

Нейтринная геофизика — первые шаги

М.Д.Скорохватов

Как читатели узнали из статьи Н.М.Буднева в последнем номере журнала за прошлый год, нейтринная обсерватория позволяет попутно проводить интересные геофизические исследования, поставляя информацию о важных физических характеристиках среды. Однако этим роль нейтринной физики в геофизике не ограничивается — заметное место здесь принадлежит, как ни странно, самим нейтрино. В настоящей заметке речь пойдет о так называемых геонейтрино.



Михаил Дмитриевич Скорохватов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института общей и ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», заведующий кафедрой физики элементарных частиц НИЯУ МИФИ, руководитель с российской стороны международного проекта «Борексино» (Borexino). Область научных интересов — ядерная физика и физика частиц, в том числе нейтринная.

Что такое «геонейтрино»

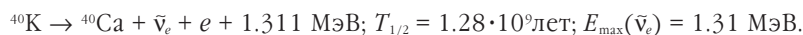
Что скрывается за этим названием? Начальная часть сложных слов «гео», как известно, говорит о принадлежности предмета к Земле. Так что же такое «земные нейтрино», каковы их источники и почему нужно их регистрировать и изучать? Здесь мы попытаемся ответить на эти вопросы.

Согласно современным представлениям, наша планета состоит из нескольких внутренних слоев: земной коры, верхней и нижней мантии, разделенных переходной зоной, и внешнего и внутреннего ядра. Это стало известно благодаря косвенному методу получения информации о внутреннем строении Земли — в результате исследований распространения сейсмических волн. Распростране-

ние сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и мощных взрывах, зависит от свойств внутренних пород, через которые они проходят, отражаясь и преломляясь на границах раздела между пластами разного типа. А вот о том, как сформировалась подобная структура нашей планеты, мы можем лишь строить более или менее правдоподобные гипотезы. Во всех моделях существенная роль отводится теплу: при образовании Земли происходило высвобождение гравитационной энергии, запасенной при начальной конденсации материи. Планета продолжает остывать до сих пор, тепло из внутренних областей излучается в океан, атмосферу и далее в космическое пространство.

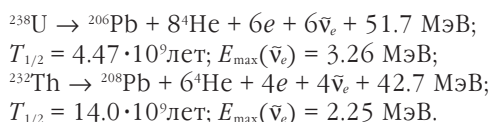
После открытия радиоактивности и изучения свойств радиоактивных элементов стало ясно, что может существовать и другой источник нагрева планет — содержащиеся в породах нестабильные изотопы, которые претерпевают превращения в результате альфа- и бета-распадов с выделением энергии. Такие естественные источники радиоактивности хорошо известны. Это несколько радиоактивных ядер с большими периодами полураспада, сравнимыми с временем жизни нашей планеты, т.е. ядра, которые еще не успели распастаться. Основными генераторами тепла служат три изотопа — это уран-238, торий-232 и калий-40.

В случае бета-распада калия образуется стабильное ядро кальция:



Уран и торий претерпевают цепочки превращений, которые в итоге приводят к рождению стабильных изотопов свинца. В ходе этих трансформаций возникают многочисленные тяжелые осколки, которые так и остаются в глубинах Земли. Однако некоторые из

данных распадов, как и распад калия-40, приводят к появлению электронного антинейтрино:



Свойства электронных антинейтрино и их распространение в веществе к настоящему времени изучены достаточно хорошо — эти частицы почти не взаимодействуют с веществом, легко пронизывают всю толщу земного шара и несут информацию о процессах своего рождения. Такие электронные антинейтрино и принято называть «геонейтрино», что отражает их происхождение.

Очевидно, что количественная информация о радиогенных элементах — производителях тепла имеет первостепенное значение для определения энергетического баланса, который, в свою очередь, служит ключом к пониманию образования и эволюции Земли. В частности, особый интерес представляет распределение тепла в мантии, так как оно определяет конвективные движения, которые связаны с вулканической деятельностью и перемещениями тектонических плит.

