

НЕЙТРИННАЯ ТОМОГРАФИЯ В ГЕОФИЗИКЕ

В.Н. Сергеев

Представлен краткий обзор состояния дел в перспективном направлении исследования земных недр – нейтринной томографии от внешних источников. Достоинством нейтринной томографии является то, что она позволяет непосредственно измерять плотность земных недр. Нейтринная абсорбционная томография использует поглощение нейтринного потока земным веществом и может быть реализована при энергиях нейтрино порядка и выше 1 Тэв. Нейтринная осцилляционная томография основана на влиянии земного вещества на осцилляции нейтрино при прохождении ими толщи земных недр и наиболее эффективна при энергиях нейтрино от 100 Мэв до 35 Гэв.

Введение

Целью настоящей работы является ознакомление читателя с состоянием дел в перспективном направлении исследования земных недр – нейтринной томографии. Здесь имеется в виду нейтринная томография Земли от внешних источников нейтрино, то есть не затрагиваются вопросы томографии от источников внутри самой Земли, связанных с распадом радиоактивных элементов в земных недрах. Этот во-

прос рассматривается другим направлением нейтринной геофизики – исследованиями геонейтрино (смотри, например [Сергеев, 2010]).

Нейтрино не имеет электрического заряда, обладает очень малой массой, не подвержено сильному взаимодействию и взаимодействует с веществом только через слабое взаимодействие [Окунь, 1990; Боум, Фогель, 1990]. Благодаря этому нейтрино почти беспрепятственно проходит через толщи земных недр и регистрация нейтрино – очень непростая задача. Проникающая способность нейтрино дает принципиальную возможность осуществления нейтринной томографии земных недр. С другой стороны, слабость взаимодействия нейтрино с земным веществом предъявляет высокие требования к величинам потоков нейтрино, используемых для «просвечивания» Земли, и к размерам детекторов нейтрино.

Нейтрино проходит сквозь Землю по прямой линии. Ослабление входящего в земные недра потока нейтрино связано с взаимодействием нейтрино с нуклонами земного вещества и прямо пропорционально средней плотности нуклонов (и, следовательно, средней массовой плотности вещества) вдоль луча входящих нейтрино. Регистрируя на выходе из Земли прошедшие сквозь земные недра нейтрино, зная характеристики входящего потока, можно определить ослабление потока, и, таким образом, среднюю плотность земных недр вдоль луча. Имея данные по различным лучам, методами томографии, в принципе, можно найти распределение плотности земных недр. Такое направление исследований в нейтринной томографии получило название абсорбционной нейтринной томографии [Winter, 2006].

Другое направление связано с особенностями осцилляций нейтрино при прохождении земных недр. В этом случае влияние земного вещества на изменения проходящего сквозь Землю потока нейтрино определяется плотностью электронов земного вещества. Плотность нуклонов и массовая плотность земного вещества могут быть найдены по плотности электронов. Это направление получило название осцилляционной нейтринной томографии [Winter, 2006].

Каждое из названных выше направлений исследований эффективно в своей области значений энергий нейтрино. Для энергий пригодных для абсорбционной томографии не существенны осцилляции нейтрино, а для энергий характерных для осцилляционной томографии не существенна абсорбция нейтринных потоков [Winter, 2006].

Опуская исторический обзор работ, посвященных нейтринной томографии Земли, сошлемся лишь на работы восьмидесятых годов прошлого века [Аскарян, 1986; Царев, Чечин, 1986] и на современный обзор [Winter, 2006], в которых можно найти необходимую информацию.

Нейтрино и его осцилляции

Существует три типа нейтрино, сопутствующие в реакциях, вызванных слабыми взаимодействиями, электрону e , мюону μ и τ -лептору, 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.

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]. Причина этого явления заключается в том, что состояния нейтрино, участвующих в слабых взаимодействиях ν_e, ν_μ, ν_τ , не совпадают с состояниями ν_1, ν_2, ν_3 , обладающими не равными между собой массами m_1, m_2, m_3 , а являются их смесью [Боум, Фогель, 1990]. В

процессе движения из-за различия масс m_1, m_2, m_3 меняется состав смеси, что выражается в превращении ν_e, ν_μ, ν_τ друг в друга.

В простейшем случае осцилляций двух типов нейтрино α и β в вакууме вероятность перехода $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ равна [Winter, 2006]:

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right). \quad (1)$$

Здесь θ – параметр, описывающий смешивание массовых состояний нейтрино a и b в активных состояниях α и β (угол смешивания), $\Delta m^2 = m_a^2 - m_b^2$, L – пройденное нейтрино расстояние, E – энергия нейтрино.

В общем случае осцилляции трех типов нейтрино описываются шестью параметрами (тремя углами смешивания $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$, двумя разностями квадратов масс $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2$ и фазой δ_{CP}). Информацию о численных значениях этих параметров можно посмотреть в [Куденко, 2011]. В настоящее время для θ_{13} получено только ограничение сверху, неизвестен знак Δm_{31}^2 и ничего не известно о δ_{CP} .

