

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Купич Андрей Сергеевич

**Измерение электромагнитного формфактора пиона с детектором
СНД на ускорительном комплексе ВЭПП-2000**

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Отчёт по научно-исследовательской работе

Научный руководитель
Ачасов Михаил Николаевич
доктор физико-математических наук

Новосибирск - 2017

1 Введение

Сферический нейтральный детектор СНД [1] – универсальный детектор для экспериментов на e^+e^- коллидере 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 объёме, системы идентификации частиц на основе пороговых аэрогеливых черенковских счётчиков [3], трёхслойного сферического электромагнитного калориметра на основе кристаллов NaI(Tl) и мюонной системы, состоящей из пропорциональных трубок и сцинтилляционных счётчиков.

Программа экспериментов включает измерение сечений процессов e^+e^- аннигиляции в адроны, которое в значительной степени мотивировано необходимостью проведения высокоточных расчётов адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона $(g-2)/2$. В частности, сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергии $\sqrt{s} < 1$ ГэВ даёт основной вклад в эту величину и должно быть измерено с точностью лучше 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 ε_{ee} и $\varepsilon_{\pi\pi}$ определяется по моделированию методом Монте-Карло. По событиям $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ измеряется интегральная светимость $IL = N_{ee}/\sigma_{ee}\varepsilon_{ee}$, где N_{ee} и σ_{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:

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

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 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$.

2 Моделирование процессов.

Для моделирования процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ использовался генератор MCGPJ [4]. При моделировании полярные углы электронов и позитронов в процессе $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ограничивались условием $30^\circ < \theta_e < 150^\circ$. Для каждой точки по энергии моделировалось 10^6 событий $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, а также по $2 * 10^6$ событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Из них половина использовалась исключительно для тренировки дискриминаторов, а остальные (т.н. тестовые события) применялись в дальнейшем анализе.

3 Условия отбора

Условия отбора одинаковы для событий эксперимента и моделирования. Частицы в событии упорядочивались по энерговыделению, т.е. две первые частицы имеют наибольшее энерговыделение. Заряженной частицей считается трек в трековой системе, нейтральной – кластер в калориметре для которого в трековой системе не найден трек.

Событие должно удовлетворять условиям:

- Число заряженных частиц > 1
- $act=0$ - условие на антисовпадение во внешней мюонной системе для подавления космических событий
- $|d0_1| < 1 \text{ см}$, $|d0_2| < 1 \text{ см}$, где $|d0_i|$ - расстояние между треком частицы и осью пучка
- $|z0_1| < 10 \text{ см}$, $|z0_2| < 1 \text{ см}$, где $|z0_i|$ - z-координата точки на треке, лежащей ближе всего к оси пучка
- $|\Delta\theta| = |180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)| < 8^\circ$, где θ_i - полярный угол вылета частицы, измеренный по трековой системе и калориметру.
- $|\Delta\phi| = |180^\circ - |\phi_1 - \phi_2|| < 4^\circ$, где ϕ_i - азимутальный угол вылета частицы, измеренный по трековой системе и калориметру.
- $E_1 > 40 \text{ MeV}$, $E_2 > 40 \text{ MeV}$, где E_i - энерговыделение частицы в калориметре
- $50^\circ < \theta_0 < 130^\circ$, где $\theta_0 = (\theta_1 - \theta_2 + 180^\circ)/2$ - средний угол вылета частиц.

Эти условия проходят события процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Вклад других процессов $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^+\pi^-\pi^0$ и космического фона пренебрежимо мал.

4 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 1, 2 и 3-го слоёв): 0E_j – энерговыделение в j -ом слое башни с наибольшим энерговыделением, 1E_j – сумма энерговыделений в j -ом слое восьми башен расположенных вокруг башни с наибольшим энерговыделением, 2E_j – сумма энерговыделений в j -ом слое остальных башен кластера ($j = 1, 2, 3$).

