ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА
2018. Т. 49. ВЫП. 4. С. 1191–1199

ГЕОНЕЙТРИНО И ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ЗЕМЛИ

Л. Б. Безруков [1,*], *В. П. Заварзина* [1], *А. С. Курлович* [1], *Б. К. Лубсандоржиев* [1], *А. К. Межох* [1], *В. П. Моргалюк* [2], *В. В. Синёв* [1]

[1] Институт ядерных исследований РАН, Москва

[2] Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва

Обсуждаются предсказания гидридной модели Земли потоков геонейтрино и потока внутреннего тепла Земли. Предсказания величины потоков геонейтрино могут быть согласованы с экспериментом. Предсказанная величина потока внутреннего тепла Земли значительно больше измеренной экспериментально в рамках предположения, что основной механизм переноса тепла — теплопроводность. В работе указывается на существование другого механизма переноса тепла в коре Земли — перенос энергии газами, образованными в коре Земли на больших глубинах. Обсуждаются экспериментальные подтверждения этой идеи, в частности результаты измерений температурных профилей в Кольской сверхглубокой скважине.

The prediction of Hydridic Earth model of geo-neutrino fluxes and intrinsic Earth heat flux is discussed. The predicted values of geo-neutrino fluxes can be adjusted to experimental ones. The predicted value of intrinsic Earth heat flux is significantly larger than the value experimentally obtained under assumption that the main mechanism of heat transfer is thermal conductivity. We introduce the new mechanism of heat transfer in the Earth crust — the energy transfer by hot gases created in the Earth crust at great depth. The experimental data supporting this idea are discussed, in particular, the temperature profiles obtained in Kola superdeep borehole.

PACS: 14.60.Lm; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сообщено об измерении величины потока геонейтрино двумя детекторами — Borexino [1] и KamLAND [2]. Геонейтрино — электронные антинейтрино — рождаются при распаде радиоактивных элементов в рядах ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K, распределенных в толще Земли. Поток геонейтрино на поверхности Земли зависит от количества ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле и от их распределения по глубине.

*E-mail: bezrukov1945@mail.ru

Теоретическое количество ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле и их распределение в Земле различно в разных моделях Земли. Наиболее популярна в настоящее время модель Земли, называемая силикатной моделью Земли (Bulk Silicate Earth) [3, 4]. Основной идеей этой модели является положение, что элементный состав Земли совпадает с элементным составом метеоритов. Исходя из этого могут быть получены массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K:

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{BSE}}(^{238}\mathrm{U}) &= 0{,}81 \cdot 10^{17}\ \text{кг}, \\ M_{\mathrm{BSE}}(^{232}\mathrm{Th}) &= 3{,}16 \cdot 10^{17}\ \text{кг}, \\ M_{\mathrm{BSE}}(^{40}\mathrm{K}) &= 5{,}73 \cdot 10^{16}\ \text{кг}. \end{aligned} \tag{1}$$

Вся масса этих элементов в основном содержится в земной коре и отсутствует в земном ядре.

Значение наблюдаемого потока геонейтрино согласуется с приведенными значениями масс ^{238}U, ^{232}Th из (1) при условии распределения этих масс в коре и в верхней мантии Земли [1].

Каждый радиоактивный распад сопровождается выделением известной порции тепловой энергии. Зная количество ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле, можно вычислить величину радиогенного теплового потока, идущего из Земли, и сравнить ее с экспериментально измеренной.

Тепловой поток внутреннего тепла Земли изучают на континентах в скважинах на глубинах около 500 м, измеряя градиент температуры по глубине. В океанах тепловой поток изучают специальным зондом, который измеряет градиент температуры на дне океана, проникая в дно на несколько метров. Для вычисления величины теплового потока из экспериментальных данных используют идею, что основным механизмом передачи тепла в земной коре является теплопроводность. Полученная таким образом усредненная величина теплового потока в настоящее время составляет (47 ± 2) ТВт.

Зная количество тепловой энергии, выделяемое в радиоактивном распаде, можно вычислить стационарный тепловой поток внутреннего тепла Земли. Тепловой поток, соответствующий вышеприведенным значениям массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле (1), окажется равным 17, 5 ТВт.

