

ПОИСК ПОТОКА ГЕОАНТИНЕЙТРИНО ОТ ^{40}K ДЕТЕКТОРОМ BOREXINO

Л. Б. Безруков *, В. В. Синев **

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Детектор Borexino обладает способностью регистрировать потоки антинейтрино наряду с солнечными нейтрино. Антинейтринные потоки генерируются в недрах Земли изотопами естественной радиоактивности, а также ядерными реакторами атомных электростанций. Мы провели анализ последних данных детектора Borexino с использованием антинейтринных потоков, добавив их к известным фонам и потокам солнечных нейтрино. В результате был обнаружен ненулевой поток антинейтрино от ^{40}K . При этом все потоки солнечных нейтрино стали согласовываться с моделью Солнца малой металличности.

The Borexino detector has the ability to detect antineutrino fluxes along with solar neutrinos. Antineutrino fluxes are generated inside the Earth by isotopes of natural radioactivity and on the Earth surface by reactor cores of nuclear power plants. We analyzed the latest data from the Borexino detector using solar neutrino fluxes and antineutrino ones, adding them to the known backgrounds. As a result, a non-zero antineutrino flux from ^{40}K was found. At the same time, all solar neutrino fluxes began to be consistent with the low metallicity Sun model.

PACS: 26.65.+t; 96.60.Jw; 91.35.-x

ВВЕДЕНИЕ

Коллаборация Borexino измерила все потоки солнечных нейтрино: ^8B [1], ^7Be [2], pp [3], CNO [4]. Поток pp -нейтрино измерен с довольно большой погрешностью ($\sim 25\%$), но оказывается совместим с предсказываемым теоретически, который имеет точность $\sim 0,8\%$. Поток $perp$ -нейтрино, считается, известен с точностью $\sim 1,2\%$, так как он коррелирован с потоком pp -нейтрино. При анализе данных коллаборации Borexino этот поток не искался, наряду с другими потоками, а практически фиксировался в пределах этой погрешности ($R(perp) = (2,74 \pm 0,04)$ событий/сут/100 т).

В коллаборации Borexino были тщательно измерены разнообразные фоны детектора, связанные как с внешними (гамма-фон от ^{208}Tl , ^{214}Bi и ^{40}K), так и внутренними источниками (альфа- (^{210}Po) и бета- (^{210}Bi , ^{85}Kr) фоны), а также фон космогенного происхождения (^{11}C) и фон от

* E-mail: bezrukov1945@mail.ru

** E-mail: vsinev@inr.ru

наложения импульсов, связанных с высокой загрузкой от радиоактивного изотопа ^{14}C .

Однако есть фоны, которые не использовались при анализе данных детектора Borexino, — это фоны, связанные с антинейтринными потоками: от калия, находящегося в недрах Земли (^{40}K), геоantineйтрино от ^{238}U и ^{232}Th , а также реакторных антинейтрино. Была, по-видимому, проведена оценка потоков от этих источников в рамках существующих моделей, и сделан вывод о малости вклада в скорость счета детектора Borexino.

При анализе самой коллаборации Borexino результат получается противоречивым: часть потоков тяготеет к малой металличности (LZ) (^8B и *per*), а часть — к большой (HZ) (^7Be и CNO), причем поток CNO сильно выходит за рамки предсказания модели большой металличности (HZ).

Мы провели собственный анализ потоков антинейтрино и рассчитали их вклад в скорость счета детектора Borexino. Вклад части этих потоков оказался малым, однако учет этих потоков привел к согласованию нейтринных потоков от Солнца в рамках одной модели, а именно малой металличности (LZ).

В ранних публикациях мы проводили анализ с включением только потока геоantineйтрино ^{40}K [5–7], и уже тогда оказалось, что полученные детектором данные лучше удовлетворяют модели Солнца с малой металличностью LZ. Сейчас в анализ включены все потоки антинейтрино (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th и реакторные) и используется спектр CNO, разделенный на отдельные потоки от ^{13}N и ^{15}O , чтобы проверить гипотезу о соотношении этих потоков в суммарном спектре CNO.

