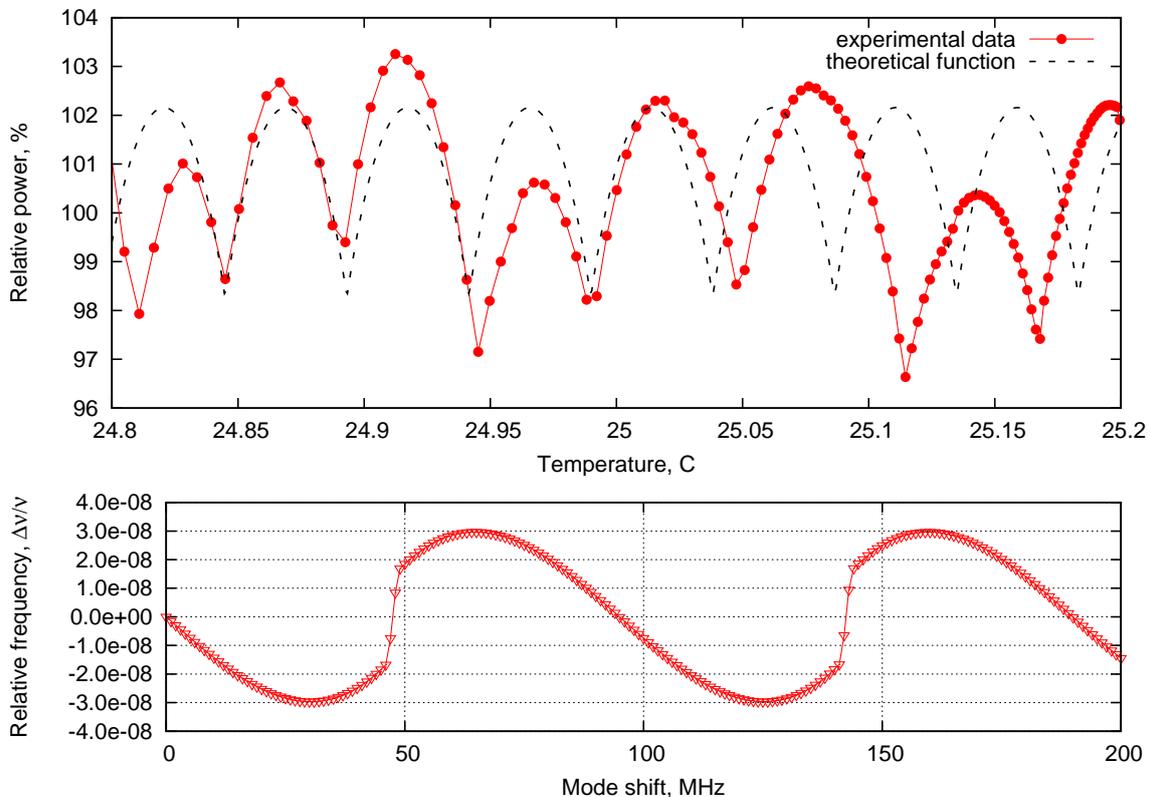


Рис. 3. Вверху – зависимость средней мощности лазерного излучения от температуры резонатора для лазера GEM Select 50. Внизу – колебания средней частоты генерации в спектре излучения лазера.

На основе этих измерений и моделирования можно сделать вывод о том, что средняя энергия фотона в спектре лазерной генерации известна и стабильна с точностью  $\lesssim 10^{-7}$ .

Далее во второй главе кратко рассмотрен вопрос о распространении лазерного излучения для гауссова пучка (мода резонатора  $TEM_{00}$ ). С использованием простого математического аппарата матричной оптики сделаны расчёты прохождения излучения через систему линз, которые позволяют оптимизировать плотность излучения в месте взаимодействия лазерного пучка с электронным.

Фотон-электронная светимость  $L_{e\gamma}$  определяет число рассеянных фотонов на электронном пучке:

$$N_{\gamma} = L_{e\gamma} \cdot \sigma_c(\omega_0, \varepsilon), \quad (3)$$

где  $\sigma_c(\omega_0, \varepsilon)$  – полное сечение комптоновского рассеяния. Светимость  $L_{e\gamma}$  за-

висит от интенсивностей электронного и лазерного пучков и их эффективного сечения. Для вычисления  $L_{e\gamma}$  необходимо знать следующие параметры пучка электронов:  $N_e$  – число частиц в пучке,  $\sigma_x(s)$  и  $\sigma_z(s)$  – горизонтальный и вертикальный бетатронные размеры,  $\sigma_e$  – продольный размер пучка,  $\sigma_\varepsilon$  – разброс энергии в пучке,  $\varepsilon, \varepsilon_0$  – энергия и средняя энергия частиц,  $(\varepsilon - \varepsilon_0)/\varepsilon_0 \cdot \psi(s)$  – сдвиг по  $x$  за счёт дисперсионной функции  $\psi$ . Для встречных пучков светимость есть:

$$\frac{dL_{e\gamma}}{dsd\varepsilon} = \iint_{-\infty}^{+\infty} 2 \cdot \rho_{ph}(x, z, s) \rho_e(x, z, s) dx dz \quad (4)$$

После интегрирования получаем:

$$\begin{aligned} \frac{dL_{e\gamma}}{dsd\varepsilon} &= \frac{2n_{ph}N_e}{(2\pi)^{3/2}\sigma_\varepsilon \sqrt{(\sigma^2 + \sigma_x^2)(\sigma^2 + \sigma_z^2)}} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{z_0^2}{2(\sigma^2 + \sigma_z^2)}\right\} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} - \frac{(x_0 + \psi \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0})^2}{2(\sigma^2 + \sigma_x^2)}\right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $x_0$  и  $z_0$  зависят от  $s$  и показывают возможный сдвиг между осями пучков электронов и фотонов. Сдвиг может появиться за счёт неточной выставки пучков или ненулевого угла столкновения. Если  $x_0 \neq 0$  и  $\psi \neq 0$ , то средняя энергия  $\bar{\varepsilon}_L$  электронов, взаимодействующих с фотонами, отличается от средней энергии всего пучка электронов:

$$\Delta\varepsilon = (\bar{\varepsilon}_L - \varepsilon_0) = -\frac{x_0 \sigma_\psi \sigma_\varepsilon}{\sigma^2 + \sigma_x^2 + \sigma_\psi^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_\psi = \psi \cdot (\sigma_\varepsilon/\varepsilon_0)$  – вклад синхротронных колебаний в поперечный горизонтальный размера пучка. Энергетический разброс взаимодействующих электронов отличается от энергетического разброса пучка, когда  $\psi \neq 0$ :

$$\sigma'_\varepsilon = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\sigma_\psi^2}{\sigma^2 + \sigma_x^2}}}. \quad (7)$$

После интегрирования по  $\varepsilon$  получаем:

$$\frac{dL_{e\gamma}}{ds} = \frac{n_{ph}N_e}{\pi\sqrt{(\sigma^2 + \sigma_x^2 + \sigma_\psi^2)(\sigma^2 + \sigma_z^2)}} \times \\ \times \exp\left\{-\frac{z_0^2}{2(\sigma^2 + \sigma_z^2)}\right\} \times \exp\left\{-\frac{x_0^2}{2(\sigma^2 + \sigma_x^2 + \sigma_\psi^2)}\right\}. \quad (8)$$

Интегрирование выражения (8) по  $s$  (пределы интегрирования ограничиваются  $\mathcal{L}$ ) может быть выполнено численно. Аналогичные расчёты сделаны для лазера, работающего в режиме генерации коротких импульсов. В последнем параграфе второй главы диссертации рассмотрен вопрос о влиянии угловых распределений взаимодействующих частиц на форму края комптоновского спектра рассеянных фотонов. Проведённые во второй главе расчёты применяются при проектировании новых установок с использованием обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения для определения интенсивности рассеянного пучка, его пространственных свойств и систематических погрешностей при использовании края комптоновского спектра как точного энергетического репера.

