

ЭЛЕКТРОННЫЙ КАТАЛОГ МЕЗОРЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. Д. Р. Зинатулина*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

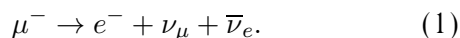
Поступила в редакцию 25.12.2018 г.; после доработки 11.01.2019 г.; принята к публикации 11.01.2019 г.

С помощью HPGe-детекторов с мишенями Mo и Ru были измерены энергетические спектры μX -излучения на мюонном пучке в Исследовательском центре ядерных проблем (RCNP, Осака, Япония). Результаты измерений добавлены в электронный атлас мезорентгеновских спектров излучения. Полученная информация необходима для идентификации γ -линий, калибровки детекторов и корректного выбора конструктивных материалов в экспериментах с отрицательными мюонами и в исследованиях состава вещества.

DOI: 10.1134/S0044002719030164

1. ВВЕДЕНИЕ

Мюон является одним из шести известных лептонов. По своим характеристикам [1] он аналогичен электрону, но отличается от него большей массой ($m_\mu = 105.67$ МэВ) и конечным временем жизни: с $\tau_{\mu d} = (2197.03 \pm 0.04)$ нс он распадается на электрон, имеющий энергию порядка 50 МэВ, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино:



Как и электрон, он имеет свою античастицу — μ^+ , живущую такое же время. Для исследования взаимодействия мюонов с веществом требуются мюонные пучки с достаточно большой интенсивностью и при этом малой энергией. Наиболее известной такой установкой является мезонная фабрика в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария) [2].

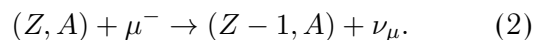
Попав в мишень, мюон тормозится в ней до полной остановки, после чего распадается. В отличие от положительного мюона, отрицательный мюон (далее мы будем говорить только о нем) активно взаимодействует с окружающим веществом, образуя так называемые мезоатомы [3, 4]. Мюон, остановившись возле любого из ядер мишени, последовательно опускается в $1s$ -состояние, испуская при этом каскад мезорентгеновских фотонов (μX). Принцип Паули этому процессу не препятствует, так как мюон — это не электрон, и для него все орбиты являются свободными. Поскольку масса мюона в 200 раз больше массы электрона, то радиусы орбит мюона в мезоатоме в 200 раз меньше, чем электрона в атоме, и, соответственно, энергия

переходов в 200 раз больше. Поэтому, в отличие от обычного рентгеновского излучения, энергия мезорентгеновского излучения составляет не десятки кэВ, а единицы МэВ. Образование и термализация мезоатома происходят за время порядка 10^{-13} с и с экспериментальной точки зрения являются мгновенным (Prompt). Следует отметить, что не все мезоатомы термализуются с испусканием μX ; некоторая часть испускает Оже-электроны, но их доля составляет менее процента и только для очень больших Z доходит до 1–2%.

Энергии уровней мезоатомов и переходов между ними индивидуальны для каждого химического элемента. Так, например, энергия $2p-1s$ -перехода в мезоатоме углерода равна 75.3 кэВ, селена — 1950 кэВ, кадмия — 3250 кэВ, а свинца — 5780 кэВ. Наблюдается тонкое и сверхтонкое расщепление уровней, а также их изотопические сдвиги.

Такие свойства мезорентгеновского излучения, как априори известные значение энергии и интенсивность (один каскад приходится на один остановившийся мюон), а также четкая привязка к моменту остановки мюона в мишени, позволяют использовать мезорентгеновские линии при анализе экспериментальных данных (идентификация линий, временная калибровка, нормировка интенсивности).

