

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
(25 марта 1992 г.)

25 марта 1992 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. Л.А. Халфин. Судьба Вселенной и тяжелое 174 кэВ-нейтрино.
2. В.И. Кудимов, Н.М. Крейнес. Метастабильная фотоиндуцированная сверхпроводимость в пленках  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,4}$  вблизи перехода полупроводник—металл.

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

524.852(048)

**Л.А. Халфин.** Судьба Вселенной и тяжелое 17кэВ-нейтрино.

1. В 1985 г. Дж. Симпсон сообщил [1], что при исследовании  $\beta$ -спектра в распаде трития он обнаружил небольшую ( $\approx 3\%$ ) примесь тяжелого нейтрино с массой 17 кэВ к обычному электронному нейтрино  $\nu_e$ . В этом же году появились работы с отрицательными результатами, в которых критиковалась работа [1]. Однако в 1989 Дж. Симпсон и А. Хайм опубликовали две работы [2], в которых они оспорили критические замечания и, более того, сообщили о новых экспериментах, подтверждающих существование 17 кэВ-нейтрино в  $\beta$ -распаде трития и ядра  $^{35}\text{S}$ , правда с меньшим значением ( $\approx 0,7\%$ ) примеси. Наиболее точные данные для  $^{35}\text{S}$  [3] дали значения коэффициента смешивания  $\sin^2\theta = 0,085 \pm 0,006 \pm 0,005$ . (Согласующиеся с этими данными результаты были сообщены в 1990 г. группой Э. Нормана [4] и, что существенно, для другого ядра,  $^{14}\text{C}$ , а также менее определенные результаты при исследовании внутренней конверсии для  $^{55}\text{Fe}$ . В то же время, в основном в работах,

сделанных с помощью магнитных  $\beta$ -спектрометров, результаты для  $^{35}\text{S}$  не были подтверждены и для  $\sin^2\theta$  получены меньшие значения. Достаточно полную библиографию экспериментальных работ см. в [5, 6]. Самые последние результаты, как положительные, так и отрицательные, были сообщены на Совещании "Проблема 17 кэВ-нейтрино" (декабрь 1991 г. Беркли) [7].

2. Существование столь тяжелого 17 кэВ-нейтрино кажется проблематичным с точки зрения современной космологии, астрофизики и физики элементарных частиц. Безусловное подтверждение его существования с необходимостью указало бы на выход за рамки современной теории, а при определенных свойствах этого нейтрино даже к выходу за рамки космологии Большого Взрыва. Дело в том, что существуют ограничения на свойства 17 кэВ-нейтрино (см., например, [5, 8] и доклады в [7]), вытекающие из современных данных: А. Космология: а) оценка возраста Вселенной; б) свойства реликтового излучения. Б. Астрофизика: а) энергетика взрыва сверхновой SN 1987 и поток нейтрино; б) свойства красных гигантов; в) флуктуации плотности и образование структур; г) реликтовый нуклеосинтез; д) проблема солнечных нейтрино. С. Физика элементарных частиц: а) масса нейтрино; б) осцилляции нейтрино; в) ширина  $Z^0$ -бозона; г) двойной безнейтринный  $\beta$ -распад; д) экзотические сверхлегкие частицы (аксионы, майораны, ...). Из всех этих ограничений наиболее модельно независимыми являются А а), б). А именно, используя только оценки возраста Вселенной (см. безусловно оценки [9] метода нуклеохронологии) и фундаментальное предположение современной космологии о Большом Взрыве, выводят (детали см. в [8]), что 17 кэВ-нейтрино должно быть нестабильным с временем жизни  $\leq 10^{12}$  с. При этом существенно, что это ограничение не зависит от коэффициента смешивания  $\sin^2\theta$ . Из современных данных [10] о планковском спектре реликтового излучения, в рамках космологии Большого Взрыва, следует [8], что вероятность радиационного распада 17 кэВ-нейтрино  $\leq 4 \cdot 10^{-5}$ . Эти два фундаментальных ограничения позволяют утверждать, что ни один из проведенных экспериментов недостаточен для решения проблемы 17 кэВ-нейтрино, ибо ни один из этих экспериментов не дает информации о времени жизни 17 кэВ-нейтрино и вероятности его радиационного распада. С этой точки зрения отрицательные результаты лишь уменьшали оценку  $\sin^2\theta$  из положительных результатов. Для решения проблемы 17 кэВ-нейтрино нужны другие экспериментальные тесты (см. п. 5).

Из других, не столь безусловных, но модельных оценок, следующих из астрофизики (Б) и физики элементарных частиц (В), вытекает ([5, 8], цитируемые в них работы и доклады в [7]), что: 1) 17 кэВ-нейтрино является майорановским нейтрино, в основном связано с  $\nu_\tau$  нейтрино; 2) мю-мезонное нейтрино  $\nu_\mu$  тоже является майорановским нейтрино, имеющим либо массу почти 17 кэВ, либо массу в интервале 190 — 220 кэВ. В связи с этим решение проблемы солнечных нейтрино за счет эффекта Михеева—Смирнова—Вольфенштейна предполагает существование легкого стерильного нейтрино.

