

02; 10

© 1990 г.

ВОЗБУЖДЕНИЕ L-СЕРИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗОЛОТА, НЕПТУНИЯ, ПЛУТОНИЯ И АМЕРИЦИЯ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 20—80 МэВ

А. В. Киреев, И. В. Рыжов, Г. А. Тутин, В. П. Эйсмонт

Измерены спектры L-серии рентгеновского излучения золота, нептуния, плутония и америция, возбуждаемого протонами с энергией 20—80 МэВ. Определены полные выходы L-излучения трансурановых элементов (относительно золота) и выходы отдельных групп. Проведено сравнение экспериментальных значений полных выходов L-излучения трансурановых элементов и золота и относительных интенсивностей групп с расчетом по модели борновского приближения плоских волн.

Введение

Процесс ионизации внутренних оболочек атомов заряженными частицами изучается давно и интенсивно. Получено много экспериментальной информации по сечениям ионизации K- и L-оболочек многих элементов протонами [1, 2]. Для некоторых элементов из интенсивностей отдельных групп L-серии рентгеновского излучения определены вероятности ионизации отдельных подоболочек [3, 4]. Однако большинство этих данных получено при энергии протонов в интервале 0.1—4 МэВ. Значительно меньше информации в интервале энергии 4—40 МэВ и практически полностью отсутствуют данные при энергии протонов выше 40 МэВ. Нам известна лишь одна работа [5], в которой изучались сечения возбуждения рентгеновского K-излучения ряда атомов протонами с энергией 160 МэВ. Трансурановые элементы до настоящего времени не изучались.

Интерес к области высоких энергий протонов и тяжелых элементов — мишеней связан с исследованием влияния релятивистских эффектов. Сведения о сечениях возбуждения рентгеновского излучения представляют и практический интерес для постановки ядерно-физических экспериментов на пучке протонов.

Целью настоящей работы являлось получение данных об отношениях интенсивностей основных групп линий L-серии рентгеновского излучения золота, нептуния, плутония и америция при энергии протонов $E_p \geq 20$ МэВ и полных сечений возбуждения L-серии рентгеновского излучения нептуния, плутония и америция при $E_p \approx 60$ МэВ.

Методика эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Пучок протонов, ускоренных на синхротроне Радиевого института С, разработанном и изготовленном Институтом ядерной физики СО АН СССР, транспортировался в экспериментальный зал через защитную стенку по вакуумному ионопроводу, снабженному магнитными квадрупольными линзами ΦM и корректирующими магнитами K, и попадал в откачанную экспериментальную камеру, где располагалась мишень M. Пучок протонов имел диаметр приблизительно 5 мм в районе мишени.

Его размер и положение контролировалось путем наблюдения с помощью передающей телевизионной камеры *ТК* свечения люминофора *Л*, нанесенного на выпускное окно экспериментальной камеры. Интенсивность пучка протонов составляла 10^8 — 10^9 с⁻¹. Диаметр рабочей части мишени равнялся 10 мм. Под углом 135° к пучку протонов располагался канал для измерения рентгеновского излучения мишени. На выходе он был снабжен тонким окном из алюминий-бериллиевого сплава. На расстоянии 7.5 мм от выходного окна экспериментальной камеры помещался полупроводниковый кремний-литиевый детектор рентгеновского излучения *Д* типа БДЭР-2. Детектор имел площадь чувствительной поверхности 12.5 мм² и разрешение (полную ширину на половине высоты) 420 эВ при энергии излучения 14.4 кэВ.

С целью уменьшения фона электромагнитного излучения в эксперименте не использовались коллиматоры при формировании пучка протонов. Для уменьшения фона рассеянных на мишени протонов детектор рентгеновского излучения располагался под углом к направлению пучка.

