

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s} = 1.05\text{--}2.00$ ГэВ

© 2021 г. М. Н. Ачасов^{1),2)}, А. Ю. Барняков¹⁾, А. А. Байков^{1),2)},
К. И. Белобородов^{1),2)}, А. В. Бердюгин^{1),2)}, А. Г. Богданчиков¹⁾, А. А. Ботов¹⁾,
В. Б. Голубев¹⁾, Т. В. Димова^{1),2)}, В. П. Дружинин^{1),2)}, В. Н. Жабин¹⁾,
Л. В. Кардапольцев^{1),2)*}, Д. П. Коврижин¹⁾, А. А. Король^{1),2)}, А. С. Купич¹⁾,
К. А. Мартин¹⁾, Н. А. Мельникова¹⁾, Н. Ю. Мучной^{1),2)}, А. Е. Образовский¹⁾,
Е. В. Пахтусова¹⁾, К. В. Пугачев^{1),2)}, Я. С. Савченко^{1),2)}, С. И. Середняков^{1),2)},
З. К. Силагадзе^{1),2)}, И. К. Сурин¹⁾, Ю. В. Усов¹⁾, А. Г. Харламов^{1),2)}, Д. А. Штоль¹⁾

Поступила в редакцию 08.06.2020 г.; после доработки 08.06.2020 г.; принята к публикации 08.06.2020 г.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ изучается в области энергии в системе центра масс от 1.05 до 2.00 ГэВ по данным с интегральной светимостью 94.5 пбн^{-1} , накопленным в эксперименте с детектором СНД на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000. Впервые измерено сечение этого процесса и показано, что его доминирующим механизмом является переход через промежуточное состояние $\omega\eta$. Измеренное сечение подпроцесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ согласуется с предыдущими измерениями в канале $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$. С достоверностью 5.7σ было установлено, что процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ не полностью описывается адронными промежуточными состояниями типа VP . Измерено сечение для этого недостающего вклада, который может происходить от радиационных процессов, например, $e^+e^- \rightarrow a_0(1450)\gamma$. Оно составляет $15\text{--}20 \text{ пбн}$ в широком интервале энергии от 1.3 до 1.9 ГэВ.

DOI: 10.31857/S0044002721010037

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена изучению процесса

$$e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma \quad (1)$$

в области энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 1.05\text{--}2.00$ ГэВ в эксперименте с детектором СНД [1] на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000 [2]. Ранее этот процесс исследовался вблизи ϕ -мезонного резонанса в экспериментах СНД на ВЭПП-2М [3], КМД-2 [4] и KLOE [5]. В этой области доминирующим механизмом реакции является распад $\phi \rightarrow a_0(980)\gamma$. Ниже ($\sqrt{s} = 0.920\text{--}1.004$ ГэВ) и выше ($\sqrt{s} = 1.03\text{--}1.38$ ГэВ) ϕ -мезонного резонанса процесс (1) измерялся в эксперименте КМД-2 [6], где был установлен верхний предел на сечение на 90% уровне достоверности около 0.1 нбн . При больших энергиях имеется только измерение распада $J/\psi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ в эксперименте BESIII [7].

Доминирующий вклад в сечение процесса (1) в изучаемой области энергии дает процесс $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ с распадом $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$. Этот процесс измерялся в экспериментах BABAR [8], КМД-3 [9] и СНД [10] в канале распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$.

В рамках настоящей работы наибольший интерес представляет поиск радиационных распадов возбужденных векторных мезонов семейств ρ , ω и ϕ на $a_0(980)\gamma$, $a_2(1320)\gamma$ и $a_0(1450)\gamma$. Измерение ширины этих распадов важно для понимания кварковой структуры возбужденных легких векторных мезонов. В частности, есть указания на то, что возбужденные состояния ρ - и ω -мезонов могут иметь примесь векторного гибридного состояния [11]. Ширины их радиационных распадов чувствительны к примеси гибридного состояния [12].

Анализ, представленный в настоящей работе, основан на данных с интегральной светимостью 94.5 пбн^{-1} , записанных СНД в 2010, 2011, 2012 и 2017 гг. Эти данные были набраны в 101 энергетической точке в области $\sqrt{s} = 1.05\text{--}2.00$ ГэВ. Так как сечение изучаемого процесса мало и относительно медленно меняется с энергией, данные были слиты в 13 интервалов по энергии.

