

А.Т. Нұралы¹ , М.М. Сейсембаева^{1,2,*} 

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, ЭТФҒЗИ, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: seisembayevamm@gmail.com

Сутегі атомының байланысқан күйлерінің қозу процесін зерттеу

Плазма физикасының маңызды салаларының бірі - элементар процестердің физикасы, яғни, молекулалардың, атомдардың, иондардың, электрондардың және фотондардың соқтығысы кезінде орын алатын процестердің физикасы болып табылады. Плазманың құрамы, оның термодинамикалық, транспорттық, оптикалық және басқа да қасиеттері плазмалық жүйеде болып жатқан процестермен, сонымен қатар олардың жылдамдықтарымен анықталады. Сол себепті, соқтығысу процестерін сараптау арқылы плазманың белгілі бір қасиеттерін зерттеуге болады. Дәстүрлі түрде, алғашқы бағалаулар қарапайым әдістермен орындалған кезде белгілі бір моделдің шеңберінде элементар процестерді зерттеу шашырау қимасын зерттеуден басталады. Осы әдістердің қатарына тәжірибеде қолданылуы міндетті болып келетін Борн әдісі жатады.

Бұл жұмыста плазмадағы сутегі атомы және сутегі тәрізді иондардың күйлеріне, энергияларына, сондай-ақ қозу процестеріне плазмадағы ұжымдық эффекттердің әсері зерттелінген. Жұмыс барысында кванттық механикалық әдістер, оның ішінде вариациялық әдіс пен ұйытқу теориясы, сонымен қатар серпімсіз шашырау процесі үшін Борн жуықтауы пайдаланылды. Электрондық соққымен сутегі атомын қоздыру процесі үшін Борн жуықтауы негізінде зерттеу нәтижелері алынды. Жоғары энергиялық соқтығысулар жағдайы үшін Борн жуықтауы жақсы нәтиже көрсетеді. Зерттеу барысында алынған нәтижелер ғылыми және тәжірибелік мәнге ие, себебі шашырау қималарын анықтау арқылы жылдамдық коэффициенттерін анықтауға мүмкіндік береді. Өз кезегінде бұл жылдамдық коэффициенттері плазма бөлшектерінің қоныстануын (концентрациясын) сипаттауға қолданылатын кинетикалық теңдеуді шешу үшін қажет.

Түйін сөздер: серпімсіз соқтығыстар, экрандалу эффектісі, кванттық механикалық дифракция эффектісі, эффективті потенциалдар, қозу қимасы, Борн жуықтауы.

А.Т. Nuraly¹, М.М. Seisembayeva^{1,2,*}

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, IETP, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: seisembayevamm@gmail.com

Investigation of the processes of excitation of bound states of a hydrogen atom

One of the most important areas of plasma physics is the physics of elementary processes, that is, the physics of processes occurring during collisions of molecules, atoms, ions, electrons and photons. The composition of plasma, its thermodynamic, transport, optical and other properties are determined by the processes occurring in the plasma system, as well as their speeds. For this reason, by analyzing collision processes, it is possible to investigate certain properties of the plasma. Traditionally, the study of elementary processes within a specific model begins with the study of the scattering cross section, when the first estimates are made using simple methods. These methods include the Born method, which can and should be applied in practice.

In this work, studies were carried out of the influence of collective effects in plasma on the states and energies of hydrogen atoms and hydrogen-like ions, as well as on excitation processes. Quantum mechanics methods were used in the research process, including the variational method and the perturbation theory, especially the Born approximation for inelastic scattering processes. As a result of the work, data were obtained based on the Born approximation for the process of excitation of a hydrogen atom by electron impact. The Born approximation shows better results in the case of high-energy collisions. The results obtained

during the study have scientific and experimental significance, since they make it possible to determine the velocity coefficients through the calculation of scattering cross sections. These coefficients, in turn, are necessary to solve the kinetic equation used to describe the sedimentation (concentration) of particles in the plasma.

Key words: inelastic collisions, screening effect, quantum mechanical diffraction effect, effective potentials, excitation cross section, Born approximation.

