

УДК 537.5+539.1

## Восстановление направления гамма-квантов в эксперименте e391a с помощью CsI калориметра

С. В. Подольский<sup>\*(1)</sup>, М. Ю. Дорошенко<sup>(2)</sup>, Т. ИНАГАКИ<sup>(2)</sup>,  
А. С. Курилин<sup>(2)</sup>, Н. В. МАКСИМЕНКО<sup>(1)</sup>, А. А. ШУТЕЕВ<sup>(2)</sup>

**Введение.** В физике частиц широко распространено использование калориметров, состоящих из кристаллов CsI, NaI и т.д. Эти кристаллы обеспечивают хорошее энергетическое, а при поперечных размерах меньших радиуса Мольера, координатное разрешение. Достаточно глубоко изучено распространение электромагнитных ливней в этих кристаллах [1], кроме того, существует ряд методов восстановления координат регистрируемых частиц [2]. Однако методы восстановления направления частиц, регистрируемых в таких калориметрах мало исследованы. Это объясняется тем, что для измерения углов с хорошей точностью существуют специально предназначенные для этого устройства, т.н. «reshower» детекторы [3], устанавливаемые перед кристаллами. Кроме того, применяется метод укладки кристаллов прямоугольной формы перпендикулярно направлению распространения ливня, что позволяет измерить положение его центра тяжести в нескольких поперечных сечениях [4].

По ряду причин используемый в эксперименте E391 [5] CsI калориметр [6] не оптимизирован для измерения угла регистрируемых гамма-квантов. Кристаллы имеют крупную сегментацию (7x7 см) и расположены в виде матрицы, параллельно оси пучка (рис 1).

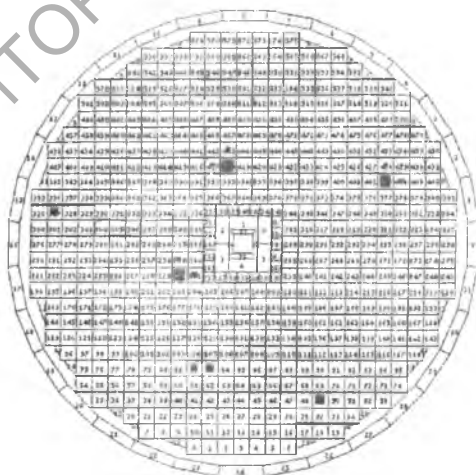


Рисунок 1 – Отображение попадания 6 гамма-квантов в CsI калориметр эксперимента e391a.

Такое расположение кристаллов позволяет получить информацию лишь о поперечном профиле электромагнитного ливня, инициированного регистрируемой частицей.

\* Электронный адрес [spodolsky@mail.ru](mailto:spodolsky@mail.ru)

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины (Республика Беларусь, Гомель).

КЕК (Япония, Цукуба).

В настоящей работе представлены результаты использования нейронной сети для реконструкции направлений гамма-квантов в эксперименте E391.

**Эксперимент E391.** Редкий распад каона,  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , рассматривают как идеальный процесс для понимания природы CP нарушения и критического теста Стандартной Модели. Эксперимент E391a посвящён поиску этого распада. В нем используются две главных концепции – узкий направленный пучок  $K_L^0$  (“pencil” beam) и герметичная для фотонов система вето. Электромагнитный калориметр и вето-система, окружающая распадный объём помещены в область высокого вакуума [5].

Методика регистрации основана на наблюдении распада по сигналам  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 (\pi^0 \rightarrow 2\gamma) + \nu + \bar{\nu}$  (“ничто”) при распаде  $K_L^0$  налету. Энергии и координаты двух фотонов измеряются CsI калориметром, а «ничто» подтверждается отсутствием дополнительного сигнала в вето-детекторах. Все остальные известные распады  $K_L^0$  – мезона в конечном состоянии содержат больше двух регистрируемых частиц (за исключением  $K_L^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ). С вероятностью 98.8%  $\pi^0$ -мезон мгновенно (время жизни  $8.7 \times 10^{-17}$  сек) распадается на два гамма-кванта. В случае регистрации лишь двух гамма-квантов основным CsI калориметром и отсутствии сигнала в вето-системе эффективная масса этих гамма-квантов полагается равной массе  $\pi^0$ - мезона. Исходя из выдвинутой гипотезы, вычисляется точка распада и другие кинематические характеристики события (рис. 2).

