= ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ =

ГЕОНЕЙТРИНО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

© 2022 г. Л. Б. Безруков^{1)*}, И. С. Карпиков¹⁾, А. К. Межох¹⁾, С. В. Силаева¹⁾, В. В. Синев¹⁾

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.; после доработки 28.06.2022 г.; принята к публикации 30.06.2022 г.

Возможность больших потоков геонейтрино от распадов ⁴⁰К и наличие избытка положительного электрического заряда в земной коре предсказываются гидридной моделью Земли. Данные эксперимента Борексино не противоречат доли калия, равной нескольким процентам от массы Земли и предсказанной этой моделью. Обнаружение избытка положительно заряженных аэроионов в подземных лабораториях может быть объяснено наличием избытка положительного электрического заряда в земной коре. Для подтверждения существования обоих этих эффектов необходимы дальнейшие исследования.

DOI: 10.31857/S0044002722060046

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь большого потока калийных геоантинейтрино (K-geo- ν) и избытка положительного заряда в коре Земли обсуждалась в работе [1], так как оба эти явления предсказаны гидридной моделью Земли (HE-модель — Hydridic Earth model) [2, 3]. Второе предсказание сформулировано в работе [4], в которой предложена гидридная модель электрического поля Земли. Оба эти явления еще не открыты. В настоящей работе мы рассмотрим экспериментальные факты, которые можно рассматривать как подтверждение существования этих явлений. Это — данные эксперимента Борексино (Borexino) [5, 6] и обнаружение избытка положительно заряженных аэроионов в подземных полостях.

2. НЕЗАВИСИМЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРА ОДИНОЧНЫХ СОБЫТИЙ ДЕТЕКТОРА БОРЕКСИНО

В работе [7] был рассчитан возможный вклад от рассеяния ⁴⁰К-geo- ν на электронах сцинтиллятора в скорость счета одиночных событий в детекторе Борексино для концентрации калия в Земле, предсказанной НЕ-моделью Земли. Вклад оказался равный $R(^{40}$ K-geo- $\nu) = 1-4$ cpd/100t (количество событий в день на 100 тонн сцинтиллятора) для концентраций калия, соответствующих нескольким процентам от массы Земли. Энергетический спектр событий от ⁴⁰K-geo- ν близок к спектру событий от солнечных СNO-нейтрино (СNO- ν), поэтому авторы полагали, что при фитировании энергетического спектра одиночных событий эксперимента Борексино суммой различных источников одиночных событий без учета вклада от ⁴⁰K-geo- ν к событиям от СNO- ν будут добавляться реально существующие события от ⁴⁰K-geo- ν . Поэтому можно ожидать, что будет зарегистрирована бо́льшая скорость счета от СNO- ν по сравнению с теоретической $R_{\text{theory}}(\text{CNO-}\nu) = 4.92 \pm 0.78 \text{ срd}/100t$. Эта величина соответствует модели Солнца с высокой металличностью, для малой металличности она меньше.

Коллаборация Борексино в 2020 г. сообщила об измерении скорости счета $R_{\exp}(\text{CNO}-\nu) = 7.2 + 3.0 - 1.6 \text{ срd/100t}$ [5]. В работе [8] эта разница между ожидаемой и измененной скоростями счета интерпретировалась как указание на наличие большого количества калия в Земле.

Однако последующий анализ [9] показал, что эта интерпретация не верна, так как при фитировании энергетического спектра одиночных событий эксперимента Борексино суммой различных источников одиночных событий с учетом вклада от ⁴⁰K-geo- ν к событиям от СNO- ν не добавляются реально существующие события от ⁴⁰K-geo- ν , а уменьшается скорость счета событий от распада радиоактивных изотопов ²¹⁰Ві и ⁸⁵Кг, содержащихся в сцинтилляторе.

На рис. 1 приведен результат фитирования энергетического спектра одиночных событий эксперимента Борексино суммой различных источников одиночных событий с учетом вклада от ⁴⁰Кgeo-*ν*. Экспериментальные данные с ошибками

¹⁾Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

^{*}E-mail: bezrukov@inr.ac.ru



Рис. 1. Энергетический спектр одиночных событий в детекторе Борексино (точки с ошибками из [5]). a — Кривые: вклады различных источников одиночных событий и их сумма, полученные в результате фитирования к экспериментальным данным, черная штриховая — вклад от ⁴⁰К-geo- ν событий, площадь под этой кривой (от нуля фотоэлектронов) соответствует скорости счета $R(^{40}$ К-geo- $\nu) = 7.06$ срd/100t, что соответствует доли калия от массы Земли, равной 3.2%. δ — Разница (остаток) между экспериментальными значениями и полученной в результате фитирования суммой различных источников одиночных событий.

