

УДК 539.186.3

О ТИПЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ТУШЕНИИ
МЕТАСТАБИЛЬНЫХ И РЕЗОНАНСНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ
АТОМОВ ГЕЛИЯ

С. А. ТЕР-АВЕТИСЯН

Институт физических исследований АН Армении

(Поступила в редакцию 16 июня 1991 г.)

Рассматривается альтернативный подход определения типа взаимодействия возбужденных атомов гелия в резонансных тушениях $He^* + B \rightarrow He + B^+ + e$. Показано, что в процесс ионизации включаются дополнительные каналы взаимодействия, зависящие от состояния возбужденного атома. Эти взаимодействия существенно отличаются от использованного до сих пор приближения $U(R) \sim R^{-6}$.

Важнейшими процессами в низкотемпературной плазме газового разряда являются неупругие столкновения возбужденных атомов с невозбужденными, приводящие к ионизации последнего



Это с одной стороны один из главных источников ионов, а с другой — эффективный канал тушения нижних, наиболее заселенных состояний. Если атом A^* находится в метастабильном состоянии, то процесс (1) обычно называют ионизацией Пеннинга. Обширная литература, посвященная пеннинговской ионизации, наиболее полно отражена в обзорах [1, 2]. Однако до сих пор остается некоторая неясность в механизме пеннинговской ионизации и в типе взаимодействия сталкивающихся частиц, хотя расчеты соответствующих сечений производились в предположении, что энергия взаимодействия в исходном канале реакции (1) описывается потенциалом $U(R) = -C/R^6$.

Настоящая работа посвящена определению типа взаимодействия по имеющимся в литературе разрозненным экспериментальным данным в предположении, что между сталкивающимися частицами возникают далекодействующие дисперсионные силы с энергией взаимодействия, описываемой потенциалом

$$U(R) = -\frac{C}{R^n} \quad (C > 0, n > 0). \quad (2)$$

Теоретическая трактовка ионизации Пеннинга основана на аналогии с расходом автоионизационных состояний, так как в процессе (1) начальное дискретное электронное состояние квазимолекулы $(A^* - B)$ по-

гружено в непрерывный спектр конечных состояний ($A-B^+$). Скорость распада квазимолекулы связана с шириной $\Gamma(R)$ этого автоионизационного уровня при заданном расстоянии R между ядрами. В области энергии столкновений E намного большей, чем глубина потенциала взаимодействия ϵ ($E \gg \epsilon$), то есть когда существует однозначная связь между расстоянием наибольшего сближения ядер r_0 и прицельным параметром и процесс в основном протекает в отталкивательном потенциале взаимодействия атомов в начальном канале, имеет место рост сечения пеннинговского процесса с увеличением энергии столкновения частиц [3, 4]. Действительно, с увеличением энергии столкновения достигаются более близкие расстояния между частицами, на которых из-за большой ширины автоионизационного уровня $\Gamma(R)$ ионизация протекает с большей вероятностью.

При малых кинетических энергиях сталкивающихся частиц, сечение процесса ионизации (1) дается формулой [5]:

$$\sigma_{\Pi} = f_{\infty} P_1 \sigma_{\text{захв}}, \quad (3)$$

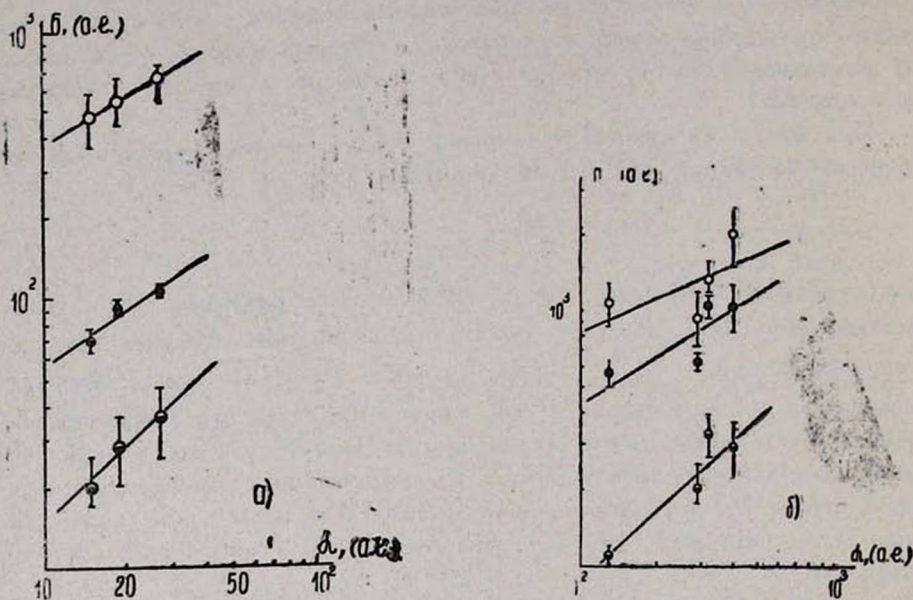
где f_{∞} — вероятность того, что данный процесс разрешен по полному электронному спину, P_1 — вероятность ионизации при сближении сталкивающихся частиц, $\sigma_{\text{захв}}$ — сечение захвата возбужденного атома сталкивающейся с ней частицей. В (3) ионизация имеет место при сильном сближении сталкивающихся частиц за счет захвата в потенциале притяжения действующего между ними. В соответствии с результатами оценки в работе [6] вероятность ионизации щелочных металлов равна единице, а для инертных газов [7] она меняется незначительно от 0,11 до 0,15.