ГЕОАНТИНЕЙТРИННЫЕ ПОТОКИ ОТ ^{238}U И ^{232}Th

Рассмотрим поток геоantineйтрино от ^{238}U и ^{232}Th . На рис. 1, *а* приведен спектр геоantineйтрино от ^{238}U и ^{232}Th , а на рис. 1, *б* — спектр электронов отдачи от реакции упругого рассеяния этих геоан-

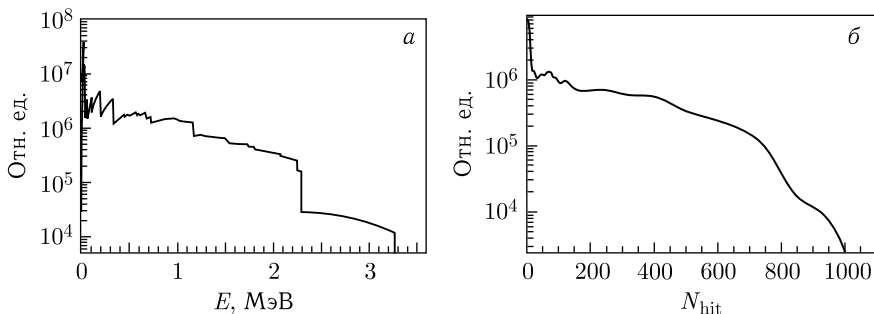


Рис. 1. Спектр антинейтрино ^{238}U и ^{232}Th (*а*) и pdf, использованная для анализа данных Borexino (*б*)

тинейтрино, наблюдаемый в детекторе Bogexino. Спектр электронов дан как функция числа сработавших фотоумножителей N_{hit} . Этот спектр, нормированный на единицу, называется pdf (probability density function) и используется при анализе спектра одиночных событий детектора Bogexino — многопараметрическом фите набора различных источников событий.

Парные события в детекторе Bogexino от спектра ^{238}U и ^{232}Th дают 4 события в год при регистрации с помощью реакции обратного бета-распада (ОБР) на протоне. По этим данным можно оценить поток геоантинейтрино в месте расположения детектора Bogexino и рассчитать спектр электронов отдачи, который должен регистрироваться в виде одиночных событий. Поток геоантинейтрино, который может дать 4 события в год в 278 т псевдокумола, должен быть около $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. А скорость счета электронов отдачи от рассеяния геоантинейтрино в 100 т оказывается на уровне $R(^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}) \sim 0,001$ события в сутки (cpd/100 т), это много меньше, чем скорость счета от самого маленького потока борных нейтрино $R(^8\text{B}) \sim 0,2 \text{ cpd/100 т}$. Мы будем использовать единицы скорости счета cpd/100 т — количество отсчетов в сутки в 100 т сцинтиллятора. Можно пренебречь таким количеством событий, но мы добавили этот поток в анализ и убедились, что действительно программа минимизации χ^2 убирает этот поток в ходе анализа.

АНТИНЕЙТРИННЫЙ ПОТОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Еще один антинейтринный поток на Земле производится ядерными реакторами как от атомных электростанций, так и исследовательскими. Этот поток в районе расположения детектора Bogexino мал по сравнению с потоками солнечных нейтрино. Однако его подложка может незначительно менять значения нейтринных солнечных потоков. Оценим этот поток. На рис. 2, а показан спектр реакторных антинейтрино,

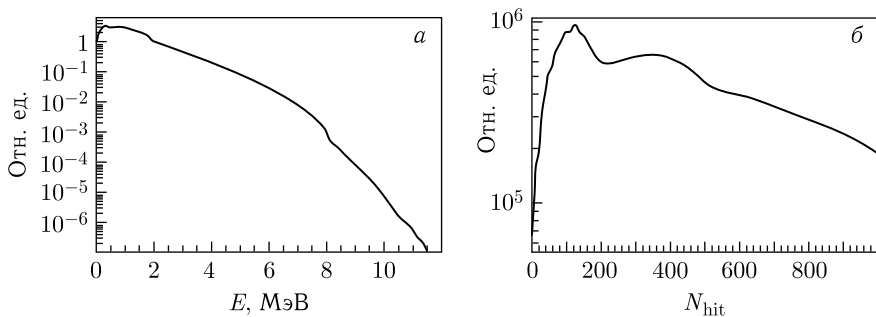


Рис. 2. Спектр антинейтрино ядерного реактора (а) и pdf, использованная для анализа данных Bogexino (б)

производимый только делениями тяжелых изотопов ядерного топлива. Этот поток так же, как и поток геоантинейтрино, может быть оценен по количеству парных событий, регистрируемых детектором Borexino. Эта величина составляет 10 событий в год в 278 т псевдокумола. При этом поток антинейтрино выше порога реакции ОБР (1,8 МэВ) составит $3,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. А этот поток даст в детекторе Borexino такое же значение скорости счета одиночных событий от реакции упругого рассеяния на электронах, как и поток геоантинейтрино от ^{238}U и ^{232}Th , — около 0,001 cpd/100 т. На рис. 2, б показан спектр электронов отдачи, вызываемый реакторными антинейтрино. Из этого спектра была создана функция pdf, использованная для анализа экспериментального спектра Borexino.

