

УДК 53.082.79

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭНЕРГИИ РАСПАДА ИЗОМЕРА ТОРИЯ-229

© 2019 г. Ю. И. Гусев¹, Ф. Ф. Карпешин², Ю. Н. Новиков^{1,3}, А. В. Попов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова “Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева”, Санкт-Петербург, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: newfi@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 27.05.2019 г.

Для определения энергии электронов из распада изомера тория-229 предлагается инжектировать ионы в мультипольную радиочастотную ловушку, где они нейтрализуются в реакции перезарядки. Электрон конверсии испускается в течение нескольких микросекунд после нейтрализации. Для определения энергии электронов планируется использовать спектрометр торможения с магнитной коллимацией, сочлененный с ионной ловушкой. Обсуждается возможный дизайн спектрометра и результаты симуляции.

DOI: 10.1134/S0367676519090084

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к определению точного значения энергии низколежащего состояния тория-229 определяется возможностью его технического использования в качестве стандарта частоты [1]. Косвенная оценка энергии перехода из баланса схемы уровней, ранее предлагавшаяся в работе [2], подвергалась критике [3]. Более поздний анализ данных, проведенный в работе [4], не позволяет дать верхнее ограничение на значения энергии перехода меньше, чем 15 эВ. Распад низколежащего состояния тория-229 с эмиссией электронов внутренней конверсии наблюдался в работе [5]. В той же работе получены нижняя и верхняя границы для значения энергии изомерного состояния (6.3–18.3 эВ). Следует отметить, что предлагаемый в работах метод измерения энергии электронов конверсии [6–8] или фотоэлектронов, эмитируемых с поверхности твердого тела [9, 10], достаточно сложен для интерпретации и извлечения точного значения энергии. Это связано с неоднородностью значения работы выхода, наличием сложной структуры спектра электронов ниже уровня Ферми, сильной зависимостью спектра фотоэлектронов от качества подготовки поверхности.

Для проведения корректного сравнения калибровочных спектров фотоэлектронов от источника УФ излучения со спектром конверсионных электронов необходимо иметь одинаковое рас-

пределение по глубине и по поверхности источников фото- и конверсионных электронов. При этом возможен сдвиг ферми – ступеньки в спектре электронов из-за различного углового распределения фотоэлектронов и электронов конверсии. При регистрации фотонов изомерного перехода также необходимо соблюдать идентичную геометрию для измеряемых и калибровочных фотонов.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность измерения энергии электронов при нейтрализации иона “на лету”. Ионы изомера тория-229 инжектируются в мультипольную радиочастотную ловушку, термализуются и удерживаются в ней до момента нейтрализации. Нейтрализация происходит в реакции перезарядки с нейтральными атомами, добавленными к рабочей среде гелия. Электрон конверсии из нейтрального атома испускается в течение нескольких микросекунд после нейтрализации. С большой вероятностью в этот момент атом находится внутри ловушки. Электроны транспортируются из ловушки вдоль линий магнитного поля, параллельного оси ловушки. Для определения энергии электронов планируется использовать схему торможения электрическим полем с магнитной коллимацией (МАС-Е). Схожую схему, сочетающую мультипольную ловушку и МАС-Е спектрометр, применяли для спектроскопии электронов, образуемых в молекулярных процессах [11].

