

## РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ПИОНОВ В КАЛОРИМЕТРЕ ДЕТЕКТОРА СНД

*М. Н. Ачасов, А. С. Купич\**

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

Создана методика разделения событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергии от 0,5 до 1,0 ГэВ в системе центра масс по энергосъединению в электромагнитном калориметре детектора СНД с применением методов машинного обучения. Эффективности идентификации событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  составили 99,6 и 99,8% соответственно.

A technique of discrimination of the  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  and  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  events in the energy range  $0.5 < \sqrt{s} < 1$  GeV by energy deposition in the electromagnetic calorimeter of SND detector was developed by applying machine learning techniques. Identification efficiencies for the  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  and  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  events are 99.6 and 99.8%, respectively.

PACS: 07.77.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

Сферический нейтральный детектор (СНД) [1] — универсальный детектор для экспериментов на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-2000 (Новосибирск) [2] в области энергии от 0,2 до 2,0 ГэВ в системе центра масс. Детектор состоит из трековой системы на основе дрейфовой и пропорциональной камер, расположенных в едином газовом объеме, системы идентификации частиц на основе пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков [3], трехслойного сферического электромагнитного калориметра на основе кристаллов NaI(Tl) и мюонной системы, состоящей из пропорциональных трубок и сцинтилляционных счетчиков.

Программа экспериментов включает измерение сечений процессов  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны, которое в значительной степени мотивировано необходимостью проведения высокоточных расчетов адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона  $(g - 2)/2$ . В частности, сечение процесса

---

\*E-mail: kupich@inp.nsk.su

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергии  $\sqrt{s} < 1$  ГэВ дает основной вклад в эту величину и должно быть измерено с точностью выше 1 %.

Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  измеряется следующим образом. Отбираются коллинеарные события, куда входят события процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ . События разделяются по типам на  $e^+e^-$  и  $\pi^+\pi^-$  ( $\mu^+\mu^-$ ), и определяется их количество. Эффективности регистрации событий  $\varepsilon_{ee}$  и  $\varepsilon_{\pi\pi}$  определяются путем моделирования методом Монте-Карло. По событиям  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  измеряется интегральная светимость  $IL = N_{ee}/\sigma_{ee}\varepsilon_{ee}$ , где  $N_{ee}$  и  $\sigma_{ee}$  — количество событий и теоретическое сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  соответственно. Для определения количества событий  $N_{\pi\pi}$  процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  количество событий реакции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  рассчитывается по теоретическому сечению и вычитается. Величина сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  определяется по формуле

$$\sigma_{\pi\pi} = \frac{N_{\pi\pi} \varepsilon_{ee} \sigma_{ee}}{N_{ee} \varepsilon_{\pi\pi} (1 + \delta_r)}. \quad (1)$$

Здесь  $1 + \delta_r$  — поправка на излучение фотонов начальными частицами.

События процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  и  $\pi^+\pi^-$  различаются по характеру энергетических потерь в калориметре. Различия в энерговыделениях частиц в калориметре были использованы для создания параметра разделения событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ .

## ПАРАМЕТР РАЗДЕЛЕНИЯ

Многослойная структура калориметра СНД дает возможность использовать различия энерговыделений вдоль направления движения для определения типа частиц. В качестве входных параметров для разделения используются энерговыделения в слоях башен, из которых состоит кластер в калориметре, соответствующий частице (башня — это три расположенных один за другим счетчика первого, второго и третьего слоев):  ${}^0E_j$  — энерговыделение в  $j$ -м слое башни с наибольшим энерговыделением,  ${}^1E_j$  — сумма энерговыделений в  $j$ -м слое восьми башен, расположенных вокруг башни с наибольшим энерговыделением,  ${}^2E_j$  — сумма энерговыделений в  $j$ -м слое остальных башен кластера ( $j = 1, 2, 3$ ).

Наиболее полным образом учесть корреляции энерговыделений в слоях калориметра позволяет параметр разделения, основанный на машинном обучении. Для обучения была выбрана сеть (лес), включающая 900 деревьев решений с глубиной, равной девяти каждое. Сеть обучалась по событиям моделирования процессов  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  и  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . Входными параметрами являются энерговыделения  ${}^kE_j$  каждой из частиц и средний угол

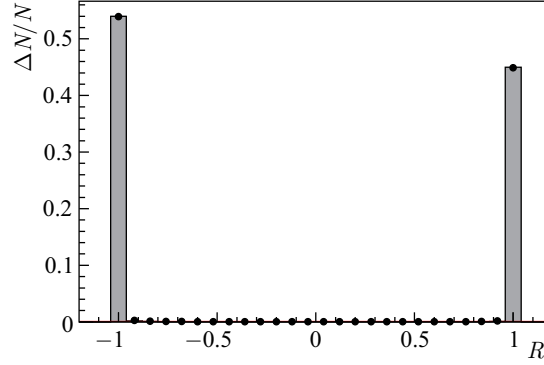


Рис. 1. Распределение по параметру  $e/\pi$  разделения  $R$  для всех коллинеарных событий при энергии  $\sqrt{s} = 778$  МэВ: точки — эксперимент; гистограмма — моделирование

$\theta_0 = (\theta_1 - \theta_2 - 180^\circ)/2$  — всего 19 параметров. Здесь индексы 1 и 2 обозначают номера частиц. Выходной параметр сети  $R$  (параметр разделения) принимает значения от  $-1$  до  $1$  (рис. 1). События  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  в основном располагаются в области  $R < 0$ , а  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, \mu^+\mu^-$  — в области  $R > 0$ .

