

01

Возбуждение электронным ударом уровней $4p^55p$ атома криптона из метастабильных состояний

© А.А. Митюрева, В.В. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: mitalal@mail.ru

Поступила в редакцию 16.11.2019 г.

В окончательной редакции 16.11.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Получены данные для сечений возбуждения электронным ударом уровней $4p^55p$ атома криптона из метастабильных состояний $4p^55s^3P_{0,2}$. Они отражают совокупный результат из имеющихся данных по указанному процессу, включая результаты собственных измерений авторов.

Ключевые слова: электронное возбуждение, атом, криптон, сечение процесса, метастабильные состояния.

DOI: 10.21883/OS.2020.04.49194.312-19

Введение

Данные по вероятностям взаимодействия электронов с атомами по-прежнему остаются весьма востребованными и необходимы для понимания и описания процессов, происходящих в атмосферной, космической и лабораторной плазме, а также в таких областях науки и технологий, как астрофизика, управляемый термоядерный синтез, плазменные двигатели, атмосферные процессы и климатология, радиационная биофизика, источники света и т.д. [1–3]. Исследования в данном направлении проводятся давно и широким фронтом, им уделяется пристальное внимание, о чем свидетельствует хотя бы большое число публикаций и, казалось бы, к настоящему времени накоплен большой материал. Однако при более внимательном рассмотрении проблемы при кажущемся благополучии выясняется, что ситуация отнюдь не столь благополучна. Имеется несколько аспектов этой проблемы. Отметим два из них.

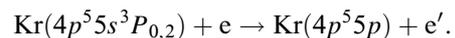
Одним из аспектов является выбор конкретного сечения из большого числа имеющихся данных, разбросанных по разным информационным источникам, и представление его в компактной и удобной для приложений форме. Подробнее этот вопрос рассматривался, например, в наших работах. В них был предложен способ представления совокупной информации по исследуемому вопросу. Обоснование подхода в рамках математической статистики дано в [4]. Подход был апробирован на представлении сечений электронного возбуждения таких объектов, как атомы гелия [5–8] и аргона [9] из нормального и метастабильных состояний и атомов криптона [10] и водорода [11] из нормального состояния. Аналогичный подход использовался для представления сечений электронного возбуждения атомов в более поздних работах, например [12,13].

Другим аспектом является малая изученность интересующего процесса. К таким процессам относится и рас-

сматриваемый в работе процесс столкновения электрона с атомом в возбужденном состоянии, в частности в метастабильном. Соответствующих данных по сечениям мало даже для сравнительно хорошо изученных атомов инертных газов. Представление сечений возбуждения атомов инертных газов гелия и аргона из метастабильных состояний рассмотрено в наших работах [5–9]. Данная работа является продолжением этих работ, в ней рассмотрен процесс возбуждения атомов криптона из метастабильных состояний. Для получения результата помимо других информационных источников использовались данные наших измерений сечений рассматриваемого процесса в криптоне [14]. Отметим, что работа [14] была первой экспериментальной работой по измерению сечений рассматриваемого процесса в криптоне.

Постановка задачи и полученные результаты

В работе представлены данные для сечений возбуждения электронным ударом уровней $4p^55p$ атома криптона (уровни $2p_{1-10}$ в обозначениях Пашена) из метастабильных состояний $4p^55s^3P_{0,2}$ (уровни $1s_{3,5}$ в обозначениях Пашена):



В соответствии с используемой методикой [4] для получения сечения используется информация из имеющихся данных по указанному процессу. Сечения находятся на основе регрессионного анализа по имеющимся данным с заданной параметрической функцией регрессии. Эта функция представляет сглаженное сечение, обладающее четырьмя характерными признаками — характером пороговой зависимости, величиной в максимуме, положением максимума, характером спада при больших энергиях. Соответственно для передачи этих