**Третья глава** посвящена рассмотрению вопроса о применении полупроводникового детектора из сверх-чистого германия (HPGe) для точных измерений абсолютных энергий гамма квантов. В Главе 1 было показано, что кинематические свойства обратного комптоновского рассеяния фотона на электроны определяют однозначную связь между энергиями начальных фотона и электрона, и максимальной энергией рассеянного фотона. В Главе 2 было показано, что среднюю энергию лазерного фотона можно считать константой, известной (или измеряемой) с относительной точностью не хуже  $\sim 10^{-6}$ . Поскольку данная работа в целом посвящена проведению «прецизионных» экспериментов, в этой главе рассмотрен вопрос о «подходящем» оборудовании для регистрации энергетического спектра рассеянных фотонов. При этом предметом рассмотрения является возможность измерения максимальной энергии рассеянных фотонов (на краю комптоновского спектра) в абсолютных единицах с относительной погрешностью  $10^{-4}$  и лучше. Вообще говоря, для достижения такой точности необходимыми свойствами детектора для регистрации спектра рассеянных фотонов являются:

- высокое энергетическое разрешение детектора –  $\sigma_E/E \lesssim 10^{-3}$ ,
- принципиальная возможность проведения абсолютной калибровки энергетической шкалы детектора с точностью  $\Delta E/E \lesssim 10^{-4}$ .

Из существующих в настоящее время детекторов этим требованиям лучше всего удовлетворяют HPGe детекторы (HPGe – High Purity Germanium,

детекторы из сверх-чистого германия). В первой части третьей главы приведён обзор существующих технологий производства HPGe детекторов и основных физических процессов, определяющих спектрометрические качества приборов. Кратко описаны алгоритмы цифровой обработки сигналов, позволяющие достичь высокого энергетического разрешения гамма спектрометра на основе HPGe детектора.

Практическая часть третьей главы посвящена разработке и применению процедуры абсолютной калибровки энергетической шкалы спектрометрического тракта. Прямой путь проведения абсолютной калибровки всего спектрометрического тракта – использование монохроматических гамма-квантов, испускаемых возбуждёнными ядрами, энергии которых хорошо измерены и занесены в таблицы физических величин. Типичная табличная точность для энергий распространенных ядерных источников гамма квантов составляет несколько электрон-вольт.

Для проведения калибровки энергетической шкалы принципиально важное значение имеет экспериментально наблюдаемая форма пика полного поглощения, которая определяется совокупностью нескольких эффектов. Для математического описания формы пика имеет смысл искать эмпирическую функцию, которая должна обладать минимально необходимым числом параметров. По видимому, она не может быть универсальной, так как зависит не только от физики процесса регистрации, но и от алгоритмов оптимизации, заложенных в конкретный сигнальный процессор. Путём проверки и анализа различных моделей описания энергетического отклика спектрометрической системы на монохроматическое возбуждения, была выбрана и использована модифицированная функция Гаусса, в которой к симметричной функции, слева от максимума, «пришивается» экспоненциальный «хвост», определяемый только одним параметром  $\xi$ :

$$f(x, x_0, \sigma, \xi) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \begin{cases} x > (x_0 - \xi \cdot \sigma) : \exp\left\{-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ x < (x_0 - \xi \cdot \sigma) : \exp\left\{\frac{\xi^2}{2} + \frac{\xi(x - x_0)}{\sigma}\right\} \end{cases} \quad (9)$$

Нормировочный коэффициент определяется выражением:

$$\frac{1}{N} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, x_0, \sigma, \xi) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) \quad (10)$$

Описанные в третьей главе эксперименты проводились в 2010 году на коаксиальном HPGe детекторе ORTEC GEM55P4-95 с относительной эффек-

тивностью регистрации 55%. Использовался электромеханический охладитель ORTEC X-COOLER II, охлаждающий кристалл до температуры  $\sim 90^\circ\text{K}$  и спектрометрическая станция ORTEC DSpec Pro. Показано, что для выбранной модели функции отклика, все её параметры – энергетическое разрешение, нелинейность и асимметрия имеют плавную и предсказуемую зависимость от энергии.

Например, энергетическое разрешение детектора в зависимости от энергии гамма кванта должно описываться функцией вида:

$$\sigma_E = \sqrt{K_0 + F\varepsilon E}, \quad (11)$$

где  $K_0$  отвечает за шум электроники,  $F$  – фактор Фано,  $\varepsilon$  – энергия образования пары носителей заряда. Зависимости  $\sigma_E$  от  $E_{fit}$  приведена на Рис. 4.

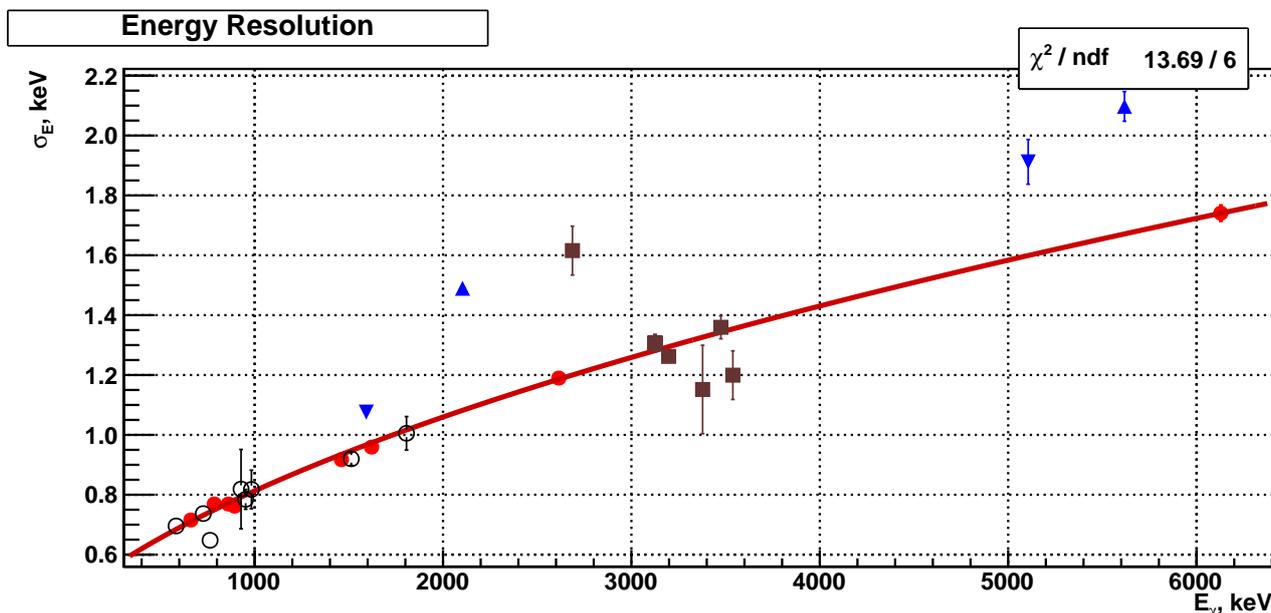


Рис. 4. Энергетическое разрешение HPGe секторметра. Параметры подгонки:  $F = 0.156 \pm 0.002$ ,  $K_0 = 0.199 \pm 0.009 \text{ кэВ}^2$ .

На Рис. 4 сплошными точками обозначены «простые» линии, выбранные для калибровки, по которым проведена подгонка функцией (11). Все остальные точки – пики-сателлиты: «сингл-эскейп» и «дабл-эскейп» пики, суммарные линии и «простые» линии, не включенные в калибровку.

С использованием предложенной процедуры калибровки энергетической шкалы спектрометра можно сделать заключение о том, является ли неизвестный источник строго монохроматическим и если да, то определить энергию излучаемых фотонов с абсолютной точностью не хуже 50 эВ в диапазоне энергий от 1 МэВ до 6–7 МэВ.

В первом параграфе **четвёртой главы**, приведено описание многофункционального источника «Рассеянных Обратно Комптоновских Квантов» – установки РОКК-1М на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М.

