

ПОИСК ПОТОКА ГЕОАНТИНЕЙТРИНО ОТ ^{40}K ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРА БОРЕКСИНО

© 2024 г. Л. Б. Безруков¹⁾, В. В. Синев^{1),*}

Поступила в редакцию 13.07.2024 г.; после доработки 13.07.2024 г.; принята к публикации 13.07.2024 г.

Детектор Борексино кроме потоков солнечных нейтрино может регистрировать и потоки антинейтрино, используя реакцию упругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на электроны. Антинейтринные потоки производятся внутри Земли изотопами естественной радиоактивности и на поверхности ядерными реакторами атомных электростанций. Мы провели анализ последних данных детектора Борексино, добавив к фонам и потокам солнечных нейтрино известные потоки антинейтрино. В результате анализа был получен поток антинейтрино от ^{40}K , который оказался значительным по величине. При этом все потоки солнечных нейтрино согласуются с моделью Солнца малой металличности.

DOI: 10.31857/S0044002724060061, EDN: HOZRPE

1. ВВЕДЕНИЕ

Коллаборацией Борексино были измерены все потоки солнечных нейтрино: ^8B [1], ^7Be [2], pp [3], CNO [4]. Поток pp -нейтрино измерен с довольно большой погрешностью ($\sim 8\%$), но оказывается совместим с предсказываемым теоретически, который имеет точность $\sim 0.8\%$. Поток pep -нейтрино, считается, известен с точностью $\sim 1.2\%$, так как он коррелирован с потоком pp -нейтрино. В анализе коллаборации Борексино этот поток не варьировался, наряду с другими потоками, а практически фиксировался в пределах этой погрешности ($R(pep) = 2.74 \pm 0.04$ событий в сутки/100 т (cpd/100 t)). Хотя в одной работе [5] было найдено значение, отличающееся от указанного $R(pep) = 3.1 \pm 0.6$ cpd/100 t.

В коллаборации Борексино были тщательно измерены все возможные 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). Также были измерены: фон космогенного происхождения (^{11}C) и фон от наложения импульсов, связанных с высокой загрузкой от радиоактивного изотопа ^{14}C .

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

В анализе самой коллаборации Борексино результат получается противоречивым: часть потоков тяготеет к малой металличности (LZ) (^8B и pep), 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 Борексино. Вклад части этих потоков оказался малым, однако включение в анализ этих потоков привело к согласованию нейтринных потоков от Солнца в рамках одной модели, а именно малой металличности (LZ).

В более ранних публикациях мы при проведении анализа использовали только поток геоантинейтрино ^{40}K [6–8], и уже тогда оказалось, что полученные детектором данные лучше удовлетворяют модели Солнца с малой металличностью LZ. В настоящем анализе включены все потоки антинейтрино (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th и реакторные), а также используется спектр CNO , разделенный на отдельные потоки от ^{13}N и ^{15}O , чтобы проверить гипотезу о соотношении этих потоков в суммарном спектре CNO .

2. ГЕОАНТИНЕЙТРИННЫЕ ПОТОКИ

ОТ ^{238}U И ^{232}Th

Рассмотрим поток геоантинейтрино от ^{238}U и ^{232}Th . На рис. 1а приведен спектр геоантинейтрино суммарно от двух изотопов ^{238}U и ^{232}Th и спектр электронов отдачи от реакции упругого рассеяния этих геоантинейтрино (б), наблюдаемый в детекторе Борексино. 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 Борексино — многопараметрическом фите при использовании набора различных источников событий.

Парные события в детекторе Борексино от спектра ^{238}U и ^{232}Th дают четыре события в год при регистра-