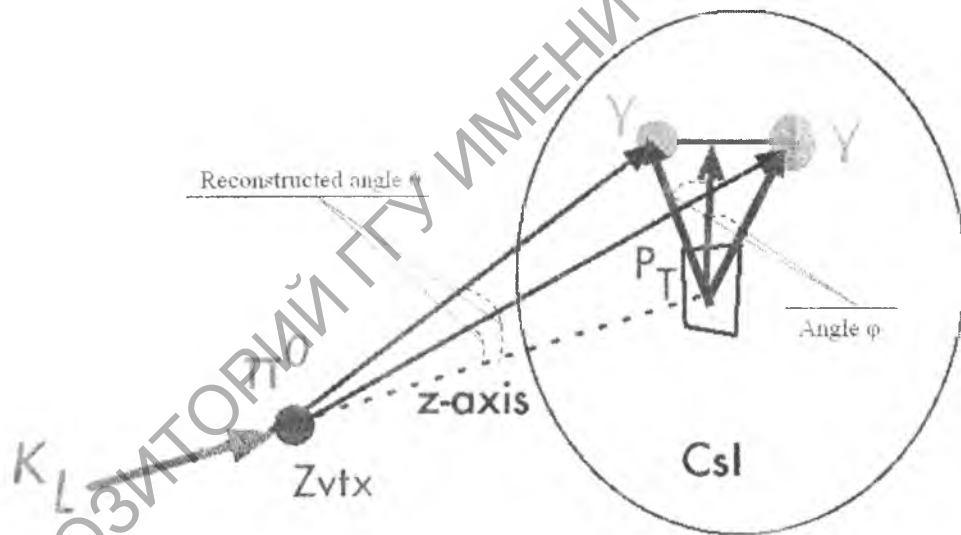


Рисунок 2 – Схема регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  в эксперименте e391a.

Распад  $K_L^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  хорошо отсортировывается путём восстановления поперечного импульса распавшейся частицы. Поскольку по законам сохранения он не может быть большим, чем у исходного пучка  $K_L^0$ -мезонов, то, налагая ограничение на нижнее значение этой величины у реконструированного события, можно полностью избавиться от этого фона.

В то же время, для улучшения эффективности подавления других распадов, таких как  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$  полезным является измерение направления гамма-квантов, регистрируемых калориметром.

При обработке экспериментальных данных, большое внимание уделяется распаду  $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ . Поскольку кинематика этого процесса позволяет с очень хорошей точностью восстановить z-координату вершины распада ( $\pm 3$  см) и массу  $K_L^0$  ( $\pm 4.5$  MeV), он используется для нормировки и различных калибровок.

**Восстановление направления с использованием энергетических характеристик кластера.** При обработке события, из всех кристаллов CsI формируются кластеры. Под кластером понимается набор кристаллов, сгруппированных в виде матрицы [3x3]. Центром этой группы является кристалл с энерговыделением большим любого соседнего.

Применение кластеров определённого размера позволяет зафиксировать число параметров при анализе пространственного распределения электромагнитного ливня. Сравнение результатов восстановления направления при кластеризации в матрицы размером [3x3] и [7x7] показало, что выигрыш в точности для больших кластеров незначителен. Это объясняется небольшим (3.8 см) радиусом Мольера кристаллов CsI, вследствие чего ливень, в основном, распространяется лишь среди нескольких кристаллов. Для уменьшения анализируемого числа параметров, полярный угол  $\varphi$  был исключён из рассмотрения, сведением всех событий в диапазон значений угла  $\varphi$  от 0 до  $\pi/4$  путём отражения/поворота кластеров (рис. 2).

Были опробованы четыре метода восстановления направления: метод случайного поиска [7], метод уменьшения градиента [8], с использованием нейронной сети на основе многослойного персептрона с обратным распространением ошибки и нейронной сети на основе радиальной базисной функции [9]. Применение последнего метода позволило получить лучшие характеристики восстановления.

В этом методе нейронная сеть (НС) состоит из двух слоёв. Первый слой формируется набором нейронов, число которых соответствует количеству обучающих примеров. Эти нейроны вычисляют разность между энергиями (нормированными на полную энергию кластера) в соответствующих кристаллах обучающего и реконструируемого события.

$$D_{i,k} = \left| \frac{E_k}{\sum_{k=1}^9 E_k} - \frac{T_k}{\sum_{k=1}^9 T_{i,k}} \right|,$$

где  $k$ -порядковый номер кристалла в кластере,  $i$  – номер обучающего примера,  $E$  – энергия в кристалле восстанавливаемого кластера,  $T$  – энергия в кристалле обучающего примера

Следующий слой нейронов сети возвращает вес данного события, равный произведению значений функции гаусса от вычисленных предыдущим слоем разностей.

$$W_i = \prod_{k=1}^9 \text{gaus}(D_{i,k}, \sigma_k),$$

где  $\sigma_k$  – равна дисперсии распределения энерговыделения в  $k$  кристалле кластера обучающего примера.

