

М.К.Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Б.У. Куанбаева², Д. Хоффманн³

¹НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Атырауский государственный университет имени Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан

³Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики,
г. Дармштадт, Германия

*e-mail: issanova@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ КУЛОНОВСКОГО ЛОГАРИФМА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

В данной работе было проведено исследование кулоновского логарифма плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза. На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц для двухтемпературной, неизотермической, плотной плазмы был получен кулоновский логарифм. Данный потенциал учитывает квантово-механические эффекты дифракции на малых расстояниях и эффекты экранировки - на больших в двухтемпературной плазме. Рассмотрены различные методы вычисления кулоновского логарифма в кинетической теории переноса и разные варианты выбора постоянной экранирования плазмы с учетом или без учета вклада ионов и значения волнового вектора электронов. Выявлено, что в невырожденной плазме влияние учета вкладов ионной компоненты оказывается малой, а в вырожденной плазме учет вклада ионов необходим, если экранирование определяется электронной компонентой. Знание кулоновского логарифма плотной плазмы необходимо для описания многих процессов, таких как диффузия, теплопроводность, электропроводность, тормозная способность, релаксация температуры т.д. Также, корректное знание величин кулоновского логарифма очень важно, поскольку он используется в различных приложениях, включая численные методы, такие как моделирование методом Монте Карло, метод частицы в ячейке, также моделирование физических систем, в том числе пылевой плазмы, ультрахолодной плазмы, лазерной абляции, ИТС и других систем.

Ключевые слова: плотная плазма, инерционный термоядерный синтез, кулоновский логарифм, эффективный потенциал.

Введение

Одним из наиболее перспективных подходов для теоретического исследования динамических и транспортных характеристик плотной плазмы ИТС является приближение парного столкновения. При моделировании динамических и транспортных характеристик плотной плазмы ИТС можно использовать два подхода. Один из них состоит в вычислении транспортных коэффициентов, определяемых на основе сечений рассеяния частиц. Во втором подходе решается кинетическое уравнение, в интеграле столкновений которого содержится логарифмически расходящийся интеграл по прицельным параметрам, заменяемый кулоновским логарифмом. Кулоновский логарифм является одним из фундаментальных параметров плазмы,

играющий определяющую роль при исследовании транспортных и динамических свойств плазмы [1]. В отличие от компьютерного моделирования, к примеру метода молекулярной динамики, метод исследования динамических и транспортных характеристик системы на основе кулоновского логарифма позволяет довольно быстро оценить важнейшие физические характеристики, такие как тормозная способность, времена релаксации, коэффициенты переноса и т.д.

За счет дальнего действия характера кулоновского взаимодействия возникает неопределенность в аргументе кулоновского логарифма, приводящая к расходимости интегралов на больших и малых углах рассеяния. Расходимость интеграла столкновения устраняется учетом экранирования при определении области

интегрирования [2-3]. Кулоновский логарифм выражается через радиус обрезания по формуле [4].

Для кулоновского логарифма в работе [5] было получено выражение

$$\lambda = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{r_D^2}{r_0^2} \right) \quad (1)$$

где r_0 - наименьший прицельный параметр, соответствующий рассеянию электрона (иона) с тепловой энергией на 90° . Темко [5] вывел уравнение Фоккера–Планка для плазмы, исходя из цепочки уравнений Боголюбова.

В работе [6] кулоновский логарифм определяется следующим образом:

$$\lambda = \ln \left(\frac{q_{mz}}{k_{De}} \right) \quad (2)$$

где $q_{mz} = \sqrt{r_0^{-2} + 4k_F^2}$ - максимальное значение волнового вектора, $k_F = (3\pi^2 n_e)^{1/3}$ - длина волны электрона на поверхности Ферми. Авторы работы [7] получили выражение для кулоновского логарифма:

$$\lambda = \int_0^{q_m} \frac{k^3}{(k^2 + k_s^2)^2} S_i(k) dk \quad (3)$$

здесь k_s - постоянная экранирования, $S_i(k)$ - структурный фактор, описывающий корреляцию ионов, q_m - максимальное значение волнового вектора.

