

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАДИОГЕННОЕ ТЕПЛО ЗЕМЛИ, В ЕЕ НЕДРАХ И ГЕОНЕЙТРИНО

В.Н. Сергеев

Рассмотрена возможность нахождения распределения радиоактивных элементов, определяющих радиогенное тепло Земли, по данным регистрации геонейтрино. Представлены последние данные по геонейтрино, полученные детекторами KamLAND и Borexino. Высказано предположение, что некоторое различие в данных радиогенного тепла, полученных этими детекторами, связано с наличием неоднородности распределения радиоактивных элементов в мантии. Приведены проекты детекторов, способных регистрировать геонейтрино, которые могут быть реализованы в ближайшие годы.

Введение

В процессе образования и эволюции Земли сформировалась ее внутренняя структура – выделились железно-никелевое ядро и силикатные мантия и кора. В результате гравитационной дифференциации радиоактивные элементы, присутствовавшие в исходном материале, из которого образовалась Земля, распределились по геосферам согласно их химическим свойствам в условиях высоких температур и давлений. Согласно моделям [Fiorentini et al., 2007; Sramek et al., 2012], основной вклад в радиогенное тепло Земли в настоящее время дает радиоактивный распад в земных недрах долгоживущих (имеющих период полураспада, соизмеримый с возрастом Земли) изотопов U, Th и K. Это ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th и ^{40}K с периодами полураспада $4,47 \cdot 10^9$, $0,713 \cdot 10^9$, $14,05 \cdot 10^9$ и $1,28 \cdot 10^9$, соответственно. В настоящее время, по оценкам [Sramek et al., 2012], доли вкладов распадов в радиогенное тепло Земли составляют: ^{238}U и ^{232}Th примерно по 40%, ^{40}K несколько менее 20% и ^{235}U около 2%.

Хотя вопрос о наличии радиоактивных элементов в земном ядре является дискуссионным [McDonough, 2014], обычно считается, что там нет значительного количества радиоактивных элементов [Usman et al., 2015], и они сосредоточены, в основном, в силикатной части Земли (BSE – Bulk Silicate Earth), в мантии и коре. Наличие радиоактивных элементов в коре относительно хорошо изучено как для континентальной коры [Huang et al., 2013], так и для океанической [White, 2013; White, Klein, 2014]. Для мантии существуют, в основном, модельные представления [Sramek et al., 2013].

Перечисленные выше изотопы урана и тория распадаются в результате α -распадов. Некоторые продукты этих распадов оказываются нестабильными и, в свою очередь, распадаются. Таким образом, порождаются цепочки распадов, которые заканчиваются образованием стабильных изотопов. Часть распадов в этих цепочках являются β -распадами [Fiorentini et al., 2007]. Изотоп ^{40}K распадается, в основном, в результате β -распада [Fiorentini et al., 2007]. Процесс β -распада сопро-

воздается рождением электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ (геонейтрино, если речь идет о земных недрах). Регистрация геонейтрино теоретически дает возможность получить информацию о радиогенном тепле Земли и распределении радиоактивных элементов в ее недрах.

Регистрация геонейтрино

Регистрация нейтрино является чрезвычайно сложной задачей из-за слабости их взаимодействия с веществом. Для регистрации геонейтрино используют детекторы большого объема с жидким сцинтиллятором, содержащим соединения водорода. Такими детекторами являются как действующие детекторы KamLAND (масса сцинтиллятора около 1 кт) в Японии и Borexino (м. с. около 0,3 кт) в Италии [Bellini et al., 2013], так и создаваемые и проектируемые.

При попадании электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ в рабочий объем детектора может происходить реакция обратного β -распада на свободном протоне p :



Эта реакция имеет наибольшее нейтринное сечение [Dye, 2012] и удобную схему пространственно-временного выделения над фоном по ее конечным продуктам (позитрону e^+ и нейтрону n). Рождающийся в результате реакции (1) позитрон через несколько нс аннигилирует с испусканием двух γ -квантов. Нейтрон после ряда упругих столкновений теряет свою кинетическую энергию и соединяется с протоном, образуя ядро дейтерия. Этот процесс также сопровождается излучением γ -кванта. Ядро дейтерия образуется через 20÷200 мкс после рождения нейтрона в результате реакции (1).

