

Джумагулова К.Н.,
Сейсембаева М.М.,
Рамазанов Т.С.

**Исследование радиуса
электронного захвата
атомом водорода**

В 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 малых расстояниях. Получены результаты исследования радиуса электронного захвата при разных значениях параметров связи и плотности. Результаты показали, что при малых значениях параметра плотности уменьшается радиус электронного захвата. На основе теории возмущения исследованы времена взаимодействия электрона с атомом водорода. Исследования показали, что с увеличением прицельного параметра время взаимодействия электрона с атомом уменьшается. При уменьшении скорости налетающего электрона время захвата увеличивается.

Ключевые слова: радиус электронного захвата, время электронного захвата, частично ионизированная плазма, теория возмущения, эффективный потенциал взаимодействия.

Dzhumagulova K.N.,
Seisembayeva M.M.,
Ramazanov T.S.

**The investigation of electron
capture radius hydrogen atom**

The results of numerical calculation of the electron capture radius in partially ionized plasma are presented. As the electron-atom interaction was chosen effective interaction potential, which takes into account the screening effect at large distances and the diffraction effect on small distances. Get the results of research electron capture radius at different values of the coupling and density parameters. The results showed that for small values of density parameter is reduced electron capture radius increases. On the basis of perturbation theory the interaction time of between the electron and the hydrogen atom is investigated. Studies have shown that with increasing impact parameter the interaction time of between the electron and the atom decreases. Electron capture time increases with a decrease of the velocity of the projectile electron.

Key words: electron capture radius, electron capture time, partially ionized plasma, perturbation theory, effective interaction potential.

Жұмагулова Қ.Н.,
Сейсембаева М.М.,
Рамазанов Т.С.

**Сутегі атомының электронды
қарпу радиусын зерттеу**

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. Тығыздық пен байланыс параметрінің әр түрлі мәндерінде электронды қарпу радиусының зерттеу нәтижелері алынған. Алынған нәтижелер бойынша тығыздық параметрінің аз мәндерінде электронды қарпу радиусының кемитіндігі байқалды. Ұйытқу теориясының негізінде электрон мен сутек атомының әсерлесу уақыты зерттелген. Зерттеу барысында, көздеу параметрін арттырған сайын электрон мен атомның әсерлесу уақыты кемитіндігі байқалды. Ұшып келе жатқан электронның жылдамдығы азайған сайын қарпу уақыты артады.

Түйін сөздер: электронды қарпу радиусы, электронды қарпу уақыты, жартылай иондалған плазма, ұйытқу теориясы, эффективті әсерлесу потенциалы.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИУСА ЭЛЕКТРОННОГО ЗАХВАТА АТОМОМ ВОДОРОДА

Введение

Исследование взаимодействия частиц в плазме и разных свойств плазменных систем представляет большой интерес во многих областях физики и важно в развитии технологии, связанных с плазмой. Последнее время большое внимание уделяется изучению процессов в водородной плазме. Когда к атому присоединяется добавочный электрон, то атом превращается в отрицательный ион, в нашем случае в отрицательный ион водорода. Отрицательный ион водорода играет важную роль в частично ионизованной водородной плазме. Отрицательный ион водорода часто используется для диагностики в ускорителях высоких энергий, а также в термоядерных устройствах. Процесс захвата электронов атомами исследовался во многих работах [1-5].

В работе [6] предложен эффективный потенциал взаимодействия между атомом и электроном.

$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha}{2r^4 \left(1 - 4 \frac{\tilde{\lambda}_{ea}^2}{r_D^2}\right)} \left(e^{-Br} (1 + Br) - e^{-Ar} (1 + Ar) \right)^2, \quad (1)$$

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

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

$\tilde{\lambda}_{ea}$ – длина волны де-Бройля, r_D^2 – радиус Дебая, α – коэффициент поляризуемости, для атома водорода $\alpha=4,5$.

Этот потенциал учитывает эффект экранировки на больших расстояниях и квантово-механический эффект дифракции на маленьких расстояниях. Имеет конечное значение на расстояниях близких к нулю.

