

ПОИСК ГЕОРЕАКТОРА

В.Н. Сергеев

Обсуждаются гипотезы о существовании природного ядерного реактора (геореактора) в ядре в центре Земли, на границе жидкого и твердого ядра и на границе мантии и ядра. Приводятся признаки существования геореактора, связанные с его работой. Отмечено, что достоверным признаком является присутствие в потоке электронных антинейтрино, рождающихся в недрах Земли, геонейтрино с энергиями выше энергий антинейтрино от радиоактивного распада ^{238}U . Для обнаружения геореактора необходимы детекторы большого объема со сцинтиллятором, содержащим соединения водорода, способные регистрировать направление прилета антинейтрино.

Введение

Возможность протекания когда-либо самоподдерживающихся ядерных реакций деления урана и тория [Широков, Юдин, 1980; Блан, 1989] в природных условиях на Земле рассматривалась еще в середине прошлого века [Wetherill, 1953; Wetherill, Inghram, 1953; Kuroda, 1956]. Впоследствии, после обнаружения в 1972 году следов работы природного ядерного реактора на урановом месторождении в Окло (Габон, Западная Африка) [Петров, 1977] интерес к проблеме возрос. Были

выдвинуты несколько гипотез о существовании природного ядерного реактора в недрах Земли (геореактора) в различных геосферах [Сергеев, 2012]. В работе [Herndon, 1993] была предложена гипотеза о существовании геореактора в ядре, в центре Земли. Последняя версия этой гипотезы представлена в [Herndon, 2013]. Исследовалась возможность существования геореактора на границе жидкого и твердого ядра Земли [Анисичкин и др., 2003; Анисичкин, Безбородов, 2009]. Гипотеза о существовании геореактора на границе мантии и ядра Земли рассматривалась в работе [De Meijer, Van Westrenen, 2008].

Интерес к гипотезе существования геореактора вызван надеждой с его помощью прояснить некоторые до конца неясные вопросы, связанные с процессами в недрах Земли: внутренний энергетический баланс Земли, динамику магнитного поля, особенности изотопных соотношений некоторых элементов в вулканических породах и др.

Слабым местом предложенных гипотез о геореакторе является механизм концентрации делящихся материалов (урана и тория) в земных недрах [Сергеев, 2012]. Однако полностью исключить возможность существования геореактора в недрах Земли пока еще нельзя, имея ввиду, в частности, что неопределенность в данных о внутренних энергетических источниках Земли [Сергеев, 2014] допускает существование геореактора в ее недрах мощностью несколько ТВт.

Необходимые условия для существования геореактора

При захвате нейтронов ядра тяжелых элементов, в частности, урана и тория, становятся нестабильными и делятся на части, выделяя при этом энергию и несколько нейтронов [Широков, Юдин, 1980; Блан, 1989]. Если потери нейтронов в среде, вызванные рассеянием и поглощением ядрами неделящихся элементов, меньше, чем их воспроизводство, то тогда возможно протекание самоподдерживающейся (цепной) ядерной реакции.

Среди долгоживущих (имеющих период полураспада, соизмеримый с возрастом Земли) изотопов урана и тория ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th самоподдерживающаяся ядерная реакция напрямую возможна лишь для ^{235}U . Этот изотоп урана делится нейтронами любых энергий, но наиболее эффективно – нейтронами низких энергий. Поэтому для улучшения возможности протекания самоподдерживающейся реакции деления ^{235}U необходимо присутствие вещества, ядра которого замедляли бы нейтроны деления, не поглощая их – замедлителя. Замедлителями являются, в частности, углерод (это обстоятельство используется в гипотезах о геореакторе [Анисичкин и др., 2003]) и вода (как, по-видимому, было в Окло [Петров, 1977]).

Ядра ^{238}U и ^{232}Th при захвате нейтронов достаточно высоких энергий испытывают ряд превращений, образуя в итоге делящиеся нейтронами любых энергий ^{239}Pu (для ^{238}U) и ^{233}U (для ^{232}Th). Так осуществляется размножение расщепляющихся нуклидов. Хотя энергия нейтронов, выделяемых при делении ядер, довольно высока (порядка нескольких МэВ), при рассеянии на ядрах среды нейтроны деления быстро теряют первоначальную энергию, что препятствует осуществлению самоподдерживающейся ядерной реакции для ^{238}U и ^{232}Th .

Природный уран состоит в основном из двух изотопов: ^{238}U (период полураспада – $4,468 \cdot 10^9$ лет) и ^{235}U (период полураспада – $7,04 \cdot 10^8$ лет) [Audi et al., 2003].

Распространенность этих изотопов урана в настоящее время ^{238}U – 99,2745% и ^{235}U – 0,7200% [Audi et al., 2003]. Для того, чтобы могла начаться самоподдерживающаяся реакция деления урана, необходима концентрация ^{235}U в природном уране более высокая, чем 0,72%. Из-за меньшего времени полураспада ^{235}U его концентрация в природном уране в прошлом была выше и 4 млрд лет назад составляла около 16%. Этого достаточно для осуществления самоподдерживающейся реакции деления при определенных условиях.