¹⁾ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

* E-mail: vsinev@inr.ru

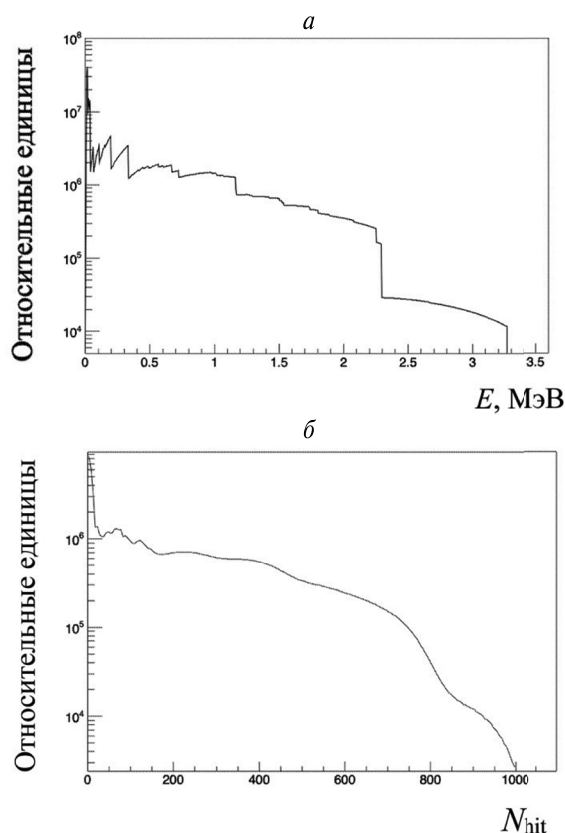


Рис. 1. Спектр антинейтрино ^{238}U и ^{232}Th (а) и pdf, использованная для анализа данных Борексино (б).

ции с помощью реакции обратного бета-распада на протоне (ОБР). По этим данным можно оценить поток геоантинейтрино в месте расположения детектора Борексино и рассчитать спектр электронов отдачи, который должен регистрироваться в виде одиночных событий. Поток геоантинейтрино, который может дать четыре события в год в 278 т псевдокумола, должен быть около $4 \times 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. 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 день (cpd/100 t), это много меньше, чем скорость счета от самого маленького потока борных нейтрино $R(^8\text{B}) \sim 0.2 \text{ cpd/100 t}$. Мы будем использовать единицы скорости счета cpd/100 t — количество отсчетов в день в 100 т сцинтиллятора. Можно было бы пренебречь таким количеством событий, но мы добавили этот поток в анализ и убедились, что действительно программа минимизации χ^2 зануляет поток геоантинейтрино в ходе анализа.

3. АНТИНЕЙТРИННЫЙ ПОТОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Еще один антинейтринный поток на Земле производится ядерными реакторами как от атомных электростанций, так и исследовательскими. Полная мощность ядерных реакторов, испускающих антинейтри-

но, составляет немного менее 1 ТВт. Этот поток в районе расположения детектора Борексино мал, по сравнению с потоками солнечных нейтрино, так как ближайшие ядерные реакторы находятся в Швейцарии и Франции. Однако его подложка может незначительно менять значения нейтринных солнечных потоков. Можно оценить этот поток. На рис. 2а показан спектр реакторных антинейтрино, производимый только делениями тяжелых изотопов ядерного топлива. Этот поток также, как и поток геоантинейтрино, может быть оценен по количеству парных событий, регистрируемых детектором Борексино. Эта величина составляет 10 событий в год в 278 т псевдокумола. При этом поток антинейтрино выше порога реакции ОБР (1.8 МэВ) будет $3.5 \times 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. А поток такой величины даст в детекторе Борексино 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 t. На рис. 2б показан спектр электронов отдачи, вызываемый реакторными антинейтрино. Из этого спектра была создана функция pdf (probability density function), использованная для анализа экспериментального спектра Борексино.

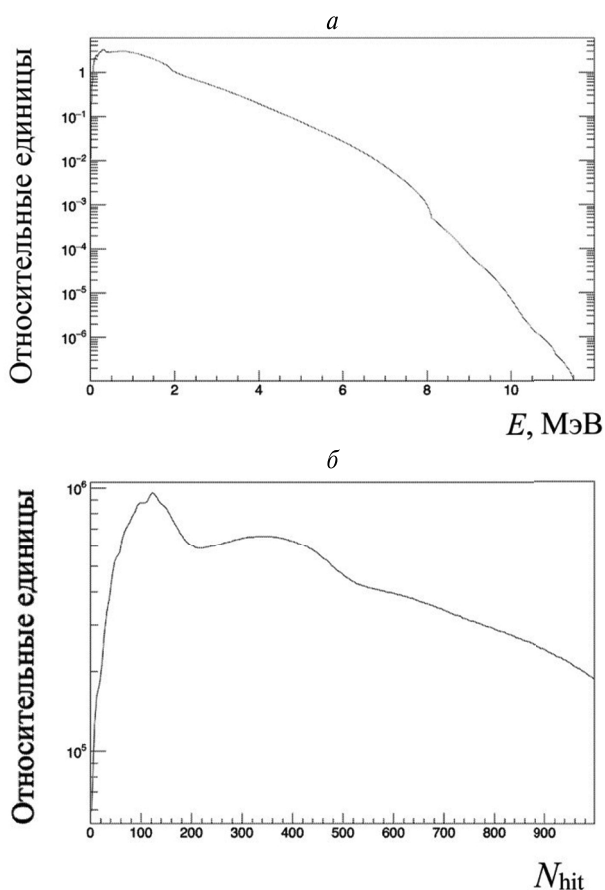


Рис. 2. Спектр антинейтрино ядерного реактора (а) и pdf, использованная для анализа данных Борексино (б).

