

Ә.Б. Ашықбаева* , Ә. Асқарұлы ,

С.А. Сызғанбаева , Р. Чичулина 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: 02assel@gmail.com

ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАНЫҢ ЭЛЕКТРОДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖӘНЕ ДИАГНОСТИКАСЫ

Бұл жұмыста модельдік екікомпонентті тығыз плазма квазиклассикалық жуықтауда өзара үйлестірілген бес-моменттік әдіс негізінде қарастырылады. Ұсынылған есептеу әдісінің ерекшелігі – сәйкестендіру параметрлерінің болмауы және есептеулер үшін тек плазма параметрлерінің қажеттілігі. Электродинамикалық сипаттамалар есептеліп, талданды. Алынған нәтижелер молекулалық динамика әдісімен модельдеу барысында басқа авторлар тапқан деректермен салыстырылды.

Бұл жүйенің статикалық сипаттамалары Дойч псевдопотенциалы арқылы гиперцептік жуықтаудағы Орнштейн-Цернике теңдеуін шешу арқылы анықталды. Дойч псевдопотенциалы үлкен қашықтықта Кулон потенциалы сияқты әрекет етеді, бірақ шағын қашықтықта шекті болады, өйткені ол бөлшектердің кванттық қасиеттерін ескереді.

Моменттер әдісін қолданған есептеулердің ерекшелігі – есептеу қатынастарына кіретін Неванлинна параметр-функциясын анықтау қажеттілігі. Осы зерттеуде бұл функция әртүрлі реттің моменттері қатынасынан ғана тәуелді болады.

Дисперсиялық теңдеу моменттер әдісі арқылы шешілді, одан плазмалық толқындардың дисперсиясы мен өшу декременті алынды. Алынған мәліметтер сандық тәжірибемен салыстырылды. Сонымен қатар, плазма температурасын анықтау үшін бағалау диагностикасының әдісі ұсынылды.

Түйін сөздер: екікомпонентті плазма, моменттер әдісі, Неванлинна параметр-функциясы, динамикалық құрылымдық фактор, плазма диагностикасы, плазмалық толқындардың дисперсиясы, плазмалық толқындардың өшу декременті.

A.B. Ashikbayeva*, A. Askaruly, S.A. Syzganbayeva, R. Chichulina

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: 02assel@gmail.com

Electrodynamic Characteristics and Diagnostics of Dense Plasma

In this work, a model two-component dense plasma is considered within the framework of a self-consistent five-moment approach in the quasi-classical approximation. The proposed calculation method is distinguished by the absence of fitting parameters and requires only knowledge of plasma parameters for calculations. The electrodynamic characteristics of the system were calculated and investigated. The obtained results are compared with data found by other authors using molecular dynamics simulations.

The static characteristics of this system were found from the solution of the Ornstein-Zernike equation in the hyperchain approximation using the Deutsch pseudopotential, which behaves like the Coulomb potential at large distances and is finite at small distances, since it takes into account the quantum properties of particles.

A distinctive feature of the moment method calculations is the necessity of determining the so-called Nevanlinna parameter function, which is included in the computational relations. In this study, this function depends only on the ratio of moments of different orders.

The dispersion and damping decrement of plasma waves were determined by solving the dispersion equation using the moment method and comparing it with numerical experiments. Additionally, a method for approximate plasma temperature diagnostics is proposed.

Key words: two-component plasma, moment method, Nevanlinna parameter function, dynamic structure factor, plasma diagnostics, plasma wave dispersion, plasma wave damping decrement.

А.Б. Ашықбаева*, А. Аскарулы, С.А. Сызганбаева, Р. Чичулина
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*e-mail: 02assel@gmail.com

Электродинамические характеристики и диагностика плотной плазмы

В данной работе модельная двухкомпонентная плотная плазма рассматривается в рамках самосогласованного пятимоментного подхода в квазиклассическом приближении. Предложенный метод расчета отличается отсутствием подгоночных параметров и требует для расчетов только знания параметров плазмы. Рассчитаны и исследованы электродинамические характеристики системы. Полученные результаты приведены в сравнении с данными, найденными другими авторами в рамках моделирования методом молекулярной динамики.

Статические характеристики данной системы были найдены из решения уравнения Орнштейна-Зернике в гиперцепном приближении с помощью псевдопотенциала Дойча, который на больших расстояниях ведет себя как потенциал Кулона, а на малых конечен, так как учитывает квантовые свойства частиц.

Особенностью вычислений с использованием метода моментов является необходимость определения так называемой параметр-функции Неванлинны, входящей в расчетные соотношения. В настоящей работе данная функция зависит лишь от отношения моментов различных порядков.

