

НОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ E391

С. В. Подольский^{а,б}, А. С. Курилин^а, Ю. Ю. Степаненко^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна

^бГомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Белоруссия

В настоящей работе представлен новый метод измерения направления γ -квантов, регистрируемых CsI-калориметром эксперимента E391. Метод основывается на использовании GRRBF нейронной сети. Его применение обеспечивает существенное улучшение чувствительности эксперимента E391. Результаты настоящей работы могут быть использованы в других экспериментах с аналогичным детектором γ -квантов.

In the present paper a new method is proposed for γ direction measurement for the CsI calorimeter of the E391 experiment. The method is based on using the GRRBF neural network, which helps to significantly increase the sensitivity of the E391 experiment. Current results could be applied to other experiments, where the same γ detector is used.

PACS: 07.05.Kf

Редкий распад $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ считается идеальным процессом для наблюдения и изучения явления CP-нарушения, а также критического теста стандартной модели [1]. Эксперимент E391 [2] посвящен поиску этого распада.

Методика регистрации в эксперименте 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 на лету. Среднее время жизни продукта распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ — π^0 -мезона — крайне мало ($\sim 10^{-17}$ с) [3]. После образования эта частица практически сразу с вероятностью $\sim 98,8\%$ распадается на два γ -кванта, которые и регистрируются электромагнитным CsI-калориметром установки (рис. 1).

Энергии и координаты двух γ -квантов измеряются, а «ничто» подтверждается отсутствием дополнительного сигнала в детекторах, окружающих рабочую область распада. Событие $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ идентифицируется по наличию вершины в рабочей зоне установки и принадлежности поперечного импульса π^0 -мезона заданному диапазону. Согласно расчетам, выполненным в рамках стандартной модели, величина относительной вероятности $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ составляет $(2,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-11}$. Поэтому наблюдаемое явление происходит на фоне других каналов распада K_L^0 -мезона, которые характеризуются много большими значениями парциальной ширины. Кроме фоновых распадов K_L^0 -мезона, в эксперименте E391 существуют другие существенные источники фонов — продукты реакций взаимодействия частиц гало пучка с материалом детекторов установки.

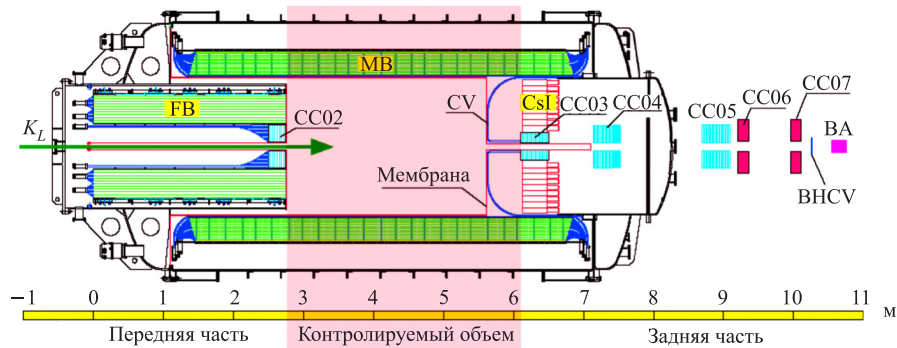


Рис. 1. Схема установки E391a

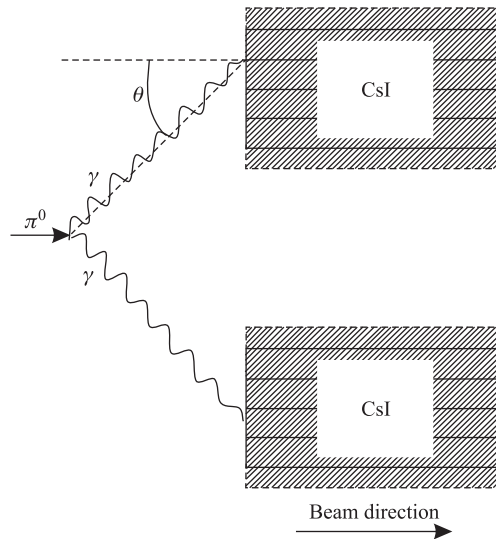


Рис. 2. Обозначение направления регистрируемого γ -кванта

Для подавления большинства фонов предусмотрена герметичная вето-система (рис. 1), которая стягивает вокруг контролируемого объема телесный угол почти 4π ср.

Результаты обработки первого сеанса набора данных [4] продемонстрировали существенные ограничения в применимости указанного выше метода подавления фонов. При взаимодействии частиц пучка с материалом установки и последующем образовании π^0 -мезона появляется дополнительный источник фона, события которого могут быть ложно идентифицированы как сигнальные.

Наличие таких событий явилось главным источником фона в первом сеансе набора данных эксперимента E391 и уменьшило чувствительность последующих сеансов. Для их подавления была предложена методика восстановления направления γ -квантов, регистрируемых CsI-калориметром эксперимента [5] (рис. 2).

