

Шаленов Е.О., Сейсембаева М.М., Джумагулова К.Н., Машеева Р.У.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, НИИЭТФ,
Казахстан, г. Алматы, e-mail: erik.shalenov@gmail.com

СЕЧЕНИЯ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНА РАЗНЫМИ АТОМАМИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

В данной работе приведены результаты численного вычисления радиуса электронного захвата в частично ионизированной плазме. В качестве взаимодействия электрона с атомом был выбран эффективный потенциал взаимодействия, который учитывает эффект экранировки на больших расстояниях и эффект дифракции на маленьких расстояниях. Получены результаты исследования радиуса электронного захвата на основе теории возмущений для разных химических элементов. Также на основе эффективного потенциала взаимодействия электрона с атомом неидеальной квазиклассической плазмы исследованы время захвата и дифференциальное сечение захвата для разных химических элементов. Результаты показали, что для элементов с большим коэффициентом поляризуемости радиус захвата больше. Также вычислены времена взаимодействия электрона с разными атомами. Исследования показали, что с ростом коэффициента поляризуемости дифференциальное сечение захвата увеличивается. Для вычисления электронного захвата был использован метод Бора-Линдхарда.

Ключевые слова: сечение захвата, эффективный потенциал взаимодействия, квазиклассическая плазма, захват электрона, радиус захвата.

Shalenov E.O., Seisembayeva M.M., Dzhumagulova K.N., Masheyeva R.U.

Al-Farabi Kazakh National University, IETP, Kazakhstan, Almaty,
e-mail: erik.shalenov@gmail.com

Electron capture cross sections by different atoms based on the perturbation theory

In this work the results of numerical calculation of the electron capture radius in partially ionized plasma are presented. The effective interaction potential was chosen as the electron-atom interaction, which takes into account the screening effect at large distances and the diffraction effect on small distances. The results on the electron capture radius for different chemical elements were obtained based on the perturbation theory. Also, on the basis of the effective interaction potential of an electron with an atom of a nonideal semiclassical plasma, the capture time and the differential capture cross section for different chemical elements are investigated. The results showed that for large values of polarizability coefficient the electron capture radius increases. On the basis of perturbation theory the interaction time between the electron and other atoms was calculated. Studies have shown that with increasing polarizability coefficient the differential capture cross section rises. For this goal the Bohr-Lindhard method has been applied to obtain the electron capture cross section.

Key words: capture cross section, effective interaction potential, semiclassical plasma, electron capture, capture radius.

Шаленов Е.О., Сейсембаева М.М., Жұмағұлова Қ.Н., Машеева Р.У.

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, ЭТФФЗИ, Қазақстан, Алматы қ.,
e-mail: erik.shalenov@gmail.com**Ұйытқы теория негізінде әртүрлі атомдардың
электронды қарпу қимасы**

Бұл жұмыста жартылай иондалған плазмадағы электронды қарпу радиусының сандық есептеулерінің нәтижелері келтірілген. Электрон мен атом әсерлесуі ретінде үлкен арақашықтықта экрандалу эффектісін, ал аз арақашықтықта дифракция эффектісін ескеретін эффективті потенциал қолданылған. Ұйытқы теориясының негізінде әр түрлі химиялық элементтерінде электронды қарпу радиусының зерттеу нәтижелері алынған. Сондай-ақ, идеалды емес квазиклассикалық плазмадағы электрон мен атом әсерлесуінің эффективті потенциалы негізінде әртүрлі химиялық элементтер үшін қарпу уақыты мен дифференциалды қарпу қимасы зерттелді. Алынған нәтижелер бойынша поляризация коэффициенттерінің үлкен мәндерінде электронды қарпу радиусының үлкейетіндігі байқалды. Тағы электрон мен әр түрлі атомдарының әсерлесу уақыты есептелген. Зерттеу барысында, поляризация коэффициенттерін арттырған сайын қарпудың дифференциалды қимасы үлкейеді. Электронды қарпу қимасын есептеу үшін Бор-Линдхард әдісі қолданылды.

Түйін сөздер: қарпу қимасы, эффективті әсерлесу потенциалы, квазиклассикалық плазма, электронды қарпу, қарпу радиусы.