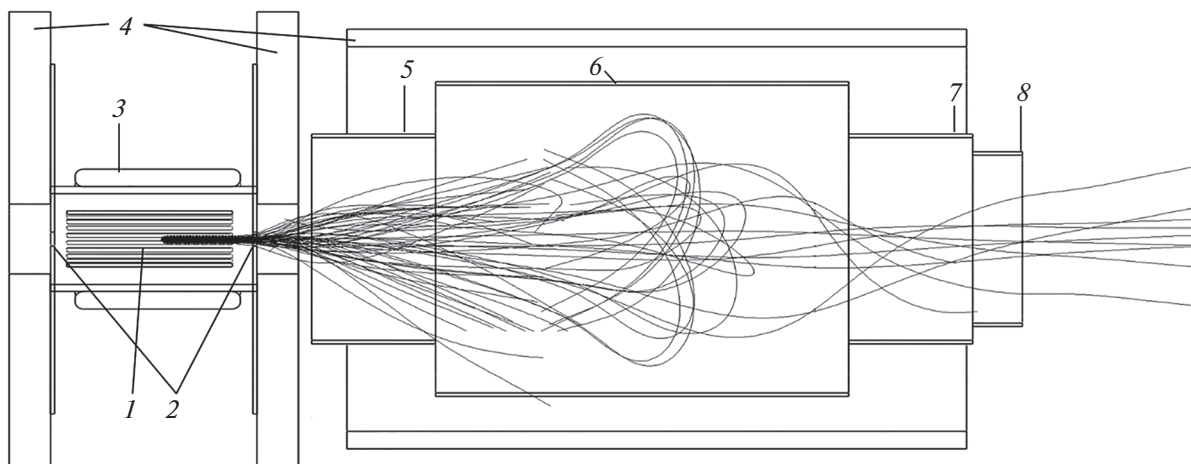


Рис. 1. Конструкция спектрометра электронов. 1 – газонаполненный мультиполь, 2 – входная и выходная апертура, 3 – соленоид, 4 – магнитные экраны (Fe), 5, 6, 7, 8 – электроды анализатора.

1. КОНСТРУКЦИЯ

Конструкция спектрометра представлена на рис. 1. Для симуляции использовали вариант мультипольной ловушки с 22 электродами. Мультиполь диаметром 15 мм и длиной 40 мм расположен внутри соленоида, создающего магнитное поле несколько сот гаусс. Для ограничения распространения поля по краям ловушки расположены магнитные экраны в виде дисков толщиной 10 мм. Дополнительный цилиндрический экран минимизирует значение магнитного поля в области анализирующих электродов спектрометра. Необходимость сочетания условий для торможения ионов в ловушке и требований транспортировки ионов и электронов вне мультиполя накладывает ограничение на газовые потоки и, как следствие, на входную и выходную апертуры ловушки.

2. ХРАНЕНИЕ И НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ИОНОВ В МУЛЬТИПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ

Инжектированные и термализованные ионы нейтрализуются при взаимодействии с примесными атомами, добавленными к гелию. Для симуляции работы ловушки, удерживающей ионы, использовалась модель взаимодействия с газом методом “твердых сфер” в программе SIMION [12]. Типичная траектория иона в ловушке показана на рис. 2. Ионы инжектируются в ловушку с энергией 1 эВ и теряют энергию в результате столкновений с атомами гелия, используемого в качестве рабочей среды. Время термализации составляет доли миллисекунды, что видно на рис. 3.

Удержание в ловушке осуществляется за счет эффективного потенциала, возникающего в радиочастотном поле в вязкой среде. Распределение

ионов по энергии и расстоянию от оси показано на рис. 4 и рис. 5, соответственно. Средняя энергия ионов в ловушке составила ~ 0.04 эВ, при этом среднее смещение атома за время между нейтрализацией иона и эмиссией электрона (10 мкс) будет около 2 мм. Для оценки распределения положения атомов в момент испускания электронов были использованы данные о положении иона в ловушке и его скорости. В предположении эргодичности использовались данные траектории одного

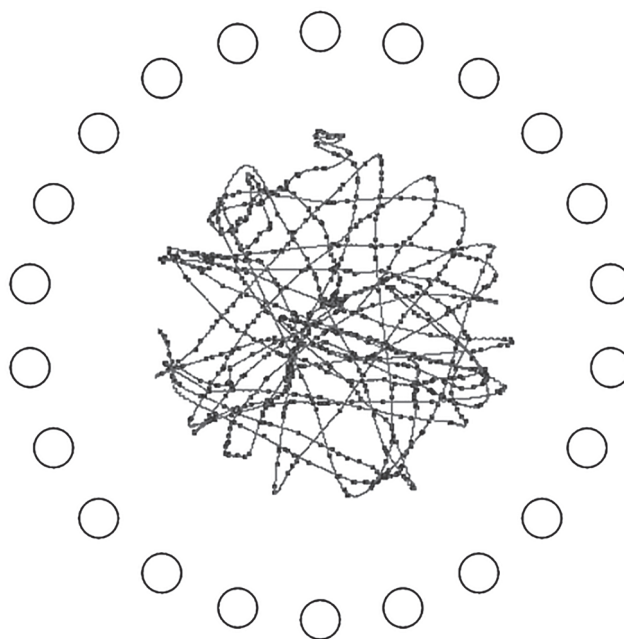


Рис. 2. Пример траектории иона в ловушке. Точками отмечены столкновения с охлаждающим газом (гелий, 0.5 Па).

