

А. Ковалик, А. Х. Инояттов, Д. Венос, О. Драгоун

Началось измерение в нейтринном проекте KATRIN

Нейтрино, вероятно, самая распространенная частица материи во Вселенной, является единственной элементарной частицей, масса покоя которой известна только в приблизительных пределах: $0,05 \leq m_\nu \leq 2$ эВ. Причем символ m_ν обозначает так называемую эффективную массу электронного антинейтрино, исследованную в ядерном β -распаде.

Однозначное экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций свидетельствует о том, что нейтрино, возникающие в слабых взаимодействиях (например, электронное антинейтрино, рожденное совместно с электроном в распаде трития ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$), представляют собой квантово-механическую суперпозицию трех состояний с массами m_1 , m_2 и m_3 . Значения этих масс пока невозможно вычислить или измерить. До сих пор удалось измерить только верхний предел для эффективной массы m_ν , которая

определяется комбинацией значений m_i и элементов матрицы смешивания нейтрино. Нижняя граница для m_ν была определена из измерений в нейтринных осцилляциях, которые из-за их интерференционного характера чрезвычайно чувствительны к значению разности квадратов масс нейтрино, но при этом не могут предоставить информацию о значении m_ν .

Модельно-независимый метод определения m_ν был предложен Э. Ферми. Он показал, что форма β -спектра в его верхней части зависит от m_ν^2 . На основании анализа имеющихся тогда β -спектров он сделал вывод о том, что «масса нейтрино меньше массы электрона и, вероятно, равна нулю». Таким же образом значение m_ν пытаются измерить уже третье поколение физиков. Был разработан ряд β -спектрометров с постепенно улучшающимся сочетанием высокого энергетического разрешения и высокой светосилы,

A. Kovalík, A. Ch. Inoyatov, D. Vénos, O. Dragoun

Measurements in the KATRIN Neutrino Project Started

Neutrino, apparently the most abundant particle of matter in the Universe, is the only elementary particle whose rest mass is known only in approximate limits: $0.05 \leq m_\nu \leq 2$ eV. By the symbol m_ν , the so-called effective mass of the electron antineutrino studied in a nuclear β decay is denoted.

Unambiguous experimental evidence for neutrino oscillations confirmed that neutrinos arising from weak interactions (e.g., electron antineutrino emitted together with electron in the tritium decay ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$) is a quantum mechanical superposition of three states with masses m_1 , m_2 and m_3 . However, we still did not calculate or measure their numeric values. So far, we have been able to measure only the upper limit of the effective mass m_ν , which is given by the combination of the values of m_i and elements of the neutrino mixing matrix. The lower limit for m_ν has resulted from measurements of neutrino oscil-

lations which, due to their interference character, are extremely sensitive to differences of the squared neutrino masses but cannot provide information about the values of m_ν .

A model-independent method for determination of m_ν was proposed by Enrico Fermi. He showed that the shape of β spectrum in its upper part depends on m_ν^2 . He concluded from his analysis of the available β spectra that “the neutrino mass is less than the electron mass and is probably equal to zero”. The third generation of physicists is trying to measure m_ν in the same way. A number of β spectrometers were developed with a gradually improving combination of high energy resolution and high luminosity, which is necessary to examine the weak effect close to the end point of β spectrum. So far, the best result of $m_\nu \leq 2$ eV has been independently achieved by physicists from the University of Mainz, Germany, and the INR RAS, Troitsk

что является необходимым для изучения слабого эффекта вблизи верхней границы β -спектра. До сих пор лучший результат $m_\nu \leq 2$ эВ был независимо достигнут физиками из Университета в Майнце (Германия) и ИЯИ РАН (Троицк, Москва) в измерениях β -спектра при распаде трития.