А.Т. Нуралы¹, М.М. Сейсембаева^{1,2,*}

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г.Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, НИИЭТФ, г.Алматы, Казахстан

*e-mail: seisembayevamm@gmail.com

Исследование процесса возбуждения связанных состояний атома водорода

Одной из важнейших областей физики плазмы является физика элементарных процессов, то есть физика процессов, происходящих при столкновении молекул, атомов, ионов, электронов и фотонов. Состав плазмы, её термодинамические, транспортные, оптические и другие свойства определяются процессами, происходящими в плазменной системе, а также их скоростями. По этой причине, анализируя процессы столкновений, можно исследовать определённые свойства плазмы. Традиционно изучение элементарных процессов в рамках конкретной модели начинается с изучения сечения рассеяния, когда первые оценки выполняются простыми методами. Эти методы включают метод Борна, который можно и нужно применять на практике.

В данной работе были проведены исследования влияния коллективных эффектов в плазме на состояния и энергии атомов водорода и водородоподобных ионов, а также на процессы возбуждения. В процессе исследования использовались методы квантовой механики, включая вариационный метод и теорию заковки, особенно приближение Борна для процесса неупругого рассеяния. В результате работы были получены данные на основе приближения Борна для процесса возбуждения атома водорода электронным ударом. Приближение Борна демонстрирует лучшие результаты в случае высокоэнергетических столкновений. Полученные в ходе исследования результаты имеют научное и экспериментальное значение, так как позволяют определить коэффициенты скорости через измерение сечений рассеяния. Эти коэффициенты, в свою очередь, необходимы для решения кинетического уравнения, используемого для описания оседания (концентрации) частиц в плазме.

Ключевые слова: неупругие столкновения, эффект экранировки, квантовомеханический эффект дифракции, эффективные потенциалы, сечение возбуждения, приближение Борна.

Кіріспе

Гелий-позитрон соқтығысуының иондалу кимасының толқындық функцияларды қолдануымен бірінші реттік Борн жуықтауында алғашқы кванттық механикалық зерттеуі [1] жұмысында жасалған. Борн жуықтаулары [2-3], әдетте, жоғары энергиялардағы шашырау процестерін жақсы сипаттайды.

Бірінші Борн жуықтауы (FBA) үшін Φ_0^+ функциясы импульсі k_i болатын позитронның бастапқы толқындық функциясы мен нысананың бастапқы күйінің ϕ_0 толқындық функциясының көбейтіндісі болатын Φ_0 функциясымен алмастырылады. Бұл жерде T-матрица элементі келесі түрде жазылады:

$$T_{f_0} = \langle \Phi_f | V | \Phi_0 \rangle. \quad (1)$$

Екінші ретті амплитуданы қатарға жіктеуді ескере отырып, Борн жуықтауын жақсартуға болады және бұл екінші Борн жуықтауын береді.

Бұрмаланған толқындары бар Борн жуықтауы (DWBA) бастапқы және соңғы күйде де позитронның толқындық функциясының бұрмалануын ескеру арқылы жасалған. Статикалық әсерлесуден бөлек атом-нысананың поляризациялық эффектісі әсерлесу потенциалына енуі мүмкін.

Төмен энергиялы позитрон мен гелийдің серпімді соқтығысуы үшін МакЭхран [4] жұмысы эксперименттік нәтижелермен жақсы сәйкес келеді. Парселл [5-6] гелийдің позитрондармен 2S және 2P қозу процесін 150 эВ-қа дейінгі энергияларда DWBA әдісімен зерттеген. Олардың зерттеулерінде позитроний пайда болу каналы қарастырылмаған. Алайда бұл жұмыс нәтижелері

