

КАЛИБРОВКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЕТЕКТОРА КЕДР

В. В. Каминский^{1,2,*}, *В. Н. Жилич*^{1,2}, *Н. Ю. Мучной*^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Система регистрации рассеянных электронов (РЭ) детектора КЕДР — симметричный фокусирующий магнитный спектрометр для рассеянных под малыми углами электронов и позитронов, встроенный в промежуток встречи коллайдера ВЭПП-4М. Она предназначена для исследования двухфотонных процессов и измерения энергии РЭ с разрешением $\Delta E/E_0 = 0,03–0,6\%$ (E_0 — энергия пучка). Для точной калибровки ее энергетической шкалы используются мечение электрона/позитрона по энергии фотона от однократного тормозного излучения, измеренной ВГО-калориметром, и край спектра РЭ обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения. В данном отчете отражено устройство и состояние этой системы калибровки.

The tagging system of KEDR detector is a symmetrical focusing magnetic spectrometer for electrons and positrons scattered at small angles (briefly, SE), which is embedded into the lattice of VEPP-4M collider. It is intended for two-photon processes study and measures scattered electron energy with resolution $\Delta E/E_0 = 0.03–0.6\%$ (E_0 is the beam energy). For precise energy scale calibration two methods are used: tagging of bremsstrahlung electron/positron by the photon energy measured by VGO calorimeter, and direct calibration using Compton backscattering spectrum edge. This report covers the design and current status of the calibration system.

PACS: 29.40.Gx; 29.30.Aj; 06.20.fb; 29.27.-a

1. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЕТЕКТОРА КЕДР

Для исследования двухфотонных процессов (ДФП) $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^-e^+X$ детектор КЕДР [1] на коллайдере ВЭПП-4М [2] имеет специальную систему регистрации рассеянных электронов [3]. Она регистрирует рассеянные после взаимодействия на малые углы электроны и позитроны (для

*E-mail: V.V.Kaminskiy@inp.nsk.su

краткости — рассеянные электроны, РЭ), что поднимает эффективность отбора двухфотонных событий в несколько раз, но основное преимущество системы — измерение энергий РЭ. В приближении метода эквивалентных фотонов инвариантная масса рожденной двухфотонной системы определяется следующим образом:

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

где E_0 — энергия начального пучка; E_- , E_+ — энергия рассеянного электрона/позитрона; ω_1 , ω_2 — энергии виртуальных фотонов.

Система регистрации РЭ детектора КЕДР (рис. 1) представляет собой симметричный (для электронов и позитронов) фокусирующий магнитный спектрометр, состоящий из магнитных элементов экспериментального промежутка коллайдера ВЭПП-4М: двух пар квадрупольных линз, двух пар поворотных магнитов, а также двух пар секступолей, трех соленоидов, корректоров орбиты и т. д. Рассеянные после взаимодействия на углы менее 1° электроны/позитроны сначала идут вместе с основным пучком через линзы, а затем отклоняются от него в поворотных магнитах и регистрируются восемью координатными детекторами, каждый из которых состоит из годоскопа на дрейфовых трубочках и двухкоординатного детектора на основе газового электронного умножителя (ГЭУ, GEM) [4]. Дуплет квадрупольных линз фокусирует РЭ на некоторое расстояние, зависящее от энергии. При повороте пучка в дипольных магнитах точки фокуса смещаются от орбиты равновесного пучка. Для оптимизации разрешения координатные детекторы располагаются на линии фокусировки и разделяются на четыре блока. Разрешение системы регистрации по энергии РЭ имеет сложную зависимость от энергии и меняется в пределах от 0,03 до 0,6 %, разрешение по инвариантной массе двухфотонной системы — от 3 до 20 МэВ в диапазоне энергий пучка 1,5–5 ГэВ.

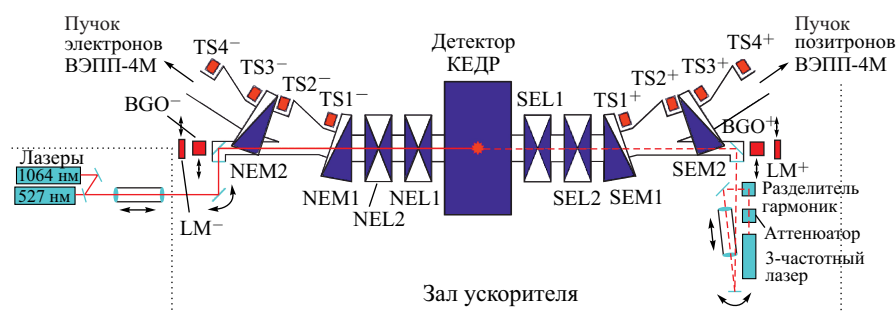


Рис. 1. Схема системы регистрации РЭ детектора КЕДР и системы ее калибровки: NEL, SEL — квадрупольные линзы; NEM, SEM — поворотные магниты; TS — координатные детекторы; BGO — калориметры; LM — мониторы светимости