В то же время стало понятно, что возможности спектрометров почти исчерпаны. Поэтому в январе 2001 г. в Бад-Либенцелле (Германия) было проведено международное совещание, собравшее около пятидесяти физиков, с целью ответить на два важных вопроса: стоит ли стремиться к дальнейшему повышению чувствительности в определении m_ν этим путем и возможно ли это в условиях современного состояния техники? Ответ на оба вопроса был однозначно положительным, и поэтому в июне 2001 г. немецкие, российские, американские и чешские физики основали международную коллаборацию KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino) [1]. В качестве места проведения эксперимента был выбран Технологический институт в Карлсруэ (KIT) (Германия), поскольку в нем находится крупнейшая в Европе тритиевая лаборатория.

Первоначальное намерение коллаборации KATRIN заключалось в создании гигантского главного электронного спектрометра диаметром 7 м и длиной

23 м. Этот уникальный прибор должен был обладать чувствительностью к массе нейтрино m_ν на уровне 0,35 эВ. Менее чем через год международная группа независимых специалистов вновь рассмотрела проект. Ввиду его уникальности в глобальном масштабе было рекомендовано попытаться получить еще более высокую чувствительность к массе нейтрино.

В 2004 г. исследователи, задействованные в проекте KATRIN, пришли к выводу, что с использованием физических методов и технологий на самом пределе современных возможностей вполне реально повысить чувствительность в определении m_ν до 0,2 эВ. Поскольку измеряемая величина представляет собой квадрат массы m_ν^2 , то намеченная цель заключалась в достижении беспрецедентного стократного увеличения чувствительности. Для этого пришлось увеличить диаметр спектрометра до 10 м.

Заключительный этап транспортировки вакуумной камеры спектрометра массой 200 т с завода-изготовителя в KIT (а это почти 9000 км пути водным транспортом) показан на фото.

После многолетних усилий коллаборации KATRIN удалось завершить строительство семидесятиметрового сооружения. Его частью является бездонный источник молекулярного трития длиной 16 м



Карлсруэ (Германия). Заключительный этап транспортировки вакуумной камеры главного спектрометра KATRIN

Karlsruhe (Germany). The final phase of transporting the vacuum chamber of the main KATRIN spectrometer



Карлсруэ, 11 июня. Торжественный запуск измерений β -спектра трития в Технологическом институте в Карлсруэ. Среди 16 почетных гостей и участников проекта KATRIN, которые символически нажали кнопку «Старт», были Т.Каджита и А. Б. Макдональд, получившие Нобелевскую премию по физике в 2015 г. за открытие осциллиющих нейтрино

Karlsruhe, 11 June. The ceremony of launching the tritium β -spectrum measurement at the Karlsruhe Institute of Technology. Among sixteen distinguished guests and KATRIN collaborators, who symbolically pressed the START button, were also T. Kajita and A. B. McDonald, awarded jointly by the Nobel Prize in Physics 2015 for the discovery of neutrino oscillations

(Moscow), Russia, in the measurements of beta spectrum observed in the decay of tritium.

At the same time, the authors realized that the possibilities of their spectrometers were almost exhausted. Therefore, in January 2001, an international meeting of about fifty physicists, experts from various professions was held in Bad Liebenzell, Germany, to answer two important questions. Is it worthwhile to strive to further increase of the sensitivity in the determination of m_ν in this way? Is this possible under the current state of technology? The answer to both questions was unambiguously positive. Therefore, in June 2001, German, Russian, American, and Czech physicists founded the international collaboration KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino) [1]. Karlsruhe Institute of Technology (KIT) was chosen as the place of the experiment since it houses the largest tritium laboratory in Europe.

The original intention of the KATRIN collaboration was to build a giant electron spectrometer with a diameter of 7 m, 23 m long. This unique device should have a sensitivity of 0.35 eV to m_ν . After less than one year of the project existence, the international group of independent experts considered it again. Taking into account the uniqueness of the project on a global scale, it was recommended to try to obtain an even higher sensitivity to the neutrino mass m_ν .

In 2004, the researchers of the KATRIN collaboration came to the conclusion that it should be realistic to increase

the sensitivity in the determination of m_ν to 0.2 eV using physical methods and technologies at the limit of the current possibilities. Since the measured value is the square of the mass m_ν^2 , it is an unprecedented hundredfold increase in sensitivity in one step. To reach this, the diameter of the spectrometer vacuum chamber was increased up to 10 m.