Таким образом, формируется набор весов, соответствующий отклонению реконструируемого события от событий обучающей выборки. После этого выполняется линеаризация весов, путём их умножения на выходные значения обучающей выборки, сложения, и нормировки на сумму весов.

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

где  $\theta_i$  – значение угла в  $i$ -м обучающем примере.

Для обучения нейронной сети была написана программа моделирования с использованием пакета Geant4 [10], имитирующая развитие электромагнитного ливня в матрице CsI кристаллов. Было разыграно  $10^8$  электромагнитных ливней, на основании чего сформирована база данных параметров НС в интервале значений энергий кластеров вплоть до 2 ГэВ, с шагом в 200 МэВ. Направление разыгрывалось от 0 до 40 градусов, обе величины распределены равномерно. Точка попадания изменялась дискретно, с шагом в 1 см.

Для обучения НС были использованы данные моделирования: направление гамма-кванта и 9 значений энерговыделения в кристаллах кластера, нормированных на полную

энергию кластера. Тестирование осуществлялось на моделированных данных. Экспериментальные данные тоже можно использовать для тестирования, поскольку восстановление распада  $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$  позволяет определить угол попадания гамма-кванта в калориметр с хорошей точностью.

Тестирование НС на событиях, полученных Geant4 моделированием развития ливней в кристаллах, демонстрирует хорошую линейность восстановления угла входа гамма-кванта (рис. 3).

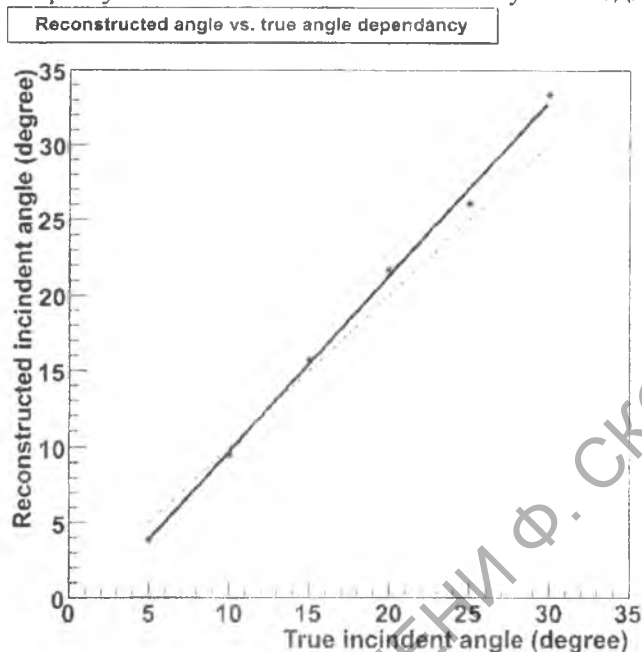


Рисунок 3 – Линейность восстановления направления гамма-квантов. Пунктирная линия соответствует идеальному восстановлению. Представленный результат получен обработкой Монте-Карло событий с энергией гамма-кванта 500 МэВ, равномерно распределённым полярным углом и точками входа фотонов.

Были получены зависимости точности восстановления направления от энергии гамма-кванта (рис. 4) и от величины восстанавливаемого угла (рис. 5).