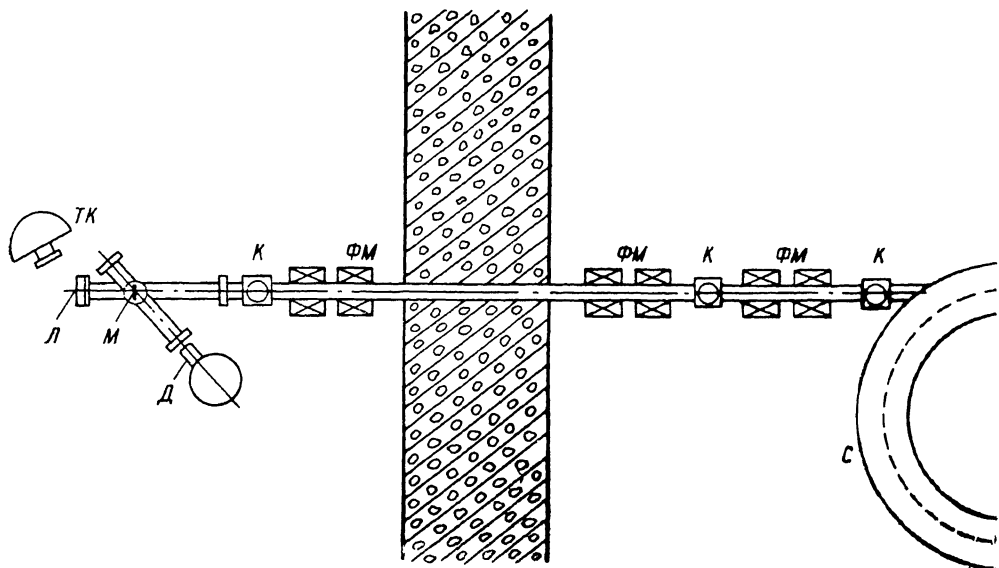


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Временная структура протонного пучка синхротрона сделала возможным проведение измерений на нуклидах, обладающих значительной удельной активностью и связанным с этим уровнем рентгеновского излучения, возбуждаемого при распаде. Регистрация рентгеновского излучения в эксперименте производилась в течение 110 мкс за каждый цикл ускорения, соответствующего времени попадания пучка протонов на мишень. Частота циклов ускорения 50 Гц. Длительность импульса тока протонов составляла приблизительно 80 мкс. Таким образом, средний уровень регистрируемого рентгеновского излучения от естественного распада уменьшался примерно в 180 раз.

Импульсы напряжения от детектора рентгеновского излучения после предварительного и основного усилителей с формированием передавались по кабелю в измерительное помещение и поступали на линейные ворота, управляемые формирователем, синхронизированным с работой ускорителя. Регистрация амплитудных спектров велась с помощью многоканального анализатора АИ-1024-95. Экспериментальные распределения вместе с дополнительной информацией переносились в дисковую память ЭВМ СМ 1420 для хранения и дальнейшей обработки.

Сечения возбуждения *L*-серии рентгеновского излучения трансурановых элементов измерялись относительно сечений золота, служащего в качестве эталона. В эксперименте использовались мишени из нептуния-237, плутония-239 и америция-241 с содержанием основного изотопа более 99 %, нанесенные на

алюминиевую подложку толщиной 100 мкм. Для предотвращения загрязнения экспериментальной камеры и поглощения мягкой части рентгеновского спектра мишени из радиоактивных нуклидов закрывались алюминиевой фольгой. Золотая мишень изготавливалась из сусального золота толщиной 0.25 мкм на алюминиевом кольце. Мишень из золота была без подложки.

Плотность мишени из золота определялась взвешиванием исходной фольги, а плотности мишеней из трансурановых элементов определялись по интенсивностям γ -линий с энергиями 29.4, 38.7 и 26.3 кэВ для нептуния-237, плутония-239 и америция-241 соответственно. Плотность определялась в средней части мишени $\varnothing 5$ мм, которая находилась в пучке протонов. Для расчета плотностей мишеней использовались оцененные значения абсолютных интенсивностей и периодов полураспада трансурановых радионуклидов [6]. Измеренные плотности составили 0.45 ± 0.02 мг/см² для мишени из золота, 1.07 ± 0.04 мг/см² для нептуния, 0.88 ± 0.05 мг/см² для плутония и 0.97 ± 0.05 мг/см² для америция.

Относительная эффективность детектора рентгеновского излучения определялась с погрешностью $\sim 5\%$ при помощи прокалиброванных источников кобальта-57 и америция-241 по линиям 6.4, 11.9, 13.9, 14.4, 17.8, 20.8, 26.3 и 59.5 кэВ.