Определены дисперсия и декремент затухания плазменных волн решением дисперсионного уравнения методом моментов в сравнении с численным экспериментом. А также, предложен метод оценочной диагностики температуры плазмы.

Ключевые слова: двухкомпонентная плазма, метод моментов, функция-параметр Неванлинны, динамический структурный фактор, диагностика плазмы, дисперсия плазменных волн, декремент затухания плазменных волн.

Кіріспе

Тығыз идеалды емес плазма әртүрлі астрофизикалық объектілерде де (ақ ергежейлі, нейтрондық жұлдыздар) [1] және бірқатар тәжірибелік қондырғыларда (электролиттер, коллоидтық жүйелер, шанды плазма және т.б.) кездеседі [2-7]. Бұл жағдайда бөлшектердің өзара әрекеттесуінің потенциалдық энергиясы әдетте плазма бөлшектерінің қозғалысының жылу энергиясынан үлкен немесе оған тең болады. Плазманың диэлектрлік қасиеттері дәстүрлі түрде сандық модельдеу арқылы да, теориялық тұрғыдан да әртүрлі бөлшектер аралық әрекеттесу потенциалдарын пайдалана отырып зерттеледі. «*Ab initio*» тәсілін қолданатын сандық әдістер динамикалық құрылымдық факторлармен (ДҚФ) сипатталған ұжымдық процестерді зерттеуге тікелей қол жеткізуді қамтамасыз етеді [8, 9].

Ең дамыған теориялық зерттеу әдістеріне плазмалық толқындардың дисперсиясын есептеуге мүмкіндік беретін квазилокализацияланған зарядты талдау (QLCA) әдісі жатады, ал плазмалық толқындардың диссипациясы туралы мәселе ашық күйінде қалады [10]. Тығыз плазмалық ортада зарядталған бөлшектер арасындағы корреляция бөлшектердің кинетикалық

сипаттамаларымен салыстырғанда маңызды болған кезде, яғни жүйеде шағын параметрлер болмаған кезде, диэлектрлік функциялардың (ДФ) қолданбалы үлгілерінің сапасы туралы сұрақ туындайды. Бұл жұмыста моменттер әдісі арқылы электродинамикалық сипаттамаларды есептеу және плазмалық диагностика жүргізіледі.

Кулондық жүйелердің электродинамикалық сипаттамаларын зерттеудің теориялық тәсілі [11, 12], моменттердің пертурбативті емес әдісіне [13] негізделген және бірнеше жинақтау ережелерін мен басқа да дәл қатынастарды қанағаттандырады. Диэлектрлік функцияның жорамал бөлігінің моменттері мен статикалық сипаттамаларын білуі тығыз плазманың электродинамикалық қасиеттерін анықтауға және зерттеуге мүмкіндік береді. Осы жұмыста жүйенің электродинамикалық сипаттамаларына қатысты тәжірибелік деректерді алдын ала білуді қажет етпейтін моменттер әдісінің өзіндік келісімді нұсқасы [14] қолданылады. Осы әдіс аясында біз [14]-тегі сияқты Неванлинна параметрлік функциясының статикалық мәнін табамыз, себебі сандық модельдеу зерттеліп отырған плазмада күшті сөнетін диффузиялық ұжымдық моданың жоқтығын көрсетеді. Неванлинна функциясының бұл статикалық

мәні осы аттас теоремаға сәйкес динамикалық құрылымдық фактормен (ДҚФ) бізмәнді байланыста болады және қолданылатын жинақтау ережелері автоматты түрде орындалады. Бұған дейін Неванлинна функциясының статикалық моделі [15] екі компонентті плазма (ЕКП) моделінде ДҚФ-ты есептеу үшін жеткілікті тиімді екені көрсетілген болатын.

Екі компонентті идеал емес плазманың динамикалық құрылымдық факторын (ДҚФ) есептеу арқылы оны басқа авторлардың эксперименттік деректерімен салыстыруға болады. Алынған ДҚФ мәндері [8, 9] деректеріне жақын болды.

Осы жұмыста, қолданылған тәсілдің квазиклассикалық болуына қарамастан, моменттер әдісі арқылы есептелген және эксперименттік деректерді сандық түрде сипаттайтын динамикалық құрылымдық факторлар негізінде плазма температурасының бағалау әдісі ұсынылды.

Плазма параметрлері

Толық иондалған екі компонентті сутегі плазмасын зерттеу үшін дәстүрлі түрде келесі өлшемсіз байланыс және тығыздық параметрлері қолданылады:

$$\Gamma = \frac{\beta e^2}{a}, \quad \beta = \frac{1}{k_B T}, \quad r_s = \frac{a}{a_0}.$$

мұндағы

$$a = \sqrt[3]{3 / 4 \pi n}$$

– Вигнер-Зейтц радиусы, e – электрон заряды, k_B – Больцман тұрақтысы, T – температура, n – бөлшектер концентрациясы ($n_e = n_i$), a_0 – сутегі атомындағы электронның бірінші Боров орбитасының радиусы.