доступны в открытом доступе и соответствуют работе [5]. Горизонтальная шкала дана в единицах: число зарегистрированных фотоэлектронов (ф.э.). Зависимость числа зарегистрированных фотоэлектронов от энерговыделения в сцинтилляторе взята из работы [10]: при энерговыделении в 0.5 МэВ регистрируется 220 ф.э., при 1.0 МэВ — 410 ф.э., при 1.5 МэВ — 590 ф.э.

Вклады различных источников событий и их сумма, полученные в результате фитирования экспериментальных данных, показаны на рис. 1*а*. У большинства кривых стоит знак, поясняющий природу одиночных событий, для которых построена кривая. Это — распады ²¹⁰Ро, ⁸⁵Кг, ²¹⁰Вi, содержащихся в сцинтилляторе, рассеяние на электронах солнечных нейтрино от ⁷Ве, *pep*, CNO, ⁸В. Показан вклад от распада изотопа ¹¹С, образующе-

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА том 85 № 6 2022

гося при взаимодействии мюона с атомными ядрами углерода сцинтиллятора. Непомеченные штрихпунктирные линии показывают вклад от гаммаквантов от распадов радиоактивных элементов в окружающем детектор грунте. Переменными параметрами при фитировании являлись площади всех помеченных кривых, кроме кривой от *рер* нейтрино (ее площадь была фиксирована).

Черной штриховой кривой показан вклад от ⁴⁰К-geo- ν событий. Площадь под этой кривой (от нуля ф.э.) соответствует скорости счета $R(^{40}$ К-geo- $\nu) = 7.05$ срd/100t, что соответствует доли калия от массы Земли, равной 3.2%.

Рисунок 16 показывает качество результата фитирования. Точки есть разница (остаток) между экспериментальными значениями и полученной в результате фитирования суммой различных источников одиночных событий.

Добавление в набор источников для фитирования событий от ⁴⁰K-geo- ν позволяет улучшить согласие экспериментального и фитированного спектров при скоростях счета событий

$$R(^{40}$$
K-geo- ν) = 7.05 cpd/100t, (1)
 $R(^{210}$ Bi) = 6 cpd/100t
и $R(^{85}$ Kr) = 3.76 cpd/100t

по сравнению с фитированием без ⁴⁰К-geo- ν . Скорости счета событий от СNO- ν и от остальных источников при добавлении в анализ ⁴⁰К-geo- ν не изменяются. Этот эффект можно понять, рассматривая рис. 1. События от СNO- ν вносят значительный вклад в общую сумму в интервале 400— 500 ф.э., а спектр событий от ⁴⁰К-geo- ν очень близок к суммарному спектру событий от распада радиоактивных изотопов ²¹⁰Ві и ⁸⁵Кг, и его вклад значительно ниже 400 ф.э. Анализ показывает, что трудно отделить события от ⁴⁰К-geo- ν от суммы событий от ²¹⁰Ві и ⁸⁵Кг. Необходима либо очень большая статистика, или независимое измерение скорости счета от какого-либо из этих источников событий.

Коллаборация Борексино уделила большое внимание измерению скорости счета событий от ²¹⁰Ві. ²¹⁰Ві распадается в ²¹⁰Ро, а затем ²¹⁰Ро распадается с испусканием альфа-частицы. На рис. 1а в районе 200 ф.э. виден пик от альфачастиц ²¹⁰Ро. Импульс от альфа-частицы имеет большую длительность, чем импульс от электрона, поэтому скорость счета ²¹⁰Ро может быть хорошо измерена. Оказалось, что скорость счета ²¹⁰Ро зависит от расстояния от точки его распада до внутренней нейлоновой оболочки, которая содержит сцинтиллятор. Чем меньше это расстояние, тем больше ²¹⁰Ро. Таким образом, в эксперименте имеются два источника ²¹⁰Ро: от распадов ²¹⁰Ві, который содержится в сцинтилляторе, и ²¹⁰Ро, который может поступать в сцинтиллятор из внутренней нейлоновой оболочки. Коллаборация Борексино, используя низкую скорость счета ²¹⁰Ро в центральной области детектора, поставила верхнюю границу на скорость распада ²¹⁰Ві в сцинтилляторе, равную $R(^{210}$ Ві) $\leq 10.8 \pm$ ± 1.0 cpd/100t [6]. Таким образом, полученная (1) величина $R(^{210}\text{Bi}) = 6 \text{ срd}/100t$ вполне может соответствовать действительности. Величина $R(^{85}$ Kr) = 3.76 cpd/100t также не противоречит данным Борексино.