С мюоном, находящимся в $1s$ -состоянии, может произойти два альтернативных явления: либо он распадается с парциальным временем жизни $\tau_{\mu d} = 2197.03$ нс, либо посредством слабого взаимодействия захватывается ядром [5]:



*E-mail: d.zinatulina@gmail.com

В отличие от рентгеновского излучения, информация по энергиям мезорентгеновских переходов достаточно скудна. Поэтому мы попытались восполнить этот пробел. В течение многих лет нашей группой проводились исследования мюонного захвата на различных мишенях, в работах [6–10] подробно описаны методика, анализ и результаты этих экспериментов. В подобных измерениях специалисты зачастую сталкиваются с проблемой идентификации фона, который порожден не только естественным фоном, а также мезорентгеновским излучением от состава мишени и окружающего материала. Для выяснения влияния такой составляющей фона было проведено большое количество измерений энергетических спектров мезорентгеновского излучения с различными материалами и мишенями.

За период с 1992 по 2006 г. нами измерены спектры мезорентгеновского излучения более 75 химических элементов на мюонных пучках $\mu E1$ и $\mu E4$ в институте Пауля Шеррера в Швейцарии (PSI, Виллиген) [9]. Полученные результаты были обработаны и собраны в виде электронного атласа, который размещен на сайте ОИЯИ [11, 12]. Информация, находящаяся в этом атласе, постоянно пополняется. Последние измерения спектров мезорентгеновского излучения проводились нами на мюонном пучке в Исследовательском центре ядерных проблем (RCNP, Осака, Япония, 2018 г.) [13]. Целью настоящей работы является доработка интерактивного каталога мезорентгеновских спектров излучения (детальная идентификация γ -линий элементов с $Z = 76–90$), а также пополнение его результатами последних измерений (спектрами Ru и Mo).

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Идея эксперимента основана на точном измерении распределения времени и энергии γ -лучей после остановки мюона в веществе мишени. В тонких мишенях (около 0.5 г см^{-2}) были остановлены отрицательные мюоны с малым импульсом от мюонных пучков $\mu E4$ и $\mu E1$ в Швейцарии [9] (PSI, Виллиген), а также от мюонного пучка в Японии [13] (RCNP, Осака). В случае газовой мишени использовалась специальная конструкция, описанная в предыдущих работах [6, 9, 10]. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

Тонкие (0.5 мм) сцинтилляционные счетчики $C1$ и $C2$ регистрировали мюоны, которые останавливались в мишени, окруженной 3–4 (в зависимости от задач измерений и мишени) HPGe-детекторами: планарными и коаксиальными. В среднем объемы коаксиальных детекторов были 100 и 250 см^3 .

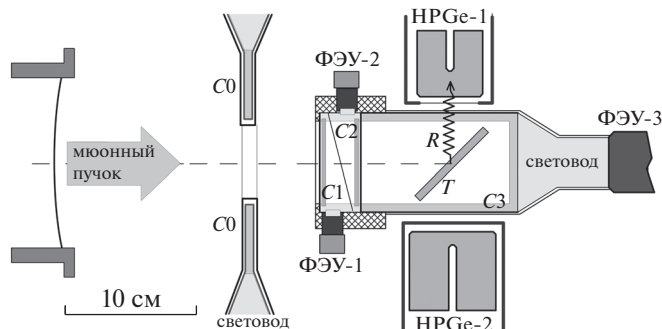


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. $C0$ — сцинтилляционные счетчики (серые прямоугольники) со световодами, $C1$ и $C2$ (тонкие прямоугольные серые полоски на рисунке) — сцинтилляционные счетчики в мишени, $C3$ — счетчик, включенный в моду антисовпадений (в случае с газовой мишенью играет также роль сосуда, в котором находится газ), T — исследуемая мишень, R — μX - и γ -излучение, регистрируемое германиевыми полупроводниковыми детекторами.

Сигналы от совпадений счетчиков $C1$ и $C2$ задерживались кабелем на 700 нс. После регистрации фотона одним из германиевых детекторов ожидался (задержанный) импульс от совпадений $C1C2$ и в память записывались: номер γ -детектора, код амплитуды импульса E_γ и время ожидания $t_\gamma = t_\mu + 700 \text{ нс}$.

