

02;07

©1993 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИН АБСОЛЮТНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ МЕДЛЕННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ K^+ С АТОМАМИ He

М.Р.Гочиташвили, Р.В.Квицинадзе, Н.Р.Джалилашвили, Б.И.Кикиани

Определены абсолютные значения сечений излучения резонансных линий иона калия и атомов калия и гелия при столкновениях ионов калия с атомами гелия в области энергии 0.5–10 кэВ. Проведена абсолютная калибровка системы регистрации излучения в видимой (400.0–800.0 нм) и вакуумно-ультрафиолетовой (50.0–130.0 нм) областях спектра. Построена корреляционная диаграмма молекулярных состояний системы $(K-He)^+$. Обсужден механизм неупругих процессов возбуждения этих линий на основе анализа экспериментальных результатов и корреляционной диаграммы молекулярных состояний системы $(K-He)^+$.

Введение

При исследовании возбуждения в процессах столкновения атомных частиц очень важным является надежное определение абсолютных величин сечений излучения спектральных линий или молекулярных полос. Такие данные необходимы при выяснении механизма неупругих процессов столкновения. Кроме того, они используются в различных смежных областях физики и техники (физика плазмы, газовый разряд и др.).

Абсолютные величины сечений излучения, измеренные разными авторами, часто противоречивы и отличаются друг от друга иногда в несколько раз. В большинстве случаев такое разногласие определяется экспериментальными трудностями проведения относительной и абсолютной по длинам волн калибровки системы регистрации излучения. Особенно это касается калибровки в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра. Существующие в настоящее время абсолютные стандарты интенсивности излучения в этой области спектра, такие как синхротронное излучение и стабилизированный плазменный шнур, не нашли пока широкого применения в лабораторной практике. Что касается использования фотоионизационных камер, то с помощью них абсолютные измерения можно проводить для ограниченного числа ионно-атомных и ионно-молекулярных пар

Экспериментальная установка, использованная нами, подробно описана в работе [1]. Примененный в настоящей работе способ абсолютной калибровки системы регистрации излучения в видимой (391.4–747.3 нм) и ВУФ (50.0–130.0 нм) областях спектра основан на тщательном анализе имеющихся в литературе многочисленных экспериментальных и расчетных данных по абсолютным значениям сечений высвечивания отдельных линий атомов и ионов, а также молекулярных полос, возбуждаемых при столкновениях различных пар частиц.

Результаты калибровки были использованы для определения абсолютных значений сечений возбуждения некоторых линий при столкновениях $K^+ - He$ с целью выяснения механизма разных неупругих процессов при этих столкновениях.

1. При проведении калибровки системы регистрации излучения в видимой области спектра использовались данные по возбуждению молекулярных полос первой отрицательной системы (переход $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$) и системы Мейнела (переход $A^2\Pi_u - X^2\Sigma_g^+$) иона азота при столкновениях электронов и протонов с молекулами N_2 . Прежде всего определялись отношения между сечениями, которые соответствовали полосам с одним и тем же верхним колебательным уровнем. Считалось, что вероятность распада возбужденного колебательного уровня данного электронного состояния не зависит от природы и энергии налетающей частицы. Это связано с тем, что распад возбужденного уровня происходит в изолированной частице, так как время взаимодействия сталкивающихся частиц ($\sim 10^{-15} - 10^{-16}$ с) на несколько порядков меньше времени распада возбужденных состояний атомных частиц ($\sim 10^{-8}$ с).

Для того чтобы связать относительные сечения излучения полос разных молекулярных систем, были использованы данные по возбуждению молекулярных полос иона N_2^+ при столкновениях $e - N_2$ [2^{-6}] и $H^+ - N_2$ [$2,4,5-7$]. При этом были использованы те абсолютные данные других авторов, которые хорошо согласовались между собой. Это позволило провести относительную по длинам волн калибровку системы регистрации излучения в широкой области спектра и дало возможность уточнить надежность имеющихся в литературе абсолютных значений соответствующих сечений. Результаты проведенного нами анализа приведены в таблице. В частности, в ней даются перечень рассматриваемых полос и соответствующих им длин волн, а также усредненные значения сечений возбуждения этих полос по данным разных работ для пар частиц $e - N_2$ и $H^+ - N_2$, нормированных на сечение возбуждения полосы (0,1) первой отрицательной системы иона N_2^+ ($\lambda = 427.8$ нм). В последнем столбце таблицы приведен перечень используемой литературы.