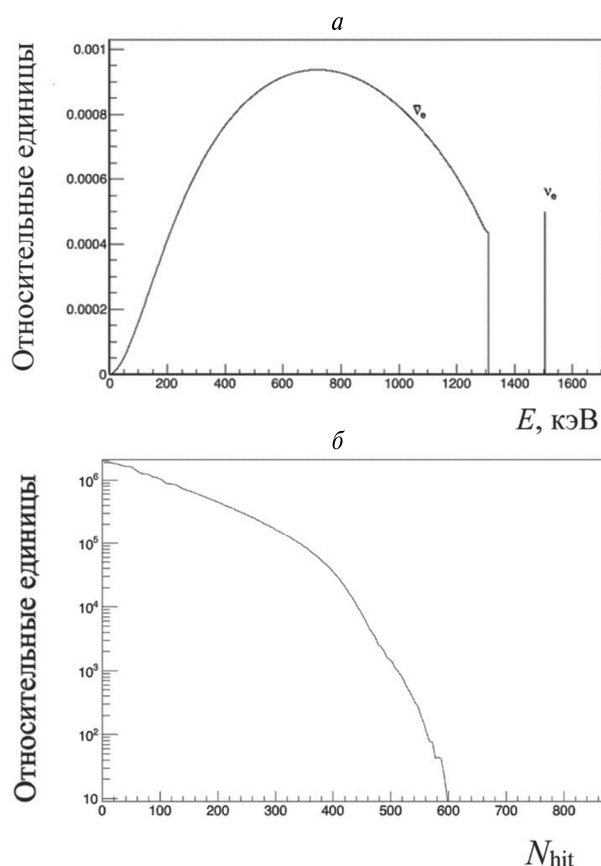


Рис. 3. Спектр антинейтрино и нейтрино ^{40}K (а) и pdf, использованная для анализа данных Борексино (б).

Оказалось, что спектр реакторных антинейтрино действительно мал, и программа минимизации χ^2 выдает близкое к нулю значение этого потока.

4. ГЕОАНТИНЕЙТРИННЫЙ ПОТОК ОТ ^{40}K

Последний поток антинейтрино, который пока не учитывался при анализе данных Борексино. Это поток антинейтрино от ^{40}K (максимальная энергия 1.3 МэВ), который включает в себя еще и небольшую долю нейтрино с энергией 1.5 МэВ. Спектр антинейтрино и нейтрино от ^{40}K показан на рис. 3а. На рис. 3б 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.

Скорость счета в детекторе Борексино событий от ^{40}K оказывается не таким и малым даже для стандартной модели Земли с содержанием калия 0.024% по массе. Эта скорость счета $R(^{40}\text{K}) \sim 0.06$ cpd/100t оказывается близкой к скорости счета борных нейтрино $R(^8\text{B}) \sim 0.2$ cpd/100t. Однако в анализе коллаборации Борексино этот поток не учитывался.

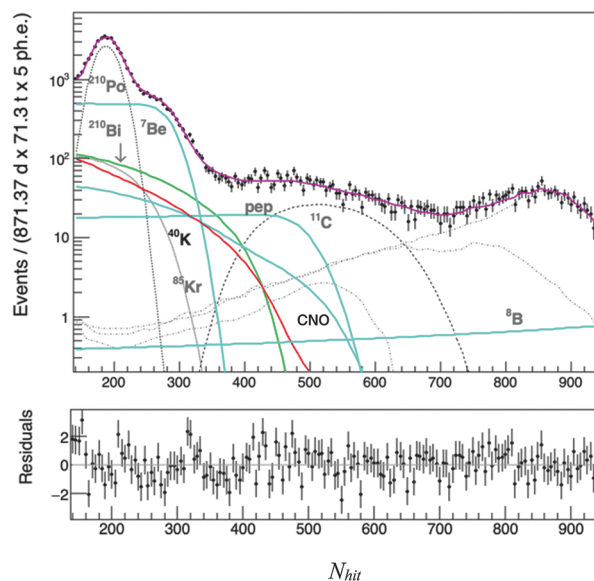


Рис. 4. Результат анализа данных Борексино с использованием антинейтринных потоков. Красной линией показан спектр электронов отдачи, вызванный рассеянием антинейтрино ^{40}K . На нижней вкладке показано отклонение экспериментальных точек от подгоночной кривой в количестве экспериментальных погрешностей.

