

ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОНЕЙТРИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.Н. Сергеев

Представлен краткий обзор состояния дел в перспективном направлении исследования земных недр с помощью нейтрино, рождающихся в недрах Земли в результате распада радиоактивных элементов (геонейтрино). Регистрация геонейтрино может дать непосредственную информацию о доле радиогенного тепла в энергетическом балансе Земли и распространенности радиоактивных элементов в различных геосферах.

Введение

Привлекательность использования нейтрино в геофизических исследованиях связана с его незначительным взаимодействием с земным веществом, и в силу этого, со способностью почти без препятствий проходить через толщу земных недр. Однако эта незначительность взаимодействия является и серьезным препятствием для регистрации нейтрино. И хотя вопрос об использовании нейтрино, рождающихся в недрах Земли в результате распада радиоактивных элементов (геонейтрино), для геофизических исследований был поднят еще в шестидесятые годы прошлого века, в практическую плоскость он начал переходить только во второй половине девяностых годов. Этому способствовало два обстоятельства: выяснение особенностей распространения нейтрино в вакууме и веществе, и создание детекторов нейтрино, способных регистрировать необходимые данные. Исторический обзор по тематике геонейтрино представлен, например, в работе [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]. В настоящее время во всем мире существует несколько проектов детекторов, способных регистрировать геонейтрино. На двух действующих детекторах этого класса, KamLAND в Японии и BOREXINO в Италии, получены первые данные. Рассматриваемое научное направление привлекает внимание как специалистов по физике нейтрино, так и представителей наук о Земле. Цель настоящей работы представить полученные результаты в области геонейтринных исследований и обозначить перспективы на ближайшие годы. Сначала приведем необходимые сведения, касающиеся физики нейтрино.

Нейтрино, его осцилляции, источники, методы регистрации

Нейтрино – элементарная частица, лептон, не имеющая электрического заряда. Существует три типа нейтрино, сопутствующие в реакциях, вызванных слабыми взаимодействиями, электрону e , мюону μ и τ -лептону, соответственно, электронное ν_e , мюонное ν_μ и τ -нейтрино ν_τ [Окунь, 1990]. Массы всех типов нейтрино очень малы относительно масс своих лептонов – спутников. Нейтрино ν_e , ν_μ , ν_τ и их античастицы $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$ участвуют только в слабых взаимодействиях с другими элементарными частицами. Этим объясняется незначительность взаимодействия нейтрино с веществом.

При движении в вакууме или веществе нейтрино одного типа испытывают превращение в нейтрино других типов. Это явление носит периодический характер и

получило название осцилляций нейтрино [Боум, Фогель, 1990]. Нейтринные осцилляции в вакууме характеризуются длинной осцилляций $L_{\text{осц}}$, которая пропорциональна энергии нейтрино. Для энергий, характерных для геонейтрино (меньше 3,26 Мэв), $L_{\text{осц}}$ меньше величины порядка 2×10^5 м. Осцилляции нейтрино в веществе имеют более сложный характер, чем вакуумные осцилляции, что обусловлено взаимодействием нейтрино с веществом. В этом случае появляется дополнительная характеристика – характеристическая длина осцилляций L_0 , которая не зависит от энергии нейтрино, но обратно пропорциональна электронной плотности вещества. Соотношение $L_{\text{осц}}$ и L_0 определяет различные ситуации для нейтринных осцилляций в веществе от случая, когда вещество практически не влияет на осцилляции (при $L_{\text{осц}} \ll L_0$) до возможного усиления осцилляций (при $L_{\text{осц}} \approx L_0$). В случае $L_{\text{осц}} \gg L_0$ амплитуда осцилляций подавлена.

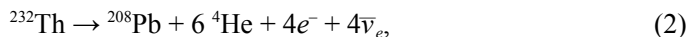
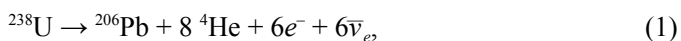
Источники нейтрино разнообразны. Нейтрино, попадающие на Землю, рождены в процессах протекающих (или протекавших) в далеком космосе, на Солнце, в атмосфере Земли, в земных недрах, а также в ядерных реакторах и ускорителях элементарных частиц. Вместе эти источники генерируют различные типы нейтрино и антинейтрино в широком диапазоне энергий.

Основными методами регистрации нейтрино являются радиохимический метод, метод, использующий рассеяние нейтрино на электронах (черенковский, сцинтиляционный), и метод, использующий поглощение нейтрино (прямой счет).

Радиогенное тепло Земли и геонейтрино

Непосредственное измерение радиогенного теплового потока, идущего из земных недр, является важной задачей геофизики. Пока что доля радиогенного тепла в тепловом балансе Земли оценивается, исходя из распространенности радиоактивных элементов в недрах Земли, на основании геохимических моделей.