В разреженной плазме, когда можно пренебречь ион-ионной корреляцией из (3) находим [8-9]:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[\ln(1 + \chi_i) - \frac{\chi_i}{1 + \chi_i} \right] \quad (4)$$

где $\chi_i = (q_m/k_s)^2$. В работе [10] полагалось, что

$$q_m = \min \{ E_T / Z_i e^2, 2 / \tilde{\lambda}_e \},$$

$\tilde{\lambda}_e = \hbar / \sqrt{2\pi m_{ei} k_B T}$ - длина волны де Бройля, E_T в невырожденном случае полагалась равной температуре, а в вырожденном — энергии Ферми, длина волны де Бройля в этих случаях также определялась с использованием температуры или энергии Ферми. Со структурным фактором ионов в дебаевском приближении из (3) находим

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[\ln(1 + \chi_i) - \frac{\chi_i}{1 + \chi_i} - \frac{1}{2} \frac{z_i}{k_s^2} \frac{4\pi n_e e^2}{T} \frac{\chi_i^2}{(1 + \chi_i)^2} \right], \quad (5)$$

Компьютерное моделирование позволяет получить значение кулоновского логарифма для сильно связанной плазмы [11-12].

Кулоновский логарифм на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц

Как известно, учет коллективных эффектов экранирования во взаимодействии частиц плазмы необходим для корректного описания статических и динамических свойств плазмы. В данной работе рассматривается плотная плазма, для которой также важен учет квантовых эффектов на малых межчастичных расстояниях [13]. Далее при расчете кулоновского логарифма в слабосвязанной плазме используется эффективный потенциал, полученный в работе [14], который учитывает как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования - на больших. Эффективный потенциал электрон-электронного взаимодействия описывается следующим выражением [14]:

$$\Phi_{ee}(r) = \frac{e^2}{(1 + \lambda_{ee}^2 k_i^2) \sqrt{1 - (2k_D / \lambda_{ee} \gamma^2)^2}} \times \frac{(\exp(-Br) - \exp(-Ar))}{r} \quad (6)$$

Эффективный потенциал электрон-ионного взаимодействия имеет вид [14]:

$$\Phi_{ei}(r) = - \frac{Z_i e^2}{\lambda_{ei}^2 \gamma^2 \sqrt{1 - (2k_D / \lambda_{ei} \gamma^2)^2}} \times \left(\frac{1/\lambda_{ee}^2 - B^2}{1/\lambda_{ei}^2 - B^2} \exp(-Br) - \frac{1/\lambda_{ee}^2 - A^2}{1/\lambda_{ei}^2 - A^2} \exp(-Ar) \right) + \frac{e^2}{r} \frac{1}{1 + C_{ei}} \exp(-r/\lambda_{ei}). \quad (7)$$

Эффективный потенциал для ион-ионной пары имеет следующий вид [14]:

$$\Phi_{ii}(r) = \frac{Z_i Z_i e^2}{\gamma^2 \sqrt{1 - (2k_D / \lambda_{ee} \gamma^2)^2}} \left(\exp(-Br) \left(\frac{1}{\lambda_{ee}^2} - B^2 \right) - \exp(-Ar) \left(\frac{1}{\lambda_{ee}^2} - A^2 \right) \right), \quad (8)$$

где $k_D^2 = k_e^2 + k_i^2$ - параметр экранирования с учетом вклада электронов и ионов, $\gamma^2 = k_i^2 + 1/\lambda_{ee}^2$, r_D - радиус экранирования Дебая, $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ - приведенная масса частиц. Для описания неизотермиче-

ской плазмы необходимо знать электрон-ионную характерную температуру T_{ei} [15-16]. В работах [14, 16-17] показано, что для корректного описания динамических и транспортных свойств плазмы электрон-ионная температура должна быть выражена в виде: $T_{ei} = \sqrt{T_e T_i}$. Эффективные потенциалы взаимодействия частиц (6-8) применимы в случае слабосвязанной плазмы.

