539.16

Разработка сверхстабильного репера для мониторинга энергетической шкалы спектрометров электронов в области энергий до 20 кэВ

Д. ВЕНОС*, М. ЗБОРЖИЛ**, Й. КАШПАР*, О. ДРАГОУН*, Й. БОНН***, А. КОВАЛИК*****, О. ЛЕБЕДА*, Н. А. ЛЕБЕДЕВ*****, М. РЫШАВЫ*, К. ШЛЕССЕР****, А. ШПАЛЕК*, Х. ВАЙНХАЙМЕР**

** Институт ядерной физики Академии Наук Чешской Республики, Ржеж под Прагой, Чешская Республика*
*** Институт ядерной физики, Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия*
**** Институт физики, Университет Майнца, Майнц, Германия*
***** Институт технологии, Карлсруэ, Германия*
****** Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия, e-mail: kovalik@jinr.ru*

При помощи двух разных спектрометров исследована долговременная стабильность энергий конверсионных электронов 7,5 и 17,8 кэВ ядерных переходов соответственно 9,4 и 32 кэВ в ^{83m}Kr, эмитированных твердотельными источниками ^{83}Rb / ^{83m}Kr, приготовленными испарением в вакууме. Полученные результаты указывают на принципиальную применимость указанных источников ^{83}Rb для мониторинга стабильности энергетической шкалы электронных спектрометров в области 20 кэВ на уровне ± 60 мэВ в течение, по крайней мере, 2 месяцев, что соответствует требованию нового нейтринного тритиевого проекта KATRIN. Исследования продолжаются с использованием источников, приготовленных имплантацией ионов ^{83}Rb в различные подложки.

Ключевые слова: *энергия ядерного перехода, конверсионные электроны, электронный спектрометр, масса нейтрино.*

The long term energy stability of 7,5 keV and 17,8 keV conversion electrons populated in the decay of solid ^{83}Rb / ^{83m}Kr vacuum evaporated sources was examined by means of two different electron spectrometers. The obtained results indicate the principal applicability of such sources for monitoring of stability for the energy scale around 20 keV at the level of ± 60 meV during at least 2 months, which fits with the requirement of the new tritium neutrino project KATRIN. The investigations continue with application of sources produced by implantation of ^{83}Rb ions into different substrates.

Key words: *nuclear transition energy, conversion electrons, electron spectrometer, neutrino mass.*

Решение проблемы массы покоя нейтрино в настоящее время относится к важнейшим задачам современной физики частиц и космологии. Принятое значение 2 эВ/с^2 [1] для верхнего предела эффективной массы покоя электронного антинейтрино основано на экспериментальных данных 2,3 эВ/с^2 [2] и 2,1 эВ/с^2 [3], полученных из анализа формы β-спектра трития в области его граничной энергии.

Цель нового проекта KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) [4], который основывается на накопленном опыте более ранних проектов [2, 3], — повышение чувствительности к эффективной массе покоя электронного антинейтрино до 0,2 эВ/с^2 (с 90 %-м доверительным интервалом) в течение трех лет набора статистики. При этом одним из важнейших требований является стабильность тормозящего напряжения –18,6 кВ в спектрометре KATRIN, которое позволяет проводить анализ β-спектра трития близко к его граничной энергии. Расчеты показали, что нестабильность этого напряжения в пределах ± 60 мВ может вносить систематическую погрешность 0,007 эВ^2/с^4 в значение квадрата массы нейтрино, получаемое из измеренного спектра. Такая погрешность представляет значительный вклад в максимальную допустимую систематическую погрешность 0,017 эВ^2/с^4 при ожидаемой чувствительности 0,2 эВ/с^2 [4, 5]. Долгосрочный мониторинг стабильности напряжения –18,6 кВ в пределах отклонения ± 60 мВ (т. е. с погрешностью ± 3 · 10^{-6}) в течение двух месяцев (планируемая длительность одного сеанса измерений) — достаточно сложная задача для современной техники. Поэтому стабильность этого напряжения будет проверяться одновременно двумя независимыми способами: с помощью высокоточного вольтметра в сочетании со специальным делителем высокого напряжения [6] и мониторингом положения стабильной во времени линии моноэнергетических электронов естественного источника в специальном мониторирующем спектрометре (такого же типа, как и спектрометр KATRIN), который будет подключен к общему источнику напряжения –18,6 кВ. В этом случае любое изменение положения реперной линии будет свидетельствовать о нестабильности в общей системе тормозящего напряжения.

