

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР**

(28—29 мая 1986 г.)

28 и 29 мая 1986 г. в конференц-зале Института физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

28 мая

1. Э. Л. Андроникашвили, Г. М. Мревлишвили. Низкотемпературная теплоемкость ДНК.

2. Н. Н. Горькавый, А. М. Фридман. Резонансная природа колец Урана и предсказание его новых спутников.

29 мая

3. С. П. Михеев, А. Ю. Смирнов. Осцилляции нейтрино в среде с переменной плотностью.

4. В. Л. Гинзбург, В. П. Фролов. Квантовые эффекты в ускоренных системах, аномальный эффект Доплера и принцип эквивалентности*).

Краткое содержание трех докладов приводится ниже.

С. П. Михеев, А. Ю. Смирнов. Осцилляции нейтрино в среде с переменной плотностью. Осцилляции нейтрино¹ модифицируются в среде². В случае смешивания двух нейтрино $\nu_\alpha = (\nu_e, \nu_\mu)$ уравнения Шрёдингера имеют вид $i\nu_\alpha = \hat{M}\nu_\alpha$, причем диагональные элементы матрицы эволюции \hat{M} содержат слагаемые, пропорциональные плотности вещества ρ . Основными понятиями являются: угол смешивания θ_m и собственные состояния нейтрино в среде ν_{im} ($i = 1, 2$). ν_{im} определяются как состояния, диагонализующие матрицу эволюции: $\nu_\alpha = \hat{S}\nu_m$, $\hat{S}^{-1}\hat{M}\hat{S} = \hat{M}^{diag}$. θ_m — это угол в унитарной матрице \hat{S} , связывающий ν_{1m} , ν_{2m} и ν_e , ν_μ . Среда изменяет смешивание нейтрино. При $\rho \neq 0$ ν_{im} отличны от ν_i — состояний с определенными массами и $\theta_i = \theta(\rho(t)) \neq \theta_m$.

Влияние среды носит резонансный характер³. Зависимость $\sin^2 2\theta_m$ от плотности или энергии нейтрино представляет собой брейт-вигнеровский пик, максимум которого $\sin^2 2\theta_m = 1$ достигается при $l_\nu = l_0 \cos 2\theta$ (условие резонанса), l_0 — собственная длина для материи ($l_0 \propto (G_F \rho)^{-1}$), l_ν — длина осцилляций в вакууме ($l_\nu = 4\pi E / \Delta m^2$), G_F — константа Ферми. Полуширина пика: $\Delta\rho_R = \rho_R \sin 2\theta$ (или $\Delta E_R = E_R \sin 2\theta$), где ρ_R (E_R) — резонансная плотность (энергия), при которой выполнено условие резонанса. Возникновение резонанса обусловлено тем, что смешанные нейтрино — это, по существу, система слабосвязанных осцилляторов (жесткость связи определяется θ). Среда по-разному изменяет собственные частоты осцилляторов, и в резонанс эти частоты равны. Эффективные, зависящие от плотности, массы ν_e и ν_μ в резонансе совпадают⁴. Проявления резонанса зависят от характера изменения плотности среды.

Угол θ_m определяет аромат (т. е. ν_e , ν_μ -состав) собственных состояний ν_{im} ; θ_m , и, следовательно, аромат зависит от плотности. При уменьшении ρ от $\rho \gg \rho_R$ до $\rho \ll \rho_R$ угол θ_m уменьшается от $\pi/2$ до θ . Соответственно (при малых θ) аромат ν_{im} изменяется почти полностью. Если $\nu_{1m}(\rho \gg \rho_R) = \nu_\mu$, то $\nu_{1m}(\rho \ll \rho_R) = \nu_e$. Это свойство лежит в основе обсуждаемых превращений нейтрино.

Динамика осцилляций следует из уравнений для собственных состояний: $i\nu_m = (\hat{M}^{diag} + \theta_m \sigma_2)\nu_m$, σ_2 — матрица Паули^{5, 6}. Недиagonальные члены, описывающие переходы $\nu_{1m} \leftrightarrow \nu_{2m}$ — θ_m , пропорциональны ρ . В зависимости от скорости изменения плотности картина осцилляций такова.

В среде с постоянной плотностью ($\dot{\theta}_m = 0$) ν_{im} эволюционируют независимо. Со временем примеси ν_{im} в нейтринном состоянии не меняются; аромат ν_{im} сохраняется. Отсюда общий характер осцилляций оказывается таким же, как и в вакууме. В среде с $\rho = \rho_R$ глубина осцилляций при произвольно малом θ максимальна, $A_P = 1$. Если генерируются нейтрино с непрерывным энергетическим спектром, то в диапазоне энергий $E_R - \Delta E_R \div E_R + \Delta E_R$ осцилляции будут резонансно усилены³.