эксперименттік нәтижелермен жақсы үйлеспесе де, DWBA әдісі төмен энергияларда қозу каналына поляризациялық потенциалды қосудың маңыздылығын көрсетті. Шашырау бұрышы функциясы ретіндегі бағдар және түзету параметрлері DWBA әдісімен Мэдисон және Уинтерс [7] жұмысында есептелген. Бірінші немесе екінші ретті ауыспалы потенциалдың әртүрлі бұрмалау ретімен эффектілері зерттелді. Шривастава және б. [8] бұрмаланған толқындық орбиталдық тәсіл көмегімен гелийдің 2S қозу процесі үшін дифференциалдық және толық қималарды есептеген. Иондалу процесі туралы айтар болсақ, DWBA әдісімен неғұрлым жүйеленген зерттеулер Кампану және б. [9-10] жұмыстарында жүргізілген болатын. Олардың моделінде кулондық және жазық толқындар пайдаланылған, сонымен қатар алмасу эффектілері ескерілген. Жүйенің соңғы күйінің шынайы сипаттамасы шашыраған позитрон мен соқтығыстан кейін бөлінген электронның салыстырмалы жылдамдығына тәуелділігімен пайдаланылған. Есептелген иондалу қималары жақын табалдырықтан 500 эВ-қа дейінгі энергиялар үшін эксперименттік нәтижелермен өте жақсы үйлеседі [6,11-13].

Әдістеме

Плазма бөлшектерінің әсерлесу потенциалдары

Сызықтық диэлектрлік өтімділік әдісін пайдалана отырып, [14-17] жұмыстарында аз қашықтықтарда кванттық механикалық дифракция эффектісін, үлкен арақашықтықтарда экрандалу эффектілерін ескеретін эффективті потенциал үшін аналитикалық формула алынған:

$$\Phi_{ab}(r) = \frac{Z_a Z_b e^2}{r \sqrt{1 - 4\lambda_{ab}^2 / r_D^2}} (e^{-A_{ab}r} - e^{-B_{ab}r}), \quad (2)$$

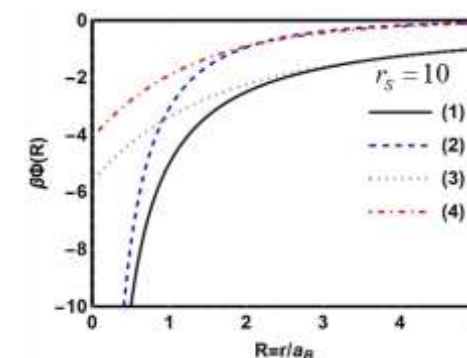
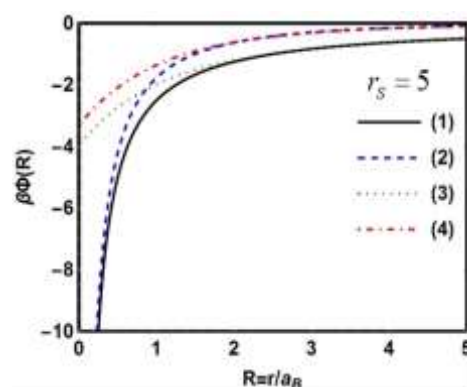
$$A_{ab}^2 = \left(1 - \sqrt{1 - 4\lambda_{ab}^2 / r_D^2}\right) / (2\lambda_{ab}^2),$$

$$B_{ab}^2 = \left(1 + \sqrt{1 - 4\lambda_{ab}^2 / r_D^2}\right) / (2\lambda_{ab}^2).$$

Көрсетілген өрнектерден осы потенциалдың $4\lambda_{ab}^2 / r_D^2 < 1$ кезінде орынды екенін көруге болады. Бұл эффективті потенциал аз қашықтықтарда шекті мәнге ие болады, ал үлкен қашықтықтарда Дебай-Хюккель потенциалына ұмтылады. Эффективті потенциалдың қашықтықтан тәуелділік графигі Дойч потенциалы графигінен төмен жатады.

1-суретте электрон-ион әсерлесуі потенциалдарының тығыздық параметрінің әр

түрлі және байланыс параметрінің тұрақты мәні үшін тәуелділіктері көрсетілген. Бұл графиктен тығыздық параметрі азайған сайын электрон-ион әсерлесу потенциалдарының жоғары жылжитынын (потенциалдар теріс мәнге ие болғандықтан) және Кулон потенциалы мен Дебай-Хюккель потенциалы графиктерінің, Дойч потенциалы мен эффективті потенциал графиктерінің бір-біріне жақындай түсетінін байқауға болады. Бұл келесідей түсіндіріледі, тығыздық параметрінің мәні кішіреген сайын, яғни тығыз плазма жүйесінде, Дебай радиусы кіші мәнге ие болады, сол себепті экрандалу күшейеді.