Амплитудный анализ импульсов от каждого детектора выполнялся в двух режимах: с большим коэффициентом усиления (E_γ до 2000 кэВ) и с меньшим коэффициентом усиления (E_γ до 10 МэВ). В результате мы получали набор данных, которые можно отсортировать разными способами, задавая разные значения времени и энергии излучения. Такая сортировка позволяла построить зависимости событий от различных переменных. Если отсортировать данные по фиксированному интервалу времени, например, при $T_{\mu-\gamma} < 20–50 \text{ нс}$, можно получить энергетический спектр для событий Prompt (мезорентгеновское излучение). Сортировка для более длительных интервалов времени ($T_{\mu-\gamma}$ больше 100–700 нс) позволяет получить спектры задержанного излучения — Delayed (события, соответствующие захвату мюона). Можно также построить распределение для какой-то определенной энергии и, таким образом, получить эволюцию конкретной γ -линии во времени (метод определения полной скорости захвата мюона ядром), но это не являлось целью настоящей работы. Здесь же мы остановимся на мезорентгеновских спектрах излучения (предшествующих мюонному захвату), т.е. на событиях Prompt.

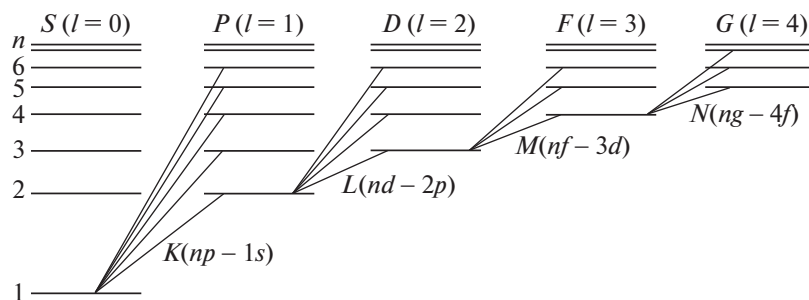


Рис. 2. Упрощенная схема уровней мезоатома и всех возможных переходов между ними (показаны переходы K -, L -, M - и N -серии).

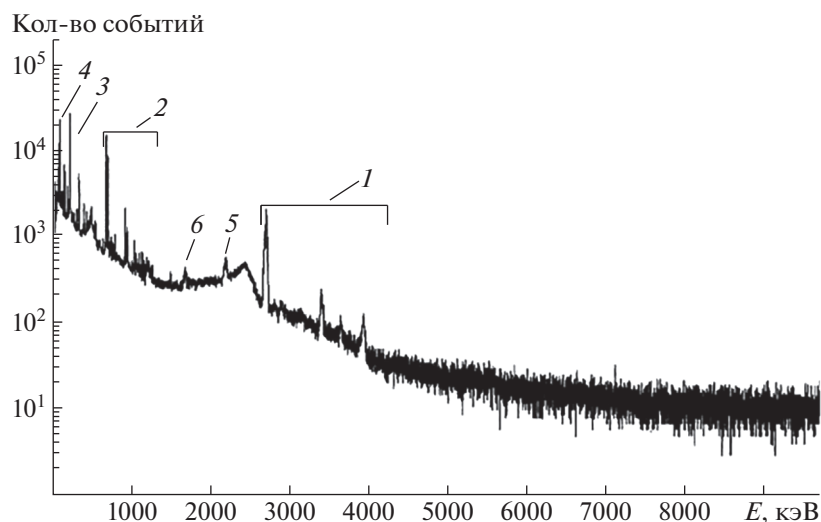


Рис. 3. Полный мезорентгеновский спектр Mo. На спектре отмечены все наблюдаемые серии каскадных переходов: 1 — $K(np-1s)$, 2 — $L(nd-2p)$, 3 — $M(nf-3d)$, 4 — $N(ng-4f)$, 5, 6 — пики одиночного и двойного вылета аннигиляционных фотонов соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате измерений мы имеем дело с “мгновенными энергетическими спектрами” — Prompt, отсортированными в коротком временном интервале (спектры содержат в основном мезорентгеновские лучи, быструю часть задержанных γ -квантов (сопровождающих захват мюона в мишени) и электроны от рассеяния пучка).

