

УДК 52-728:550.42

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПЕРВОЙ РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО CNO ЦИКЛА ДЕТЕКТОРОМ БОРЕКСИНО

© 2021 г. Л. Б. Безруков¹*, В. П. Заварзина¹, И. С. Карпиков¹,
А. С. Курлович¹, А. К. Межох¹, С. В. Силаева¹, В. В. Синев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: bezrukov@inr.acl.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Коллаборация Борексино наблюдала превышение скорости счета над ожидаемой скоростью счета событий от CNO-ν. Этот результат согласуется с предсказанием Гидридной модели Земли о вкладе рассеяния ⁴⁰K гео-антинейтрино на электронах в единичные события Борексино. Доля калия в Земле $1.5 \pm 1.0\%$ от массы Земли является наиболее вероятной величиной, которая обеспечивает наблюдаемое превышение скорости счета.

DOI: 10.31857/S0367676521040062

ВВЕДЕНИЕ

Впервые коллаборация Борексино доложила результат о детектировании солнечных нейтрино CNO цикла (CNO-ν) на международной конференции Neutrino2020 и затем опубликовала электронный препринт [1]. CNO-ν регистрируются в детекторе Борексино через реакцию рассеяния нейтрино на электронах сцинтиллятора. Электрон отдачи вызывает вспышку света в сцинтилляторе, параметры которой измеряются. В детекторе Борексино достигнуты уникально низкие фоны, что позволило выделять события от CNO-ν с высокой достоверностью. При выделении событий от CNO-ν использовались два метода анализа для разных интервалов энергии электронов отдачи: Counting Analysis (CA) и Multivariate fit (MF).

Мы будем использовать следующие обозначения.

Дифференциальный энергетический спектр скорости счета электронов отдачи в определенном объеме сцинтиллятора:

$$R'(E) = \frac{dR(E)}{dE}, \quad (1)$$

здесь E – энергия электрона отдачи при рассеянии нейтрино (или антинейтрино) на электроны.

Скорость счета электронов отдачи в энергетическом интервале $E_{min} - E_{max}$:

$$R(E_{min} - E_{max}) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R'(E)dE. \quad (2)$$

Полная скорость счета рассеяния нейтрино (или антинейтрино) на электронах без энергетического порога:

$$R = \int_0^{\infty} R'(E)dE. \quad (3)$$

Мы будем выражать $R(E_{min} - E_{max})$ и R в единицах: $cpd/100 t$ – количество событий в сутки в 100 тоннах сцинтиллятора.

Введем понятие эффективной энергии событий в энергетическом интервале:

$$E_{eff} = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} ER'(E) dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} R'(E) dE}. \quad (4)$$

Ожидаемая полная скорость счета рассеяния CNO-ν [2] (в Стандартной солнечной модели с высокой металличностью SSM HZ [3, 4] с учетом MSW-LMA эффекта [5, 6]):

$$R_{CNO} = 4.92 \pm 0.78 \text{ cpd}/100t (68\% \text{ CL}). \quad (5)$$

Для CA [1] использовался энергетический интервал от 0.74 до 0.85 МэВ. В результате была получена полная скорость счета рассеяния CNO-ν:

$$R_{CA} \pm \sigma(R_{CA}) = \frac{R_{CA}(0.74-0.85 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{CA}}{R_{CNO}(0.74-0.85 \text{ МэВ})} R_{CNO} = (6) \\ = 5.6 \pm 1.6 \text{ cpd}/100t,$$

где $R_{CA} (0.74-0.85 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{CA}$ – экспериментальная скорость счета CNO- ν подобных событий в энергетическом интервале от 0.74 до 0.85 МэВ.

Для MF [1] использовался энергетический интервал от 0.32 до 2.64 МэВ. В результате была получена полная скорость счета рассеяния CNO- ν :

$$\begin{aligned} R_{MF} \pm \sigma(R_{MF}) &= \\ &= \frac{R_{MF}(0.32-2.64 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{MF}}{R_{CNO}(0.32-2.64 \text{ МэВ})} R_{CNO} = \quad (7) \\ &= 7.2 - 1.7 + 3.0 \text{ cpd}/100t, \end{aligned}$$

где $R_{MF} (0.32-2.64 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{MF}$ – экспериментальная скорость счета CNO- ν подобных событий в энергетическом интервале от 0.32 до 2.64 МэВ.

В работе [7] был проанализирован новый источник CNO подобных событий, который появляется в рамках Гидридной модели Земли или Богатой водородом Земли [8]. Это – рассеяние гео-антинейтрино от распада изотопа ^{40}K . Целью данной работы является анализ экспериментальных данных (6), (7) с учетом возможного существования такого источника.