5. АНАЛИЗ ДАННЫХ БОРЕКСИНО С УЧЕТОМ АНТИНЕЙТРИННЫХ ПОТОКОВ

На рис. 4 приведен результат нашего анализа. На нем показаны компоненты потоков солнечных нейтрино, бета- и гамма-фоны, а также поток геоантинейтрино от ^{40}K . Потоки геоантинейтрино 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 $R(^{40}\text{K}) = 11$ cpd/100 t при ограничении этого потока сверху. Если же поток геоантинейтрино от ^{40}K не ограничивать сверху, то значение скорости счета событий становится 19.1 ± 2.5 cpd/100 t. При этом значение потока нейтрино CNO-цикла приходится ограничивать снизу, чтобы он не становился исчезающе малым.

Найденные в результате анализа значения потоков солнечных нейтрино показаны в табл. 1 вместе со значениями скорости счета событий от геоантинейтрино ^{40}K . Можно заметить, что введение в анализ потока антинейтрино и нейтрино от ^{40}K существенно улучшает согласие экспериментальных данных и модели источников событий. При этом все потоки солнечных нейтрино оказываются в границах солнечной модели с малой металличностью (LZ). Особенное впечатление вызывает увеличение восстановленной скорости счета компоненты рер-нейтрино по сравнению с анализом без введения калийных антинейтрино. Ожидалось, что введение калийной компоненты заберет события из других источников, а оказалось, что рер-компонента автоматически увеличилась и стала соот-

Таблица 1. Скорости счета событий от солнечных нейтрино и ^{40}K в единицах $\text{cpd}/100\text{ t}$, полученные в результате анализа; приведенные ошибки – вычисляемые программой ROOT характеристики минимума χ^2

Компонента	1	2	3	4
^7Be	48.4 ± 1.2	45.9 ± 1.3	45.4 ± 1.6	43.6 ± 1.5
<i>per</i>	2.74	2.74	2.8 ± 0.3	2.9 ± 0.3
^8B	0.16	0.16	0.12 ± 0.05	0.14 ± 0.05
CNO	7.6 ± 1.2	4.4 ± 0.6	5.2 ± 1.6	2.6 ± 0.6
^{40}K	0	11	11	19.1 ± 2.5
χ^2	198	171	169	161

ветствовать солнечной модели с низкой металличностью.

В первом столбце табл. 1 приведен результат анализа без использования антинейтринных потоков, в том числе и от ^{40}K . Скорость счета CNO нейтрино в точности соответствует данным, полученным в коллаборации Борексино. 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 коллаборации Борексино.

Во втором столбце приведены данные анализа с введением антинейтринных потоков и ^{40}K с ограничением в $11\text{ cpd}/100\text{ t}$. 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 третьем столбце 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 не существенно.

В последнем столбце 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 среди прочих вариантов анализа.

Во Введении уже отмечалось, что в одной из работ коллаборации Борексино [5] было приведено измеренное значение скорости счета *per*-нейтрино, равное $3.1 \pm 0.6\text{ cpd}/100\text{ t}$, которое согласуется с нашим значением $2.9 \pm 0.3\text{ cpd}/100\text{ t}$. И это значение 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 по-

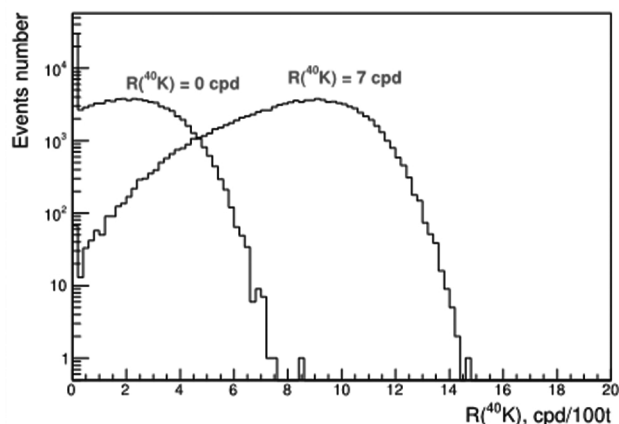


Рис. 5. Результат виртуального эксперимента. Распределение скорости счета событий ^{40}K в случае отсутствия потока ($R(^{40}\text{K}) = 0$) и в случае его наличия ($R(^{40}\text{K}) = 7$).

