

НЕДАВНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ДЕТЕКТОРЕ СНД

А. А. Король^{1,2,*}, *М. Н. Ачасов*^{1,2}, *А. Ю. Барняков*^{1,2},
К. И. Белобородов^{1,2}, *А. В. Бердюгин*^{1,2}, *А. Г. Богданчиков*¹,
*А. А. Ботов*¹, *Т. В. Димова*^{1,2}, *В. П. Дружинин*^{1,2},
В. Н. Жабин^{1,2}, *В. Г. Голубев*^{1,2}, *Л. В. Кардапольцев*^{1,2},
*С. В. Кошуба*¹, *Д. П. Коврижин*^{1,2}, *Н. А. Мельникова*^{1,2},
Н. Ю. Мучной^{1,2}, *А. Е. Образовский*¹, *С. И. Середняков*^{1,2},
З. К. Силагадзе^{1,2}, *И. К. Сурин*^{1,2}, *А. Г. Харламов*^{1,2},
Д. А. Штоль^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Представлены недавние результаты экспериментов на детекторе СНД. Данные набирались на ускорительных комплексах ВЭПП-2000 и ВЭПП-2М в Новосибирске в области энергии в системе центра масс 0,3–2,0 ГэВ. Использована интегральная светимость 70 и 25 пб⁻¹ соответственно. Измерены сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$, $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$.

Recent results of experiments on the SND detector are presented. Data were collected on the VEPP-2000 and VEPP-2M e^+e^- colliders (Novosibirsk) in the c.m. energy region 0.3–2.0 GeV. Integrated luminosity used is 70 and 25 pb⁻¹, respectively. Cross section of the $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$, $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$ processes is measured.

PACS: 13.66.Bc; 13.66.Jn

ВВЕДЕНИЕ

Представлены результаты анализа данных, набранных на детекторе СНД [1–3] на ускорительных комплексах ВЭПП-2М [4] и ВЭПП-2000 [5] в диапазоне значений энергии в системе центра масс 0,3–2,0 ГэВ.

Детектор СНД состоит из нескольких подсистем (рис. 1). Это сферический трехслойный электромагнитный калориметр из кристаллов NaI(Tl), ци-

*E-mail: a.a.korol@inp.nsk.su

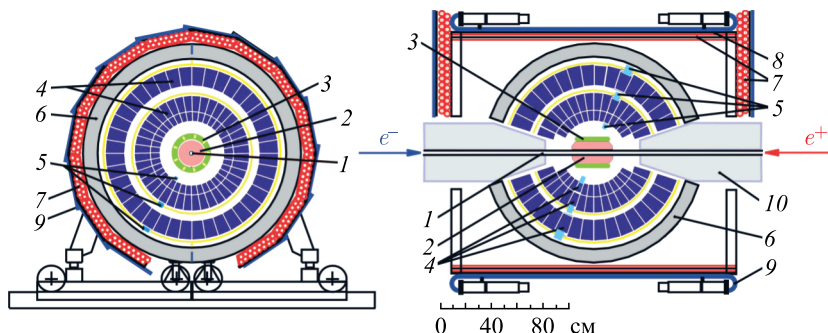


Рис. 1. Схема детектора: 1 — вакуумная труба; 2 — трековая система; 3 — черенковский счетчик; 4 — электромагнитный калориметр NaI(Tl); 5 — фототриоды; 6 — железный поглотитель; 7–9 — мионная подсистема; 10 — фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000

лиندрическая трековая система (дрейфовая и пропорциональная камеры в одном газовом объеме), пороговый черенковский счетчик из аэрогеля и мионная подсистема. Электромагнитный калориметр перекрывает 95 % полного телесного угла, имеет толщину, эквивалентную $13,4X_0$, энергетическое разрешение зависит от энергии фотона и составляет $\delta E/E = 0,042/\sqrt[4]{E(\text{ГэВ})}$, угловое разрешение $\delta\varphi = 1,5^\circ$. Трековая система перекрывает 94 % полного телесного угла, угловое разрешение в азимутальном и полярном направлениях соответственно $\delta\varphi = 0,45^\circ$, $\delta\theta = 0,8^\circ$.