Результаты эксперимента и их обработка

В экспериментах с трансурановыми элементами использовалась двухслойная мишень: перед мишенью из трансуранового элемента помещалась мишень из золота. Одновременно регистрировался спектр L -серии рентгеновского излучения золота и трансуранового элемента. Кроме того, в экспериментальном спектре присутствуют линии L -серии рентгеновского излучения дочерних элементов, возбуждаемого при α -распаде, особенно существенные при исследовании америция. На рис. 2 в качестве примера представлено полученное в эксперименте с америцием при энергии протонов 61 МэВ распределение амплитуд импульсов рентгеновского детектора (кривая 1). На этом же рисунке представлены компоненты разложения этого распределения на составляющие: L -серию рентгеновского излучения нептуния, сопровождающего α -распад америция (кривая 2); L -серию рентгеновского излучения золота, возбуждаемого протонами с энергией 61 МэВ (кривая 3); L -серию рентгеновского излучения америция, возбуждаемого протонами той же энергии (кривая 4). Распределения 2 и 3 измерены в отдельных экспериментах и соответствующим образом пронормированы.

Обработка распределений велась с помощью ЭВМ. Выполнялись операции по сложению отдельных серий измерений, нормированию и вычитанию фоновых спектров, определению площадей под пиками и вычислению статистических ошибок. Фон под отдельными группами аппроксимировался линейной зависимостью.

При расчете интенсивностей линий L -серии рентгеновского излучения, возбуждаемого протонами, вносились поправки на поглощение излучения в материале мишени 3—7%, в алюминиевой защитной фольге 9—33%, в слое золота 4—12%, в выходном окне экспериментальной камеры и входном окне детектора 2—19%. Коэффициенты ослабления рентгеновского излучения в различных материалах брались из работы [7].

Т а б л и ц а 1

Отношение групп	E_p , МэВ				
	19	24	41	61	84
L_{α}/L_{β}	1.44 ± 0.06	1.53 ± 0.04	1.42 ± 0.02	1.39 ± 0.04	1.33 ± 0.05
L_{α}/L_{γ}	10.9 ± 1.0	9.7 ± 0.6	9.0 ± 0.3	10.6 ± 1.5	6.5 ± 0.6

Результаты эксперимента по определению относительных интенсивностей групп линий L_{α} -, L_{β} - и L_{γ} -рентгеновского излучения золота, возбуждаемого протонами под углом 135° , приведены в табл. 1, для нептуния, плутония и америция под углом 135° приведены в табл. 2.

