

Обоснование- представление

Цикл работ: “Нейтринная геофизика”

на соискание премии ЛЯП за 2019 г.

Авторы: **ЛЯП ОИЯИ:**
Вишнева А.В.
Громов М.Б.
Смирнов О.Ю.

Представляется цикл из 2 научно-исследовательских работ, главы в коллективной монографии и обзора **“Нейтринная геофизика”**

Нейтринная геофизика – новая быстро развивающаяся область науки на стыке геологии, геофизики и физики частиц – изучает внутреннее строение Земли посредством измерения потока геонейтрино на ее поверхности. Геонейтрино – антинейтрино сопровождающие распад радиоактивных элементов в коре и мантии Земли. Радиогенный вклад в полное тепловыделение Земли является важным параметром, определяющим тепловую историю Земли, и, соответственно, ограничивающим геофизические модели Земли. Об экспериментальном указании на присутствие геонейтринного сигнала впервые было заявлено в 2005 г. японо-американской коллаборацией KamLAND на основании данных, полученных на детекторе в шахте Камиока в Японии. Первое надежное подтверждение ненулевого геонейтринного потока было опубликовано в 2010 году коллаборацией Borexino.

Для детального изучения вклада радиоактивных элементов в разогрев Земли необходимы измерения от нескольких детекторов подобных Borexino, расположенных в различных точках земного шара. Методика, отработанная на Borexino, уже дала жизнь новым проектам масштаба десятков килотонн, нацеленным в том числе на измерение геонейтринного потока. Яркий тому пример – детектор JUNO в Китае.

На конкурс выносятся цикл работ по нейтринной геофизике,

включающий 2 работы по измерению геонейтринных потоков на детекторе Борексико, главу в первой специализированной коллективной монографии по нейтринной геофизике, и обзор по экспериментальной геофизике. Работы опубликованы в журналах Phys.Rev.D и Progress in Particle and Nuclear Physics. В рамках работ цикла получены уникальные результаты по геонейтринным потокам на детекторе Борексико. Результаты и перспективы экспериментальных исследований геонейтринно представлены в обширном обзоре руководителя группы.

Новые измерения геонейтринного потока в Борексико выполнены на данных, набранных в течение 3263 дней, между декабрем 2007 года и апрелем 2019. Критерии отбора антинейтринных кандидатов были оптимизированы в сравнении с применявшимися ранее. В результате достигнуто значительное увеличение эффективной экспозиции, главным образом за счет увеличения доверительного объема детектора и применения более сложного отбора событий космогенного фона. На экспозиции, в два раза превышающей использовавшуюся при предыдущем анализе, и достигшей $(1.29 \pm 0.05) \times 10^{32}$ протонов \times год наблюдается $52.6^{+9.4}_{-8.6}(\text{стат})^{+2.7}_{-2.1}(\text{сист})$ геонейтринных событий от распадов ^{238}U и ^{232}Th , точность измерения геонейтринного сигнала достигла $^{+18.3}_{-17.2}\%$. Вклад антинейтринно от ядерных реакторов никак не ограничивался при подгонке данных, результаты подгонки совпадают с ожидаемыми. После получения статистически надежного указания на существование геонейтринно, усилия физиков сконцентрированы на выделении вклада от мантии в полный геонейтринный поток. Гипотеза отсутствия геонейтринного сигнала от мантии исключается данными Борексико на У.Д. 99%. Измеренный от мантии сигнал составляет $21.2^{+9.5}_{-9.0}(\text{стат})^{+1.1}_{-0.9}(\text{сист})$ TNU и соответствует радиогенному теплу от U и Th в мантии $24.6^{+11.1}_{-10.4}$ ТВт. В предположении, что вклад калия в тепло мантии составляет 18%, и используя оценку полного радиогенного тепла для литосферы $8.1^{+1.9}_{-1.4}$ ТВт, измерение Борексико соответствует полному радиогенному потоку тепла от Земли $38.2^{+13.6}_{-12.7}$ ТВт, что соответствует конвективному отношению Юри $0.78^{+0.41}_{-0.28}$. Данные значения хорошо совместимы с различными геофизическими моделями, демонстрируя только статистически слабое ($\sim 2.4\sigma$) отклонение для моделей с наиболее низкими концентрациями радиоактивных элементов в мантии. Дополнительно, существование гипотетического гео-реактора в центре Земли с мощностью выше 2.4 ТВт исключается данными Борексико на уровне 95% У.Д.. Процесс

поиска сигнала от геореактора заключался в подгонке экспериментальных данных с дополнительным вкладом от геореактора, но при вкладе от мировых ядерных реакторов ограниченном у теоретического предсказания. В статье особое внимание уделено деталям анализа данных, представляющих интерес для следующего поколения экспериментов с жидким сцинтиллятором.