Энергетические характеристики процессов в сцинтилляторе определяются по регистрируемой выделившейся световой энергии. Две вспышки света в сцинтилляторе, быстрая и отложенная, являются характерными признаками протекания реакции (1) и, следовательно, регистрации $\bar{\nu}_e$. Порог реакции (1) равен 1,806 Мэв. Это обстоятельство не позволяет регистрировать геонейтрино от распадов ^{40}K и ^{235}U по реакции (1) (см. рис. 1). Ситуация с ^{235}U не вызывает проблем из-за возможности регистрации $\bar{\nu}_e$ от распада ^{238}U . Регистрация же $\bar{\nu}_e$ от распада ^{40}K рассматривается пока только на уровне концепций [Chen, 2015]. О содержании К в земных недрах можно ознакомиться в работе [Arevalo et al., 2009].

Определение направления на источник геонейтрино и распределение радиоактивных элементов в земных недрах

Важной характеристикой регистрируемого электронного антинейтрино является направление на его источник, которое практически совпадает с направлением движения $\bar{\nu}_e$ в рабочем объеме детектора при регистрации по реакции (1). Знание угловых распределений прилета в детектор геонейтрино позволяет построить распределение радиоактивных элементов в земных недрах. Для случая сферической симметрии такого распределения это продемонстрировано в работе [Fields, Hochmuth, 2006].

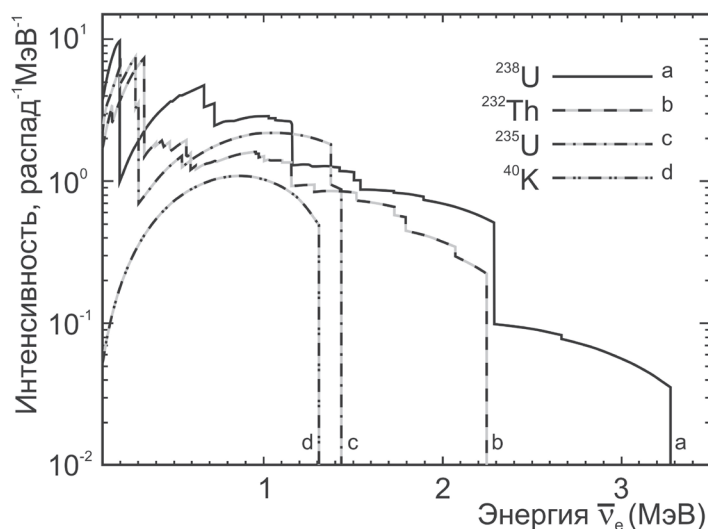


Рис. 1. Энергетические спектры $\bar{\nu}_e$ от распадов ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U и ^{40}K , изотопов, дающих основной вклад в радиогенное тепло Земли [Dye, 2012]

Согласно [Vogel, Beacom, 1999] в реакции (1) для энергий геонейтрино (менее 3,26 Мэв, см. рис. 1) позитрон имеет практически изотропное угловое распределение, а угловое распределение нейтрона концентрируется в направлении $\bar{\nu}_e$. Последующие столкновения нейтрона с ядрами среды меняют направление движения нейтрона, но, в целом, нейтрон сохраняет направление $\bar{\nu}_e$. Зная координаты точки аннигиляции позитрона и точки захвата нейтрона, усредняя по многим событиям регистрации $\bar{\nu}_e$, можно получить направление на источник геонейтрино [Batygov, 2006; Domogatsky, 2006]. Однако точность при этом невысока. Ситуация может быть улучшена при добавлении в сцинтиллятор веществ, ядра которых имеют большее сечение захвата нейтрона, чем водород. При этом уменьшается время с момента рождения нейтрона в реакции (1) до его захвата. Наиболее подходящими являются Gd, ^6Li и ^{10}B [Batygov, 2006; Tanaka, Watanabe, 2014; Kim et al., 2015].

Несколько иной подход к определению направления прилета $\bar{\nu}_e$ в детектор рассмотрен в [Safdi, Suerfu, 2015]. В этой работе предложено делать детектор из набора чередующихся тонких слоев с полностью проницаемыми для нейтронов промежутками. В одном слое происходит аннигиляция позитрона, а в соседнем, наполненном сцинтиллятором с добавками ^{10}B , захват нейтрона. Такая схема имеет ряд преимуществ по сравнению с детектором с монокристаллическим рабочим объемом [Safdi, Suerfu, 2015]. Следует заметить, что во всех случаях, необходимое для получения приемлемых результатов число событий регистрации $\bar{\nu}_e$ – это тысячи.