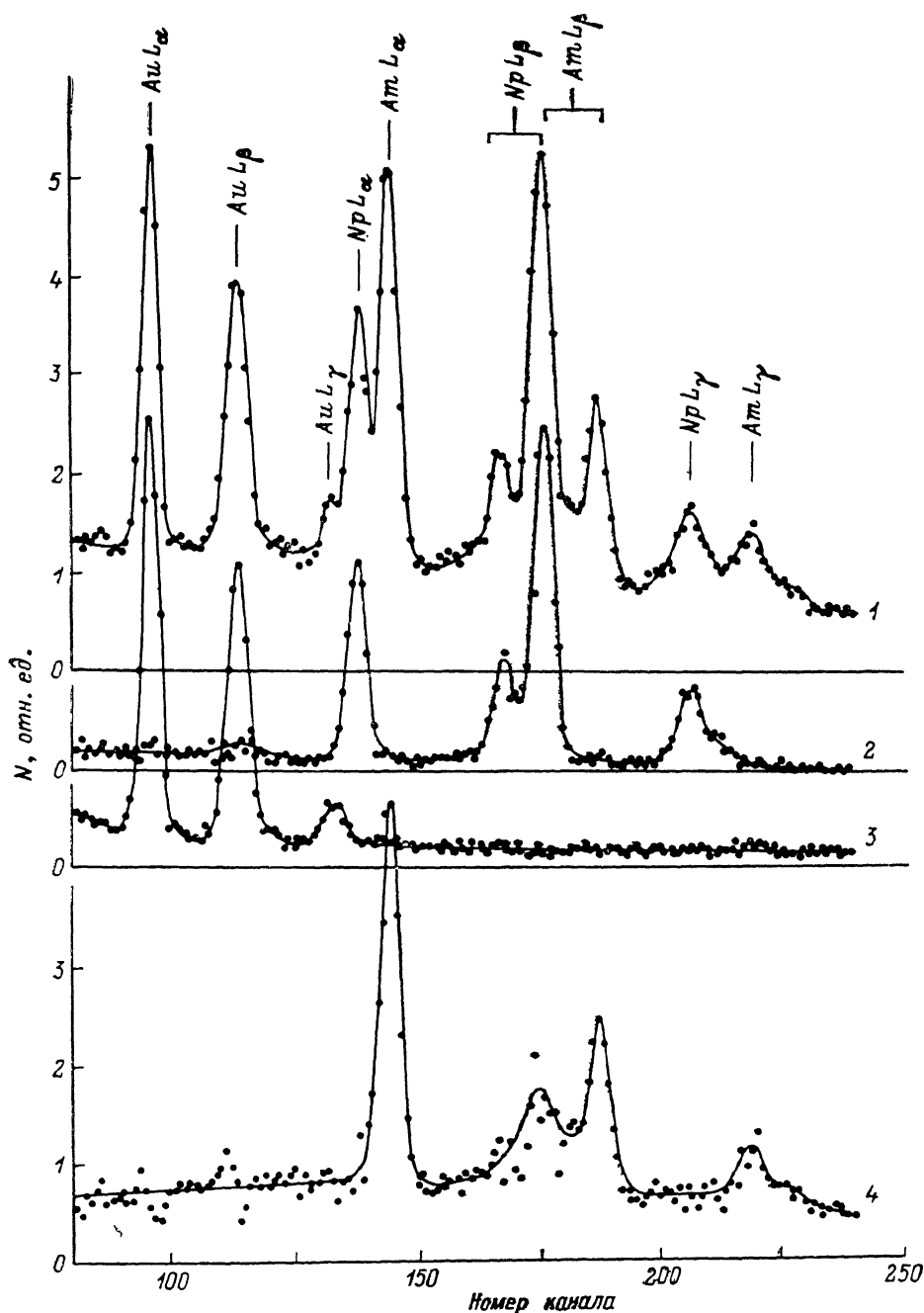


Рис. 2. Экспериментальные распределения импульсов рентгеновского детектора по амплитуде при энергии протонов $E_p = 61$ МэВ.

1 — полное распределение с мишенью Am+Au; 2 — распределение от распада Am-241; 3 — распределение с мишенью Au; 4 — разностное распределение, т. е. «чистое» распределение с мишенью Am.

Экспериментально определенные отношения сечений возбуждения L -серии рентгеновского излучения трансурановых элементов к сечению возбуждения L -серии рентгеновского излучения золота при тех же энергиях под углом 135° представлены в табл. 3.

Таблица 2

$E_p, \text{МэВ}$	Np		Pu		Am	
	L_α/L_β	L_α/L_γ	L_α/L_β	L_α/L_γ	L_α/L_β	L_α/L_γ
19	1.81 ± 0.18	7.6 ± 1.5				
61	1.70 ± 0.07	6.8 ± 0.6	1.50 ± 0.08	6.9 ± 0.8	1.55 ± 0.11	6.8 ± 0.9

Обсуждение результатов

На рис. 3 наряду с полученными нами результатами по отношениям интенсивностей групп линий L -серии рентгеновского излучения золота приведены данные работы [8] при меньших энергиях протонов. Сплошной линией представлены результаты расчета в борновском приближении плоских волн