The photo shows the final phase of transporting the vacuum chamber of the 200-ton spectrometer by the rivers and seas from the factory to KIT (nearly 9000 km).

After many years of effort, the KATRIN collaboration has succeeded in completing the 70-m-long device. Its part is also a windowless source of molecular tritium of 16 m length and weighing 20 tons, whose 30 K temperature is stabilized with a relative accuracy of $1 \cdot 10^{-3}$. The pre-spectrometer leaves only electrons from a narrow region of the β spectrum containing information on m_ν to pass to the main spectrometer for the energy analysis. This results in a substantial suppression of the undesirable background. The electron detector consists of 148 independent parts that allow possible corrections for minor device inhomogeneities.

Finally, on 11 June this year, the ceremony of launching the tritium β -spectrum measurement took place at the Karlsruhe Institute of Technology, in which more than 400 people took part, including the JINR Director, V. Matveev. It should, however, be noted that the spectrometer system was filled with tritium as early as on 18 May for the first time, and the first short-term measurement of

и массой 20 т, температура которого (30 К) стабилизируется с относительной точностью $1 \cdot 10^{-3}$. Головной спектрометр пропускает для энергетического анализа в главном спектрометре только электроны из узкой области β -спектра, содержащие информацию о массе нейтрино m_ν , что приводит к существенному подавлению нежелательного фона. Детектор электронов состоит из 148 независимых частей — пикселей, что позволяет внести поправки на незначительные неоднородности устройства (если они будут иметь место).

11 июня 2018 г. в Технологическом институте в Карлсруэ состоялся торжественный запуск измерений β -спектра трития, в котором приняло участие более 400 человек, в том числе и директор ОИЯИ ака-

Рис. 1. Результат первого измерения β -спектра трития в проекте KATRIN

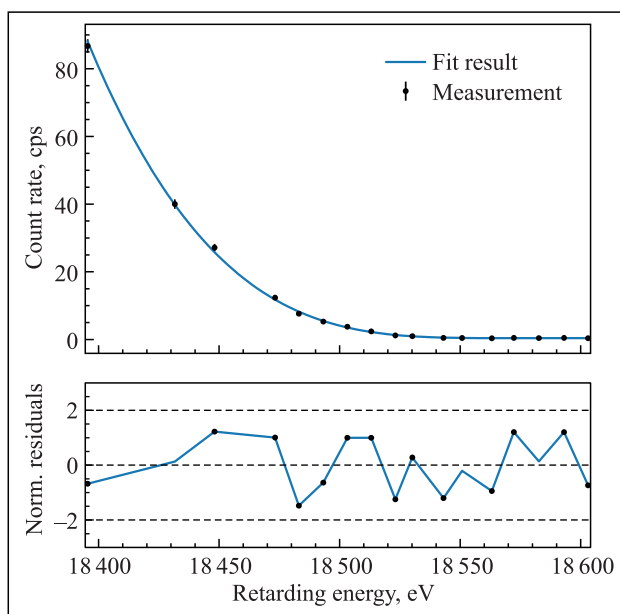


Fig. 1. The first tritium β spectrum measured in the KATRIN project

its beta spectrum was carried out on 19 May (Fig. 1). Thus, a phase of the long-term data collection has started, in which more than 160 physicists, engineers and technicians take part. The importance of the KATRIN project for the science of Germany itself is indicated by the fact that the share of the Federal Ministry of Education and Research of Germany in this project is about 75%. Only its investment in the building for the KATRIN apparatus reached about 50 million euros.

It is planned that the project goal (the sensitivity of $0.2 \text{ eV}/s^2$ to m_ν at 90% CL) will be achieved within three years of the measurement (Fig. 2). The main spectrometer of the KATRIN (the so-called Magnetic Adiabatic

демик РАН В. А. Матвеев. Необходимо отметить, что впервые тритий был впущен в систему спектрометра уже 18 мая, а первое кратковременное измерение его β -спектра проведено 19 мая (рис. 1). Теперь началась долгосрочная фаза сбора данных, в котором принимает участие более 160 физиков, инженеров и техников. О значимости проекта KATRIN для науки и самой Германии говорит тот факт, что доля Федерального министерства образования и научных исследований Германии в этом проекте составляет около 75%. Инвестиции в здание и отдельные части KATRIN составляют около 50 млн евро.