Бұрын айтылғандай, кванттық эффектілерді ескеру үшін Дойч потенциалы қолданылады

$$\Phi_{ab}(r) = \frac{e_a e_b}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r}{\lambda_{ab}}\right) \right]. \quad (1)$$

Мұнда e_a , e_b – бір-бірінен r қашықтықта орналасқан a және b типті бөлшектердің

зарядтары, $\lambda_{ab} = \frac{\hbar}{\sqrt{\pi \mu_{ab} k_B T}}$ – де Бройль толқын

ұзындығы, $\hbar$ – Планк тұрақтысы,

$\mu_{ab} = \frac{m_a m_b}{m_a + m_b}$ – келтірілген масса.

Моменттер әдісі

Моменттер әдісі кулондық жүйенің диэлектрлік қасиеттерін шығын функциясының $L(k, \omega)$ бірнеше дәрежелік моменттерін білу негізінде анықтауға мүмкіндік береді,

$$C_\nu(k) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^\nu L(k, \omega) d\omega, \quad \nu = 0, 2, 4. \quad (2)$$

Бұл моменттер – жинақтау ережелері [13], оларды бөлшектер арасындағы өзара әсерлесу потенциалы мен статикалық құрылымдық факторларды $S_{ab}(k)$ білу арқылы есептеуге болады. Соңғылары Орнштейн–Цернике теңдеуін гиперцептік жуықтауда [16] шешу арқылы есептелуі мүмкін. Соңында, шығын функциясы $L(k, \omega)$ диэлектрлік өтімділікпен келесі түрде байланысқан:

$$L(k, \omega) = -\frac{\text{Im } \varepsilon^{-1}(k, \omega)}{\omega}. \quad (3)$$

Жұмыс формулаларын жеңілдету үшін спектрлік функция – жоғалту функциясы – жиіліктің оң және жүйе функциясы ретінде таңдалады, сондықтан оның тақ ретті моменттері нөлге тең болады.

Моменттер әдісі шеңберінде алынған кері диэлектрлік функцияның формуласын жазайық [11]

$$\varepsilon^{-1}(k, \omega) = 1 + \frac{\omega_p^2(Q(k) + \omega)}{\omega(\omega^2 - \omega_2^2(k)) + Q(k)(\omega^2 - \omega_1^2(k))}, \quad (4)$$

мұндағы

$$\omega_1^2(k) = C_2(k) / C_0(k),$$

$\omega_2^2(k) = C_4(k) / C_2(k)$ және мұндағы Неванлинна функциясы-параметрі (НФП) статикалық жуықтауда [14] ретінде анықталғани:

$$Q(k) = \frac{i}{\sqrt{2}} \frac{\omega_2^2(k)}{\omega_1(k)}. \quad (5)$$

Моменттерге арналған өрнектер дербес түрде белгілі [11]:

$$C_0(k) = \frac{k_{De}^2}{k^2} (Z_e^2 S_{ee}(k) + Z_i^2 S_{ii}(k) - 2Z_i Z_e S_{ei}(k)),$$

$$k_{De}^2 = 4\pi n_e e^2 \beta, \quad (6)$$

$$C_2 = \omega_p^2, \quad (7)$$

$$C_4 = \omega_p^4 (\zeta_{ee}(q) + K(k) + U(k) + H). \quad (8)$$

Мұндағы

$$K(k) = \frac{\langle v_e^2 \rangle k^2}{\omega_p^2},$$

$$H = \omega_p^4 \left(-\frac{1}{6\pi^2 n_e} \int_0^\infty q^2 S_{ei}(q) \zeta_{ei}(q) dq \right),$$

$$U(k) = \omega_p^4 \left(\frac{1}{16\pi^2 n_e} \int_0^\infty q^2 (S_{ee}(q) - 1) \left(Z_{ee}(k, q) - \frac{8\zeta_{ee}(q)}{3} \right) dq \right),$$

$$Z_{ee}(k, q) = \int_{|q-k|}^{q+k} \zeta_{ee}(p) (q^2 - k^2 - p^2)^2 \frac{dp}{qk^3 p}.$$

Маңыздысы – бұл жерде өзара әрекеттесу потенциалының $\Phi_{ab}(q) = \frac{4\pi e^2}{q^2} \zeta_{ab}(q)$ форм-

факторы $\zeta_{ab}(q)$ ескеріледі. Мұндағы

$$\langle v_e^2 \rangle = 3 \frac{\theta}{m\beta} F_{3/2}(\eta) - \text{электрондардың орташа}$$