Большинство мезорентгеновских уровней, особенно для тяжелых элементов, представляют собой сложные мультиплеты. Все мезорентгеновские линии можно сгруппировать в серии: K -серия — это переходы $2p-1s$, $3p-1s$, $4p-1s$, ..., $np-1s$; L -серия — переходы $3d-2p$, $4d-2p$, ..., $nd-2p$; и т.д. Эти линейчатые спектры имеют вполне определенную энергетическую структуру, схематично представленную на рис. 2. Интенсивность переходов в каждой серии убывает с увеличением n и зависит от химического окружения мезоатома (объект изучения мезохимии).

Как уже говорилось ранее, в каталоге [11] представлено ~ 75 элементов. Для измерений мы попытались использовать простые химические соединения. В случае измерения химически активных элементов нами были использованы пассивные соединения. Второй “компаньон” в подобных ситуациях был выбран так, чтобы его Z сильно отличалось от основного. Это помогало избежать наложения соответствующих мезорентгеновских спектров.

На главной веб-странице интерактивного атласа представлена Периодическая таблица, на которой химические элементы обозначены разными цветами (в зависимости от мишеней, используемых для измерений): зеленый — мишень из чистого химического элемента (в виде гранул или фольг), красный — оксидов, оранжевый — галогенидов, фиолетовый — нитратов; серым цветом обозначены неисследованные элементы. Также на сайте представлено руководство пользователя, объяснение самого процесса; на странице сайта во вкладках можно ознакомиться с условиями прове-

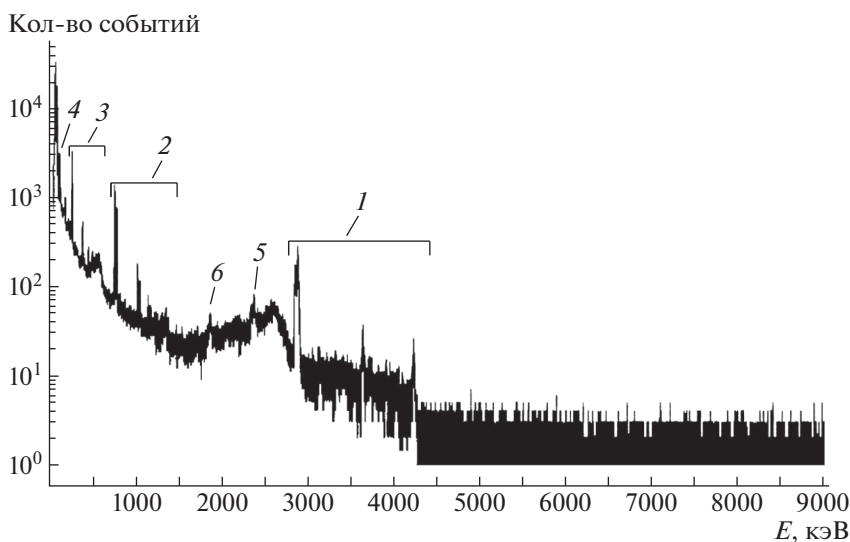


Рис. 4. Полный мезорентгеновский спектр Ru. На спектре отмечены все наблюдаемые серии каскадных переходов: 1 — $K(np-1s)$, 2 — $L(nd-2p)$, 3 — $M(nf-3d)$, 4 — $N(ng-4f)$, 5, 6 — пики одиночного и двойного вылета аннигиляционных фотонов соответственно.