Сравнение этой теоретической величины с экспериментальной не привело к идее, что не верно основополагающее допущение силикатной модели Земли. Исследователи стали искать дополнительные источники тепловой энергии.

В этой статье мы будем использовать альтернативную модель Земли, так называемую гидридную модель Земли [5], и рассмотрим вопрос о соответствии предсказания ею потока геонейтрино и теплового потока с экспериментальными данными.

1. ГИДРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛИ И ГЕОНЕЙТРИНО

Основной идеей гидридной модели Земли является то, что элементный состав планет зависит от расстояния от Солнца, поэтому состав Земли должен отличаться от элементного состава пояса астероидов. В работах [5] Владимир Ларин для вычисления элементного состава Земли предложил и использовал следующее соотношение:

$$\left(\frac{X_{\mathrm{M}}}{X_{\mathrm{Si}}}\right)_{\mathrm{Earth}} = \left(\frac{X_{\mathrm{M}}}{X_{\mathrm{Si}}}\right)_{\mathrm{Sun}} F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M})),$$

где X_M — доля элемента M в массе Земли; X_{Si} — доля кремния в массе Земли; $F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M}))$ — доля химического элемента M от массы этого элемента в Солнце, оставшаяся на орбите Земли при ее образовании; $E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M})$ — потенциал ионизации элемента M.

В работе [6] предложена функция F в следующем виде:

$$F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M})) = A \exp\{-B \cdot E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M})\},$$

где коэффициенты A и B подобраны исходя из экспериментальных данных об элементном составе Солнца и земной коры.

Используя методику расчета из работы [7], $E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M})$ из работы [8] и функцию $F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M}))$ из работы [6], получаем следующие массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле:

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{HE1}}(^{238}\mathrm{U}) &= 3{,}18 \cdot 10^{17} \text{ кг}, \\ M_{\mathrm{HE1}}(^{232}\mathrm{Th}) &= 1{,}0 \cdot 10^{18} \text{ кг}, \\ M_{\mathrm{HE1}}(^{40}\mathrm{K}) &= 2{,}6 \cdot 10^{19} \text{ кг}. \end{aligned} \tag{2}$$

Вид функции $F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M}))$ из работы [9] отличается от вида этой функции из работы [6], если взять функцию $F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M}))$ из работы [9], то получим другие массы для ^{238}U и ^{232}Th: $M_{\mathrm{HE}}(\mathrm{U}) = 1{,}1 \cdot 10^{17}$ кг, $M_{\mathrm{HE}}(\mathrm{Th}) = 3{,}6 \cdot 10^{17}$ кг. Видно, что предсказание гидридной модели Земли зависит от вида функции $F(E_{\mathrm{IP}}(\mathrm{M}))$, которая известна очень приближенно. Однако принципиальным для гидридной модели Земли является то, что она позволяет ввести в анализ другие, большие массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле, а также считать, что ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K имеются в ядре Земли в изначальном количестве. Особенно значительным должно быть превышение количества калия по сравнению с предсказанным силикатной моделью Земли из-за его малого потенциала ионизации.

В работе [10] мы попытались ответить на вопрос: какие наибольшие количества ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле допускают современные экспериментальные данные по потоку геонейтрино и по тепловому потоку из Земли? Мы

получили следующие значения:

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{HE2}}(^{238}\mathrm{U}) &= 1{,}7 \cdot 10^{17}\ \text{кг}, \\ M_{\mathrm{HE2}}(^{232}\mathrm{Th}) &= 6{,}7 \cdot 10^{17}\ \text{кг}, \\ M_{\mathrm{HE2}}(^{40}\mathrm{K}) &= 1{,}2 \cdot 10^{19}\ \text{кг}. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь для оценки количества калия в Земле мы экстраполировали наблюдаемую концентрацию калия в коре Земли на всю массу Земли.

Из этих оценок и из сравнения с массами ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле для силикатной модели Земли, приведенными выше в (1), можно сделать следующие качественные заключения. Массы ^{238}U и ^{232}Th в обоих моделях близки, хотя в гидридной модели Земли они несколько выше.