Безразмерные параметры

Для удобства описания свойств частично ионизованной плазмы удобно пользоваться параметрами, характеризующими её состояние при определенных плотностях и температурах. Одним из параметров, характеризующих состояние системы, является параметр связи:

$$\Gamma = \frac{(Ze^2)}{ak_B T}, \quad (2)$$

T – температура плазмы; k_B – постоянная Больцмана.

Параметр плотности:

$$\frac{\Phi_{ea}(R)}{k_B T} = \frac{\alpha \Gamma r_s}{2R^4 \left(1 - \frac{12\Gamma^2}{\pi r_s}\right)} \left(e^{-BR} (1 + BR) - e^{-AR} (1 + AR) \right)^2, \quad (4)$$

$$A^2 = \frac{\pi}{r_s \Gamma} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{12\Gamma^2}{\pi r_s}} \right),$$

$$B^2 = \frac{\pi}{r_s \Gamma} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{12\Gamma^2}{\pi r_s}} \right),$$

здесь, $R = r/a_B$ – межчастичное расстояние в единицах радиуса Бора.

Радиус и время захвата электрона атомом водорода.

Исследование радиуса электронного захвата атомами является важным для изучения про-

$$r_s = \frac{a}{a_B}, \quad (3)$$

здесь

$$a = \left(\frac{3}{4\pi n} \right)^{1/3}, \quad a_B = \frac{h^2}{m_e e^2},$$

среднее расстояние между частицами и радиус Бора.

Применяя эти безразмерные параметры связи и плотности, эффективный потенциал (1) в безразмерном виде будет выглядеть так

цесса взаимодействия электрона с атомом. В работе [7] предложен метод нахождения радиуса захвата. Радиус электронного захвата был найден из равенств кинетической энергии налетающего электрона и энергии взаимодействия свободного электрона с атомом.

$$\frac{e^2 \alpha}{2R_{cap}^4 \left(1 - 4 \frac{\lambda^2}{r_d^2}\right)} \left(e^{-BR_{cap}} (1 + BR_{cap}) - e^{-AR_{cap}} (1 + AR_{cap}) \right)^2 = \frac{1}{2} m v_p^2, \quad (5)$$

где v_p – скорость налетающего электрона, $\frac{1}{2} m v_p^2$ – кинетическая энергия налетающего электрона. Если кинетическая энергия электрона меньше энер-

гии взаимодействия электрона с атомом, то электрон вступает в область захвата. Для удобства решения уравнение (5) с помощью безразмерных параметров (2) и (3) переписывается в следующем виде:

$$\frac{\alpha \Gamma r_s}{2R^4 \left(1 - \frac{12\Gamma^2}{\pi r_s}\right)} \left(e^{-BR} (1 + BR) - e^{-AR} (1 + AR) \right)^2 - \frac{v^2}{2} = 0, \quad (6)$$

$v = v_p / v_{th}$, v_{th} – тепловая скорость электрона.

Это уравнение решалось численным методом. Следует отметить что захват электрона происходит, если прицельный параметр меньше радиуса захвата $b > R_{cap}$, но значение радиуса захвата от прицельного параметра не зависит. Прицельный параметр b это вертикальное расстояние между центрами налетающего электрона и атома.

На рисунке 1 представлен график зависимости радиуса электронного захвата в единицах радиуса Бора от скорости налетающего электрона. Мы видим, что с увеличением скорости ра-

диус захвата уменьшается. При уменьшении значения параметра плотности видно уменьшение радиуса электронного захвата.

Изменение радиуса захвата при разных параметрах связи приведен на рисунке 2. Из рисунка видно, что с увеличением скорости электрона радиус захвата уменьшается. Изменение радиуса при увеличении параметра связи объясняется рисунком 3. В более плотном плазме на маленьких расстояниях большую роль играет эффект дифракции, а на больших расстояниях эффект экранировки.