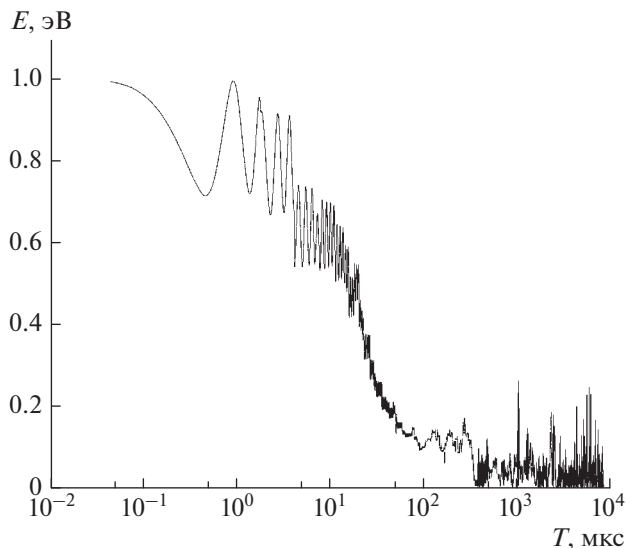


Рис. 3. Изменение во времени энергии иона, инжектированного в ловушку. Давление 0.5 Па, начальная энергия иона 1 эВ.

иона вместо оценки мгновенного положения множества ионов. После предполагаемой нейтрализации атом продолжает двигаться со скоростью иона. Эмиссия электрона производилась в случайный момент времени в соответствии с распределением по экспоненциальному закону с временной константой, соответствующей времени жизни изомера. Распределение атомов в момент эмиссии электрона показано заполненными символами на рис. 5. Видно, что до радиуса ~ 3 мм распределение положений старта электронов незначительно от-

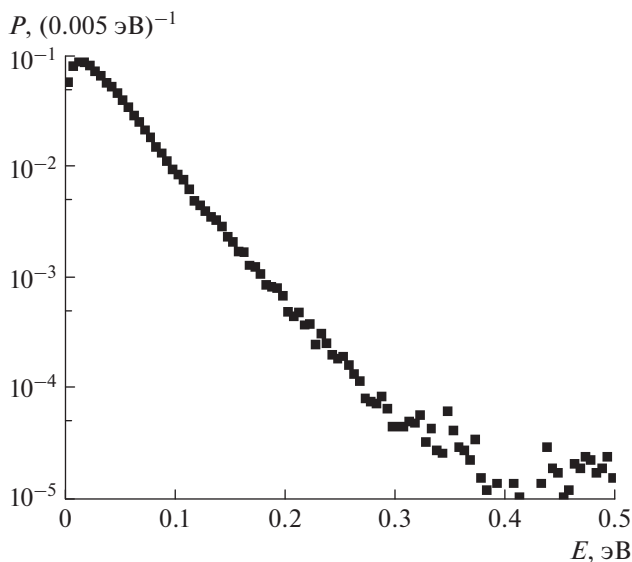


Рис. 4. Распределение ионов по энергии (средняя энергия 0.04 эВ).

личается от распределения удерживаемых ионов. При использовании апертуры спектрометра диаметром 6 мм данное распределение накладывает ограничение на эффективность $\sim 40\%$. При диаметре 3 мм соответствующая эффективность составит $\sim 10\%$. При использовании давления в ловушке 0.5 Па и достаточно производительных вакуумных насосов диаметр апертуры 3 мм представляется приемлемым.

3. СИМУЛЯЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СПЕКТРОМЕТРЕ

Траектории электронов рассчитывались с использованием пакета "SIMION" [12] в присутствии комбинации радиочастотного поля мультиполя, статических электрического и магнитного полей. Для расчета магнитного поля был использован код CST2017 [13]. Распределение магнитного поля вдоль оси показано на рис. 6. Пример траектории электронов в спектрометре приведен на рис. 1. Упругое рассеяние электронов на гелии также было включено в симуляцию. Следует отметить, что, несмотря на значимую вероятность рассеяния, это незначительно влияет на конечную энергию электрона в анализаторе в связи с большой разницей масс электрона и атома гелия и транспортирующим эффектом магнитного поля. Симуляция спектра, полученного для электронов с энергией 2 эВ, позволяет дать оценку ожидаемого разрешения системы ~ 0.15 эВ. Пример зависимости пропускания фильтра от потенциала анализирующего электрода (электрод б на рис. 1) и производной такой зависимости показаны на рис. 7. Потенци-