3. Все известные к настоящему времени эксперименты по обнаружению 17 кэВ-нейтрино являются косвенными экспериментами, а именно экспериментами по обнаружению "kink" (излома) в распределении энергии электронов в  $\beta$ -распаде. "Kink" соответствует разрыву непрерывности

$d^3N(E)/dE^3$  в точке  $E = E_m$  (определяемой массой 17 кэВ-нейтрино) теоретического  $\beta$ -спектра  $dN(E)/dE$ . В свою очередь  $dN(E)/dE$  связано с экспериментально измеряемым спектром  $dN(E)/dE$  согласно интегральному уравнению:

$$\frac{d\tilde{N}(E)}{dE} = \int K(E, E') \frac{dN(E')}{dE'} dE', \quad (1)$$

где  $K(E, E')$  — функция отклика спектрального прибора. Таким образом, задача обнаружения "kink" в  $\beta$ -спектре сводится к двум обратным задачам: а) нахождение  $dN(E')/dE'$  по  $d\tilde{N}(E)/dE$  при известном  $K(E, E')$  как решение уравнения (1), б) определение разрыва непрерывности  $d^3N(E')/dE'^3$  по найденному согласно а) теоретическому  $\beta$ -спектру  $dN(E')/dE'$ . Обе эти задачи являются типичными некорректными обратными задачами (по Адамару) и могут быть исследованы в рамках статистического подхода к решению некорректных задач (см. [11] и указанные там ссылки). Во всех известных экспериментах на самом же деле решалась прямая задача, в которой, предполагая определенный параметрический вид  $dN(E')/dE'$ , вычислялась согласно (1) параметрическая зависимость  $d\tilde{N}(E)/dE$  и затем по экспериментально определенному  $d\tilde{N}(E)/dE$  оценивались искомые параметры (в частности, масса и коэффициент смешивания 17 кэВ-нейтрино). Этот подход заведомо не является оптимальным с точки зрения статистического подхода.

4. Параметрический вид  $dN(E)/dE$  определялся, в частности, согласно стандартной теории смешивания нейтрино, которая основана (см., например, [12]) на предположении, что массовые состояния нейтрино стабильны. Как уже подчеркивалось, современная космология отвергает эту возможность и теория смешивания нейтрино должна быть построена для нестабильных нейтрино. Это и было сделано в работе автора [13], в которой использовались результаты общей теории многоуровневой нестабильной физической системы с нарушением дискретной симметрии (см. [14] и ссылки на них на более ранние работы). Новая теория смешивания предсказывает новые эффекты, величина которых пропорциональна перекрытию распределений масс нестабильных нейтрино, которых, в частности, в случае вырождения масс  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  (см. п. 3) не мало. В стандартной теории смешивания феноменологический коэффициент смешивания  $\sin^2\theta$  является независимым параметром. В новой же теории коэффициент смешивания не произволен и ограничен соотношением унитарности (аналог соотношения унитарности Белла—Штейнбергера). Существенно, что это соотношение унитарности выведено вне приближения Вайскопфа—Вигнера (W.—W.) и показывает его большую чувствительность к хвостам распределений масс, а не только к массам и ширинам, как в приближении W.—W.

5. Для решения проблемы существования 17 кэВ-нейтрино и проверки ожидаемых его свойств (см. п. 3) естественно внимание к прямым методам: 1) эксперименты по осцилляциям нейтрино различных ароматов, 2) измерение импульса дочернего ядра в  $\beta$ -распаде, что позволило бы свести трехчастичную задачу  $\beta$ -распада к двухчастичной (см. доклады [15, 16]). Согласно [17] необходимые эксперименты по осцилляциям ожидаются не ранее 1995 г., не менее проблематична и реализация метода 2)). В работе автора [18] предложен неожиданный метод исследования нейтринной физики, в частности ос-

цилляции нейтрино, с помощью исследования неэкспоненциальных членов [19] в законах распада  $\beta$ -активных ядер, а также нестабильных частиц (например  $\pi$ -, K-мезонов), в продуктах распада которых есть нейтрино. Приведем один из результатов для закона распада  $L(t) \pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$  ( $|\nu_\mu\rangle = \sqrt{a_1}|\nu_1\rangle + \sqrt{a_2}|\nu_2\rangle + \sqrt{a_3}|\nu_3\rangle$ ,  $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ ,  $m_1 \leq m_2 \leq m_3$ ):