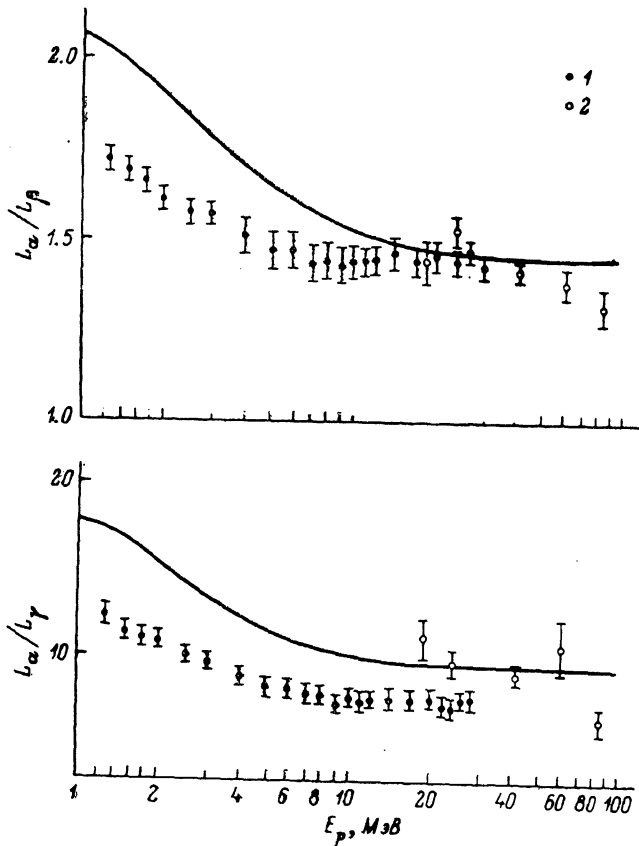


Рис. 3. Зависимость отношений интенсивностей групп линий L -серии рентгеновского излучения золота от энергии протонов.

Точки — эксперимент (1 — из работы [8], 2 — наши данные), сплошная линия — теория

(БППВ) [9, 10] с использованием данных по выходам флуоресценции и коэффициентам Костера—Кронига из работ [11, 12] и радиационных ширин из работы [13]. Наши данные по отношениям интенсивностей групп L_α/L_β золота и данные работы [8] в перекрывающейся области энергий хорошо согласуются друг с другом и близки к теоретической оценке по БППВ в интервале энергий протонов 12—60 МэВ. Наши данные по отношению групп L_α/L_γ заметно выше данных работы [8] в перекрывающейся области энергий. Результаты при энергии 84 МэВ обнаруживают тенденцию к уменьшению для обоих отношений по сравнению с ходом теоретической зависимости.

Т а б л и ц а 3

E_p , МэВ	$\sigma(Np)/\sigma(Au)$		$\sigma(Pu)/\sigma(Au)$		$\sigma(Am)/\sigma(Au)$	
	эксперимент	теория	эксперимент	теория	эксперимент	теория
19	0.45 ± 0.04	0.56				
61	0.77 ± 0.04	0.77	0.81 ± 0.06	0.77	0.79 ± 0.05	0.75

На рис. 4 дается сравнение наших результатов по отношению интенсивностей групп линий L -серии для трансурановых элементов с теоретическими предсказаниями по модели БППВ. Видно, что характер зависимости относительных интенсивностей групп линий не противоречит теоретической тенденции. Не следует придавать большого значения некоторым расхождениям в абсолютных величинах экспериментальных и теоретических отношений интенсивностей групп линий, так как последние содержат ошибки, связанные с недостаточно точным знанием выходов флюоресценции, коэффициентов Костера—Кронига, радиационных ширин, т. е. параметров, используемых при переходе от сечений ионизации к интенсивностям групп линий. Погрешности могут достигать в ряде случаев 30 %. При оценке степени согласия с теорией важнее учитывать характер зависимости этих отношений от энергии протонов.

Для получения абсолютных сечений возбуждения L -серии рентгеновского излучения нептуния, плутония и америция, которые измерены в нашей работе относительно таких сечений для золота, необходимо знать абсолютные сечения для золота при энергиях 19 и 61 МэВ. Экспериментальные значения сечения

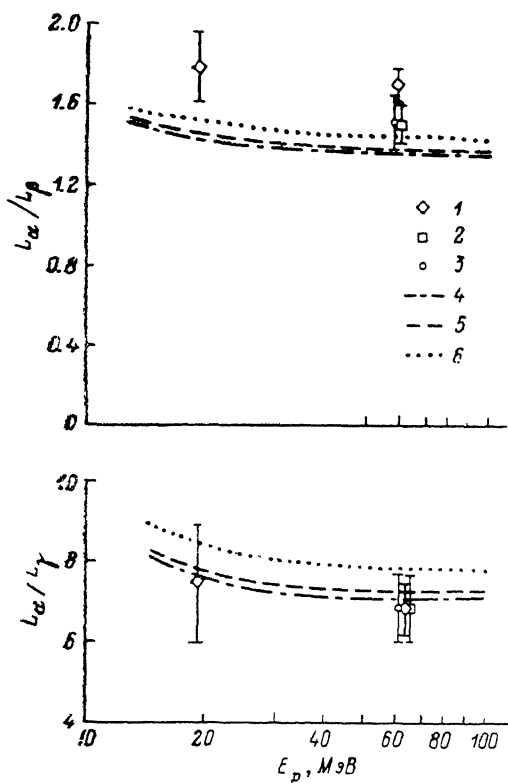


Рис. 4. Отношение интенсивностей групп линий L -серии рентгеновского излучения трансурановых элементов.