С учетом того, что гидридная модель Земли предсказывает, что ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K должны присутствовать в ядре Земли с содержанием, которое было в изначальной Земле, установки, регистрирующие геонейтрино от семейства ^{238}U и ^{232}Th, должны иметь значительно большую статистику, чем современные установки, чтобы различить столь разные модели Земли [10].

Масса ^{40}K, предсказываемая гидридной моделью Земли, более чем на два порядка больше, чем предсказываемая силикатной моделью Земли. В работе [11] была проанализирована возможность регистрации такого большого потока нейтрино от распадов ^{40}K существующими детекторами и было получено, что их чувствительность недостаточна. Однако для детекторов следующего поколения с пониженным фоном и увеличенной мишенью, а также в случае независимого измерения потока солнечных нейтрино цикла CNO такая возможность появится.

2. ГИДРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛИ И ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Зная количество тепловой энергии, выделяемое в радиоактивном распаде, можно вычислить стационарный тепловой поток внутреннего тепла Земли. Тепловой поток, соответствующий вышеприведенным значениям массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле для гидридной модели Земли для случая (3), окажется равным 304 ТВт. Такое большое значение определяется в основном большим количеством калия в Земле, предсказываемым гидридной моделью Земли.

Сравнение этого теоретического значения со значением 47 ТВт, полученным из экспериментальных данных, на первый взгляд, приводит к идее о том, что не верна гидридная модель Земли, так как большое количество калия в Земле следует из основополагающего допущения гидридной модели Земли, что потенциал ионизации элемента есть основной параметр, который определил долю химического элемента, оставшуюся на орбите планеты при ее образовании. Если придерживаться позиции, что гидридная модель Земли

верна, то требуется привести аргументы, позволяющие понять такую большую разницу предсказанного в рамках гидридной модели Земли внутреннего теплового потока Земли и потока, полученного из измерений градиентов температур.

Рассмотрим далее имеющиеся экспериментальные данные о потоке внутреннего тепла Земли, кроме уже упомянутого значения 47 ТВт.

Результаты исследований температурного профиля в сверхглубоких скважинах легко понять в рамках гидридной модели Земли, в то же время они не были предсказаны силикатной моделью Земли.

Научные результаты и опыт исследований на Кольской сверхглубокой скважине опубликованы в работе [12]. В Кольской сверхглубокой скважине достигнута глубина 12 262 м. Все полученные представления о структуре земной коры не соответствовали ожиданиям: по мере углубления горные породы не становятся более плотными, и их пористость не убывает, как предполагалось ранее. Наоборот, горные породы на многокилометровой глубине пронизаны многочисленными порами и разбиты трещинами.

Сенсацией также было наличие водорода и водородосодержащих газов, в частности воды на значительной глубине, где давление достигает сотен атмосфер. И наконец, Земля оказалась значительно горячее, чем ранее предполагалось. На глубине 5 км температура превысила 70 °C, на семи — переваливала за 120 °C, а на 12 км — 220 °C. Эта температура была выше на целых 100 °C, экстраполированной по данным на глубинах до 1 км.

Гидридная модель Земли предсказывает элементный состав изначальной Земли. Около 18 % массы ядра Земли должен составлять водород. Радиогенный нагрев ядра Земли приводит к появлению на границе ядра и мантии свободного водорода. В конечном итоге гидридная модель предсказывает наличие процесса дегазации земной поверхности в основном водородосодержащими газами, например водой. Газы должны образовываться на больших глубинах, где реализуются необходимые температуры. Газы обеспечивают появление пор и трещин в породе.

Эти газы — основной переносчик тепла. Появившиеся поры и трещины в коре на больших глубинах позволяют перемещаться газам. Можно указать два механизма переноса тепла в обход термометров, измеряющих градиент температуры на глубинах около 500 м или на дне океана. Первый: газы могут поглощать тепловую энергию при своем образовании. Тепловая энергия переходит во внутреннюю энергию молекулы и затем высвобождается в экзотермических химических реакциях, в которых участвуют газы на малых глубинах. Второй: газы выходят из коры на поверхность узкими струями с достаточно большими расстояниями между струями. Наличие такой струи приводит на больших глубинах к появлению горизонтальной составляющей скорости движения газов в направлении этой струи. Следовательно, в процессе вертикального переноса тепла способом теплопроводности на глубинах около 500 м участвует только

часть тепла, большую часть уносят горячие газы. Отметим, что скважины не бурят на месте выхода струи газа, так как на континенте это место выглядит либо как озеро, либо как болото. Вулканы также являются местом для выхода струи газа.