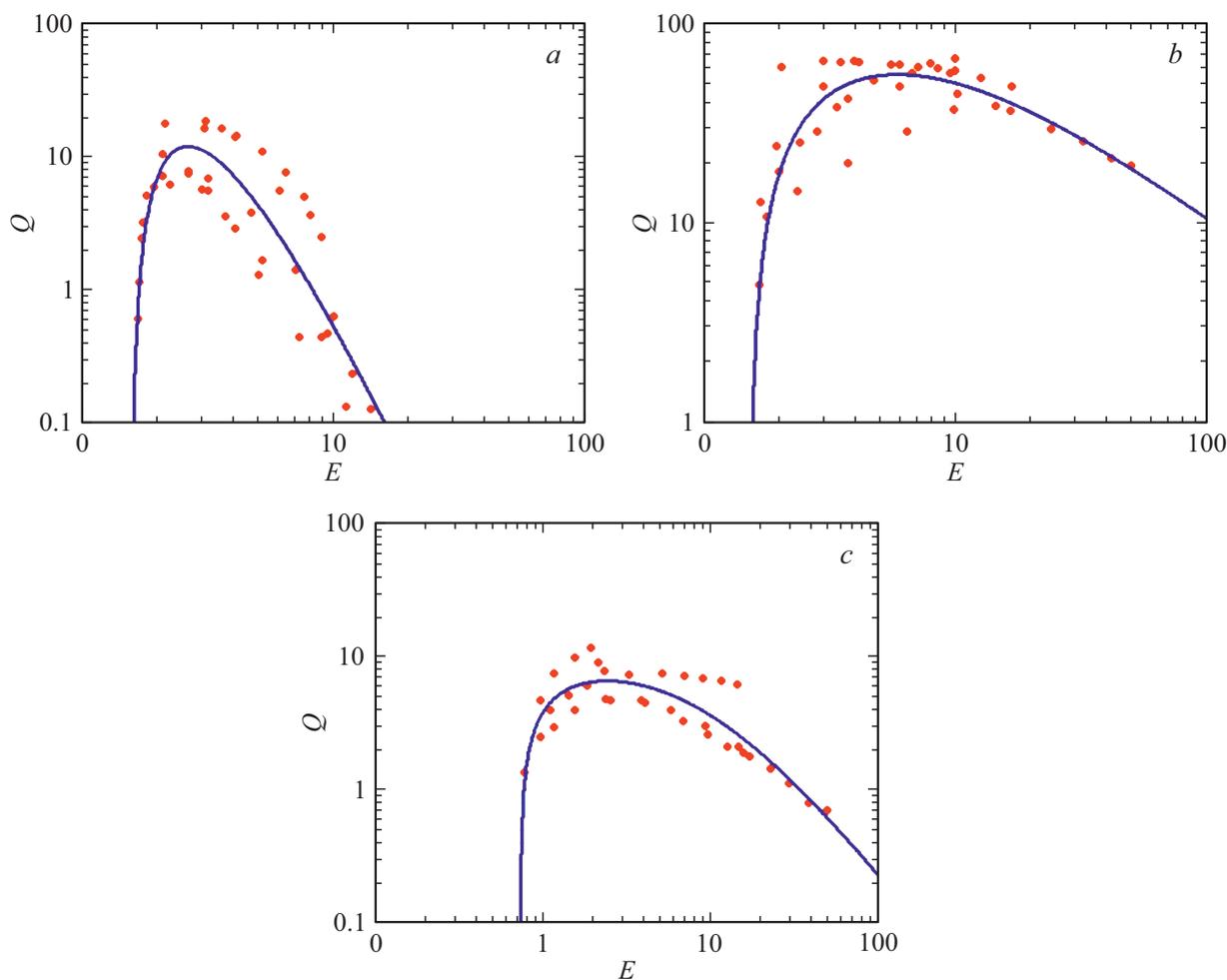


Рис. 1. Сечение Q (10^{-16} см²) возбуждения перехода (а) $1s_3-2p_2$, (б) $1s_3-2p_4$, (с) $1s_3-2p_{10}$ в зависимости от энергии электронов E (eV). Точки — данные информационных источников, сплошная линия — регрессионная кривая.

