

Е.О. Шаленов^{1*} , С.Р. Жұмашева² , Е.С. Сейтқожанов^{1,2} , Қ.Н. Джумагулова^{1,2} 

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

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

*e-mail: erik.shalenov@gmail.com

ТЫҒЫЗ АЗҒЫНДАЛҒАН ПЛАЗМАДАҒЫ ИОНДАНУ ПОТЕНЦИАЛЫНЫҢ ТӨМЕНДЕУІН ЕСКЕРЕТІН ИОНДАНУ ТЕПЕ - ТЕҢДІГІ

Қазіргі заманғы плазмалық зерттеулерде, әсіресе иондану потенциалының төмендеуін ескере отырып, тығыз азғындалған плазма жағдайында иондану тепе-теңдігін зерттеуге ерекше назар аударылады. Бұл жұмыста тығыз плазманың күйін анықтайтын негізгі заңдылықтар мен механизмдерді анықтау мақсатында осы құбылысты зерттеу жүргізілді. Зерттеудің мақсаты - иондану потенциалының төмендеуінің тығыз азғындалған плазмадағы иондану тепе-теңдігіне әсерін талдау. Біз бұл құбылысты сипаттаудың жаңа тәсілін Дебай және Томас-Ферми экрандалу ұзындықтарын ескеру арқылы ұсынамыз. Бұл жұмыстың ғылыми және практикалық мәні де бар. Ғылыми тұрғыдан алғанда, ол экстремалды жағдайларда плазма физикасы туралы түсінігімізді кеңейтеді, бұл физиканың әртүрлі салаларына, соның ішінде астрофизика мен лазерлік плазмодинамикаға маңызды әсер етеді. Практикалық тұрғыдан алғанда, зерттеу нәтижелері инерциялық термоядролық синтез және термоядролық тұтану сияқты әртүрлі технологиялық қолданбаларда плазмалық процестерді басқарудың жаңа әдістерін әзірлеу үшін пайдалы болуы мүмкін. Зерттеу әдістемесі иондану потенциалының төмендеуін ескеретін Саха теңдеулеріне негізделген математикалық модельдеу мен сандық есептеулерді қамтиды. Жұмыстың негізгі нәтижелері иондану потенциалының төмендеуі тығыз плазмадағы иондану тепе-теңдігінің айтарлықтай өзгеруіне әкелетінін көрсетеді. Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу иондану потенциалының төмендеуін ескере отырып, тығыз азғындалған плазманың әрекеті туралы жаңа білім беру арқылы плазма физикасы саласына айтарлықтай үлес қосады.

Түйін сөздер: химиялық потенциал, Дебай экрандалу ұзындығы, Томас-Ферми экрандалу ұзындығы, Саха теңдеуі, иондану тепе-теңдігі.

Е.О. Шаленов^{1*}, С.Р. Жұмашева², Е.С. Сейтқожанов^{1,2}, Қ.Н. Джумагулова^{1,2}

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

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

*e-mail: erik.shalenov@gmail.com

Исследование ионизационного равновесия с учетом снижения потенциала ионизации в плотной вырожденной плазме

В современных исследованиях плазмы особое внимание уделяется изучению ионизационного равновесия в условиях плотной вырожденной плазмы, особенно с учетом снижения потенциала ионизации. В данной работе проведено исследование этого явления с целью выявления основных закономерностей и механизмов, определяющих состояние плотной плазмы. Цель исследования заключается в анализе влияния снижения потенциала ионизации на ионизационное равновесие в плотной вырожденной плазме. Мы предлагаем новый подход к описанию этого явления, который учитывает как длину экранирования Дебая, так и длину экранирования Томаса-Ферми. Данная работа имеет как научную, так и практическую значимость. С научной точки зрения, она расширяет наше понимание физики плазмы в экстремальных условиях, что имеет важное значение для различных областей физики, включая астрофизику и лазерную плазмодинамику. С практической точки зрения, результаты исследования могут быть полезными для разработки новых методов контроля плазменных процессов в различных технологических приложениях, таких как инерциальный термоядерный синтез и термоядерное зажигание. Методология исследования включает в себя математическое моделирование и численные расчеты, основанные на уравнениях Саха, учитывающих снижение

потенциала ионизации. Основные результаты работы позволяют утверждать, что снижение потенциала ионизации приводит к значительным изменениям в ионизационном равновесии в плотной плазме. В целом, проведенное исследование вносит существенный вклад в область физики плазмы, предоставляя новые знания о поведении плотной вырожденной плазмы с учетом снижения потенциала ионизации.