Введение

Исследование взаимодействия между частицами и свойств плазменных систем представляет большой интерес во многих областях физики. Оно также важно для развития технологий, связанных с применением плазмы. Мы использовали разработанный нами ранее оригинальный потенциал взаимодействия между электроном и атомом в частично ионизированной водородной плазме, который был представлен в работах [1-5]. Этот и другие авторские потенциалы взаимодействия частиц неидеальной плазмы получили широкое применение при исследовании свойств квазиклассической плазмы [6-17]. Этот эффективный потенциал учитывает квантово-механический эффект дифракции на маленьких расстояниях, эффект экранировки на больших расстояниях, имеет конечное значение на расстояниях близких к нулю. Он имеет следующий вид:

$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2\alpha}{2r^4 \left(1 - 4\frac{\lambda_{ea}^2}{r_d^2}\right)} \times \left(e^{-Br}(1+Br) - e^{-Ar}(1+Ar)\right)^2, \quad (1)$$

где

$$A^2 = \frac{1}{2\lambda_{ea}^2} \left(1 + \sqrt{1 - 4\lambda_{ea}^2 / r_D^2}\right),$$

$$B^2 = \frac{1}{2\lambda_{ea}^2} \left(1 - \sqrt{1 - 4\lambda_{ea}^2 / r_D^2}\right),$$

$\lambda_{ea} = \hbar / (2\pi\mu_{ea}k_B T)^{1/2}$ – длина волны де-

Бройля, $r_D = \sqrt{k_B T / (8\pi n e^2)}$ – радиус Дебая, k_B

– постоянная Больцмана,

$\mu_{ea} = m_e m_a / (m_e + m_a) \approx m_e$ приведенная масса

атома и электрона, α – коэффициент элект-

ронной поляризуемости, $a_B = \hbar^2 / (m_e e^2)$

радиус Бора.

Теория и результаты

Одним из элементарных процессов в плазме является процесс электронного захвата, который происходит за счет столкновения электрона с атомом. Процесс захвата электронов атомом был исследован во многих работах [18-25]. В работе [18-21] теоретически рассмотрено сечение электронного захвата, а также предложен метод нахождения радиуса захвата на основе теории возмущений. Для нахождения радиуса, времени и вероятности электронного захвата был применен метод Бора-Линдхарда. Из метода Бора-Линдхарда [25], известно, что электронный захват происходит, когда расстояние между атомом и налетающим электроном мало по сравнению с радиусом захвата R_{cap} . Радиус электронного захвата был найден из равенств кинетической энергии налетающего электрона и

энергии взаимодействия свободного электрона с атомом на расстоянии R_{cap} .

$$\frac{e^2 \alpha}{2R_{cap}^4 \left(1 - 4 \frac{\lambda^2}{r_d^2}\right)} \times \left(e^{-BR_{cap}} (1 + BR_{cap}) - e^{-AR_{cap}} (1 + AR_{cap}) \right)^2 = \frac{1}{2} m v_p^2 \quad (2)$$

$$t_{cap} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{R_{cap}^2 (v) - b^2}}{v^2} & \text{для } b \leq R_{cap} \\ 0 & \text{для } b \geq R_{cap}, \end{cases} \quad (3)$$

где b – прицельный параметр. Следует отметить, что захват электрона происходит, если прицельный параметр меньше радиуса захвата, т.е. $b < R_{cap}$, но значение радиуса захвата от прицельного параметра не зависит. Прицельный параметр b – это вертикальное расстояние между центрами налетающего электрона и ядра атома.

Вероятность электронного захвата находится из отношения времени столкновения и орбитального времени электрона:

$$P_{cap}(b) = \frac{1}{\tau} \int dt \quad (4)$$

Используя вероятность захвата, можно вычислить сечение электронного захвата по формуле:

$$\sigma_{cap} = 2\pi \int db b P_{cap}(b) \quad (5)$$

где v_p – скорость налетающего электрона, $\frac{1}{2} m v_p^2$ – кинетическая энергия налетающего электрона. Если кинетическая энергия электрона меньше энергии взаимодействия электрона с атомом, то электрон вступает в область захвата.

Время нахождения электрона в области захвата атома было найдено из отношения пройденного пути электрона к скорости этого электрона.

В таблице 1 показаны коэффициенты поляризуемости в единицах a_B^3 . Видно, что для щелочного элемента коэффициент поляризуемости больше чем для инертных газов.