Исходя из (2), сечение захвата описывается формулой

$$\sigma_{\text{захв}} = \pi n (n-2)^{\frac{2-n}{n}} \left(\frac{C}{mv_{\infty}^2} \right)^{\frac{2}{n}}, \quad (4)$$

где m — приведенная масса сталкивающихся частиц, v_{∞} — скорость на бесконечности. Указанная зависимость сечения ионизации от скорости подтверждается многими экспериментальными данными. Так, в [8] измерялась зависимость сечения пеннинговского процесса от скорости столкновения $\text{Ne}(^3P_2)$ с атомами аргона, криптона и ксенона в области скоростей столкновения $v = (0,3-1,7) \cdot 10^5$ см/с. Из наклона k кривой логарифмической зависимости сечения ионизации от v был определен тип взаимодействия, то есть определено n по формуле (4); $k=4/n$. Для столкновений метастабильного неона с атомами аргона, криптона и ксенона было получено, соответственно, $n=6,45$; $5,48$; $4,6$. В работе [3] было получено $n=4$ для $\text{Ne}(^3P_2)-\text{Kr}$, что значительно отличается от приведенного выше значения. Конечно, n может меняться с расстоянием R , что означает зависимость k от скорости столкновений. В [3] при малых скоростях столкновений $\text{He}(2^3S)$, $\text{He}(^3P_{2,0})$, $\text{Ar}(^3P_{2,0})$ с атомами

Fig. $n=6$, указывая на Ван-дер-Ваальсовский характер притяжения у этих систем при больших расстояниях. При малых расстояниях, то есть при больших скоростях для $\text{He}(2^1S)$, $\text{Ne}(^3P_{2,0})$ — Hg силы притяжения хорошо описываются диполь-квадрупольным взаимодействием и $n=4$. В случае столкновения $\text{He}(2^1S)$ — Hg , при больших расстояниях между частицами, притяжение описывается $n=2,66$, указывая на «химический» тип взаимодействия.



На рисунке 1 представлены зависимости сечений ионизации атомов а) Ar , Kr , Xe и б) Na , K , Rb , Cs от их поляризуемости, при столкновении с возбужденными атомами гелия в состояниях: $\circ$ — 2^1P_1 , $\bullet$ — 2^1S_0 , $\ominus$ — 2^3S_0 . (Значения сечений взяты из работ [10—12]).

В настоящей работе используется следующий альтернативный подход. Так как в исходном канале взаимодействия один из атомов находится в возбужденном состоянии, то согласно [9], можно написать $\sigma = \alpha \bar{r}^2$, где α — поляризуемость атома В в основном состоянии, $\bar{r}^2$ — квадрат орбиты возбужденного электрона атома A^* , усредненный по его состояниям. Так как из (4)

$$\ln \sigma_{\text{взв}} = \frac{2}{n} \ln \alpha + \ln \frac{\pi n}{n-2} \left(\frac{\bar{r}^2}{2E} (n-2) \right)^{\frac{2}{n}},$$

то для определенной энергии взаимодействия график зависимости сечения ионизации от поляризуемости невозбужденных атомов (см. рис. а и б) определенной группы периодической системы элементов, даст возможность определить тип взаимодействия из наклона $k=2/n$. Получен-

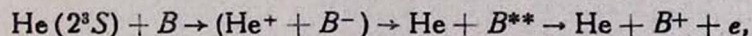
ные нами значения Π и соответствующие ссылки приведены в таблице. Когда во взаимодействии участвуют метастабильные атомы гелия в состоянии 2^1S , то независимо от ионизируемого атома взаимодействие носит диполь-дипольный характер, а в случае 2^3S —ион-дипольный. При взаимодействии резонансно-возбужденных атомов гелия с атомами инертных газов и с атомами щелочных металлов действуют ион-октупольные или диполь—квадрупольные силы притяжения.

Таблица

Атом В	Возбужденный атом A^*		
	He^*		
	2^3S_0	2^1S_0	2^1P_1
Na			
K	$1,9 \pm 0,4$ [11]	$3,2 \pm 0,5$ [11]	$4,3 \pm 0,6$ [11]
Rb			
Cs			
Ar			
Kr	$2,1 \pm 0,1$ [12]	$2,9 \pm 0,1$ [10]	$3,5 \pm 0,1$ [10]
Xe			
Hg		<u>$2,66$ [3]</u>	

Типы взаимодействия Π для процессов столкновений (1). Указаны источники экспериментальных данных. Подчеркнут результат других авторов.