Ключевые слова: химический потенциал, длина экранирования Дебая, длина экранирования Томаса-Ферми, уравнение Саха, ионизационное равновесие.

E.O. Shalenov^{1*}, S.R. Zhumasheva², Ye.S. Seitkozhanov^{1,2}, K.N. Dzhumagulova^{1,2}

¹Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

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

*e-mail: erik.shalenov@gmail.com

Study of ionization equilibrium taking into account the depression of ionization potential in a dense degenerate plasma

In modern plasma research, special attention is paid to the study of ionization equilibrium under conditions of dense degenerate plasma, especially taking into account the depression of ionization potential. In this work, we conducted a study of this phenomenon in order to identify the main patterns and mechanisms that determine the state of dense plasma. The goal of the study is to analyze the effect of depression of ionization potential on the ionization equilibrium in a dense degenerate plasma. We propose a new approach to describe this phenomenon that takes into account both the Debye and Thomas-Fermi screening lengths. This work has both scientific and practical significance. From a scientific point of view, it expands our understanding of plasma physics under extreme conditions, which has important implications for various fields of physics, including astrophysics and laser plasmadynamics. From a practical point of view, the results of the study can be useful for the development of new methods for controlling plasma processes in various technological applications, such as inertial thermonuclear fusion and thermonuclear ignition. The research methodology includes mathematical modeling and numerical calculations based on the Saha equations, which take into account the depression of ionization potential. The main results of the work suggest that the depression of ionization potential leads to significant changes in the ionization equilibrium in a dense plasma. Overall, this study makes a significant contribution to the field of plasma physics by providing new knowledge about the behavior of dense degenerate plasmas taking into account the depression of ionization potential.

Keywords: chemical potential, Debye screening length, Thomas-Fermi screening length, Saha equation, ionization equilibrium.

Кіріспе

Инертті газдар плазма физикасында жүйенің жабық қабығы сияқты қарапайым электронды құрылымға байланысты кеңінен зерттеледі. Плазманың әсері мен күй теңдеуі, әсіресе қатты қыздыру және қысу жағдайында, жалпы физика тұрғысынан айтарлықтай қызығушылық тудырады, сонымен қатар астрофизика, алып планеталар физикасы және энергетикадағы перспективалы қолданбалар үшін практикалық қызығушылық тудырады [1]. Газ және сұйық ксенонның күй теңдеуі мен электрөткізгіштігін өлшеу үшін әртүрлі эксперименттер мен теориялық модельдеулер жүргізілді [2-9]. Ксенонның ультра жоғары қысымда әсерін зерттеу үшін әртүрлі модельдер де қолданылды. Мысалы, 0 К кезіндегі қысым-көлем изотермасын есептеу үшін электронды жолақ теориясының кеңейтілген жазық толқын әдісі қолданылды [10].

Соққы деректерімен салыстыру үшін соққы сығымдау қисығын есептеу үшін атомаралық потенциалды пайдаланатын сұйықтық теориясы қолданылды [10], ал иондану құрамын анықтау үшін химиялық модель пайдаланылды [11]. Плазманың иондану құрамына ерекше көңіл бөлінеді, өйткені бұл оның термодинамикалық, транспорттық және оптикалық қасиеттерін есептеуге негіз болады. Ксенон газының жоғары тығыздықтағы химиялық моделі [11] атомдық және иондық түрлер мен электрондар арасындағы әртүрлі өзара әрекеттесулерді ескергенімен, әртүрлі бөлшектердің өзара әрекеттесуінен туындаған иондану энергиясының төмендеуін түзету бұл модельде қарастырылмаған.