особенностей рассматривается четырехпараметрическая аппроксимация. Мы используем аппроксимацию сечения возбуждения электронным ударом в виде

$$Q(u) = p_0 \left(\frac{u}{u+1} \right)^{p_1} (u+p_2)^{-p_3}, \quad u = \frac{E}{\Delta E} - 1,$$

где E — энергия электронов, ΔE — порог возбуждения, $p = (p_0, p_1, p_2, p_3)$ — параметры. Очень приближенно можно считать, что p_0 задает величину сечения, параметр p_2 влияет на форму кривой $Q(u)$ вблизи максимума и на его местоположение, параметр p_1 отвечает за ход сечения у порога возбуждения, параметр p_3 учитывает разную асимптотику поведения сечения при больших энергиях налетающего электрона E .

Следует, однако, иметь в виду, что параметры сильно взаимосвязаны. Заметим также, что процедура регрессионного анализа гарантирует качество результата только в том диапазоне энергий, в котором имеются исходные данные. Экстраполяция на больший диапазон энергий может быть не обоснована. В частности, определяемый параметр p_3 может не соответствовать реальной

асимптотике сечения при энергии $E \rightarrow \infty$ (например, встречающиеся в литературе значения $p_3 = 1, 3$).

В качестве источника информации мы использовали только те опубликованные в реферируемых международных журналах научные статьи, где интегральные сечения приводятся самими авторами работ. При анализе были рассмотрены и обработаны данные экспериментальных и теоретических работ. Не учитывались, как правило, работы, где получены лишь дифференциальные сечения, измеренные к тому же в узком диапазоне углов. Также из экспериментальных рассматривались только те работы, в которых использовался пучок электронов, а не плазменные работы. Информационные источники брались с одинаковым весом. Отметим, что данных по рассматриваемому процессу в криптоне мало. Из экспериментальных работ это наша работа [14], выполненная в газовой ячейке с электронным пучком и оптической регистрацией метастабильных и излучающих уровней [15]. Основная доля возбуждения в этом эксперименте осуществляется с уровня $5s^3P_2$, как наиболее заселенного (заселенность уровней $5s^3P_2$ более