Данные по геонейтрино, полученные детекторами KamLAND и Borexino

Регистрация геонейтрино от распада ^{238}U и ^{232}Th ведется детекторами KamLAND с 2002 и Borexino с 2007 гг. На рис. 2 представлены данные регистрации геонейтри-

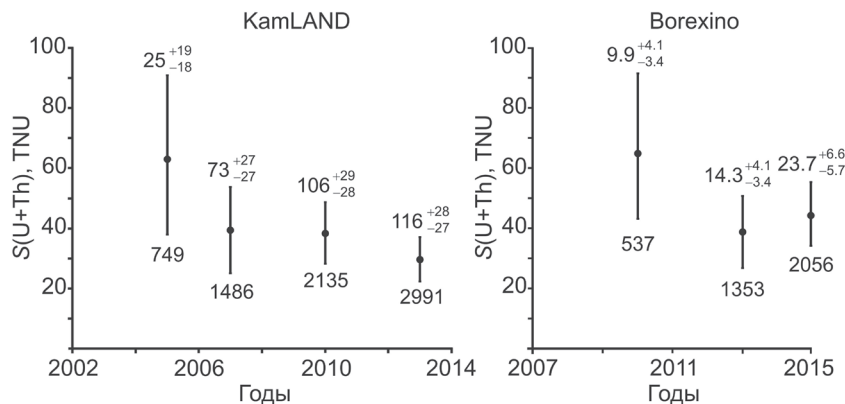


Рис. 2. Величины зарегистрированных сигналов геонейтрино от U и Th по мере накопления данных.

Горизонтальные шкалы – годы публикации данных. Числа около значений зарегистрированного сигнала: вверх – количество зарегистрированных геонейтрино, вниз – количество дней накопления данных

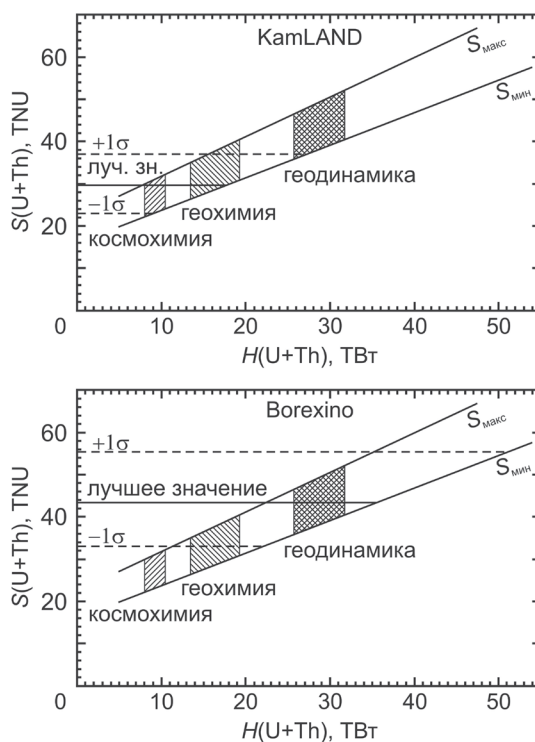


Рис. 3. Ожидаемый сигнал геонейтрино для детекторов KamLAND и Borexino в зависимости от радиогенного тепла, выделяемого при радиоактивном распаде U и Th в недрах Земли.

Горизонтальные линии – результаты регистрации геонейтрино от U и Th детекторами KamLAND [Gando et al., 2013] и Borexino [Agostini et al., 2015]. Линии S_{max} и S_{min} соответствуют максимальному и минимальному ожидаемому сигналу в зависимости от распределения U и Th в мантии и коре. Заштрихованные области показывают радиогенное тепло от U и Th, предсказываемое космохимической, геохимической и геодинамической моделями BSE согласно классификации [Sramek et al., 2013]

но этими детекторами по годам их публикации. Актуальные на сегодняшний день данные опубликованы в работах [Gando et al., 2013; Agostini et al., 2015]. Величина сигнала геонейтрино S измеряется в единицах TNU (Terrestrial Neutrino Units), $1 \text{ TNU} = 1$ событие в год в мишени, содержащей 10^{32} протонов. Имея в виду данные, приведенные на рис. 2, очевидно, что для определения углового распределения прилета геонейтрино требуются детекторы с массой сцинтиллятора в десятки раз больше, чем в действующих детекторах. Поэтому, не имея информации о направлении прилета геонейтрино в детектор, сигнал от распада U и Th в мантии оценивают, вычитая из сигнала от BSE сигнал от коры, который вычисляется на основе геологических данных о распределении U и Th в ней. Полученные таким образом величины сигнала от распадов U и Th в мантии составляют для детектора KamLAND $6,0 \pm 7,5 \text{ TNU}$ и для Borexino $20,1 \pm 12,4 \text{ TNU}$ [Dye, 2015]. Подобный совместный анализ данных двух детекторов (в предположении сферически симметричной мантии) дает $9,8 \pm 6,5 \text{ TNU}$ [Dye, 2015].