1-сурет. Электрон-ион арасындағы әсерлесу потенциалдары, $\Gamma=1$. (1) – Кулон потенциал негізінде алынған; (2) – Дебай-Хюккель потенциал негізінде алынған; (3) – Дойч потенциал негізінде алынған; (4) – (2) потенциал негізінде алынған

Нәтижелер мен пікірталас

Сутегі атомын электрондық соққымен қоздыру қимасы үшін Борн жуықтауы

Электронның атоммен әсерлесуі үшін (2) потенциалы мына түрде жазылады [18]:

$$U(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = -\frac{Ze^2}{rC_{ei}} (\exp(-A_{ei}r) - \exp(-B_{ei}r)) + \frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|C_{ee}} (\exp(-A_{ee}|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|) - \exp(-B_{ee}|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|)), \quad (3)$$

бұл жерде $C_{ee} = \sqrt{1 - 4\lambda_{ee}^2 / r_D^2} = \sqrt{1 - 8x^2 y^2}$,
 $A_{ee} = \sqrt{(1 - C_{ee}) / (2\lambda_{ee}^2)}$, $B_{ee} = \sqrt{(1 + C_{ee}) / (2\lambda_{ee}^2)}$.

1s негізгі күйінен 2s қозған күйге ауысу жағдайы үшін $S(\mathbf{r})$ шамасы:

$$S_{2s,1s}(\mathbf{r}) = \frac{e^2}{C_{ee}} \int \psi_{2s}^*(r_1) \psi_{1s}(r_1) \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} \left(\exp(-A_{ee}|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|) - \exp(-B_{ee}|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|) \right) d^3 r_1 =$$

$$= \frac{e^2}{C_{ee}} \left(\int_0^r R_{2s}(r_1) R_{1s}(r_1) r_1^2 \left(A_{ee} k_0(A_{ee} r) i_0(A_{ee} r_1) - B_{ee} k_0(B_{ee} r) i_0(B_{ee} r_1) \right) dr_1 + \right.$$

$$\left. + \int_r^\infty R_{2s}(r_1) R_{1s}(r_1) r_1^2 \left(A_{ee} k_0(A_{ee} r_1) i_0(A_{ee} r) - B_{ee} k_0(B_{ee} r_1) i_0(B_{ee} r) \right) dr_1 \right). \quad (4)$$

Осы өрнекті интегралдайтын болсақ, келесі формуланы аламыз:

$$W_{2s,1s}(q) = - \frac{4\sqrt{2}\pi e^2 (A_{ee}^2 - B_{ee}^2) (\eta_{1s} \eta_{2s})^{3/2} (\eta_{2s} (q^2 - 3\beta^2) + 2a_z \beta (q^2 + \beta^2))}{C_{ee} a_z^4 (A_{ee}^2 + q^2) (B_{ee}^2 + q^2) (q^2 + \beta^2)^3}, \quad (5)$$

бұл жерде $\eta_{1s} = \left(\frac{(2+y)^3}{4(2+3y)} \right)^{-1}$,

$\eta_{2s} = \frac{(1+y)^5}{1+5y-2y^2+6y^3}$, $\beta = \left(\eta_{1s} + \frac{\eta_{2s}}{2} \right) a_z^{-1}$.

Матрицалық элементтің өлшемсіз түрін көмегімен табылған қима формуласы келесідей:

$$Z^4 \sigma_{2s,1s} = \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} \frac{64\pi a_B^2 (\eta_{1s} \eta_{2s})^3 (G^2 - H^2)^2 \left((\eta_{1s} + \eta_{2s}) Q^2 + (\eta_{1s} - \eta_{2s}) (\beta a_z)^2 \right)^2}{C_{ee}^2 K (G^2 + Q^2)^2 (H^2 + Q^2)^2 (Q^2 + (\beta a_z)^2)^6} Q dQ, \quad (6)$$

мұнда $G = A_{ee} a_z = \sqrt{\frac{1 - C_{ee}}{4x^2}}$,

$H = B_{ee} a_z = \sqrt{\frac{1 + C_{ee}}{4x^2}}$, $x = \frac{\lambda_{ei}}{a_z}$.