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

²⁾Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

*E-mail: L.V.Kardapol'tsev@inp.nsk.su

2. УСЛОВИЯ ОТБОРА

В настоящей работе процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ изучается в пятифотонном конечном состоянии. Выделение событий этого процесса осуществляется в две стадии. На первой стадии отбираются события с ровно пятью фотонами с энергией больше 20 МэВ и отсутствием заряженных частиц. Последнее условие обеспечивается требованием, что число сработавших проволочек в дрейфовой камере меньше четырех. Накладывается условие на полное энергосодержание в калориметре $E_{\text{ЕМС}}$ и на суммарный импульс события $P_{\text{ЕМС}}$, вычисленный по сработавшим кристаллам в калориметре,

$$E_{\text{ЕМС}}/\sqrt{s} > 0.6, \quad P_{\text{ЕМС}}/\sqrt{s} < 0.3. \quad (2)$$

Требуется также отсутствие срабатывания мюонной системы.

Основным фоновым процессом является

$$e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma. \quad (3)$$

Также исследовался фон от других наиболее существенных в исследуемой области энергии многофотонных процессов.

Для подавления фона для событий прошедших предварительный отбор проводится кинематическая реконструкция в гипотезах $e^+e^- \rightarrow 3\gamma$, $e^+e^- \rightarrow 5\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ с требованиями сохранения энергии и полного импульса в событии. Для последних двух гипотез дополнительно накладываются условия, что инвариантные массы пар фотонов равны массам π^0 - и η -мезонов. В результате кинематической реконструкции уточняются энергии и углы фотонов, а также вычисляется χ^2 предполагаемой кинематической гипотезы. На полученные таким образом значения χ^2 накладывались следующие условия:

$$\begin{aligned} \chi_{5\gamma}^2 &< 30, & \chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 &< 10, \\ \chi_{3\gamma}^2 &> 50, & \chi_{\pi^0\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 &> 80. \end{aligned} \quad (4)$$

Для оценки фона наряду с сигнальной областью, определенной условиями (4), рассматривалась также контрольная область, в которой условие $\chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 < 10$ было заменено на $10 < \chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 < 60$.

3. АППРОКСИМАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ИНВАРИАНТНОЙ МАССЕ $\pi^0\gamma$

$$\text{И } \chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2$$

Отобранные события можно разделить на четыре класса. Первый класс ($\omega\eta$) содержит события процесса

$$e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma. \quad (5)$$

Во втором классе ($\text{res-}\eta\pi\gamma$) находятся события остальных адронных процессов, имеющих конечное состояние $\eta\pi^0\gamma$:

$$e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \quad e^+e^- \rightarrow \phi\eta, \quad e^+e^- \rightarrow \phi\pi^0, \quad (6)$$

$$e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0, \quad e^+e^- \rightarrow \rho\pi^0. \quad (7)$$

Третий класс ($\text{rad-}\eta\pi\gamma$) содержит события от радиационных распадов возбужденных векторных мезонов, т.е. процессы $e^+e^- \rightarrow a_0(980)\gamma$, $e^+e^- \rightarrow a_0(1450)\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow a_2(1270)\gamma$. Последний четвертый класс (bkg) — это события фона. Первые три класса описывают разные промежуточные механизмы процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$.

Числа событий в каждом классе определяют при совместной аппроксимации распределения по инвариантной массе $\pi^0\gamma$ для событий из сигнальной области ($\chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 < 10$), и распределения по $\chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2$ для контрольной области ($10 < \chi_{\eta\pi^0\gamma}^2 - \chi_{5\gamma}^2 < 60$). Используемые при аппроксимации распределения для четырех классов событий получаются по моделированию.