В этой работе кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [18-19]:

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{b_{\max}} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) b db, \quad (9)$$

Угол рассеяния в системе центра масс определяется как [18]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ - энергия в системе центра масс, $b_{\perp} = Z_{\alpha} Z_{\beta} / (m_{\alpha\beta} v^2)$. В качестве минимального прицельного параметра принято брать $b_{\min} = \max\{b_{\perp}, \lambda_{\alpha\beta}\}$. В формуле (10) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (11)$$

Численные расчеты и обсуждение результатов

В данной работе исследование кулоновского логарифма проводилось на основе разных теоретических подходов. Результаты, полученные на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц были сравнены с результатами других теоретических моделей. На рисунке 1 приведены зависимости кулоновского логарифма от концентрации электронов. Красной сплошной линией обозначены результаты, полученные на основе эффективного потенциала. Видно, что с ростом концентрации кулоновский логарифм убывает и проходит через минимум $n_e \sim 10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Сравнение 1 и 2 показывают, что учет корреляции ионов вносит вклад в кулоновский логарифм уже при $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, но

этот вклад становится заметным при $n_e \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, когда учет корреляции ионов необходим и приводит к заметному уменьшению сечения рассеяния электронов. Расчеты со структурным фактором в дебаевском приближении (5) согласуются с расчетами со структурным фактором из уравнения (3).

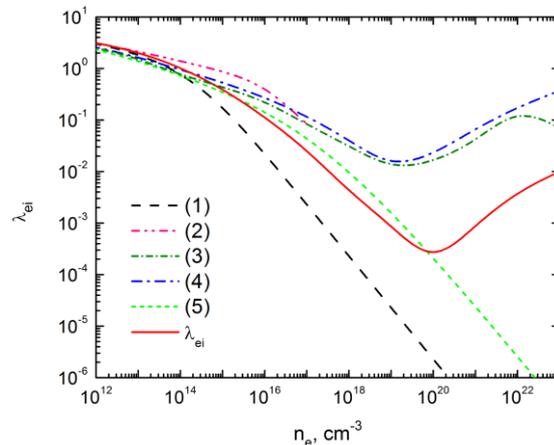


Рисунок 1 - Кулоновский логарифм как функция концентрации электронов при $T = 300 \text{ K}$ без учета вклада ионов

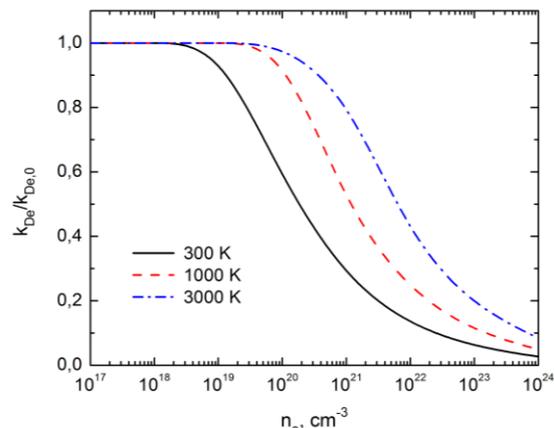


Рисунок 2 - Поправка вырождения к классическому электронному радиусу экранирования при разных температурах

На рисунке 2 показаны поправки вырождения к классическому электронному радиусу экранирования при разных температурах. При $T = 300 \text{ K}$ эффекты вырождения электронной компоненты плазмы проявляются при $n_e \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и с увеличением концентрации экранирующие свойства электронного газа значительно ослабевают.

С увеличением температуры эффект уменьшается и отклонения поправки от единицы начинаются при больших значениях

концентрации. По этой причине минимумы кулоновского логарифма с ростом температуры сдвигаются к большим значениям концентрации, что видно на рисунке 3.

В плотной плазме значения кулоновского логарифма увеличиваются с ростом температуры. Это связано как с уменьшением радиуса Ландау, так и с увеличением радиуса экранирования. При $T=30000\text{ K}$ минимум кулоновского логарифма сглаживается.

Сравнение положения минимумов кулоновского логарифма на рисунке 3 и зависимости отношения волнового числа Ферми к электронной постоянной экранирования на рисунке 4 показывает, что они совпадают. Из этого следует вывод, что появление минимума кулоновского логарифма является следствием ослабления экранирования ионов из-за вырождения электронного газа.

На рисунке 5 представлены зависимости кулоновского логарифма как функция концентрации электронов при $T=300\text{ K}$ с учетом вклада ионов. Из рисунка 5 видно, что в этом случае минимум пропадает и результаты, полученные на основе эффективного потенциала хорошо совпадают с результатами других теоретических подходов.