Интегральная светимость, набранная в экспериментах с детектором СНД на комплексах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000, приведена в таблице.

В течение 2010–2013 гг. светимость ограничивалась нехваткой позитронов. Для решения этой проблемы проведена модернизация комплекса. После модернизации электроны и позитроны передаются из инжекционного комплекса ВЭПП-5. Набор данных начат в декабре 2016 г.

Использованная интегральная светимость

Параметр	Ниже ϕ	Вблизи ϕ	Выше ϕ
ВЭПП-2М			
IL , пб ⁻¹	9,1	13,2	8,8
\sqrt{s} , ГэВ	0,36–0,97	0,98–1,06	1,06–1,38
ВЭПП-2000			
IL , пб ⁻¹	15,5	6,9	47,0
\sqrt{s} , ГэВ	0,30–0,97	0,96–1,05	1,05–2,00

1. ПРОЦЕСС $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$

Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ [6] с использованием полной статистики, собранной на комплексах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. Этот процесс имеет третье по величине сечение в области значений энергии ниже 1 ГэВ, его изучение позволяет получить параметры электромагнитных радиационных распадов легких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ) и извлечь информацию о переходном формфакторе $\pi^0\gamma\gamma^*$.

Для нормализации использовался процесс $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$. Общие критерии отбора включают в себя (кроме условий аппаратного триггера) отсутствие заряженных треков, большое энерговыделение в калориметре, небольшой полный импульс, оцененный по калориметру, отсутствие срабатывания мюонной системы.

Окончательный отбор делается после проведения кинематического фита с фиксацией сохранения 4-импульса (4С): $\chi_{3\gamma}^2 < 30$, $36 < \theta_\gamma < 144^\circ$, $80 < M_{\text{ГС}} < 190$ МэВ. Здесь $M_{\text{ГС}}$ — это масса отдачи наиболее энергичного фотона. Количество событий сигнала определяется как параметр числа π^0 из подгонки формы спектра $M_{\text{ГС}}$.

Проведенное измерение $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ является самым точным в настоящее время (рис. 2). Систематическая неопределенность в области пика ω -мезона составила 1,4 %, основной вклад дают измерение светимости (1,2 %) и эффективность критериев отбора (0,6 %).

С использованием среднемировых значений $B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) \cdot B(\omega \rightarrow e^+e^-)$ (PDG [7]) было также рассчитано отношение ширины

$$\frac{\Gamma(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)}{\Gamma(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)} = 0,0992 \pm 0,0023,$$

оказавшееся заметно больше (на $3,4\sigma$) результата KLOE [8] $0,0897 \pm 0,0016$. Измеренное значение относительной вероятности распада

$$B(\rho \rightarrow \pi^0\gamma) = (4,20 \pm 0,47 \pm 0,22) \cdot 10^{-4}$$

на $1,8\sigma$ меньше среднемирового результата $(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$, однако согласуется со значением для заряженного мезона

$$B(\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm\gamma) = (4,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}.$$

Для ϕ -мезона получено значение

$$B(\phi \rightarrow \pi^0\gamma) \cdot B(\phi \rightarrow e^+e^-) = (3,92_{-0,40}^{+0,71} \pm 0,51) \cdot 10^{-7}.$$