Радиогенное тепло в геотермическом балансе

Геологические исследования внутреннего состава Земли ограничиваются корой, где используются данные приблизительно 40 тыс. буровых скважин, распределенных по земному шару. Правда, самые глубокие из них не превышают 10–12 км (12 262 м на Кольском п-ове) — при толщине коры на суше в десятки километров. Усредненный тепловой поток из недр Земли составляет примерно 80–90 мВт/м² (для сравнения: средний солнечный поток на поверхности — 400 Вт/м²). Измерение геотермического градиента в разных точках земной поверхности позволяет сделать оценки глобальных тепловых потерь планеты. Однако такие оценки для разных расчетов расходятся до полутора раз: от ≈30 до ≈46 ТВт. В наиболее популярной модели значение суммарного потока тепла от Земли составляет 44±1 ТВт, причем вклад радиогенного тепла предсказывается на уровне 20 ТВт: 8 ТВт от цепочек распада урана-238, еще 8 ТВт от цепочек распада тория-232 и 4 ТВт от распада калия-40. Таким образом, в этой модели приблизительно половина тепла планеты производится радиоактивными изотопами, а другая половина — это остаточное тепло нашей планеты, запасы которого еще не исчерпаны.

Отметим и другие модели, в которых предполагается разный вклад радиоактивных распадов в глобальное производство тепла планеты, от полностью радиогенного происхождения тепла до минимального вклада, когда в расчет принимается

распад урана, тория и калия только в коре и верхней мантии. Более подробное описание моделей радиогенного тепла можно найти в обзоре [1].

Скорее всего, основные запасы урана и тория сосредоточены в континентальной коре, в недрах которой производится связанное с их распадами тепло — от 5 до 10 ТВт по разным оценкам, а массовые отношения Th:U и K:U по данным космохимических и геохимических наблюдений составляют около 4 и примерно 1.4·10⁴. Но существует также гипотеза, что некоторая часть урана, тория и других очень тяжелых элементов в процессе дифференциации первичного вещества планеты могла опуститься к центру Земли и сконцентрироваться там в небольшой области. Такое предположение подразумевает возможность протекания цепной реакции деления, т.е. образования в центре планеты природного ядерного реактора. Этот реактор может генерировать энергию для поддержания механизма геодинамо. Накопление продуктов деления (шлаков) при выгорании урана ослабляет интенсивность цепной реакции и может даже привести к прекращению работы реактора, которая, однако, возобновляется при удалении шлаков в результате диффузии. Эта гипотеза, следовательно, способна объяснить изменение и даже инверсию земного магнитного поля, происходящую каждые 200 тыс. лет. Согласно гипотезе мощность геореактора может составлять 5–10 ТВт.

Нейтринные установки

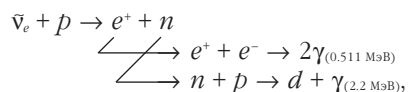
Поскольку нейтрино крайне слабо взаимодействуют с материей, т.е. обладают высокой проникающей способностью, Земля для геонейтрино практически прозрачна, что дает возможность использовать их в качестве прямого зонда для изучения внутренних областей планеты. Измеряя потоки геонейтрино на поверхности в разных точках Земли, мы можем точно фиксировать расположение источников излучения и составить карту радиогенного тепловыделения нашей планеты.

Однако высокая проникающая способность нейтрино значительно осложняет регистрацию: детектор должен иметь огромный объем и быть хорошо защищенным от фоновых излучений. Критическим фактором оказывается близость места проведения измерений к атомным электростанциям, так как ядерные реакторы испускают в процессе цепной реакции деления огромные потоки антинейтрино, которые будут имитировать регистрацию установкой геонейтрино.