В среде с медленно меняющейся плотностью реализуется адиабатический режим ^{3, 5-10}. Условие адиабатичности $|\dot{\theta}_m|^2 \ll |M_1^{\text{diad}} - M_2^{\text{diad}}|^2 = 4\pi^2/l_m^2$ (l_m — длина осцилляций в веществе), которое в области резонанса принимает вид $2\Delta r_R > l_m$ (Δr_R — пространственная ширина резонансного слоя ³), означает, что ν_{im} эволюционируют независимо, переходами $\nu_{1m} \leftrightarrow \nu_{2m}$ можно пренебречь. Примеси ν_{im} в данном нейтринном состоянии сохраняются и равны примесям в момент генерации нейтрино; аромат ν_{im}

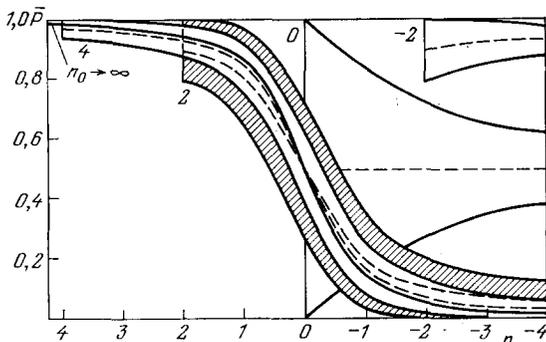


Рис. 1. Зависимость средней вероятности \bar{P} и глубины осцилляций (A_P) от $n = (\rho - \rho_R)/\Delta\rho_R$ для разных начальных условий n_0 (цифры у кривых) в адиабатическом режиме

изменяется в соответствии с изменением плотности. Вероятность обнаружить в момент t нейтрино исходного типа является квазипериодической функцией, осциллирующей около среднего значения $\bar{P}(t)$ с глубиной $A_P(t)$. При этом \bar{P} и A_P являются универсальными функциями одной переменной $n = (\rho - \rho_R)/\Delta\rho_R$ и одного параметра — значения n в начальный момент (рис. 1) \bar{P} и A_P не зависят от распределения $\rho(r)$ ^{5, 6, 8}. Чем сильнее различаются начальная и конечная плотности и чем меньше вакуумное смешивание, тем сильнее изменение ароматов ν_{im} и тем полнее переход одного типа нейтрино в другой ^{3, 7, 8}. При увеличении n_0 глубина осцилляций уменьшается:

$$A_P \propto (n_0^2 + 1)^{-1/2},$$

и в пределе $n_0 \rightarrow \infty$ распространение нейтрино приобретает характер безосцилляционного превращения одного типа нейтрино в другой ^{7, 8}. При этом $\nu(t)$ практически совпадает с одним из ν_{im} .

Если плотность изменяется быстро, так что адиабатическое условие нарушено, становятся существенными переходы $\nu_{im} \leftrightarrow \nu_{2m}$. В процессе распространения меняются и примеси ν_{im} в нейтринном состоянии, и аромат самих ν_{im} . A_P и \bar{P} зависят от распределения плотности и фазы осцилляций.

На масштабах, где проявляются резонансные эффекты материи: $l_0 \gg \lambda_0 \approx m_N/G_F \approx 3,5 \cdot 10^9$ г/см², оказывается существенным расхождение волновых пакетов ν_{im} . Разность групповых скоростей ν_{im} зависит от плотности и при $\rho = \rho_R/\cos^2 2\theta$, обращаясь в нуль, изменяет знак. В адиабатическом режиме эффект (P), просуммированный по пакетам, совпадает с усредненным эффектом без учета расхождения ^{5, 6}.

Область приложений обсуждаемых эффектов: Солнце ^{3, 4, 5, 6, 9-12}, Земля ^{1, 3, 8}, оболочки и ядра коллапсирующих звезд ^{7, 8}, ранняя Вселенная ⁸.

1. С о л н ц е. Существует область $\sin^2 2\theta$ и Δm^2 (рис. 2), в которой для стандартной солнечной модели достигается 2—4-кратное подавление скорости ν = захвата в Cl — Ag-эксперименте. При этом возникает определенное искажение формы спектра борных нейтрино. Так может быть объяснен результат Дэвиса. Для Ga — Ge-эксперимента предсказания лежат в широком интервале от стандартных до 10-кратно подавленных по сравнению со стандартными. Сопоставление данных Cl — Ag- и Ga — Ge-экспериментов, а также

измерение формы спектра борных нейтрино прямыми электронными методами позволит установить, происходит ли в Солнце резонансное превращение нейтрино, и практически однозначно определить Δm^2 и $\sin^2 2\theta$.