(3) потенциал негізінде алынған 1s → 2s ауысуының қималары 2-3 суреттерде көрсетілген. 2-суреттегі қималар де Бройль толқын ұзындығының $\lambda_{ei} = 0.1a_z$ мәніндегі әр түрлі экрандалу радиустары үшін алынған. 3-суреттегі қималар экрандалу радиусының $r_D = 20a_z$ тұрақты мәніндегі әр түрлі де Бройль толқын ұзындықтары үшін алынған. Осы суреттер бойынша де Бройль толқын ұзындығы көбейген сайын, яғни плазма температурасы кеміген сайын қима графиктерінің аз ғана төмендейтінін көруге болады. 1s күйінен 2p күйіне ауысуының матрицалық элементі келесідей:

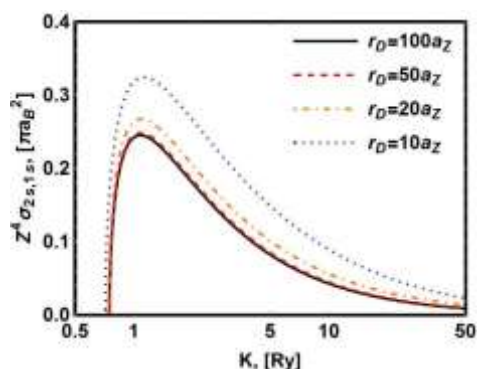
$$W_{2p,1s}(q) = - \frac{16i\pi\sqrt{2}e^2 q \gamma (A_{ee}^2 - B_{ee}^2) \eta_{1s}^{3/2} \eta_{2p}^{5/2}}{a_z^4 C_{ee} (A_{ee}^2 + q^2) (B_{ee}^2 + q^2) (q^2 + \gamma^2)^3}, \quad (7)$$

мұнда $\eta_{2p} = \frac{(1+y)^5}{1+5y}$, $\gamma = \left(\eta_{1s} + \frac{\eta_{2p}}{2} \right) a_z^{-1}$.

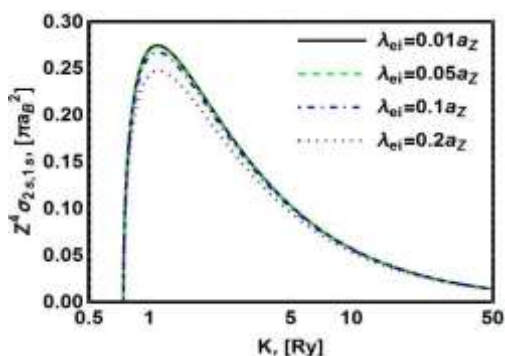
Қима формуласы:

$$Z^4 \sigma_{2p,1s} = \frac{256\pi a_B^2 \eta_{1s}^3 \eta_{2p}^5}{C_{ee}^2 K} * \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} \frac{(\gamma a_z)^2 (G^2 - H^2)^2 Q^3}{(G^2 + Q^2)^2 (H^2 + Q^2)^2 (Q^2 + (\gamma a_z)^2)^6} dQ. \quad (8)$$