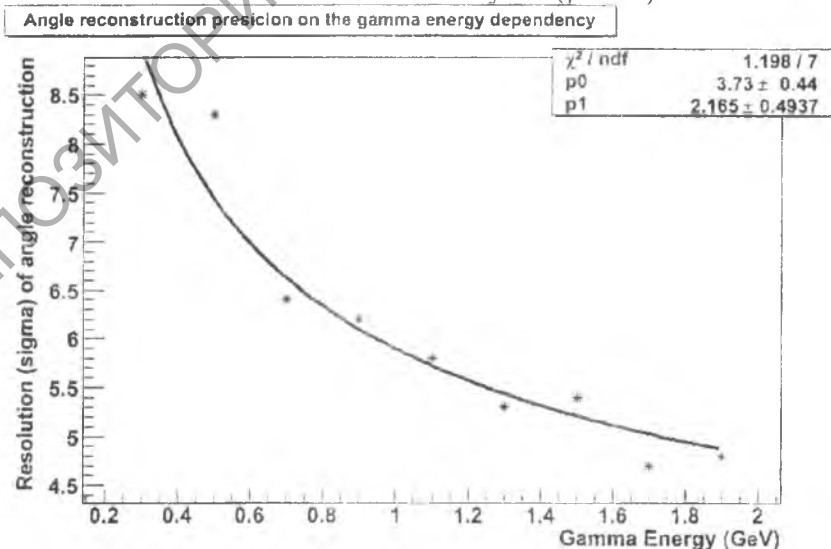


Рисунок 4 – Зависимость углового разрешения от энергии налетающих гамма-квантов. Представленный результат получен обработкой Монте-Карло событий с углом входа  $15^\circ$ , равномерно распределёнными полярным углом и точками входа фотонов. График был фитирован функцией  $p^0 E(\text{GeV}) + p1$ . В результате угловое разрешение может быть описано выражением  $3.73^\circ / \sqrt{E(\text{GeV})} + 2.17^\circ$ .

$$3.73^\circ / \sqrt{E(\text{GeV})} + 2.17^\circ$$

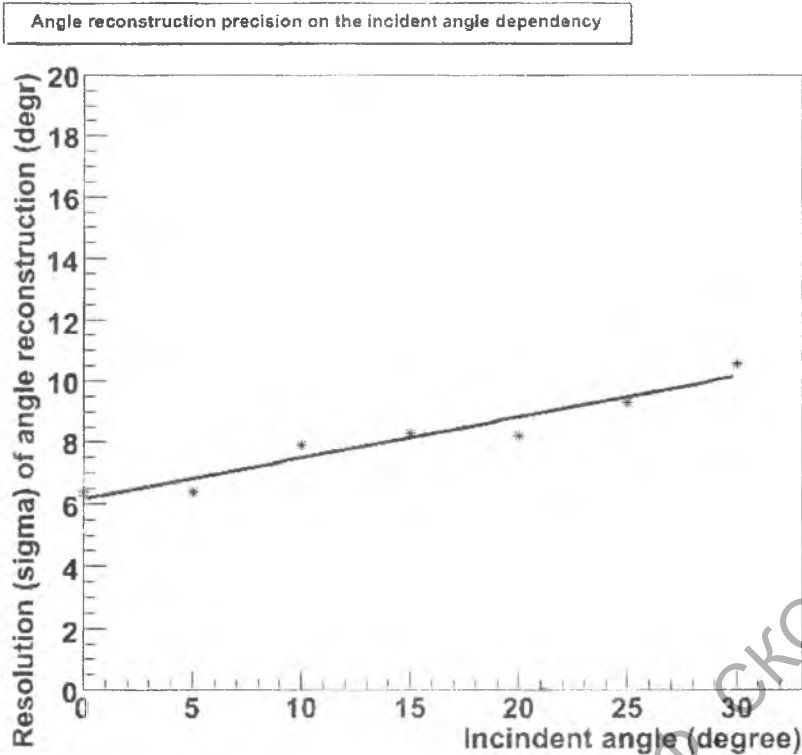


Рисунок 5 – Зависимость точности восстановления угла входа фотонов, от его значения. Представленный результат получен обработкой Монте-Карло событий с энергией 500 МэВ, равномерно распределённым полярным углом и точками входа фотонов.

Тестирование на реальных данных осуществлялось путём отбора из экспериментальной статистики событий  $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$  с хорошо восстановленной массой K0L мезона ( $\pm 4.5$  MeV), с последующим вычислением направления входа гамма-квантов, используя координату вершины. Затем отобранные тестовые кластеры обрабатывались нейронной сетью и сравнивались результаты восстановления со значениями, полученными из реконструкции кинематики распада. График распределения абсолютной ошибки, приведённый на рис. 6, также демонстрирует хорошую систематику восстановления угла.