В предыдущих экспериментах [2, 3, 7] для энергетической калибровки спектрометров использовалась узкая линия (естественная ширина 2,70 ± 0,06 эВ [8]) конверсионных *K* электронов ядерного γ-перехода 32 кэВ в ^{83m}Kr с энергией 17824,3 ± 0,5 эВ [9]. Эту линию удобнее, чем другие, использовать и в мониторирующем спектрометре KATRIN. В [2] применяли вымороженный на углеродную подложку ^{83m}Kr, а в

журнал измерительная техника копировал SYPH3R
москва, ипк издательство стандартов год, номер:

[3, 7] — газообразный ^{83m}Kr. Поскольку период полураспада ^{83m}Kr невелик ($T_{1/2}$ = 1,83 ч), он не очень подходит для долговременного мониторинга. Кроме того, оба упомянутых выше метода требуют применения сложного оборудования.

Более подходящим для мониторинга является твердотельный источник материнского изотопа ^{83}Rb с периодом полураспада $T_{1/2}$ = 86,2 сут. Результаты измерений спектров *K*- и *L*-электронов Оже криптона, а также конверсионных *K*-, *L*-, *M*-, *N*- электронов γ-переходов 32 и 9,4 кэВ в ^{83m}Kr из распада твердотельного источника ^{83}Rb были приведены в [10,11]. Источник был изготовлен испарением в вакууме на алюминиевую подложку. В [12] указан результат исследования положения конверсионной *K*-линии γ-перехода 32 кэВ (*K*-32) в течение нескольких месяцев с погрешностью ± 1,1 эВ, что не отвечает требуемой стабильности в проекте KATRIN. В связи с этим необходимо напомнить, что до сих пор в ядерной электронной спектроскопии не существует коммерческих твердотельных энергетических реперов конверсионных электронов или электронов Оже, имеющих погрешность менее 0,1 эВ. Кинетические энергии этих электронов зависят непосредственно от энергий их связи в атоме. В твердотельных источниках энергии связи электронов чувствительны к физико-химическому окружению радиоактивных атомов, что приводит к энергетическим сдвигам в спектрах как конверсионных электронов, так и электронов Оже. Такой же эффект наблюдается и в фотоэлектронных спектрах стабильных атомов. Этот энергетический сдвиг, который принято называть химическим, достигает ± 7 эВ и сильно коррелирован с валентным состоянием излучающего атома [13—15]. Известно также, что энергии связи электронов в твердых телах, как правило, на 2—10 эВ [16, 17], а для атомов, адсорбированных на поверхности твердых тел, на 1—3 эВ [18—20] меньше, чем для свободных атомов.

Ниже представлены первые результаты по исследованию стабильности измеряемых энергий конверсионных линий ядерных γ-переходов 9,4 и 32 кэВ в ^{83m}Kr из распада ^{83}Rb с погрешностью менее 0,1 эВ с применением твердотельных источников, приготовленных испарением в вакууме на разные подложки.

Спектрометры электронов. Для точного определения энергии линий конверсионных электронов с применением твердотельных источников необходимо, чтобы разрешающая способность прибора составляла несколько электрон-вольт. Это позволяет выделить в экспериментальном спектре пики электронов, покинувших источник без энергетических потерь, так называемые «пики без потерь». Собственная ширина такого пика определяется естественной шириной соответствующего атомного уровня и ядерного перехода. В исследованиях применялись спектрометры электронов двух различных типов: дифференциальный электростатический ESA12 [21, 22] типа цилиндрическое зеркало с фокусировкой второго порядка, оснащенный тормозящей (ускоряющей) линзой и канальным умножителем в качестве детектора электронов (ИЯФ АНЧР, Ржеж под Прагой), и интегральный спектрометр [23] типа «магнитный адиабатический коллиматор с электростатическим фильтром» — «MAC-E-Filter» (Институт физики, Университет Майнца, Германия). Первый из спектрометров работает в диапазоне 0—20 кэВ с относительным приборным разрешением $\Delta E/E_e$ = 0,011 в «основной» моде и абсолютным разрешением ΔE = 1 и 3 эВ для энергий электронов 2 и 7 кэВ, соответственно, в моде торможения электронов (пониженная трансмиссия). Второй из спектрометров работает в энергетическом диапазоне 7—35 кэВ с предельным значением $\Delta E/E_e = 5 \cdot 10^{-5}$. Вакуум в рабочем объеме спектрометра ESA12 достигает $5 \cdot 10^{-8}$ мбар (5 мкПа), что на два порядка ниже, чем в спектрометре Университета Майнца. Предельный вакуум во втором спектрометре определяется возможностью нагрева стенок его вакуумной камеры до температуры несколько сотен градусов. Следует заметить, что после небольшой реконструкции спектрометр Университета Майнца будет работать в качестве мониторирующего спектрометра в проекте KATRIN.