В условиях нашего эксперимента измерялись величины сигналов соответствующих полос, указанных в таблице, возбуждаемых при столкновениях электронов с энергией 110 эВ с молекулой N_2 .

Кривые относительных сечений полос разных систем "сшивались" с помощью усредненных данных разных авторов в широком диапазоне спектра. Нормировка величин сигналов полос производилась на величину сигнала полосы (0,1) $\lambda = 427.8$ нм, абсолютное значение сечения возбуждения которой по данным работы [2] равняется $5.3 \cdot 10^{-18}$ см².

Аналогичная процедура применялась в ВУФ диапазоне спектра. В качестве эталонов в этом случае использовались абсолютные значения

$V' - V''$	Кант $\lambda, \text{нм}$	$\frac{\sigma(\lambda)}{\sigma(427.8)}$	Литература
------------	---------------------------	---	------------

1-ая отрицательная система $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$

(0, 0)	391.4	3	[2-5,7]
(1, 2)	423.6	0.14	[2-5,7]
(0, 1)	427.8	1	[2-5,7]
(1, 3)	465.2	0.056	[2-5,7]
(0, 2)	470.9	0.21	[2-5,7]
(1, 4)	514.9	0.014	[2-5,7]
(0, 3)	522.8	0.038	[2-5,7]
(0, 4)	586,5	0.0062	[2,5]

Система Мейнела $A^2\Pi_u - X^2\Sigma_g^+$

(6, 0)	504.9	0.0014	[2,6]
(5, 0)	553.0	0.0078	[2,6]
(6, 1)	567.1	0.013	[2,6]
(4, 0)	612.4	0.048	[2,4,6]
(5, 1)	628.6	0.058	[2,4,6]
(6, 2)	645.6	0.042	[2,6]
(3, 0)	687.4	0.25	[2,4]
(4, 1)	703.7	0.22	[2,4,6]
(5, 2)	724.0	0.12	[2,4,6]
(6, 3)	747.3	0.05	[2,6]

сечений высвечивания отдельных атомарных линий и молекулярных полос, которые были измерены в разных работах. В частности, рассматривались линии иона аргона $\lambda = 92.0, 93.2$ нм, линии атома аргона $\lambda = 104.8, 106.7$ нм, возбуждаемые при столкновениях электронов с энергией 100 эВ с атомами аргона [8,9]. Использовались также полосы Вернера (переход $C^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$) молекулярного водорода (0,2), (1,3), (1,4), (2,5) и атомарная линия водорода L_α ($\lambda = 121.6$ нм), возбуждаемые при столкновениях электронов с энергией 100 эВ с молекулами водорода [10,11], а также линии атомов и ионов кислорода, возбуждаемые при столкновении электронов с энергией 200 эВ с молекулами кислорода [11-13]. Абсолютные значения сечений высвечивания указанных линий и полос нормировались на значение сечения линии L_α ($1.2 \cdot 10^{-17}$ см²), измеренное в работе [11] при столкновениях электронов с энергией 100 эВ с молекулами H_2 .

В условиях нашего эксперимента измерялись величины сигналов всех перечисленных линий и полос при их возбуждении в процессах столкновения электронов с энергией 110 и 200 эВ с атомами Ag и молекулами H_2 и O_2 . На рис. 1 приведен спектр излучения полос Вернера и линий атома водорода L_α при столкновениях $e - H_2$ для значения энергии электронов $E = 110$ эВ.