Из выше приведенной дискуссии о важности знания концентрации ²¹⁰Ві в сцинтилляторе для

измерения доли калия в Земле следует [9], что в детекторе следующего поколения необходимо иметь более чистую по содержанию радиоактивных примесей нейлоновую внутреннюю оболочку. Это позволит измерить концентрацию ²¹⁰Ві в сцинтилляторе, увеличить необходимую статистику и измерить скорость счета событий от ⁴⁰К-geo-*ν*.

В связи с объявлением коллаборацией Борексино нового результата измерения скорости счета $R_{\rm exp}({\rm CNO}-\nu) = 6.7 + 2.0 - 0.8 \ {\rm cpd}/100t$ [6], который по-прежнему больше теоретического, мы хотим отметить, что в работе [9] указывалось на систематическое смещение среднего при восстановлении его при помощи фитирования экспериментальных данных Борексино. Величина для скорости счета $R(^{40}{\rm K}$ -geo- $\nu) = 7.05 \ {\rm cpd}/100t$, соответствующая черной штриховой кривой на рис. 1*a*, также включает в себя такое систематическое смещение. Следовательно, реальная доля калия в Земле может оказаться несколько меньше указанных выше 3.2%.

Аргументы в пользу существования столь большого количества калия в Земле приведены в работе [11].

3. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕГИСТРАЦИИ ИЗБЫТКА ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОИОНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЯХ

Как отмечалось выше, НЕ-модель предсказывает большое количество калия в Земле. Это предсказание противоречит принятой в настоящее время модели Земли (BSE-модель — Bulk Silicate Earth model). В качестве дополнительного аргумента в пользу НЕ-модели могло быть обнаружение другого явления, предсказываемого НЕмоделью и не предсказываемого BSE-моделью. В качестве такого явления мы рассмотрим здесь предсказание наличия избытка положительного заряда в коре Земли.

В работе [4] упоминалось о регистрации избытка положительных аэроионов в закрытых подземных полостях модифицированным счетчиком аэроионов "Сапфир-ЗМ". На рис. 2 приведен пример изучения зависимости плотностей аэроионов обоих знаков от времени и их зависимости от атмосферного давления. Измерения проводились с 21 ноября до 9 декабря 2021 г. в подземной невентилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ с глубиной 12.7 м. Измерения проводились у потолка, потому что у потолка была обнаружена максимальная (по сравнению с другими положениями счетчика аэроионов в лаборатории) концентрация отрицательно заряженных аэроионов. Это наблюдение соответствует предсказанию НЕ-модели о существовании



Рис. 2. Зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Измерения проводились с 21 ноября до 9 декабря 2021 г. у потолка в подземной невентилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Все данные усреднены в интервале 10 мин. a — Кривые: серая штриховая — плотность аэроионов положительного заряда N_+ , черная штриховая — отрицательного заряда N_- , сплошная — зависимость атмосферного давления от времени, точки (полые квадратики) — результаты измерения активности радона у пола лаборатории. δ — Зависимость от времени коэффициента униполярности N_+/N_- . В 18 : 00 26.11.2021 г. был выключен осушитель.

в коре Земли напряженности электрического поля, направленного вниз. Все данные усреднены в интервале 10 мин. Штриховой кривой с серыми точками показана (рис. 2a) плотность аэроионов положительного заряда N_+ . Штриховой кривой черного цвета — отрицательного заряда N_- . Сплошная кривая — зависимость атмосферного давления от времени. Полыми квадратиками показаны результаты измерения активности радона у пола лаборатории. Рисунок 26 — зависимость от времени коэффициента униполярности N_+/N_- . В 18 : 00 26.11.2021 был выключен осушитель и влажность установилась в районе 46%.

Наблюдаемая зависимость плотностей аэроионов от атмосферного давления может быть объяснена тем, что радон и положительный заряд постоянно приносятся газовыми пузырьками, появляющимися в поровой водной среде. НЕ-модель предсказывает, что поднимающиеся водородсодержащие газы несут положительный заряд. Также НЕмодель предсказывает, что отрицательно заряженный слой расположен под корой Земли, поэтому вектор напряженности электрического поля в коре Земли должен быть направлен вниз. Теллурические токи положительного заряда в коре Земли также являются естественным следствием НЕ-модели.

Однако наблюдение наличия избытка положительного заряда в закрытых полостях земной коры не является бесспорным доказательством наличия избытка положительного заряда вокруг этой полости. Поэтому экспериментальные исследования в области земного электричества должны быть продолжены.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Добавление событий от ⁴⁰K-geo- ν при анализе данных Борексино позволяет улучшить согласие экспериментального и фитированного энергетических спектров при скоростях счета событий: $R(^{40}$ K-geo- $\nu) = 7.05$ cpd/100t, $R(^{210}$ Bi) = = 6 cpd/100t и $R(^{85}$ Kr) = 3.76 cpd/100t. Скорости счета событий от СNO- ν и остальных источников при включении в анализ событий от ⁴⁰K-geo- ν не изменяются. Полученная скорость счета от ⁴⁰Kgeo- ν соответствует 3.2% калия от массы Земли. Эта величина не противоречит предсказанию гидридной модели Земли. Однако имеющаяся статистика и неопределенности в знании концентраций ²¹⁰Bi и ⁸⁵Kr в сцинтилляторе не позволяют выбрать между набором источников событий с добавлением событий от ⁴⁰K-geo- ν и без добавления.