квадраты түріндегі жылулық жылдамдығы, m – олардың массасы, ω_p – жүйенің плазмалық жиілігі, F_ν – Ферми интегралы, ол келесі түрде анықталады

$$F_\nu(\eta) = \int_0^\infty \frac{x^\nu}{\exp(x - \eta) + 1} dx;$$

$\eta = \beta\mu$ – жүйенің өлшемсіз химиялық потенциалы, ол нормалану шартынан анықталады:

$$F_{1/2}(\eta) = \frac{2}{3} \theta^{-3/2}.$$

Динамикалық құрылымдық фактор

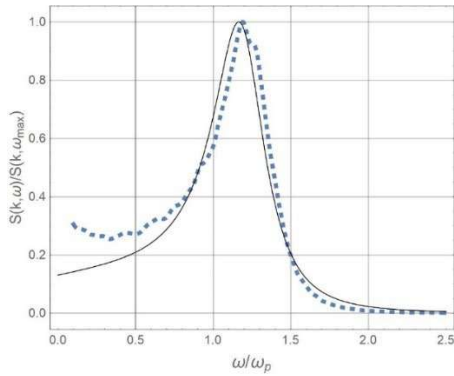
Флуктуация-диссипация теоремасы бойынша кванттық жүйенің динамикалық заряд-заряд құрылымдық факторы үшін келесі өрнекті жазуға болады:

$$S_{zz}(k, \omega) = \frac{L(k, \omega)}{\pi \beta \phi(k) b(\beta \hbar \omega)}, \quad (9)$$

мұнда $\phi(k) = 4\pi e^2 / k^2$ – Кулон потенциалының Фурье түрі, он Бозе функциясы $b(x) = (1 - \exp(-x)) / x$.

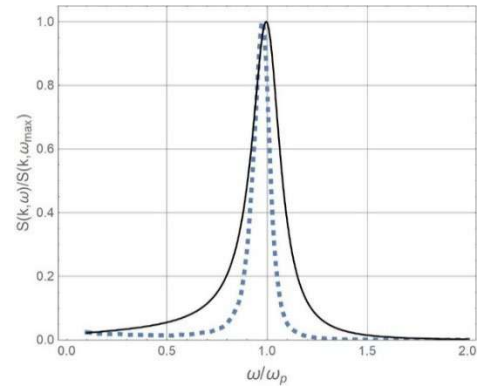
(9) өрнегіне моменттер әдісімен алынған диэлектрлік функцияның (4) формуласын қоя отырып, динамикалық құрылымдық факторды аламыз. Нәтижелер 1–2-суреттерде модельдеу нәтижелерімен [8, 9] салыстырмалы түрде көрсетілген.

1–2-суреттерде ДҚФ нәтижелері көрсетілген: мұндағы тұтас сызық – моменттер әдісімен алынған ДҚФ, ал көк шаршылар [8, 9] бойынша модельдеу нәтижелеріне сәйкес келеді.



$$\Gamma = 1, r_s = 1, ka = 0.7795$$

1-сурет – Динамикалық құрылымдық фактор



$$\Gamma = 2, r_s = 0.5, ka = 0.3898$$

2-сурет – Динамикалық құрылымдық фактор

Есептеу нәтижелерінен көрініп тұрғандай, моменттер әдісі арқылы алынған динамикалық құрылымдық фактор сандық эксперименттердің деректерімен [8, 9] жақсы сәйкес келеді. Бұл тағы да моменттер әдісінің артықшылығын дәлелдейді – яғни, кері диэлектрик функция (4) барлық жинақталатын қосынды ережелерін (6)–(8) автоматты түрде қанағаттандырады.

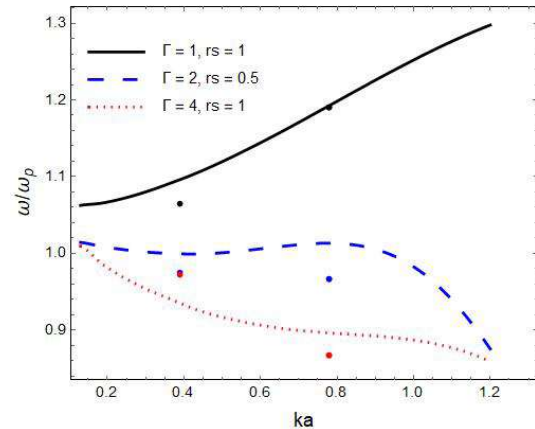
Плазмалық толқындардың дисперсиясы мен өшу декременті

