

## О ПОИСКЕ ПЕРЕХОДОВ НЕЙТРИНО В СТЕРИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕНСИВНОГО БЕТА-ИСТОЧНИКА

*А. Ю. Оралбаев, М. Д. Скорохватов, О. А. Титов\**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Приведены результаты вычисления бета-спектра некоторых ветвей распада  $^{144}\text{Pr}$ , представляющие интерес для восстановления спектра антинейтрино от источника  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ , который предполагается использовать в эксперименте SOX по поиску стерильных нейтрино. Проведен анализ основных факторов, влияющих на бета-спектр, даны способы их вычисления, выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

We present beta-spectrum calculations for two  $^{144}\text{Pr}$  decay branches needed to obtain antineutrino spectrum of  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$  source that will be used in the SOX experiment. We analyze the factors that affect the beta spectrum, give their calculation methods, and compare the calculations with experiment.

PACS: 14.60.Lm; 23.40.Bw

### ВВЕДЕНИЕ

В некоторых нейтринных экспериментах наблюдается ряд аномалий: ускорительная, галлиевая, реакторная. В реакторных экспериментах есть указания на дефицит потока антинейтрино на небольших расстояниях от реактора на уровне 5–6%. Реакторная аномалия [1] может быть объяснена как недостаточной точностью в определении спектров реакторных антинейтрино (в особенности от запрещенных переходов), так и проявлениями новой физики, например, переходами нейтрино в стерильные состояния. Измерения взаимодействий реакторных антинейтрино проводятся по реакции обратного бета-распада с порогом 1,8 МэВ. Как было показано в [2], сечение этого процесса вычисляется с точностью около 1%. Экспериментальные значения сечения известны с худшей точностью, в основном из-за неопределенности

---

\*E-mail: titov-o@mail.ru

в спектральном составе реакторных антинейтрино. Для более точного измерения сечения было предложено использовать интенсивный радиоактивный источник [3, 4] с известным спектром. Одним из наиболее перспективных является источник  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ , который планируется использовать в эксперименте SOX [5].

В эксперименте с источником  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$  фактическим источником антинейтрино является  $^{144}\text{Pr}$ , так как это ядро имеет два перехода с энергиями выше порога реакции обратного бета-распада 1,8 МэВ. Первый переход — неуникальный гамов-теллеровский первого запрещения  $0^- \rightarrow 0^+$  с граничной энергией 2997,5 кэВ и относительной интенсивностью 97,9%. Второй переход — уникальный гамов-теллеровский первого запрещения  $0^- \rightarrow 2^+$  с граничной энергией 2301,0 кэВ и относительной интенсивностью 1,040%.

Для эксперимента SOX необходимо провести точное вычисление спектра антинейтрино от источника. Цель данной работы — оценка точности вычисления спектров бета-распада, обсуждение факторов, влияющих на спектр  $^{144}\text{Pr}$ . Для этого были проведены вычисления бета-спектров указанных переходов, допускающие сравнение с известными экспериментальными данными.

### ТОЧНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ БЕТА-СПЕКТРОВ

Спектр электронов для разрешенных распадов определяется формулой

$$N_{\beta}(W) = Kp^2(W - W_0)^2 F(Z, W), \quad (1)$$

где  $K$  — нормировочная константа;  $p$  — импульс электрона;  $W$  — полная энергия электрона в единицах  $m_e c^2$ ;  $W_0$  — граничная энергия в единицах  $m_e c^2$ ;  $F(Z, W)$  — функция Ферми. Спектр антинейтрино можно получить из формулы (1), заменив  $W$  на  $W_0 - W$ .

Функция Ферми учитывает влияние кулоновского поля дочернего ядра на бета-частицы. Аналитическое выражение для функции Ферми имеет вид

$$F(Z, W) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} e^{\pi\alpha ZW/p} \frac{|\Gamma(\gamma + i\alpha ZW/p)|^2}{\Gamma(2\gamma + 1)^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры;  $\gamma = \sqrt{1 - \alpha Z}$ ;  $R$  — радиус ядра;  $\Gamma$  — гамма-функция. Значения функции Ферми, полученные разными авторами [6–8], несколько различаются. Расхождения, по-видимому, вызваны тем, что при вычислениях использованы разные методы вычисления гамма-функции комплексного аргумента. Наиболее сильно различия проявляются для низких (порядка 1 кэВ) энергий электронов (и, следовательно, для антинейтрино с энергиями вблизи границы спектра). Для этой области энергий рекомендуется использовать точное выражение для гамма-функции [8].