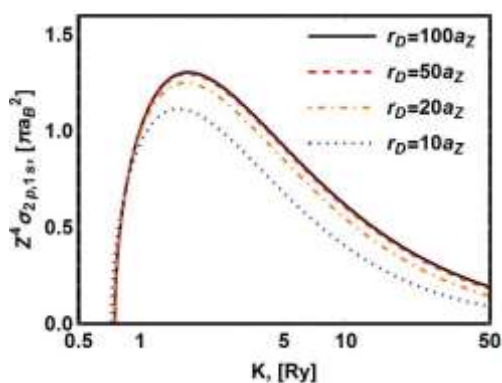
(4)-(8) формулалардағы η_{1s} , η_{2s} , η_{2p} , β , γ шамалары мен 1s, 2s, 2p күйлерінің радиал функциялары. (3) потенциал негізінде алынған 1s → 2p ауысуының қималары 4-5 суреттерде көрсетілген. 4-суреттегі қималар де Бройль толқын ұзындығының $\lambda_{ei} = 0.1a_z$ тұрақты мәніндегі әр түрлі экрандалу радиустары үшін алынған. 5-суреттегі қималар экрандалу радиусының $r_D = 20a_z$ мәніндегі әр түрлі де Бройль толқын ұзындықтары үшін алынған. Осы сурет бойынша 1s → 2s қозу процесімен қатар 1s → 2p қозу процесі үшін де Бройль толқын ұзындығы өскен сайын, яғни плазма температурасы кеміген сайын қима графиктерінің аз ғана төмендейтінін байқауға болады.



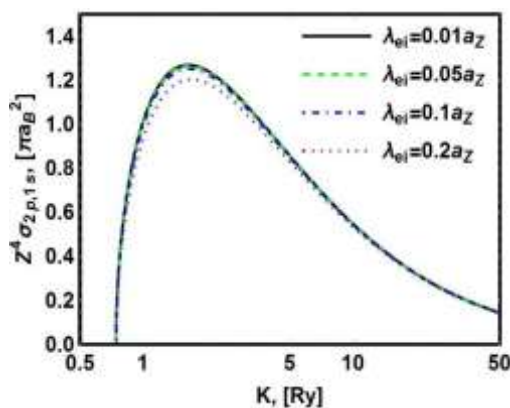
2-сурет. $1s \rightarrow 2s$ қозу процесі үшін (3) потенциалы негізінде алынған қима, $\lambda_{ei} = 0.1a_Z$



3-сурет. $1s \rightarrow 2s$ қозу процесі үшін (3) потенциалы негізінде алынған қима, $r_D = 20a_Z$



4-сурет. $1s \rightarrow 2p$ қозу процесі үшін (3) потенциал негізінде алынған қима, $\lambda_{ei} = 0.1a_Z$



5-сурет. $1s \rightarrow 2p$ қозу процесі үшін (3) потенциал негізінде алынған қима, $r_D = 20a_Z$

Қорытынды

Бұл жұмыста плазмадағы сутегі атомы және сутегі тәрізді иондардың күйлеріне, энергияларына, сондай-ақ қозу процестеріне плазмадағы ұжымдық эффектілердің әсері бойынша зерттеулер жүргізілді. Жұмыс барысында кванттық механиканың меншікті мәндерді жуықтап есептеу әдістері – вариациялық әдіс пен ұйытқу теориясы, нақтырақ айтқанда, серпімсіз шашырау процесі үшін Борн жуықтауы пайдаланылды. Осы жұмыста электрондық соққымен сутегі атомын қоздыру процесі үшін Борн жуықтауының теориясы мен Борн жуықтауы негізінде алынған нәтижелер келтірілді. Борн жуықтауы соққылаушы бөлшектердің энергиясы үлкен болған кездерде жақсы нәтиже береді. Дебай-Хюккель потенциалы негізінде алынған және (3) потенциал негізінде, де Бройль толқын ұзындығының тұрақты мәнінде, алынған қима графиктері экрандалу радиусы кеміген сайын ауысуы үшін жоғарылайды, ал ауысуы үшін төмендейді және солға жылжиды. Экрандалу радиусының тұрақты мәнінде (3) потенциал негізінде алынған қима графиктері де Бройль толқын ұзындығы өскен сайын төмен жылжиды. Алынған қима графиктері Кулон потенциалы негізінде алынған қималармен және Дебай-Хюккель потенциалы негізінде басқа жұмыстарда алынған қима графиктерімен салыстырылды. Жұмыс барысында алынған нәтижелер ғылыми және тәжірибелік мәнге ие, себебі шашырау қималарын анықтау арқылы жылдамдық коэффициенттерін анықтауға болады. Өз кезегінде жылдамдық коэффициенттері плазма бөлшектерінің қоныстануын (концентрациясын) білуге қолданылатын кинетикалық теңдеуді шешу үшін қажет.