Цель проекта — получение чувствительности к m_ν на уровне $0,2 \text{ эВ}/c^2$ (с 90%-м уровнем достоверности), ее планируется достичь в течение трех лет набора статистики (рис. 2). Главный спектрометр проекта KATRIN (интегральный электростатический спектрометр с магнитной адиабатической коллимацией) должен обеспечить приборное разрешение около 1 эВ при энергии электронов 18,6 кэВ (граничная энергия β -спектра трития) и трансмиссию около 18% от 4π . Одним из важнейших требований для достижения на-

Рис. 2. Зависимость чувствительности к массе покоя антинейтрино m_ν от времени набора статистики

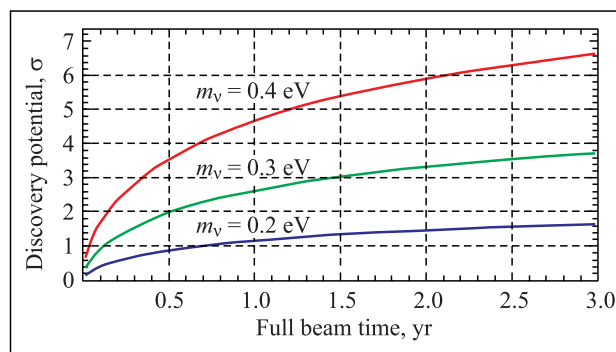


Fig. 2. Dependence of the sensitivity to m_ν as a function of data taking time

Collimator combined with an Electrostatic Filter) should provide an instrumental resolution of about 1 eV at the electron energy of 18.6 keV (the endpoint energy of the beta spectrum of tritium) and a transmission of about 18% of 4π . One of the most important requirements for achieving the intended goal is the stability of the retarding/analyzing voltage (about -18.6 kV). According to the calculations, its instability within $\pm 60 \text{ mV}$ can introduce a systematic error of $0.007 \text{ eV}^2/s^4$ in the square of the antineutrino rest mass obtained from the measured beta spectrum. Such an error represents a significant contribution to the maximum permissible systematic error of $0.017 \text{ eV}^2/s^4$ to achieve the planned sensitivity to the neu-

меченной цели является стабильность тормозящего/анализирующего напряжения (около $-18,6$ кВ). По проведенным расчетам, его нестабильность в пределах ± 60 мВ может внести систематическую погрешность на уровне $0,007$ эВ²/с⁴ в значение квадрата массы покоя антинейтрино, полученное из измеренного β -спектра. Такая погрешность представляет значительный вклад в максимально допустимую систематическую погрешность $0,017$ эВ²/с⁴ для достижения запланированной чувствительности к массе нейтрино. Долгосрочный мониторинг стабильности напряжения $-18,6$ кВ в пределах отклонения ± 60 мВ (т.е. с относительной погрешностью $\pm 3 \cdot 10^{-6}$) в течение двух месяцев (планируемая продолжительность одного сеанса измерений) является достаточно сложной задачей для современной техники. Поэтому стабильность тормозящего напряжения будет проверяться одновременно двумя независимыми способами: а) с помощью высокоточного вольтметра в сочетании со специальным делителем высокого напряжения и б) мониторингом положения стабильной во времени реперной линии моноэнергетических электронов, эмитируемых естественным источником, в специальном мониторирующем спектрометре (того же типа, что и главный спектрометр проекта KATRIN), который будет подключен

к общему источнику напряжения $-18,6$ кВ. В таком случае любое изменение положения реперной линии будет свидетельствовать о нестабильности в общей системе тормозящего напряжения. В разработке естественного источника реперных электронов, удовлетворяющего вышеупомянутым требованиям, вместе с коллегами из ИЯФ АН ЧР (Ржеж) принимали участие сотрудники Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, которые занимаются прецизионной ядерной электронной спектроскопией уже несколько десятков лет.