Таблица 1 – Электронная поляризуемость атомов некоторых химических элементов

Элементы	He	H	Ar	Li
α, a_B^3	1.38	4.5	11.07	164

На рисунке 1 представлен радиус захвата как функция скорости для разных химических элементов на основе теории возмущений. Здесь $\Gamma = 1, r_s = 8$. Видно, что для элементов с большим коэффициентом поляризуемости радиус захвата больше.

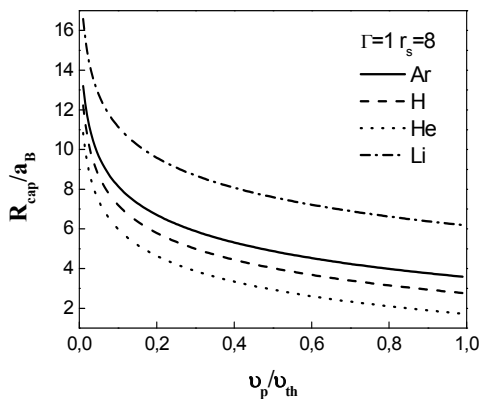


Рисунок 1 – Радиус захвата для разных химических элементов

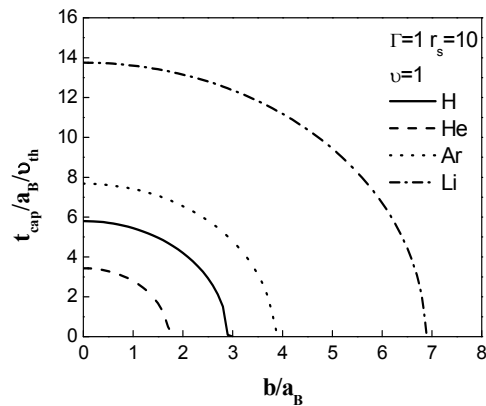


Рисунок 2 – Время захвата для разных химических элементов

Зависимость времени взаимодействия электрона с разными атомами от прицельного параметра показана на рисунке 2.

Как видно из этого рисунка, время взаимодействия возрастает с увеличением коэффи-

циента поляризуемости атома. Дифференциальное сечение электронного захвата атомами разных химических элементов были сравнены с сечением электронного захвата атомом водорода на рисунке 3.

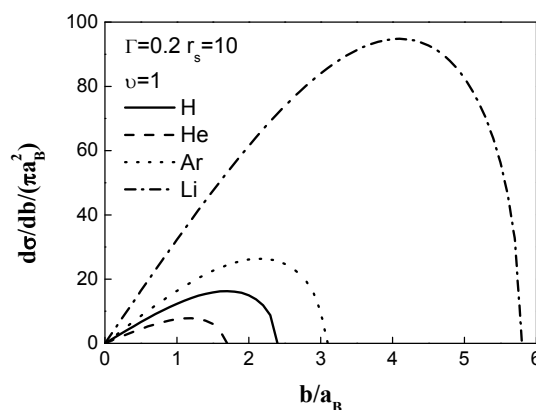


Рисунок 3 – Дифференциальное сечение захвата для разных химических элементов

Заключение

На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц неидеальной квазиклассической плазмы, который учитывает эффект экранировки поля заряженных частиц на больших расстояниях и эффект дифракции на малых расстояниях, был исследован процесс электронного захвата разными атомами. Движение электрона рассматривалось на основе теории возмущений (прямолинейные траектории). Получены результаты исследования радиуса

захвата, времени взаимодействия электрона с атомом и сечение захвата электрона разными атомами. В рамках теории возмущений результаты исследования показали, что для элементов с большим коэффициентом поляризуемости радиус захвата больше. Анализ полученных данных показал, что с увеличением коэффициента поляризуемости дифференциальное сечение захвата достигает больших значений.

Работа была выполнена в рамках Гранта AP05132665 Министерства образования и науки еспублики Казахстан.