Белгілі болғандай, динамикалық құрылымдық факторлар жүйенің электродинамикалық сипаттамаларын шамамен анықтауға мүмкіндік береді. Мысалы, ДҚФ пиктерінің абсцисса осіндегі орналасуы бойынша (бекітілген ka мәндерінде) толқындардың дисперсиясын оңай анықтауға болады, ал динамикалық құрылымдық фактордың жарты биіктіктегі жарты ені осы толқындардың диссипация декрементіне пропорционал [17, 18]. Дәл осы әдіс бойынша сандық эксперимент нәтижелерінен плазмалық толқындардың спектрі мен өшу декременті анықталды [8, 9]. Алынған мәліметтерді салыстыру үшін моменттер әдісі арқылы келесі дисперсиялық теңдеу шешілді [17, 18]

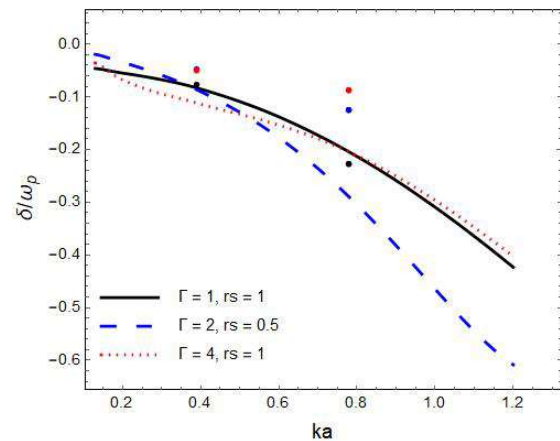
$$\omega(\omega^2 - \omega_2^2(k)) + Q(k)(\omega^2 - \omega_1^2(k)) = 0. \quad (10)$$

(10) теңдеуін шеше отырып, плазмандардың спектрі мен декременті алынады. Себебі электродинамикалық сипаттамаларды анықтау бойынша сандық эксперимент нәтижелері [8, 9] өте аз және тек кіші толқындық сандар үшін ғана

ұсынылған, сондықтан осы диапазон үшін плазмандардың спектрі мен декременті моменттер әдісі арқылы есептелді. Өртүрлі байланыс және тығыздық параметрлері үшін алынған нәтижелер 3-4-суреттерде келтірілген, мұндағы дөңгелектер [8, 9] деректері бойынша алынған эксперименттік мәндерді білдіреді.



3-сурет – Плазмандардың спектрі



4-сурет – Плазмандардың өшу декременті

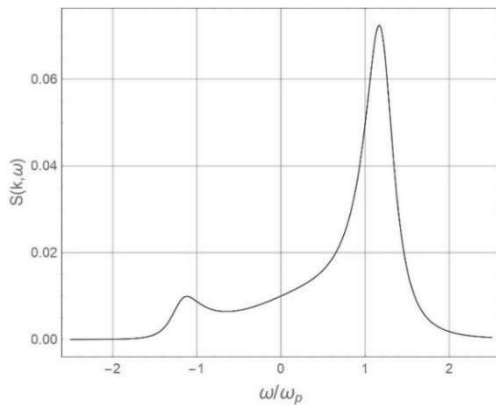
3-4-суреттерден көрініп тұрғандай, байланыс параметрі артқан сайын плазмалық толқындардың жиілігі азаяды, ал сөну декременті ұлғаяды – бұл құбылыс сандық эксперименттерде де сапалы түрде байқалады [8, 9].

Температураны анықтауы

Тенгерілген детальды баланс деп аталатын қатынас бар::

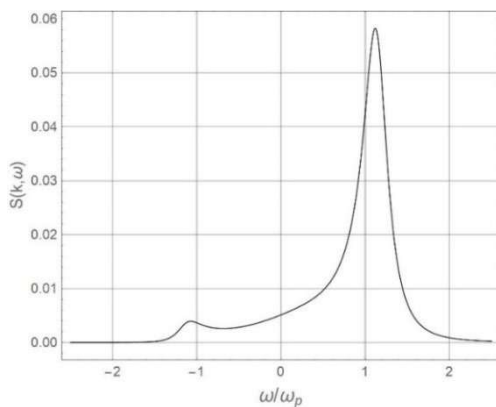
$$S(k, -\omega) = \exp(-\beta \hbar \omega) S(k, \omega),$$

мұнда $S(k, \omega)$ – динамикалық құрылымдық фактор (12). Бұл қатынастан оң жақтағы пиктің сол жақтағы пикке қарағанда биіктеу екені шығады [19, 20], бұл құбылысты 5–6-суреттерден көруге болады, мұнда ДҚФ жоғарыда сипатталған моменттер әдісі арқылы тұрғызылған.



$$\Gamma = 1, r_s = 1, ka = 0.7795$$

5-сурет – МЭ алынған динамикалық құрылымдық фактор



$$\Gamma = 2, r_s = 2, ka = 0.7795$$

6-сурет – МЭ алынған динамикалық құрылымдық фактор

Мұнда жиілік, жалпы алғанда, кез келген мәнге ие бола алады, бірақ пиктер маңында олардың биіктіктерінің айырмашылығы күштірек байқалады және бұл айырмашылықты байқау мен өлшеу оңайырақ.