Эффективности идентификации

$$\varepsilon_e = \frac{N^{ee}(R \in [-1; 0])}{N^{ee}(R \in [-1; 1])}, \quad \varepsilon_\pi = \frac{N^{\pi\pi}(R \in [0; 1])}{N^{\pi\pi}(R \in [-1; 1])} \quad (2)$$

событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $\pi^+\pi^-$  в области пика  $\rho$ -мезона, определенные путем моделирования, составляют около 0,998 и 0,999 соответственно. Здесь  $N^{ee,\pi\pi}(R \in [a; b])$  — количество событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $\pi^+\pi^-$  при значениях  $R$  из интервала  $[a; b]$ .

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ

Неточности моделирования энерговыделения частиц в слоях калориметра, в частности моделирования ядерного взаимодействия пионов, приводят к ошибке определения эффективности идентификации. Для оценки систематической погрешности процедуры разделения из частиц, зарегистрированных в процессах  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ , составлялись псевдо- $ee$ - и псевдо- $\pi\pi$ -события. При отборе таких частиц использовались сигналы аэрогелевых черенковских счетчиков (счетчик срабатывает от электронов и не срабатывает от пионов) и параметр  $e/\pi$  разделения  $R'$ , для которого входными данными являлись только энерговыделения  ${}^k E_j$  одной частицы. Частица считалась

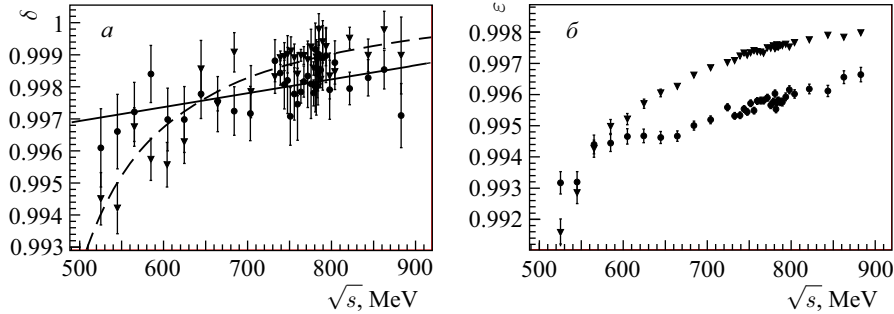


Рис. 2. Поправочные коэффициенты к эффективнымностям разделения (а) и эффективности разделения (после введения поправки) (б) событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  (●) и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  (▼) в зависимости от энергии

«пионом», если обе коллинеарные частицы не вызывали срабатывания черенковского счетчика и для второй частицы  $R' > 0$ . В случае, когда  $R' < 0$  для второй частицы и счетчик срабатывал для обеих частиц, частица считалась «электроном». Отобранные частицы объединялись попарно в псевдособытия. Эффективность разделения при моделировании псевдособытий и настоящих событий согласуется с точностью 0,1 % для  $e^+e^-$  и 0,02 % для  $\pi^+\pi^-$ .

Псевдособытия были использованы для определения поправочных коэффициентов к эффективности идентификации  $\delta_x = \epsilon_x^{\text{exp}} / \epsilon_x^{\text{mc}}$ , где  $x = e$  или  $\pi$ ,  $\epsilon_x^{\text{exp}}$  и  $\epsilon_x^{\text{mc}}$  — эффективности идентификации псевдособытий эксперимента и моделирования соответственно, рассчитанные по формулам (2). Величины поправочных коэффициентов меняются от 0,999 до 0,994 с уменьшением энергии (рис. 2, а). Погрешность определения поправки составляет  $10^{-3}$  для  $\delta_e$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  для  $\delta_\pi$ . В погрешности дают вклады статистическая погрешность определения поправочных коэффициентов и разница между эффективностями идентификации для настоящих и псевдособытий.

Эффективности идентификации событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  после умножения на поправочные коэффициенты показаны на рис. 2, б. Погрешности эффективностей определяются погрешностями поправочных коэффициентов. Вклад погрешности эффективности идентификации в погрешность измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергии от 0,5 до 1,0 ГэВ составляет 0,2–0,9 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод разделения событий процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  с помощью калориметра детектора СНД. Определены эффективности идентификации  $\epsilon_e = 99,6\%$  и  $\epsilon_\pi = 99,8\%$  процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  соответственно. Вклад погрешностей  $\varepsilon_e$  и  $\varepsilon_\pi$  в погрешность измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  составляет 0,2–0,9 %.

Работа частично поддержана грантами РФФИ №14-02-00129-а и №16-32-00542-мол-а. Часть работы, связанная с реконструкцией кластеров в калориметре, поддержана РФФ (проект №14-50-00080).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Achasov M. N. et al.* // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2012. V. 225–227. P. 66–68.
2. *Беркаев Д. Е. и др.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 140, вып. 2(8). С. 247–255;  
*Abakutova E. V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 744. P. 35–40;  
*Abakutova E. V. et al.* // JINST. 2015. V. 10. P. T09001.
3. *Барняков А. Ю. и др.* // ПТЭ. 2015. Т. 58, №1. С. 37–42.