В работе [Herndon, 2013] сформулированы условия, необходимые для существования геореактора. В несколько измененном виде они сводятся к следующему:

1. Изначально должно быть достаточное количество урана в районе локализации геореактора.
2. Должен существовать естественный механизм концентрации урана.
3. Изотопный состав урана в начале функционирования геореактора должен быть соответствующим, чтобы поддерживать цепную ядерную реакцию.
4. Реактор должен быть в состоянии размножать достаточное количество расщепляющихся нуклидов, чтобы функционировать до настоящего времени.
5. Должен существовать естественный механизм удаления продуктов деления.
6. Должен существовать естественный механизм отвода тепла от геореактора.
7. Должен существовать естественный механизм регулирования уровня мощности геореактора.
8. Местоположение геореактора должно быть таким, которое бы обеспечивало его сохранение и предотвращало разрушение. Условие 8 может быть расширено, имея ввиду возможность существования нейтронно-делительной волны [Феоктистов, 1989] в активном слое геореактора [Анисичкин и др., 2003].

Отличительные признаки существования геореактора

В качестве подтверждения гипотез о геореакторе обычно приводятся данные о соотношении стабильных изотопов гелия ^3He / ^4He в изверженных породах. Увеличение ^3He / ^4He в вулканических породах относительно ^3He / ^4He в атмосфере объясняется радиогенным происхождением ^3He и ^4He , связанным с работой геореактора [Herndon, 2013; Анисичкин и др., 2009]. Как аргумент используют также влияние возможного нестационарного режима работы геореактора [Herndon, 2013; Анисичкин и др., 2003] на процессы, происходящие в Земле (изменение магнитного поля Земли и т.п.). Однако эти признаки существования геореактора являются косвенными и могут быть связанными с другими процессами, протекающими в глубинах Земли.

Максимальной энергией электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ от радиоактивных распадов ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th и ^{40}K , дающих основной вклад в радиогенное тепло Земли, является максимальная энергия $\bar{\nu}_e$ от распада ^{238}U , составляющая 3,26 МэВ. В то же время энергетический спектр $\bar{\nu}_e$ от радиоактивных распадов продуктов деления ^{235}U , ^{239}Pu и ^{233}U простирается до 8 МэВ [Русов и др., 2008]. Поэтому достоверным признаком работы геореактора является присутствие в потоке $\bar{\nu}_e$, рождающихся в земных недрах, геонейтрино с энергиями выше 3,26 МэВ.

Регистрация геонейтрино и поиск геореактора

Регистрация геонейтрино от радиоактивных распадов ^{238}U и ^{232}Th ведется детекторами большого объема с жидким сцинтиллятором, содержащим соединения водорода на основе реакции обратного β – распада на свободном протоне [Сергеев, 2015]. Такой способ регистрации геонейтрино является наиболее эффективным [Chen, 2014].

Нейтринный детектор KamLAND (масса сцинтиллятора около 1 кт) в Японии регистрирует геонейтрино с 2002 года и детектор Borexino (м. с. около 0,3 кт) в Италии – с 2007 года. В настоящее время на детекторе KamLAND проводится модернизация, а детектор Borexino готовят к новому эксперименту, исключающему возможность регистрации геонейтрино [Ludhova, 2016]. Детектор SNO+ с массой сцинтиллятора около 0,8 кт в Канаде [Andringa et al., 2016] начнет регистрацию геонейтрино в скором будущем. В Китае к 2020 году планируется создать детекторы JUNO (м. с. около 20 кт) [Han et al., 2016] и Jinping (м. с. около 4 кт) [Beacom et al., 2016], способные регистрировать геонейтрино. Существует проект создания большого европейского нейтринного детектора LENA с массой сцинтиллятора 50 кт [Wurm et al., 2012]. К сожалению, проект мобильного подводного детектора Nanohano [Сергеев, 2015] вряд ли будет реализован в ближайшие десятилетия [Sramek et al., 2016].

При обработке данных регистрации геонейтрино оценивалась возможность существования геореактора в центре Земли. По последним опубликованным данным ограничения сверху на мощность такого геореактора составили для детектора Borexino 4,5 ТВт при 95% C.L. [Bellini et al., 2013] и для детектора KamLAND 3,7 ТВт при 95% C.L. [Gando et al., 2013]. Однако ограничение сверху на мощность геореактора не является доказательством его существования.