Установка использовалась для:

- калибровки системы регистрации рассеянных электронов [31],
- измерения степени поперечной поляризации электронного пучка,
- проведения экспериментов на выведенном пучке гамма квантов [2–7]

Общая схема расположения элементов установки РОКК-1М [1] показана на Рис. 5. Установка была запущена в 1991 году: был получен первый пучок рассеянных гамма квантов. Установка позволяет получать ОКР лазерного света как на электронном, так и на позитронном пучках в ВЭПП-4М: обеспечена возможность ввода лазерного излучения в вакуумную камеру накопителя с обеих сторон экспериментального промежутка. Область электрон-фотонного взаимодействия находится в прямолинейной части экспериментального промежутка ВЭПП-4М, центром которого является место встречи электронного и позитронного пучков в детекторе КЕДР. Последняя существенная модернизация установки РОКК-1М была проведена в декабре 2009 года. Суть модернизации состояла в появлении новой точки ввода излучения для  $\text{CO}_2$  лазера: эта часть системы обозначена как LASER 2 на Рис. 5. Линия распространения лазерного излучения показана пунктиром на Рис. 5, а новая «короткая» ОЭФВ расположена между магнитами NEM1 и NEM2.

С 2005 по 2008 гг. на коллайдере ВЭПП-4М и детекторе КЕДР проводился эксперимент по измерению массы  $\tau$ -лептона [15, 17, 35]. Для определения массы частицы измеряется зависимость сечения реакции  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  от энергии встречных пучков вблизи порога рождения пары  $\tau^+\tau^-$ . Целью эксперимента являлось улучшение абсолютной точности, с которой была известна масса  $\tau$ -лептона ( $m_\tau =$

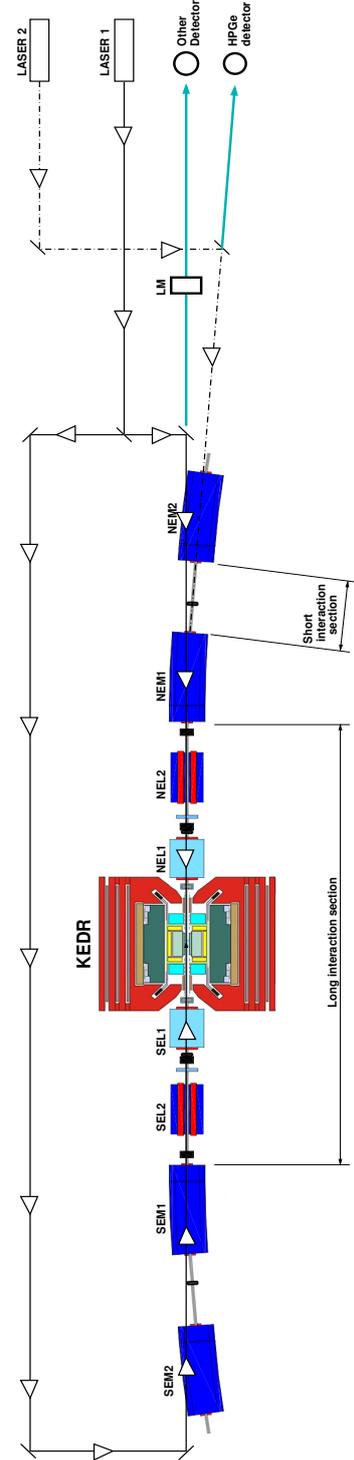


Рис. 5. Схема установки РОКК-1М.

1776.99 $_{-0.26}^{+0.29}$  МэВ), до уровня  $\simeq 0.15$  МэВ. Поскольку основной вклад в точность измерения массы  $\tau$ -лептона вносит область вблизи порога рождения, для проведения эксперимента необходимо набрать большой интеграл светимости. Следовательно, нужно было минимизировать потери ускорительного времени на проведение калибровок энергии методом РД. В этом эксперименте, наряду с методом РД, использовалось обратное комптоновское рассеяние излучения  $CO_2$  лазера.

Идея метода проста: с помощью HPGe детектора нужно измерить максимальную энергию рассеянных на электронном пучке комптоновских гамма квантов –  $\omega_{max}$ . Используя выражение (1) на стр. 8 можно восстановить значение средней энергии электронов в пучке  $\varepsilon$  из измеренного значения  $\omega_{max}$  и выбранного угла  $\alpha$ :

$$\varepsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{max} \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \right) \simeq \frac{m}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\omega_{max}}{\omega_0}}. \quad (12)$$

Впервые такой метод измерения энергии пучка был применён на накопительном кольце Taiwan Light Source в 1996 году, где энергия электронов составляла 1300 МэВ и была измерена с относительной точностью  $\Delta E/E \simeq 0.1\%$ . Более высокий уровень точности измерения энергии был получен вскоре после этого на источниках СИ BESSY-I и BESSY-II в Берлине. На BESSY-II энергия пучка  $E \simeq 1720$  МэВ была измерена с точностью  $\Delta E/E \simeq 3 \cdot 10^{-5}$ , причём эти измерения были подтверждены измерениями энергии пучка методом РД.

При измерении пучка методом ОКР на ВЭПП-4М была разработана и применена оригинальная процедура обработки комптоновского спектра, выполненная с учётом асимметричной функции отклика детектора. На Рис. 6 приведён пример одного такого измерения – стандартное окно вывода программы обработки спектров. На Рис. 6 показаны:

- Слева вверху – общий вид гистограммы со спектром ОКР и калибровочными линиями.
- Слева внизу – фрагмент гистограммы вблизи края комптоновского спектра, и функция подгонки.
- В центре вверху – зависимость параметра асимметрии энергетической калибровки шкалы спектрометра от энергии калибровочного пика.
- В центре внизу – зависимость энергетического разрешения спектрометра от энергии калибровочного пика, подгонка её функцией  $\sigma_E = \sqrt{K_0 + F\varepsilon E}$ , где параметр  $K_0$  отвечает за шумовую составляющую разрешения, а  $F$  – фактор Фано.

- Справа сверху – зависимость остаточной нелинейности шкалы спектрометра от энергии калибровочного пика.
- Справа внизу – сводная таблица результатов калибровки шкалы и измерения энергии пучка.