Қарастырайық

$$\frac{S(k, -\omega)}{S(k, \omega)} = \exp(-\beta \hbar \omega) > 1.$$

Осыдан шығады:

$$\ln \frac{S(k, -\omega)}{S(k, \omega)} = -\beta \hbar \omega = -\frac{\hbar \omega}{k_B T} \Rightarrow T = \frac{\hbar \omega}{k_B \left(\ln \frac{S(k, \omega)}{S(k, -\omega)} \right)}.$$

Егер өлшемсіз жиілікті енгізсек:

$$x = \frac{\omega}{\omega_p},$$

онда егер x мәні $x_1 = 0.5$ мен $x_2 = 1.5$ аралығында өзгерсе,

$$T = \frac{\hbar x \omega_p}{k_B \left(\ln \frac{S(k, x \omega_p)}{S(k, -x \omega_p)} \right)} \quad (11)$$

немесе

$$\Gamma \sqrt{\frac{3}{r_s}} = \frac{1}{x} \left(\ln \frac{S(k, x \omega_p)}{S(k, -x \omega_p)} \right). \quad (12)$$

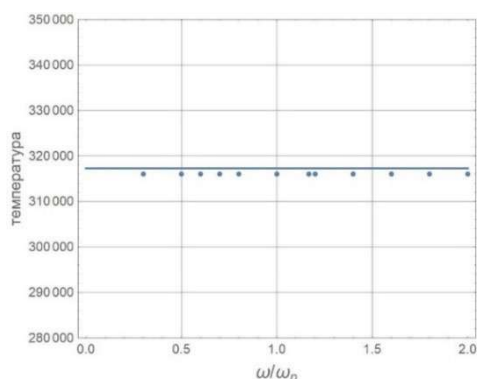
Екінші жағынан, егер Γ және r_s берілсе,

$$T_1 = \frac{e^2}{a_B k_B \Gamma r_s} = \frac{3.1561 \times 10^5}{\Gamma r_s}. \quad (13)$$

Осы бөлімнің мақсаты – (11) және (13) формулалары бойынша есептелген температура мәндерін салыстыру немесе (12) қатынасының орындалуын тексеру.

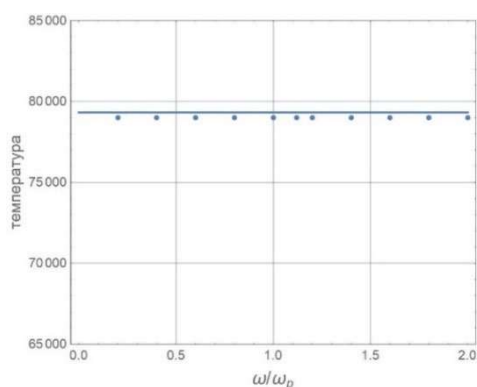
Нәтижелер 7–8-суреттерде келтірілген, мұндағы дөңгелекшелер – ДҚФ биіктіктерінің айырмасы графиктерінен (4–5-суреттер) белгілі бір оң және теріс жиіліктердегі мәндер бойынша

есептелген температуралар (11), ал тұтас сызық – нақты мәндер (13).



$$\Gamma = 1, r_s = 1$$

7-сурет – Температуралар мәндерін салыстыруы



$$\Gamma = 2, r_s = 2$$

8-сурет – Температуралар мәндерін салыстыруы

Қорытынды

Осы жұмыста моменттер әдісі арқылы толық иондалған екі компонентті сутегі плазмасының электродинамикалық сипаттамалары есептелді және олар сандық эксперименттердің нәтижелерімен [8, 9] салыстырылды.

Графиктерде көрсетілген нәтижелерден (1-4-суреттер) моменттер әдісімен алынған есептеулер деректерінің эксперименттік нәтижелермен жақсы сәйкестікте екені көрінеді. Сонымен қатар, бұл жұмыста моменттер әдісімен есептелген динамикалық құрылымдық факторлар негізінде плазманың температурасы анықталды және 7–8-суреттерде көрсетілген есептеулер нәтижелерінен көрініп тұрғандай, бағалау арқылы жүргізілген диагностика қанағаттанарлық нәтижелерге алып келеді.

Осылайша, берілген моменттер әдісі нұсқасының қолдануға жарамдылығы және Дойч псевдопотенциалына негізделген екі компонентті плазманың динамикалық қасиеттерін сипаттаудағы квазиклассикалық тәсіл гипотезасы расталды.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауымен орындалды (грант № AP23488267).