Приготовление радиоактивных источников ^{83}Rb методом испарения в вакууме. Качество радиоактивного источника можно определять отношением его толщины к длине свободного пробега для неупругого рассеяния электронов. Чем больше это отношение, тем меньше вероятность того, что электрон покинет источник без потерь энергии. В результате уменьшается интенсивность упомянутого выше «пика без потерь», образование которого необходимо для точного определения энергии электронов из аппаратурного спектра. В этом кроется причина столь пристального внимания к приготовлению радиоактивных источников в прецизионной ядерной спектроскопии низкоэнергетических электронов. Для приготовления тонких радиоактивных источников пригоден метод испарения в вакууме на подходящую подложку. Он успешно применяется в низкоэнергетической (E_e < 20 кэВ) ядерной электронной спектроскопии в течение последних двух-трех десятилетий (см., например [24]).

Радионуклид ^{83}Rb получали в реакции Kr(*p*, *xn*)^{83}Rb при облучении природного криптона протонами с первичной энергией 27 МэВ на циклотроне U-120M (ИЯФ АНЧР). Активность ^{83}Rb достигала примерно 100 МБк, а эффективность его выделения из мишени в водный раствор составляла около 90 % [25]. Раствор рубидия концентрировали высушиванием под инфракрасной лампой в кварцевом стакане. Твердый остаток растворяли в 0,1 М HNO_3 (0,5—1,5 мл). Полученный раствор рубидия вносили в хроматографическую колонку длиной 70 и диаметром 1,5 мм. После этого колонку промывали порциями по 0,5 см^3 растворов HNO_3 с концентрациями 0,3; 0,5 и 1,0 М. Рубидий с колонки элюировали раствором 2,0 М HNO_3 объемом 0,5 см^3. Приготовленный таким способом финальный раствор рубидия выпаривали досуха, растворяли в дистиллированной воде и наносили на лодочку вакуумного испарителя.

Для изготовления источников ^{83}Rb методом испарения в ИЯФ АНЧР применяли коммерческую аппаратуру MED 020 фирмы BAL-TEC Лихтенштейн, оснащенную безмасляной вакуумной системой, которая позволяет достичь вакуума $3 \cdot 10^{-6}$ мбар в объеме испарительной камеры. Установку использовали только для испарения ^{83}Rb. В большинстве случаев применяли лодочки из тантала, но тестировали также лодочки из молибдена и вольфрама. Лодочки нагревали пропусканием электрического тока. Для выбора оптимального режима испарения была измерена зависимость количества вещества, полученного при испарении, от температуры лодочки. Было обнаружено, что до температуры лодочки 300 °С рубидий не улетучивается. При температуре 600 °С на лодочке оставалось всего несколько процентов от первоначального количества ^{83}Rb. При приготовлении источников для измерений электронных спектров лодочку с нанесенным на нее ^{83}Rb первоначально прогревали при температуре 200 °С в течение 5—10 мин, чтобы избавиться от возможных мешающих примесей. При этом подложка источни-

ка была защищена металлическим экраном. Завершив прогрев, экран отодвигали в сторону, и испарение рубидия проводили при температуре 800 °С в течение 30—60 с через маску диаметром 8 мм, которая вплотную накрывала подложку. После испарения подложку с ^{83}Rb закрепляли в специальном медном держателе, заранее покрытом золотом, чтобы обеспечить надежный электрический контакт.

Кроме толщины, качество приготовленных источников ^{83}Rb / ^{83m}Kr оценивали и по доле удерживания ^{83m}Kr в источнике. В отличие от ядерного γ-перехода 32,2 кэВ, который осуществляется только при распаде изомерного состояния ^{83m}Kr [26], переход 9,4 кэВ генерируется тремя путями: прямо из распада ^{83}Rb на ядерный уровень 9,4 кэВ ^{83}Kr; из распада ^{83}Rb на ядерные уровни ^{83}Kr выше 9,4 кэВ; из изомерного состояния через переход 32,2 кэВ. Следовательно, для определения доли удерживания ^{83m}Kr в источнике небходимо было измерить отношение интенсивностей, испускаемых в распаде ^{83}Rb γ-квантов с энергиями 32,2 и 9,4 кэВ.

В ходе исследований изменяли основные факторы, влияющие на свойства источника, а именно: состав и активность исходного ^{83}Rb для выпаривания (в одном случае добавлялась примесь стабильного рубидия), материал подложки источника; расстояние от лодочки до подложки источника. Целью этого было достижение: повторяемости значений энергии конверсионных линий, измеренных с разными источниками ^{83}Rb; достаточно большой активности ^{83}Rb/^{83m}Kr в источниках; значительной доли удерживания ^{83m}Kr в источнике; весьма высокой интенсивности «пика без потерь».