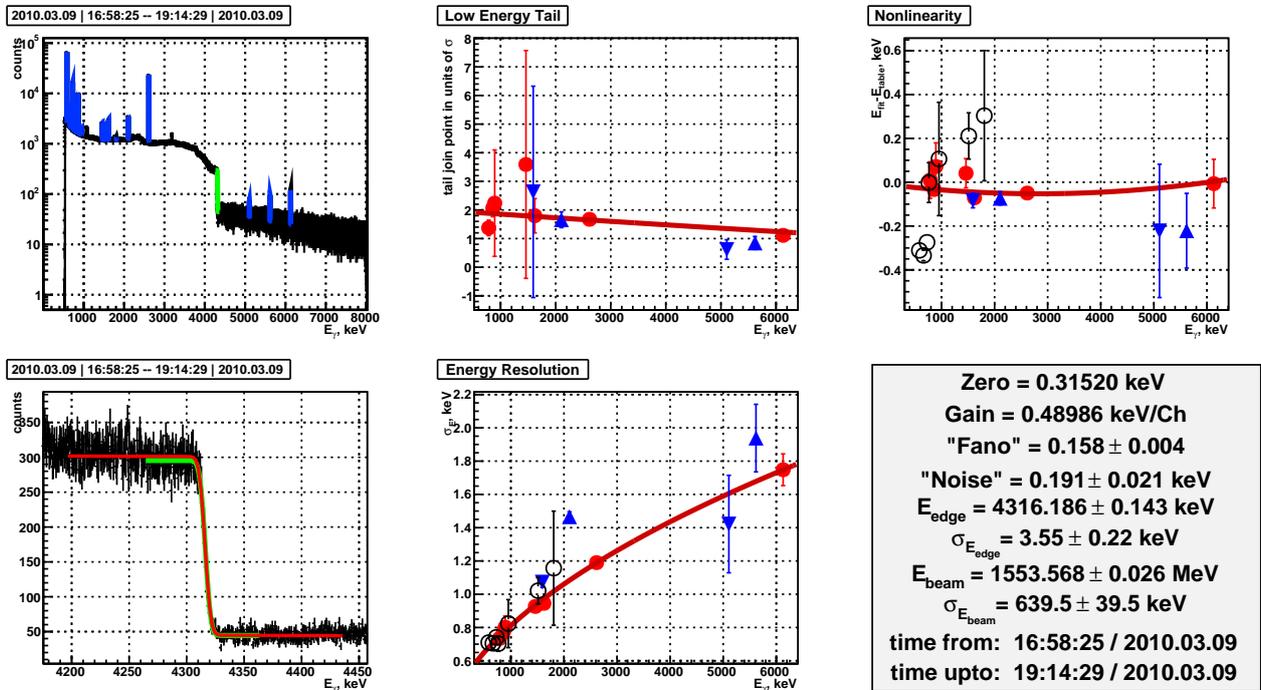


Рис. 6. Результат измерения энергии пучка ВЭПП-4М. Март 2010г.

Функции подгонки параметров калибровки энергетической шкалы (разрешение, асимметрия, нелинейность) проведены по точкам, которые относятся к «простым» калибровочным пикам и изображены на Рис. 6 сплошными круглыми точками. Остальные точки относятся к различным пикам-сателлитам и в калибровке шкалы не участвуют.

В экспериментах на ВЭПП-4М оценка систематических погрешностей измерения энергии пучка методом ОКР проводилась путём сравнения результатов одновременных измерений методом резонансной деполяризации. На Рис. 7 представлен результат сравнения измерений энергии пучка ВЭПП-4М двумя способами. Второй график (внизу на Рис. 7) – результаты измерения энергетического разброса электронного пучка методом ОКР. Из Рис. 7 видно, что статистическая ошибка в определении энергии методом ОКР составляет около 20 кэВ при энергии пучка  $E_{beam} \simeq 1553.50$  МэВ и времени измерения около 3-х часов. В относительных единицах  $\Delta E_{beam}/E_{beam} \simeq 1.3 \cdot 10^{-5}$ . Точность «хорошего» измерения энергии методом РД составляет 1-2 кэВ. Значимого систематического различия в измерении энергии двумя способами не наблюдается.

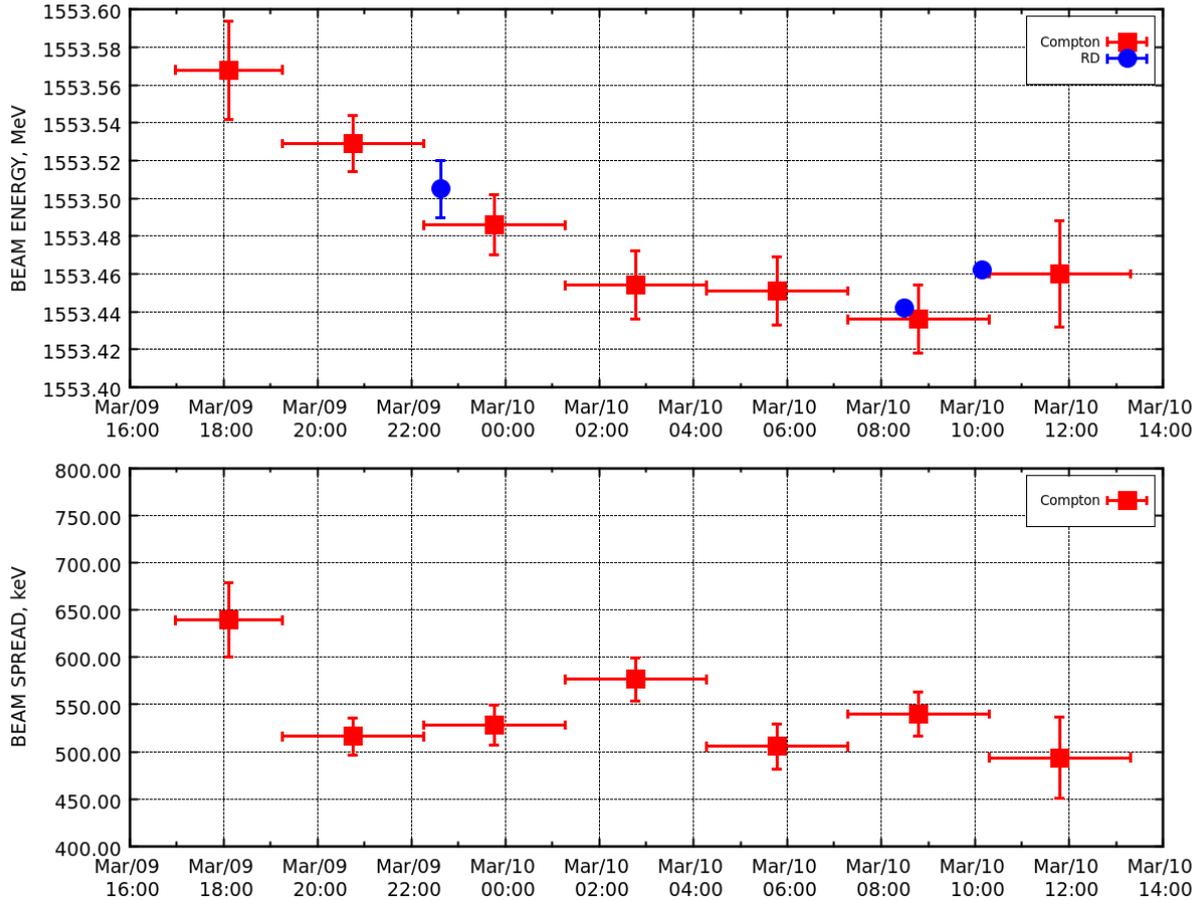


Рис. 7. Вверху – поведение во-времени средней энергии электронов в пучке ВЭПП-4М, независимо измеренное методами ОКР и РД. Внизу – результаты измерения энергетического разброса электронов в пучке. Измерения проводились 9–10 Марта 2010 года.

Программа экспериментов на детекторе КЕДР в области энергий до 4 ГэВ в с.с.м. была построена с учётом того, что светимость коллайдера ВЭПП-4М существенно меньше светимости современных установок. Однако, на коллайдере ВЭПП-4М есть важное преимущество – возможность прецизионного измерения энергии пучка. Благодаря этому обстоятельству, в экспериментах, не требующих большого интеграла светимости, можно получать результаты мирового уровня за счёт минимизации систематических погрешностей измерений, связанных с неопределённостью энергии взаимодействия встречных пучков. К настоящему времени коллаборацией КЕДР, с использованием комбинированной техники измерения пучка (РД + ОКР), получены следующие результаты:

- получен предварительный результат эксперимента по измерению массы  $\tau$ -лептона. Значение массы составило  $m_\tau = 1776.81_{-0.19}^{+0.17} \pm 0.15$  МэВ.
- измерено произведение электронной ширины  $J/\psi$ -мезона и вероятности

его распада на  $e^+e^-$  пару [19, 23],

- измерены массы  $D^0$  и  $D^+$  мезонов [32],
- измерена масса, полная и лептонная ширина  $\psi(3770)$  [21],
- произведён поиск узких резонансов в области энергий 1.85–3.1 ГэВ в с.с.м. и поставлен верхний предел на их лептонную ширину [21].

**В пятой главе** описаны установки для измерения энергии пучка методом ОКР, разработанные на основе опыта применения метода в эксперименте на ВЭПП-4М.

