

KATRIN-2016: СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА, ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СИСТЕМАТИКЕ

Н. А. Титов от имени проекта KATRIN*

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

82-летняя история поиска массы нейтрино связана с именами многих известных физиков. Проект KATRIN нацелен на получение верхнего предела эффективной массы электронного антинейтрино в β -распаде трития на уровне $0,2 \text{ эВ}/c^2$. Приведены основные параметры установки. Запуск с нерадиоактивными газами планируется в сентябре 2016 г., и набор данных с тритием — в 2017 г. Обсуждаются возможности установки сверх первоначальной программы KATRIN.

82-years old neutrino mass search history has been connected with the names of many prominent physicists. KATRIN project is aimed at setting upper limit on the effective electron antineutrino mass at $0.2 \text{ eV}/c^2$ level. The main installation parameters are presented. Commissioning start is planned with nonradioactive gases for September 2016 and data taking with tritium, for 2017. Possible experiments beyond original KATRIN program are discussed.

PACS: 14.60.Pq; 14.60.St; 29.30.Aj

На связь массы нейтрино с формой спектра электронов указал Э. Ферми в 1934 г. в статье о теории β -распада [1]. Уже в 1938 г. в ЛФТИ А. И. Алиханов, А. И. Алиханьян и Б. С. Дзелепов исследовали с этой целью спектр распада RaE [2]. В 1949 г. Г. Ханна и Б. Понтекорво впервые использовали в измерениях распад трития и показали, что $m_\nu < 1 \text{ кэВ}/c^2$ [3]. Исследование распада трития стало источником наиболее точных данных о величине массы нейтрино. В работе Бергквиста [4], где был поставлен предел $m_\nu < 55\text{--}60 \text{ эВ}/c^2$, впервые потребовался учет основных систематических погрешностей, в том числе возбуждения остаточного иона. Исторически важной оказалась работа ИТЭФ, в которой наблюдалась конечная масса нейтрино [5]. Эта работа стимулировала интерес к проблеме и инициировала проведение серии более чувствительных экспериментов. Также было привлечено внимание к космологическому аспекту конечной массы нейтрино. Так, реликтовые ней-

*E-mail: titov@inr.ru

трино с массой в диапазоне из работы [5] должны были приводить к замкнутому сценарию Вселенной. Следует отметить высокое качество спектрометра, созданного Евгением Фроловичем Третьяковым (2.09.1924–26.06.1999). В работах, выполненных позднее в Лос-Аламосской и Ливерморской национальных лабораториях США, использовали спектрометры «Tretjakov type» [6, 7].

Дальнейшее увеличение чувствительности измерений связано с изобретением электростатического спектрометра с адиабатической магнитной коллимацией В. М. Лобашевым и П. Е. Спиваком [8], а также независимо от них Э. Оттенем и Й. Бонном [9]. Такой спектрометр реализован соответственно на установках «Троицк ν -масс» и «Mainz Neutrino Mass Experiment» (совместный результат $m_\nu < 2$ эВ/ c^2). Принцип действия спектрометра основан на адиабатичности движения электрического заряда в медленно меняющемся магнитном поле [10]. В силу сохранения первого адиабатического инварианта, при переходе из сильного магнитного поля в слабое, заряды двигаются вдоль силовых линий магнитного поля, выстраиваясь вдоль их направления. В сильном магнитном поле помещается источник трития, а в слабом — электростатический спектрометр (или времяпролетная база, см. ниже). Важно, что разрешение спектрометра не зависит от поперечных размеров источника. Одновременно магнитным полем экранируются электроны от распада трития на электродах спектрометра.