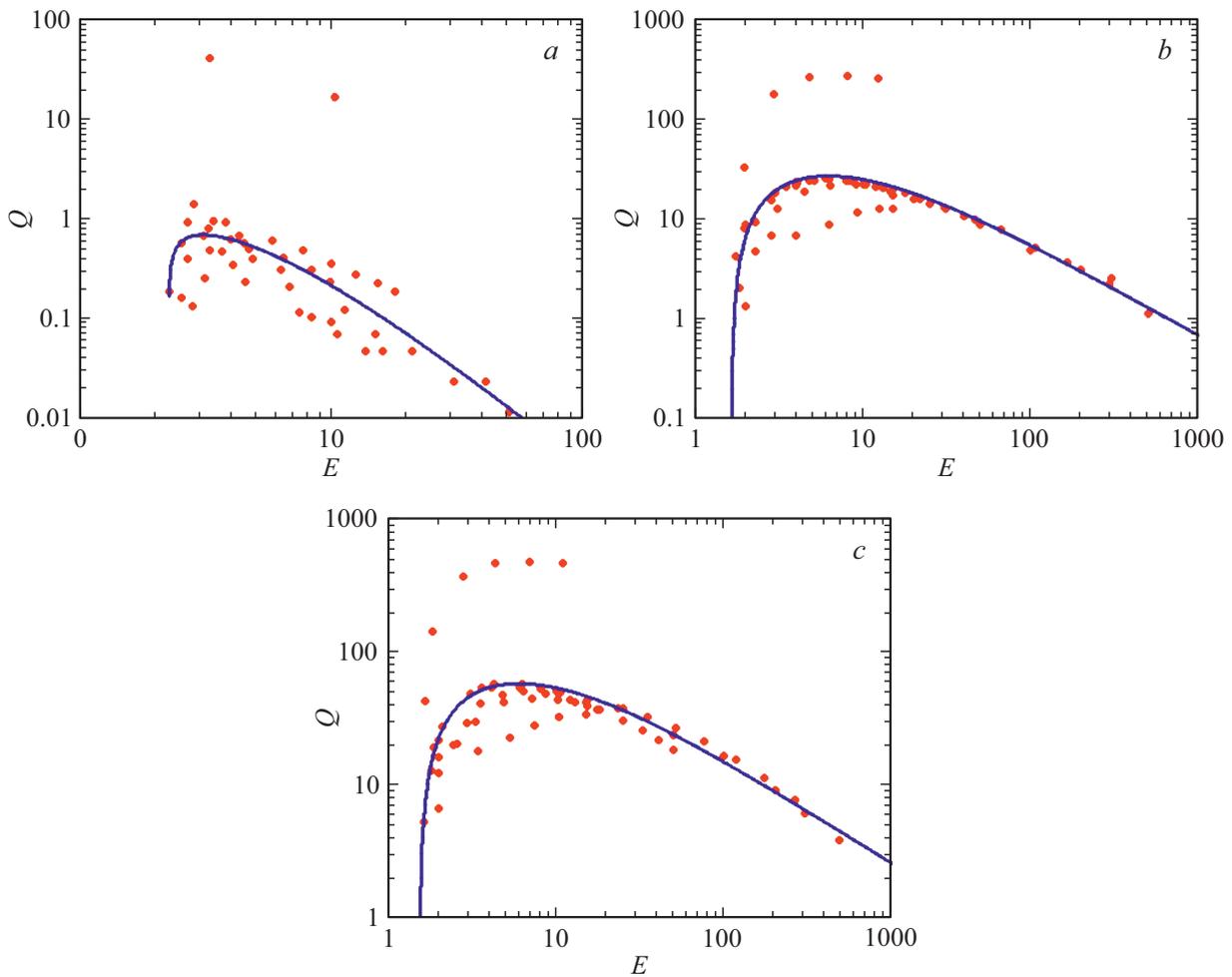


Рис. 2. Сечение Q (10^{-16} см²) возбуждения перехода (a) $1s_5-2p_2$, (b) $1s_6-2p_6$, (c) $1s_5-2p_9$ в зависимости от энергии электронов E (eV). Точки — данные информационных источников, сплошная линия — регрессионная кривая.

чем на порядок превосходит заселенность остальных уровней $5s$). В экспериментальных работах [16,17] использовались пучок метастабильных атомов и оптическая регистрация излучающих уровней. В теоретической работе [18] сечения вычислялись на основе двух методов — полурелятивистского метода R -матрицы (метод Брейта–Паули) и метода искаженных волн. В теоретической работе [19] использован релятивистский метод R -матрицы. Работа [20] базируется на релятивистском методе искаженных волн.

Полученные результаты для зависимости сечений электронного возбуждения от энергии электрона представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2. В таблицах приводится относительная дисперсия D , параметры регрессии p , пороговая энергия ΔE (eV), а также энергия и величина сечения в максимуме E (eV), Q (10^{-16} см²). Таблица 1 содержит данные для возбуждения из метастабильного уровня $1s_3$, а табл. 2 — для возбуждения из метастабильного уровня $1s_5$. На рис. 1 представлены данные для возбуждения из метастабильного уровня $1s_3$, а на рис. 2 — для возбуждения из метастабильного

уровня $1s_5$. Точками представлена вся совокупность значений сечений из рассмотренных информационных источников, сплошная линия — регрессионная кривая.

Как отмечалось выше, регрессионной кривой имеет смысл пользоваться только в том диапазоне энергий электронов, в котором имеются исходные данные. Экстраполяция на большие энергии может быть не обоснована. Для представляемых в работе результатов обоснованным диапазоном энергий можно считать энергии от порога возбуждения до 100 eV. Для переходов $1s_5-2p_6$ и $1s_5-2p_9$ этот диапазон простирается до 1000 eV.