Используя результаты указанных выше работ, построили кривые относительной спектральной чувствительности системы регистрации излучения нашей экспериментальной установки в видимой (рис. 2,а) и ВУФ

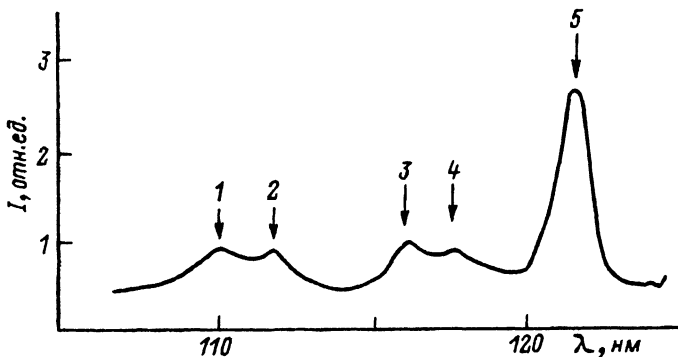


Рис. 1. Спектр излучения полос Вернера и линий L атома водорода. Полосы Вернера: 1 — (0, 2); 2 — (1, 3); 3 — (1, 4); 4 — (2, 5); 5 — линия L_{α} .

(рис. 2, б) областях спектра. Как видно из рисунка, максимальная чувствительность системы регистрации излучения в видимой области спектра наблюдается в диапазоне длин волн 500–600 нм, а в ВУФ области — в диапазоне 100–110 нм. Погрешность в измерении относительной спектральной чувствительности $K(\lambda)/K(\lambda_0)$ в видимой области спектра оценивается нами как $\sim \pm 5\%$, а в ВУФ области — $\sim \pm 15\%$.

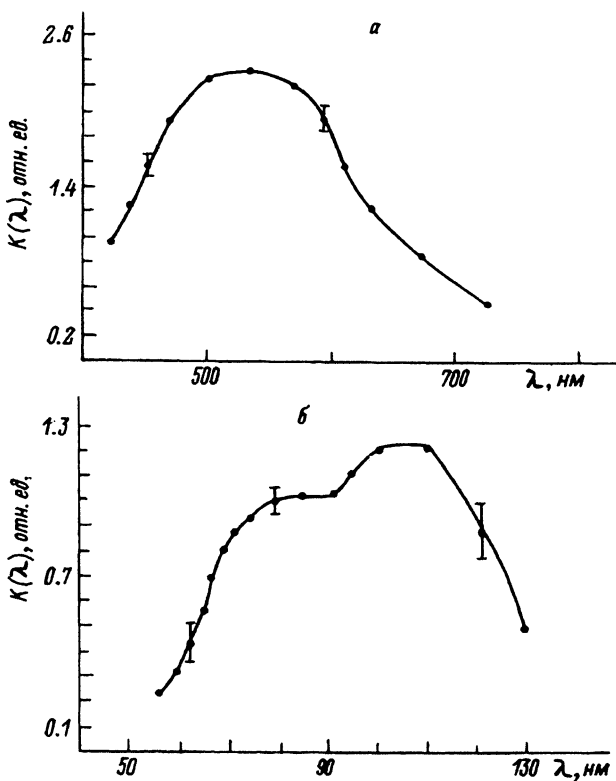


Рис. 2.

а — кривая относительной спектральной чувствительности в видимой области спектра, б — в вакуумно-ультрафиолетовой области спектра.