НОВЫЙ ИСТОЧНИК CNO ПОДОБНЫХ СОБЫТИЙ

В работе [9] был вновь проведен анализ возможного избытка CNO подобных событий от распада изотопа ^{40}K в Земле и приведены аргументы в пользу существования такого источника. В обеих работах [7, 9] было предсказано, что в детекторе Борексино можно ожидать избыток (1–4) $\text{cpd}/100t$. В этих работах был получен дифференциальные энергетические спектры скорости счета электронов отдачи от рассеяния гео-антинейтрино от распада изотопа ^{40}K для разных долей калия в Земле. На рис. 1 сплошная кривая – ожидаемый спектр от рассеяния CNO- ν $R'_{CNO}(E)$, пунктирная кривая – суммарный спектр от рассеяния CNO- ν и ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 1% от массы Земли, точечная кривая – суммарный спектр от рассеяния CNO- ν

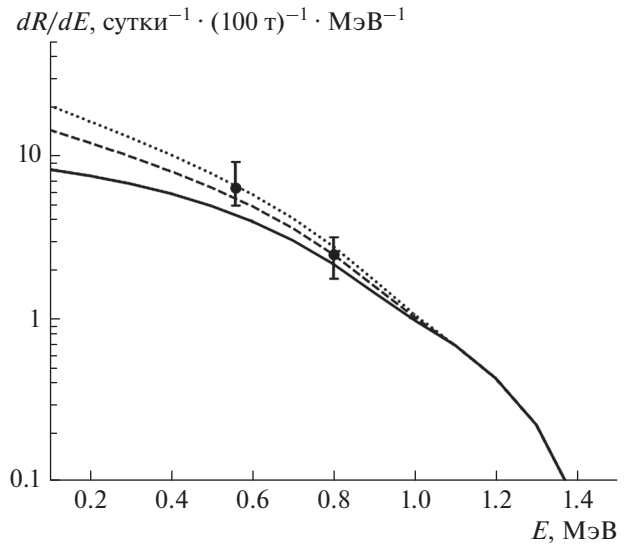


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры скорости счета электронов отдачи в 100 т сцинтиллятора детектора Борексино. Сплошная кривая – ожидаемый спектр от рассеяния CNO- ν . Пунктирная кривая – суммарный спектр от рассеяния CNO- ν и ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 1% от массы Земли. Точечная кривая – суммарный спектр от рассеяния CNO- ν и ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 2% от массы Земли. Точки – экспериментальные значения, пересчитанные из данных, полученных коллаборацией Борексино.

и ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 2% от массы Земли. Обращаем внимание, что спектры от распада изотопа ^{40}K оказались более мягкими по сравнению со спектром от рассеяния CNO- ν .

В работе [10] была найдена наиболее правдоподобная модель источников CNO подобных событий, удовлетворяющая экспериментальным данным о скорости счета CNO подобных событий (6), (7), при помощи критерия согласия Пирсена (χ тест). Для этого из (6), (7) были вычислены значения $R_{CA} (0.74-0.85 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{CA}$ и $R_{MF} (0.32-2.64 \text{ МэВ}) \pm \sigma_{MF}$. Эти значения были использованы для χ теста разных моделей источников CNO подобных событий:

$$\chi_i = \chi_{MF,i} + \chi_{CA,i} = \frac{|R_{MF}(0.32-2.64 \text{ МэВ}) - R_{model,i}(0.32-2.64 \text{ МэВ})|}{\sigma_{MF}} + \frac{|R_{CA}(0.74-0.85 \text{ МэВ}) - R_{model,i}(0.74-0.85 \text{ МэВ})|}{\sigma_{CA}}, \quad (8)$$

здесь индекс i означает номер модели источников CNO подобных событий.

В табл. 1 приводятся значения χ_i . Модель с $i = 1$ в качестве источников событий рассматривает только CNO- ν с $R = 4.9 \text{ cpd}/100t$. Сплошная кри-

вая на рис. 1 использовалась для вычисления $R_{model,1} (0.32-2.64 \text{ МэВ})$ и $R_{model,1} (0.74-0.85 \text{ МэВ})$.

Модель с $i = 2$ в качестве источников событий рассматривает только CNO- ν с $R = 5.6 \text{ cpd}/100t$, $R_{model,2} (0.32-2.64 \text{ МэВ}) = R_{model,1} (0.32-2.64 \text{ МэВ}) \cdot$

Таблица 1. χ_i для 6-ти различных моделей источников CNO подобных событий

i	Модель	$\chi_{MF,i} + \chi_{CA,i} = \chi_i$
1	Энергетический спектр CNO, $R = 4.9 \text{ cpd}/100t$ (сплошная кривая на рис. 1)	$1.33 + 0.44 = 1.77$
2	Энергетический спектр CNO, $R = 5.6 \text{ cpd}/100t$	$0.94 + 0.0 = 0.94$
3	Энергетический спектр CNO, $R = 7.2 \text{ cpd}/100t$	$0.0 + 1.0 = 1.0$
4	Энергетический спектр CNO + 1% K, $R = 7.05 \text{ cpd}/100 t$ (пунктирная кривая на рис. 1)	$0.51 + 0.0 = 0.51$
5	Энергетический спектр CNO + 1.5% K, $R = 8.1 \text{ cpd}/100 t$	$0.11 + 0.22 = 0.33$
6	Энергетический спектр CNO + 2% K, $R = 9.2 \text{ cpd}/100 t$ (точечная кривая на рис. 1)	$0.13 + 0.43 = 0.56$

$\cdot 5.6/4.9$ и $R_{model,2}$ (0.74–0.85 МэВ) = $R_{model,1}$ (0.74–0.85 МэВ) $\cdot 5.6/4.9$.

