

## ВЫДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ ПО ВРЕМЕНИ В КАЛОРИМЕТРЕ

© 2020 г. М. Н. Ачасов<sup>1),2)</sup>, А. Ю. Барняков<sup>1)</sup>, А. А. Байков<sup>1),2)</sup>, К. И. Белобородов<sup>1),2)</sup>,  
А. В. Бердюгин<sup>1),2)</sup>, А. Г. Богданчиков<sup>1)</sup>, А. А. Ботов<sup>1)</sup>, В. Б. Голубев<sup>1)</sup>,  
Т. В. Димова<sup>1),2)</sup>, В. П. Дружинин<sup>1),2)</sup>, В. Н. Жабин<sup>1)</sup>, В. В. Жуланов<sup>1),2)</sup>,  
Л. В. Кардапольцев<sup>1),2)</sup>, Д. П. Коврижин<sup>1)</sup>, А. А. Король<sup>1),2)</sup>, А. С. Купич<sup>1)</sup>,  
К. А. Мартин<sup>1)</sup>, Н. А. Мельникова<sup>1)</sup>, Н. Ю. Мучной<sup>1),2)</sup>, А. Е. Образовский<sup>1)</sup>,  
Е. В. Пахтусова<sup>1)</sup>, К. В. Пугачев<sup>1),2)</sup>, Я. С. Савченко<sup>1),2)</sup>, С. И. Середняков<sup>1),2)\*</sup>,  
З. К. Силагадзе<sup>1),2)</sup>, И. К. Сурин<sup>1)</sup>, Ю. В. Усов<sup>1)</sup>, А. Г. Харламов<sup>1),2)</sup>, Д. А. Штоль<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.; после доработки 13.04.2020 г.; принята к публикации 13.04.2020 г.

В эксперименте с детектором СНД на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-2000 для выделения событий процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  измерялось время запаздывания сигнала от нерелятивистских антинейтронов в каждом счетчике многоканального калориметра на 1640 кристаллах NaI(Tl). Временное разрешение для событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  составляет 0.8 нс. Измеренный временной спектр запаздываний сигнала от антинейтронов в калориметре при энергии в с.ц.м. 1902 МэВ согласуется с расчетом.

DOI: 10.31857/S004400272006001X

### I. ВВЕДЕНИЕ

Нуклоны (нейтрон и протон) составляют основу вещества, и их свойства, в частности внутренняя структура, всегда были предметом экспериментального и теоретического исследования. Электромагнитная структура нуклонов описывается формфакторами и измеряется при взаимодействии виртуального фотона с нуклоном. Для протона электромагнитные формфакторы измерены достаточно подробно, но для нейтрона экспериментальные данные пока недостаточны. В особенности это относится к формфакторам во времениподобной области, которые могут измеряться в процессе  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  [1, 2]. Выделению нейтрон-антинейтронных событий вблизи порога их рождения по времени в калориметре детектора СНД посвящена работа.

### II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент по изучению процесса

$$e^+e^- \rightarrow n\bar{n} \quad (1)$$

проводился на коллайдере ВЭПП-2000 [3] с детектором СНД [4] в интервале энергии вблизи порога этого процесса  $E = 1.8\text{--}2.0$  ГэВ. Главной частью детектора СНД является сферический электромагнитный калориметр на основе 1640 кристаллов NaI(Tl), который использовался в настоящей работе как детектор событий  $n\bar{n}$ . Основным сигналом дают антинейтроны, которые аннигилируют с энергосодержанием в калориметре около 1 ГэВ. Их скорость вблизи порога порядка  $0.1 c$  ( $c$  — скорость света), и сигнал в калориметре задержан, например, по сравнению с сигналом от фотонов в реакции  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  на 5–10 нс в зависимости от точки аннигиляции антинейтрона в калориметре. Эта задержка используется для выделения процесса (1). Для измерения времени была модернизирована электроника калориметра [5]. Сигнал с фотоприемника интегрируется с постоянной времени  $\simeq 0.5$  мкс и оцифровывается параллельным аналого-цифровым преобразователем (flash ADC) с тактовой частотой 36 МГц (утроенная частота обращения пучка в коллайдере). При обработке оцифрованного сигнала вычисляется его амплитуда и время задержки относительно сигналов от калибровочного процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ .

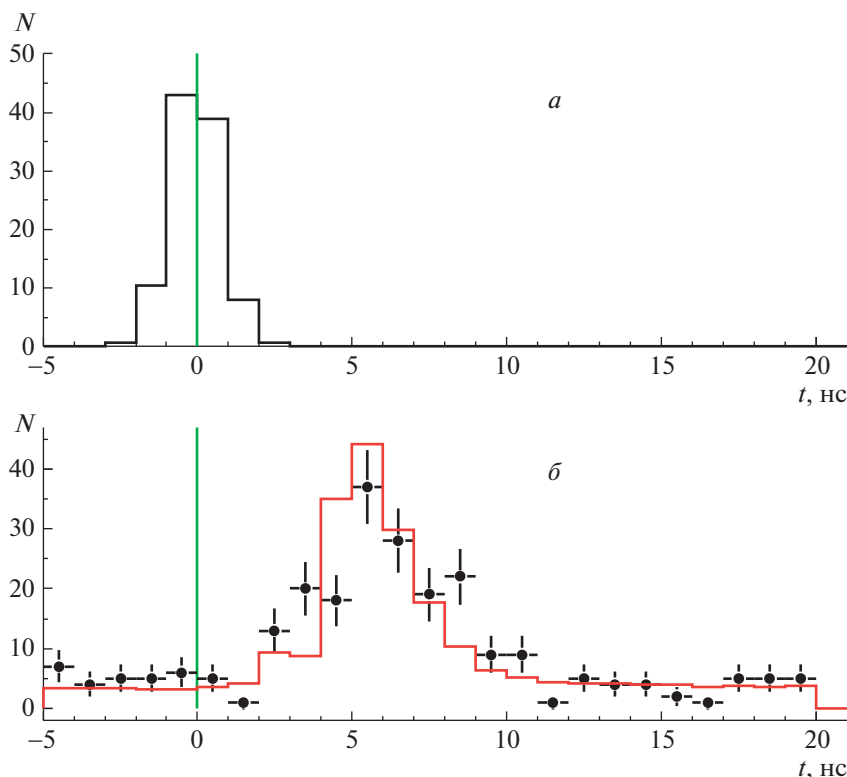
### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При отборе событий  $n\bar{n}$  требуется отсутствие заряженных частиц, большое энерговыделение в

<sup>1)</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

<sup>2)</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

\*E-mail: S. I. Serednyakov@inp.nsk.su



**Рис. 1.** Результаты испытаний системы измерения времени: *a* — временной спектр событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ , вертикальная линия соответствует нулевой отметке времени относительно калибровочных событий процесса упругого рассеяния  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ; *б* — временной спектр отобранных событий процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ , точки с ошибками — эксперимент, гистограмма — моделирование.

калориметре, большой нескомпенсированный импульс, измеренный в калориметре, и условия, подавляющие космический фон. Применение этих условий отбора позволяет уменьшить число  $n\bar{n}$ -кандидатов, среди которых, кроме событий  $n\bar{n}$ , присутствуют пучковый и космический фоны, до  $\sim 100$  соб./пбн<sup>-1</sup>.

Временное разрешение калориметра измерялось на событиях процесса  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  (рис. 1*a*) и составило 0.8 нс. Время события определялось усреднением измеренного времени с кристаллов выделением. Временное распределение для кандидатов в  $n\bar{n}$ -события при энергии 1902 МэВ показано на рис. 1*б*. События, распределенные по времени равномерно, являются космическим фоном. Сигнал от  $n\bar{n}$ -событий виден справа от нуля в диапазоне до 10 нс. Ширина распределения объясняется разбросом точек аннигиляции вдоль трека антинейтрона: от вакуумной камеры (радиус 2 см) до третьего слоя калориметра (радиус 60 см). Для сравнения на рис. 1*б* показано расчетное распределение [6], которое удовлетворительно согласуется с измеренным.

Всего в гистограмме на рис. 1*б* найдено  $N = 124 \pm 12$   $n\bar{n}$ -событий. Сечение процесса (1) вы-

числяется по формуле:

$$\sigma_{nn} = N/[\varepsilon L(1 + \delta)], \quad (2)$$

где  $L = 1.8$  пбн<sup>-1</sup> — светимость,  $\varepsilon \simeq 0.18$  — эффективность регистрации,  $1 + \delta \simeq 0.8$  — радиационная поправка. Вычисленное по формуле (2) сечение равно 0.5 нбн и не противоречит предыдущим измерениям [1, 2, 7].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-2000 с детектором СНД выделялся процесс  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  по временной задержке сигнала с калориметра. Для измерения времени в каждый канал калориметра СНД был установлен flash ADC, оцифровывающий форму импульса. Временная задержка определялась при обработке этого импульса. Временное разрешение событий, измеренное по процессу  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ , составило 0.8 нс. Применение этой техники позволило уверенно выделить  $n\bar{n}$ -события, задержанные на 5–10 нс относительно событий  $\gamma\gamma$ . Метод может применяться для идентификации медленных частиц ( $\pi, K^\pm, K_L, p$ ), рождающихся в  $e^+e^-$ -аннигиляции на ВЭПП-2000.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00147А.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Antonelli *et al.* (FENICE Collab.), Nucl. Phys. B **517**, 3 (1998).
2. M. N. Achasov *et al.* (SND Collab.), Phys. Rev. D **90**, 112007 (2014).
3. P. Yu. Shatunov *et al.*, Phys. Part. Nucl. Lett. **13**, 995 (2016).
4. 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. Shwartz, A. A. Varkovich, and I. M. Zemlyansky, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **598**, 31 (2009); V. M. Aulchenko, A. G. Bogdanchikov, D. A. Bukin, T. V. Dimova, V. P. Druzhinin, P. V. Filatov, V. B. Golubev, A. G. Kharlamov, A. A. Korol, S. V. Koshuba, A. E. Obrazovsky, E. V. Pakhtusova, V. M. Popov, S. I. Serednyakov, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **598**, 102 (2009); A. Yu. Barnyakov, M. Yu. Barnyakov, K. I. Beloborodov, V. S. Bobrovnikov, A. R. Buzykaev, A. F. Danilyuk, V. B. Golubev, V. L. Kirillov, A. A. Kononov, E. A. Kravchenko, A. P. Onuchin, K. A. Martin, S. I. Serednyakov, and V. M. Vesenev, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 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 Phys. Res. A **598**, 340 (2009).
5. M. N. Achasov, V. M. Aulchenko, A. G. Bogdanchikov, V. P. Druzhinin, V. B. Golubev, A. A. Korol, S. V. Koshuba, D. P. Kovrizhin, S. I. Serednyakov, I. K. Surin, A. I. Tekut'ev, and Yu. V. Usov, JINST **10**, T06002 (2015).
6. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Berrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **506**, 250 (2003); J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce Dubois, M. Asai, G. Berrand, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytrasek, G. A. P. Cirrone, G. Cooperman, G. Cosmo, G. Guttone, G. G. Daquino, M. Donszelmann, *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Science **53**, 270 (2006).
7. V. P. Druzhinin and S. I. Serednyakov, EPJ Web Conf. **212**, 07007 (2019), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921207007>

## SELECTION OF THE $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ PROCESS USING TIME MEASUREMENTS IN THE CALORIMETER

M. N. Achasov<sup>1),2)</sup>, A. Yu. Barnyakov<sup>1)</sup>, A. A. Baykov<sup>1),2)</sup>, K. I. Beloborodov<sup>1),2)</sup>,  
A. V. Berdyugin<sup>1),2)</sup>, A. G. Bogdanchikov<sup>1)</sup>, A. A. Botov<sup>1)</sup>, V. B. Golubev<sup>1)</sup>, T. V. Dimova<sup>1),2)</sup>,  
V. P. Druzhinin<sup>1),2)</sup>, V. N. Zhabin<sup>1)</sup>, V. V. Zhulanov<sup>1),2)</sup>, L. V. Kardapoltsev<sup>1),2)</sup>,  
D. P. Kovrizhin<sup>1)</sup>, A. A. Korol<sup>1),2)</sup>, A. S. Kupich<sup>1)</sup>, K. A. Martin<sup>1)</sup>, N. A. Melnikova<sup>1)</sup>,  
N. Yu. Muchnoi<sup>1),2)</sup>, A. E. Obrazovsky<sup>1)</sup>, E. V. Pakhtusova<sup>1)</sup>, K. V. Pugachev<sup>1),2)</sup>,  
Ya. S. Savchenko<sup>1),2)</sup>, S. I. Serednyakov<sup>1),2)</sup>, Z. K. Silagadze<sup>1),2)</sup>, I. K. Surin<sup>1)</sup>, Yu. V. Usov<sup>1)</sup>,  
A. G. Kharlamov<sup>1),2)</sup>, D. A. Shtol<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

In experiment with the SND detector at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider to select events of the  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  process the signal delay time from nonrelativistic antineutrons has been measured in each channel of the NaI(Tl) 1640 crystals calorimeter. The time resolution for events of  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  reaction is 0.8 ns. The measured antineutrons delay time spectrum at the collider c.m. energy 1902 MeV is in agreement with expectations.