Дубненская группа была зачинателем геонейтринных исследований на детекторе Борексико. Первые оценки чувствительности детектора к геонейтрину были проведены еще в 2006 году по результатам работы на прототипе Борексико (CTF) [4]. Группа участвовала в получении ранних результатов, связанных с регистрацией антинейтринных низких энергий, включая две первые работы по геонейтрину (публикации 2010 и 2013 годов). Работы [1] и [3], выносимые на конкурс, готовились в составе группы антинейтринного анализа Борексико, в сотрудничестве с коллегами по Борексико. Дубненская группа разрабатывала и оптимизировала критерии отбора антинейтринных событий, в том числе для подавления фона от быстрых нейтронов; улучшила качество данных системы FADC и выполнила их анализ, результаты последнего использовались при построении спектра антинейтринных в области энергий от 1.8 до ~ 9 МэВ. Выполнила моделирование и расчёт фона от (α, n) реакций. Группа участвовала в подготовке текста статей, а также во внутреннем рецензировании. Накопленный опыт подытожен в объемном обзоре руководителя группы [4]. Помимо прямой работы с данными детектора Борексико, члены группы активно занимаются формированием научного интереса к новой области науки, представляя доклады как по геонейтринным результатам Борексико, так и обзорные доклады по нейтринной геофизике, на семинарах, школах и международных конференциях

Результаты представлялись на семинарах в ЛЯП, в лаборатории Гран Сассо, в Миланском университете, Белорусском гос. университете, университете им. Комениуса (Братислава), в ИЯИ РАН в Троицке, а также на международных конференциях. Публикации дубненской группы в рецензируемых трудах конференций вынесены в дополнительный список: [5]-[10], пленарные доклады [11]-[20], семинары [21]-[30], постеры [31]. Результатам работы вошли в том числе в кандидатскую диссертацию М. Громова [32].

Цикл работ, выносимых на конкурс

[1] M. Agostini, et al. (The Borexino collaboration), “Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data”, Phys. Rev. D 92, 031101, 2015 . Paper highlighted in the Editor’s Suggestion on the PRD website.

[2] O.Smirnov, “The physics of geoneutrino and their detection”, in Geoneutrinos by Open Academic Press, 2016, ISBN 978-83-944520-1-8. (Глава в коллективной монографии).

[3] M. Agostini et al. (The Borexino collaboration), “Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino”, Phys. Rev. D 101, 012009 (2020).

[4] O.Smirnov, “ Experimental aspects of geoneutrino detection: Status and perspectives”, Progress in Particle and Nuclear Physics, Volume 109, 2019, 103712

Дополнительный список. Труды конференций

[5] O. Yu. Smirnov and A. Ianni, “Borexino Geo/Solar Antineutrino discovery potential (on the basis of CTF results)” in Proceedings of XXII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Santa Fe, June 13-19, 2006. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 221:398 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2011.10.046.

[6] М.Громов, Гео-нейтрино и исследования строения Земли // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». НИИЯФ МГУ. Москва, Россия: МГУ, 2014, С. 88—97.

[7] O.Smirnov, “Neutrino geophysics”, Proc. of the 4th South Africa - JINR Symposium "Few to Many Body Systems: Models, Methods and Applications" ", edited by F. Šimkovic and conveners of session, ISBN-978-5-9530-0445-9.

[8] М.Громов, “Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино”, Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5 , № 9—10. С. 782.

[9] O.Smirnov, “Borexino. Recent results and future plans”, Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", ОИЯИ, Дубна. 12 -17 апреля 2016 г. Physics of Particles and Nuclei, 2017, Vol. 48, No. 6, pp. 1026–1029.

[10] O.Smirnov, “Geoneutrino : experimental status and perspectives”, 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1056 012055

Дополнительный список. Доклады на конференции (пленарные)

[11] М.Громов, “Гео-нейтрино и исследования строения Земли”. НИИЯФ МГУ. Москва, Россия, 25-26 ноября 2014. XV межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине».

[12] М.Громов, “Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино.” НИЯУ МИФИ, ОФН РАН. Москва, Россия, 17-21 ноября 2014. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» - 2014.