Из-за того, что вещество содержит электроны и не содержит мюоны и тау-лептоны нейтрино ν_e и ν_μ, ν_τ по-разному взаимодействуют с веществом. Это приводит к влиянию электронной плотности вещества на нейтринные осцилляции [Михеев, Смирнов, 1987]. Для случая осцилляций двух типов нейтрино α и β в веществе с постоянной плотностью электронов n_e вероятность перехода $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ описывается формулами [Winter, 2006]:

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2(2\tilde{\theta}) \sin^2\left(\frac{\Delta \tilde{m}^2 L}{4E}\right), \quad \Delta \tilde{m}^2 = \xi \cdot \Delta m^2, \quad \sin(2\tilde{\theta}) = \frac{\sin(2\theta)}{\xi}, \quad (2)$$

где $\xi \equiv \sqrt{\sin^2(2\theta) + (\cos(2\theta) - \hat{A})^2}$, $\hat{A} \equiv \frac{2\sqrt{2}G_F n_e E}{\Delta m^2}$, G_F – константа связи слабого взаимодействия.

Абсорбционная нейтринная томография

Сечение взаимодействий нейтрино с нуклонами σ растет с увеличением энергии нейтрино E линейно вплоть до энергий порядка 10 Тэв [Winter, 2006]:

$$\frac{\sigma}{E} \approx 10^{-35} \frac{\text{см}^2}{\text{Тэв}}. \quad (3)$$

Рост σ приводит к увеличению ослабления потока нейтрино, проходящих сквозь Землю. Используя (3), можно оценить ослабление нейтринного потока при энергии нейтрино E . При $E \sim 1$ Тэв ослабление потока нейтрино на длине диаметра Земли составляет несколько процентов, что достаточно для соответствующих измерений, конечно, при условии, что начальный поток нейтрино имеет необходимую величину. При энергиях нейтрино ~ 25 Тэв длина свободного пробега нейтрино в земном веществе приблизительно равна диаметру Земли. Приведенные числа характеризуют наиболее благоприятные энергии нейтрино для осуществления абсорбционной нейтринной томографии Земли.

Источники достаточно больших потоков нейтрино с энергиями порядка и более 1 Тэв существуют в атмосфере Земли. Это – атмосферные нейтрино, рождающиеся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли. Необходимые нейтринные потоки могут быть также созданы искусственно на основе уско-

рителей с энергией порядка 10 Тэв [Winter, 2006]. Однако пока этот вопрос находится в стадии обсуждения проектов и до их осуществления еще далеко. Краткий обзор по искусственным источникам нейтрино с обширной библиографией представлен в [Winter, 2010].

Для регистрации нейтрино высоких энергий используются детекторы, располагающиеся глубоко под поверхностью Земли. Рабочим телом является достаточно прозрачная среда (вода, лед), в которой помещаются фотоумножители для регистрации черенковского излучения от вторичных процессов при взаимодействии нейтрино с веществом. При высоких энергиях нейтрино треки вторичных частиц сохраняют направление прилета нейтрино, что позволяет надежно определять угловые распределения нейтринного излучения. Такие установки получили название нейтринных телескопов. Для нейтринных телескопов фильтром, поглощающим все потоки частиц кроме нейтрино, является толща Земли, то есть нейтринные телескопы направлены вглубь Земли. В настоящее время реализуются несколько проектов создания нейтринных телескопов нового поколения с рабочим объемом порядка 1 км³. Это европейские нейтринные телескопы, располагающиеся в глубинных водах Средиземного (ANTARES, NEMO, KM3NeT) и Ионического (NESTOR) морей. Существуют планы расширения Байкальского глубоководного нейтринного телескопа до рабочего объема в 1 км³. В начале 2011 года завершено создание самого крупного в настоящее время нейтринного телескопа IceCube, расположенного на американской антарктической станции Амундсен-Скотт глубоко во льду. Этот телескоп является единственным в настоящее время действующим нейтринным телескопом с рабочим объемом в 1 км³. Подробнее о нейтринных телескопах можно посмотреть в работе [Рябов, 2009].

Различные схемы абсорбционной нейтринной томографии как Земли в целом, так и отдельных ее внутренних областей при использовании разных источников нейтрино представлены в обзоре [Winter, 2006]. Здесь мы лишь представим некоторые недавние работы, посвященные этому вопросу.

В работе [Gonzalez-Garcia et al., 2008] представлен проект нейтринной томографии переходной зоны ядро – мантия Земли с использованием потоков атмосферных нейтрино с энергией в районе 10 Тэв. Показано, что за 10 лет нейтринным телескопом с рабочим объемом 1 км³ могут быть накоплены необходимые данные для получения сферически симметричного профиля плотности переходной зоны ядро – мантия Земли. Различие между плотностью ядра и плотностью мантии может быть установлено на уровне не ниже 3σ. Использовались вычисленные на основании данных по космическим лучам и магнитному полю Земли входные нейтринные потоки. Оценки проведены для места расположения нейтринного телескопа IceCube.

Аналогичная работа проделана для места расположения нейтринного телескопа NEMO [Borriello et al., 2009]. Найдено, что за 10 лет накопления данных нейтринным телескопом с рабочим объемом 1 км³ может быть достигнута чувствительность по плотности 5% для ядра и 2% для мантии.