Астрофизика мен плазма физикасында иондалу тепе-теңдігі плазмадағы атомдар мен иондардың иондану және рекомбинация процестері [12] арасындағы тепе-теңдікті білдіреді. Плазма ионизациясының дәрежесі осы

процестер арасындағы тепе-теңдікпен анықталады, бұл өз кезегінде плазманың температурасына, тығыздығына және құрамына байланысты. Тығыз плазмада иондану потенциалымен қабылданатын тиімді электр өрісін төмендететін қорғаныс әсерін тудыратын басқа зарядталған бөлшектердің болуына байланысты төмендейді. Бұл әсер иондану потенциалының төмендеуі ретінде белгілі және оны плазмадағы зарядталған бөлшектердің әрекетін сипаттайтын модель болып табылатын Дебай-Хюккель теориясымен сипаттауға болады. Дебай-Хюккель теориясы иондану потенциалы плазманың тығыздығы мен температурасына байланысы төмендейді деп болжайды. Төмен температурада экрандалу әсері әлсіз және иондану потенциалы шамалы ғана төмендейді. Бірақ жоғары тығыздық пен температурада экрандалудың әсері басым болады және иондану потенциалын бірнеше реттік деңгейге төмендетуге болады.

Плазма бөлшектерінің әсерлесу потенциалдары

Тығыз плазмадағы бөлшектердің әсерлесу моделін жасау, олардың негізінде атомдық байланысқан күйлерді анықтау, соқтығысу процесстерін зерттеу арқылы жүйенің кинетикалық, термодинамикалық, оптикалық, спектроскопиялық және т.б. қасиеттерін зерделеу тығыз плазмамен байланысты технологиялар үшін маңызды және үлкен фундаменталды қызығушылыққа ие. Плазмадағы бөлшектердің әсерлесуінің эффективті потенциалын анықтаудың екі әдісі бар. Бірінші әдіс бойынша фазалық кеңістіктегі таралу функциялары үшін жалпылама Больцман-Пуассон теңдеуі шешіледі. Екінші әдіс диэлектрлік үн қату (отклик) функциясына негізделген.

Вакуумдағы зарядталған бөлшектердің Кулон потенциалымен әсерлесетіні белгілі. Дегенмен тығыз плазмада заряд өрісінің экрандалуы, әсерлесетін бөлшектердің толқындық қасиеттерінің күшеюі, сонымен қатар басқа да эффектілердің байқалатындығынан, ондағы зарядтар әсерлесуін сипаттау үшін Кулон потенциалын қолдана алмаймыз. Алыс қашықтықтардағы экрандалуды ескеретін белгілі Дебай-Хюккель (DH) потенциалын да тығыз плазмадағы бөлшектердің әсерлесуін сипаттау үшін қолдану тиімсіз. Себебі тығыз плазма аймағы үшін электрондардың азғындалу әсерлері күшейе түседі, ал Дебай-Хюккель потенциалы [13-16] классикалық плазма үшін ғана жарамды:

$$\Phi_{DH}(r) = \frac{Ze^2}{r} \text{Exp}(-k_D r), \quad (1)$$

мұндағы $k_D^2 = k_s^2 + k_i^2 = r_D^{-2}$ – кері Дебай радиусы, $k_s^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{k_B T}$, $k_i^2 = \frac{4\pi n_i e^2}{k_B T}$, n_e және n_i – электрондар мен иондардың концентрациясы, T – плазманың температурасы, r – бөлшектердің арақашықтығы. Дебай – Хюккель потенциалы үлкен арақашықтықта экрандалуға, ал аз арақашықтықта Кулон потенциалына ұмтылады. Ескере кететіні, плазмадағы бөлшек өрісінің экрандалуы зарядтардың тұрақталған статистикалық таралуы үшін Пуассон-Больцман теңдеуінен алынған экрандалған Дебай радиусы арқылы сипатталады. Бірақ, бұл жуықтаулар идеалды немесе квазиклассикалық плазма болған жағдайда орындалады. Егер плазма тығыздығының азғындалған плазмаға немесе кванттық плазмаға сәйкес келетін тығыздықтарға дейін өссе, онда экрандалу ұзындығы Дебай және Томас-Ферми жіктелулерінің арасында интерполяцияланатын электрондық кері экрандалу радиусына тең ескеру қажеттігі туады. [17] жұмыста экрандалу ұзындығы Дебай және Томас-Ферми ескеретін тәсіл ұсынылған. Экрандалу ұзындығы Дебай және Томас-Ферми келесідей жазылады:

$$k_s \rightarrow k_{id}^2 = \frac{1}{2} k_{TF}^2 \theta^{1/2} I_{-1/2}(\eta), \quad (2)$$

мұндағы $k_{TF} = \frac{\sqrt{3}\omega_p}{v_F} = \sqrt{\frac{4k_F}{\pi a_B}}$ – Томас-Ферми