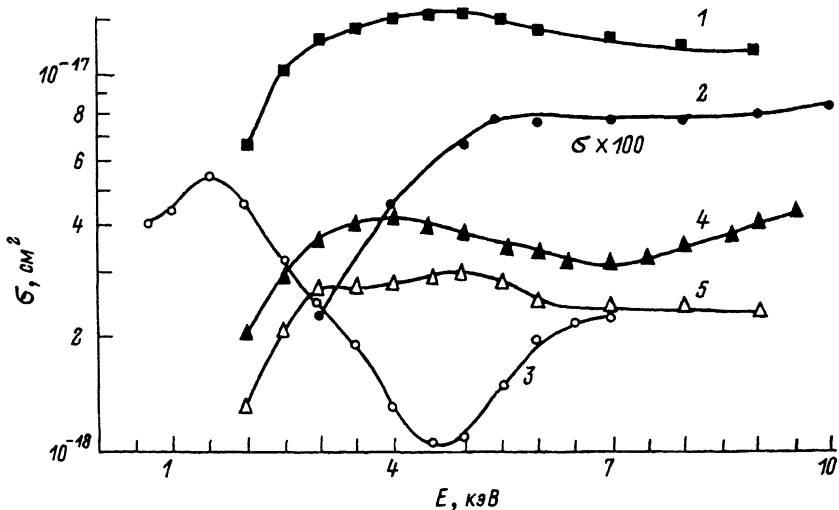


Рис. 3. Зависимости сечений возбуждения линии $\sigma(\lambda)$ и сечения перезарядки σ_c от энергии ионов K^+ при столкновении K^+-He .

1 — KII (60.1 нм), 2 — KI (766.5 нм), 3 — σ_c [15], 4 — HeI (58.4 нм), 5 — KII (61.2 нм).

2. Пара K^+-He является типичным примером столкновения тяжелой и легкой частиц с замкнутыми электронными оболочками. Анализ обзорного спектра показал, что при столкновениях этих частиц в интервале энергии 0.5–10 кэВ в основном возбуждаются линии HeI (переход $2p-1s$, $\lambda = 58.4$ нм), KI (переход $4p-4s$, $\lambda = 766.5$ нм), KII (переход $4s'-3p$, $\lambda = 60.1$ нм), KII (переход $4s-3p$, $\lambda = 61.2$ нм). На рис. 3 приводятся зависимости абсолютных сечений возбуждения этих линии от энергии налетающей частицы. Суммарная погрешность абсолютных измерений составляет $\sim 30\%$ и в основном определяется погрешностью абсолютной калибровки системы регистрации излучения. В частности, в видимой области спектра определяются погрешностью измерения сечений полосы 427.8 нм при столкновениях $e-N_2$, а ВУФ области — погрешностью

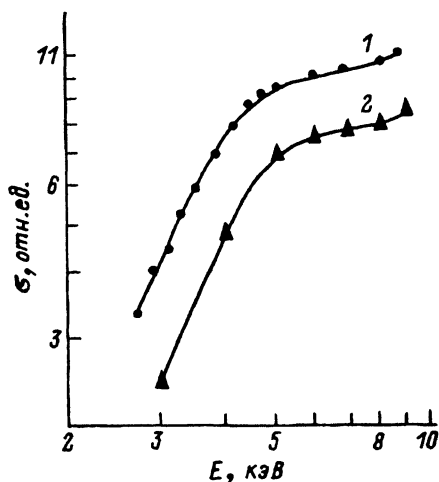


Рис. 4. Функции возбуждения линии атома и иона калия при столкновении K^+-He .

1 — KI (766.5 нм), 2 — KII (388.9 нм).

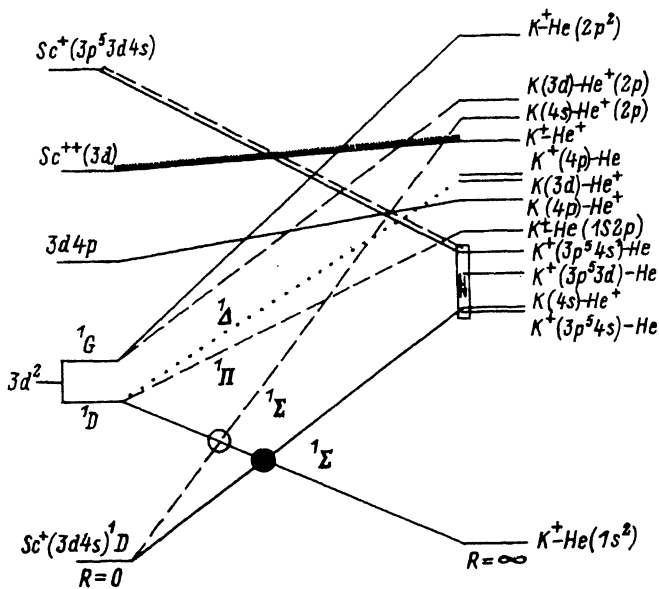


Рис. 5. Корреляционная диаграмма МС системы (К-He)⁺.