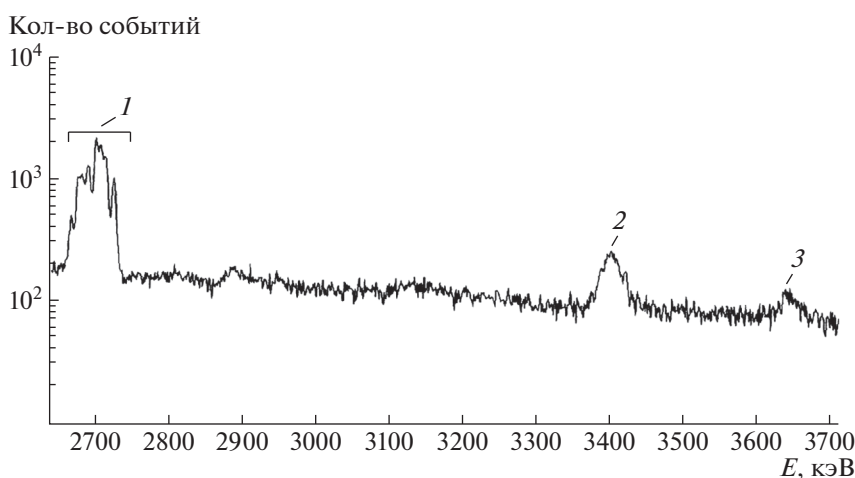


Рис. 5. K -серия Mo в масштабе рис. 3. 1 — мультиплет $K_{\alpha}(2p-1s)$; 2 — переход $K_{\beta}(3p-1s)$, $E = 3408.1$ кэВ; 3 — переход $K_{\gamma}(4p-1s)$, $E = 3647.9$ кэВ.

денных измерений, использованным оборудованием и пр. Чтобы увидеть полный μX -спектр конкретного элемента, необходимо кликнуть по нему в Периодической таблице. На рис. 3 и 4 в качестве примера представлены полные μX -спектры Mo и Ru. На них отмечены все серии с характерно убывающей интенсивностью линий.

Электронный каталог [11] содержит спектры мюонных переходов $np-1s$ для всех элементов измеряемых мишеней. Для многих элементов также представлены L -, M -серии, иногда N -, O -серии и др. Каждая из линий серии представляет собой, в свою очередь, сложный мультиплет (из-за тонкого, сверхтонкого взаимодействий и изотопических сдвигов). Структура спектров (рис. 3 и 4) довольно

сложная, что происходит за счет наличия комптоновского хвоста, образования пар, а также ПОВ (пик одиночного вылета аннигиляционного фотона) и ПДВ (пик двойного вылета аннигиляционных фотонов). На рис. 5 и 6 представлен спектр K -серии в масштабе общих мезорентгеновских спектров рис. 3 и 4 (это можно увидеть и для других серий L -, M - и др., щелкнув их в полном спектре на веб-странице [12], для примера на рис. 7 приведен μX -спектр L -серии Ru).

В связи с тем, что радиус K -оболочки сравним с радиусом ядра, K -оболочка становится чувствительной к ядерным параметрам, в результате чего μX -переход на K -оболочку зависит от свойств самого ядра. Особенно явно такая зави-

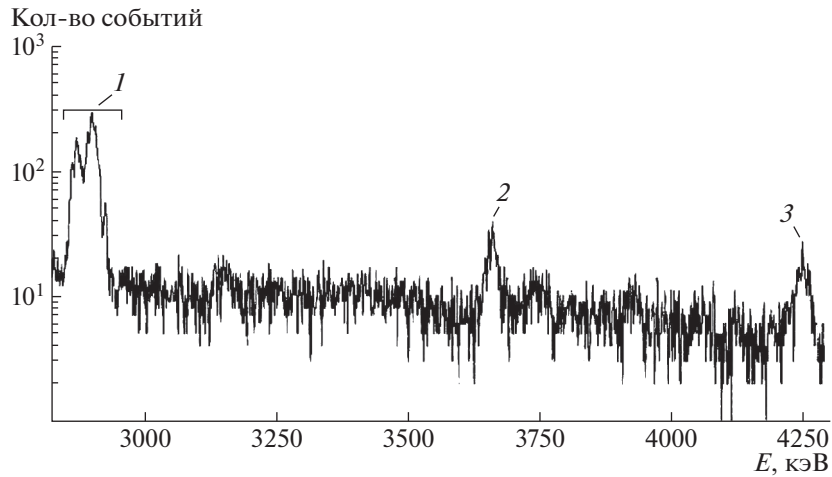


Рис. 6. K -серия Ru в масштабе рис. 4. 1 — мультиплет $K_{\alpha}(2p-1s)$; 2 — переход $K_{\beta}(3p-1s)$, $E = 3658.5$ кэВ; 3 — переход $K_{\gamma}(4p-1s)$, $E = 4250.0$ кэВ.