В первом параграфе пятой главы рассмотрен эксперимент по измерению зарядовой асимметрии упругого рассеяния электронов и позитронов на протоне. В ИЯФ на накопителе ВЭПП-3 в 2009 году проводился эксперимент по измерению зарядовой асимметрии в упругом рассеянии электронов и позитронов на газовой водородной мишени. Энергия пучков электронов/позитронов составляла 1.6 ГэВ; система регистрации позволяла произвести измерения одновременно при переданных импульсах 0.4 и 1.6 (ГэВ/с)<sup>2</sup>. Для минимизации систематических ошибок при проведении эксперимента набор статистики ведётся попеременно на электронном и позитронном пучке. При таком подходе, основным источником систематической погрешности в измерении отношения сечений рассеяния является неидентичность режимов магнитной системы накопителя при работе с частицами разного знака заряда – так как требуется переполюсовка всех магнитных элементов. Так, например, разница энергий

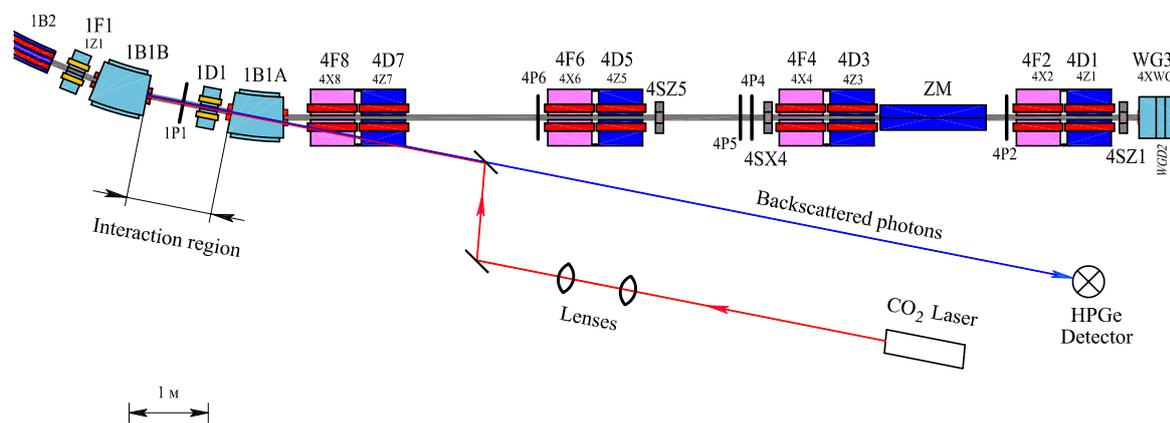


Рис. 8. Общий вид системы измерения энергии пучка на накопителе ВЭПП-3.

электронов и позитронов в 1 МэВ приводит к систематической ошибке  $\sim 1\%$  в измерениях отношения сечений, что уже превышает статистическую ошибку проведённого эксперимента. Для контроля за равенством энергий электронов и позитронов в течение проведения эксперимента была создана система измерения энергии пучков, основанная на обратном комптоновском рассеянии

лазерного излучения. Схема установки показана на Рис. 8. Для ввода инфракрасного лазерного излучения в вакуумную камеру накопителя ВЭПП-3, было изготовлено входное окно из ZnSe, через которое лазерное излучение попадает на  $45^\circ$  зеркало, отражающее излучение навстречу электронному пучку.  $CO_2$  лазер и коаксиальный HPGe детектор на время эксперименты были перенесены с установки РОКК-1М на ВЭПП-4М в тоннель накопителя ВЭПП-3. Стоит отметить, что процедура переноса всей аппаратуры для системы измерения энергии пучка занимает один рабочий день. После этого требуется одна смена (12 часов) для настройки оборудования и получения пучка рассеянных фотонов, и – система готова к работе. Результаты работы системы в течение эксперимента представлены в диссертации. В начале эксперимента энергия пучков вела себя нестабильно от захода к заходу, причём разница энергий электронов и позитронов доходила до 2-х МэВ ( $\Delta E/E \sim 1.25 \cdot 10^{-3}$ ). Путём анализа возможных причин такого поведения, было установлено, что причиной является работа системы автоматической коррекции орбиты пучка. Алгоритм работы этой системы был изменён, что дало возможность «держаться» энергии одинаковыми на необходимом уровне точности. Обработка результатов проведённого эксперимента на настоящий момент ещё не закончена.

Второй параграф пятой главы посвящён системе измерения энергии пучков для экспериментов с детектором BESS-III на коллайдере ВЕРС-II. В 2008 году был разработан проект такой системы [25–27], совместно с коллегами из ИНЕР (Пекин, КНР) и University of Hawaii (Гонолулу, США). Систему решено было разместить в противоположной, по отношению к детектору BESSIII, точке пересечения электронного и позитронного колец коллайдера. На Рис. 9 показана схема размещения элементов установки. Такой вариант размещения

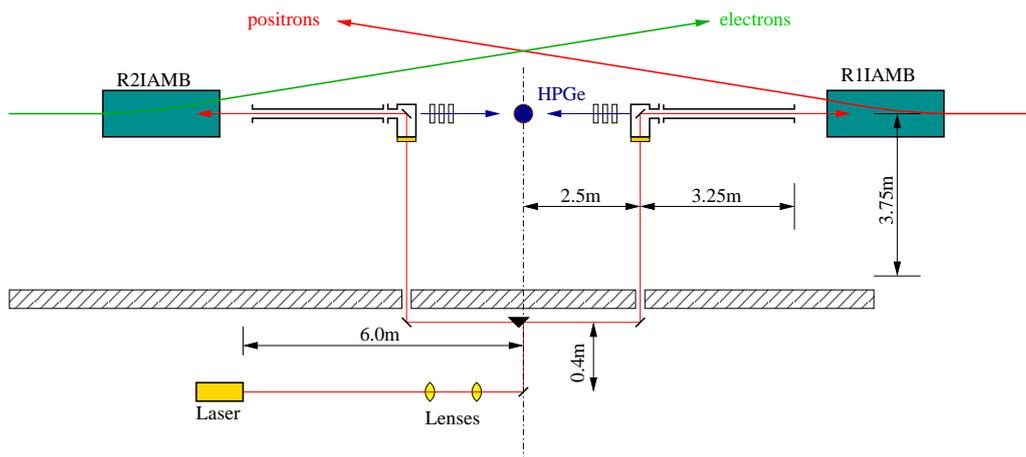


Рис. 9. Схема установки по измерению энергии электронного и позитронного пучков на коллайдере ВЕРС-II.

системы позволяет использовать один лазер и один HPGe детектор для поочередного измерения энергий электронного и позитронного пучков. Излучение

вводится через окно из GaAs, изготовленное в ИЯФ по новой уникальной технологии [33], предполагающей возможность прогрева этого узла в сборе до 250°C. В эксперименте используется CO<sub>2</sub> лазер COHERENT GEM Select 50, такой же, как использовался на ВЭПП-4М, но работающий на линии 10P42 ( $\lambda=10.835231$  мкм). Физический запуск системы состоялся в декабре 2010 года. Проведение эксперимента по измерению массы  $\tau$ -лептона запланировано на 2011 год, ожидаемая точность измерения составит 50 кэВ.

В третьем параграфе пятой главы представлен проект системы измерения энергии электронного пучка для коллайдера ВЭПП-2000. Измерение энергии пучков ВЭПП-2000 с высокой точностью необходимо для решения следующих задач:

- Измерения масс  $\omega(782)$  и  $\phi(1020)$ ,  $K^\pm$ ,  $K_{S,L}$ ,  $K^*$ ,  $\eta$ ;
- Определения с высокой точностью фаз  $\rho-\omega$ ,  $\rho-\phi$  и  $\omega-\phi$  интерференции в различных конечных состояниях;
- Измерение лептонной ширины  $\eta'$ ;
- Измерение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ .

Отличительной особенностью проектируемой системы является расположение области взаимодействия лазерного пучка с электронным на криволинейном участке орбиты, внутри поворотного магнита. В связи с этим, понадобилось провести дополнительные расчёты, показавшие, что в такой конфигурации систематический сдвиг измеренной энергии пучка находится на уровне  $2 \cdot 10^{-5}$  в относительных единицах.