$$\begin{aligned}
 L(t) \approx & \exp[-2\Gamma m_\pi + (m_\pi^2 + p^2)^{-1/2}] + \frac{2}{\pi} \frac{1}{t} \exp[-\Gamma m_\pi + (m_\pi^2 + p^2)^{-1/2}] \times \\
 & \times \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \Gamma}{(m_\pi - m_\mu - m_i)^2 + \Gamma^2} \sin \left( \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2 - 2m_\mu m_i - m_i^2}{2p} t \right) + \\
 & + \frac{2}{\pi^2} \frac{1}{t^2} \sum_{i \neq j}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\Gamma^2 a_i a_j}{[(m_\pi - m_\mu - m_j)^2 + \Gamma^2][(m_\pi - m_\mu - m_i)^2 + \Gamma^2]} \times \\
 & \times \cos \left[ \frac{(m_i - m_j)(m_i + m_j + 2m_\mu)}{2p} t \right]. \quad (2)
 \end{aligned}$$

В (2)  $p$  — импульс  $\pi$ -мезона,  $m_\pi, m_\mu$  — массы  $\pi$ - и  $\mu$ - мезонов,  $(2\Gamma)^{-1}$  — время жизни  $\pi$ -мезона. Это выражение справедливо для  $t \geq 2/(m_\pi - m_\mu - m_1)$ , и обычные неэкспоненциальные члены порядка  $t^{-2}$ , не содержащие осцилляционных множителей, опущены. Члены в (2), содержащие  $\sin$  позволили бы определить массы  $m_i$  нейтрино (альтернатива методу 2)), члены же, содержащие  $\cos$ , воспроизводят осцилляционные члены (альтернатива методу 1)). Хотя эти неэкспоненциальные члены малы, для регистрации закона распада  $L(t)$  нужны лишь детекторы ядер и сильно взаимодействующих частиц, а не сложнейшие детекторы слабодействующих нейтрино. Выражение (2) получено для стабильных нейтрино. Для нестабильных нейтрино следует, что выражение (2) несправедливо для  $t \geq t_{cr}$ , где  $t_{cr}$  определяется временем жизни нейтрино. Еще более точное выражение для  $L(t)$  можно получить [20] на основании теории каскадного распада [21] вне приближения W.—W. Это выражение дает возможность получить информацию не только о времени жизни нейтрино, но и об амплитудах распада нейтрино, в частности, в каналы распада с экзотическими суперлегкими частицами, без непосредственного детектирования этих каналов распада.

6. Если время жизни 17 кэВ-нейтрино окажется меньше  $10^{12}$ с, то его существование заставит выйти за рамки стандартной теории элементарных частиц, но не затронет космологию Большого Взрыва. Если же время жизни 17 кэВ-нейтрино окажется больше  $10^{12}$ с и (или) вероятность его радиационного распада окажется больше  $4 \cdot 10^{-5}$ , то это с необходимостью будет означать несправедливость космологии Большого Взрыва, т.е. наших представлений о прошлом, настоящем и будущем Вселенной. Все это зависит от результатов будущих экспериментов, ибо абсолютных теоретических запретов на существование 17 кэВ-нейтрино нет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Simpson J.J.// Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 1891.
2. Simpson J.J., Hime A.// Phys. Rev. Ser. D. 1989. V. 39. P. 1825.
- Hime A., Simpson J.J.//Ibidem. P. 1837.

3. *Hime A., Jelley N.A.*//Phys. Lett. B. 1991. V. 257. P. 441.
4. *Sur B. et al.*//Phys. Lett. 1991. V. 66. P. 2444.
5. *Caldwell D.O., Langacker P.*// Phys. Rev. D. 1991. V. 44. P. 823.
6. *Ljubicic A., Logen B.A., Zimen I.*//Particle World. 1991. V. 2. P. 101.
7. Transparencies from the Workshop on the 17 keV Neutrino Question. Berkeley, California, USA, 18 — 20 December 1991.
8. *Altherr T., Chardonnet P., Salat P.*// Phys. Lett. B. 1991. V. 265. P. 252.
9. *Халфин Л.А.*// ЯФ. 1983. Т. 38. С. 1008.
10. *Mother J.C. et al.*//Astrophys. J. Lett. 1990. V. U7. P. 354.
- [11] *Халфин Л.А.*// Теория вероятн. и ее примен. 1992.
12. *Кuo T.K., Pantaleone J.*// Rev. Mod. Phys. 1989. V. 61. P. 937.
13. *Khalfin L.A.*// [7]; Preprint Research Institute for Theoretical Physics. — University of Helsinki, April 1992.
14. *Khalfin L.A.* Preprint CPT, DOE-ER-40200-211. - Austin, USA, February 1990; Preprint CPT, DOE-ER-40200-246. — Austin, USA, March 1991.
15. *Shrock R.*// [7].
16. *Swartz M.*// [7].
17. *Caldwell D.O.* Preprint UCSB-HEP-92-02. — Santa Barbara, USA, February 1992.
18. *Khalfin L.A.*// Дискуссия в [7]; Preprint Research Institute for Theoretical Physics. — University of Helsinki, April 1992.