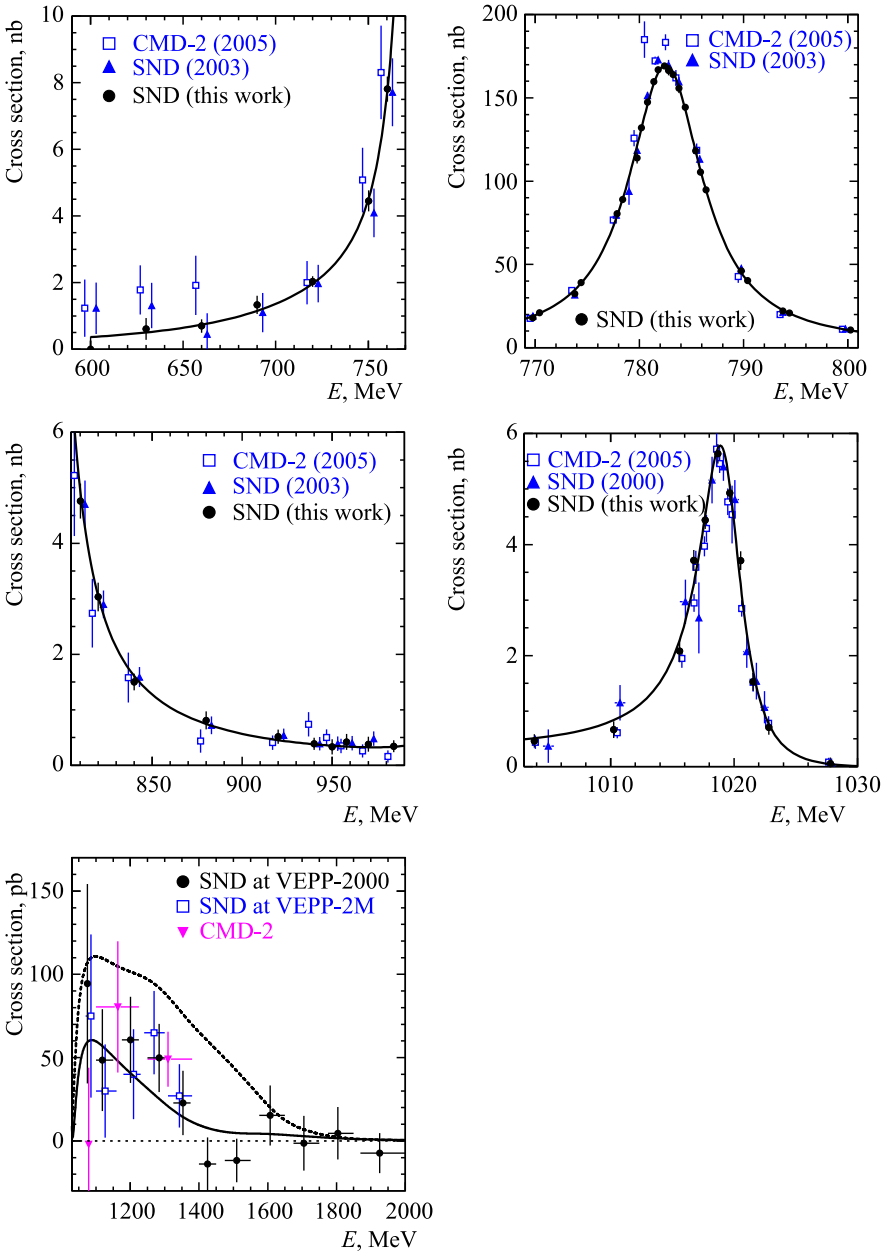


Рис. 2. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$

2. РАНЕЕ НЕ ИЗУЧАВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ

Полное адронное сечение в области энергии ниже 2 ГэВ рассчитывается как сумма эксклюзивных адронных сечений. В настоящее время его значение, полученное из инклюзивных и эксклюзивных измерений, хорошо сшивается на границе [9]. Однако в области значений энергии 1,5–2,0 ГэВ набор эксклюзивных измерений неполон. Нет экспериментальных данных по конечным состояниям $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$, $\pi^+\pi^-\eta\eta$, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0$, $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$..., и очень важно эти измерения провести.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ изучался [10] впервые. Измерено его сечение (рис. 3), изучены промежуточные состояния.