Оказалось, что спектр реакторных антинейтрино действительно мал, и программа минимизации χ^2 дает малое значение этого потока.

ГЕОАНТИНЕЙТРИННЫЙ ПОТОК ОТ ^{40}K

Еще один поток антинейтрино, который пока не учитывался при анализе данных Borexino, — это поток антинейтрино от ^{40}K , который включает в себя и небольшую долю нейтрино. Спектр антинейтрино и нейтрино от ^{40}K показан на рис. 3, а. На рис. 3, б показана функция pdf — зависимость вероятности срабатывания числа фотоумножителей N_{hit} при появлении электронов отдачи от рассеяния антинейтрино и нейтрино суммарно от распада ^{40}K в Земле.

Значение скорости счета в детекторе Borexino событий от ^{40}K оказывается не таким и малым даже для стандартной модели Земли с содержанием калия 0,024 % по массе. Эта скорость счета $R(^{40}\text{K}) \sim 0,1 \text{ cpd}/100 \text{ т}$ близка к скорости счета борных нейтрино $R(^8\text{B}) \sim 0,2 \text{ cpd}/100 \text{ т}$. Однако в анализе коллаборации Borexino этот поток не учитывался.

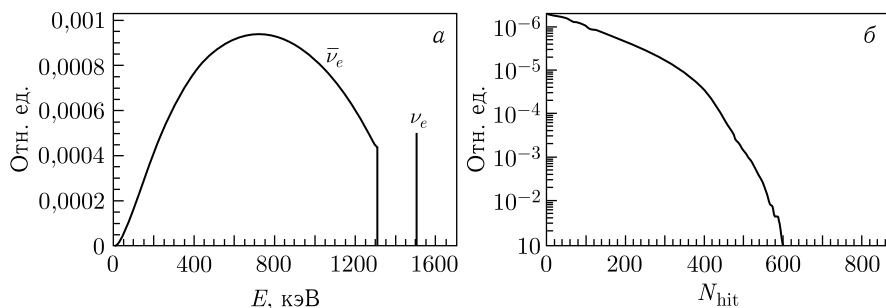


Рис. 3. Спектр антинейтрино и нейтрино ^{40}K (а) и pdf, использованная для анализа данных Borexino (б)

АНАЛИЗ ДАННЫХ VOREXINO С УЧЕТОМ АНТИНЕЙТРИННЫХ ПОТОКОВ

На рис. 4 показан результат анализа компонент потоков солнечных нейтрино, бета- и гамма-фонов, а также потока геоantineйтрино от ^{40}K . Потоки геоantineйтрино от урана с торием и реакторных антинейтрино малы и не видны в данной шкале величин.

После введения в анализ pdf для ^{40}K было получено значение скорости счета $R(^{40}\text{K}) = 11 \text{ crp}/100 \text{ т}$ при ограничении этого потока сверху. Если же поток геоantineйтрино от ^{40}K не ограничивать сверху, то значение скорости счета событий становится $(19,1 \pm 2,5) \text{ crp}/100 \text{ т}$. При этом значение потока нейтрино CNO-цикла приходится ограничивать снизу, чтобы он не пропадал.