Әдебиеттер

1. Ichimaru, S. Nuclear fusion in dense plasmas // Rev. Mod. Phys. – 1993. – Vol. 65. – P. 255-299
2. S. Alexander, P. M. Chaikin, P. Grant, G. J. Morales, P. Pincus, and D. Hone, J. Charge Renormalization, Osmotic Pressure, and Bulk Modulus of Colloidal Crystals Theory // Chem. Phys. – 1984. – V. 80. – P. 5776.
3. K.Kremer, M. O. Robbins and G. S. Grest Phase Diagram of Yukawa Systems: Model for Charge-Stabilized Colloids// Phys. Rev. Lett. – 1986. – V. 57. – P. 2694.
4. H. Ohta and S. Hamaguchi Wave Dispersion Relations in Yukawa Fluids // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – P. 6026.
5. G. Kalman, M. Rosenberg, and H. E. DeWitt Collective Modes in Strongly Correlated Yukawa Liquids: Waves in Dusty Plasmas // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – P. 6030.
6. P. K. Kaw and A. Sen Low frequency modes in strongly coupled dusty plasmas // Phys. Plasmas. – 1998. – V. 5. – P. 3552.
7. M. S. Murillo Critical Wave Vectors for Transverse Modes in Strongly Coupled Dusty Plasmas // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 85. – P. 2514.
8. Pschiwul T. and Zwicknagel G. Dynamic response of two-component model plasmas // Contrib. Plasma Phys. 2003. – Vol. 43. – No. 5- 6. – P. 393-397.;
9. Wierling A., Pschiwul T., Zwicknagel G. Dynamic response of a one-component plasma at moderate coupling // Physics of Plasmas – 2002. – Vol. 9 (12). – P. 4871-4878
10. K. I. Golden and G. J. Kalman, Phys. Plasmas 7, 14 (2000); 8, 5064 (2001)
11. Tkachenko I.M., Arkhipov Yu.V., Askaruly A. The method of moments and its applications in plasma physics. – Germany: Lap Lambert Academic Publishing, 2012. – 125 p
12. Yu.V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov and I.M. Tkachenko Physical Review. E. – 2014 – V. 90 – P. 053102
13. Krein M. G., Nudel'man A. A. The Markov moment problem and extremal problems // Translations of Mathematical Monographs. American Mathematical Societ. – 1977. – Vol. 50. – P. 417

14. Yu. V. Arkhipov, A. Askaruly, A. E. Davletov, D. Yu. Dubovtsev, Z. Donkó, P. Hartmann, I. Korolov, L. Conde, I. M. Tkachenko Direct Determination of Dynamic Properties of Coulomb and Yukawa Classical One-Component Plasmas // Phys. Rev. Lett. – 2017. – Vol. 119 – P. 045001
15. Arkhipov Yu. V., Ashikbayeva A. B., Askaruly A., Davletov A. E., Syzganbaeva S., Voronkov V. V., Tkachenko I. M. Dense Plasma Dynamic Structure Factor Simulation Data vs. the Method of Moments // Contrib. Plasma Phys. – 2015. – Vol. 55. – P. 381-389
16. Архипов Ю. В., Баимбетов Ф. Б., Давлетов А. Е., Стариков К. В. Псевдопотенциальная теория плотной высокотемпературной плазмы. – Алматы: Қазақ Университеті, 2002. – 113 с.
17. Архипов Ю. В., Ашықбаева А. Б., Асқарұлы Ә., Дубовцев Д., Сызганбаева С. А., Ара Х, Колома Ю, Ткаченко И. М. О коллективных процессах в плотной кулоновской одно-компонентной плазме // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2017. – Вып. 19 – Т. 1. – с. 42-44.
18. Архипов Ю. В., Ашықбаева А. Б., Асқарұлы Ә., Дубовцев Д., Сызганбаева С. А., Ткаченко И. М. Динамические свойства плотной кулоновской плазмы // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2017. – Вып. 19 – Т. 2. – с. 82-85.
19. S. H. Glenzer, O. L. Landen, P. Neumayer, R. W. Lee, K. Widmann, S. W. Pollaine, R. J. Wallace, G. Gregori, A. Hölzl, T. Bornath, R. Thiele, V. Schwarz, W.-D. Kraeft, and R. Redmer Observations of Plasmons in Warm Dense Matter // PRL 98. – 2007. – Vol. 6. – P. 065002.
20. Tobias Dornheim, Maximilian Böhme, Dominik Kraus, Tilo Döppner, Thomas R. Preston, Zhandos A. Moldabekov and Jan Vorberger Accurate temperature diagnostics for matter under extreme conditions // Nature Communications. – 2022. – <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35578-7>