Модель с $i = 3$ рассматривает только CNO- ν , но с $R = 7.2 \text{ cpd}/100 t$. Согласно (5) это – маловероятная модель.

Модель с $i = 4$ рассматривает CNO- ν плюс ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 1% от массы Земли с $R = 7.05 \text{ cpd}/100 t$. Пунктирная кривая на рис. 1 использовалась для вычисления $R_{model,4}$ (0.32–2.64 МэВ) и $R_{model,4}$ (0.74–0.85 МэВ).

Модель с $i = 5$ рассматривает CNO- ν плюс ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 1.5% от массы Земли.

Модель с $i = 6$ рассматривает CNO- ν плюс ^{40}K гео-антинейтрино для доли калия в Земле равной 2% от массы Земли с $R = 9.2 \text{ cpd}/100 t$. Использовалась точечная кривая на рис. 1.

Из табл. 1 видно, что наиболее правдоподобной моделью источников CNO подобных событий, удовлетворяющей экспериментальным данным о скорости счета CNO подобных событий (6), (7), является модель с $i = 5$.

Мы вычислили эффективные энергии (4) для CA и MF, которые оказались равными $E_{eff, CA} = 0.8 \text{ МэВ}$ и $E_{eff, MF} = 0.56 \text{ МэВ}$, также мы вычислили значения:

$$\begin{aligned}
 R'_{CA}(E_{eff, CA}) \pm \sigma(R'_{CA}) &= \\
 = \frac{R_{CA} \pm \sigma(R_{CA})}{R_{CNO}} R'_{CNO}(E_{eff, CA}), & \\
 R'_{MF}(E_{eff, MF}) \pm \sigma(R'_{MF}) &= \\
 = \frac{R_{MF} \pm \sigma(R_{MF})}{R_{CNO}} R'_{CNO}(E_{eff, MF}) &
 \end{aligned} \quad (9)$$

и отложили их на рис. 1. Такое представление результатов измерения скорости счета CNO подобных событий очень наглядно. С использованием величин из (9) мы также провели χ тест для моде-

лей, показанных в табл. 1, и получили точно такие же значения χ_i .

Из табл. 1 видно, что функция χ от доли калия в Земле имеет минимум, поэтому можно оценить ошибку наиболее вероятной величины доли калия в Земле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные детектора Борексина о скорости счета CNO подобных событий (6), (7) могут быть интерпретированы как указание на наличие в Земле калия с массовой долей $1.5 \pm 1.0\%$ и наличия в Солнце CNO цикла с параметрами, ожидаемыми согласно SSM HZ с учетом MSW-LMA эффекта.

Авторы выражают благодарность Ф.Л. Безрукову, Л.А. Кузьмичеву и И.И. Ткачеву за интерес к работе и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agostini M., Altenmüller K., Appel S. et al. // arXiv: 2006.15115. 2020.
2. Agostini M., Altenmüller K., Appel S. et al. // arXiv: 2005.12829v2. 2020.
3. Vinyoles N., Serenelli A.M., Villante F.L. et al. // Astrophys. J. 2017. V. 835. No. 2. P. 202.
4. Villante F.L., Serenelli A.M. // arXiv: 2004.06365v1. 2020.
5. De Holanda P.C., Liao W., Smirnov A. Yu. // Nucl. Phys. B. 2004. V. 702. No. 1–2. P. 307.
6. Capozzi F., Lisi E., Marrone A., Palazzo A. // Progr. Part. Nucl. Phys. 2018. V. 102. P. 48.
7. Sinev V.V., Bezrukov L.B., Litvinovich E.A. et al. // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. P. 186.
8. Larin V.N. Hydridic Earth: the new geology of our primordially hydrogen-rich planet. Calgary: Polar Publishing, 1993. 247 p.
9. Bezrukov L.B., Karpikov I.S., Kurlovich A.S. et al. // arXiv: 2004.02533v2. 2020.
10. Bezrukov L.B., Karpikov I.S., Kurlovich A.S. et al. // arXiv:2007.07371v2. 2020.

Interpretation of first detection of solar neutrinos from CNO cycle with Borexino

L. B. Bezrukov^{a,*}, V. P. Zavarzina^a, I. S. Karpikov^a, A. S. Kurlovich^a, A. K. Mezhokh^a,
S. V. Silaeva^a, V. V. Sinev^a

^a*Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

**e-mail: bezrukov@inr.ac.ru*

The Borexino collaboration observed an excess of the counting rate over the expected counting rate of events from CNO- ν . This result is consistent with the prediction of the Earth's Hydride model on the contribution of ^{40}K geo-antineutrino scattering on electrons to single Borexino events. The proportion of potassium in the Earth $1.5 \pm 1.0\%$ of the Earth's mass is the most likely value that provides the observed excess of the counting rate.