**Шестая глава** посвящена использованию образующихся при комптоновском рассеянии гамма квантов и электронов для проведения калибровок энергетической шкалы различных детекторов.

Основным направлением исследований в экспериментах на встречных  $e^+e^-$  пучках традиционно считается процесс аннигиляции электрон-позитронной пары с рождением нового состояния лептонов или адронов. В то же время, наряду с аннигиляционными процессами, существуют процессы двухфотонного рождения частиц. Сечения двухфотонных процессов имеют более высокий порядок по константе электромагнитного взаимодействия  $\alpha$ , но с ростом энергии  $e^+e^-$  соударения сечения аннигиляционного рождения падают как  $1/\varepsilon^2$ , а двухфотонного — логарифмически растут. Исследование переходов  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны является важной частью экспериментальной программы детектора КЕДР. Для восстановления кинематических переменных  $\gamma\gamma$ -системы в состав детектора КЕДР входит Система Регистрации Рассеянных Электронов (СРРЭ) [31]. Система (Рис. 10) расположена симметрично

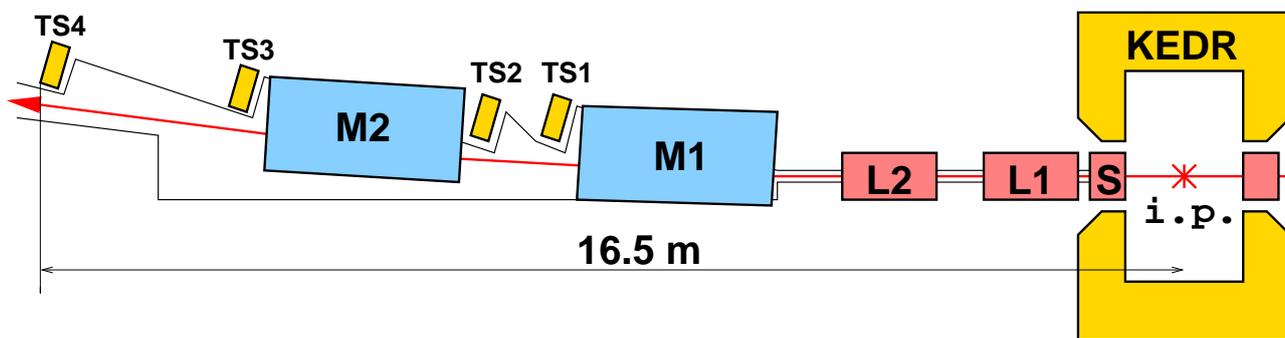


Рис. 10. СРРЭ детектора КЕДР. Детекторы РЭ TS1–TS4, для позитронов они расположены симметрично с другой стороны КЕДРа.

относительно места электрон-позитронной встречи и регистрирует как рассеянные электроны, так и позитроны: такая постановка позволяет полностью определить  $\gamma - \gamma$  кинематику. Поскольку СРРЭ обеспечивает высокую точность измерения потерь энергии рассеянных электронов (на уровне 0.5%), становится актуальным вопрос об измерении ее энергетического разрешения и абсолютной калибровки энергетической шкалы. Для решения этой задачи идеальной была бы возможность получать рассеянные электроны с известной потерей энергией во всем диапазоне регистрации (0.02 – 0.61)  $\cdot \varepsilon$ .

Реально осуществимым вариантом, предоставляющим такие возможности, является использование процесса ОКР монохроматических лазерных фотонов, при котором электроны теряют часть своего импульса, передавая его электромагнитной волне. Энергетический спектр рассеянных комптоновских электронов имеет резкий край, зависящий от параметров светового пучка и пучка заряженных частиц. Метод, основанный на процессе ОКР, позволяет произвести калибровку СРРЭ с абсолютной точностью не хуже 0.2% в достаточно широком диапазоне потерь импульсов частиц за счет использования нескольких гармоник лазерного излучения и возможности изменения энергии электронного пучка. На Рис.11 представлен измеренный СРРЭ спектр потерь энергии рассеянных электронов в результате ОКР лазерного света с  $\omega_0=2.33$  эВ на электронном пучке с  $\varepsilon=2.1$  ГэВ. С 1993 года на установке РОКК-1М проводятся эксперименты по измерению энергетического разрешения и эффективности регистрации одно-

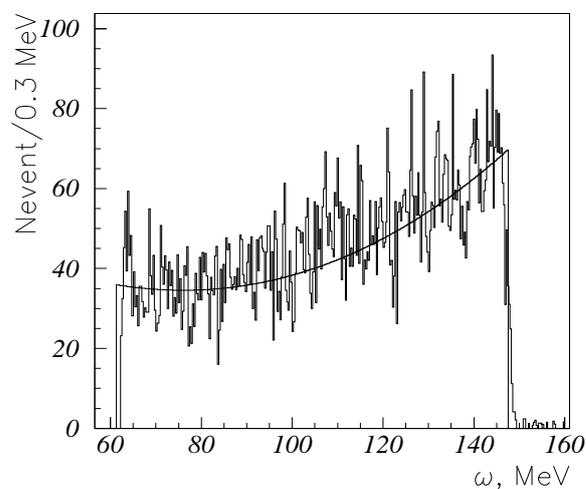


Рис. 11. Энергетический спектр рассеянных электронов, измеренный СРРЭ.

С 1993 года на установке РОКК-1М проводятся эксперименты по измерению энергетического разрешения и эффективности регистрации одно-

го модуля СРРЭ – TS4 (см. Рис. 10). Методика проведения измерений энергетического разрешения СРРЭ состоит в определении степени размытия края комптоновского спектра рассеянных электронов. Для получения экспериментальных точек во всем энергетическом диапазоне TS4 использовались 1-я и 2-я гармоники лазерного излучения, а также менялась энергия электронного пучка  $\varepsilon$  в коллайдере ВЭПП-4М.

Пучок выведенных комптоновских гамма квантов от рассеяния лазерного излучения позволяет проводить абсолютную калибровку энергетической шкалы калориметров полного поглощения. Максимальная энергия рассеянных гамма квантов определяется формулой (1) на стр. 8, и, если энергия электронов пучка известна, является хорошим энергетическим репером.

В составе детектора КЕДР с 2002 года работает электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона, принцип действия которого основан на сборе заряда, выделяющегося в криптоне за счёт ионизации, вызываемой пролетающими частицами. Энергетическое разрешение жидкокриптонового калориметра сравнимо с разрешением кристаллических сцинтилляционных калориметров, в то время как его пространственное разрешение может быть существенно лучше за счет возможности определения точки конверсии фотона. Кроме того, измерение  $dE/dx$  и продольного профиля электромагнитного ливня в ионизационном калориметре на сжиженном газе дает информацию для идентификации частиц и позволяет разделять электроны и  $\pi$ -мезоны. Для исследования свойств калориметра полного поглощения, заполненного жидким криптоном, разработчиками калориметра был собран «прототип-400», наполняемый 400 кг жидкого криптона. В 1994-1995 гг. на установке РОКК-1М был проведён эксперимент по измерению энергетического и координатного разрешения прототипа. Детальное описание прототипа калориметра и результаты эксперимента можно найти в [3, 5, 7].

В 1995-1997 гг. на установке РОКК-1М были проведены три серии эксперимента по изучению энергетического и пространственного разрешения прототипа электромагнитного калориметра детектора BELLE, созданного для экспериментов по изучению несохранения  $CP$ -четности в распадах  $B$ -мезонов на  $B$ -фабрике в КЕК, Япония. Прототип состоял из 36 сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) в форме усеченных пирамид длиной 30 см (16 радиационных длин) с поперечными размерами счетчиков центральной части цилиндрического калориметра BELLE, свет с кристаллов регистрировался полупроводниковыми фотодиодами. Результаты измерений опубликованы в [2, 6].