Наиболее полным образом учесть корреляции энерговыделений в слоях калориметра позволяет параметр разделения, основанный на машинном

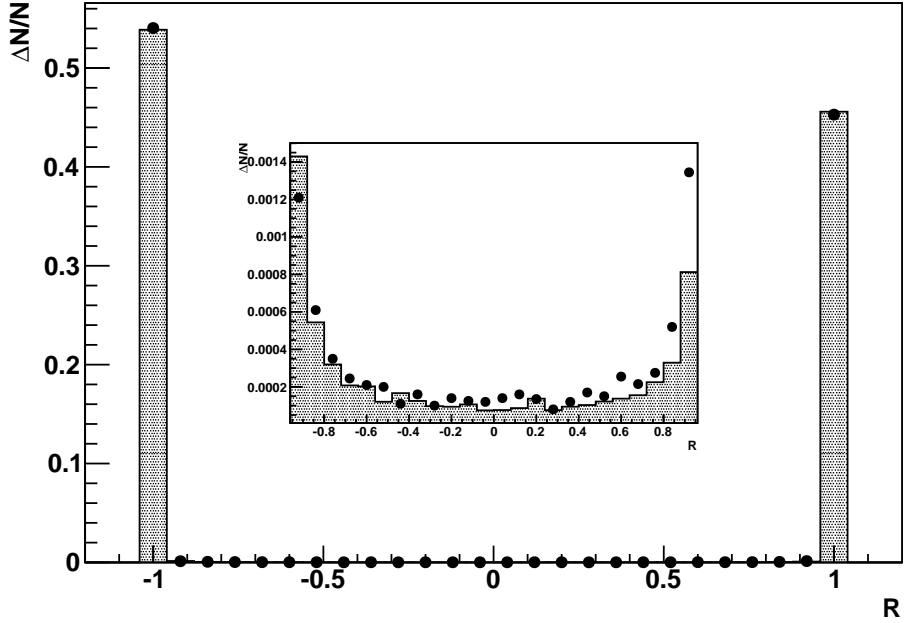


Рис. 1: Распределение по параметру e/π разделения R для всех коллинеарных событий при энергии $\sqrt{s} = 778$ МэВ. Точки – эксперимент, гистограмма – моделирование.

обучении. Для обучения была выбрана сеть (лес), включающая 900 решающих деревьев с глубиной равной 9 каждое. Сеть обучалась по событиям моделирования процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Входными параметрами являются энергосделения kE_j каждой из частиц и средний угол $\theta_0 = (\theta_1 - \theta_2 - 180^\circ)/2$ – 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

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

событий процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $\pi^+\pi^-$ в области пика ρ -мезона, определённые по моделированию, составляют около 0.998 и 0.999 соответственно. Здесь $N^{ee, \pi\pi}(R \in [a; b])$ – количества событий процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $\pi^+\pi^-$ при значениях R из интервала $[a; b]$.

Таблица 1: Вклады в ошибки поправочных коэффициентов δ_e и δ_π .

Ошибка	Вклад в δ_e , %	Вклад в δ_π	
		при $\sqrt{s} > 0.65$ GeV, %	при $\sqrt{s} < 0.65$ GeV, %
σ_{stat}	0.01	0.02	0.02 – 0.06
σ_{ID}	0.02	0.01	0.02
σ_{bkg}	0.02	0.02	–
σ_{tot}	0.03	0.03	0.03 – 0.06

5 Эффективность разделения.

Неточности моделирования энерговыделения частиц в слоях калориметра, в частности, моделирования ядерного взаимодействия пионов, приводят к ошибке определения эффективности идентификации. Для оценки систематической ошибки 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 аэрогеливых черенковских счётчиков (счётчик срабатывает от электронов и не срабатывает от пионов) и параметр e/π разделения R' для которого входными данными являлись только энерговыделения kE_j одной частицы. Частица считалась «пионом», если обе коллинеарные частицы не вызвали срабатывания черенковского счётчика и для второй частицы $R' > 0$. В случае, когда $R' < 0$ для второй частицы и счётчик сработал для обеих частиц, частица считалась «пионом». Отобранные частицы объединялись попарно в псевдособытия. Эффективность разделения в моделировании для псевдособытий и настоящих событий согласуются с точностью 0.03% для e^+e^- и 0.02% для $\pi^+\pi^-$.