Величина радиогенного тепла Земли однозначно определяется количеством радиоактивных элементов в земных недрах. Сигнал же геонейтрино определяется как количеством радиоактивных элементов (следовательно, и величиной радиогенного тепла), так и их распределением в земных недрах. Для сферически симметричного распределения радиоактивных элементов в мантии Земли максимальный сигнал геонейтрино достигается при однородном распределении в мантии и максимально возможном количестве радиоактивных элементов в коре, минимальный – при сосредоточении радиоактивных элементов в тонком слое у границы мантия – ядро и минимально возможном количестве радиоактивных элементов в коре [Bellini et al., 2013]. На рис. 3 представлена величина ожидаемого сигнала геонейтрино от распада U и Th как функция радиогенной энергии и результаты регистрации сигнала детекторами KamLAND и Borexino.

На рис. 3 обращает на себя внимание более высокие значения радиогенного тепла, измеренные детектором Borexino, по сравнению с данными детектора KamLAND. Если с получением новых данных ситуация не изменится, то это может означать существование неоднородности в распределении радиоактивных элементов в мантии Земли.

Перспективы

Нейтринные детекторы, способные регистрировать геонейтрино, многоцелевые, сложные и дорогостоящие установки. В настоящем разделе приведены проекты, которые будут реализованы (или могут быть реализованы) в ближайшие годы. Детектор SNO+ с массой сцинтиллятора около 0,8 кт в Канаде [Andringa et al., 2015] начнет регистрацию геонейтрино в 2016 году. Европейский детектор LENA с массой сцинтиллятора около 50 кт предполагается построить в Финляндии или во Франции [Wurm et al., 2012]. Детектор JUNO с массой сцинтиллятора около 20 кт будет создан в Китае [An et al., 2015].

Мобильный детектор Hanohano с массой сцинтиллятора около 10 кт предполагается создать в США [Learned et al., 2008]. Детектор будет транспортироваться на барже в интересующий район Мирового Океана, с последующим погружением, где будет опускаться на большую глубину для сбора данных. Рис. 4 иллюстрирует преимущество в регистрации сигнала геонейтрино от распадов радиоактивных элементов в мантии Земли океанского детектора относительно детекторов, распо-

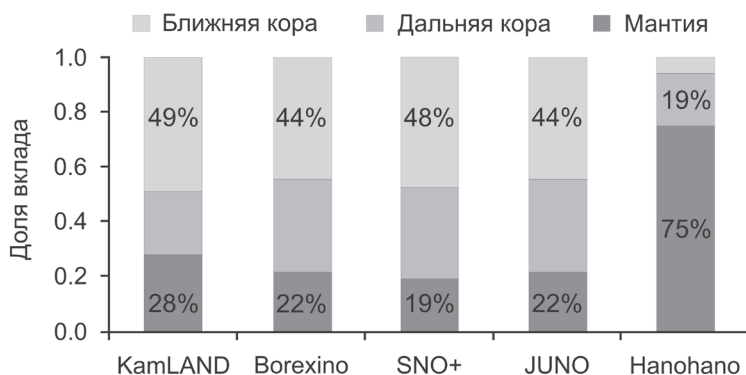


Рис. 4. Предсказываемые доли вкладов сигналов геонейтрино, генерируемых при распаде U и Th в недрах Земли, для различных детекторов от ближней коры (определяемой как ближайшие шесть участков коры размером 2×2) и дальней коры (остаток коры после выделения ближней коры) по [Dye et al., 2015; Strati et al., 2015]

ложенных на континентах. Предполагается, что детекторы LENA и JUNO будут регистрировать направление прилета геонейтрино.

Заключение

Совершенствование техники измерения направления прилета геонейтрино в детектор и создание детекторов нового поколения с массой сцинтиллятора в десятки кт позволит достаточно надежно определить распределение U и Th в земных недрах. Это даст возможность получить более точные данные о радиогенном тепле земных недр и проверить достоверность геохимических моделей состава Земли.