Расстояние между лодочкой и подложкой источника меняли в пределах 2,5—15 мм. В качестве подложки источника использовали окисленную естественным путем алюминиевую фольгу толщиной 50 мкм или углеродную пластинку толщиной 0,2 мм (фольга) и 1 мм (высокоориентированный пиролитический графит — HOPG). Всего было приготовлено 29 источников ^{83}Rb, из них 16 на алюминиевой подложке, 12 — на углеродной и один на подложке из HOPG. Активность ^{83}Rb в приготовленных источниках находилась в пределах 0,4—12,0 МБк, что соответствовало расчетной толщине от 0,02 до 0,5 монослоя ^{83}Rb. Измерения показали, что распределение активности по поверхности источника обладает аксиальной симметрией с плоским максимумом в центре источника [27]. Оптимальное расстояние лодочка — подложка оказалось равным 5 мм. При этом была достигнута достаточно высокая эффективность испарения 25—30 %. Доля удерживания ^{83m}Kr в источнике составляла 15—20 %. При более близком расстоянии эффективность и доля удерживания росла, но интенсивность «пика без потерь» заметно падала. Материал и параметры упомянутых подложек не оказывали существенного влияния на качество источников.

Надо отметить, что даже когда, казалось бы, процедуры приготовления источников были идентичными, в частности, одни и те же исходные активности ^{83}Rb в лодочке, источников с одинаковыми свойствами не получалось: отличались структуры измеренных спектров конверсионных электронов. Этот факт подтверждает чрезвычайную сложность поставленной задачи. Очевидно, свойства источника ^{83}Rb очень чувствительны к процедуре приготовления, а ее полного контроля достичь не удалось.

Измерения на электростатическом спектрометре ESA12. Исследования временной стабильности энергий конверсионных электронов, возникающих в распаде ^{83}Rb, требуют непрерывных измерений электронных спектров в течение

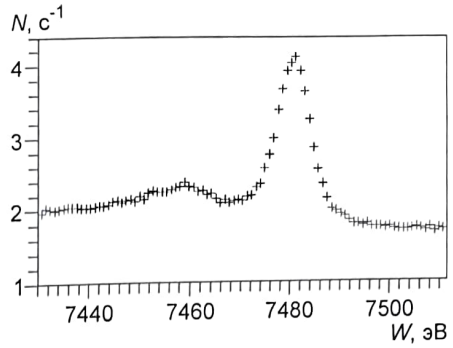

Рис. 1. Конверсионная линия L_1-9,4 из распада ^{83}Rb, измеренная на дифференциальном электростатическом спектрометре ESA12 с приборным разрешением 3 эВ и шагом 0,5 эВ (источник изготовлен на алюминиевой подложке)

многих недель. Их начали на электростатическом спектрометре ESA12 в ИЯФ АНЧР. Так как этот спектрометр не позволяет измерить конверсионную линию *K*-32, для исследований была выбрана конверсионная L_1-линия ядерного γ-перехода 9,4 кэВ (L_1-9,4) с энергией 7,5 кэВ и естественной шириной 3,72 ± 0,19 эВ [8]. Требование проведения измерений с приборным разрешением в несколько электрон-вольт необходимо для выделения «пика без потерь» в конверсионной линии. Для получения статистической погрешности 30—10 мэВ в значении энергии указанной линии, измерения соответствующего спектра проводили в течение 3—10 сут в зависимости от интенсивности источника. На рис. 1 в качестве примера показана измеренная с приборным разрешением 3 эВ и шагом 0,5 эВ конверсионная линия L_1-9,4 с источником на алюминиевой подложке. Слева от интенсивного «пика без потерь» виден слабовыраженный широкий пик электронов, претерпевших неупругое рассеяние в источнике, — «пик характеристических энергетических потерь». На него накладывается также спектр электронов, которые потеряли энергию в процессах встряски [14]. В связи с этим стоит заметить, что в случае проведения измерений с приборным разрешением в десятки электрон-вольт и (или) с использованием источника с большой эффективной толщиной, два упомянутых выше компонента спектральной линии «сольются» в один либо «пик без потерь» будет сильно подавлен, и это исключит точное определение энергии спектральной линии.

