

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

РЗ-87-131

С.Б.Борзаков, Ю.Н.Покотилловский, Д.М.Хазинс

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР  
ПРИ ЗАХВАТЕ ПРОТОНАМИ  
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

Направлено в журнал "Ядерная физика".

**1987**

Вероятность внутренней парной конверсии при захвате нейтронов протонами до настоящего времени не измерена, однако эта величина интересна с двух точек зрения. Во-первых, в появившейся недавно теоретической работе <sup>/1/</sup> рассчитанная величина этой вероятности  $2,7 \cdot 10^{-3}$  противоречит как старому расчету <sup>/2/</sup>, данному результат  $3 \cdot 10^{-4}$ , так и всей совокупности вычислений и экспериментальных данных по коэффициентам парной конверсии для переходов различной мультипольности в ядрах (см. обзор <sup>/3/</sup>). С другой стороны, недавние наблюдения узких коррелированных пиков в энергетических спектрах позитронов и электронов, испускаемых из сверхтяжелых систем при столкновении тяжелых ионов вблизи кулоновского барьера <sup>/4/</sup>, могут быть интерпретированы как распад нейтральной частицы с массой

1,8 МэВ. Возможными кандидатами для такой частицы могут быть "стандартный" <sup>/5/</sup> и более поздние варианты аксиона <sup>/6,7/</sup>. Время жизни аксиона

$$\tau(a \rightarrow e^+e^-) = 4\pi G_F^{-2} \chi^2 m_a^2 (m_a^2 - 4m_e^2)^{-4/2} \quad (1)$$

и масса

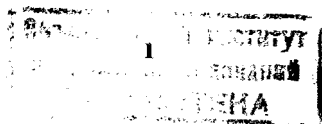
$$m_a = 25 N (\chi + \frac{1}{\chi}) \quad (2)$$

связаны с параметрами теории:  $N$  - числом пар кварков ( $N = 3$  в "стандартной" модели <sup>/5/</sup>) и  $\chi$  - отношением вакуумных средних двух хиггсовских дублетов. При  $m_a = 1,8$  МэВ  $\chi = 0,042$ , что дает  $\tau_a = 5 \cdot 10^{-12}$  с. Такая частица могла бы испускаться в конкуренции с внутренней парной конверсией в магнитных гамма-переходах <sup>/8/</sup>.

В нашей работе измерялось рождение  $e^+e^-$ -пар в изовекторном  $M1$  переходе  $n + p \rightarrow d + \gamma$  ( $E_\gamma = 2,22$  МэВ) методом счета  $\gamma\gamma$ -совпадений при аннигиляции позитронов в мишени.

Эксперимент проводился на нейтронном пучке трехосного нейтронного спектрометра на реакторе ИР-8 Института атомной энергии им. И. В. Курчатова <sup>/9/</sup>. Нейтроны монохроматизировались отражением от монокристалла меди. Медленные нейтроны ( $E = 50$  мэВ, плотность потока  $\sim 5 \cdot 10^6$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) попадали на мишень из полиэтилена площадью 25x25 мм и толщиной 5 или 10 мм, окруженную графитом толщиной 3 мм для торможения позитронов. Оценки показали, что практически все позитроны останавливались в мишени. Гамма-кванты с

$E_\gamma = 2,22$  МэВ и пара квантов от аннигиляции позитронов в мишени регистрировались с помощью двух сцинтилляционных детекторов с кристаллами  $NaI(Tl)$  ( $\phi 100 \times 100$  мм - детектор 1 и  $\phi 150 \times 100$  - детектор 2), находившихся по разные стороны от мишени под углом  $90^\circ$  к пучку нейтронов на расстоянии 20 см от мишени. Кроме защиты от



$\gamma$ -излучения, оба детектора были окружены со всех сторон защитой от нейтронов из  $^{252}\text{Cf}$  толщиной 8 мм, а мишень также помещалась в трубку из  $^{252}\text{Cf}$   $\varnothing$  90x500 мм толщиной 8 мм.

При регистрации гамма-гамма совпадений (разрешающее время  $\tau = 60$  нс) измерялся амплитудный спектр сигналов в детекторе 2. Сигналы от детектора 1 ограничивались по амплитуде в пределах ширины фотопика с  $E_\gamma = 511$  кэВ с помощью дискриминаторов. Порог регистрации  $\gamma$ -квантов детектором 2 соответствовал  $E_\gamma = 200$  кэВ. Интенсивность  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma = 2,22$  МэВ определялась путем измерения спектра амплитуд детектором 1.