В результате аппроксимации во всем изучаемом диапазоне энергии получаются следующие значения чисел событий в четырех классах:

$$\begin{aligned} N_{\omega\eta} &= 267 \pm 20, & N_{\text{rad}} &= 97 \pm 21, \\ N_{\text{res}} &= 27, & N_{\text{bkg}} &= 113 \pm 10. \end{aligned} \quad (8)$$

Суммарный вклад от фоновых процессов, вычисленный с помощью моделирования, равен $N_{\text{bkg}}^{\text{calc}} = 123$ и хорошо согласуется с результатом аппроксимации.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения борновского сечения использовалось выражение

$$\sigma_B = \frac{N}{\varepsilon L(1 + \delta)}, \quad (9)$$

где N — число событий соответствующего класса, ε — эффективность регистрации, L — интегральная светимость, $(1 + \delta)$ — радиационная поправка согласно [13]. Используя полученные из аппроксимации числа событий в 13 энергетических интервалах для классов $\omega\eta$ и $\text{rad-}\eta\pi\gamma$, были измерены сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ соответственно. Измеренные сечения приведены на рис. 1 и 2.

Важным вопросом является значимость полученной при аппроксимации величины вклада $\text{rad-}\eta\pi\gamma$. Для этого сравниваются значения функции правдоподобия для аппроксимации, описанной выше (L_1), и аппроксимации с $N_{\text{rad}} \equiv 0$ (L_0). Полученная таким образом значимость наблюдения сигнала $\text{rad-}\eta\pi\gamma$ составляет 5.7σ .

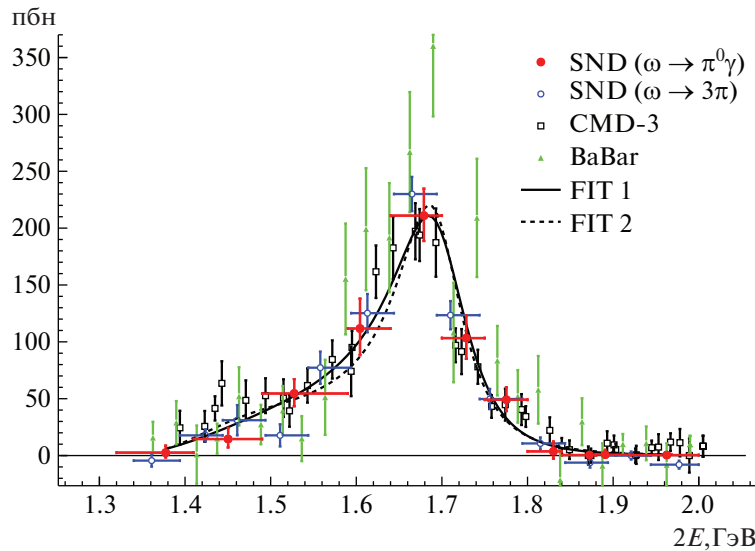


Рис. 1. Зависимость борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ от энергии, измеренная в настоящей работе (закрашенные круги). Для сравнения приведены измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ в канале распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в экспериментах SND [10] (полые круги), КМД-3 [9] (квадраты) и BABAR [8]. Эти данные были умножены на вероятность распада $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)$ [14]. Кривая показывает результаты аппроксимации, описанной в тексте.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000 было впервые измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ в области энергии от 1.05 до 2.00 ГэВ. Основной вклад в сечение дает промежуточный механизм $\omega\eta$. Измеренное сечение подпроцесса $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ хорошо согласуется с предыдущими измерениями этого сечения в экспериментах СНД и КМД-3 в режиме распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. С достоверностью 5.7σ было