Долгосрочные измерения от 2 до 6 мес проводили с пятью разными источниками. В четырех случаях источники в ходе измерений несколько раз извлекали из спектрометра,

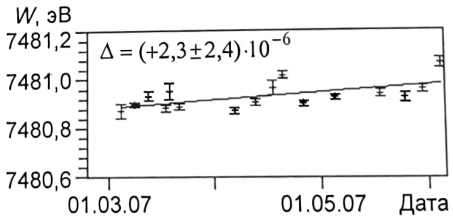

Рис. 2. Поведение энергии конверсионной линии L_1-9,4 во времени (условия измерений те же, см. рис. 1). Показаны статистические погрешности значений энергии. Сплошная линия — линейная аппроксимация. Значение дрейфа энергии за месяц Δ скорректировано на сдвиги делителя и вольтметра

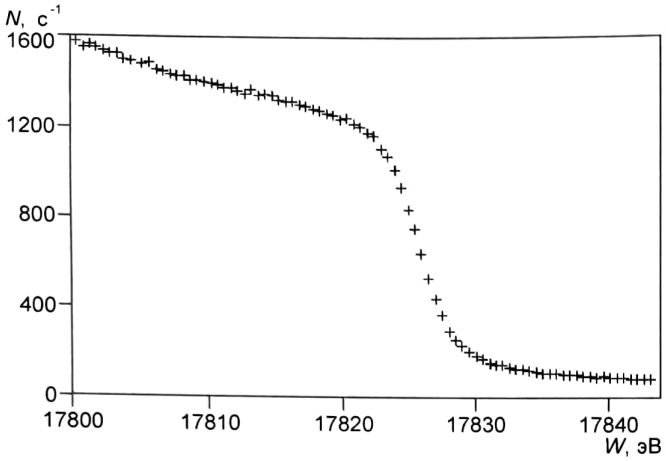

Рис. 3. Конверсионная линия *K*-32, измеренная на интегральном спектрометре «MAC-E-Filter» (Майнц) с приборным разрешением 0,9 эВ (источник ^{83}Rb № 28)

хранили на воздухе и потом опять помещали в спектрометр. В измерениях применяли два разных точных делителя высокого напряжения [28], которые в сочетании с высокоточными вольтметрами 8508A фирмы Fluke позволяли определять напряжение с относительной погрешностью 10^{-6}.

На рис. 2 в качестве примера показано поведение измеренных значений энергии конверсионной линии L_1-9,4 во времени для источника ^{83}Rb на алюминиевой подложке. Первоначальная активность источника составляла 6,6 МБк, а доля удерживания ^{83m}Kr в источнике была равна 12 %. Источник находился непрерывно в вакуумной камере спектрометра с остаточным давлением порядка 10^{-8} мбар.

Для всех изучаемых источников измеряемое значение энергии конверсионной линии L_1-9,4 со временем увеличивалось (наподобие зависимости, приведенной на рис. 2), и это изменение можно было описать с помощью линейной функции. После учета поправок на сдвиги коэффициентов деления двух указанных делителей высокого напряжения ((–2,4 ± 0,4) · 10^{-6} и (–4,0 ± 0,4) · 10^{-6} в месяц) и поправки на дрейф показаний вольтметра ((0,12 ± 0,04) · 10^{-6} в месяц) дрейф измеренных значений энергии конверсионной линии L_1-9,4 для исследованных источников ^{83}Rb находился в пределах (2,3—12) · 10^{-6} в месяц. Следует отметить, что энергия линии L_1-9,4, измеренная сразу после помещения источника ^{83}Rb в спектрометр, отличалась для разных источников. Это наблюдалось, когда применялись разные процедуры приготовления источников и когда эти процедуры, казалось, были вполне идентичными. Максимальная разница в значениях измеренных энергий конверсионной линии L_1-9,4 составляла 0,7 эВ.

Измерения на спектрометре «MAC-E-Filter». Для измерений в Майнце использовали два источника ^{83}Rb (рабочие обозначения № 28 и 29) на углеродной фольге. Первоначальная активность ^{83}Rb в источниках составляла 5,0 МБк (№ 28) и 4,9 МБк (№ 29), а доли удерживания ^{83m}Kr были 19 и 11 %, соответственно.