В связи с этим необходимо напомнить, что, в отличие от гамма-спектроскопии, в ядерной электронной спектроскопии до сих пор нет коммерчески доступных твердотельных энергетических реперов конверсионных электронов или электронов Оже с погрешностью менее $0,1$ эВ. Главная причина состоит в том, что кинетические энергии этих электронов напрямую зависят от энергий их связи в атоме. Как известно, энергии связи электронов чувствительны к физико-химическому окружению атомов, что впоследствии приводит к энергетическим сдвигам в спектрах как конверсионных электронов, так и электронов Оже, в особенности в случае твердотельных источников. Из фотоэлектронной спектроскопии известно, что этот энергетический сдвиг, который принято называть химическим сдвигом,

trino mass. The long-term monitoring of the -18.6 kV voltage stability within a deviation of ± 60 mV (i.e., with a relative error of $\pm 3 \cdot 10^{-6}$) for two months (the planned duration of one measurement cycle) is quite a challenge for modern technology. Therefore, the stability of the retarding voltage is checked simultaneously by two independent methods: a) using a high-precision voltmeter in combination with a special high-voltage divider; and b) by monitoring of the position of the time-stable reference line of monoenergetic electrons emitted by a natural source in a special monitoring spectrometer (of the same type as the main spectrometer of the KATRIN project), which will be connected to a common high-voltage power supply of -18.6 kV. Thus, any change in the position of the reference electron line will indicate instability in the common system of the retarding voltage. Together with the colleagues from the NPI of the CAS (Řež), researchers from DLNP, JINR, who have been engaged in the precision nuclear electron spectroscopy for several decades, participated in the development of a natural source of the reference electrons that meets the above requirements.

In this regard, it should be noted that (in contrast to gamma-ray spectroscopy) in nuclear electron spectro-

scopy there are still no commercially available solid-state energy calibration sources of conversion or Auger electrons with an uncertainty better than 0.1 eV. The main reason of this situation is that the kinetic energies of these electrons directly depend on the electron binding energies. It is well known that the electron binding energies are sensitive to the physicochemical environment of atoms that results in energy shifts in both the conversion electron and Auger electron spectra especially in the case of solid-state sources. As it is known from the photoelectron spectroscopy, these energy shifts (called chemical shifts) amount to ± 7 eV and are strongly correlated with the valence state of the emitting atoms. It is also known that the binding energies of electrons in solids are usually by $2-10$ eV smaller than for free atoms (the so-called solid-state shift), and for atoms adsorbed on the surface of solids by $1-3$ eV. However, it is necessary to emphasize that from the point of view of meeting the requirements for a natural source of the reference electrons for monitoring the high voltage in the KATRIN measurements, the accuracy of the determination of the absolute value of the energy of reference electrons does not play any decisive role but only the timing stability.

достигает ± 7 эВ и сильно коррелирован с валентным состоянием излучаемого атома. Известно также, что энергии связи электронов в твердых телах, как правило, на 2–10 эВ меньше, чем для свободных атомов (так называемый твердотельный сдвиг), а для атомов, адсорбированных на поверхности твердых тел, — на 1–3 эВ. Необходимо, однако, подчеркнуть, что с точки зрения выполнения требований к естественному источнику реперных электронов для мониторинга высокого напряжения в измерениях KATRIN, точность определения абсолютного значения энергии реперных электронов не играет решающей роли, но важна ее временная стабильность.

Как и в предыдущих прямых экспериментах по определению массы покоя электронного антинейтрино, в качестве реперных электронов была выбрана *K*-конверсионная линия (естественная ширина $(2,70 \pm 0,06)$ эВ) ядерного γ -перехода 32 кэВ в ^{83m}Kr (*K*-32), энергия которой $(17824,3 \pm 0,5)$ эВ относительно близка к граничной энергии β -спектра трития. Поскольку период полураспада ^{83m}Kr достигает всего 1,83 ч, то он не подходит для долговременного мониторинга. Сотрудниками ЛЯП был предложен твердотельный источник материнского изотопа ^{83}Rb с периодом полураспада $T_{1/2} = 86,2$ сут, что больше, чем планируе-

мая продолжительность одного сеанса измерения (два месяца).