Отметим, что полученные результаты для сечений коррелируют с силами осцилляторов для оптических переходов между соответствующими уровнями. Большими силами осцилляторов обладают переходы $1s_3-2p_{3,4}$ и $1s_5-2p_{1,6-10}$ [16,17]. Из приведенных данных видно, что сечения возбуждения велики именно для этих переходов. Кроме того, у них наименьшая скорость спада сечения в зависимости от энергии электрона — параметр $p_3 \sim 1$. Для оптически слабых переходов соответствующий параметр заметно больше — $p_3 \sim 3$, что характерно для

Таблица 1. Возбуждение из состояния $1s_3$ атома криптона: относительная дисперсия D , параметры регрессии p_0 – p_3 , порог возбуждения ΔE , энергия электрона и сечение в максимуме E , Q

upper level	D	$p_0, 10^{-16} \text{ cm}^2$	p_1	p_2	p_3	$\Delta E, \text{ eV}$	$E, \text{ eV}$	$Q, 10^{-16} \text{ cm}^2$
$2p_1$	0.58	512.4	0.753	3.436	3.929	1.7	2.55	1.03
$2p_2$	0.70	2096	2.113	1.537	4.118	1.58	2.65	11.7
$2p_3$	0.36	242.7	2.146	0.594	0.789	1.58	5.36	48.4
$2p_4$	0.43	562.8	1.313	4.959	0.937	1.54	5.92	55.3
$2p_5$	1.32	6.261	2.148	0.058	2.159	1.11	1.37	2.51
$2p_6$	0.89	9.122	0.82	0.765	1.918	0.99	1.34	2.45
$2p_7$	1.15	370.5	0.827	8.231	2.181	0.97	2.41	1.69
$2p_8$	1.15	945.9	0.816	9.914	2.425	0.88	2.22	1.70
$2p_9$	1.42	109.6	2.248	0.192	2.472	0.88	1.21	24.0
$2p_{10}$	0.36	677.5	0.79	12.94	1.604	0.74	2.43	6.45

Таблица 2. Возбуждение из состояния $1s_5$ атома криптона: относительная дисперсия D , параметры регрессии p_0 – p_3 , порог возбуждения ΔE , энергия электрона и сечение в максимуме E , Q

upper level	D	$p_0, 10^{-16} \text{ cm}^2$	p_1	p_2	p_3	$\Delta E, \text{ eV}$	$E, \text{ eV}$	$Q, 10^{-16} \text{ cm}^2$
$2p_1$	0.87	18.23	0.154	3.426	0.943	2.35	3.38	4.24
$2p_2$	1.07	7.49	0.409	2.169	2.02	2.23	3.07	0.67
$2p_3$	1.20	834.7	0.494	14.48	2.605	2.23	5.13	0.48
$2p_4$	1.50	359.6	0.251	5.648	3.679	2.19	2.87	0.35
$2p_5$	1.09	43.31	0.953	1.827	3.643	1.76	2.49	0.71
$2p_6$	0.75	266	1.258	5.05	0.93	1.64	5.15	34.0
$2p_7$	1.12	16.51	1.065	0.568	0.85	1.62	3.24	7.28
$2p_8$	0.96	66.91	1.902	0.458	0.871	1.53	4.10	20.1
$2p_9$	0.76	413.5	1.06	5.61	0.786	1.53	5.46	59.1
$2p_{10}$	0.21	59.63	1.412	1.19	0.551	1.39	5.14	18.1

расчетных сечений возбуждения запрещенных переходов с учетом обмена [21].

Заключение

Представлены данные для сечений возбуждения электронным ударом уровней $4p^5 5p$ атома криптона из метастабильных состояний $4p^5 5s^3 P_{0,2}$. Они отражают совокупный результат из имеющихся данных, включая результаты собственных измерений авторов, и получены на основе развитого ранее подхода к представлению совокупной информации по сечениям электронно-атомного рассеяния.