Литература

- 1 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. and Omarbakiyeva Y.A. Effective polarization interaction potential «charge-atom» for partially ionized dense plasma // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Vol. 12. – P. 092702.
- 2 Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., Riepke G. and Reinholz H. // *Proc. of the 45th EPS Conf. on Plasma Physics*. – Prague, 2-6 July, 2018. – P.561-564.
- 3 Джумагулова К.Н., Шаленов Е.О., Габдуллина Г.Л. Об эффекте Рамзауэра в плотной квазиклассической плазме // *Вестник КазНУ, серия физическая*. – 2015. – № 3 (54). – P.18-24.
- 4 Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S. and Gabdullina G.L. Influence of dynamic screening on the scattering cross sections of the particles in the dense nonideal plasmas of noble gases // *Intern. J of Mathematics and Physics*. – 2016. – Vol. 7. – No. 1. – P.131.
- 5 Шаленов Е.О., Джумагулова К.Н., Рамазанов Т.С., Джумагулов М.Н. Исследование процесса возбуждения внутренних состояний атома водорода // *Вестник КазНУ, серия физическая*. – 2017. – №3 (62). – P. 26-33.
- 6 Dzhumagulova K.N., Gabdullina G.L. and Shalenov E.O. Dynamic interaction potential and the scattering cross sections of the semiclassical plasma particles // *Physics of Plasmas*. – 2013. – Vol. 20. – P. 042702.
- 7 Dzhumagulova K.N., Shalenov E.O. and Ramazanov T.S. Elastic scattering of low energy electrons in partially ionized dense semiclassical plasma // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Vol. 22. – P. 082120.
- 8 Dzhumagulova K.N., Shalenov E.O., Ramazanov T.S. and Gabdullina G.L. Phase shifts and scattering cross sections of the particles of nonideal semiclassical plasmas based on the dynamic interaction potential // *Contrib. Plasma Phys*. – 2015. – Vol. 57. – P. 230.

- 9 Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N. and Ramazanov T.S. Scattering cross sections of the particles in the partially ionized dense nonideal plasmas // *Physics of Plasmas*. – 2017. – Vol. 24. – P.012101.
- 10 Shalenov E.O., Rosmej S., Reinholz H., Röpke G., Dzhumagulova K.N. and Ramazanov T.S. Optical reflectivity based on the effective interaction potentials of xenon plasma // *Contrib. Plasma Phys.* – 2017. – Vol. 57. – P. 486.
- 11 Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N., Reinholz H., Röpke G. and Ramazanov T.S. Dynamical conductivity of the dense semiclassical plasmas on the basis of the effective potential // *Physics of Plasmas*. – 2018. – Vol. 25. – P. 082706.
- 12 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. and Akbarov A.Z. Cross sections and transport coefficients of dense partially ionized semiclassical plasma // *J. Phys. A: Math. Gen. Plasmas*. – 2006. – Vol. 39. – P. 4335.
- 13 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Gabdullin M.T., Akbarov A.Zh. and Nigmatova G.N. Thermodynamic and transport properties of nonideal complex plasmas on the basis of pseudopotential models // *Contr. Plasma Physics*. – 2007. – Vol. 47. – P. 262.
- 14 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Akbarov A.Zh. and Gabdullin M.T. The scattering cross sections and radial distribution functions for a dense semiclassical plasma // *PLTP*. – Kiev: Naukova dumka, 2004. – P. 5.9.103.
- 15 Друкaрев Т.Ф. Теория столкновений электронов с атомами. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 37.
- 16 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Gabdullin M.T., Akbarov A.Zh. and Nigmatova G.N. Thermodynamic and transport properties of nonideal complex plasmas on the basis of pseudopotential models // *Contr. Plasma Physics*. – 2007. – Vol. 47. – P. 262.
- 17 Dzhumagulova K.N., Shalenov E.O. and Ramazanov T.S. Influence of dynamic screening on the scattering cross sections of the particles in the dense nonideal plasmas of noble gases // 15th Intern. Conf. on the Physics of Non-Ideal Plasmas. – Book of abstracts. – 2015. – P.116.
- 18 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Akbarov A.Zh. and Gabdullin M.T. The scattering cross sections and radial distribution functions for a dense semiclassical plasma // *PLTP*. – Kiev: Naukova dumka, 2004. – P. 5.9.10.
- 19 Shalenov E.O., Seisembayeva M.M., Dzhumagulova K.N. and Ramazanov T.S. // *Proc. of the 45th EPS Conf. on Plasma Physics*. – Prague, 2-6 July, 2018. – P.557-560.
- 20 Джумагулова К.Н., Сейсембаева М.М., Рамазанов Т.С. Исследование радиуса электронного захвата атомом водорода // *Вестник КазНУ, серия физическая*. – 2015. – №4 (55). – P.12-19.
- 21 Seisembayeva M.M., Dzhumagulova K.N. and Ramazanov T.S. Investigation of the electron capture process in semiclassical plasma // *Nukleonika*. – 2016. – Vol 61. – No. 2. – P. 201-205.
- 22 Ki D.-H. and Jung Y.-D. Formation of negative hydrogen ion: Polarization electron capture and nonthermal shielding // *Jour. Chem. Phys.* – 2012. – Vol. 137. – No. 9. – P. 094310.
- 23 Ben-Itzhak I., Jaint A. and Weaver O.L. Impact parameter dependence of classical probability from any initial state by fast bare projectiles // *J. Phys. B*. – 1993. – Vol. 26. – P. 1711-1726.
- 24 Jung, Y.-D. and Akbari-Moghanjoughi M. Electron-exchange effects on the charge capture process in degenerate quantum plasmas // *Physics of Plasmas*. – 2014. –Vol. 21. – P. 032108.
- 25 Jung, Y.-D. Electron capture from one- and two-electron atoms by fast positrons in dense plasmas // *Physics of Plasmas*. – 1997. – Vol. 4. – P. 16.
- 26 Brandt D.A. simple classical model for the impact parameter dependence of electron capture // *Nucl. Instrum. Methods*. – 1983. Vol. 214. – P. 93-96.