В общем случае координата X частицы на выходе фокусирующего магнитного спектрометра зависит от ее энергии E следующим образом:

$$X = A \frac{E_0}{E} + B. \quad (2)$$

Средняя энергия пучка E_0 определена на коллайдере ВЭПП-4М с высокой точностью ($< 10^{-4}$) [2]. Коэффициенты A и B зависят от поля поворотных магнитов и расположения координатных детекторов, а также от орбиты пучка в месте встречи и силы других магнитных элементов. Таким образом, при известных коэффициентах A и B энергия РЭ определяется из его координаты. Для надежности и достоверности требуется провести калибровку энергетической шкалы системы регистрации РЭ с использованием физических процессов.

Для однократного тормозного излучения (ОТИ) энергия РЭ связана с энергией фотона ω соотношением $E = E_0 - \omega$, что позволяет реализовать мечение электрона по энергии фотона ОТИ (рис. 2). Для измерения энергий фотонов используются два ВГО-калориметра — со стороны электронов и

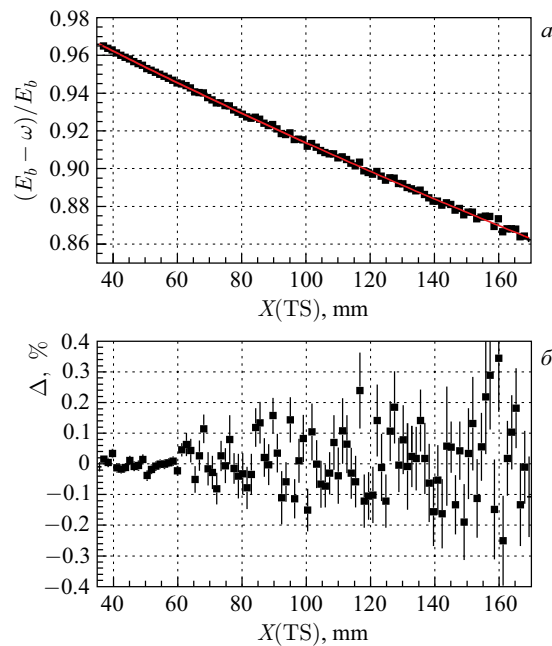


Рис. 2. *a*) Демонстрация калибровки координатных блоков $TS4^-$ с помощью мечения РЭ по энергии фотонов. *б*) Отличие восстановленной энергии РЭ от калибровочной кривой

позитронов. Калибровка калориметров проводится с помощью узких краев спектров рассеянных фотонов от ОТИ и обратного комптоновского рассеяния (см. разд. 2).

2. ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ

Обратное комптоновское рассеяние (ОКР) — лобовое неупругое столкновение монохроматического низкоэнергетического фотона ($\omega_0 = 1,2-2,4$ эВ) с ультрарелятивистским электроном (или позитроном, $E_0 = 1,5-5$ ГэВ). При нулевом угле рассеяния энергия фотона ω максимальна, соответственно, энергия E электрона отдачи минимальна:

$$\omega_{\max} = \frac{E_0 \lambda}{1 + \lambda} \approx 4\gamma^2 \omega_0, \quad E_{\min} = E_0 - \omega_{\max} = \frac{E_0}{1 + \lambda}, \quad \lambda = \frac{4\omega_0 E_0}{m^2}, \quad (3)$$

где m — энергия покоя электрона ($c = 1$). Энергетический спектр рассеянных фотонов представляет собой плато с очень узким краем, спектр электронов зеркально-симметричен.

Таким образом, обеспечивая взаимодействие лазерного пучка с пучком электронов (или позитронов) и измеряя положение края спектра комптоновских электронов в координатных детекторах системы регистрации РЭ, можно сопоставить координате энергию. Для однозначного нахождения двух коэффициентов A и B из формулы (2) необходимо набрать комптоновские спектры с лазерным излучением двух длин волн. С имеющимися лазерами можно провести калибровку координатных блоков $TS4^\pm$ (см. рис. 1), работающих в диапазоне 87–98 % энергии пучка, при энергиях пучка от 1,5 до 4 ГэВ. Именно в $TS4^\pm$ попадает большая часть РЭ от ДФП, так как спектр виртуальных фотонов ДФП обратно пропорционален энергии. Край спектра комптоновских фотонов используется для калибровки ВГО-калориметров в диапазоне энергий фотонов от 40 до 1000 МэВ при тех же энергиях пучка.

3. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

С электронным пучком ВЭПП-4М взаимодействует излучение двух лазеров с длинами волн 1064 нм (Nd:YAG), 527 нм (Nd:YLF с удвоением частоты). На позитронном направлении работает трехчастотный лазер на кристалле Nd:YLF с длинами волн 1053 нм (первая гармоника), 527 нм (вторая гармоника) и 263 нм (четвертая гармоника пока не используется для калибровки). Эти лазеры импульсные, работают при частоте внешнего запуска 1000 Гц, длительность лазерного импульса меньше 10 нс, так что комптоновское взаимодействие происходит в пределах детектора КЕДР на длине менее 2 м. Сиг-

налы запуска лазеров для синхронизации с пучками ускорителя формируются из сигнала фазы ВЧ ВЭПП-4М (819 кГц).

На электронной стороне излучение двух лазеров сводится в один оптический путь с помощью обычного и дихроичного зеркал. Лазерное излучение фокусируется на нужное расстояние (примерно 22 м) с помощью моторизованного экспандера (оптической трубы с двумя линзами). Поперечное положение лазерного пучка относительно электронного регулируется с помощью двухосного зеркала с шаговыми двигателями. Излучение вводится в вакуумную камеру через кварцевое окно, далее отражается от неподвижного зеркала в сторону электронного пучка.

На позитронной стороне излучение трехчастотного лазера разделяется на гармоники в дисперсионной призме. Есть также возможность управления мощностью излучения с помощью поляризационной призмы. Далее излучение фокусируется и проводится в вакуумную камеру аналогично электронной стороне.

Для настройки эффективности взаимодействия реализован монитор скорости счета комптоновских частиц. Создано программное обеспечение, позволяющее как управлять отдельными узлами оптической системы (шаговыми двигателями, линиями задержки, коммутаторами и т. д.), так и автоматизировать эксперимент в целом таким образом, что система калибровки может работать долгое время (несколько недель) без участия оператора.

4. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ

Между калибровками с ВГО-калориметрами энергетическая шкала системы регистрации РЭ рассчитывается по состоянию магнитной системы ВЭПП-4М. Создана модель экспериментального промежутка, в которой учитываются измеренные поля и токи магнитных элементов и показания датчиков положения пучка в конкретном экспериментальном заходе (время набора данных КЕДР 60–120 мин). Моделируются частицы ОКР и ОТИ и их пролет через магнитную систему. На выходе программы — коэффициенты A и B из формулы (2) для каждого захода для всех восьми блоков.

Модель отслеживает относительные изменения энергетической шкалы. Для рассчитанных коэффициентов A_p и B_p делаются поправки: $A \rightarrow A_p \cdot \Delta A$, $B \rightarrow B_p + \Delta B$. ΔA и ΔB находятся в заходах с экспериментальными калибровками: $\Delta A = A_s/A_p$ и $\Delta B = B_s - B_p$. Сравнение рассчитанных и экспериментальных положений комптоновского края за длительное время показывает, что расчет воспроизводит наблюдаемые в эксперименте скачки и дрейф положения с точностью 0,06 % энергии пучка. Планируется довести точность расчета до теоретического предельного уровня 0,01–0,02 %.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Создана система комптоновской калибровки для системы регистрации РЭ детектора КЕДР: лазерно-оптическая система с двумя длинами волн для электронов и позитронов и система управления. Система работает непрерывно в автоматическом режиме. Создана программа для расчета траекторий частиц в системе регистрации РЭ с учетом измеренных параметров ВЭПП-4М, позволяющая вычислять энергетическую шкалу системы регистрации РЭ с удовлетворительной точностью. Работа по улучшению точности и стабильности продолжается.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 15-02-09016 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анашин В. В. и др. (колл. КЕДР). Детектор КЕДР // ЭЧАЯ. 2013. Т. 44, вып. 4. С. 1263–1345; http://www1.jinr.ru/Репан/2013-v44/v-44-4/02_an.pdf.
2. Алешаев А. Н. и др. (колл. ВЭПП-4М). Ускорительный комплекс ВЭПП-4: состояние и перспективы // Докл. АН ВШ РФ. 2013. Т. 1, № 20. С. 35–46.
3. Aulchenko V. M., Bondar A. E., Buzulutskov A. F., Poluektov A. O., Romanov L. V., Shekhtman L. I., Sokolov A. V., Titov V. M., Vasiljev A. A., Zhilich V. N., Zhulanov V. V. Upgrade of the KEDR Tagging System // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494, No. 1–3. P. 241–245; [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01474-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01474-2).
4. Aulchenko V. M., Beloborodova O. L., Bobrov A. V., Bondar A. E., Kudryavtsev V. N., Shamov A. G., Shekhtman L. I., Zhilich V. N., Zhulanov V. V. Operation of the Triple-GEM Detectors in the Tagging System of the KEDR Experiment on the VEPP-4M Collider // JINST. 2011. V. 6. P. P07001; <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/6/07/P07001>.