В настоящей работе не требовалось высокой точности для низких энергий электронов, поэтому было использовано приближение, предложенное в [9,10]. Результаты вычислений для  $^{144}\text{Pr}$  согласуются с [6,8] в пределах 1% и с [7] — в пределах 10%.

В случае запрещенных переходов необходимо умножить выражение (1) на фактор формы  $C(W)$ , зависящий от типа перехода. В наших вычислениях использованы теоретически вычисленные значения  $C(W)$  из работы [11]. Отметим, что фактор формы, вообще говоря, зависит от структуры конкретного ядра, поэтому теоретические вычисления не всегда надежны. Как отмечается в [12], для  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Pr}$  теоретические вычисления для формы бета-спектров не согласуются с экспериментальными данными; кроме того, есть серьезные расхождения между разными экспериментами. В связи с этим для эксперимента SOX планируется провести дополнительные прецизионные измерения электронных спектров, из которых можно будет извлечь данные о факторе формы.

Для достижения высокой точности вычислений необходимо учесть следующие поправки: электромагнитную  $L(Z, W)$  и слабую  $C_A(Z, W)$  поправки на конечный размер дочернего ядра [13], поправку на экранировку со стороны атомных электронов  $S(Z, W)$  [14], радиационную поправку  $G(Z, W)$  [15], поправку на слабый магнетизм  $B(W)$  [11]. Отметим, что все поправки, кроме радиационной, одинаковы для электронов и антинейтрино. На рис. 1 и 2 показаны зависимости поправок для электронов от энергии для интересующих нас ветвей распада  $^{144}\text{Pr}$ .

На рис. 3 представлен график Кюри для ветви распада  $^{144}\text{Pr}$  с граничной энергией 2,3 МэВ, в котором учтены все перечисленные факторы. Также на графике приведены экспериментальные данные из работы [16]. Видно, что результаты вычислений в целом хорошо сходятся с экспериментом. В обла-

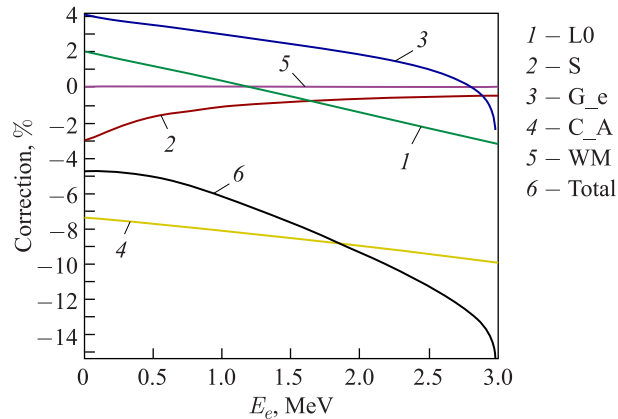


Рис. 1. Поправки к спектру электронов для главной ветви распада  $^{144}\text{Pr}$

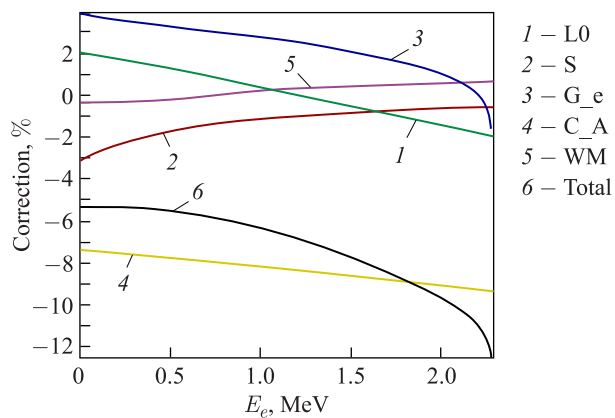


Рис. 2. Поправки к спектру электронов для ветви распада  $^{144}\text{Pr}$  с граничной энергией 2,3 МэВ