Существует и еще одна особенность распространения нейтрино: по мере удаления от источника геонейтрино, рожденное как электронное антинейтрино, может с определенной вероятностью трансформироваться в другие нейтринные состояния — мюонное и тау. Этот эффект, предсказанный Б.М.Понтекорво, называется нейтринными осцил-

ляциями; для наблюдателя он будет проявляться в уменьшении потока геонейтрино в точке регистрации. Осцилляции были изучены, и была определена вероятность того, что геонейтрино останется в состоянии электронного антинейтрино, которая для больших расстояний составляет $P_{ee} = 0.57$.

Детектирование геонейтрино осуществляется по реакции обратного β -распада $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$:



которая применялась еще в середине 50-х годов прошлого века в пионерских экспериментах Ф.Райнеса и К.Коуэна по обнаружению свободного антинейтрино. Порог этой реакции составляет 1.8 МэВ. Поэтому, используя данный метод, можно зарегистрировать только небольшую часть антинейтрино от цепочки распада урана и тория (рис.1), и, к сожалению, нельзя обнаружить антинейтрино от распада калия-40, энергия которых менее 1.3 МэВ.

Геонейтрино сегодня регистрируются двумя экспериментальными установками, KamLand и Borexino (рис.2).

О первом указании на сигнал от геонейтрино было заявлено в 2005 г. коллаборацией KamLand [2] на основании данных, полученных на установке, которая расположена на о. Хонсю в шахте «Камиока» в Японии. Она предназначена для поиска нейтрино от различных источников, в том числе и земных. Нейтринный детектор установки представляет собой сцинтилляционный спектрометр, содержащий 1000 т жидкого сцинтиллятора (ЖС). ЖС приготовлен на основе органического раство-

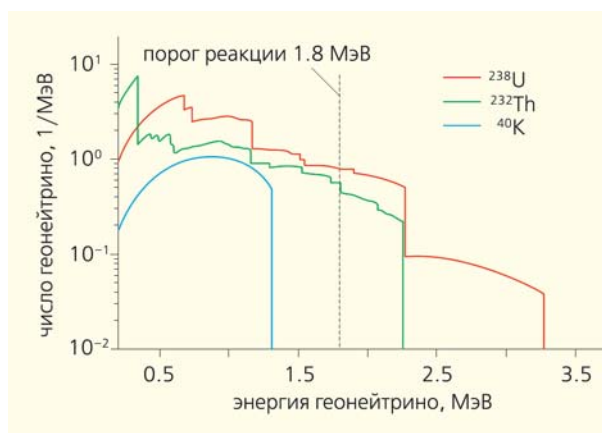


Рис.1. Энергетический спектр геонейтрино.

рителя — водородосодержащей среды, которая служит мишенью для геонейтрино. ЖС содержится в прозрачной сфере диаметром 13 м; для уменьшения внешнего фонового излучения она окружена 2.5-метровым слоем парафинового масла. События реакций взаимодействия регистрируются фотоэлектронными умножителями по двум сцинтилляционным вспышкам — сначала от позитрона, затем от захвата нейтрона водородом в ЖС. Две эти вспышки разнесены во времени — интервал между ними соответствует замедлению и диффузии нейтрона (несколько сотен микросекунд). С помощью процедуры реконструкции событий в мишени измеряется энергия геонейтрино и восстанавливаются координаты точки взаимодействия. В процессе анализа отбираются события в центральном объеме, содержащем 600 т ЖС, где