Найденные в результате анализа значения солнечных нейтринных потоков показаны в таблице вместе со значениями скорости счета событий от геоantineйтрино от ^{40}K . Видно, что введение в анализ потока

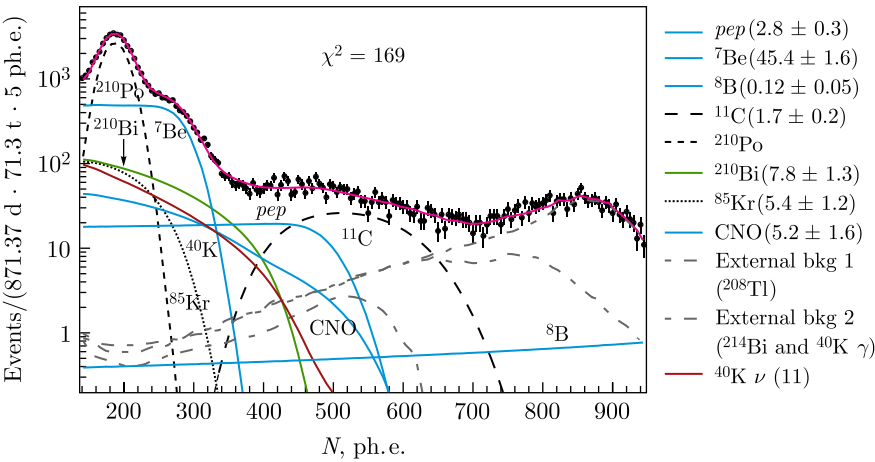


Рис. 4. Результат анализа данных Vorexino с использованием антинейтринных потоков

Скорости счета событий от солнечных нейтрино и ^{40}K в единицах $\text{crp}/100 \text{ т}$, полученные в результате анализа. Приведенные ошибки — вычисляемые программой ROOT характеристики минимума χ^2

Компонента	1	2	3	4
^7Be	$48,4 \pm 1,2$	$45,9 \pm 1,3$	$45,4 \pm 1,6$	$43,6 \pm 1,5$
<i>pep</i>	2,74	2,74	$2,8 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,3$
^8B	0,16	0,16	$0,12 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,05$
CNO	$7,6 \pm 1,2$	$4,4 \pm 0,6$	$5,2 \pm 1,6$	$2,6 \pm 0,6$
^{40}K	0	11	11	$19,1 \pm 2,5$
χ^2	198	171	169	161

антинейтрино и нейтрино от ^{40}K существенно улучшает согласие экспериментальных данных и модели источников событий. При этом все потоки солнечных нейтрино ложатся в границы солнечной модели с малой металличностью (LZ). Особенное впечатление вызывает увеличение восстановленной скорости счета *per*-компоненты по сравнению с анализом без введения калийных антинейтрино. Ожидалось, что введение калийной компоненты заберет события из других источников, а оказалось, что *per*-компонента автоматически увеличилась и стала соответствовать солнечной модели с низкой металличностью.

В колонке 1 таблицы дан результат анализа без использования антинейтринных потоков, в том числе от ^{40}K . Скорость счета CNO-нейтрино в точности соответствует данным, полученным в коллаборации Borexino. При этом значение χ^2 имеет максимальное значение в нашем анализе. Значение скорости счета *per*-нейтрино зафиксировано в рамках модели с большой металличностью (HZ). Скорость счета ^8B -нейтрино зафиксирована в соответствии с измерениями Borexino.

В колонке 2 приведены данные анализа с введением антинейтринных потоков и ^{40}K с ограничением в 11 cpd/100 т. Скорость счета *per*-нейтрино также зафиксирована в рамках модели с большой металличностью. Наличие потока ^{40}K приводит к уменьшению скоростей счета ^7Be и CNO-нейтрино. Скорость счета событий от ^{40}K оказывается на предельном значении.

В колонке 3 приведен такой же анализ, но сделаны свободными параметры, отвечающие *per*-нейтрино и ^8B . В результате видно, что скорость счета *per*-нейтрино увеличилась, а скорость счета ^8B -нейтрино уменьшилась. Значение χ^2 изменилось незначительно.

В колонке 4 все параметры сделаны свободными, но поток CNO-нейтрино ограничен снизу. Получено довольно большое значение скорости счета ^{40}K , но при этом все потоки солнечных нейтрино оказываются в рамках одной модели с малой металличностью (LZ). Значение χ^2 оказывается минимальным по сравнению с прочими вариантами анализа.

В одной из работ коллаборации Borexino [8] было приведено измеренное значение скорости счета *per*-нейтрино $(3,1 \pm 0,6)$ cpd/100 т, которое согласуется с нашим значением $(2,91 \pm 0,3)$ cpd/100 т и соответствует солнечной модели с малой металличностью (LZ).