Наличие такого механизма переноса тепла, дополнительного к теплопроводности, позволяет понять появление неожиданно больших температур на больших глубинах, а также разрешить противоречие между предсказанием большого потока тепла в рамках гидридной модели Земли и результатами экспериментов с измерением градиента температур.

Опубликованы интересные результаты о повышении температуры толщи Мирового океана, полученные в эксперименте ARGO [13]. Наблюдения относятся к периоду 2005–2010 гг. Несмотря на то, что это время — время солнечного минимума, Мировой океан нагревался. Для обеспечения такого нагрева необходим дополнительный поток энергии, равный $(0{,}58 \pm 0{,}15)$ Вт $\cdot$ м$^{-2}$ в течение 6-летнего периода. Если эту цифру умножить на площадь поверхности Земли, то получим (300 ± 80) ТВт.

С позиции гидридной модели Земли этот экспериментальный факт можно объяснить увеличением выхода горячих газов в океан и наличием экзотермических химических реакций с их участием в объеме океана. Модель содержит идею, что поток газов не стационарен, а цикличен. Мы можем считать, что наблюдается нагрев океана за счет повышения внутреннего теплового потока Земли во время ее выхода из малого ледникового периода. Величина необходимого потока тепла для наблюдаемого нагрева океана не вызывает удивления в рамках гидридной модели Земли.

Упомянем также работу ученых ФИАН [14] по измерению теплового потока Луны методом регистрации радиоволнового излучения Луны. Авторы считают, что поток тепла идет из глубоких недр Луны и имеет, как и у Земли, радиогенное происхождение. Если считать, что Луна состоит из того же состава элементов, что и Земля, то можно вычислить тепловой поток из Земли:

$$H_{\mathrm{earth}} = \frac{H_{\mathrm{moon}} M_{\mathrm{earth}}}{M_{\mathrm{moon}}} = 170 \text{ ТВт}, \tag{4}$$

где H_{moon} — измеренный тепловой поток Луны; M_{earth} — масса Земли; M_{moon} — масса Луны. Следует отметить, что у Луны, согласно гидридной модели, процесс дегазации практически закончен из-за малого размера Луны, поэтому практически вся радиогенная энергия Луны выходит из Луны способом теплопроводности. Значение, полученное в (4), поддерживает справедливость гидридной модели Земли. Важно отметить, что измерение теплового потока Луны методом регистрации радиоволнового излучения усредняет тепловой поток по видимой поверхности Луны. В двух различных точках на поверхности Луны были произведены измерения теплового потока в пробуренных скважинах во время миссий «Apollo 15», «Apollo 17». Полученные

в этих экспериментах значения теплового потока, пересчитанные к потоку из Земли по формуле (4), составят 43 и 65 ТВт. Мы считаем, что эти данные не противоречат эксперименту ФИАН, так как в местах измерений во время миссий «Apollo 15», «Apollo 17» тепловые потоки были ниже средней величины. Это следует из фотографии Луны, сделанной инфракрасным телескопом на борту спутника «NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter» в 1996 г. во время полного лунного затмения.

В заключение приведем оценку сверху для потока внутреннего тепла Земли. Если считать, что на Луне в районах, которые никогда не освещаются Солнцем, температура поверхности определяется только радиогенным теплом, то, зная эту температуру, можно вычислить поток энергии, излучаемой единицей поверхности, по закону Стефана–Больцмана. Затем распространить этот поток на всю поверхность Луны и, используя формулу (4), вычислить тепловой поток для Земли. Для температуры 40 K этот поток окажется равным 420 ТВт. Эта верхняя граница показывает, что массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле, приведенные в (2), слишком велики, а массы, приведенные в (3), как уже указывалось, приводят к потоку 304 ТВт.