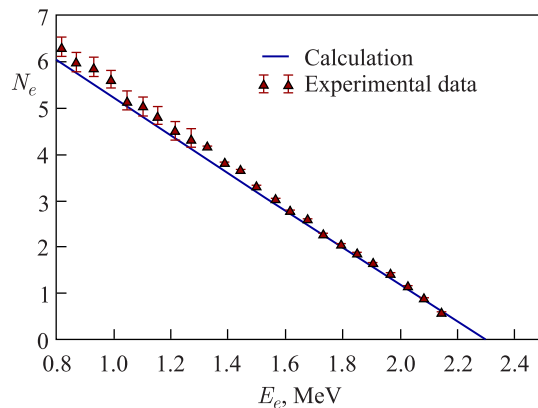


Рис. 3. График Кюри для ветви распада  $^{144}\text{Pr}$  с граничной энергией 2,3 МэВ

сти низких энергий наблюдается небольшое расхождение в пределах одной ошибки. С точки зрения эксперимента SOX интерес представляет именно эта область энергии, поэтому необходимо провести дополнительное исследование бета-спектра при низких энергиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ точности вычисления спектров бета-распада. Рассмотрен вопрос о функции Ферми, существенно влияющей на спектр. Вычислен спектр электронов для  $^{144}\text{Pr}$ , проведено сравнение с эксперимен-

тальными данными. В дальнейшем планируется вычислить спектр антинейтрино от  $^{144}\text{Pr}$  и провести усреднение сечения обратного бета-распада по этому спектру, что позволит определить спектр позитронов и полное число событий в эксперименте SOX.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-02-00616.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mention G. et al.* The Reactor Antineutrino Anomaly // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. P. 073006.
2. *Oralbaev A., Skorokhvatov M., Titov O.* The Inverse Beta-Decay: A Study of Cross Section // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 675, No. 1. P. 012003.
3. *Cribier M. et al.* Proposed Search for a Fourth Neutrino with a PBq Antineutrino Source // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. P. 201801.
4. *Gaffiot J. et al.* Experimental Parameters for a Cerium-144 Based Intense Electron Antineutrino Generator Experiment at Very Short Baselines // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 072005.
5. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino // *JHEP.* 2013. No. 8. P. 38.
6. *Behrens H., Jänecke J.* Numerical Tables for Beta-Decay and Electron Capture. Landolt-Bornstein New Ser. Berlin: Springer Verlag, 1969.
7. *Джелепов Б. С., Зырянова Л. Н., Суслов Ю. П.* Бета-процессы. Функции для анализа бета-спектров и электронного захвата. Л.: Наука, 1972.
8. *Semenov S. V. et al.* Contribution of the Lowest 1+ Intermediate State to the  $2\nu\beta\beta$ -Decay Amplitude // *Phys. At. Nucl.* 2000. V. 63. P. 1196.
9. *Wilkinson D. H.* Evaluation of Beta-Decay. Part III. The Complex Gamma Function // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1993. V. 335. P. 305.
10. *Wilkinson D. H.* Evaluation of Beta-Decay. Part IV. The Complex Gamma Function; Practicalities // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1995. V. 365. P. 203.
11. *Hayes A. C. et al.* Systematic Uncertainties in the Analysis of the Reactor Neutrino Anomaly // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 202501.
12. *Durero M. et al. (SOX Collab.).* The  $^{144}\text{Ce}$  Source for SOX // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 675, No. 1. P. 012032.
13. *Wilkinson D. H.* Evaluation of Beta-Decay // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1990. V. 290. P. 509.
14. *Huber P.* Determination of Antineutrino Spectra from Nuclear Reactors // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 84. P. 024617.
15. *Sirlin A.* General Properties of the Electromagnetic Corrections to the Beta-Decay of a Physical Nucleon // *Phys. Rev.* 1967. V. 164. P. 1767.
16. *Porter F. T., Day P. P.*  $0^-$  to  $0^+$  Beta-Transition  $^{144}\text{Pr} \rightarrow ^{144}\text{Nd}^*$  // *Phys. Rev.* 1959. V. 114. P. 1286.