References

- 1 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, et al, *Physics of Plasmas* 12, 092702 (2015).
- 2 E.O. Shalenov et al., *Proc. of the 45th EPS Conference on Plasma Physics*, 561 (2018).
- 3 K.N. Dzhumagulova, E.O. Shalenov and G.L. Gabdullina, *Rec. Contr. Phys.* 3(54), 18-24 (2015). (in Russ).
- 4 E.O. Shalenov et. al., *Intern. J of Mathematics and Physics* 7, 131 (2016).
- 5 E.O. Shalenov, K.N. Dzhumagulova and T.S. Ramazanov, *Rec. Contr. Phys.* 62, 26-33 (2017). (in Russ).
- 6 K.N. Dzhumagulova, et al, *Physics of Plasmas* 20, 042702 (2013).
- 7 K.N. Dzhumagulova, , et al, *Physics of Plasmas* 22, 082120 (2015).
- 8 K.N. Dzhumagulova et. al., *Contrib. Plasma Physics* 57, 230 (2015).
- 9 E.O. Shalenov, K.N. Dzhumagulova and T.S. Ramazanov, *Physics of Plasmas* 24, 012101 (2017).
- 10 E.O. Shalenov et. al., *Contrib. Plasma Physics* 57, 486 (2017).
- 11 E.O. Shalenov et. al., *Physics of Plasmas* 25, 082706 (2018).
- 12 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova and A.Z. Akbarov, *J. Phys. A: Math. Gen. Plasmas* 39, 4335 (2006).
- 13 T.S. Ramazanov et. al., *Contr. Plasma Physics* 47, 262 (2007).
- 14 T.S. Ramazanov et. al., *PLTP (Kiev: Naukova dumka, 2004)*, p. 5.9.103.
- 15 T.F. Drukarev, *Teorija stolknovenij jelektronov s atomami (Moscow: Fizmatgiz, 1963)*, p. 37. (in Russ).
- 16 T.S. Ramazanov et. al., *Contr. Plasma Physics* 47, 262 (2007).
- 17 K.N. Dzhumagulova et. al, 15th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas, Book of abstracts, 116 (2015).
- 18 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, A.Zh. Akbarov, and M.T. Gabdullin, *PLTP (Kiev, Naukova dumka, 2004)*, 5.9.10 p.
- 19 E.O. Shalenov et al., *Proc. of the 45th EPS Conf. on Plasma Physics*, 557 (2018).
- 20 K.N. Dzhumagulova, M.M. Seisembayeva, et al, *Rec. Contr. Phys.* 4(55), 12-19 (2015). (in Russ).
- 21 M.M. Seisembayeva, K.N. Dzhumagulova and T.S. Ramazanov, *Nukleonika* 61, 201 (2016).
- 22 D.-H. Ki and Y.-D., *Jour. Chem. Phys.*, 137, 094310 (2012).
- 23 I. Ben-Itzhak, A. Jaint and O.L. Weaver, *J. Phys. B*. 26, 1711 (1993).
- 24 Y.-D. Jung and M. Akbari-Moghanjoughi, *Physics of Plasmas* 21, 032108 (2014).
- 25 Y.-D. Jung, *Physics of Plasmas* 4, 16 (1997).
- 26 D.A. Brandt, *Nucl. Instrum. Methods* 214, 93 (1983).