Через двое суток после помещения источника № 28 в спектрометр проводили измерения разных конверсионных линий в различных условиях в течение 80 сут. Высокая трансмиссия спектрометра и эффективность его детектора электронов позволили измерить нужный участок спектра конверсионной линии *K*-32 в течение 3 ч для достижения статистической погрешности в определении ее энергии на уровне 10 мэВ. Пример измеренного спектра конверсионной линии *K*-32 показан на рис. 3. Измерения были связаны с исследованием стабильности энергии линии *K*-32. На рис. 4 показано поведение полученных значений энергии *K*-32 за весь период измерения в течение 80 сут. Данные скорректированы с учетом дрейфа показаний вольтметра и коэффициента деления специального делителя высокого напряжения, составлявшие в относительных единицах (– 0,30 ± 0,05) · 10^{-6} и (0,6 ± 0,1) · 10^{-6} в месяц, соответственно. На 30-е сутки после начала измерений энергии всех исследуемых конверсионных линий скачкообразно увеличились на 0,9 эВ. Предположительно этот скачок мог быть вызван двумя явлениями — увеличением температуры делителя высокого напряжения в результате сбоя в системе его охлаждения или самопроизвольным отключением одного из двух блоков питания катушек компенсации земного магнитного поля. До сих пор истинную причину скачка энергий конверсионных линий так и не удалось установить. Детальный осмотр специального делителя после измерений показал, что первая причина была наиболее вероятна.

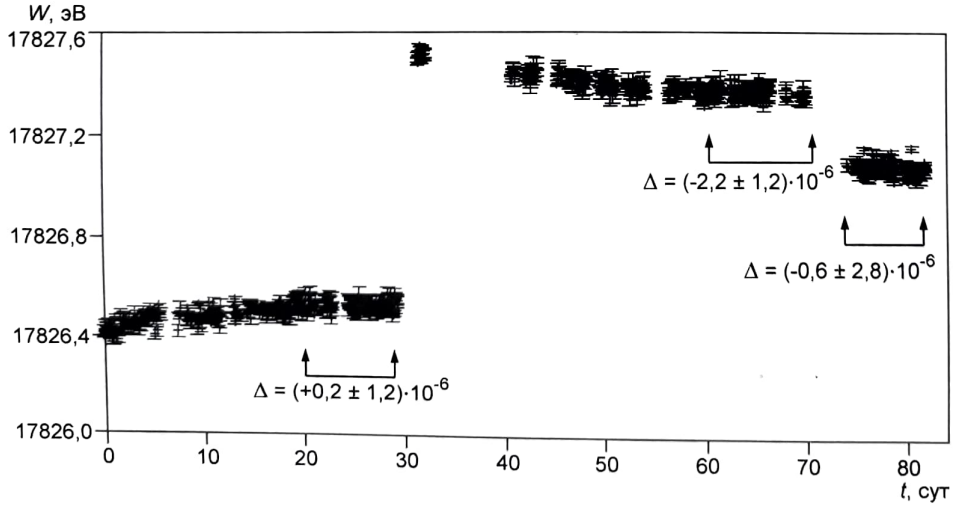

Рис. 4. Поведение энергии конверсионной линии *K*-32 источника № 28 во времени, исследованной на спектрометре в Майнце в течение 80 сут. Отмечены области с наиболее стабильной энергией и приведены скорректированные значения Δ дрейфа энергии в относительных единицах за месяц

Как следует из рис. 4, в начале измерений получаемые значения энергии конверсионной линии *K*-32 источника № 28 увеличивались и после некоторого времени достигали «насыщения». На 31-е сутки, когда технические неполадки были устранены, энергии конверсионных линий к исходным значениям не вернулись. В период 31—50 сут энергия линии *K*-32 плавно уменьшалась, а

с 60—70-х суток наступало состояние стабильности. Вероятно, плавные изменения энергии линии *K*-32 вызваны изменением работы выхода главного электрода спектрометра и (или) нестабильностью источника ^{83}Rb. По окончании 70 сут источник прогрели при температуре около 70 °С в течение 10 ч в отдельной части спектрометра без нарушения вакуума с целью стабилизации физико-химических свойств напыленного слоя ^{83}Rb. После прогрева энергии всех измеряемых конверсионных линий уменьшились на 25 мэВ. Чтобы скомпенсировать уменьшение интенсивности источника № 28 в результате радиоактивного распада ^{83}Rb, источник и детектор электронов спектрометра были сдвинуты навстречу друг другу, т. е. ближе к соответствующим магнитам проводящего магнитного поля спектрометра [23]. После этого регистрируемая детектором интенсивность линии *K*-32 увеличилась втрое, а ее измеренная энергия уменьшилась на 0,36 эВ (см. на рис. 4 период 72—75 сут). Факт изменения энергии свидетельствует о недостаточно точной юстировке положения источника ^{83}Rb и детектора электронов в спектрометре. Вопреки всем проблемам, которые сопровождали измерения источника ^{83}Rb № 28, в предположении линейности дрейфа энергии конверсионной линии *K*-32, значение, определенное в областях стабильного поведения (интервалы 20—30, 60—70 и 75—83 сут), удовлетворяет приведенному в начале статьи требованию стабильности энергии конверсионной линии *K*-32 в пределах $\pm 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ в течение одного месяца.