толқындық саны, $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$ – плазмалық

жиілік, $v_F = \frac{\hbar k_F}{m_e}$ – Ферми жылдамдығы,

$k_F = (3\pi^2 n_e)^{1/3}$, θ – плазманың азғындалу параметрі. Онда Дебай және Томас-Ферми (DTF) экрандалу ұзындығын ескеретін (1) Дебай-Хюккель потенциалы келесідей жазылады:

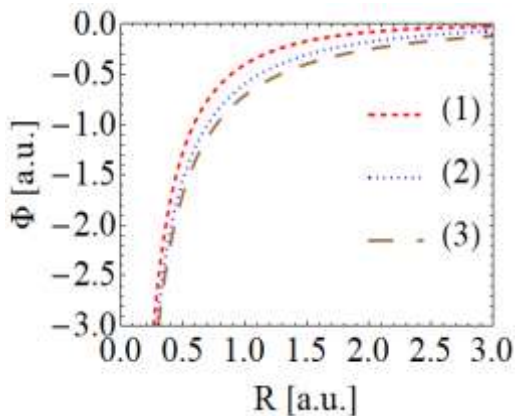
$$\Phi_{DTF}(r) = \frac{Ze^2}{r} \text{Exp}(-k_D r), \quad (3)$$

мұндағы $k_D^2 = k_{id}^2 + k_i^2 = r_D^{-2}$.

Электрон-иондық әсерлесу үшін анықталған (3) потенциалдың графиктері 1-2-суреттерде көрсетілген. Ол потенциал экрандалу эффектілерін ескеретіндіктен үлкен

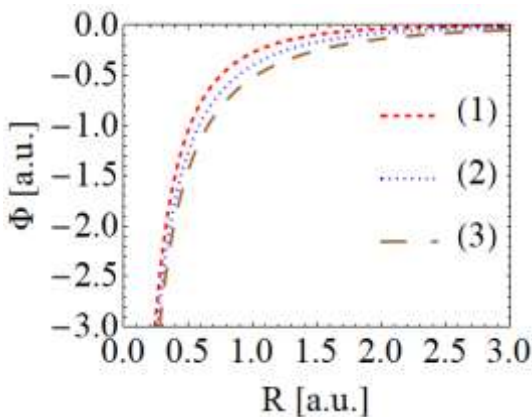
арақашықтықтарда нөлге тезірек ұмтылады. 1 – суреттегі график тығыздық параметрінің тұрақты мәніндегі азғындалу параметрінің әр түрлі мәндері үшін алынған, ал 2-суреттегі график азғындалу параметрінің тұрақты мәніндегі әр түрлі тығыздық параметрі үшін алынған. Тығыздық параметрі өскен сайын электрон – ион әсерлесуі үшін потенциалдар едәуір төмендегені байқалған.

3-4 суреттерде (1) және (3) потенциалдарының графиктері келтірілген, осы суреттерден көрініп тұрғандай тығыздық параметрі артқан сайын потенциалдың абсолют мәні төмендейтінін көреміз, ал арақашықтығы азайғанда (1) потенциалы (3) потенциалына жақын келеді.



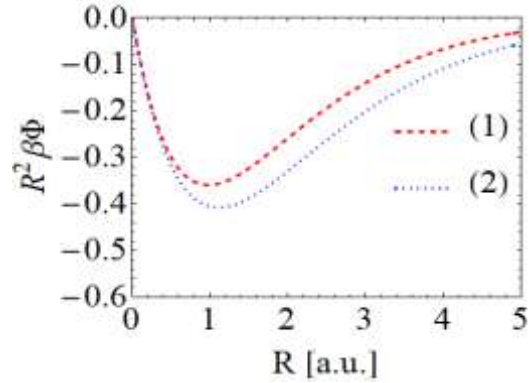
(1) - $\theta = 0.5$, (2) - $\theta = 1.0$, (3) - $\theta = 1.5$ мәндері үшін DTF потенциал (3) негізінде алынған.