**В седьмой главе** обсуждается новый метод измерения энергии пучка, основанный на применении магнитного спектрометра, калибровка которого осуществляется по краю спектра рассеянных на монохроматическом лазерном излучении электронов. Рассмотренный выше (в Главах 4, 5) метод измерения энергии электронного пучка, основанный на регистрации энергетиче-

ческого спектра рассеянных комптоновских гамма квантов, прекрасно зарекомендовал себя как рабочий инструмент при проведении экспериментов на циклических ускорителях с энергией пучка до 2 ГэВ. Ещё раз напомним, что высокой точности измерения энергии пучка удаётся достичь за счёт применения HPGe детектора с высоким энергетическим разрешением, энергетическая шкала которого может быть прокалибрована с помощью гамма излучения радиоактивных изотопов. С практической точки зрения, проведение такой калибровки представляется возможным при энергиях комптоновских гамма квантов не выше  $\simeq 10$  МэВ.

Будущее экспериментальной физики частиц на коллайдерах, по всей видимости, связано с проектами линейных коллайдеров (проекты ILC, CLIC, NLC). Поскольку задача измерения энергий сталкивающихся пучков не перестаёт быть актуальной, необходим поиск новых методов и подходов для её решения. В 2005–2007 автор, совместно с коллегами из DESY, принимал участие в разработке метода измерения энергии электронного пучка для проекта ILC. Задача состоит в измерении энергии в с.ц.м. сталкивающихся пучков с относительно точностью  $10^{-4}$  или лучше, причём в случае линейного коллайдера надо определять среднюю энергию отдельно для каждого банча, т.к. у каждого банча она своя. Точное измерение энергии столкновения позволит измерять массы рождающихся частиц, а так же будет являться важным инструментом настройки светимости. В настоящее время в проект ILC включена система измерения энергии пучков, основанная на измерении угла поворота орбиты в магнитном спектрометре с помощью датчиков положения пучка. В таком подходе, всегда будет остро стоять вопрос о точной абсолютной калибровке системы. Поэтому, представляется крайне важным поиск новых комплементарных подходов для точного определения энергии пучков.

В работах [29, 30] был представлен проект системы измерения энергии пучка для ILC, основанный на применении магнитного спектрометра, калибровка которого осуществляется по краю спектра рассеянных на монохроматическом лазерном излучении электронов. Основное преимущество такого подхода заключается в том, что измеряемыми величинами являются координаты частиц, следовательно, калибровка системы вообще не зависит от энергии частиц, а необходимая абсолютная точность измерения отношения двух отрезков вполне может быть достигнута. Следует также отметить, что предлагаемый метод измерения энергии пучка может быть легко адаптирован к любому энергетическому диапазону измерений. В шестой главе диссертации рассмотрена возможность проведения тестового эксперимента по измерению энергии пучка на ВЭПП-4М с помощью магнитного спектрометра.

В **Заключении** перечислены основные результаты работы:

1. На установке РОКК-1М развита техника проведения прецизионных экспериментов с использованием обратного комптоновского рассеяния монохроматического лазерного излучения на релятивистском электронном пучке коллайдера ВЭПП-4М.
2. Исследовано влияние различных факторов, определяющих форму края комптоновского спектра в условиях реального эксперимента. К таким факторам относятся: степень монохроматичности лазерного излучения, угловые и пространственные распределения фотонов и электронов в области рассеяния электронного пучка на лазерной мишени.
3. Разработана оригинальная методика точных измерений абсолютных энергий гамма квантов с помощью HPGe детектора в диапазоне энергий 1–10 МэВ. Выбрана и проверена в экспериментах эмпирическая модель описания формы пика полного поглощения для HPGe детектора, разработан алгоритм проведения абсолютной калибровки энергетической шкалы HPGe детектора с использованием гамма линий радиоактивных источников.
4. На базе установки РОКК-1М создана система прецизионной калибровки энергии электронного пучка ВЭПП-4М, основанная на измерении максимальной энергии гамма квантов от обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения (метод ОКР).
5. Обеспечена возможность измерения энергии пучка в течение длительных экспериментов. При измерении средней энергии электронов в пучке достигнута точность на уровне  $\Delta E_{beam}/E_{beam} \sim 1.3 - 1.7 \cdot 10^{-5}$ , являющаяся рекордной для этого метода. Эксплуатация системы измерения энергии пучка методом ОКР и анализ данных проводился в течение всех экспериментов на детекторе КЕДР с 2005 по 2010 годы.
6. На основе опыта применения метода ОКР для измерения энергии пучка на ВЭПП-4М, аналогичная система была запущена на накопительном кольце ВЭПП-3. Система использовалась в эксперименте по измерению зарядовой асимметрии в упругом рассеянии электронов и позитронов на протоне.
7. В декабре 2010 года была введена в эксплуатацию система измерения абсолютной энергии электронного и позитронного пучков на электрон-позитронном коллайдере ВЕРС-II в Институте физики высоких энергий академии наук Китайской Народной Республики. Основная цель

создания этой системы – планируемый эксперимент по измерению массы тау-лептона с точностью  $\simeq 50$  кэВ.

8. Разработан проект системы измерения энергии пучков для коллайдера ВЭПП-2000, которую планируется ввести в эксплуатацию в конце 2011 года.
9. Проведена калибровка энергетической шкалы системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) детектора КЕДР по краю комптоновского спектра рассеянных электронов. С 2010 года обеспечена возможность параллельной эксплуатации системы измерения энергии пучка в ВЭПП-4М и системы калибровки СРРЭ. Проведены эксперименты по измерению энергетического и пространственного разрешения прототипа жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР и прототипа кристаллического калориметра детектора BELLE на выведенном пучке меченых комптоновских гамма квантов.
10. Автором диссертации, совместно с коллегами из DESY, предложен новый метод абсолютного измерения энергии пучка для проекта международного линейного коллайдера (ILC). Метод основан на использовании рассеянных комптоновских электронов для калибровки магнитного спектрометра, отклоняющего основной электронный пучок. Одним из безусловных достоинств такого подхода является отсутствие ограничений на диапазон измеряемых энергий пучка.
11. В диссертации рассмотрена возможность применения этого метода на ВЭПП-4М, которая позволила бы, во-первых, решить проблему измерения энергии пучка выше 2 ГэВ, а во-вторых, явилась бы экспериментальной демонстрацией возможностей метода для других проектов и установок.

## **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- [1] A Compton source of high energy polarized tagged [gamma]-ray beams. The ROKK-1M facility / N.Yu. Muchnoi, G. Ya. Kezerashvili, A. M. Milov, A. P. Usov // *Nucl. Instr. and Meth. B.* — 1998. — Vol. 145, no. 1-2. — Pp. 40–48.
- [2] Study of characteristics of the BELLE CsI calorimeter prototype with a BINP tagged photon beam / N.Yu. Muchnoi, H. S. Ahn, V. M. Aulchenko et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 1998. — Vol. 410, no. 2. — Pp. 179–194.