измерения сечений линии атома водорода L_α при столкновениях $e-\text{H}_2$. Большая точность ($\sim 5\%$) достигнута в определении относительной величины сечения в зависимости от энергии ионов.

Перейдем к обсуждению полученных результатов. На рис. 4 приведены функции возбуждения резонансной линии атома калия и линии иона калия K^+ (переход $4p-4s$, $\lambda = 388.9$ нм). Из рисунка видно, что функции возбуждения этих линий подобны, что, по-видимому, указывает на общность механизма заселения этих каналов. Для объяснения этого результата целесообразно воспользоваться корреляционной диаграммой молекулярных состояний (МС) системы $(\text{KHe})^+$ (рис. 5), построенной нами с помощью правила корреляции Бара-Лихтена [14]. Из диаграммы видно, что терм, отвечающий возбуждению состояния $\text{K}(4p)$, непосредственно не пересекается с термом основного состояния, но может заселить терм, отвечающий возбуждению состояния $\text{K}(3d)$ в результате двойного вращательного перехода $\Sigma-\Pi-\Delta$ между входным термом системы и термом состояния $\text{K}(3d)-\text{He}^+$. Ввиду того что термы состояний $\text{K}^+(4p)-\text{He}(1s^2)$ и $\text{K}(3d)-\text{He}^+(1s)$ на больших межъядерных расстояниях энергетически очень близки (дефект энергии ~ 4 эВ), обменное взаимодействие между этими состояниями может привести к заселению одного из них посредством другого и, следовательно, к одинаковому энергетическому ходу сечений. В свою очередь возбуждение $4p$ -уровня атома калия может быть обусловлено существенным вкладом каскадного перехода с уровня $3d$ на $4p$. Вероятность заселения $3d$ -уровня атома калия очень мала (из-за малой вероятности перехода $\Sigma-\Pi-\Delta$), чем и объясняется аномальная малость сечения возбуждения состояния $\text{K}(4p)$ и линии KI ($\lambda = 388.9$ нм) по данным работы [2]. Следовательно, можно утверждать, что заселение $4p$ -уровней иона и атома калия связано главным образом с заселением $3d$ -состояния атома калия.

Сравнение наших результатов по возбуждению резонансной линии атома калия с результатами полного сечения перезарядки при этих столкновениях [15] показывает, что перезарядка главным образом связана с захватом электрона в основное состояние атома калия. Из корреляционной диаграммы (рис. 5) следует, что этот процесс обусловлен Σ - Σ -взаимодействием типа Ландау-Зинера между термами $K^+(3p^6)-He(1s^2)$ и $K(4s)-He^+(1s)$.

Определенный интерес представляет сравнение кривых энергетической зависимости сечения излучения резонансных линий иона калия ($\lambda = 60.1, 61.2$ нм) и полного сечения перезарядки σ_c [15] (рис. 3). Согласно диаграмме, заселение $K^+(4s, 4s')$ осуществляется через состояние $K(4s)-He^+(1s)$ за счет обменного взаимодействия между термами этих состояний. Возможность корреляции между этими состояниями подтверждается данными, приведенными на рис. 3. В частности, как видно из рисунка, положение минимума кривой энергетической зависимости полного сечения перезарядки совпадает с положением максимума кривой энергетической зависимости сечения высвечивания резонансного уровня иона $K^+(4s, 4s')$, причем величина сечения высвечивания в области максимума примерно соответствует глубине провала в энергетической зависимости сечения перезарядки. Далее из рис. 3 следует, что сечение возбуждения состояния $K^+(4s')$ значительно больше сечения возбуждения состояния $K^+(4s)$. По-видимому, это связано с тем, что дефект энергии на бесконечности между состояниями $K(4s)-He^+$ и $K^+(4s)-He$ ($\Delta E_1 \sim 0.3$ эВ) больше, чем между состояниями $K(4s)-He^+$ и $K^+(4s)-He$ ($\Delta E_2 \sim 0.001$ эВ). В последнем случае обменное взаимодействие происходит на больших межъядерных расстояниях, когда обмен внутреннего электрона атома калия и внешнего электрона атома гелия маловероятен, что касается возбуждения состояния $K^+(4s')$, то этот процесс характеризуется большим энергетическим расщеплением между термами состояния $K(4s)-He^+$ и $K^+(4s')-He(1s^2)$ и обменное взаимодействие происходит на сравнительно малых межъядерных расстояниях и более существенно.