Сурет 1 – Сутегі плазмасы үшін алынған электрон – иондық әсерлесу потенциалдары $r_s = 5$



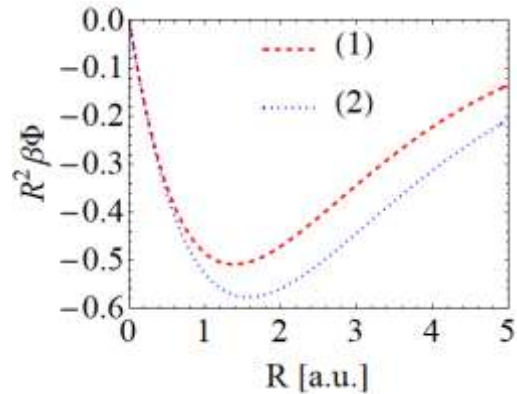
(1) - $r_s = 2.5$, (2) - $r_s = 5$, (3) - $r_s = 10$ мәндері үшін DTF потенциал (3) негізінде алынған.

Сурет 2 – Сутегі плазмасы үшін алынған электрон – иондық әсерлесу потенциалдары $\theta = 0.5$



(1) - DTF потенциал (3) негізінде алынған, $k_{id}^2 + k_i^2$; (2) - DH потенциал (1) негізінде алынған, $k_s^2 + k_i^2$.

Сурет 3 – Сутегі плазмасы үшін алынған электрон – иондық әсерлесу потенциалдары. $\theta = 0.5, r_s = 4$

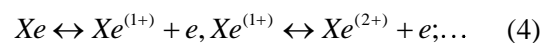


(1) - DTF потенциал (3) негізінде алынған, $k_{id}^2 + k_i^2$; (2) - DH потенциал (1) негізінде алынған, $k_s^2 + k_i^2$.

Сурет 4 – Сутегі плазмасы үшін алынған электрон – иондық әсерлесу потенциалдары. $\theta = 0.5, r_s = 8$.

Иондану потенциалының төмендеуі және иондалған ксенон плазмасының құрамы

Иондалған плазманың құрамын анықтау үшін плазма электрондардан, иондардан және атомдардан тұратын химиялық модельді қолданады [31, 32]. Осындай химиялық модельді тығыз иондалған ксенон плазмада келесі иондану процестері жүреді:



Термодинамикалық тепе – теңдіктегі химиялық реакциялар жүйесі химиялық потенциалдар μ_k көмегімен химиялық тепе – теңдіктің сәйкес шарттарымен сипатталады:

$$\mu_{k-1} = \mu_k + \mu_e + E_{ion}^k (k = 1 \dots k_{max}). \quad (5)$$

Максималды иондану еселігімен ксенон плазмасының құрамын есептеуге арналған Саха теңдеулер жүйесі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{n_{Xe}}{n_{Xe}^{1+} n_e^{free}} = \frac{g_0}{g_{1+}} \frac{\lambda^3}{2} \text{Exp} \left(\frac{I_1 - \Delta I}{k_B T} \right) \\ \frac{n_{Xe}^{1+}}{n_{Xe}^{2+} n_e^{free}} = \frac{g_{1+}}{g_{2+}} \frac{\lambda^3}{2} \text{Exp} \left(\frac{I_2 - \Delta I}{k_B T} \right) \\ \dots \\ \frac{n_{Xe}^{k-1}}{n_{Xe}^{k+} n_e^{free}} = \frac{g_{k-1}}{g_k} \frac{\lambda^3}{2} \text{Exp} \left(\frac{I_{k+} - \Delta I}{k_B T} \right) \end{array} \right. , \quad (6)$$

мұндағы n_{Xe} – жеке иондалған Xe иондарының концентрациясы, n_e^{free} – бос электрондардың концентрациясы, $\frac{g_{k-1}}{g_k}$ – бөлу функциясы болып табылады.

Саха теңдеулер жүйесін шешу үшін ядролар санының сақталуын және жүйедегі зарядтардың бейтараптығын қарастыру керек:

$$\sum_{k=1} n_k + n_0 = const, \dots \sum_{k=1} kn_k = n_e. \quad (7)$$

Жүйедегі бос электрондар, иондар және атомдар санының $n_i + n_0$ ядроларының жалпы санына қатынасы ретінде иондалған коэффициентті енгізу қажет:

$$\alpha_{k+} = \frac{n_{k+}}{(n_0 + n_i)}. \quad (8)$$

Плазма компоненттерінің концентрациясы арасындағы байланысты келесідегідей сипаттауға болады:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{Xe} = \frac{n_{Xe}}{n_{tot}} \\ \alpha_{Xe}^{1+} = \frac{n_{Xe}^{1+}}{n_{tot}} \\ \dots \\ \alpha_{Xe}^{k+} = \frac{n_{Xe}^{k+}}{n_{tot}} \end{array} \right. , \quad (9)$$