Для получения чувствительности к массе нейтрино на уровне $m_\nu < 0,2$ эВ/ c^2 , как в проекте KATRIN, требуется увеличение интенсивности источника трития минимум на два порядка, что оказалось возможным в Научно-исследовательском центре Карлсруэ (сейчас — Технологический институт, Карлсруэ, Германия). Расположенная там тритиевая лаборатория имеет лицензию на работу с 40 г трития [11]. Проект был предложен в 2001 г. (Letter of Intent) группой из Карлсруэ, группами нейтринных экспериментов в Троицке, Майнце и Лос-Аламосе и группой ядерной спектроскопии из Института ядерных исследований Ржеж (Чехия) [12]. В настоящее время в проекте участвуют 17 групп из шести стран.

Установка состоит из основного спектрометра диаметром 10 м, с разрешением 0,9 эВ, предварительного спектрометра, безоконного газового источника, содержащего 3 Ки трития, систем дифференциальной и криогенной откачки, 146-пиксельного полупроводникового детектора и торцевой части (rear section), обеспечивающей равномерное распределение электрического потенциала в газовом источнике. По состоянию на середину 2016 г. все компоненты установлены или монтируются. Ведутся испытания отдельных систем, проводится изучение фоновых условий в основном спектрометре. В сентябре 2016 г. планируется запустить установку целиком с нерадиоактивными изотопами H_2/D_2 и выполнить ряд методических экспериментов. С начала 2017 г. предполагается приступить к постепенному вводу в газовый источник T_2 .

Рассматривается возможность, после завершения программы KATRIN, провести на установке поиск тяжелых стерильных нейтрино с массой в области нескольких кэВ [13].

Скорость набора статистики на установке KATRIN можно увеличить примерно в пять раз, если вести измерения во времяпролетном режиме [14]. Для этого необходимо модулировать потенциал спектрометра или получать стартовый сигнал от детектора единичных электронов [15].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-22-03069-офи.м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fermi E.* Versuch einer Theorie der β -Strahlen // *Z. Phys.* 1934. V. 88. P. 161–171.
2. *Alichanlian A. I., Alichanow A. I., Dželepov B. S.* On the Form of the β -Spectrum of RaE in the Vicinity of the Upper Limit and the Mass of the Neutrino // *Phys. Rev.* 1938. V. 53. P. 766–767.
3. *Hanna G. C., Pontecorvo B.* The β -Spectrum of H^3 // *Phys. Rev.* 1949. V. 75. P. 983–984.
4. *Bergkvist K.-E.* A High-Luminosity, High-Resolution Study of the End-Point Behaviour of the Tritium β -Spectrum (I). Basic Experimental Procedure and Analysis with Regard to Neutrino Mass and Neutrino Degeneracy // *Nucl. Phys. B.* 1972. V. 39. P. 317–370.
5. *Boris S. et al.* Neutrino Mass from the Beta Spectrum in the Decay of Tritium // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 2019–2023.
6. *Wilkerson J. F. et al.* Limit on ν_e Mass from Free-Molecular-Tritium Beta Decay // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 2023–2027.
7. *Stoeffl W., Decman D. J.* Anomalous Structure in the Beta Decay of Gaseous Molecular Tritium // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 75. P. 3237–3241.
8. *Lobashev V. M., Spivak P. E.* A Method for Measuring the Electron Antineutrino Rest Mass // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1985. V. 240. P. 305–310.
9. *Picard A. et al.* A Solenoid Retarding Spectrometer with High Resolution and Transmission for keV Electrons // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1992. V. 63. P. 345–358.
10. *Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З.* Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. С. 134–152.
11. <http://www.itep.kit.edu/english/258.php>
12. <http://xxx.lanl.gov/pdf/hep-ex/0109033v1>
13. *Mertens S. et al.* Sensitivity of Next-Generation Tritium Beta-Decay Experiments for keV-Scale Sterile Neutrinos // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2015. No. 02. P. 020.
14. *Steinbrink N. et al.* Neutrino Mass Sensitivity by MAC-E-Filter Based Time-of-Flight Spectroscopy with the Example of KATRIN // *New J. Phys.* 2013. V. 15. P. 113020.
15. *Asner D. M. et al.* Single-Electron Detection and Spectroscopy via Relativistic Cyclotron Radiation // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 114. P. 162501.