Была выполнена проверка возможности получения большой скорости счета событий от ^{40}K в анализе при отсутствии этого потока. Было сгенерировано 10^5 спектров для каждого случая: с калием и без. Затем по результатам анализа с поиском потока ^{40}K были получены распределения скоростей счета в обоих случаях. На рис. 5 приведен результат виртуального эксперимента с включением потока ^{40}K и его отсутствием.

Вероятность получить при анализе скорость счета от потока ^{40}K $R(^{40}\text{K}) > 7$ cpd/100 т при его отсутствии оказалась 10^{-5} . Соответственно, вероятность получения такого же значения скорости счета при его наличии составляет 0,9.

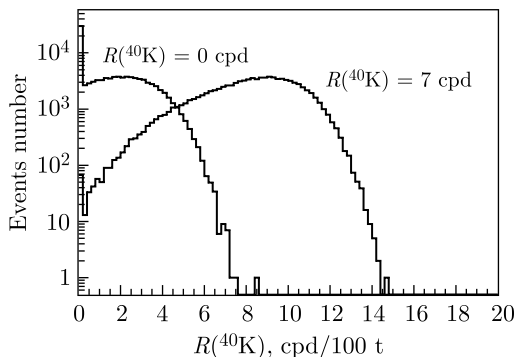


Рис. 5. Результат виртуального эксперимента. Распределения скорости счета событий ^{40}K в случае отсутствия потока ($R(^{40}\text{K})=0$) и в случае его наличия ($R(^{40}\text{K})=7$)

Был проведен анализ с заменой спектра электронов отдачи от нейтринного потока ^{40}K на бета-спектр ^{40}K . Минимизация χ^2 приводит к обнулению бета-спектра, и результат оказывается аналогичным результату коллаборации Bogexino.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментального спектра одиночных событий детектора Bogexino, полученного в 2022 г. В анализ были включены потоки антинейтрино, которые регистрируются детектором наряду с потоками нейтрино, но не были учтены при анализе коллаборацией Bogexino ввиду их ожидаемой малости.

Скорость счета событий от распадов ^{40}K , включая как события от антинейтрино, так и нейтрино, оказалась значительно больше ожидаемой исходя из общепринятой модели Земли (BSE — Bulk Silicate Earth) и совпадает с предсказываемой другой моделью Земли — «Богатая водородом Земля» (Hydride Earth).

Скорость счета одиночных событий от других антинейтринных потоков, генерируемых в Земле изотопами естественной радиоактивности, а также ядерными реакторами атомных электростанций, в результате нашего анализа оказалась близкой к нулю. Эта величина согласуется с результатом анализа парных событий, проведенного коллаборацией Bogexino. Таким образом, полученный нами нулевой результат подтверждает справедливость идеи о том, что скорости счета различных событий, полученные при минимальном значении χ^2 , соответствуют лучшей модели источников событий, наиболее адекватно отражающей реально существующую в природе ситуацию.

Установлено, что с учетом всех антинейтринных потоков анализ становится более стабильным, несмотря на малость некоторых из них.

Например, поток борных нейтрино в анализе без антинейтринных потоков стремится занулиться, а при включении антинейтринных потоков принимает нормальное значение, соответствующее модели LZ.

Поток геонейтрино ^{40}K , включающий в себя как антинейтрино, так и нейтрино, оказался значительно больше ожидаемого, исходя из общепринятой модели Земли.

Все полученные потоки солнечных нейтрино согласуются с солнечной моделью малой металличности (LZ) при учете всех антинейтринных потоков и геонейтрино от ^{40}K .

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agostini M. et al. (*Borexino Collab.*) // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. P. 062001.
2. Arpesella C. et al. (*Borexino Collab.*) // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 091302.
3. Agostini M. et al. (*Borexino Collab.*) // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. P. 082004.
4. Basilico D. et al. (*Borexino Collab.*) // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. P. 102005.
5. Bezrukov L. B., Karpikov I. S., Kurlovich A. S., Mezhokh A. K., Silaeva S. V., Sinev V. V., Zavarzina V. P. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 430–432; arXiv:2007.07371 [hep-ex].
6. Bezrukov L. B., Karpikov I. S., Kurlovich A. S., Mezhokh A. K., Silaeva S. V., Sinev V. V., Zavarzina V. P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012170.
7. Bezrukov L. B., Karpikov I. S., Sinev V. V. arXiv: 2304.02747 [hep-ex].
8. Смирнов О. Ю. // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 7(184). С. 1225.