Основной вклад в радиогенное тепло Земли дает распад радиоактивных элементов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , в реакциях [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]



Реакции (1), (2), (3) идут с выделением энергии в 51,7; 42,7; 1,31 Мэв, соответственно, и сопровождаются рождением 6, 4 и 1 электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$ на каждый акт деления. Нейтрино, рождающиеся в недрах Земли в реакциях радиоактивного распада, таких как (1)–(3), и называют геонейтрино. В основном это электронные антинейтрино. Имея возможность регистрировать геонейтрино, можно было бы определить и радиогенный тепловой поток из земных недр. Максимальная энергия $\bar{\nu}_e$ для реакции (1) равна 3,26 Мэв, для реакции (2) – 2,25 Мэв, для реакции (3) – 1,31 Мэв. Таким образом, $\bar{\nu}_e$ с энергиями выше 2,25 Мэв рождаются в результате распада ^{238}U , а с энергиями выше 1,31 Мэв – распада ^{238}U и ^{232}Th . Отсюда можно определить, какие доли в общем потоке нейтрино соответствуют каким реакциям из (1)–(3), используя знание энергетических спектров $\bar{\nu}_e$ в каждой из реакций (1)–(3).

Помимо информации о потоке радиогенного тепла, геонейтрино несет также важную информацию о распределениях радиоактивных элементов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в земных недрах. Если бы можно было регистрировать не только энергию, но и направления прилета геонейтрино, такие распределения могли бы быть определены методами томографии. Для случая сферически симметричных распределений радиоактивных элементов такая возможность продемонстрирована в работе [Fields, Hochmuth, 2006].

Представленные выше возможности, однако, на практике пока не реализуемы в полном объеме.

Регистрация геонейтрино

Для регистрации геонейтрино используются сцинтилляционные детекторы с большой массой сцинтиллятора (порядка 1000 т и более). Для исключения помех, вызванных различными процессами, детекторы размещают глубоко под поверхностью Земли. Геонейтрино регистрируют по процессу обратного бета-распада на свободном протоне [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]



Эта реакция имеет большое нейтринное сечение и удобную схему пространственно-временного выделения над фоном по ее конечным продуктам (позитрону и нейтрону). Порог реакции (4) равен 1,806 Мэв. В действующих и проектируемых детекторах используется реакция (4) и, следовательно, регистрация геонейтрино от распада ^{40}K пока недоступна. Вторым отрицательным моментом является ограничение возможности определения направления прилета нейтрино в сцинтилляционных детекторах.

Помимо геонейтрино детекторы на основе реакции (4) могут регистрировать также и реакторные антинейтрино. Солнечные нейтрино, являющиеся электронными нейтрино ν_e , по реакции (4) не регистрируются. Так что основной фон для геонейтрино – это реакторные антинейтрино.

Для энергий, характерных для геонейтрино, влияние вещества на нейтринные осцилляции незначительно, и вероятность выживаемости геонейтрино, усредненная по расстояниям, составляет $\langle P_{ee} \rangle \approx 0,59$ [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007].

Локально излучение геонейтрино изотропно. Ослабление потока геонейтрино происходит за счет геометрического расхождения. Поток от более дальних источников меньше чем от более близких при той же интенсивности источников. По расчетам для равномерного распределения источников [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007] около 25% потока приходит с расстояний в радиусе 50 км и около 50% с расстояний в радиусе 500 км. Поэтому большое значение имеет геологическая ситуация в окрестности детектора. Детектор, расположенный на континенте, будет измерять, в основном, геонейтринные потоки, идущие от коры, а расположенный в океанических районах – идущие от мантии.

К настоящему времени проделана большая работа по оценке ожидаемых геонейтринных потоков в различных регионах Земли по наиболее популярной геохимической модели BSE (Bulk Silicate Earth). Общий поток радиогенного тепла, согласно BSE, составляет 19 Твт, что примерно равно половине общего теплового потока Земли, оцениваемого от 31 Твт до 44 Твт [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]. По

BSE предположительно 40–50% радиогенных элементов содержится в континентальной коре, остальное количество – в мантии (в основном, в нижней части). Получены оценки также и на основании альтернативных BSE моделей. Так что регистрация геонейтрино может дать возможность проверки геохимических моделей.

Действующие и проектируемые детекторы геонейтрино

Детекторы нейтрино представляют собой сложные и дорогостоящие инженерные сооружения. Проведение геонейтринных экспериментов занимает длительное время (годы). В настоящее время измерения геонейтринных потоков ведутся в Японии и Италии.

Детектор KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector), расположенный в префектуре Камиока (Япония), является первым детектором чувствительным к геонейтрино. Масса сцинтиллятора составляет 1000 тонн. Описание установки можно посмотреть в [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]. Коллаборация KamLAND начала измерение потоков геонейтрино в 2002 году. В 2005 году было впервые сообщено о регистрации геонейтрино [Araki, Enomoto, Furuno, et al., 2005]. По данным на 2008 год, с учетом огромной работы, проделанной над уменьшением ошибок наблюдений, за 749 дней было зарегистрировано 73 ± 27 геонейтрино от ^{238}U и ^{232}Th . Сигнал составил 39 ± 15 TNU, что не противоречит BSE (34,5 TNU) [Enomoto, 2008]. Скорость счета событий измеряется в единицах TNU (1 TNU = 1 событие в год в мишени, содержащей 10^{32} протонов). Для детектора KamLAND основным источником ошибок является большой фон реакторных антинейтрино, превышающий сигнал от геонейтрино в 6,7 раза [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007].