Такие же измерения проводились при помещении внутрь мишени позитронного источника  $^{22}\text{Na}$ , излучающего кроме позитронов  $\gamma$ -кванты с  $E_\gamma = 1,27$  МэВ. Скорость счета в фотопике при измерениях интенсивности квантов с  $E_\gamma = 2,22$  МэВ равна

$$N_{\gamma}(2,22) = I_{\gamma} \Omega_1 E_1(2,22) \kappa_1(2,22), \quad (3)$$

а скорость счета совпадений квантов с энергией 511 кэВ

$$N_{\beta\beta}(0,51) = 2 \cdot I_{\beta\beta} \Omega_2 E_2(0,51) \kappa_2(0,51) \kappa_2(0,51), \quad (4)$$

где  $I_{\gamma}$  - интенсивность квантов с  $E_\gamma = 2,22$  МэВ, вылетающих из мишени,  $I_{\beta\beta}$  - интенсивность излучения пар квантов с  $E_\gamma = 511$  кэВ, образующихся при аннигиляции позитронов в мишени.  $\Omega_1, E_1(2)$ ,  $\kappa_1(2)$  - соответственно телесный угол, эффективность регистрации в фотопике и коэффициенты поглощения квантов на пути из мишени в детекторы 1 и 2 для энергий, указанных в скобках.

Аналогичные соотношения можно написать для случая, когда в мишени находится источник  $^{22}\text{Na}$ :

$$N_{\gamma}^* = I_{\gamma}^* \Omega_1 E_1(1,27) \kappa_1(1,27), \quad (5)$$

$$N_{\beta\beta}^* = 2 I_{\beta\beta}^* \Omega_2 E_2(0,51) \kappa_2(0,51) \kappa_2(0,51). \quad (6)$$

Счет совпадений определяется только телесным углом  $\Omega_2$ , поскольку он вдвое меньше  $\Omega_1$ .

Из этих выражений легко получить искомую величину

$$\beta = \frac{I_{\beta\beta}}{I_{\gamma}} = \frac{N_{\beta\beta}(0,51) N_{\gamma}^*(1,27) E_2(2,22) \kappa_2(2,22)}{N_{\gamma}(2,22) N_{\beta\beta}^*(0,51) E_1(1,27) \kappa_1(1,27)} \quad (7)$$

Таким образом, для получения искомой вероятности необходимо знать интенсивности в фотопике соответствующих линий при измерениях в нейтронном пучке и от источника  $^{22}\text{Na}$ , и отношение эффективностей регистрации в фотопике и коэффициентов поглощения  $\gamma$ -квантов

на пути из мишени в детектор 1 для энергий 1,27 и 2,22 МэВ. Соответствующие величины брались из литературы [10]. Заметим, что в соответствии с (7) окончательный результат в первом приближении не зависит от толщины мишени, телесных углов детекторов и эффективности детектора 2.

При определении величин  $N_{\gamma}$  и  $N_{\beta\beta}$  фон измерялся при помещении на пути пучка нейтронов пластины из  $^{252}\text{Cf}$ , ослабляющей поток медленных нейтронов более чем в 100 раз. При этом поток  $\gamma$ -квантов и быстрых нейтронов от реактора уменьшался примерно на 1% и 5% соответственно (расчетная оценка). Фон при измерениях в 3-4 раза превышает эффект. Величина эффекта должна быть поправлена на вклад внешней парной конверсии квантов с  $E_\gamma = 2,22$  МэВ в защите из  $^{252}\text{Cf}$ , окружающей мишень, и в веществе мишени. Для учета этого приводились измерения вероятности парной конверсии при помещении в мишень источников  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 1,8$  МэВ ( $^{83}\text{Y}$ ) и  $E_\gamma = 2,8$  МэВ ( $^{24}\text{Na}$ ). При этом учитывались позитроны бета-распада (0,21%) [11] и вклад внутренней парной конверсии в  $N_{\beta\beta}^*(^{24}\text{Na})$  ( $7 \cdot 10^{-4}$ ) [3]. Измерения для каждого из этих источников вероятности конверсии приводились в соответствии с известным энергетическим ходом сечения образования пар к величине энергии  $E_\gamma = 2,22$  МэВ и усредненный результат вычитался из первоначально измеренной вероятности. Эта поправка составила величину  $(0,52 \pm 0,13) \cdot 10^{-3}$ . Окончательно полученная величина вероятности реакции  $n + \beta \rightarrow p + e + \bar{\nu}$  по отношению к радиационному захвату

$$\beta = (0,58 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}.$$

Эта величина противоречит расчету (1) и согласуется с [2] и [3]. Если принять, что вероятность внутренней парной конверсии равна  $0,3 \cdot 10^{-3}$  [2], то вероятность рождения нейтральной частицы с временем жизни  $\tau < 5 \cdot 10^{-11}$  с не превышает  $0,7 \cdot 10^{-3}$  (90% у.д.). Для исследуемой реакции расчет предсказывает [8] вероятность рождения аксиона  $2 \cdot 10^{-3}$ , что в 3 раза превышает экспериментальный результат.