лучены 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 $R(^{40}\text{K}) > 7\text{ cpd}/100\text{ t}$ при его отсутствии оказалась 10^{-5} . Соответственно, вероятность получения такого же значения скорости счета при его наличии 0.9.

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 Борексино.

Сравнивая полученную нами из анализа экспериментальных данных величину $R(^{40}\text{K}) = 19.1 \pm 2.5\text{ cpd}/100\text{ t}$ с распределением восстановленных величин $R(^{40}\text{K})$ из рис. 5 при условии, что для розыгрыша была взята величина $R(^{40}\text{K}) = 7\text{ cpd}/100\text{ t}$, можно сделать вывод, что в природе реализуется $R(^{40}\text{K}) > 7\text{ cpd}/100\text{ t}$. Это соответствует доле калия в Земле более 3% от массы Земли при условии его равномерного распределения. Для точного определения доли калия в Земле требуется эксперимент с большей статистикой. Таким экспериментом в ближайшем будущем может стать эксперимент JUNO.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Скорость счета событий от распадов ^{40}K , включающая в себя 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 и ядерными реакторами атомных электростанций, в результате нашего анализа оказалась близкой к нулю. Эта величина согласуется с результатом анализа парных событий, произведенного коллаборацией Борексино. 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 реальную существующую в природе ситуацию.

Получено, что с учетом всех антинейтринных потоков анализ становится более стабильным, несмотря на малость некоторых из них. Например, поток нейтрино от ^8B в анализе без потоков антинейтрино стремится стать нулевым, а при учете 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. Получена нижняя граница существования в природе доли калия в Земле — более 3% от массы Земли при условии его равномерного распределения.

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

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Agostini et al. (Borexino Collab.), Phys. Rev. D **101**, 062001 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.062001>
2. C. Arpesella et al. (Borexino Collab.), Phys. Rev. Lett. **101**, 091302 (2008); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.091302>
3. M. Agostini et al. (Borexino Collab.), Phys. Rev. D **100**, 082004 (2019); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.082004>
4. D. Basilico et al. (Borexino Collab.), Phys. Rev. D **108**, 102005 (2023); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.102005>
5. О. Ю. Смирнов, Письма в ЭЧАЯ **10**, 1225 (2013); G. Belini et al. (Borexino Collab.), Phys. Rev. Lett. **108**, 051302 (2012); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.051302>
6. L. B. Bezrukov, V. P. Zavarzina, I. S. Karpikov, A. S. Kurlovich, A. K. Mezhokh, S. V. Silaeva, and V. V. Sinev, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **85**, 430 (2021); <https://doi.org/10.3103/S1062873821040067>; arXiv: 2007.07371 [hep-ex]; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.07371>
7. V. Sinev, L. Bezrukov, I. Karpikov, A. Kurlovich, A. Mezhokh, S. Silaeva, and V. Zavarzina, J. Phys.: Conf. Ser. **1690**, 012170 (2020); doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012170
8. L. B. Bezrukov, I. S. Karpikov, and V. V. Sinev, arXiv: 2304.02747 [hep-ex]; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02747>

LOOKING FOR GEO-ANTINEUTRINO FLUX FROM ^{40}K USING BOREXINO DATA

L. B. Bezrukov¹⁾, V. V. Sinev¹⁾

¹⁾ Institute for Nuclear Research (INR) of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The Borexino detector can detect antineutrino fluxes as well as solar neutrinos fluxes using neutrino-electron scattering reaction. Antineutrino fluxes are produced inside the Earth by isotopes of natural radioactivity and on the Earth's surface by reactor cores of nuclear power plants. We analyzed the latest data from the Borexino detector adding to the analysis of solar neutrino fluxes the antineutrino ones, adding them to the known backgrounds. The result of the analysis was that 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.