Такой подход позволяет учитывать весь набор доступных значений, полученных независимо разными авторами различными теоретическими и экспериментальными методами. Примечательно, что подход позволяет объединить результаты, полученные различными методами в узком диапазоне энергий, и распространить его на широкий диапазон энергий электронов. Этот вывод очень важен для плазменных приложений, которые требуют знания констант скоростей процессов в широкой области изменения энергий электронов. Из

общих принципов статистики следует, что данные, полученные на основе описанного подхода, представляются более надежными, чем данные любого конкретного информационного источника. Значение относительной дисперсии D указывает на реальную точность, с которой сечения известны на настоящий момент. Как видно из полученных результатов, эта величина для процесса возбуждения электронным ударом из метастабильных состояний криптона на уровни конфигурации $4p^5 5p$ составляет от 0.2 до 1.5.

Полученные результаты для сечений коррелируют с силами осцилляторов для оптических переходов между соответствующими уровнями. Из приведенных данных видно, что сечения возбуждения велики для оптически сильных переходов. Эти переходы имеют наименьшую скорость спада сечения в зависимости от энергии электрона. Для оптически слабых переходов скорость спада заметно больше.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Yamazaki S. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. P. 2121–2128.
- [2] *Harada Y., Masuda S., Ozaki H.* // Chem. Rev. 1997. V. 97. P. 1897–1952.
- [3] *Белова О.М., Бычков К.В., Морченко Е.С., Низамов Б.А.* // Астрономический журн. 2014. Т. 91. № 9. С. 745–761.
- [4] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. В. 4 (230). С. 48–60; *Mityureva A.A., Smirnov V.V.* // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Phys. and Math. 2015. V. 1. P. 372–380. doi 10.1016/j.spjpm.2016.02.004
- [5] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 74. В. 1. С. 6–11.
- [6] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 6. С. 933–938.
- [7] *Митюрева А.А., Смирнов В.В., Пономаренко Г.А.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 3. С. 368–374.
- [8] *Mityureva A.A., Smirnov V.V.* // Russian J. Phys. Chem. 2002. V. 76. N 1. P. S109–S114.
- [9] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 2004. Т. 97. № 4. С. 544–558.
- [10] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 2016. Т. 121. № 6. С. 24–30; *Mityureva A.A., Smirnov V.V.* // Opt. Spectrosc. 2016. V. 121. N 6. P. 804–809. doi 10.1134/S0030400X16120183
- [11] *Митюрева А.А., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 3. С. 360–365.
- [12] *Suno H., Kato T.* // NIFS-Data-91 2005
- [13] *Suno H., Kato T.* // At. Data Nucl. Data Tabl. 2006. V. 92. P. 407–455. doi 10.1016/j.adt.2006.01.001
- [14] *Митюрева А.А., Пенкин Н.П., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 1989. Т. 67. В. 4. С. 785–787.
- [15] *Митюрева А.А., Пенкин Н.П., Смирнов В.В.* // Опт. и спектр. 1989. Т. 66. В. 2. С. 243–247.
- [16] *Jung R.O., Stone T.E., Boffard J.B., Anderson L.W., Lin C.C.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 163202.
- [17] *Jung R.O., Stone T.E., Boffard J.B., Anderson L.W., Lin C.C.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 73. P. 022722. doi 10.1103/PhysRevA.73.022722
- [18] *Dasgupta A., Bartschat K., Vaid D., Grum-Grzhimailo A.N., Madison D.H., Blaha M., Giuliani J.L.* // Phys. Rev. A. 2002. V. 65. P. 042724. doi 10.1103/PhysRevA.65.042724
- [19] *Zeng J., Wu J., Jin F., Zhao G., Yuan J.* // Phys. Rev. A. 2005. V. 72. P. 042707. doi 10.1103/PhysRevA.72.042707
- [20] *Chen Z.B.* // Indian J. Phys. 2019. V. 93. N 11. P. 1391–1397. doi 10.1007/s12648-019-01412-y
- [21] *Очкур В.И.* // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. № 3(9). С. 734–741.