В появившейся в материалах конференции [12] аннотации работы по измерению этой величины на нейтронном пучке реактора Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль) также сообщается об отсутствии аксиона, однако не приводится численный результат измерений.

Авторы благодарны А.Б.Попову, Г.С.Самосвату и Э.И.Шарапову, предоставившим спциализированные детекторы.

Авторы выражают признательность А.Ю.Румянцеву, А.С.Иванову, Н.И.Митрофанову за предоставление нейтронного пучка на установке [9], В.И.Морозову, Л.Н.Болдаренко, В.Л.Кузнецову

и С.В. Жукову за оказание гостеприимства, а также В.М. Назарову, М.В. Фронтасевой и С.Ф. Гундориной за проведение активационного анализа чистоты полиэтилена мишени.

#### Литература

1. Рекало М.П. - Ядерная физика, 1985, 42(2), 393.
2. Берестецкий В.Б., Шмушкевич И.М. - ИЭТФ, 1949, 19(7), 591; Ахлезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. 2-е изд., М., 1959, с. 442.
3. Schluter P., Soff G., Greiner W. - Phys. Rep. 1981, 75(6), 327
4. Cowan T. et al. - Phys. Rev. Lett. 1986, 56(5), 444.
5. Donnelly T. et al. - Phys. Rev. 1978, D18, 1607.
6. Peccei R.D., Tai Tsun Wu, Yanagida T. - Phys. Lett. 1986, B172, 435.
7. Krauss L.M., Wilczek F. - Phys. Lett. 1986, B173, 189.
8. Mukhopadhyay N.C., Zehnder A. - Phys. Rev. Lett. 1986, 56, 206.
9. Головин А.Е. и др. - ПТЭ, 1978, (4), 31.
10. Экспериментальные исследования полей гамма-излучения и нейтронов. Под ред. Ю.А. Егорова. М.: Атомиздат, 1974.
11. Lederer C.M., Shirley V.S. Tables of Isotopes, N-Y, 1978.
12. Freedman S.F. et al. In: International Symp. on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei (Heidelberg, 1-5 July) p. 162 (abstracts).

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 февраля 1987 года.

Борзаков С.Б., Покотиловский Ю.Н., Хазинс Д.М.  
Измерение вероятности излучения электрон-позитронных пар при захвате протонами тепловых нейтронов

P3-87-131

Измерения проводились путем регистрации спектра  $\gamma\gamma$ -совпадений при захвате тепловых нейтронов  $E = 50$  мэВ/ протонами полиэтиленовой мишени. Гамма-спектры измерялись с помощью двух сцинтилляционных детекторов с кристаллами NaI(Tl). Измеренная величина вероятности парной конверсии оказалась равной  $5,8 \pm 2,4 \cdot 10^{-4}$ , что согласуется с современными данными по вероятности внутренней парной конверсии при  $\gamma$ -переходах в ядрах и противоречит недавним расчетам этой величины в рамках релятивистского импульсного приближения. Полученная экспериментальная величина вероятности исключает также рождение в этой реакции короткоживущего аксиона с временем жизни  $\tau_a < 5 \cdot 10^{-11}$  с и массой  $m_a = 1,8$  МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С. Виноградовой

Borzakov S.B., Pokotilovskij Yu.N., Khazins D.M.  
Measurement of the Probability of Electron-Positron Pair Radiation at the Capture of Thermal Protons by Neutrons

P3-87-131

Measurements were performed by registration of  $\gamma\gamma$ -coincidence spectrum at the capture of thermal neutrons ( $E = 50$  MeV) with polyethylene target protons. Gamma-spectra were measured by means of two scintillation detectors with NaI(Tl) crystals. The pair conversion probability value obtained is equal to  $(5.8 \pm 2.4) \cdot 10^{-4}$ . It agrees with up-to-date data on the probability of internal pair conversion at  $\gamma$ -transitions in nuclei and contradicts the recent calculations of this value within the relativistic momentum approximation. The obtained experimental value of probability excludes also the production in this reaction of a short-lived axion with  $\tau_a < 5 \cdot 10^{-11}$  s and  $m_a = 1.8$  MeV.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987