Для тестирования свойств приготовленных источников ^{83}Rb использовались три электронных спектрометра, а именно: 1) дифференциальный комбинированный электростатический спектрометр ESA50, состоящий из тормозящей сферы и двойного цилиндрического зеркала с регулируемым приборным разрешением в диапазоне энергий электронов 0–50 кэВ (ЛЯП ОИЯИ); 2) дифференциальный электростатический спектрометр ESA12 типа цилиндрическое зеркало с фокусировкой второго порядка, оснащенный тормозящей (ускоряющей) линзой (ИЯФ АН ЧР, Ржеж); 3) интегральный электростатический спектрометр с магнитной адиабатической коллимацией (Институт физики, Университет Майнца, Германия). Сначала проводились исследования источников ^{83}Rb , которые были изготовлены методом испарения в вакууме на разные подложки по методике, разработанной в ЛЯП [2]. Всего было изготовлено 29 источников ^{83}Rb , из них 16 на алюминиевой подложке (окисленная естественным путем фольга), 12 — на углеродной (поликристаллическая фольга) и один на подложке из НОПГ (высокоориентированный пиролитический графит). Долгосрочные измерения (от 2 до 6 месяцев)

As in the previous direct experiments for determination of the rest mass of the electron antineutrino, the *K*-conversion line (natural width of (2.70 ± 0.06) eV) of the 32 keV nuclear γ transition in ^{83m}Kr (*K*-32) was chosen as reference electrons because its energy of (17824.3 ± 0.5) eV is relatively close to the end point energy of the β spectrum of tritium. Since the half-life of ^{83m}Kr is only 1.83 h, it is not suitable for long-term monitoring. Researchers from DLNP, JINR proposed to use a solid source of the parent isotope ^{83}Rb with a half-life $T_{1/2} = 86.2$ d which is longer than the planned duration of one measurement cycle (i.e., two months). Three electron spectrometers were employed to test the properties of the prepared ^{83}Rb sources, namely: 1) the ESA50 differential combined electrostatic spectrometer consisting of a retarding sphere followed by a double pass cylindrical mirror analyzer with an adjustable instrumental resolution operating in the electron energy range 0–50 keV (DLNP, JINR); 2) the ESA12 differential electrostatic spectrometer of the cylindrical mirror type with second-order focusing equipped with a decelerating lens (NPI, Řež); and 3) an integral electrostatic spectrometer with magnetic adiabatic collimation (Institute of Physics, University of

Mainz, Germany). First, ^{83}Rb sources prepared by evaporation in vacuum on different substrates [2] according to the method developed at DLNP, JINR were investigated. Altogether, 29 sources of ^{83}Rb were prepared, 16 on aluminum substrates (naturally oxidized foil), 12 on carbon substrates (polycrystalline foil), and one on HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) substrate. But only five of them were used for long-term measurements (from 2 to 6 months). In four cases, the sources were removed several times from the spectrometer, stored in air, and then placed in the spectrometer again. For all sources studied, the measured values of the energies of the selected conversion lines increased with time, and these changes could be described by a linear function. The drifts were within the interval $(2.3 \div 12) \cdot 10^{-6}$ per month, which is noticeably more than the above requirement $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ in two months, and were clearly caused by changes in the spectrometer work function (due to the changes in the composition of the residual gases in the spectrometer chamber) as well as by the dynamics of physicochemical processes in the surface layer of ^{83}Rb . To minimize the influence of some unfavourable factors, it was decided to place the $^{83}\text{Rb}/^{83m}\text{Kr}$ atoms in more stable surroundings by implantation of

