

ВЛИЯНИЕ ВЕЩЕСТВА ЗЕМЛИ НА ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО

В.А. Царев

Обсуждаются возможности изучения осцилляций нейтрино и геофизических исследований с помощью ускорительных нейтрино, проходящих через земной шар.

Проблема нейтринных осцилляций — одна из наиболее важных в современной физике нейтрино. Эксперименты, которые проводятся и планируются с ускорительными или реакторными нейтрино, ориентированы на поиск вакуумных осцилляций /1/. Чрезвычайно интересной задачей является также поиск своеобразных осцилляционных явлений, которые могут происходить при прохождении нейтрино через большие толщи вещества ($\approx 10^9$ см/ ρ , где ρ — плотность в г/см³) /2/. В отличие от вакуумных, осцилляции в веществе могут происходить и при $m_\nu = 0$ и возникают в результате когерентного рассеяния нейтрино на нуклонах и электронах вещества через нейтральный ток при условии, что последний недиагонален по нейтрино. Если имеют место вакуумные осцилляции, взаимодействие с веществом приводит к их модификации даже для диагонального нейтрального тока. Подобные эффекты могли бы сказываться на потоках атмосферных нейтрино, проходящих через Землю, или нейтрино от космических источников (Солнца, сверхновых и т.п.) /3, 4/, однако ряд неопределенностей затрудняет интерпретацию результатов измерений таких потоков. В настоящей работе обсуждаются возможные проявления осцилляций в веществе при прохождении пучков ускорительных нейтрино через земной шар и приложение этих эффектов в нейтринной геофизике /5/.

Рассмотрим вначале модель с недиагональным нейтральным током. Для простейшего случая двух типов безмассовых нейтрино ν_a и ν_b вероятность найти в первоначально чистом пучке ν_a на расстоянии x нейтрино ν_a и ν_b равна

$$P_{\nu_a, \nu_a}(x) = (1/2) [1 + \cos(2\pi x/L)], \quad P_{\nu_b, \nu_a}(x) = (1/2) [1 - \cos(2\pi x/L)], \quad (1)$$

где эффективная длина осцилляций /2/

$$L = \pi/G \sin^2 a (g_p N_p + g_n N_n + g_e N_e). \quad (2)$$

Здесь N_p (N_n , N_e) — число протонов (нейтронов, электронов) в единице объема; a — параметр, определяющий вероятность недиагональных переходов; G — константа слабого взаимодействия и $\sum_i g_i \approx 1$. Полагая $N_i = \rho_i N_A$, где N_A — число Авогадро, $\rho_e = \rho_p \approx \rho_n \approx \rho/2$ и ρ — средняя плотность вещества на пути нейтринного пучка, получим:

$$L \approx 2,5 \cdot 10^9 \text{ см} / \rho \sin^2 a \sum_i g_i. \quad (3)$$

Величина ρ составляет 2 — 3 г/см³ для литосферы, ≈ 5 г/см³ в среднем по земному шару и ≈ 8 г/см³ по диаметру Земли. Поэтому при $\sin^2 a \approx 0,1$ — 1 длина L соизмерима с характерными размерами земного шара. Это означает, что, измеряя L , можно определять ρ для различных путей в Земле, причем эффекты, обусловленные влиянием вещества на плотность нейтринного потока, прошедшего Землю, будут порядка 100%. Таким образом, подобные измерения могут оказаться значительно более чувствительными, чем измерения, основанные на эффектах поглощения /5/, поскольку последние при $E_\nu \leq 1$ ТэВ не превосходят нескольких процентов ($\epsilon \approx 0,06 E_\nu/\text{ТэВ}$). Большая величина эффекта обусловлена когерентностью взаимодействия и, следовательно, линейностью по G , тогда как эффекты поглощения некогерентны и квадратичны по G . В отличие от поглощения, эффекты осцилляций не зависят от энергии E_ν , которая может быть выбрана исходя из возможностей ускорителя и требования надежной регистрации нейтрино на больших расстояниях от источника.

Рассмотрим теперь другой вариант — модификацию вакуумных осцилляций в результате когерентного рассеяния на электронах вещества /2/. В этом случае для двух типов нейтрино (ν_e , ν_μ) вероятность P перехода $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ дается тем же выражением, что и в вакууме, но с заменой вакуумных угла смешивания θ_V и длины осцилляций $L_V = 4\pi E_\nu / \delta$ ($\delta \equiv m_1^2 - m_2^2$) их значениями для вещества:

$$P_{\nu_\mu \nu_\mu}(x) = 1 - (1/2) \sin^2 2\theta_\mu [1 - \cos(2\pi x/L_M)];$$

$$\sin^2 2\theta_M = \sin^2 2\theta_V [1 - 2(L_V/L_0) \cos 2\theta_V + L_V^2/L_0^2]^{-1}, \quad (4)$$