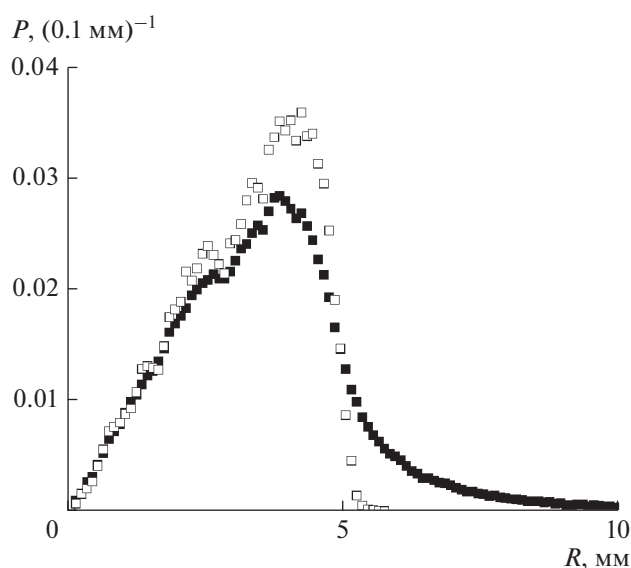


Рис. 5. Вероятность нахождения иона (светлые символы) и атома в момент эмиссии электрона (темные символы) на расстоянии R от оси мультиполя.

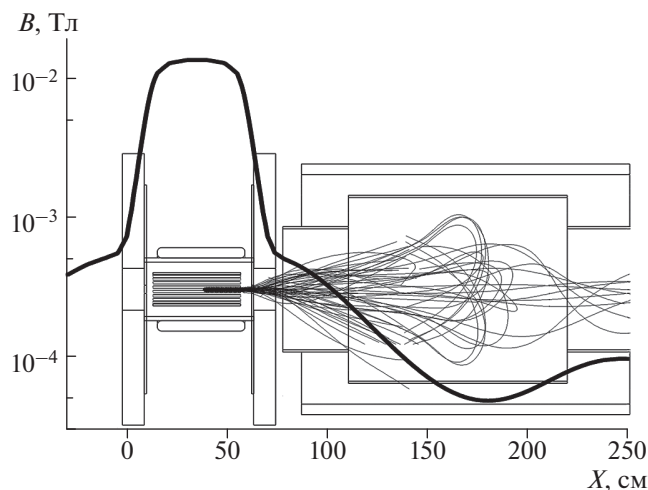


Рис. 6. Распределение магнитного поля вдоль оси. На вставке для сравнения показана конструкция спектрометра.

ал на электродах 5 и 7 был равен нулю, и +20 В на электроде 8.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Константа скорости нейтрализации в типичной зарядово-обменной реакции составляет $\sim 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [14]. При этом среднее время реакции может варьироваться в диапазоне от миллисекунд до секунд при изменении концентрации примеси кислорода от 10^{-1} до 10^{-4} . В процессе взаимодействия ионов тория с молекулами примесей помимо перезарядки возможен ряд процессов, в результате которых ионы тория могут и терять заряд с образованием молекул, и образовывать молекулы в ионизированном состоянии [14, 15]. Так, наиболее интенсивные линии соединений тория в спектре масс соответствуют ионам тория и оксидам тория [5, 16]. Энергия ионизации ThO составляет 6.6026(2) эВ [17], что на 0.3 эВ больше энергии ионизации Th. Соответственно для начальной оценки энергии изомера можно игнорировать образование оксида тория в ловушке. Для получения более точной оценки, по-видимому, можно будет варьировать концентрацию и природу примесных молекул. Следует учитывать, что энергия диссоциации молекулярных ионов относительно низка (см., например, [18]), что может открыть дополнительный канал разрядки изомера тория-229.

Отметим, что наше давление 0.5 Па = 0.005 мбар на порядок ниже, чем в установке [7] – 40 мбар. Это приведет к важному физическому следствию, которое поможет лучше понять механизм электронного моста. Дело в том, что время жизни ядерного изомера в случае девозбуждения через

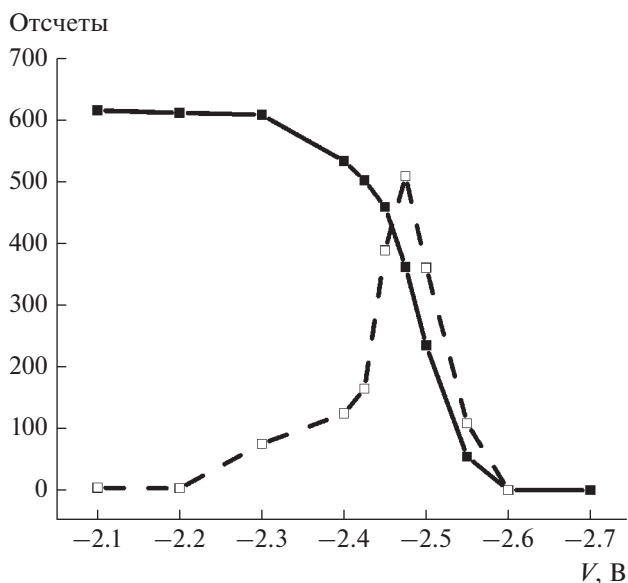


Рис. 7. Зависимость счёта электронов от потенциала анализирующего электрода 6 на рис. 1 (сплошная линия) и производной такой зависимости (пунктир).