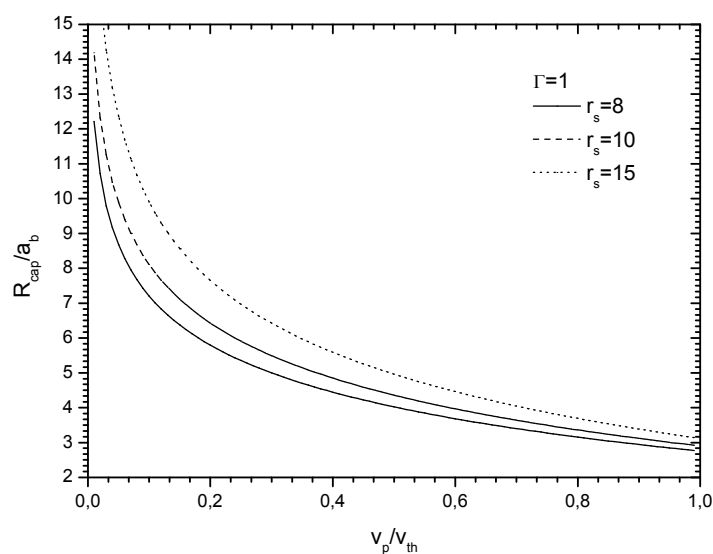


Рисунок 1 – Радиус электронного захвата

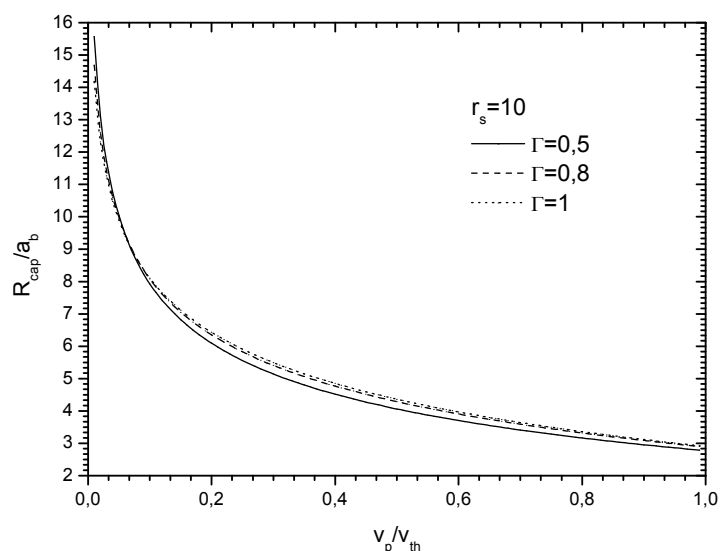


Рисунок 2 – Радиус электронного захвата

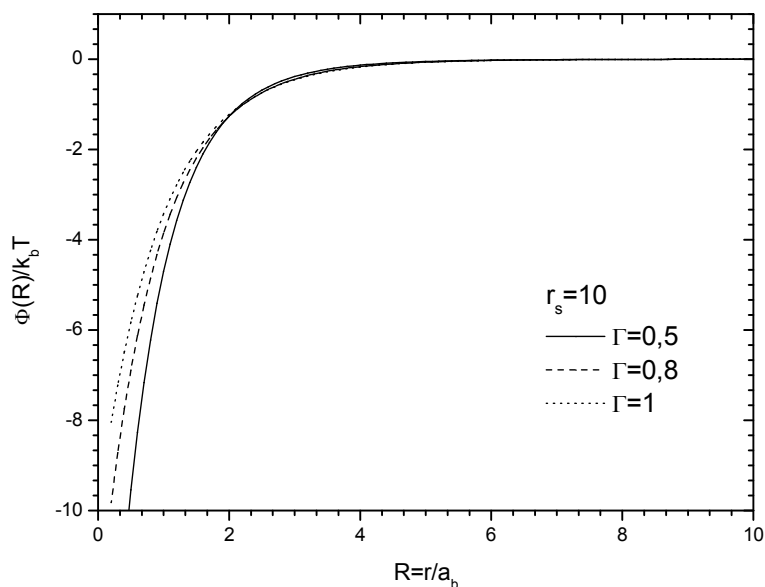


Рисунок 3 – Эффективный потенциал

Взаимодействие электрона с атомом началось с момента входа в область захвата и заканчивалось на выходе из этой области. На рисунке 4 приведена траектория налетающего электрона

на основе теории возмущения [8], где положение атома считалось неподвижным, а движение налетающего электрона считалось прямолинейным.