$$L_M = L_V [1 - 2(L_V/L_0) \cos 2\theta_V + L_V^2/L_0^2]^{-1/2}.$$

Здесь $L_0 = 1,77 \cdot 10^9 / \rho$ см — длина Вольфенштейна. Как видно из (4), при $L_V \ll L_0$, $\theta_\mu \approx \theta_V$, $L_M \approx L_V$ и влияние вещества не существенно; при $L_V \gg L_0$, $\sin^2 2\theta_M \approx 0$ вещество подавляет осцилляции (при этом $L_M \approx L_V$). Если выполнено соотношение $L_V/L_0 \approx \cos 2\theta_V$, то имеет место "усиление" амплитуды осцилляций /2, 4/, то есть $\sin^2 2\theta_M \approx 1$ (даже если вакуумные осцилляции подавлены при малом θ_V).

Рассмотрим условия, при которых эффекты вещества проявляются наиболее ярко при прохождении нейтрино через Землю. Возможны две ситуации:

1) Эффект вакуумных осцилляций велик. Это возможно, если а) $\sin^2 2\theta_V \approx 1$ (условие на амплитуду) и б) $x \geq L_V/2$ (условие на фазу). В этом случае наиболее сильным проявлением вещества будет подавление осцилляций, для чего необходимо —

$$E_\nu / \text{ТэВ} \geq 14,2 (\delta / \text{эВ}^2) / (\rho / (\text{г/см}^3)),$$

$$x \geq 1,77 \cdot 10^4 \text{ км} / (\rho / (\text{г/см}^3)). \quad (5)$$

Легко видеть, что оба условия могут быть удовлетворены. Например, при $\delta = 10^{-3}$, $E_\nu \geq 1,8$ ГэВ, диаметр Земли $D \geq 2200$ км.

2) Вакуумные осцилляции проявляются слабо. Это возможно при выполнении хотя бы одного из условий: а) $\theta_V \ll 1$, б) $x \ll L_V/2$. Второе условие не очень существенно, поскольку его можно избежать надлежащим выбором E_ν (хотя при очень малых δ потребуются малые энергии нейтрино, что затрудняет их регистрацию. Например, $\delta < 10^{-4}$ эВ² требует $E_\nu < 1$ ГэВ). Для наиболее заметного проявления вещества нужно, чтобы осцилляции в веществе приводили к большому изменению потока нейтрино. Для этого необходимо обеспечить усиление амплитуды осцилляций ($L_V/L_0 \approx \cos 2\theta_V$, при этом $L_M \approx L_V/\sin 2\theta_V$) и большое изменение фазы ($x \geq L_M/2$). Эти условия можно переписать в виде

$$E_\nu / \text{ТэВ} \approx 14,2 \cos 2\theta_V (\delta / \text{эВ}^2) / (\rho / (\text{г/см}^3)),$$

$$x \geq 1,77 \cdot 10^4 \text{ км} \operatorname{ctg} 2\theta_V / (\rho / (\text{г/см}^3)). \quad (6)$$

Первое из условий (6) при малых θ_V совпадает с первым условием (5) и легко выполнимо. Второе условие в полной мере выполняется на диаметре Земли лишь при $\theta_V \geq 0,1$. При меньших x фаза не успевает измениться на π (кроме того, нужно учитывать еще непостоянство $\rho(x)$ /4/). Тем не менее и в этом случае эффект осцилляций, пропорциональный $[\pi(x/L_0) \sin 2\theta_V]^2$, может быть достаточно велик, поскольку $D/L_0 \approx 3$.

Таким образом, модификация осцилляций в Земле может привести к эффектам, превосходящим на несколько порядков эффекты поглощения при доступных сейчас энергиях нейтрино (≤ 200 ГэВ). Это обстоятельство может оказаться полезным для изучения осцилляций и проведения геофизических исследований.

Автор благодарен С.П. Михееву и В.А. Чечину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понтекорво Б.М. ЖЭТФ, 33, 549 (1958).
2. Wolfenstein L. Phys. Rev., D 17, 2369 (1978).
3. Wolfenstein L. Phys. Rev., D 20, 2634 (1979).
4. Михеев С.П., Смирнов А.Ю. ЯФ, 42, № 6, (1985).
5. Волкова Л.В., Зацепин Г.Т. Известия АН СССР, сер. физ. 38, 1060 (1974); Недялков И.П. Препринты ОИЯИ 18-81-189, P2-81-645, Дубна, 1981; De Rújula A. et al. Phys. Reports, 99, 342 (1983); Салеев В.А., Царев В.А., Чечин В.А. Препринт ФИАН № 88, М., 1985.

Поступила в редакцию 8 августа 1985 г.