- [3] Liquid krypton calorimeter for KEDR detector and last prototype results / N.Yu. Muchnoi, V. M. Aulchenko, A. K. Barladyan et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 1996. — Vol. 379, no. 3. — Pp. 475–477.
- [4] Study of the BELLE CsI calorimeter prototype with the BINP tagged photon beam / N.Yu. Muchnoi, V. M. Aulchenko, A. E. Bondar et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 1996. — Vol. 379, no. 3. — Pp. 491–494.
- [5] The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam / N.Yu. Muchnoi, V. M. Aulchenko, A. E. Bondar et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 1997. — Vol. 394, no. 1-2. — Pp. 35–45.
- [6] A detailed test of the CsI(Tl) calorimeter for BELLE with photon beams of energy between 20 MeV and 5.4 GeV / N.Yu. Muchnoi, H. Ikeda, A. Satpathy et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 2000. — Vol. 441, no. 3. — Pp. 401–426.
- [7] *Muchnoi, N. Yu.* The KEDR liquid krypton calorimeter: Description and recent prototype results / N.Yu Muchnoi, V. M. Aulchenko et al. // 6th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics (ICCHEP 96), Rome, Italy, 8-14 Jun 1996. — 1996. — Pp. 441–448.
- [8] *Muchnoi, N. Yu.* Precise energy measurements in experiments on VEPP-4M collider / N.Yu Muchnoi, A. Bogomyagkov et al. // Particle Accelerator Conference (PAC 05), Knoxville, Tennessee, 16-20 May 2005. — 2005.
- [9] *Muchnoi, N. Yu.* Beam energy calibration in experiment on precise tau lepton mass measurement at VEPP-4M with KEDR detector / N.Yu. Muchnoi, A. Bogomyagkov et al. // European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006. — 2006.
- [10] *Muchnoi, N. Yu.* Study of beam energy spread at the VEPP-4M / N.Yu. Muchnoi, O. I. Meshkov et al. // European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006. — 2006.
- [11] *Muchnoi, N. Yu.* Fast and precise beam energy monitor based on the Compton backscattering at the VEPP-4M collider / N.Yu. Muchnoi, S. A. Nikitin, V. N. Zhilich // European Particle Accelerator Conference (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006. — 2006.
- [12] *Muchnoi, N. Yu.* Beam energy spread measurement at the VEPP-4M electron- positron collider / N.Yu Muchnoi, V. A. Kiselev et al. // *JINST.* — 2007. — Vol. 2. — Pp. –06001.

- [13] Development of the Methods of Beam Energy Spread Determination in the VEPP-4M Collider / N.Yu Muchnoi, V.A. Kiselev, O. I. Meshkov et al. // EPAC'08, 11th European Particle Accelerator Conference, 23- 27 June 2008, Genoa, Italy. — 2008.
- [14] Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M / N. Yu. Muchnoi, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A.* — 2009. — Vol. 598, no. 1. — Pp. 23–30.
- [15] *Muchnoi, N. Yu.* Measurement of the tau lepton mass at the KEDR detector / N.Yu Muchnoi, V. V. Anashin et al. // *JETP Lett.* — 2007. — Vol. 85. — Pp. 347–352.
- [16] Results on  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$  from KEDR / N. Yu. Muchnoi, E. M. Baldin, V. V. Anashin et al. // *Nuclear Physics B.* — 2008. — Vol. 181-182. — Pp. 353–357.
- [17] Tau mass measurement at KEDR / N.Yu. Muchnoi, A. G. Shamov, V. V. Anashin et al. // *Nuclear Physics B.* — 2009. — Vol. 189. — Pp. 21–23.
- [18] Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М / Н.Ю. Мучной, О.В. Анчугов, В.Е. Блинов et al. // *ЖЭТФ.* — 2009. — Vol. 136, no. 4. — Pp. 690–702.
- [19] Изучение Процесса  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  на Детекторе КЕДР / Н.Ю. Мучной, В.В. Анашин, В.М. Аульченко et al. // *Ядерная физика.* — 2009. — Vol. 72, no. 3. — Pp. 531–536.
- [20] Experiments on the physics of charged particle beams at the VEPP-4M electron-positron collider / N.Yu. Muchnoi, O.V. Anchugov, V.E. Blinov et al. // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2009. — Vol. 109. — Pp. 590–601.
- [21] Recent results from the KEDR detector / N.Yu. Muchnoi, V. V. Anashin, V. M. Aulchenko et al. // *Chinese Physics C.* — 2010. — Vol. 34, no. 6. — P. 650.
- [22] Measurement of  $J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma$  at KEDR / N. Yu. Muchnoi, V. V. Anashin, V. M. Aulchenko et al. // *Chinese Physics C.* — 2010. — Vol. 34, no. 6. — P. 831.
- [23] Measurement of  $J/\psi$  leptonic width with the KEDR detector / N. Yu. Muchnoi, A. G. Shamov, V.V. Anashin, KEDR collaboration // *Chinese Physics C.* — 2010. — Vol. 34, no. 6. — P. 836.

- [24] Experiments with internal targets at the VEPP-3 electron storage ring / N. Muchnoi, D. Nikolenko, H. Arenhövel et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2010. — Vol. 73, no. 8. — Pp. 1322–1338.
- [25] Energy determination at BEPC-II / N.Yu. Muchnoi, M. N. Achasov, V. E. Blinov et al. // *Nuclear Physics B*. — 2009. — Vol. 189. — Pp. 366–370.
- [26] Beam energy measurement system at BEPC II / N.Yu. Muchnoi, M. O. XiaoHu, E. V. Abakumova et al. // *Chinese Physics C*. — 2010. — Vol. 34, no. 6. — P. 912.
- [27] Проект системы калибровки энергии ВЭПП-2000 на основе метода обратного комптоновского рассеяния / Н.Ю. Мучной, М.Н. Ачасов, Д.Е. Беркаев, Е.Э. Пята. — Препринт, ИЯФ СО РАН 2009-10, 2009.
- [28] *Muchnoi, N.Yu.* ILC Beam Energy Measurement Using Compton Backscattering / N.Yu. Muchnoi // 2007 International Linear Collider Workshop (LCWS07 and ILC07), Hamburg, Germany, 30 May - 3 Jun 2007. — 2007.
- [29] *Muchnoi, N.* ILC Beam Energy Measurement by means of Laser Compton Backscattering / N. Muchnoi, H. J. Schreiber, M. Viti. — DESY Preprint 08-064, PLATANENALLEE 6 - 15738 Zeuthen, 2008.
- [30] *Muchnoi, N.* ILC beam energy measurement by means of laser Compton backscattering / N. Muchnoi, H. J. Schreiber, M. Viti // *Nucl. Instr. and Meth. A*. — 2009. — Vol. 607, no. 2. — Pp. 340–366.
- [31] Detector KEDR tagging system for two-photon physics / N.Yu. Muchnoi, V. M. Aulchenko, B. O. Baibusinov et al. // *Nucl. Instr. and Meth. A*. — 1995. — Vol. 355, no. 2-3. — Pp. 261–267.
- [32] Measurement of D0 and D+ meson masses with the KEDR detector / N.Yu. Muchnoi, V. V. Anashin, V. M. Aulchenko et al. // *Physics Letters B*. — 2010. — Vol. 686, no. 2-3. — Pp. 84–90.
- [33] Высоковакуумное оптическое окно инфракрасного диапазона / Е.В. Абакумова, М.Н. Ачасов, Н.Ю. Мучной et al. // *Вакуумная техника и технология*. — 2010. — Vol. 20, no. 2. — Pp. 77–78.
- [34] Beam energy and energy spread measurement by Compton backscattering of laser radiation at the VEPP-4M collider / N.Yu. Muchnoi, V. E. Blinov, V.V. Kaminsky et al. // *ICFA Beam Dyn. Newslett.* — 2009. — Vol. 48. — Pp. 195–207.

- [35] Tau mass measurement at KEDR / N.Yu. Muchnoi, A. G. Shamov, V. V. Anashin et al. // *Nuclear Physics B.* — 2008. — Vol. 181-182. — Pp. 311–313.
- [36] New precise determination of the [tau] lepton mass at KEDR detector / N.Yu. Muchnoi, V. V. Anashin, V. M. Aulchenko et al. // *Nuclear Physics B.* — 2007. — Vol. 169. — Pp. 125–131.
- [37] *Muchnoi, N.Yu.* ROKK-1M is the Compton source of the high intensity polarized and tagged gamma beam at the VEPP-4M collider / N.Yu Muchnoi, G. Ya. Kezerashvili, A.M. Milov // 11th International Symposium on High-energy Spin Physics and the 8th International Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics (SPIN 94), Bloomington, Indiana, 15-22 Sep 1994. — 1994.
- [38] *Muchnoi, N.* Calibration of the VEPP-4M Collider Beam Energy by Infrared Laser / N. Muchnoi, S. Peleganchuk // IEEE Particle Accelerator Conference (PAC2001), Chicago, Illinois, 18-22 Jun 2001. — 2001.