Осцилляционная нейтринная томография

Из условия максимального влияния электронной плотности на осцилляции нейтрино из формул (2) может быть получен диапазон значений энергий нейтрино наиболее эффективный для осцилляционной нейтринной томографии. Он составляет от 100 Мэв до 35 Гэв [Winter, 2006]. Но и источники с энергиями нейтрино

вне этого диапазона пригодны для целей осцилляционной томографии. Так в работе [Akhmedov et al., 2005] рассмотрен вопрос использования солнечных нейтрино (энергия не выше 15 Мэв) и нейтрино от сверхновых (максимум энергетического спектра в районе 20 Мэв).

Источниками нейтрино для осцилляционной томографии могут служить как природные источники (солнечные, от сверхновых, атмосферные нейтрино), так и искусственные – созданные с помощью ускорителей [Winter, 2006]. Для регистрации нейтрино могут быть использованы различные типы детекторов в зависимости от энергий нейтрино.

Для проведения нейтринной осцилляционной томографии нужно знать (или измерять) состав нейтринного потока на входе в земные недра и на выходе из них. Профиль плотности восстанавливается на основании этих данных, используя формулы для вычисления вероятностей переходов одних типов нейтрино в другие, зависящих от электронной плотности земного вещества вдоль луча распространения нейтрино.

Теория осцилляционной нейтринной томографии достаточно развита, хотя и имеет ряд нерешенных проблем, в частности, проблему восстановления профиля плотности электронов на основании измерений в общем случае. Тем не менее, проделана большая работа, выявлены случаи различных упрощений в теории (смотри, например [Akhmedov et al., 2005]). Также проводятся и планируются эксперименты по уточнению и определению значений параметров, описывающих осцилляции нейтрино [Winter, 2010; Куденко, 2011].

Осцилляционная нейтринная томография потенциально более информативна, чем абсорбционная [Winter, 2006]. В принципе может быть восстановлен профиль плотности вдоль луча на основании измерения только по этому лучу. Кроме того, электронная плотность несет информацию о составе земных недр.

Предложено много различных схем осцилляционной нейтринной томографии [Winter, 2006]. Основным препятствием для практического осуществления таких проектов является недостаточная интенсивность природных потоков нейтрино, требующая нереальных в настоящее время детекторов, а также отсутствие искусственных источников нейтринных потоков необходимой величины.

Заключение

Достоинством нейтринной томографии является возможность прямого измерения плотности земных недр. Традиционные геофизические методы в той или иной степени привлекают для этого модельные представления.

История вопроса об использовании нейтрино в целях томографии земных недр насчитывает не один десяток лет, но лишь в настоящее время, с вводом в эксплуатацию детекторов нейтрино с рабочим объемом порядка 1 км^3 , нейтринная абсорбционная томография Земли начинает становиться реальностью. Относительно осцилляционной нейтринной томографии пока этого сказать нельзя.

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

Литература

Аскарян Г.А. Исследование Земли с помощью нейтрино, нейтринная геология // Успехи физических наук, 1984, т. 144, в. 3, С. 523–530.

- Боум Ф., Фогель П.* Физика массивных нейтрино. М.: Мир. 1990. 304 с.
- Куденко Ю.Г.* Исследование нейтринных осцилляций в ускорительных экспериментах с длинной базой // Успехи физических наук, 2011, т. 181, № 6, С. 569–594.
- Михеев С.П., Смирнов А.Ю.* Резонансные осцилляции нейтрино в веществе // Успехи физических наук, 1987, т. 153, в. 1, С. 3–58.
- Окунь Л.Б.* Лептоны и кварки. М.: Наука. 1990. 349 с.
- Рябов В.А.* Регистрация астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2009, т. 40, в. 1, С. 5–62.
- Сергеев В.Н.* Перспективы геонейтринных исследований / Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010, С. 54–58.
- Царев В.А., Чечин В.А.* Дальние нейтрино. Физические основы и геофизические приложения // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1986, т. 17, в. 3, С. 389–432.
- Akhmedov E.Kh. et al.* Geotomography with solar and supernova neutrinos // JHEP, 2005, 0506:053; arXiv: 0502154v2 [hep-ph].
- Borriello E. et al.* Sensitivity on Earth Core and Mantle densities using Atmospheric Neutrinos // JCAP, 2009 0906:030; arXiv: 0904.0796v2 [astro-ph.EP].
- Gonzalez-Garcia M.C. et al.* Radiography of the Earth's Core and Mantle with Atmospheric Neutrinos // Phys. Rev. Lett., 2008, 100, 061802; arXiv: 0711.0745v2 [hep-ph].
- Winter W.* Neutrino tomography – Learning about the Earth's interior using the propagation of neutrinos // Earth Moon Planets, 2006, 99. P. 285–307; arXiv: 0602049v2 [physics.geo-ph].
- Winter W.* Performance Comparison: Superbeams, Beta Beams, Neutrino Factory / 12th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Beta Beams (NuFact10), October 20–25, 2010, Mumbai, India; arXiv: 1011.4468 [hep-ph].