[13] M.Gromov, “Antineutrino physics in Borexino”. MSU. Moscow, Russia, August 20-26, 2015. The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics.

[14] O.Smirnov on behalf of the Borexino collaboration. “Geoneutrino flux measurement with Borexino detector”, International Workshop: Neutrino Research and Thermal Evolution of the Earth, October 25 – 27, 2016, Sendai, Japan

[15] O.Smirnov on behalf of the JUNO collaboration. “Geoneutrino studies with JUNO detector”, International Workshop: Neutrino Research and Thermal Evolution of the Earth October 25 – 27, 2016, Sendai, Japan.

[16] O.Smironov, “Measurement of the geo-neutrino fluxes: status and future”, International Session-Conference of the Section of Nuclear Physics of the Physical Sciences Department of the Russian Academy of Sciences "Physics of fundamental interactions" dedicated to 50th anniversary of Baksan Neutrino Observatory, June 6-8, 2017. (доклад на параллельной сессии).

[17] O.Smironov, “Geo-neutrino : experimental status and perspectives”, Conference on Neutrino and Nuclear Physics (CNNP2017) 15-21 October 2017, Monastero dei Benedettini, University of Catania, Catania, Italy.

[18] М.Громов, “Регистрация нейтрино с энергиями от 1 до 50 МэВ с помощью детектора BOREXINO”. ФИАН. Москва, Россия, 17 апреля 2018. XI Черенковские чтения.

[19] O.Smironov, “Solar and geo-neutrinos: current status and future directions”, International school of nuclear physics 41st Course Star Mergers, Gravitational Waves, Dark Matter and Neutrinos in Nuclear, Particle and Astro-Physics, and in Cosmology Erice-Sicily: September 16-24, 2019

[20] O.Smironov, “Solar and geo-neutrinos”, Future of large-scale neutrino detectors, INR, Moscow: October 3-4, 2019

Семинары

[21] O.Smironov, “Neutrino geophysics”, Università Milano-Bicocca Dipartimento di Fisica, October 6, 2014.

[22] О.Смирнов, “Нейтринная геофизика”, БГУ, Минск, 26 мая 2015 г.

[23] М.Громов, “Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте BOREXINO”. ИЯИ РАН. Троицк, Россия, 19 января 2015. Доклад на семинаре ОФВЭ ИЯИ РАН (рук. Ю.Г. Куденко).

[24] О.Смирнов, “Измерение потоков геонейтрино: статус и будущее”, нейтринный семинар ЛЯП, 11 ноября 2016.

[25] O.Smironov, “Measurement of the geo-neutrino fluxes: status and future”, LNGS seminar, November 28, 2016.

[26] O.Smironov, “Measurement of the geo-neutrino fluxes: status and future”, seminar at Comenius Iniversity, Bratislava, January 11, 2017.

[27] М.Громов, “Особенности калибровки детектора Borexino в свете решаемых физических задач по регистрации гео- и стерильных нейтрино”. ФИАН и ИЯИ РАН. Москва, Россия, 22 декабря 2017. Доклад на семинаре ОЛВЭНА ИЯИ РАН «Нейтринная и ядерная астрофизика» им. Г.Т. Зацепина (рук. О.Г. Ряжская).

[28] О.Смирнов, “Экспериментальная нейтринная физика и астрофизика: состояние и перспективы”, Семинар ЛВЭ, 12 января 2018 г.

[29] О.Смирнов, “Нейтринная геофизика: новые результаты”, нейтринный семинар ЛЯП, 5 февраля 2020.

[30] О.Смирнов, “Нейтринная геофизика”, семинар ЛВЭ, 7 февраля 2020.

Дополнительный список. Постерные доклады

[31] M.Gromov on behalf of the Borexino collaboration. “The final measurement of the geo-neutrino flux with the Borexino detector and its geophysical implications”, the 52nd meeting of the PAC for Particle Physics, JINR, February 3-4, 2020.

Диссертации

[32] М.Громов. «Регистрация нейтрино с энергиями от 1 до 50 МэВ с помощью детектора Borexino», диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц». Гео-нейтрино посвящена глава 4, на защиту вынесен следующий результат: «Измерен поток электронных антинейтрино из недр Земли (гео-нейтрино) в детекторе Borexino по данным, набранным в период с декабря 2007 по

март 2015. Результаты измерения исключают гипотезу отсутствия гео-нейтрино.