Литература

- Agostini M. et al. Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data // Phys. Rev. D. 2015. 92, 031101; arXiv: 1506.04610v1 [hep-ex].
- An F. et al. Neutrino Physics with JUNO; arXiv:1507.05613v1 [physics.ins-det].
- Andringa S. et al. Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment. 2015; arXiv: 1508.05759v1 [physics.ins-det].
- Arevalo R. Jr. et al. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution // Earth and Planetary Science Letters. 2009. 278. P. 361–369.
- Batygov M. On the Possibility of Directional Analysis for Geo-neutrinos // Earth, Moon, and Planets. 2006. 99. 1. P. 183–192.
- Bellini G. et al. Geo-Neutrinos // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2013. 73. P. 1–34; arXiv: 1310.3732v1 [physics.geo-ph].
- Chen M. ^{40}K Geoneutrino Detection / Neutrino Geoscience 2015. Paris, France. June 15–17, 2015; http://www.ipgp.fr/sites/default/files/ngs2015_chen.pdf
- Domogatsky G. et al. Can Radiogenic Heat Sources Inside the Earth be located by their Antineutrino incoming Directions? // Physics of Atomic Nuclei. 2006. 69. 11. P. 1894 – 1898; arXiv: 0411163v1 [hep-ph].

- Dye S.T. Geo-neutrinos and the Radioactive Power of the Earth // Reviews of Geophysics. 2012. 50. RG3007; arXiv: 1111.6099v3 [nucl-ex].
- Dye S.T. Geo-neutrinos: combined KamLAND and Borexino analysis, and future / Neutrino Geoscience 2015. Paris, France. June 15–17, 2015; http://www.ipgp.jussieu.fr/sites/default/files/ngs2015_dye.pdf
- Dye S.T. et al. Geo-neutrinos and Earth Models // Physics Procedia. 2015. 61. P. 310 – 318; arXiv:1405.0192v1 [physics.geo-ph].
- Fields B.D., Hochmuth K.A. Imaging the Earth's Interior: the Angular Distribution of Terrestrial Neutrinos // Earth, Moon, and Planets. 2006. 99. 1. P. 155–181; arXiv: 0406001 [hep-ph].
- Fiorentini G., et al. Geo-Neutrinos and Earth's Interior // Phys. Rep. 2007.453. P. 117–172; arXiv: 0707.3203v2 [physics.geo-ph].
- Gando A. et al. Reactor ON-OFF Antineutrino Measurements with KamLAND // Phys. Rev. D. 2013. 88. 033001; arXiv: 1303.4667v2 [hep-ex].
- Huang Y. et al. A reference Earth model for the heat-producing elements and associated geoneutrino flux // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. 14. 6. P. 2003–2029.
- Kim B. R. et al. Development of (Gd, ^6Li)-loaded Organic Liquid Scintillators for Reactor Neutrino Detection // Journal of the Korean Physical Society. 2015. 66. 5. P. 768–773.
- Learned J.G. et al. Hanohano: a deep ocean anti-neutrino detector for unique neutrino physics and geophysics studies. 2008; arXiv: 810.4975v1 [hep-ex].
- McDonough W.F. Compositional Model for the Earth's Core / Treatise on Geochemistry (Second Edition). Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier. 2014. V. 3: The Mantle and Core. P. 559–577.
- Safdi B.R., Suerfu B. Directional Antineutrino Detection // Phys. Rev. Lett. 2015. 114. 071802; arXiv: 1410.8530v1 [physics.ins-det].
- Sramek O. et al. Geoneutrinos // Advances in High Energy Physics. 2012. Article ID 235686. 34 p.
- Sramek O. et al. Geophysical and geochemical constraints on geo-neutrino fluxes from Earth's mantle // Earth and Planetary Science Letters. 2013. 361. P. 356–366; arXiv: 1207.0853v2 [physics.geo-ph].
- Strati V. et al. Expected geoneutrino signal at JUNO // Progress in Earth and Planetary Science. 2015. 2:5; arXiv: 1412.3324v2 [physics.geo-ph].
- Tanaka H. K. M., Watanabe H. ^6Li -loaded directionally sensitive anti-neutrino detector for possible geo-neutrinographic imaging applications // Sci. Rep. 2014. 4. 4708.
- Usman S.M. et al. AGM2015: Antineutrino Global Map 2015 // Sci. Rep. 2015. 5. 13945; arXiv: 1509.03898v1 [physics.ins-det].
- Vogel P.Jr., Beacom F. The angular distribution of the reaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ // Phys. Rev. D. 1999. 60. 053003; arXiv: 9903554v1. [hep-ph].
- White W.M. Radioactivity in the oceanic crust / Neutrino Geoscience 2013. Takayama, Japan. March 21–23, 2013; <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013/>
- White W.M., Klein E.M. Composition of the Oceanic Crust / Treatise on Geochemistry (Second Edition). Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier. 2014. V. 4: The Crust. P. 457–496.
- Wurm M. et al. The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA // Astroparticle Physics. 2012. 35. 11. P. 685–732; arXiv: 1104.5620v3 [astro-ph.IM].