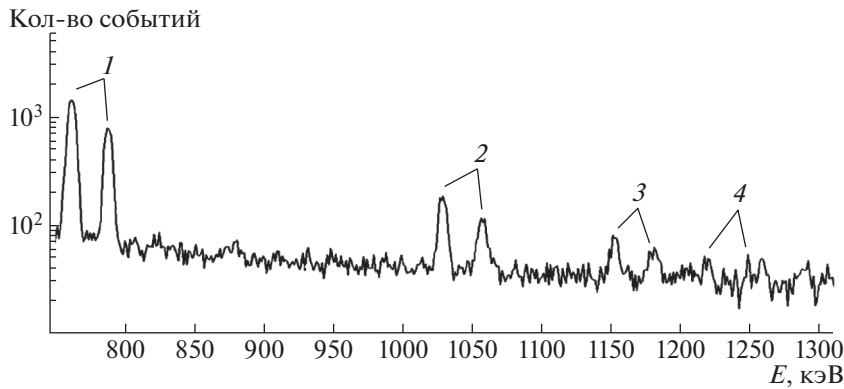


Рис. 7. L -серия Ru в масштабе рис. 4. 1 — дублет $L_{\alpha 1}(3d_{3/2}-2p_{1/2})$ и $L_{\alpha 2}(3d_{1/2}-2p_{1/2})$ с $E_1 = 763.3$ кэВ ($E_2 = 789.5$ кэВ); 2 — дублет $L_{\beta 1}(4d_{3/2}-2p_{1/2})$ и $L_{\beta 2}(4d_{1/2}-2p_{1/2})$ с $E_1 = 1029.8$ кэВ ($E_2 = 1058.3$ кэВ); 3 — дублет $L_{\gamma 1}(5d_{3/2}-2p_{1/2})$ и $L_{\gamma 2}(5d_{1/2}-2p_{1/2})$, $E_1 = 1153.3$ кэВ ($E_2 = 1182.3$ кэВ); 4 — дублет $L_{\delta 1}(6d_{3/2}-2p_{1/2})$ и $L_{\delta 2}(6d_{1/2}-2p_{1/2})$, $E_1 = 1220.3$ кэВ ($E_2 = 1248.7$ кэВ).

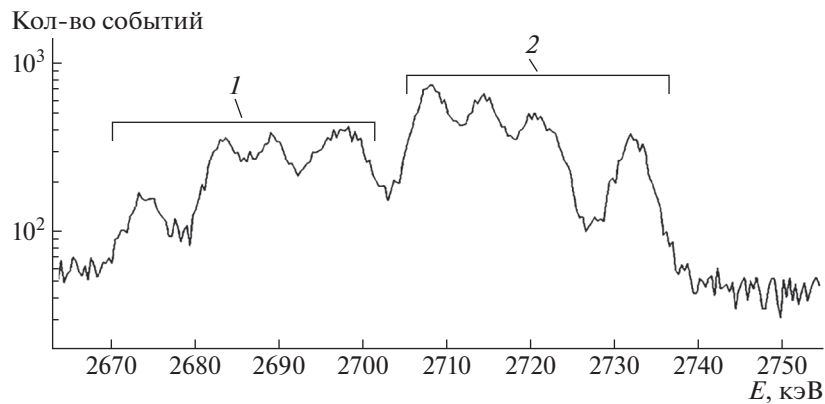


Рис. 8. Фрагмент K -серии Mo — $K_{\alpha}(2p-1s)$ мультиплет с учетом сверхтонкого расщепления: 1 — $K_{\alpha 1}(2p_{3/2}-1s_{1/2})$ с пиками при $E = 2674.0, 2683.5, 2689.1$ и 2697.8 кэВ; 2 — $K_{\alpha 2}(2p_{1/2}-1s_{1/2})$ с пиками при $E = 2708.1, 2714.2, 2721.1$ и 2732.3 кэВ. Количество пиков соответствует количеству событий при переходе мюона с оболочек $2p_{3/2,1/2}$ на $1s_{1/2}$.