установлено, что процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ не полностью описывается адронными промежуточными состояниями. Мы предполагаем, что недостающий вклад ($\text{rad-}\eta\pi\gamma$) происходит от радиационных процессов, например, $e^+e^- \rightarrow a_0(980)\gamma$, $a_0(1450)\gamma$ и $a_2(1270)\gamma$. Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$. Оно составляет 15–20 пбн в широком интервале энергии от 1.3 до 1.9 ГэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. N. Achasov, D. E. Berkaev, A. G. Bogdanchikov, D. A. Bukin, I. A. Koop, A. A. Korol, S. V. Koshuba, D. P. Kovrizhin, A. V. Otboev, E. A. Perevedentsev, Yu. A. Rogovsky, A. L. Romanov, P. Yu. Shatunov, Yu. M. Shatunov, D. B. Swartz, A. A. Valkovich, and I. M. Zemlyansky, Nucl. Instrum. Methods A **598**, 31 (2009); V. M. Aulchenko, A. G. Bogdanchikov, A. A. Botov, D. A. Bukin, D. A. Bukin, T. V. Dimova, V. P. Druzhinin, V. P. Filatov, V. B. Golubev, A. G. Kharlamov, A. A. Korol, S. V. Koshuba, A. E. Obrazovsky, E. V. Pakhtusova, V. M. Popiv, S. I. Serednyakov, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **598**, 102 (2009); A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, K. I. Beloborodov, A. R. Buzykaev, A. F. Danilyuk, V. B. Golubev, V. L. Kirillov, S. A. Kononov, E. A. Kravchenko, A. P. Onuchin, K. A. Martin, S. I. Serednyakov, V. M. Vesenev, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **598**, 163 (2009); V. M. Aulchenko, A. G. Bogdanchikov, A. A. Botov, D. A. Bukin, M. A. Bukin, E. A. Chekushkin, T. V. Dimova, V. P. Druzhinin, A. A. Korol, S. V. Koshuba, A. I. Tekutiev, and Yu. V. Usov, Nucl. Instrum. Methods A **598**, 340 (2009).

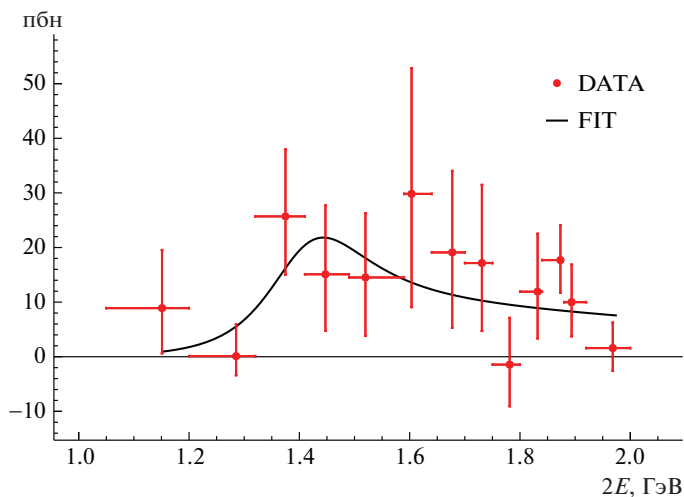


Рис. 2. Зависимость борновского сечения для процесса $e^+e^- \rightarrow \text{rad-}\eta\pi^0\gamma$ от энергии. Точки с ошибками — данные, кривая — результат аппроксимации, описанной в тексте.