обратную резонансную конверсию пропорционально ширине промежуточного атомного уровня. В свою очередь, ширина атомных уровней подвержена столкновительному уширению. При давлении $p = 45$ мбар уширение, согласно оценке [19], может увеличиваться в 10 раз. При нашем давлении $p = 0.5$ Па оно пренебрежимо мало. Поэтому сравнение результатов относительно времени жизни, полученных на разных установках, может экспериментально продемонстрировать зависимость времени жизни ядерного изомера от окружающих физических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели возможность измерения энергии электронов конверсионного распада первого возбужденного состояния тория-229. Метод использует регистрацию электронов конверсии, образуемых в результате нейтрализации ионов изомера тория-229, удерживаемых в радиочастотной мультипольной ловушке. Для измерения энергии электронов предлагается использовать метод торможения в электрическом поле спектрометра с магнитной коллимацией (MAC-E). Анализ результатов симуляции показывает возможность достижения разрешения 0.1 эВ при эффективности несколько процентов и, соответственно, точности определения энергии на уровне сотых долей эВ. Особенность этого метода – в хорошей обособленности атома в момент эмиссии электрона, что позволит с высокой точностью определить энергию изомерного состояния лишь на ос-

нове знания энергии электронов и энергии связи электрона в атоме. Совсем недавно были опубликованы результаты измерения спектра конверсионных электронов методом, схожим с описанным в статье, — с нейтрализацией ионов и эмиссией электронов “на лету” [20]. Полученное значение энергии изомерного состояния $8.28(17)$ эВ является первым прямым измерением и подтверждает правильность выбранной методики и направления исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peik E., Tamm Chr.* // Europhys. Lett. 2003. V. 61. P. 181.
2. *Beck B.R., Becker J.A., Beiersdorfer R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Art. № 142501.
3. *Sakharov S.L.* // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. P. 1.
4. *Kazakov G.A., Schumm T., Stellmer S.* // arXiv: 1702.00749v1. 2017.
5. *von der Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M. et al.* // Nature. 2016. V. 533. P. 47.
6. *Гусев Ю.И., Новиков Ю.Н., Попов А.В., Тихонов В.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 962; *Gusev Y.I., Novikov Y.N., Popov A.V., Tikhonov V.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. № 8. P. 875.
7. *Seiferle B., von der Wense L., Thirolf P.G.* // Eur. Phys. J. A. 2017. V. 53. P. 108.
8. *Stellmer S., Shigekawa Y., Rosecker V. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. Art. № 014317.
9. *von der Wense L., Thirolf P.G., Kalb D. et al.* // arXiv: 1211.0710v1. 2012.
10. *Borisyuk P.V., Chubunova E.V., Kolachevsky N.N. et al.* // arXiv:1804.00299v1. 2018.
11. *Jusko P., Roucka S., Plasil R. et al.* // Int. J. Mass Spectrom. 2013. V. 352. P. 19.
12. <http://simion.com/>.
13. <http://www.cst.com/>.
14. *Churchill L.R., DePalatis M.V., Chapman M.S.* // Phys. Rev. A. 2011. V. 83. Art. № 012710.
15. *Cox R.M., Citir M., Armentrout P.B. et al.* // J. Chem. Phys. 2016. V. 144. Art. № 184309.
16. *Sonnenschein V., Moore I.D., Raeder S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 52.
17. *Goncharov V., Heavens M.C.* // J. Chem. Phys. 2006. V. 124. Art. № 064312.
18. *Gibson J.K., Haire R.G., Marcalo J. et al.* // Eur. Phys. J. D. 2007. V. 45. P. 133.
19. *Karpeshin F.F., Trzhaskovskaya M.B.* // Nucl. Phys. A. 2018. V. 969. P. 173.
20. *Seiferle B., von der Wense L., Bilous P.B. et al.* // arXiv: 1905.06308v1.10. 2019.