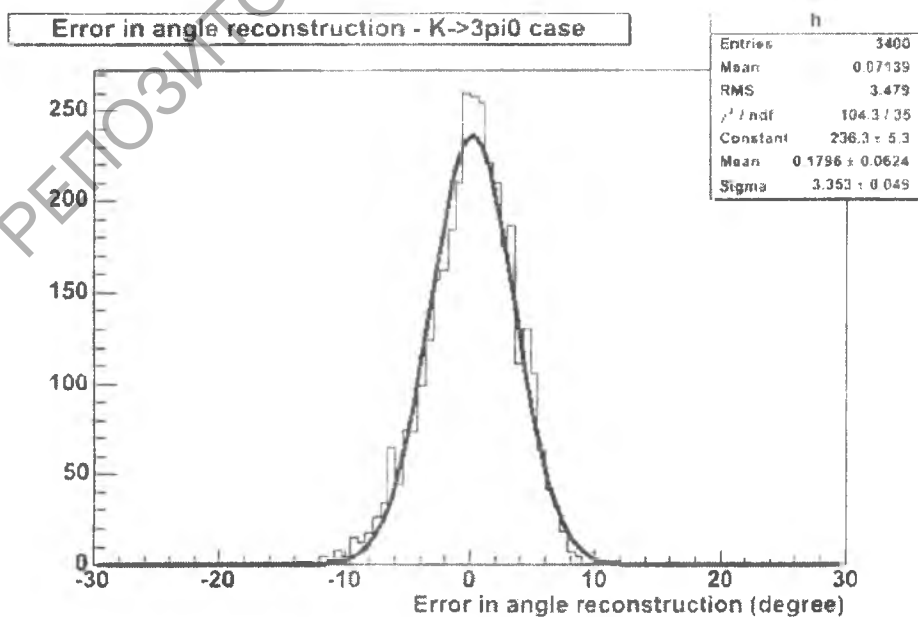


Рисунок 6 – Распределение ошибок при восстановлении направления фотонов событий  $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$  с использованием нейронной сети на основе радиальной базисной функции.

**Заключение.** В данной работе представлены результаты восстановления направления гамма-квантов, регистрируемых калориметрами, состоящими из кристаллов (CsI) с крупной сегментацией, ориентированных по направлению регистрируемых частиц. Показано, что при использовании нейронных сетей вида обобщённой регрессионной радиальной базисной функции удаётся достичь углового разрешения  $\sigma = 3.73^\circ / \sqrt{E(\text{GeV})} + 2.17^\circ$  при угле  $15^\circ$ , для

CsI калориметра эксперимента E391, что сопоставимо с результатами, получаемыми со стриповых детекторов [4]. При восстановлении отсутствуют большие систематические сдвиги и нелинейности. Среди апробованных методов описанный в статье метод обеспечил лучший результат. Предложенный способ восстановления может быть применён к другим калориметрам, состоящим из кристаллов, ориентированных по направлению регистрируемых частиц.

**Abstract.** A method for the direction reconstruction of gamma's registered by the electromagnetic calorimeter has been proposed.

### Литература

1. Claude Leroy and Pier-Giorgio Rancoita, Physics of cascading shower generation and propagation in matter: principles of high-energy, ultrahigh-energy and compensating calorimetry. Rep. Prog. Phys., 63 (2000), 505–606.
2. Ren-yuan Zhu, G. Gratta and H. Newman, Crystal Calorimeters for Particle Physics, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 44 (1995), 88–108.
3. P. Aspell, S. Bates, Ph. Bloch et al. (RD 36 Collaboration), Energy and spatial resolution of a shashlik calorimeter and a silicon preshower detector, Nucl. Instrum. Meth. A376: 17-28, 1996.
4. A. Nagano, Study of strip electro-magnetic calorimeter, ILC Detector Workshop March. 3–5, 2005, KEK.
5. T. Inagaki, et al., Measurement of the  $K \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ , Proposal of an experiment at the KEK 12-GeV proton synchrotron, KEK Internal 96–13, Nov. 1996, H.
6. M. Doroshenko, et al., Undoped-CsI Calorimeter for the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$  Experiment at KEK-PS. Nucl. Inst. Meth., A 545, (2005), 278.
7. A. Smith, A. Doucet, Nando de Freitas, N. Gordon, Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York: Springer-Verlag, 2001.
8. Н. Н. Калиткин, Численные методы, Москва, Наука, 1978.
9. В. Медведев, В. Потемкин, Нейронные сети, Matlab 6, Москва, Диалог МИФИ, 2001.
10. J. Allison и др., Geant4 – A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003), 250–303.

Гомельский государственный  
университет имени Ф. Скорины

Поступило 10.04.06

КЕК (Япония, Цукуба)