АЛҒЫС

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант нөмері AP19679049)

Әдебиеттер

- 1 Basu M., Mazumdar P.S., Ghosh A.S. The sensitivity of the final-state wavefunction in positron impact ionisation // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1985. – Vol.18. – P.369-377.
- 2 Seisembayeva M.M., Shalenov E.O., Kossymkyzy Zh., Turekhanova K.M., Jumagulov M.N., Ramazanov T.S., and Dzhumagulova K.N. Effective Interaction Potentials and the Scattering Cross Sections of the Lorentzian Dense Semiclassical Plasma Particles // *Physics Letters A.* – 2022– Vol.447. – Art.No 128313.
- 3 Dzhumagulova K.N., Seisembayeva M., Shalenov E.O., Kossymkyzy Zh., and Ramazanov T.S. Study of the phenomenon of runaway electron based on the effective interaction potentials // *In Proc. Int. Conf. "47th EPS Conference on Plasma Physics" (Sitges).* – 2021. – Vol.45A. – P.349.
- 4 McEachran R. P., Morgan D.L., Ryman A.G., and Stauffer A.D. Positron scattering from noble gases. // *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* – 1977. – Vol.10 no.4. – P.663–677.
- 5 Parcell L., McEachran R., and Stauffer A. Positron excitation of the 21S state of helium // *Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.* – 1983. – Vol.16. – P.4249–4258.
- 6 Parcell L., McEachran R., and Stauffer A. Positron excitation of the 21S state of helium // *Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.* – 1987. – Vol.20. – P.2307–2315.
- 7 Madison D.H., and Winters K.H. A second-order distorted-wave model for the excitation of the 21P state of helium by electron and positron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* – 1983. – Vol.16. – P.4437–4450.
- 8 Srivastava R., Kumar, M. and Tripathi A.N. Excitation of helium by positron: A distorted wave polarized orbital approach // *J. Chem. Phys.* – 1986. – Vo.84, no.8. – P.4715–4717.
- 9 Campeanu R.I., Fromme D., Kruse G., McEachran R., Parcell L., Raith W., Sinapius G., and Stauffer A. Partitioning of the positron-helium total scattering cross section // *J.Phys.B: At.Mol.Phys.* –1987. –Vol.20. –P.3557–3570.
- 10 Campeanu R., McEachran R., and Stauffer A. Positron Impact Ionization of He, Ne, and Ar. // *Can. J. Phys.* – 1996. – Vol.74. – P.544–547.
- 11 Knudsen H., Brun-Nielsen L., Charlton M., and Poulsen M. Single ionization of H2, He, Ne and Ar by positron impact.// *Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.* – 1990. – Vol.23. – P.3955–3976.
- 12 Ashley P., Moxom J., and Laricchia G. Near-Threshold Ionization of He and H2 by Positron Impact // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol.77, no.7. – P.1250–1253.
- 13 Moxom J., Ashley P., and Laricchia G. Single ionization by positron impact // *Can. J. Phys.* – 1996. – Vol.74. – P.367–372.
- 14 Shalenov E.O., Seisembayeva M.M., Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., and Jumagulov M.N. Electron capture by the excited hydrogen atom in the dense semiclassical partially ionized plasma // *In Proc. Int. Conf. "46th EPS Conference on Plasma Physics" (Milan).* – 2019. – Vol.43C. –P.477.
- 15 Dzhumagulova K.N., Shalenov E.O., Ramazanov T.S., and Gabdullina G.L. Phase shifts and scattering cross sections of the particles of non-ideal semiclassical plasmas based on the dynamic interaction potential // *Contributions to Plasma Physics.* – 2015. – Vol.55, no.2–3. –P.230–35.
- 16 Jumagulov M.N., Seisembayeva M.M., Shalenov E.O., Kossymkyzy Zh., Ramazanov T.S., and Dzhumagulova K.N. Electron Runaway in a Dense Semiclassical Plasma // *High Energy Density Physics.* – 2020. – Vol.36. – Art.No 100832.
- 17 Seisembayeva M.M., Reinholz H., Shalenov E.O., Jumagulov M.N., and Dzhumagulova K.N. Coulomb Logarithm and the Dreicer Field in a Dense Semiclassical Plasma // *Contributions to Plasma Physics.* – 2022. – Vol.62, no.10. – Art.No e202200014.
- 18 Shalenov E.O., Nuraly A.T., and Dzhumagulova K.N. Bound States of the Hydrogen Atom in High-Density Plasmas // *Contributions to Plasma Physics.* – 2022. – Vol.62, no.10. – Art.No e202200017.