2. P. Y. Shatunov, D. E. Berkaev, Yu. M. Zharinov, I. M. Zemlyansky, A. S. Kasaev, A. N. Kypotin, I. A. Koop, A. P. Lysenko, A. V. Otboev, E. A. Perevedentsev, V. P. Prosvetov, Yu. A. Rogovsky, A. L. Romanov, A. I. Senchenko, A. N. Skrinsky, Yu. M. Shatunov, and D. B. Schwartz, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **13**, 995 (2016).
3. M. N. Achasov, S. E. Baruk, K. I. Beloborodov, A. V. Berdyugin, A. V. Bozhenok, A. D. Bukin, D. A. Bukin, S. V. Burdin, T. V. Dimova, S. I. Dolinsky, V. P. Druzhinin, M. S. Dubrovin, I. A. Gaponenko, V. B. Golubev, V. N. Ivanchenko, A. A. Korol, *et al.*, *Phys. Lett. B* **479**, 53 (2000).
4. R. R. Akhmetshin, E. V. Anashkin, M. Arpagaus, V. M. Aulchenko, V. S. Banzarov, L. M. Barkov, N. S. Bashtovoy, A. E. Bondar, D. V. Bondarev, A. V. Bragin, D. V. Chernyak, A. S. Dvoretzky, S. I. Eidelman, G. V. Fedotovitch, N. I. Gabyshev, A. A. Grebeniuk, *et al.*, *Phys. Lett. B* **462**, 380 (1999).
5. KLOE Collab. (F. Ambrosino *et al.*), *Phys. Lett. B* **681**, 5 (2009).
6. R. R. Akhmetshin, V. M. Aulchenko, V. Sh. Banzarov, A. Baratt, L. M. Barkov, S. E. Baru, N. S. Bashtovoy, A. E. Bondar, D. V. Bondarev, A. V. Bragin, S. I. Eidelman, D. A. Epifanov, G. V. Fedotovitch, D. A. Gorbachev, A. A. Grebeniuk, D. N. Grigoriev, *et al.*, *Phys. Lett. B* **562**, 173 (2003).
7. M. Ablikim *et al.* (BESIII Collab.), *Phys. Rev. D* **94**, 072005 (2016).
8. B. Aubert *et al.* (BaBar Collab.), *Phys. Rev. D* **73**, 052003 (2006).
9. R. R. Akhmetshin, A. N. Amirkhanov, A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, V. Sh. Banzarov, N. S. Bashtovoy, D. E. Berkaev, A. E. Bondar, A. V. Bragin, S. I. Eidelman, D. A. Epifanov, L. B. Epshteyn, A. L. Erofeev, G. V. Fedotovitch, S. E. Gayazov, A. A. Grebenuk, *et al.*, *Phys. Lett. B* **773**, 150 (2017).
10. M. N. Achasov, A. Yu. Barnyakov, K. I. Beloborodov, A. V. Berdyugin, A. G. Bogdanchikov, A. A. Botov, T. V. Dimova, V. P. Druzhinin, V. B. Golubev, V. P. Kardapoltsev, A. G. Kharlamov, A. A. Korol, S. V. Koshuba, D. P. Kovrizhin, A. S. Kupich, R. A. Litvinov, *et al.*, *Phys. Rev. D* **99**, 112004 (2019).
11. A. Donnachie and Yu. S. Kalashnikova, *Phys. Rev. D* **60**, 114011 (1999).
12. F. E. Close, A. Donnachie, and Yu. S. Kalashnikova, *Phys. Rev. D* **65**, 092003 (2002).
13. E. A. Кураев, В. С. Фадин, *ЯФ* **41**, 733 (1985) [*Sov. J. Nucl. Phys.* **41**, 466 (1985)].
14. M. Achasov *et al.* (SND Collab.), *Phys. Rev. D* **93**, 092001 (2016).

STUDY OF THE PROCESS $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ IN THE ENERGY RANGE $\sqrt{s} = 1.05\text{--}2.00\text{ GeV}$

M. N. Achasov^{1),2)}, A. Yu. Barnyakov¹⁾, A. A. Baykov^{1),2)}, K. I. Beloborodov^{1),2)},
A. V. Berdyugin^{1),2)}, A. G. Bogdanchikov¹⁾, A. A. Botov¹⁾, V. B. Golubev¹⁾, T. V. Dimova^{1),2)},
V. P. Druzhinin^{1),2)}, V. N. Zhabin^{1),2)}, L. V. Kardapoltsev^{1),2)}, D. P. Kovrizhin^{1),2)},
A. A. Korol^{1),2)}, A. S. Kupich¹⁾, K. A. Martin^{1),2)}, N. A. Melnikova¹⁾, N. Yu. Muchnoi^{1),2)},
A. E. Obrazovsky¹⁾, E. V. Pakhtusova¹⁾, K. V. Pugachev^{1),2)}, Ya. S. Savchenko^{1),2)},
S. I. Serednyakov^{1),2)}, Z. K. Silagadze^{1),2)}, I. K. Surin¹⁾, Yu. V. Usov¹⁾,
A. G. Kharlamov^{1),2)}, and D. A. Shtol^{1),2)}

¹⁾*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia*

²⁾*Novosibirsk State University, Russia*

Process $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ has been studied in the energy range 1.05–2.00 GeV using the data with integrated luminosity 94.5 pb⁻¹ collected by the SND detector at the VEPP-2000 e^+e^- collider. The cross section of this process was measured for the first time and it was shown that its dominant intermediate mechanism is the transition through intermediate state $\omega\eta$. The measured cross section of the subprocess $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ is consistent with previous measurements in the channel $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$. With a significance of 5.7 σ , it was found that the process $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ is not completely described by hadron intermediate states like VP . The cross section was measured for this missing contribution, which can originate from radiation processes, for example, $e^+e^- \rightarrow a_0(1450)\gamma$. It is 15–20 pb in a wide energy range from 1.3 to 1.9 GeV.