2. Ядра и оболочки коллапсирующих звезд (см. рис. 2). Эффекты зависят от канала смешивания, в котором выполнено резонансное условие. Для смешивания $\nu_e \leftrightarrow \nu_x$ предсказывается исчезновение ν_e -пика от нейтронизации; для $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu(\nu_\tau)$ — «обмен» спектрами ν_e и $\nu_\mu(\nu_\tau)$; для $\bar{\nu}_e \leftrightarrow \bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_\tau)$ — аналогичный обмен спектрами $\bar{\nu}_e$ — $\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_\tau)$. Если резонанс осуществляется в канале $\bar{\nu}_e \leftrightarrow \bar{\nu}_s$ или $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$, где ν_s — стерильное

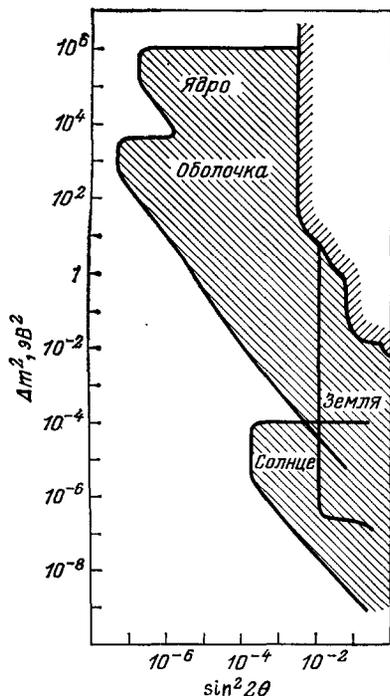


Рис. 2. Область значений Δm^2 и $\sin^2 2\theta$, в которой происходит заметное превращение нейтрино в веществе Солнца, ядер и оболочек коллапсирующих звезд, Земли.

Для Земли использовали интервал энергий 1 мэВ — 10⁶ ГэВ. Заштрихованная область — существующие экспериментальные ограничения

состояние, то возможно практически полное исчезновение сигнала в $\bar{\nu}_e$, либо ν_e -детекторах. В этой связи важно проводить поиск ν -вспышек, ориентированный на регистрации ν_e и $\bar{\nu}_e$ одновременно.

3. Земля. Область сильного эффекта занимает примерно порядок по $(E/\Delta m^2)$. В толще Земли укладывается около половины резонансной длины осцилляций. Зависимость фактора подавления от $E/\Delta m^2$ и зенитного угла отражает распределение вещества. В этой связи обсуждаются: просвечивание Земли пучком нейтрино от ускорителя¹³, искажения спектра атмосферных нейтрино⁶, модуляция (день-ночь и др.) потока нейтрино от Солнца, различия ν -потоков от гравитационных коллапсов на разных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понтекорво Б. М. // ЖЭТФ. 1978. Т. 33. С. 549.
Биленький С. М., Понтекорво Б. М. // УФН. 1977. Т. 123. С. 181.
2. Wolfenstein L. // Phys. Rev. Ser. D. 1978. V. 17. P. 2369; 1979. V. 20. P. 2634.
Barger V., Whisnant K., Pakvasa S., Phillips R. J. N. // Ibidem. 1980. V. 22. P. 2718.
3. Михеев С. П., Смирнов А. Ю. // ЯФ. 1985. Т. 42. С. 1441.
Mikheyev S. P., Smirnov A. Yu. // Nuovo Cimento. Ser. C. 1986. V. 9. P. 17.
4. Bethe H. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 1305.

5. Михеев С. П., Смирнов А. Ю.//Международный семинар «Кварки-86». Тбилиси, 15—17 апреля 1986 г.
6. Mikheyev S. P., Smirnov A. Yu. Talk given at 7th VOGU/ICOBAN. 16—18 April 1986. Тоуама, Япон.
7. Михеев С. П., Смирнов А. Ю.//ЖЭТФ. 1986. Т. 91. С. 7.
8. Mikheyev S. P., Smirnov A. Yu.//Proc. of VIth Moriond Workshop on «Massive Neutrinos in Particle Physics and Astrophysics»—Tignes. France, 25 January — 1 February 1986.— P. 355.
9. Messiah A.//Ibidem. P. 373; Preprint Saclay PhT/86-46.
10. Barger V. et al. Preprint Univ. of Wisconsin, MAD/PH/280.
11. Rosen S. P. et al., Gelb J. M.//⁸.— P. 1.
12. Bouchez J. et al.//Ibidem Preprint Saclay PhPE/86 — 10 May 1986.
13. Ермилова В. К., Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН СССР № 45.— Москва, 1986.