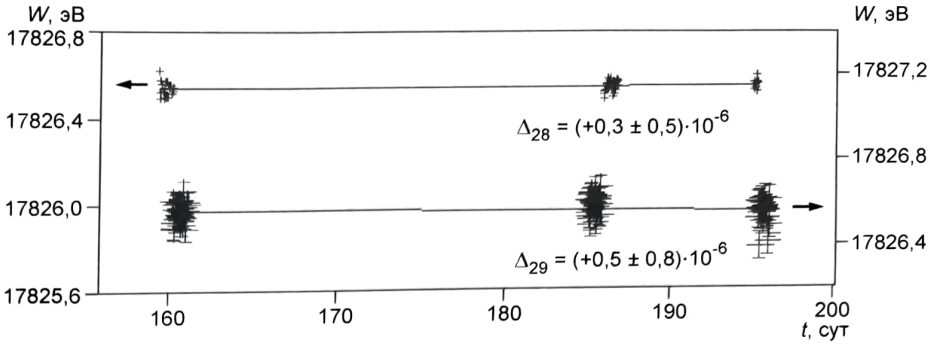

Рис. 5. Поведение энергии конверсионной линии *K*-32, измеренной на спектрометре в Майнце с двумя источниками ^{83}Rb — № 28 и 29 в период 159—196 сут от начала измерения источника № 28. Линейный ход зависимости энергии от времени показан сплошными линиями, приведены скорректированные значения Δ дрейфа энергии в относительных единицах за месяц

По истечении 84 сут измерений к источнику № 28 в спектрометр был добавлен источник № 29 таким образом, чтобы с помощью специального держателя извне (без нарушения вакуума в спектрометре) можно было установить в рабочее положение один из двух источников. При этом на нерабочий источник подавали запирающее напряжение +100 В с целью сдвинуть спектр испускаемых им конверсионных электронов в область низкоэнергетического «хвоста» конверсионной линии измеряемого источника, который находился под нулевым потенциалом. На рис. 5 приведены значения энергии линии *K*-32 источников № 28 и 29 в период 159—196 сут измерений, когда спектрометр находился в стабильном состоянии. Не было никаких проблем с вакуумом в камере спектрометра, и остаточное давление плавно уменьшалось с $4 \cdot 10^{-10}$ до $3 \cdot 10^{-10}$ мбар. Из линейной аппроксимации поведения значений энергии линии *K*-32 за указанный период получили скорректированные с учетом сдвигов коэффициентов деления и показаний вольтметра значения ее дрейфа за месяц $(0{,}3 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-6}$ и $(0{,}5 \pm 0{,}8) \cdot 10^{-6}$, соответственно для источников № 28 и 29. Оба результата находятся в пределах требуемой для проекта KATRIN относительной нестабильности $\pm 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ за месяц.

Заключение. Представлены результаты исследования стабильности во времени значений энергий конверсионных линий L_1-9,4 и *K*-32 из распада ^{83}Rb с помощью принципиально различных спектрометров электронов в ИЯФ АНЧР и Университете в Майнце, соответственно. Для измерений использовали твердотельные источники ^{83}Rb, приготовленные методом испарения в вакууме на разные подложки. Анализ данных, полученных в относительно стабильных условиях работы спектрометра в Майнце, указывает на принципиальную применимость источников ^{83}Rb, приготовленных методом вакуумного испарения, для мониторинга стабильности энергетической шкалы спектрометра электронов, используемого в проекте KATRIN с требуемой погрешностью ± 60 мэВ (т. е. с относительной погрешностью $\pm 3 \cdot 10^{-6}$) в течение 2 мес. Из исследований также следует, что для надежного мониторинга стабильности энергетической шкалы электронного спектрометра проекта KATRIN необходимо в течение измерений обеспечить неизменность работы выхода мониторирующего спектрометра. Нестабильность работы выхода в основном обусловлена составом остаточных газов в камере спектрометра. Этот факт подтверждается тем, что дрейф линии L_1-9,4, полученный на спектрометре в Ржеже, в среднем на порядок больше дрейфа, полученного в Майнце. Исследования продолжаются с использованием источников, приготовленных методом имплантации ионов ^{83}Rb в разные подложки.

Работа выполнена при содействии Чешской Академии Наук (контракт № ASCR IRP AV0Z10480505), поддержке Грантового агенства ЧР (контракт № 202/06/0002) и Министерства образования ЧР (контракты № LA318 и LC07050), а также финансовой поддержки германского агентства DFG и BMBF (Университеты Майнца и Мюнстера).