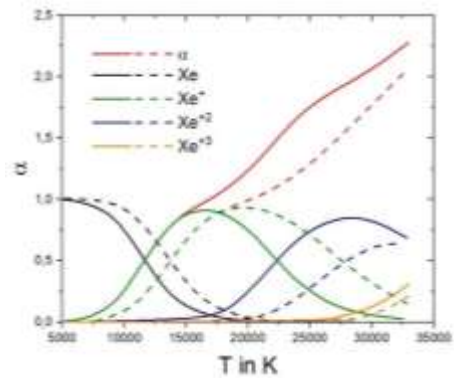
Ядролар санының сақталу заңы:

$$n_{tot} = n_{Xe} + n_{Xe}^{1+} + n_{Xe}^{2+} + \dots + n_{Xe}^{k+}. \quad (10)$$

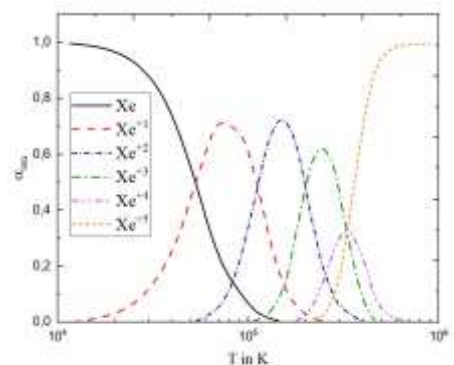
Жүйедегі толық зарядтардың сақталу заңы:

$$n_e^{free} = n_{Xe}^+ + 2n_{Xe}^{1+} + 3n_{Xe}^{2+} + \dots + kn_{Xe}^{k+}. \quad (11)$$

Ксенон плазмасының құрамы сандық әдістер арқылы алынды. Есептеу нәтижелері 5-7 суреттерде көрсетілген. Ксенон плазмасындағы өзара әрекеттесу потенциалының төмендеуі (6-11) теңдеулері негізінде шешілді. Жалпы тығыздық ксенонды құрамын анықтаудағы бастапқы тығыздығы ретінде қабылданды. Бастапқыдағы температура 33000 К шамасына өзгерді. Температура жоғарылаған сайын жүйедегі электрондар концентрациясы артты. 5 суретте көрсетілгендей жалпы тығыздық $n = 1.24 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ деп есептелінді.

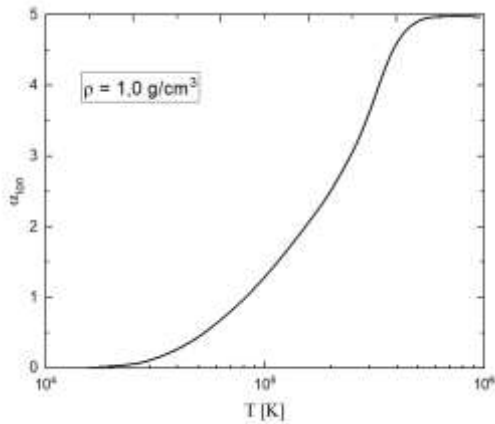


Сурет 5 – $n = 1.24 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ кезіндегі Xe плазмасының құрамы: тұтас сызықтар - [18] жұмыс нәтижелері, үзік сызықтар – біздің нәтижелер



(1) - DTF потенциал (3) негізінде алынған, $k_{id}^2 + k_i^2$; (2) - ДН потенциал (1) негізінде алынған, $k_s^2 + k_i^2$.

Сурет 6 – Температураның функциясы ретінде $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ тұрақты тығыздықтағы әртүрлі иондану кезеңдеріндегі Xe плазмасының құрамы



(1) - DTF потенциал (3) негізінде алынған, $k_{id}^2 + k_i^2$; (2) - ДН потенциал (1) негізінде алынған, $k_s^2 + k_i^2$.