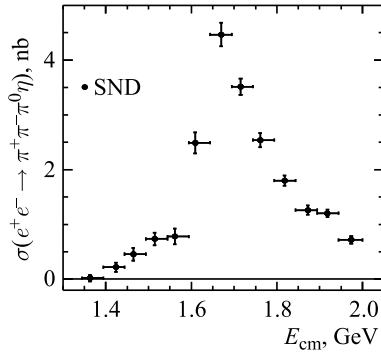


Рис. 3. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$

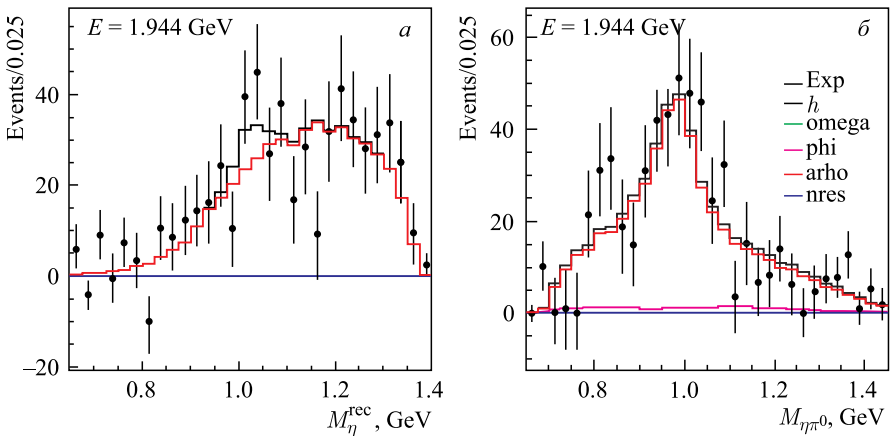


Рис. 4. Масса отдачи η (а) и инвариантная масса $\eta\pi^0$ (б)

Обнаруженные промежуточные состояния — это $\omega\eta$, $\phi\eta$, бесструктурный $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ и $a_0(980)\rho$. Выше 1,8 ГэВ последнее состояние является доминантным (рис. 4).

Дополнительно рассматривалось сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ с тем же конечным состоянием (рис. 5).

Заметна разница с ранее измеренным результатом BaBar [11].

Процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta \rightarrow 7\gamma$ изучался [12] впервые. Отбирались события конечного состояния $e^+e^- \rightarrow 7\gamma$. В событиях безусловно доминирует промежуточное состояние $\omega\pi^0\eta$. Возможный сигнал $\eta'\gamma$ не наблюдался. Спектр

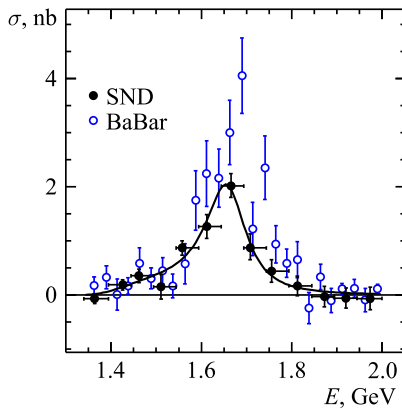


Рис. 5. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$

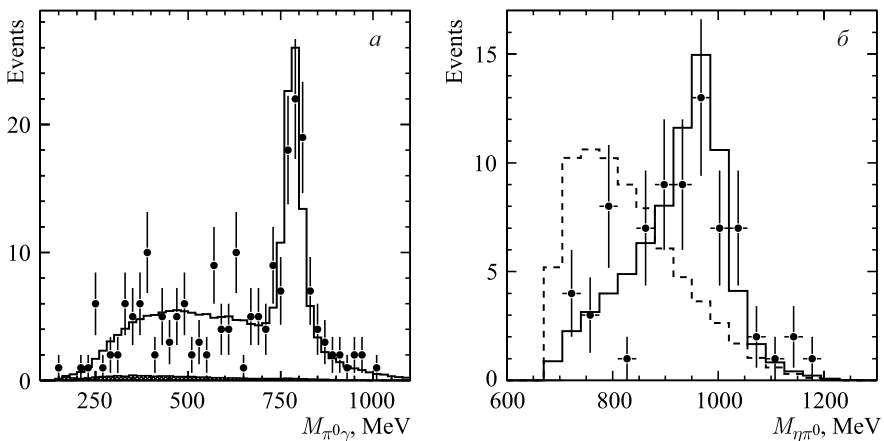


Рис. 6. Инвариантная масса $\pi^0\gamma$ (а) и $\eta\pi^0$ (б)

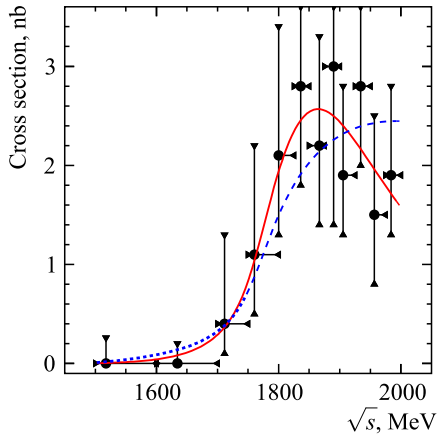


Рис. 7. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$

инвариантных масс $\pi^0\eta$ для отобранных событий $\omega\pi^0\eta$ хорошо описывается моделью промежуточного состояния $a^0(980)\omega$ (рис. 6).