проводились с пятью разными источниками. В четырех случаях источники в ходе измерений несколько раз извлекали из спектрометра, хранили на воздухе и потом опять помещали в спектрометр. Для всех изучаемых источников измеряемые значения энергий выбранных конверсионных линий со временем увеличивались, это изменение можно было описать с помощью линейной функции. Дрейф, находящийся в пределах $(2,3 \div 12) \cdot 10^{-6}$ в месяц, что заметно больше, чем вышеупомянутое требование $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ в два месяца, был явно вызван изменением работы выхода спектрометра под влиянием изменения состава остаточных газов в камере спектрометра, а также динамикой физико-химических процессов в поверхностном слое ^{83}Rb . Чтобы минимизировать влияние некоторых неблагоприятных факторов, было решено поместить атомы $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ в более стабильную среду имплантацией ионов ^{83}Rb при энергии 15 и 30 кэВ в поликристаллическую золотую и платиновую фольгу высокой чистоты. Всего было приготовлено четыре источника ^{83}Rb [3]. Из них три были с платиновой подложкой и один с золотой. Энергетические дрейфы наиболее часто измеряемой конверсионной линии K-32 в случае платиновой подложки находились в пределах от

$-(0,96 \pm 0,17) \cdot 10^{-6}$ до $(1,02 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$ в месяц, а для золотой подложки $-(2,64 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$ в месяц. Таким образом, источники $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ в платиновой матрице вполне удовлетворяли вышеупомянутому требованию к стабильности энергии реперных электронов для мониторинга. Разница в энергетических дрейфах между источниками с платиновой и золотой подложками может быть вызвана разными физико-химическими свойствами этих двух благородных металлов, в особенности более быстрым восстановлением кристаллической решетки платины после ионной имплантации. В дальнейшем желательно исследовать также возможность замены платиновой подложки на подложку из материала с низким атомным номером для существенного уменьшения вероятности неупругого рассеяния реперных электронов в материале подложки при сохранении энергетического дрейфа, а также выяснить причину наблюдаемой «тонкой структуры» линий реперных электронов. Этими вопросами будет заниматься в первую очередь группа сотрудников ЛЯП ОИЯИ.

Список литературы / References

1. *Angrik J., Armbrust T. et al.* KATRIN Design Report 2004 // FZKA Scientific Report 7090, Karlsruhe. <http://www-ik.fzk.de/katrin/publications/index.html>.
2. Венос Д., Зборжил М., Кашпар Й., Драгоун О., Бонн Й., Ковалик А., Лебеда О., Лебедев Н.А., Рышавы М., Шлоессер К., Шпалек А., Вайнхаймер Х. // Измерительная техника. 2010. №3. С.41.
Vénos D., Zbořil M., Kašpar J., Dragoun O., Bonn J., Kovalik A., Lebeda O., Lebedev N.A., Ryšavy M., Schlösser K., Špalek A., Weinheimer Ch. // *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2010. No. 3. P.41.
3. *Zbořil M., Bauer S., Beck M., Bonn J., Dragoun O., Jakūbek J., Johnston K., Kovalik A., Otten E.W., Schlösser K., Slezák M., Špalek A., Thümmel T., Vénos D., Žemlička J., Weinheimer Ch.* // *JINST*. 2013. V.8, No.3. P.P03009. DOI: 10.1088/1748-0221/8/03/P03009.

^{83}Rb ions at 15 and 30 keV energy into the high-purity polycrystalline gold and platinum foils. As a whole, four ^{83}Rb sources were prepared [3], three of them in platinum and one in gold. The energy drifts of the most frequently measured K-32 conversion line in the case of the platinum substrate were within the range of $-(0.96 \pm 0.17) \cdot 10^{-6}$ to $(1.02 \pm 0.16) \cdot 10^{-6}$ /month and $(2.64 \pm 0.16) \cdot 10^{-6}$ /month for the gold substrate. Thus, the $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ sources in the platinum matrix quite satisfied the above requirement for the time stability of the energy of the reference electrons for monitoring. The difference in energy drifts between the platinum and gold substrates can be caused by the different physicochemical properties of these two noble metals, in particular, by the faster recovery of the platinum crystal lattice after the ion implantation. In the future, it is also desirable to investigate a possibility of replacing the platinum substrate by a substrate of a material with a low atomic number in order to substantially reduce the probability of inelastic scattering of reference electrons in the substrate material (while preserving the small energy drift) and to find out the cause of the observed “fine structure” of some reference electron lines. These tasks will be primarily investigated by researchers from DLNP.