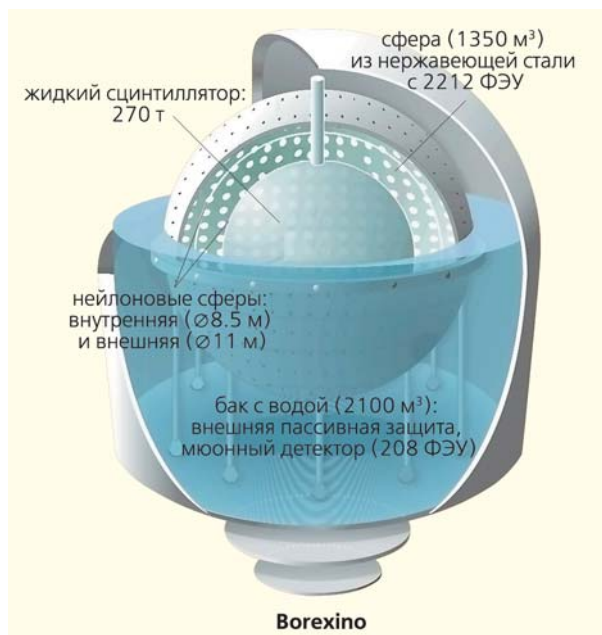
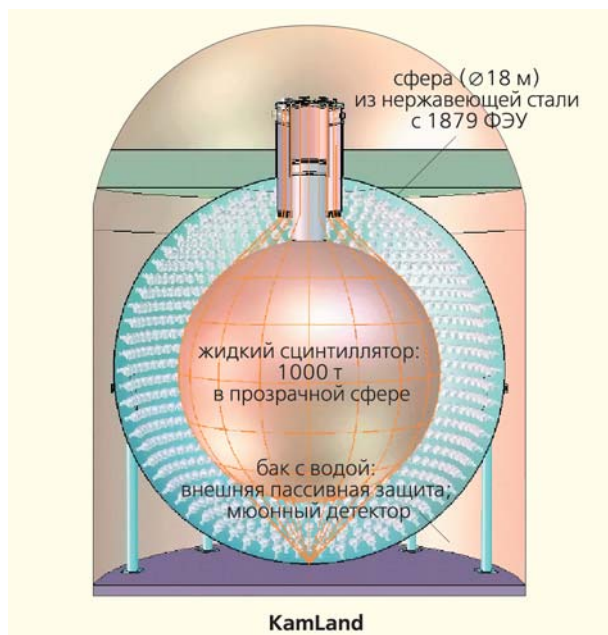


Рис.2. Крупномасштабные нейтринные детекторы, с помощью которых были зарегистрированы геонейтрино.

лучше соотношение эффекта и фона. Процессы, вызванные космическими мюонами, отсекаются с помощью сигналов внешнего вето-детектора.

Из-за большого числа АЭС вблизи детектора изучение геонейтрино в лаборатории «Камиока» затруднено, и в этом отношении вторая подземная лаборатория — в горном массиве Гран Сассо в центре Италии — оказывается более удачным местом. Здесь расположен другой экспериментальный комплекс — Borexino [3], созданный при участии российских ученых из Курчатовского института, Объединенного института ядерных исследований, Петербургского института ядерной физики им. Б.П.Константинова и Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В.Скобельцина МГУ. В самой Италии атомных станций нет, а европейские АЭС находятся на расстояниях ~1000 км. Хотя установка тоже построена для универсальных нейтринных экспериментов, задаче поиска именно геонейтрино на ней уделяется значительное внимание.

Внутренняя структура детектора состоит из нескольких слоев. Внешний заполнен 2400 т сверхчистой воды, защищающей детектор от природной радиоактивности горных пород и материалов внешних конструкций. Этот слой способен регистрировать редкие космические мюоны, что позволяет распознавать фоновые события. Следующий слой — стальная сфера, заполненная 1000 т сверхчистого углеводородного соединения, используемого для защиты центральной части детектора. На внутренней поверхности стальной сферы установлены 2200 фотоэлектронных умножителей, реагирующих на очень слабые вспышки света, которые происходят при взаимодействии нейтрино с веществом в детекторе. И, наконец, в центре находится прозрачный нейлоновый шар радиусом 4.25 м, содержащий 270 т ЖС. Уровень очистки жидкого сцинтиллятора, достигнутый в установке Borexino, превышает аналогичные показатели любого другого детектора. Как следствие, фон Borexino оказался рекордно низким. Анализ данных, как и в эксперименте KamLand,

проводится на основе энергетической и пространственной реконструкции событий с выделением внутренней области мишени, имеющей хорошее соотношение эффекта и фона.