3. ВЫВОДЫ

1. Гидридная модель Земли представляет собой удобный инструмент для размышления о явлениях, происходящих на Земле. Продемонстрировано, что в рамках гидридной модели Земли могут быть единым образом поняты многие наблюдаемые сложные явления: величины потоков геонейтрино, температурные профили в сверхглубоких скважинах, наблюдаемый нагрев океана.

2. Сформулировано, что гидридная модель Земли предсказывает наличие больших масс для ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K в Земле, а также позволяет считать, что значительные массы ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K имеются в ядре Земли. Особенно значительным должно быть превышение количества калия по сравнению с предсказанным силикатной моделью Земли из-за его малого потенциала ионизации.

3. Сделано допущение, что полученное значение теплового потока внутреннего тепла Земли методом измерения градиента температур не учитывает значительное количество тепла, переносимое горячими газами, появление которых на больших глубинах предсказано гидридной моделью Земли. Наличие такого механизма переноса тепла, дополнительного к теплопроводности, позволяет понять появление неожиданно больших температур на больших глубинах на континентах и в океанах.

Благодарности. Авторы благодарят оргкомитет Международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Нальчик, 6–9 июня 2017 г.) за приглашение выступить

с данным докладом. Авторы также благодарят Игоря Ткачева (ИЯИ РАН) за плодотворные дискуссии, Allen Caldwell (MPI) за возможность представить доклад на семинаре в MPI и за плодотворную дискуссию, Leo Stodolsky (MPI) за плодотворную дискуссию, в частности за вопрос о том, какие должны быть температурные профили на континентах при наличии переноса тепла горячими газами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.).* Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // Phys. Rev. D. 2015. V. 92. P. 031101.
2. *Gando A. et al. (KamLAND Collab.).* Reactor On–Off Antineutrino Measurement with KamLAND // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 033001; arXiv:1303.4667v2 [hep-ex].
3. *Bellini G., Ludhova L., Ianni A., Mantovani F., McDonough W.F.* Geoneutrinos // Prog. Part. Nucl. Phys. 2013. V .73. P. 1–34.
4. *Yu Huang, Chubakov V., Mantovani F., Rudnick R. L., McDonough W. F.* A Reference Earth Model for the Heat Producing Elements and Associated Geoneutrino Flux. arXiv:1301.0365v2 [physics.geo-ph].
5. *Ларин В. Н.* Гипотеза изначально гидридной Земли (новая глобальная концепция). М.: Недра, 1975. 101 с.;
   Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 216 с.;
   Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, 2005. 248 с.;
   Larin V. N. Hydridic Earth: The New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet / Ed. C. Warren Hunt. Calgary. Canada: Polar Publ., 1993.
6. *Toulhoat H., Beaumont V., Zgonnik V., Larin N., Larin V. N.* Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue. arXiv:1208.2909 [astro-ph.EP]. 2012. 15 p.
7. *Bezrukov L.* Geoneutrino and Hydridic Earth Model. Version 2. Preprint INR 1378/2014. M., 2014. 12 p.; arXiv:1308.4163[astro-ph.EP].
8. CRC Handbook of Chemistry and Physics / Ed. by D. R. Lide. 84th Ed. Sec. 10: Atomic, Molecular and Optical Physics; Ionization Potentials of Atoms and Atomic Ions. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003.
9. *Toulhoat H., Beaumont V., Zgonnik V., Larin N., Larin V. N.* Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue. arXiv:1208.2909v2 [astro-ph.EP]. 2015. 42 p.
10. *Bezrukov L. B., Kurlovich A. S., Lubsandorzhiev B. K., Morgalyuk V. P., Sinev V. V., Zavarzina V. P.* On Geoneutrino // EPJ Web of Conf. “QUARKS-2016”. 2016. V. 125. P. 02004.
11. *Sinev V. V., Bezrukov L. B., Litvinovich E. A., Machulin I. N., Skorokhvatov M. D., Sukhotin S. V.* Looking for Antineutrino Flux from ^{40}K with Large Liquid Scintillator Detector // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 26, No. 2. P. 339–345.

12. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.

13. *Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K.*. Earth's Energy Imbalance // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 13421–13449.

14. *Krotikov V. D., Troitskyi V. S.* Radio Emission and Nature of the Moon // Sov. Phys. Usp. 1964. V. 6. P. 841–871.