Суть предложенной методики восстановления направления регистрируемых γ -квантов заключается в использовании специально обученной нейронной сети вида General

Regression Radial Basis Function Neural Network [6]. Этот тип нейронной сети обладает свойством очень точной аппроксимации многомерных зависимостей, однако требует большого количества обучающих примеров.

При обработке события из всех кристаллов CsI формируются кластеры. Под кластером понимается набор кристаллов, сгруппированных в виде матрицы $[3 \times 3]$. Центром этой группы является кристалл с энерговыделением, большим любого соседнего.

Применение кластеров определенного размера позволяет зафиксировать число параметров при анализе пространственного распределения электромагнитного ливня. Сравнение результатов восстановления направления при кластеризации в матрицы размером $[3 \times 3]$ и $[7 \times 7]$ 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 φ был исключен из рассмотрения сведением всех событий в диапазон значений угла φ от 0 до $\pi/4$ путем отражения/поворота кластеров.

Нейронная сеть (НС) состоит из трех слоев. Первый слой формируется набором нейронов, число которых соответствует количеству обучающих примеров. Эти нейроны суммируют квадрат разности между энергиями (нормированными на полную энергию кластера) в соответствующих кристаллах обучающего и реконструируемого события:

$$D_i = \sum_{k=1}^9 \left(\frac{E_k}{\sum_{j=1}^9 E_j} - \frac{T_{i,k}}{\sum_{j=1}^9 T_{i,j}} \right)^2, \quad (1)$$

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 значению функции Гаусса от вычисленных предыдущим слоем разностей

$$W_i = \text{gaus}(D_i, \sigma_i), \quad (2)$$

где σ — параметр, равный среднему расстоянию (в пространстве энерговыделений кристаллов) от соответствующего обучающего примера до двух ближайших (по углу θ).

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

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (3)$$

где θ_i — значение угла в i -м обучающем примере.

Для обучения нейронной сети использовались результаты специального моделирования развития электромагнитных ливней. Эти тренировочные примеры были подготовлены

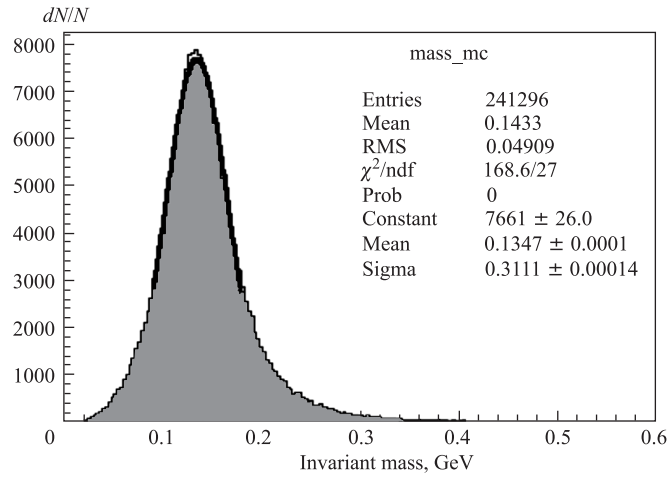


Рис. 3. Распределение значений восстановленной массы π^0 -мезона событий $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ (Монте-Карло, $\sigma = 31,1$ МэВ)

с использованием пакета Geant4 [7]. Тестирование предложенной методики показало отсутствие нелинейностей при восстановлении направления, а также высокую точность восстановления, которая описывается функцией

$$\sigma(E) = \frac{3,8^\circ}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} + 1,6^\circ, \quad (4)$$

где E — энергия регистрируемого γ -кванта.

Реконструкция значения θ позволила предложить новые обрезания, на основании которых сигнальные события отделяются от фоновых:

- разностью между величинами угла θ γ -кванта, вычисленного на основании гипотезы об эффективной массе зарегистрированной частицы, и углом θ , восстановленным через использование данных об энерговыделении в кристаллах CsI;
- эффективной массой зарегистрированных частиц (рис. 3).

В результате применения этой методики удалось увеличить чувствительность эксперимента E391 на 35 % [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buras A.* CP Violation and Rare Decays of K and B Mesons. Mode of Access: <http://arxiv.org/pdf/hep-ph/9905437>. 1999.
2. *Inagaki T. et al.* KEK-E391 Proposal 1996. KEK-Internal 96-13. 1996.
3. *Eidelman S. et al.* The Review of Particle Physics // *Phys. Lett. B.* 2004. V. 592, No. 1–4. P. 1.
4. *Ahn J. K. et al.* New Limit on the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Rate // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 74. P. 051105–051109.
5. *Doroshenko M. et al.* Undoped-CsI Calorimeter for the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at KEK-PS // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. V. 545, No. 1–2. P. 278–295.
6. *Медведев В. С.* Нейронные сети. Matlab 6. М.: Диалог; МИФИ, 2002. 489 с.
7. *Allison J. et al.* Geant4. A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 506. P. 250–303.
8. *Stepanenko Y.* Master Thesis 2009. Gomel State Univ., 2009.