Псевдособытия были использованы для определения поправочных коэффициентов к эффективности идентификации $\delta_x = \epsilon_x^{exp}/\epsilon_x^{mc}$, где $x = e$ или π , ϵ_x^{exp} и ϵ_x^{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). Ошибка определения поправки составляет 10^{-3} для δ_e и 5×10^{-4} для δ_π . В ошибки дают вклады статистическая ошибка 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. Ошибки эффективностей определяются ошибками поправочных коэффициентов (табл. 1). Вклад ошибки эффективности идентификации в ошибку измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергии от 0.5 до 1.0 ГэВ составляет менее 0.2% в большинстве энергетических точек.

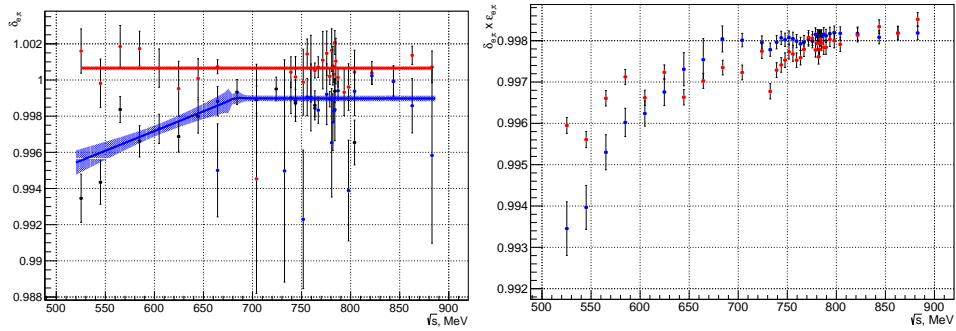


Рис. 2: Поправочные коэффициенты к эффективностям разделения (слева) и эффективности разделения (после введения поправки) (справа) событий процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ (красные) и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ (синие) в зависимости от энергии.

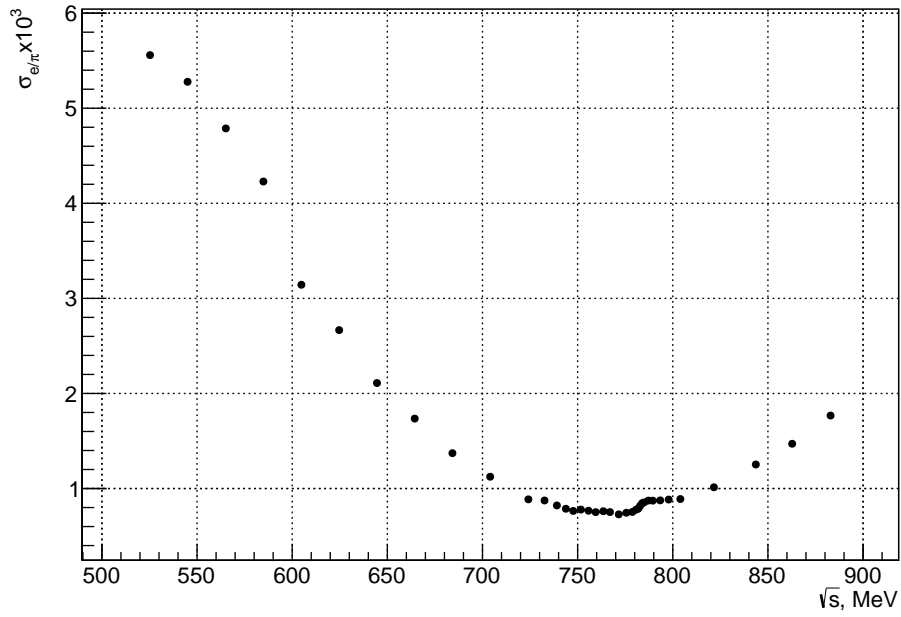


Рис. 3: Вклад в относительную ошибку $\sigma_{e/\pi}$ сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ связанный с e/π разделением в зависимости от энергии