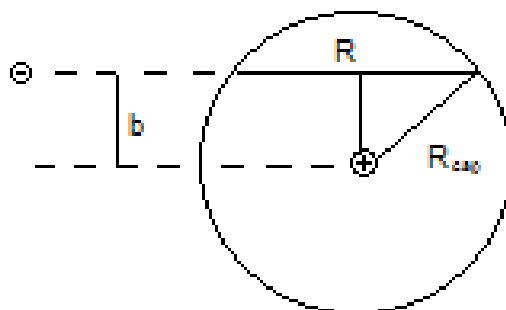


Рисунок 4 – Траектория налетающего электрона на основе теории возмущения

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

$$t_{cap} = \frac{2\sqrt{R_{cap}^2 - b^2}}{v_p^2} \quad (7)$$

На рисунке 5 показан график зависимости времени взаимодействия от прицельного параметра при постоянном значении скорости и фиксированных значениях параметра связи и плотности. Видно, что время взаимодействия электрона с атомом уменьшается, когда увеличивается прицельный параметр.

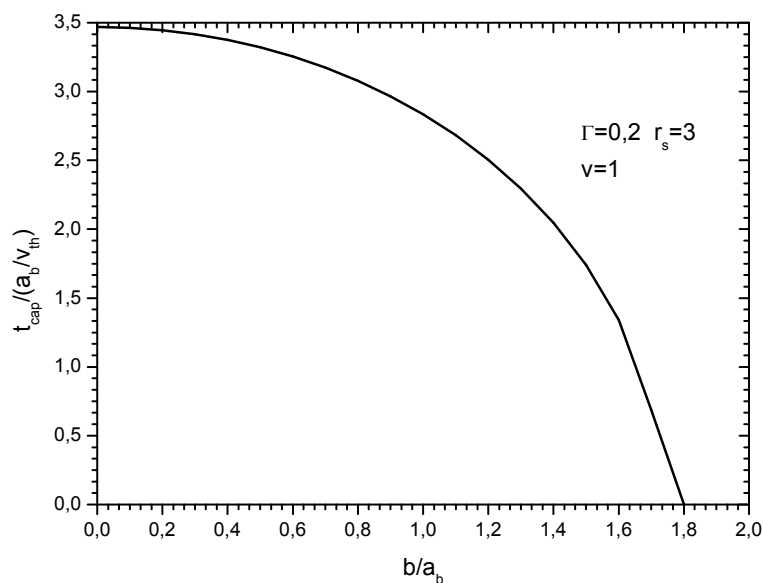


Рисунок 5 – Время взаимодействия электрона с атомом

Изменение времени взаимодействия при разных скоростях приведено на рисунке 6, с увеличением скорости оно уменьшается. Если радиус захвата меньше по сравнению с прицельным параметром, то взаимодействие между электроном и атомом не происходит.