References

- 1 M. Basu, P.S. Mazumdar, A.S. Ghosh, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 18, 369-377 (1985).
- 2 M.M. Seisembayeva, E.O. Shalenov, et al., *Physics Letters A* 447, 128313 (2022).
- 3 K.N. Dzhumagulova, M.M. Seisembayeva, et al., Study of the phenomenon of runaway electron based on the effective interaction potentials, *In Proc. Int. Conf. "47th EPS Conference on Plasma Physics" (Sitges)* 45A, 349 (2021).
- 4 R.P. McEachran, D.L. Morgan, A.G. Ryman, and A.D. Stauffer, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 10(4) 663–677 (1977).
- 5 L. Parcell, R. McEachran, and A. Stauffer, *Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.* 16, 4249–4258 (1983).
- 6 L. Parcell, R. McEachran, and A. Stauffer, *Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.* 20, 2307–2315 (1987).
- 7 D.H. Madison, and K.H. Winters, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* 16, 4437–4450 (1983).
- 8 R. Srivastava, M. Kumar, and A.N. Tripathi, *J. Chem. Phys.* 84 (8) 4715–4717 (1986).
- 9 R.I. Campeanu, D. Fromme, et al., *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* 20, 3557–3570 (1987).
- 10 R. Campeanu, R. McEachran, and A. Stauffer, *Can. J. Phys.* 74, 544–547 (1996).
- 11 H. Knudsen, L. Brun-Nielsen, M. Charlton, and M. Poulsen, *Phys.B.: At.Mol. Opt. Phys.* 23, 3955–3976 (1990).
- 12 P. Ashley, J. Moxom, and G. Laricchia, *Phys. Rev. Lett.* 77 (7), 1250–1253 (1996).

13 J. Moxom, P. Ashley, and G. Laricchia, Can. J. Phys. 74, 367–372 (1996).

14 E.O. Shalenov, M.M. Seisembayeva, K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, and M.N. Jumagulov, Electron capture by the excited hydrogen atom in the dense semiclassical partially ionized plasma, In Proc. Int. Conf. "46th EPS Conference on Plasma Physics" (Milan), 43C, 477 (2019).

15 K.N. Dzhumagulova, E.O. Shalenov, T.S. Ramazanov, and G.L. Gabdullina, Contributions to Plasma Physics 55 (2–3), 230–35 (2015).

16 M.N. Jumagulov, M.M. Seisembayeva, et al., High Energy Density Physics 36, 100832 (2020).

17 M.M. Seisembayeva, H. Reinholz, et.al., Contributions to Plasma Physics 62 (10), e202200014 (2022).

18 E.O.Shalenov, A.T. Nuraly, and K.N. Dzhumagulova, Contributions to Plasma Physics 62 (10), e202200017 (2022).

Мақала тарихы:

Түсті – 26.04.2024

Қабылданды – 15.06.2024

Article history:

Received 26 April 2024

Accepted 15 June 2024

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Асхат Нұралы** – ғылыми қызметкер, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан, email: askhat.nuraly.98@gmail.com).

2. **Мадина Сейсембаева** – аға ғылыми қызметкер, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, PhD студент, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, ЭТФҒЗИ (Алматы қ., Қазақстан, email: seisembayevamm@gmail.com).

Information about authors:

1. **Askhat Nuraly** – researcher, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, email: askhat.nuraly.98@gmail.com).

2. **Madina Seisembayeva** – senior researcher, Satbayev University, PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, IETP (Almaty, Kazakhstan, email: seisembayevamm@gmail.com).