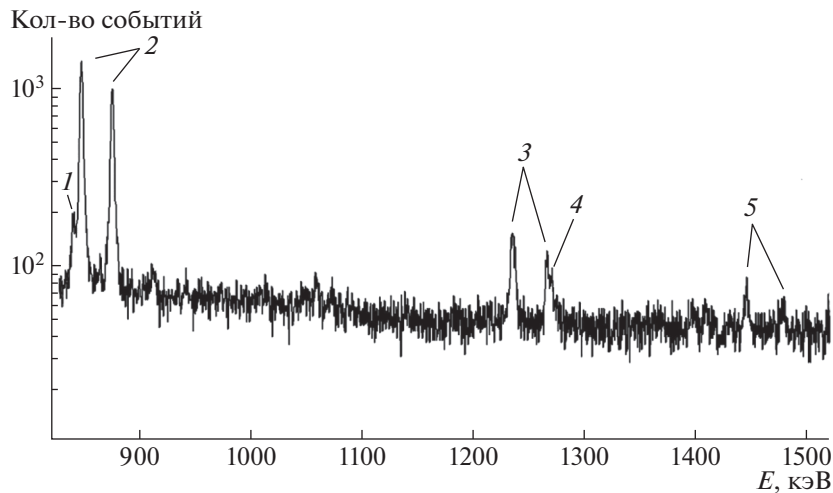


Рис. 9. M -серия Pt. 1 — γ -переход, соответствующий реакции $^{193}\text{Pt}(\mu^-, \nu Xn) ^{193}\text{Ir}^*$ ($E = 848.9$ кэВ); 2 — дублет $M_{\alpha 1}(4f_{3/2}-3d_{1/2})$ и $M_{\alpha 2}(4f_{1/2}-3d_{1/2})$ с $E_1 = 851.6$ кэВ ($E_2 = 879.3$ кэВ); 3 — дублет $M_{\beta 1}(5f_{3/2}-3d_{1/2})$ и $M_{\beta 2}(5f_{1/2}-3d_{1/2})$ с $E_1 = 1235.6$ кэВ ($E_2 = 1267.4$ кэВ); 4 — γ -переход, соответствующий реакции $^{193}\text{Pt}(\mu^-, \nu Xn) ^{193}\text{Ir}^*$; 5 — дублет $M_{\gamma 1}(6f_{3/2}-3d_{1/2})$ и $M_{\gamma 2}(6f_{1/2}-3d_{1/2})$, $E_1 = 1445.7$ кэВ ($E_2 = 1479.1$ кэВ).

симось наблюдается для ядер с $Z \geq 21$. Таким образом, для K -серии Mo, например, мы имеем сложную структуру K_{α} (рис. 8). В частности, переходы $K_{\alpha 1}(2p_{3/2}-1s_{1/2})$ и $K_{\alpha 2}(2p_{1/2}-1s_{1/2})$ соответствуют тонкому расщеплению линий (их число соответствует количеству событий при переходе мюона с оболочек $2p_{3/2,1/2}$ на $1s_{1/2}$), а сложность мультиплета объясняется изотопическими сдвигами в мишени с натуральными Mo и Ru за счет сверхтонкого расщепления.

Корректировка результатов предыдущих измерений заключалась в детальной идентификации некоторых γ -линий элементов с Z в диапазоне от 76 до 90. Это было связано с тем, что в первой версии каталога для таких Z разделение Prompt- и Delayed-событий было проведено недостаточно прецизионно, что привело к наложению спектральных линий мгновенных событий (P) с задержанными (D). Для устранения этого эффекта в настоящей работе была осуществлена качественная сортировка данных с учетом присутствия задержанных γ -линий. В результате чего примесь ядерных γ -линий в мезорентгеновских спектрах каталога была существенно уменьшена. С помощью схем распадов, приведенных в [15], были идентифицированы и отмечены остаточные Delayed γ -линии, присутствующие в Prompt-спектрах, а также уточнены энергии μX -переходов (на рис. 9 в качестве примера приведен спектр M -серии Pt).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информация из каталога спектров μX -лучей важна для точной идентификации структуры фона и

для правильного выбора мишеней и материалов для различных экспериментов, связанных с остановкой мюонов в веществе (а также при изучении редких материалов и антикварных изделий). Кроме того, энергии и интенсивности мезорентгеновских линий удобны для энергетической калибровки детекторных систем. Полученные результаты могут быть использованы для определения параметров зарядового распределения в ядрах. Суммарная интенсивность мезорентгеновской K -серии дает число мюонов, точно остановившихся в мишени с определенным Z .