Возбуждение резонансной линии атома гелия $HeI(2p-1s)$ характеризуется структурой на кривой функции возбуждения. Это может быть обусловлено вкладом различных каналов возбуждения в различных областях энергии. В частности, в области сравнительно малых энергий возбуждение $He(2p)$ может происходить, как и в случае $K^+(4s, 4s')$, за счет обменного взаимодействия через промежуточное состояние, отвечающее каналу $K(4s)-He^+(1s)$. В области же больших энергий возбуждение $He(2p)$ может происходить за счет вращательного Σ - Π -перехода между термами, отвечающими системам $K^+-He(1s^2)$ и $K^+-He(1s2p)$ (рис. 5).

Основными результатами настоящей работы являются проведение абсолютной калибровки системы регистрации излучения в видимой и ВУФ областях спектра и определение значения абсолютных сечений возбуждения резонансных линий атома калия, иона калия и атома гелия при столкновениях K^+-He . Показано, что для системы частиц с замкнутыми электронными оболочками (K^+, He) использование правил корреляции Бара-Лихтена для одноэлектронных орбиталей позволяет построить корреляционную диаграмму МС, которая качественно правильно описывает экспериментальные результаты.

Авторы выражают глубокую благодарность С.В.Бобашеву за постоянный интерес к настоящей работе.

Список литературы

- [1] Кикиани Б.И., Гочиташвили М.Р., Квицинадзе Р.В., Анкудинов В.А. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. Вып. 6(12). С. 1906-1913.
- [2] Скубенич В.В., Запесочный И.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. № 3. С. 481-488.
- [3] Pedleton W.R., O'Neil R.R // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 56. N 12. P. 6260-6262.
- [4] Stanton P.N., St.John R.M. // J. Opt. Soc. 1969. Vol. 50. N 11. P. 252-260.
- [5] Лаеров В.М., Гочиташвили М.Р., Анкудинов В.А., Кикиани Б.И. // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. Вып. 2. С. 516-529.
- [6] Cartwright D.C. // J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. N 1. P. 178-185.
- [7] Philpot J.L., Hughes R.H. // Phys. Rev. 1964. Vol. 133A. N 1. P. 107-110.
- [8] Tan K.H., Mc Conkey J.W. // Phys. Rev. A. 1974. Vol. 10. N 4. P. 1212-1215.
- [9] Tan K.H., Donaldson F.J., Mc Conkey J.W. // Can. J. Phys. 1974. Vol. 52. P. 786-791.
- [10] Stone E.J., Zipf E.C. // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 56. N 9. P. 4646-4651.
- [11] Mumma M.J., Zipf E.C. // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. P. 1661-1669.
- [12] Ajello J.M., Franklin B. // J. Chem. Phys. 1985. Vol. 82. N 6. P. 2519-2525.
- [13] Mental J.E., Morgan H.D. // VIII ICPEAC. Beograd, 1973. P. 363.
- [14] Barat M., Lichten W. // Phys. Rev. A. 1972. Vol. 6. P. 211-229.
- [15] Кикиани Б.И., Ломсадзе Р.А., Гочиташвили М.Р., Мосулишвили Н.О., Лаеров В.М. // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. Вып. 1. С. 792-803.

Тбилисский университет

Поступило в Редакцию
10 июля 1992 г.