Результаты

Экспериментальные данные установок KamLand [4] и Borexino [5], набранные до 2010 г. и уже проанализированные, представлены в таблице. Для сравнения измеренных установками потоков геонейтрино полезно привести значения в расчете на одинаковый объем мишени (например, 100 т) и на равный интервал времени регистрации (например, один год). Пересчитанные величины доказывают наличие в каждом эксперименте положительных эффектов от геонейтрино, которые в пределах пока еще больших погрешностей находятся в согласии. В то же время следует обратить внимание, что, согласно моделям, ожидаемый поток геонейтрино в детекторе KamLand, расположенном вблизи океанической коры, должен быть меньше потока в центральной Италии. Сопоставление измеренных потоков геонейтрино с ожидаемыми значениями показано на рис.3.

Как видно из рисунка, данные KamLand лучше согласуются с моделью, предполагающей 50%-й вклад радиогенного тепла, тогда как данные Borexino не отвергают и предсказания модели с максимальным (100%) вкладом. Усреднение данных двух экспериментов позволяет оценить количество полного радиогенного тепла в 20 ± 9 ТВт [4]. Этот результат имеет большую погрешность, однако это первая количественная величина, показывающая, что значительная доля тепла нашей планеты (возможно, половина) связана с распадом радиоактивных элементов в недрах Земли.

Теперь вернемся к гипотезе о существовании геореактора в центре Земли. Согласно предсказаниям, его мощность может лежать в пределах 3—10 ТВт. Как и обычные реакторы на АЭС, геореактор должен генерировать мощные потоки анти-

Таблица

Обработанные данные двух установок

Детектор	KamLand	Borexino
Время набора данных	03.02–11.09 2135 дней (4126 т·лет)	12.07–12.09 537 дней (252.6 т·лет)
Среднее расстояние от детектора до АЭС	200 км	1000 км
Полное число зарегистрированных событий-кандидатов, среди которых выделено:	841	21
событий от реакторов	484.7±26.5	10.7 ^{+4.3} / _{-3.4}
фоновых событий	244.7±18.4	0.42±0.06
Число зарегистрированных геонейтрино	111 ⁺⁴⁵ / ₋₄₃	9.9 ^{+4.1} / _{-3.4}
Скорость счета геонейтрино на 100 т мишени в год	2.7 ^{+1.1} / _{-1.0}	3.9 ^{+1.6} / _{-1.3}
Измеренные потоки геонейтрино, см ⁻² ·с ⁻¹	(4.3 ^{+1.2} / _{-1.1})·10 ⁶	(7.1 ^{+2.0} / _{-2.4})·10 ⁶

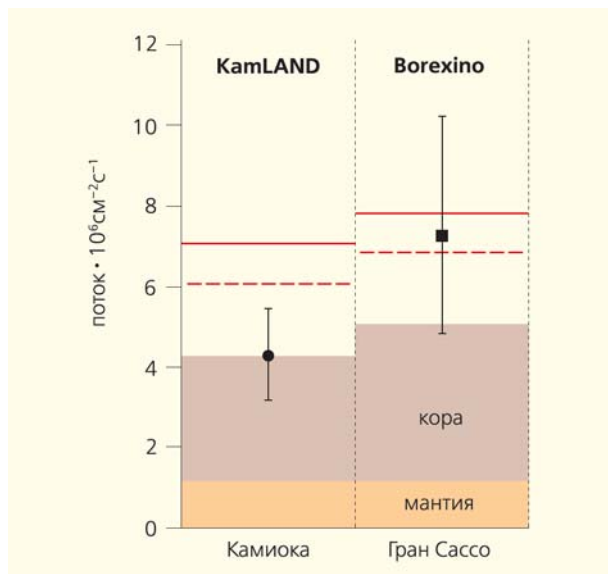


Рис.3. Измеренные потоки геонейтрино и их ожидаемые значения. Закрашенные области — данные модели с 50%-м вкладом радиогенного тепла, красная линия — данные модели максимального радиогенного тепла. Непредельности моделей не включены.