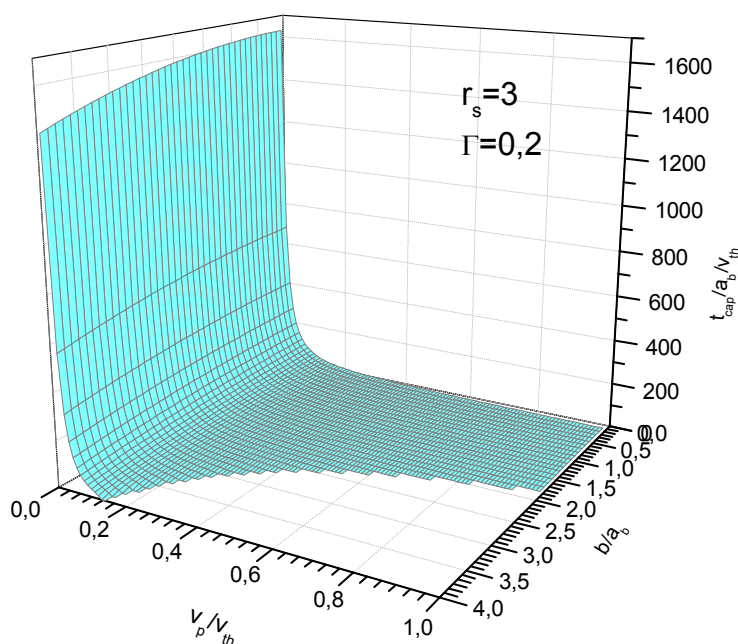


Рисунок 6 – Время взаимодействия электрона с атомом

Заключение

Был исследован процесс электронного захвата атомом водорода, где движение электрона рассматривалось на основе теории возмущения. В взаимодействии электрона с атомом учитывались эффект экранировки поля заряженных частиц на больших расстояниях и эффект дифракции на малых расстояниях.

Получены результаты исследования радиуса электронного захвата при разных значениях па-

раметров связи и плотности. Результаты показали, что радиус электронного захвата с увеличением скорости налетающего электрона уменьшается. Также при малых значениях параметра плотности уменьшается радиус. При исследовании радиуса захвата было вычислено время взаимодействия электрона с атомом. С увеличением прицельного параметра время взаимодействия электрона с атомом уменьшается. При уменьшении скорости налетающего электрона время захвата увеличивается.

Литература

- 1 Ryufuku H., Watanabe T. Total and partial cross sections for charge transfer in collisions of multicharged ions with atomic hydrogen. // *Phys. Rev.* – Алма-Ата, 1979. – Vol. 20. – P. 1828-1837.
- 2 Brandt D. A simple classical model for the impact parameter dependence of electron capture. // *Nucl. Instrum. Methods.* №214. – 1983. – P. 93-96.
- 3 Ben-Itzhak I., Jaint A., 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.
- 4 Shevelko V., Tawara H. *Atomic Multielectron Processes.* – Chap. 3. – Springer, Berlin, 1998. –P. 137-155.
- 5 Beyer H. F., Shevelko V. P. *Introduction to the Physics of Highly Charged Ions.* – Chap. 6. – Institute of Physics Publishing, Bristol, 2003. – p. 213-234.
- 6 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Omarbakiyeva Y.A. Effective polarization interaction potential “charge-atom” for partially ionized dense plasma. // *Phys. Plasm.* – 2005. №12. – P. 092702-(1-4).
- 7 Ki D.-H., Jung Y.-D. Formation of negative hydrogen ion: Polarization electron capture and nonthermal shielding. // *Jour.Chem.Phys.* – 2012. – №137 (9). – P. 094310-(1-15).
- 8 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Квантовая механика (нерелятивистская теория).* 4-е изд. – М.: Наука, 1989. – С. 167-202.

References

- 1 Ryufuku H., Watanabe T. Total and partial cross sections for charge transfer in collisions of multicharged ions with atomic hydrogen. // *Phys. Rev. A.* – 1979. – Vol. 20. – P. 1828-1837.
- 2 Brandt D. A simple classical model for the impact parameter dependence of electron capture. // *Nucl. Instrum. Methods.* № 214. – 1983. – P. 93-96.
- 3 Ben-Itzhak I., Jaint A., 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.
- 4 Shevelko V., Tawara H. *Atomic Multielectron Processes.* – Chap. 3. – Springer, Berlin, 1998. –P. 137-155.
- 5 Beyer H. F., Shevelko V. P. *Introduction to the Physics of Highly Charged Ions.* – Chap. 6. – Institute of Physics Publishing, Bristol, 2003. – p. 213-234.
- 6 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Omarbakiyeva Y.A. Effective polarization interaction potential “charge-atom” for partially ionized dense plasma. // *Phys. Plasm.* – 2005. №12. – P. 092702-(1-4).
- 7 Ki D.-H., Jung Y.-D. Formation of negative hydrogen ion: Polarization electron capture and nonthermal shielding. // *Jour.Chem.Phys.* – 2012. – №137 (9). – P. 094310-(1-15).
- 8 Landau L.D., Lifshic E.M. *Kvantovaja mehanika (nereljativistskaja teorija).* 4-e izd. – М.: Nauka, 1989. – S. 167-202.