Сурет 7 – Хе плазмасының құрамы $\rho = 1\text{г/см}^3$ тұрақты тығыздықта иондану дәрежесін көрсететін температураға тәуелділік графигі

Қорытынды

Плазма бөлшектерінің әсерлесу потенциалдары жайлы зерттелінді, сол бойынша графиктер алынды. Иондалған сутегі плазмасының құрамы есептелді. Бұл үшін жүйенің зарядталған бөлшектерінің өзара әрекеттесуінен туындаған иондану

потенциалының төмендеуін ескере отырып, Саха теңдеуі шешілді. Жүйедегі бөлшектердің әрекеттесуінен туындаған электрондар мен иондардың иондану потенциалдарының төмендеуі плазманың химиялық моделі негізінде есептелді. Химиялық модель шеңберінде әртүрлі элементтердің иондану тепе-теңдігі мен плазма құрамы зерттелді. ксенон плазмаларының құрамы Саха теңдеуі арқылы иондану потенциалының төмендеуін ескере отырып есептелді. Бұл жұмыста есептелген электрондар мен иондардың иондану потенциалының төмендеуі иондану тепе-теңдігін сиретілген плазмамен салыстырғанда ионданудың жоғары дәрежелеріне жылжитатыны көрсетілген. Бұл плазмалық ортаның әсерінен байланысқан күйлердің энергетикалық деңгейлерінің деформациялануына байланысты, соның нәтижесінде атомды төменгі энергияларда иондандыруға болады. Жұмыс барысында алынған нәтижелер басқада ғалымдардың жұмыстарымен салыстырылды.

АЛҒЫС

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант нөмері АР19676689).

Әдебиет

- 1 Ruffio J.-B., Katelyn H., Dimitri M., Lee J.R., Konstantin B., Jason W., Max M.-B., et al. Detecting exomoons from radial velocity measurements of self-luminous planets: application to observations of HR 7672 B and future prospects // The Astronomical Journal. – 2023. – Vol.165, No. 3. – P.113.
- 2 Becker A., Collins L. A., Kress J.D., and Troullier N. Ionization and equation of state of dense xenon //Physical Review B. – 1994. – Vol.50, no. 24. – P.17720.
- 3 Mazevet S., and Ceperley D.M. "Xenon at high pressure and temperature //Physical Review B. – 2007. – Vol.76, no. 18. – P.184107.
- 4 Shalеноv 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 //Contributions to Plasma Physics. – 2017. – Vol.57, no. 10. – P.486–92.
- 5 Soubiran F., Zérah G., and Mazevet S. Ab initio equations of state for xenon in a wide pressure–temperature range //Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – Vol.215, no. 1. – P.012088.
- 6 Dzhumagulova K.N., Shalеноv E.O., Tashkenbayev Ye.A., and Ramazanov T.S. Study of the electron–atom collisions in dense semiclassical plasma of noble gas //Journal of Plasma Physics. – 2022. – Vol.88, no.1. – 905880119.
- 7 Belov S.I., and Ryzhov V.N. New ab initio equation of state of xenon //High Temperature. – 2014. – Vol.52, no. 5. – P.730-734.
- 8 Kuhlbrodt S., Redmer R., Reinholz H., Ropke G., Holst B., Mintsev V.B., Grayaznov V.K., Shilkin N.S., and Fortov V.E. Electrical conductivity of noble gases at high pressures //Contr. to Plasma Physics. – 2005. – Vol.45. – P.61.
- 9 Cong W., Gu Y., Chen Q., He X.T., and Zhang P. Equation of state for shock compressed xenon in the ionization regime: ab initio study //Communications in Theoretical Physics. – 2012. – Vol. 58, no. 1. – P.160–164.
- 10 Ross M., and McMahan A.K. Condensed xenon at high pressure //Physical Review. – 1980. – Vol.21, no. 4. – P.1658–64.
- 11 Schwarz V., Juranek H., and Redmer R. Noble Gases and hydrogen at high pressures //Physical Chemistry Chemical Physics. – 2005. – Vol.7, no. 9. – P.1990.
- 12 Shalеноv E.O., Seisembayeva M.M., Dzhumagulova K.N., and Ramazanov T.S. Kinetic ionization and recombination coefficients in the dense semiclassical plasmas on the basis of the effective interaction potential //Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol.1400. – 077035.

13 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. – e202200014.

14 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.