References

1. Ichimaru, S. Rev. Mod. Phys., 65, P. 255-299 (1993)
2. S. Alexander, P. M. Chaikin, P. Grant, G. J. Morales, P. Pincus, and D. Hone, J. Chem. Phys., 80, 5776 (1984).
3. K. Kremer, M. O. Robbins and G. S. Grest Phys. Rev. Lett., 57, 2694 (1986).
4. H. Ohta and S. Hamaguchi Phys. Rev. Lett., 84, 6026 (2000).
5. G. Kalman, M. Rosenberg, and H. E. DeWitt Phys. Rev. Lett., 84, 6030 (2000).
6. P. K. Kaw and A. Sen Phys. Plasmas., 5, 3552 (1998).
7. M. S. Murillo Phys. Rev. Lett., 85, 2514 (2000).
8. Pschiwul T. and Zwicknagel G. Contrib. Plasma Phys., 43, 5-6, 393-397 (2003).
9. Wierling A., Pschiwul T., Zwicknagel G. Physics of Plasmas, 9 (12), 4871-4878 (2002)
10. K. I. Golden and G. J. Kalman, Phys. Plasmas 7, 14 (2000); 8, 5064 (2001)
11. Tkachenko I. M., Arkhipov Yu. V., Askaruly A. The method of moments and its applications in plasma physics. – (Germany: Lap Lambert Academic Publishing, 2012, 125 p)
12. Yu. V. Arkhipov, A. B. Ashikbayeva, A. Askaruly, A. E. Davletov and I. M. Tkachenko Physical Review. E., 90, 053102 (2014)
13. Krein M. G., Nudel'man A. A. The Markov moment problem and extremal problems (Translations of Mathematical Monographs. American Mathematical Society, 1977, 50, 417p)
14. Yu. V. Arkhipov, A. Askaruly, A. E. Davletov, D. Yu. Dubovtsev, Z. Donkó, P. Hartmann, I. Korolov, L. Conde, I. M. Tkachenko Phys. Rev. Lett., 119, 045001 (2017)
15. Arkhipov Yu. V., Ashikbayeva A. B., Askaruly A., Davletov A. E., Syzganbaeva S., Voronkov V. V., Tkachenko I. M. Contrib. Plasma Phys., 55, 381-389 (2015)
16. Yu. V. Arkhipov, F. B. Baimbetov, A. E. Davletov and K. Starikov Pseudopotentsialnaja teorija plotnoi vysokotemperaturnoi plazmy (Almaty: Qazaq Universitety, 2002. -113 p.). (In Russ)
17. Yu. V. Arkhipov, A. B. Ashikbayeva, A. Askaruly, et. al. Journal of Open Systems Evolution Problems, 19(1), 42-44 (2017) (In Russ)
18. Yu. V. Arkhipov, A. B. Ashikbayeva, A. Askaruly, et. al. Journal of Open Systems Evolution Problems, 19(2), 82-85 (2017) (In Russ)
19. S. H. Glenzer, O. L. Landen, P. Neumayer, R. W. Lee, K. Widmann, S. W. Pollaine, et. al. PRL, 98, 6, 065002 (2007).
20. Tobias Dornheim, Maximilian Böhme, Dominik Kraus, et. al. Nature Communications, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35578-7> (2022)

Сведения об авторах

- А. Б. Ашықбаева – PhD, доцент, физико-технический факультет Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: 02assel@gmail.com)*
- А. Асқарұлы – PhD, доцент, физико-технический факультет Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: adilask@gmail.ru)*
- С. А. Сызганбаева – PhD физико-технического факультета Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: syzganbaeva.saule@bk.ru)*
- Р. Чичулина – студент 4 курса физико-технического факультета Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: 20chichulina22@gmail.com)*

Information about authors

A.B. Ashikbayeva – PhD, Associate Professor, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: 02assel@gmail.com)

A. Askaruly – PhD, Associate Professor, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty (Kazakhstan, e-mail: adilask@gmail.ru)

S.A. Syzganbaeva – PhD, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: syzganbaeva.saule@bk.ru)

R. Chichulina – 4th-year student, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: 20chichulina22@gmail.com).

Авторлар жайлы мәліметтер:

Ә.Б. Ашықбаева – PhD, доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: 02assel@gmail.com)

Ә. Асқарұлы – PhD, доцент, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: adilask@gmail.ru)

С.А. Сызганбаева – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: syzganbaeva.saule@bk.ru)

Р. Чичулина – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің физика-техникалық факультетінің 4-курс студенті (Алматы, Қазақстан, e-mail: 20chichulina22@gmail.com)

*Қарастырылуға 19.05.25 түсті
Қабылданды 03.06.25*