Зависимость сечения от энергии описывается моделью с одним резонансом, масса и ширина которого соответствуют $\rho(1700)$. Безрезонансное описание хуже резонансного на уровне $1,2\sigma$ (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 2010–2013 гг. детектором СЧД были собраны данные с интегральной светимостью $\sim 70 \text{ пб}^{-1}$ на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 в области значений энергии в системе центра масс 0,3–2,0 ГэВ. Проводится их анализ. В комбинации с данными, собранными еще ранее на ускорительном комплексе ВЭПП-2М, получены наиболее точные на сегодняшний день результаты по процессу $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$: сечение и параметры радиационных распадов легких векторных мезонов.

Впервые измерены сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\eta$. Обнаружен заметный вклад промежуточных состояний $a^0(980)\rho$ и $a^0(980)\omega$ в соответствующие процессы.

После модернизации ускорительный комплекс ВЭПП-2000 начал свою работу с увеличенной светимостью. Установлена цель набрать интегральную светимость $\sim 1^{-1}$.

Благодарности. Работа поддержана РФФИ (гранты №15-02-01037 и №16-02-00327-а). Часть работы, связанная с реконструкцией фотонов в электромагнитном калориметре, поддержана Российским научным фондом (грант №14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Achasov M. N. et al.* Spherical Neutral Detector for VEPP-2M Collider // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 449. P. 125–139; arXiv:hep-ex/9909015.
2. *Abramov G. N. et al.* SND Upgrade // eConfC. 2001. V. 010430. P. T10; arXiv:hep-ex/0105093.
3. *Aulchenko V. M. et al.* SND Tracking System: Tests with Cosmic Muons // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 102–104.
4. *Koop I. A. et al.* Status of VEPP-2M Collider, Its Upgrade Plans and Novosibirsk Phi-Factory Project // Physics and Detectors for DAPHNE: Proc. of the 3rd Intern. Workshop “DAPHNE’99”, Frascati, Italy, Nov. 16–19, 1999. P. 393–404.
5. *Khazin B. I. et al. (CMD-3, SND Collab.)*. Detectors and Physics at VEPP-2000 // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 623. P. 353–355.
6. *Achasov M. N. et al. (SND Collab.)*. Study of the Reaction $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ with the SND Detector at the VEPP-2M Collider // Phys. Rev. D. 2016. V. 93, No. 9. P. 092001; arXiv:1601.08061.
7. *Olive K. A. et al. (Particle Data Group Collab.)*. Review of Particle Physics // Chin. Phys. C. 2014. V. 38. P. 090001.
8. *Ambrosino F. et al. (KLOE Collab.)*. Study of the Process $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$ in the ϕ -Meson Mass Region with the KLOE Detector // Phys. Lett. B. 2008. V. 669. P. 223–228; arXiv:0807.4909 [hep-ex].
9. *Jegerlehner F.* Leading-Order Hadronic Contribution to the Electron and Muon $g-2$ // EPJ Web Conf. 2016. V. 118. P. 01016; arXiv:1511.04473.
10. *Achasov M. N. et al.* Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ Cross Section below $\sqrt{s} = 2$ GeV // Phys. Rev. D. 2016. V. 94, No. 9. P. 092002; arXiv:1607.00371.
11. *Aubert B. et al. (BaBar Collab.)*. The $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-), 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ and $K^+K^-2(\pi^+\pi^-)$ Cross Sections at Center-of-Mass Energies from Production Threshold to 4.5 GeV Measured with Initial-State Radiation // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 052003; arXiv:hep-ex/0602006.
12. *Achasov M. N. et al.* Study of the Process $e^+e^- \rightarrow \omega\eta\pi^0$ in the Energy Range $\sqrt{s} < 2$ GeV with the SND Detector // Phys. Rev. D. 2016. V. 94, No. 3. P. 032010; arXiv:1606.06481.