Прямым доказательством существования геореактора, как было указано выше, является регистрация геонейтрино с энергиями выше 3,26 МэВ. Поскольку местоположение гипотетического геореактора заранее неизвестно, необходимы детекторы с массой сцинтиллятора несколько десятков кт, способные регистрировать направление прилета $\bar{\nu}_e$ [Сергеев, 2015]. Регистрация направления прилета $\bar{\nu}_e$ снимает также проблему фона реакторных антинейтрино $\bar{\nu}_e$, связанного с работой АЭС. Детекторы JUNO и LENA будут способны подтвердить или опровергнуть гипотезы о существовании геореактора.

Заключение

В заключение следует обратить внимание на два обстоятельства. 1. Если не будет подтверждена гипотеза работы геореактора в настоящее время, то это не исключает его существования в прошлом. 2. При достаточно длительной работе в прошлом и определенной мощности геореактора динамика изменения первоначальных количеств урана и тория в недрах Земли будет отличаться от изменений, вызванных радиоактивным распадом.

Литература

- Анисичкин В.Ф., Безбородов А.А. Ядерная топка Земли // Наука из первых рук. 2009. № 3. С. 26–35.
- Анисичкин В.Ф. и др. Возможные режимы цепных ядерных реакций в ядре Земли / VII Забабахинские научные чтения, Снежинск. Сентябрь 8–12, 2003. <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s1/1-3.pdf>
- Блан Д. Ядра, частицы, ядерные реакторы. М.: Мир, 1989. 336 с.
- Петров Ю.В. Естественный ядерный реактор Окло // Успехи физических наук. 1977. Т. 123. Вып. 3. С. 473–486.
- Русов В.Д., Тарасов В.А., Литвинов Д.А. Физика реакторных антинейтрино. М.: Эдиториал УРСС, 2008. 408 с.
- Сергеев В.Н. Геореактор // Динамические процессы в геосферах. Вып. 3: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2012. С. 30–34.
- Сергеев В.Н. Внутреннее тепло Земли и геонейтрино // Динамические процессы в геосферах. Вып. 6: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2014. С. 162–167.
- Сергеев В.Н. Распределение радиоактивных элементов, определяющих радиогенное тепло Земли, в ее недрах и геонейтрино // Динамические процессы в геосферах. Вып. 7: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2015. С. 193–199.
- Феокистов Л.П. Нейтронно-делительная волна // Доклады АН СССР. 1989. Т. 309. № 4. С. 864–867.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М.: Наука, 1980. 728 с.
- Andringa S. et al. Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment // Advances in High Energy Physics. V. 2016. 61942502015; arXiv: 1508.05759v3 [physics.ins-det].
- Audi G. et al. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // Nuclear Physics A. 2003. V. 729. P. 3–128.
- Beacom J.F. et al. Letter of Intent: Jinping Neutrino Experiment. 2016; arXiv: 1602.01733v4 [physics.ins-det].
- Bellini G. et al. Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino // Phys. Lett. 2013. B 722. P. 295–300; arXiv: 1303.2571v1 [hep-ex].
- Chen M. Geoneutrino Detection / Treatise on Geochemistry (2nd Edition). Editors-in-Chief: H. Holland and K. Turekian. Elsevier. 2014. V. 15: Analytical Geochemistry/Inorganic INSTR. Analysis. P. 443–454.
- Gando A. et al. Reactor ON-OFF Antineutrino Measurements with KamLAND // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. 033001; arXiv: 1303.4667v2 [hep-ex].
- Han R. et al. Potential of Geo-neutrino Measurements at JUNO // Chinese Phys. C. 2016. V. 40. 3. 033003; arXiv:1510.01523v4 [physics.ins-det].
- Herndon J.M. Feasibility of a nuclear fission reactor at the center of the Earth as the energy source for the geomagnetic field // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1993. V. 45. P. 423–437.
- Herndon J.M. Terracentric Nuclear Fission Georeactor: Background, Basis, Feasibility, Structure, Evidence, and Geophysical Implications; arXiv: 1308.5934v2 [physics.gen-ph].
- Kuroda P.K. On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals // J. Chem. Phys. 1956. V. 25. No. 4. P. 781–782.
- Ludhova L. Low-energy neutrinos // Journal of Physics: Conference Series. 718. 022012. 2016. <http://iopscience.iop.org/1742-6596/718/2/022012>
- De Meijer R.J., Van Westrenen W. Assessing the feasibility and consequences of nuclear georeactors in Earth's core-mantle boundary region; arXiv: 0805.0664v1 [physics.geo-ph].
- Sramek O. et al. Revealing the Earth's mantle from the tallest mountains using the Jinping Neutrino Experiment // Scientific Reports. 2016. 6:33034. <http://www.nature.com/articles/srep33034>.
- Wetherill G.W. Spontaneous fission yields from uranium and thorium // Phys. Rev. 1953. V. 92. No. 4. P. 907–912.
- Wetherill G.W., Inghram M.G. / Proc. of the Conference on Nuclear Processes in Geologic Settings. USA, Sept. 1953. P. 30.
- 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].