Литература

1. **Yao W. M. e. a.** Review of particle Physics // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2006. V. 33. P. 1: http://www. pdg.lbl.gov

2. **Kraus Ch. e. a.** Final result from phase II of the Mainz neutrino mass search in tritium β decay // Phys. J. 2005. V. C40. P. 447.

3. **Lobashev V. M.** The search for the neutrino by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN // Nucl. Phys. 2003. V. A719. P. 153.

4. **Angrik J. e. a.** KATRIN Design Report 2004 // Report NPI ASCR Řež EXP-01/2005 or FZKA Scientific Report 7090, Karlsruhe, http://www-ik.fzk.de/~katrin/publications/index.html

5. **Kašpar J. e. a.** Effect of energy scale imperfection on results of neutrino mass measurements from β-decay // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2004. V. A527. P. 423.

6. **Thümmler T. e. a.** Precision high voltage divider for the KATRIN experiment // New J. Phys. 2009. V. 11. P. 103007.

7. **Robertson R.G.H. e. a.** Limit on ν_e mass from observation of the β decay of molecular tritium // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 957.

8. **Ostrick B.** Eine kondensierte ^{83m}Kr-Kalibrationsquelle fur das KATRIN-experiment // PhD thesis. Münster university, 2008.

9. **Vénos D. e. a.** Precise energy of the weak 32-keV gamma transition observed in ^{83m}Kr decay // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2006. V. A560. P. 352.

10. **Kovalík A. e. a.** The K and LMX Auger spectra of krypton from the ^{83}Rb decay // J. Elec. Spec. Rel. Phen. 1992. V. 58. P. 49.

11. **Kovalík A., Gorozhankin V. M.** A conversion-electron investigation of the 9.4 keV M1+E2 transition in ^{83}Kr // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1993. V. 19. P. 1921.

12. **Kovalík A.** Neutrino Masses in the sub-eV Range // Intern. Workshop on Massive Neutrinos in sub-eV Region. Bad Liebenzell, Germany, Jan. 18—21, 2001: http://www-ik.fzk.de/~katrin/publication/index.html#liebenzell

13. **Siegbahn K. e. a.** ESCA applied to free molecules. North-Holland — Amsterdam — London, 1969.

14. **Siegbahn K. e. a.** ESCA atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy // Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsaliensis. 1967. V. 20.

15. **Surface** analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy / Eds. D. Bliggs, J. T. Grant. Chichester (UK): IM Publ. and Surface Spectra Ltd., 2003.

16. **Shirley D. A. e. a.** Core-Electron binding energies of the first thirty elements // Phys. Rev. 1977. V. 15B. P.544.

17. **Weightman P.** X-ray-excited Auger and photoelectron spectroscopy // Rep. Prog. Phys. 1982. V. 45. P. 753.

18. **Houston J. E., Park R. L., Laramore G. E.** Direct Comparison of Core-Electron Binding Energies of Surface and Bulk Atoms of Ti, Cr, and Ni // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. P. 846.

19. **Mandel T. e. a.** Core-level binding energies and Auger electron energies in epitaxial rare-gas layers on graphite (001) // Surface Sci. 1985. V. 162. P. 453.

20. **Kaindl G. e. a.** Distance-Dependent Relaxation Shifts of Photoemission and Auger Energies for Xe on Pd(001) // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 1808.

21. **Varga D. e. a.** Electrostatic spectrometer for measurement of internal conversion electrons in the 0.1—20 keV region // Nucl. Instr. Meth. 1982. V. 192. P. 277.

22. **Dragoun O.** An improved method for the measurement of the fine effects in electron spectra // Nucl. Instr. Meth. 1995. V. A365. P. 385.

23. **Picard A. e. a.** A solenoid retarding spectrometer with high resolution and transmission for keV electrons // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1992. V. B63. P. 345.

24. **Kovalik A. e. a.** The KLL and KLX Auger electrons of arsenic from the ^{75}Se decay // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1987. V. 43. P. 225.

25. **Vénos D. e. a.** ^{83m}Kr radioactive source based on ^{83}Rb trapped in cation-exchange paper or in zeolite // App. Rad. Isot. 2005. V. 63. P. 323.

26. **Firestone R. B. e. a.** // Table of isotopes. N.J.: Wiley, 1996, 1998 (update).

27. **Vénos D. e. a.** Distribution of the ^{83}Rb / ^{83m}Kr activity on vacuum evaporated samples examined with the Timepix position sensitive detector // Report NPI ASCR REZ, EXP-01/2007: http://www.arXiv.org/abs/0712.3860.

28. **Dragounová N.** Precision High-Voltage DC Dividers and Their Calibration // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 2005. V. 54. P. 1911.

Дата принятия 22.09.2009 г.