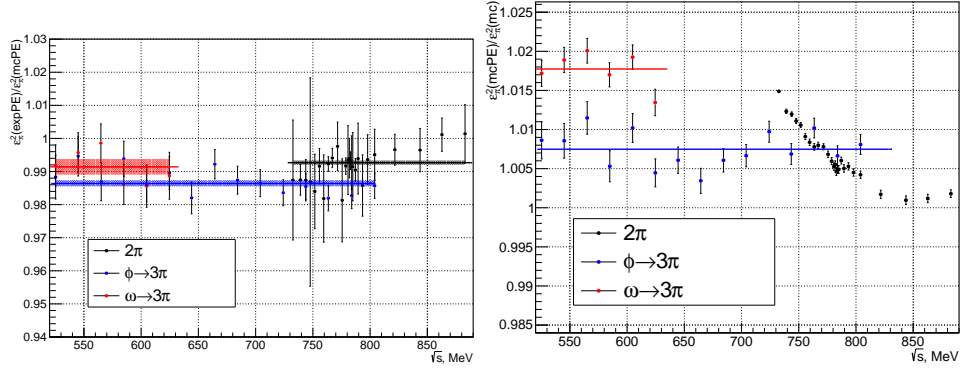


Рис. 4: Отношение эффективностей для экспериментальных псевдособытий и псевдособытий моделирования (слева), для псевдособытий моделирования и истинного моделирования (справа) в зависимости от энергии

6 Эффективность отбора по полному энерговыделению

На ранних этапах данного анализа было обнаружено, что неэффективность относительно условия отбора $E_{1,2} > 40$ MeV крайне велика и составляет 10-20%. Такая большая неэффективность в первую очередь связана с рассеянием пионов на большой угол в калориметре детектора СНД, что приводит к потере кластера в стандартной реконструкции. Поэтому было принято решение увеличить максимально допустимое угловое расстояние по ϕ между треком и кластером с 15° до 30° . Это позволило уменьшить неэффективность в 2 раза. Псевдособытия $\pi\pi$ использовались для проверки истинности эффективности относительно условия отбора $E_{1,2} > 40$ MeV, полученной из моделирования. Псевдособытия $\pi\pi$ конструировались из событий $e^+e^- \rightarrow \omega, \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, а также $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. В качестве поправки к эффективности бралось отношение эффективности для псевдособытий эксперимента и для псевдособытий моделирования (рис.4). Также рассматривалось отношение эффективности в псевдособытиях моделирования и истинных событиях моделирования (рис.4). Полученные результаты свидетельствуют о наличии систематики не менее 0.7 %.

7 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 $\varepsilon_e = 99.6\%$ и $\varepsilon_\pi = 99.8\%$ процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ соответственно. Вклад ошибок ε_e и ε_π в ошибку измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ составляет 0.1-0.5 %. Частично изучен вклад в систематику от условия на полное энерговыделение.

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

8 Список выступлений

Часть полученных результатов (а именно проверка методик e/π разделения) была опубликована в журнале JINST: 2017 JINST 12 T01002 (доступна по ссылке: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/12/01/T01002>)

Список литературы

- [1] *Achasov M. N. et al.* // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2012. V.225-227. P.66-68
- [2] *Бержаев Д. Е. и др.* // ЖЭТФ 2011. Т.140. вып. 2(8) С.247-255;
Авакумова Е. В. et al. // Nucl. Instr. Meth A. 2014. V.744. P.35-40;
Авакумова Е. В. et al. // JINST 2015. V.10. P.T09001.
- [3] *Барняков А. Ю. и др.* // ПТЭ2015. Т.58. №1 С.37-42;
- [4] *G.V. Fedotov, A.L. Sibidanov* Monte Carlo generator with radiative corrections for the processes $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$ and $\pi^+\pi^-$ at low energies// Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, Volume 131, April 2004, Pages 9-18