Полученные данные говорят о том, что переход системы из автоионизационного ($A^* \rightarrow B$) состояния на ионный терм ($A \rightarrow B^+$) происходит через включения дополнительных каналов взаимодействия сильно определяющих величину сечения тушения. Например, в случае ионизации метастабильными 2^3S атомами гелия, когда возбужденный электрон не может перейти в основное состояние из-за того, что электростатическое взаимодействие атомов не снимает запрета по спину на триплет-синглетный переход, процесс ионизации можно представить схематически в следующем виде



то есть, имеет место подбарьерный переход электрона между атомами A^* и B . Такое взаимодействие приводит к сближению частиц на малые межъядерные расстояния, где вероятность автоионизации становится очень большой, что подтверждается экспериментально. В случае $He(2^1S)$ кроме реакции (5) возможна также прямая передача возбуждения (удары второго рода) на автоионизационное состояние B^{**} , сечение которой

достаточно велико [13]. Из анализа электронных спектров [14] пеннинговской ионизации в [15] указывалось на то, что механизм ионизации для атомов щелочных металлов и атомов ртути, аргона, криптона и ксенона имеет различный характер. Однако, согласно приведенному анализу, такое различие не наблюдается.

Полученные результаты позволяют исходя из разрозненных измерений предсказать типы взаимодействия (см. таблицу, где экспериментально определена величина ρ лишь в последней строке для ртути). Показано, что ионизационный процесс (1) происходит через дополнительные каналы, приводящие к разным типам взаимодействия, существенно отличающихся от использованного до сих пор приближения $U(R) \sim R^{-6}$ для потенциала взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Б. М. Возбужденные атомы, Энергониздат, М., 1982.
2. *Randel R. D., Stebbing R. F.*, In: Case studies in atomic collision physics, v.2. Ed. by McDaniel E. W. North-Holland, 1972.
3. *E. Illenberger, A. Niehaus*, Z. Phys., B20, 33 (1975).
4. *Woodard M. R.*, et al. J. Chem. Phys., 69, 2978 (1978).
5. *Bates D. R.*, et al. Proc. Phys. Soc., 91, 288 (1967).
6. *Жданов В. П., Чукисов М. И.* Опт. и спектр. 41, 521 (1976).
7. *Bolden R. C.*, et al. J. Phys., B3, 61 (1970).
8. *Tang S. Y.*, et al. J. Chem. Phys., 55, 56 (1972).
9. Смирнов Б. М. Атомные столкновения и электронные процессы в плазме, Атомиздат, М., 1968.
10. *Девдариани А. Э.* и др. ЖТФ, 55, 368 (1985).
11. *Толмачев Ю. А.* Опт. и спектр. 62, 750 (1987).
12. *A. L. Schmeltekopf, F. C. Fenssenfeld*, J. Chem. Phys. 53, 3173 (1970).
13. *Габриелян Ю. К.* и др. ЖПС, 53, 535 (1990).
14. *Куприянов С. Е., Кабанов С. П.* В сб. Химия плазмы, Изд. Атомиздат, М., 3, 189 (1976).
15. *Толмачев Ю. А.* В сб. Химия плазмы, Изд. Энергониздат, М., 9, 80 (1982).

ՀԱՅԻՌԻՄԻ ՄԵՏԱՍՏԱՐԻԼ ԵՎ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՆՏԻՆ-ԳՐԳՈՎԱՆ ԱՏՈՄՆԵՐԻ ՄԱՐՄԱՆ
ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐՈՒՄ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԻՊԻ ՄԱՍԻՆ

Ս. Հ. ՏԵՐ-ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

Քննարկվում է այլընտրական մոտեցում պարզելու համար փոխազդեցության արագը հե-
լիումի զրգոված ատոմների մարման ռեակցիաներում: $\text{He}^* + B \rightarrow \text{He} + B^+ + e$: Ցույց է արված,
որ զրգոված ատոմի մեջ ընդգրկվում են լրացուցիչ փոխազդեցություններ, որոնք կախված են զր-
գոված ատոմի վիճակից: Այդ փոխազդեցությունները էապես տարբերվում են մինչև այժմ օգ-
տագործվող $U(R) \sim R^{-6}$ մոտավորությունից:

ON THE TYPE OF INTERACTIONS IN QUENCHING REACTIONS OF METASTABLE AND RESONANTLY-EXCITED HELIUM ATOMS

S. A. TER-AVETISYAN

An alternative approach to the determination of the type of interactions in
reactions of excited helium atoms quenching: $\text{He}^* + B \rightarrow \text{He} + B^+ + e$ was conside-
red. It is shown that additional interaction channels depending on the state of the
excited atom are involved. These interactions are essentially different from conven-
tional $U(R) \sim R^{-6}$ approximation.