15 Shalenov E.O., Kossymkyzy Zh., Seisembayeva M.M., Masheyeva M.U., Jumagulov M.N., and Dzhumagulova K.N. Differential scattering cross section of the dense semiclassical plasma based on the born method //Recent Contributions to Physics. – 2020. – Vol.73, no. 2. – P.34–40.

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. – 100832.

17 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. – e202200017.

18 Raitza T., Reinholz H., Röpke G., Mintsev V., and Wierling A. Reflectivity in shock wave fronts of xenon //Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2006. – Vol.39, no. 17. – P.4393–99.

References

- 1 J.-B. Ruffio, H. Katelyn, M. Dimitri, et al., The Astronomical Journal, 165 (3), 113 (2023).
- 2 A. Becker, L.A. Collins, J.D. Kress, and N. Troullier, Physical Review B, 50 (24), 17720 (1994).
- 3 S. Mazevet, and D.M. Ceperley, Physical Review B, 76 (18), 184107 (2007).
- 4 E.O. Shalenov, S. Rosmej, et al., Contributions to Plasma Physics, 57, 486–92 (2017).
- 5 F. Soubiran, G. Zérah, and S. Mazevet, Journal of Physics Conference Series, 215, 012088 (2010).
- 6 K.N. Dzhumagulova, E.O. Shalenov, et al., Journal of Plasma Physics, 88, 905880119 (2022).
- 7 S.I. Belov and V.N. Ryzhov, High Temperature, 52, 730-734 (2014).
- 8 S. Kuhlbrodt, R. Redmer, et al., Contributions to Plasma Physics, 45, 61 (2005).
- 9 W. Cong, Y. Gu, et al., Communications in Theoretical Physics, 58, 160–64 (2012).
- 10 M. Ross and A.K. McMahan, Physical Review, 21, 1658–64 (1980).
- 11 V. Schwarz, H. Juraneck, and R. Redmer, Physical Chemistry Chemical Physics, 7, 1990 (2005).
- 12 E.O. Shalenov, M.M. Seisembayeva, et al., Journal of Physics Conf. Series, 1400, 077035 (2019) .
- 13 M.M. Seisembayeva, H. Reinholz, et al., Contributions to Plasma Physics, 62, e202200014 (2022).
- 14 M.M. Seisembayeva, E.O. Shalenov, et al., Physics Letters A, 447, 128313 (2022).
- 15 E.O. Shalenov, Zh. Kossymkyzy, et al., Recent Contributions to Physics, 2 (73), 34–40 (2020).
- 16 M.N. Jumagulov, M.M. Seisembayeva, et al., High Energy Density Physics, 36, 100832 (2020).
- 17 E.O. Shalenov, A.T. Nuraly, and K.N. Dzhumagulova, Contrib. to Plasma Physics, 62, e202200017 (2022).
- 18 T. Raitza, H. Reinholz, et al., Journal of Physics A Mathematical and General, 39, 4393–99 (2006).

Мақала тарихы:

Түсті – 14.02.2024

Қабылданды – 05.03.2024

Article history:

Received 14 February 2024

Accepted 05 March 2024

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Ерік Шаленов** (автор корреспондент) – PhD, Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан, email: erik.shalenov@gmail.com).

2. **С. Жұмашева** – PhD студенті, Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, ЭТФҒЗИ (Алматы қ., Қазақстан, email: utepova_daniya@mail.ru).

3. **Елдос Сейтқожанов** – PhD студенті, Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, ЭТФҒЗИ (Алматы қ., Қазақстан, email: Saken.Toktarbay@kaznu.edu.kz).

4. **Қарлығаш Джумагулова** – физ.-мат.ғыл.докт., проф., Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, ЭТФҒЗИ (Алматы қ., Қазақстан, email: Manas.Khassanov@kaznu.edu.kz).

Information about authors:

1. **Erik Shalenov** (corresponding author) – PhD, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, email: erik.shalenov@gmail.com).

2. **S. Zhumasheva** – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, IETP (Almaty, Kazakhstan, email: utepova_daniya@mail.ru).

3. **Yeldos Seitkozhanov** – PhD student, Satbayev University, Al-Farabi Kazakh National University, IETP (Almaty, Kazakhstan, email: kosov_vlad_nik@list.ru).

4. **Karlygash Dzhumagulova** – Dr. of Phys. and Math. Sc., Prof., Satbayev University, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: Saken.Toktarbay@kaznu.edu.kz).