Можно предложить детектор нового поколения, который сможет зарегистрировать большой поток

калийных геоантинейтрино с высокой достоверностью. Это — детектор типа Борексино, но с очищенным от радиоактивности нейлоновым внутренним мешком. Это позволит измерить концентрацию ²¹⁰Ві в сцинтилляторе, увеличить статистику и измерить скорость счета ⁴⁰К-geo-*ν*.

Приведены результаты исследований плотностей аэроионов в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ. Во всех проведенных измерениях зарегистрирован избыток положительных аэроионов. Наблюдаемая зависимость плотностей аэроионов от атмосферного давления может быть объяснена тем, что радон и положительный заряд постоянно приносятся газовыми пузырьками, появляющимися в поровой водной среде.

Результаты эксперимента Борексино и экспериментов по изучению плотностей аэроионов обоих знаков в закрытых полостях в земной коре не противоречат предсказаниям гидридной модели Земли. Однако для окончательного подтверждения существования большого количества калия в Земле и положительно заряженной земной коры требуются дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- L. B. Bezrukov, A. S. Kurlovich, B. K. Lubsandorzhiev, V. V. Sinev, V. P. Zavarzina, and V. P. Morgalyuk, EPJ Web Conf. 191, 03005 (2018).
- В. Н. Ларин, Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли) (Агар, Москва, 2005); V. N. Larin, Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet, Ed. by C. Warren Hunt (Polar Publ., Calgary, Alberta, 1993).
- 3. H. Toulhoat and V. Zgonnik, ApJ 924, 83 (2022).

 Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, А. С. Курлович, Б. К. Лубсандоржиев, А. К. Межох, В. П. Моргалюк, В. В. Синёв, ДАН 480, 155 (2018) [Dokl. Phys. 63, 177 (2018);

https://doi.org/10.1134/S1028335818050051].

- 5. Borexino Collab. (M. Agostini *et al.*), Nature **587**, 577 (2020); arXiv: 2006.15115 [hep-ex].
- S. Appel, Z. Bagdasarian, D. Basilico, G. Bellini, J. Benziger, R. Biondi, B. Caccianiga, F. Calaprice, A. Caminata, P. Cavalcante, A. Chepurnov, D. D'Angelo, A. Derbin, A. Di Giacinto, V. Di Marcello, X. F. Ding, *et al.*, arXiv: 2205.15975 v1 [hep-ex].
- V. V. Sinev, L. B. Bezrukov, E. A. Litvinovich, I. N. Machulin, M. D. Skorokhvatov, and S. V. Sukhotin, Phys. Part. Nucl. 46, 186 (2015); https://doi.org/10.1134/S1063779615020173; arXiv: 1405.3140 [physics.ins-det].
- Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, И. С. Карпиков, Ф. С. Курлович, Ф. К. Межох, С. В. Силаева, В. В. Синев, Изв. РАН. Сер. физ. 85, 566 (2021); https://doi.org/10.31857/S0367676521040062
 [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].

- 9. L. Bezrukov, A. Gromtseva, I. Karpikov, A. Kurlovich, A. Mezhokh, P. Naumov, Ya. Nikitenko, S. Silaeva, V. Sinev, and V. Zavarzina, arXiv: 2202.08531 [physics.ins-det].
- M. Agostini *et al.* (Borexino Collab.), Phys. Rev. D 100, 082004 (2019).
- L. B. Bezrukov, I. S. Karpikov, A. S. Kurlovich, A. K. Mezhokh, S. V. Silaeva, V. V. Sinev, and V. P. Zavarzina, arXiv: 2007.07371v2 [hep-ex physics.ins-det].

GEO-NEUTRINO AND EARTH ELECTRIC FIELD

L. B. Bezrukov¹, I. S. Karpikov¹, A. K. Mezhokh¹, S. V. Silaeva¹, V. V. Sinev¹

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

The possibility of large geo-antineutrino fluxes from ⁴⁰K decays and the presence of an excess of positive electric charge in the Earth's crust are predicted by the Hydride Model of the Earth. The data of the Borexino experiment do not contradict the proportion of potassium equal to several percent of the Earth's mass and predicted by this model. The detection of an excess of positively charged air-ions in underground laboratories can be explained by the presence of an excess of positive electric charge in the Earth's crust. Further studies are needed to confirm the existence of both of these effects.