Точки — наши экспериментальные данные (1 — Np, 2 — Pu, 3 — Am), линии — теория (4 — Np, 5 — Pu, 6 — Am)

для золота имеются лишь до $E_p=30$ МэВ [8]. Чтобы оценить значение сечения золота при $E_p=61$ МэВ, была проделана экстраполяция с помощью теоретической зависимости в рамках модели БППВ [10]. Для лучшего согласия расчета с имеющимися экспериментальными данными в области энергий 1—30 МэВ варьировалось значение среднего выхода флюоресценции на L -оболочке золота. Наилучшее описание имеющихся экспериментальных данных по сечению возбуждения L -серии рентгеновского излучения золота получено при значении среднего выхода флюоресценции на L -оболочке золота — $\bar{\omega}_L=0.31$. Неопределенность за счет экстраполяции сечения в область 60 МэВ мы оцениваем в 15 %.

Считая угловое распределение характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого протонами, изотропным, получаем полное сечение возбуждения L -серии рентгеновского излучения нептуния при $E_p=19$ МэВ

равным 250 ± 30 бн, сечения возбуждения L -серии рентгеновского излучения при $E_p = 61$ МэВ составляют для нептуния 360 ± 60 бн, для плутония 370 ± 60 бн, для америция 370 ± 60 бн.

Теоретические оценки отношения полных сечений возбуждения L -серии рентгеновского излучения трансурановых элементов к сечениям для золота, полученные по модели БППВ, представлены для сравнения в табл. 3. Они показывают удовлетворительное согласие с нашими экспериментальными результатами.

Заключение

Впервые измерены спектры L -серии рентгеновского излучения нептуния, плутония и америция, возбуждаемого протонами, а также золота при энергии протонов выше 30 МэВ. Определены полные выходы L -излучения трансурановых элементов (относительно золота) и выходы отдельных групп. Проведено сравнение экспериментальных значений полных выходов L -излучения трансурановых элементов и золота и относительных интенсивностей групп L_α/L_β и L_α/L_γ с расчетом в борновском приближении плоских волн. Сравнение показало, что теория правильно отражает общее поведение указанных величин как функций порядкового номера элемента и энергии протонов, но точного количественного согласия не наблюдается. Желательно получение дополнительных экспериментальных данных в широкой области энергий бомбардирующих частиц.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, обеспечившим работу синхротрона Радиевого института с необходимым качеством пучка протонов.

Список литературы

- [1] Rutledge C. H., Watson R. L. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. 1973. Vol. 12. N 2. P. 195—216.
- [2] Hardt T. L., Watson R. L. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. 1976. Vol. 17. N 2. P. 107—125.
- [3] Sokhi R. S., Crumpton D. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. 1984. Vol. 30. N 1. P. 49—124.
- [4] Sera K., Ishii K., Yamadera A. et al. // Phys. Rev. A. 1980. Vol. 22. N 6. P. 2536—2549.
- [5] Jarvis O. N., Whitehead C. // Phys. Rev. A. 1972. Vol. 5. N 3. P. 1198—1207.
- [6] Чечев В. П., Кузьменко Н. К., Сергеев В. О., Артамонова К. П. Оценочные значения ядерно-физических характеристик трансурановых радионуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 245 с.
- [7] Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. М.: Атомиздат, 1973. 254 с.
- [8] Shafroth S. M., Bissinger G. A., Waltner A. W. // Phys. Rev. A. 1973. Vol. 7. N 2. P. 566—571.
- [9] Merzbacher E., Lewis H. W. // Encyclopedia of Physics / Ed. S. Flugge. Berlin: Springer Verlag, 1958. Vol. 34. P. 166—192.
- [10] Benka O., Kropf A. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. 1978. Vol. 22. N 3. P. 219—233.
- [11] Bambynek W., Crasemann B., Fink R. W. et al. // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44. N 4. P. 716—813.
- [12] McGuire E. J. // Proc. Intern. Conf. on Inner Shell Ionization Phenomena and Future Applications. Oak Ridge: USAEC, 1972. Vol. 1. P. 662—679.
- [13] Scofield J. H. // Atomic Data and Nucl. Data Tables. 1974. Vol. 14. N 2. P. 121—138.

Поступило в Редакцию
5 июня 1989 г.