Детектор Bogexino расположен в Гранд Сассо, Италия. Масса сцинтиллятора составляет 300 тонн. В марте 2010 года было объявлено о регистрации $9,9 \pm 3,7$ геонейтрино от ^{238}U и ^{232}Th за 537 дней в период с декабря 2007 года по декабрь 2009 года. Сигнал составил $63,5 \pm 22,8$ TNU, что не противоречит BSE (40,7 TNU) [Bellini, Benziger, Bonetti, et al., 2010]. Для детектора Bogexino отношение фона реакторных антинейтрино к регистрируемым геонейтрино равно 0,9 [Fiorentini, 2008].

Для получения данных по геонейтрино, на основании которых можно было бы делать более детальные геофизические и геохимические выводы, необходимо измерение геонейтринных потоков крупными детекторами, расположенными в различных местах Земли. В настоящее время существует несколько проектов детекторов, способных регистрировать геонейтрино, реализация которых будет способствовать существенному продвижению в этом направлении.

Детектор SNO+ располагается в Садбери, провинция Онтарио, Канада. Эксперимент должен начаться в ближайшее время [Chen, 2008]. Масса сцинтиллятора составляет 1000 тонн. Для детектора SNO+ отношение фона реакторных антинейтрино к регистрируемым геонейтрино равно 1,1 [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007].

Детектор BANGA (Baksan Antineutrino spectrometer for Geophysics and Astronomy) предполагается построить на Баксане, Северный Кавказ, Россия [Домогацкий, Копейкин, Микаэлян, 2009]. Масса сцинтиллятора составляет 5000 тонн. Для детектора BANGA отношение фона реакторных антинейтрино к регистрируемым геонейтрино равно 0,2.

Мобильный детектор Nanohano [Dye, 2008]. Масса сцинтиллятора составляет 10000 тонн. Детектор будет транспортироваться на специальной барже и может опускаться на большие глубины океана. Очень полезен для измерения потоков ге-

онейтрино от мантии. Отношение фона реакторных антинейтрино к регистрируемым геонейтрино для Гавайских островов равно 0,1 [Fiorentini, Lissia, Mantovani, 2007]. Предполагаемое время реализации этого проекта 2013 год.

Существуют и другие, более амбициозные, проекты с массами мишени в 50 и 100 килотонн (LENA, Earth и другие), но вопрос их реализации – дело более отдаленного будущего.

Заключение

Геонейтринные исследования являются частью общих исследований нейтрино. Современная стратегия развития этих исследований заключается в создании сети крупных многоцелевых установок. Для геонейтринных исследований также важна география расположения детекторов. С вводом в действие новых крупных установок, расположенных в различных в геологическом смысле регионах Земли, в течение нескольких лет можно ожидать получения результатов, позволяющих значительно продвинуться в знании тепловых процессов, протекающих в земных недрах, и распространенности радиогенных элементов в различных геосферах Земли.

Автор благодарит профессора А.В. Витязева за постоянный интерес к проблемам геонейтрино и внимание к этой работе.

Литература

- Боум Ф., Фогель П. Физика массивных нейтрино. М.: Мир. 1990. 304 с.
- Домогацкий Г.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А. Нейтринная геофизика и астрономия на Баксане: возможности спектроскопии природных источников антинейтрино // Ядерная физика, 2009, т. 72, № 11, с. 1925–1932.
- Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука. 1990. 349 с.
- Araki T., Enomoto S., Furuno K. et al. Experimental Investigation of Geologically Produced Antineutrinos with KamLAND // Nature, 2005, 436, P. 499–503.
- Bellini G., Benziger J., Bonetti S. et al. Observation of Geo-Neutrinos // Phys. Lett. 2010, B687, P. 299–304; arXiv: 1003.0284v2 [hep-ex].
- Chen M. SNO+ / Workshop on Neutrino Geosciences 2008, SNOLab, Sudbery, Ontario, Canada, Sept. 17–19, 2008 [http://geonu.snolab.ca/].
- Dye S. Hanohano / Workshop on Neutrino Geosciences 2008, SNOLab, Sudbery, Ontario, Canada, Sept. 17–19, 2008 [http://geonu.snolab.ca/].
- Enomoto S. KamLAND Geoneutrino Study / Workshop on Neutrino Geosciences 2008, SNOLab, Sudbery, Ontario, Canada, Sept. 17–19, 2008 [http://geonu.snolab.ca/].
- Fields B.D., Hochmuth K.A. Imaging the Earth's Interior: the Angular Distribution of Terrestrial Neutrinos // Earth Moon Planets, 2006, 99, P. 155–181; arXiv: 0406001 [hep-ph].
- Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F. Geo-Neutrinos and Earth's Interior // Phys. Rep. 2007, 453, P. 117–172; arXiv: 0707.3203v2 [physics.geo-ph].
- Fiorentini G. A Roadmap for Geoneutrinos / Workshop on Neutrino Geosciences 2008, SNOLab, Sudbery, Ontario, Canada, Sept. 17–19, 2008 [http://geonu.snolab.ca/].