нейтрино со сходным энергетическим спектром. Поэтому, если он существует, детекторы регистрировали бы избыток потока антинейтрино по отношению к ожидаемому потоку от реакторов АЭС. В пределах погрешностей измерений такого избытка детекторы KamLand и Borexino не обнаружили, а тщательный анализ данных позволил установить верхнюю границу мощности гипотетического геореактора. Лучшее ограничение было получено в эксперименте Borexino — 3 ТВт [5]. Это означает, что экспериментальные результаты не отвергают возможности существования геореактора, но с мощностью не более 3 ТВт. Дальнейший набор статистики позволит уточнить эти данные. Таким образом, вопрос о природном геореакторе внутри планеты пока остается открытым.

Перспективы

Первые успешные наблюдения геонейтрино знаменуют рождение нового направления науки — нейтринной геофизики. Развитие технологий ре-

гистрации ядерных излучений и достижение беспрецедентно высокой чувствительности детекторов к природным потокам антинейтрино стимулируют выполнение более детальных исследований, разработку и реализацию новых проектов в этой молодой области науки.

В будущем ожидается ввод в действие новых детекторов геонейтрино: в Канаде (SNO+), в Финляндии (LENA), в США — на Гавайских о-вах, а также в России, в Баксанской нейтринной обсерватории. Эти установки будут проводить измерения в различных точках планеты, что значительно улучшит наши знания о радиогенных источниках тепла. Особый интерес представляют места вдалеке от ядерных реакторов, а также расположенные как на континентальной, так и на океанической коре. Измерения на океанической коре, которая значительно тоньше континентальной, дадут возможность оценить содержание урана и тория внутри мантии, а сопоставление данных разных детекторов позволит лучше понять глобальное распределение источников радиогенного тепла внутри планеты.

Во всех новых проектах планируется значительное увеличение чувствительного объема детекторов. Например, в проекте LENA мишень сцинтилляционного детектора должна составлять ~30 тыс. т, что в десятки раз увеличит скорость набора статистики и позволит достичь 2–3%-й точности в течение трех лет измерений потоков геонейтрино. И не только. Уточнение энергетических спектров поможет установить соотношение урана и тория. Таким образом, экспериментальные данные станут основанием для проверки и отбора разных геофизических моделей.

Все настоящие и планируемые детекторы нечувствительны к антинейтрино от распада калия-40. Поэтому одной из важнейших задач остается разработка новых методов регистрации нейтринного излучения, чтобы можно было создать детекторы с более низким порогом регистрации, «улавливающие» и эти частицы.

В заключение отметим, что возможности работающих детекторов до конца еще не исчерпаны. Среди ближайших задач — дальнейший набор статистики и анализ данных в эксперименте Borexino, которые благодаря хорошему соотношению эффекта и фона детектора дают уверенность в существенном повышении точности уже полученных результатов. ■

Литература

1. Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F. Geoneutrinos and earth's interior // Phys. Rep. 2007. V.453. P.117—172.
2. Araki T., Enomoto S., Furuno K. et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLand // Nature. 2005. V.436. P.499—503.
3. Скорохватов М.Д. Солнечные нейтрино и эксперимент «Борексино» // Природа. 2009. №5. С.13—24.
4. Gando A., Gando Y., Ichimura K. et al. Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements // Nature Geoscience. 2011. V.4. P.647—651.
5. Bellini G., Benziger J., Bick D. et al. Observation of geoneutrinos // Phys. Lett. B. 2010. V.687. P.299—304.