Автор выражает благодарность группе ученых из Малайзии и Японии за совместную работу во время последних измерений в RCNP [13], а также начальнику сектора ЛЯП В.Г. Егорову и научному сотруднику ЛЯП М.В. Ширченко за поддержку и неоценимую помощь в обсуждениях результатов измерений.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-32-00823-Мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Beringer *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012).
2. Paul Sherrer Institut, <https://www.psi.ch>
3. Е. Ким, *Мезонные атомы и ядерная структура* (Атомиздат, Москва, 1975).
4. В. С. Евсеев, Т. Н. Мамедов, В. С. Роганов, *Отрицательные мюоны в веществе* (Энергоатомиздат, Москва, 1985).
5. В. В. Балашов, Г. Я. Коренман, Р. А. Эрамжян, *Поглощение мезонов атомными ядрами* (Атомиздат, Москва, 1978).

6. Yu. Shitov, V. Egorov, Ch. Briançon, V. Brudanin, J. Deutsch, T. Filipova, C. Petitjean, R. Prieels, T. Siiskonen, J. Suhonen, Ts. Vylov, V. Wiaux, I. Yutlandov, and Sh. Zaporov, Nucl. Phys. A **699**, 917 (2002).
7. Д. Р. Зинатулина, К. Я. Громов, В. Б. Бруданин, Ш. Бриансон, В. Г. Егоров, К. Петитжан, В. И. Фоминых, В. Г. Чумин, М. В. Ширченко, И. А. Ютландов, Изв. РАН. Сер. физ. **72**, 783 (2008) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **72**, 737 (2008)].
8. Д. Р. Зинатулина, Ш. Бриансон, В. Б. Бруданин, Р. В. Васильев, К. Я. Громов, В. Г. Егоров, К. Петитжан, В. И. Фоминых, В. Г. Чумин, М. В. Ширченко, И. А. Ютландов, Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 868 (2010) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **74**, 825 (2010)].
9. V. Egorov, V. Brudanin, K. Gromov, A. Klinskih, M. Shirchenko, Ts. Vylov, I. Yutlandov, D. Zinatulina, Ch. Briançon, C. Petitjean, and O. Naviliat-Cuncic, Czech. J. Phys. **56**, 453 (2006).
10. D. Zinatulina, V. Brudanin, V. Egorov, C. Petitjean, M. Shirchenko, J. Suhonen, and I. Yutlandov, arXiv: 1803.10960v2.
11. Electronic Catalogue of Mesoroentgen Spectra, <http://muxrays.jinr.ru>
12. D. Zinatulina, Ch. Briançon, V. Brudanin, V. Egorov, L. Perevoshchikov, M. Shirchenko, I. Yutlandov, and C. Petitjean, EPJ Web Conf. **177**, 03006 (2018); arXiv: 1801.06969.
13. I. H. Hashim, H. Ejri, T. Shima, A. Sato, Y. Kuno, N. Kawamura, S. Miyake, and K. Ninomiya, Phys. Rev. C **97**, 014617 (2018); arXiv: 1707.08363 [nucl-ex].
14. National Nuclear Data Center, <https://www.nndc.bnl.gov/>

ELECTRONIC CATALOGUE OF MESOROENTGEN SPECTRA

D. R. Zinatulina

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

μX -ray spectra for Mo and Ru targets were measured with HPGe detectors and muon beam of RCNP (Osaka, Japan). The results are included into the electronic atlas of the μX rays composed of graphic plots. The information on the μX -ray spectra is very useful for the identification of γ lines, calibration of the detectors and correct selection of the constructive materials in the experiments with negative muons and investigation of materials.