По итогам численного моделирования с учетом вклада ионов можно сделать вывод, что влияние корреляции ионов пренебрежимо мала. Такое же поведение имеет место и при других температурах (рис. 6).

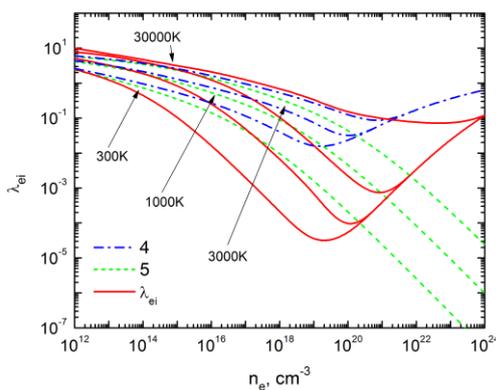


Рисунок 3 - Кулоновский логарифм как функция концентрации электронов при разных температурах без учета вклада ионов

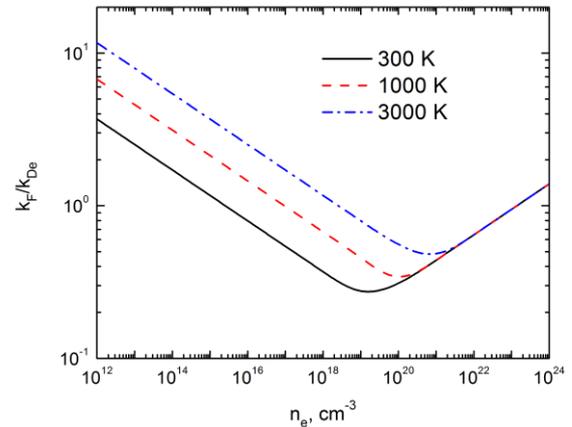


Рисунок 4 - Зависимости отношения волнового числа Ферми к электронной постоянной экранирования при разных температурах

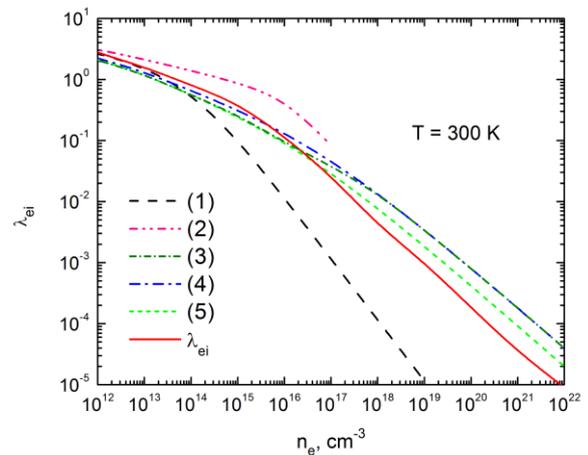


Рисунок 5 - Кулоновский логарифм как функция концентрации электронов при $T=300\text{ K}$ с учетом вклада ионов

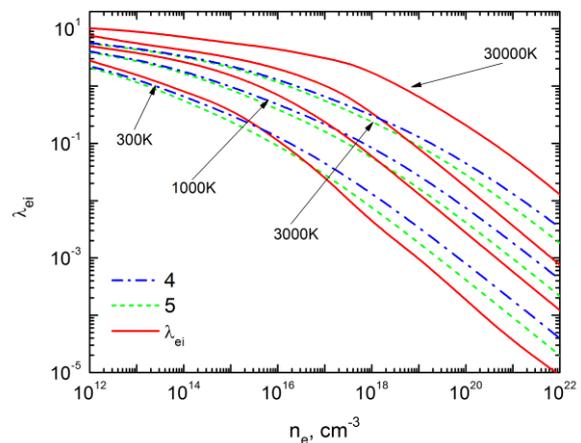


Рисунок 6 - Кулоновский логарифм как функция концентрации электронов при разных с учетом вклада ионов

Таким образом, проведено исследование кулоновского логарифма в плотной плазме на основе эффективного потенциала взаимодействия, который учитывает квантовые эффекты дифракции на малых расстояниях и экранировку на больших расстояниях. Значения кулоновского логарифма зависят от выбора граничного волнового вектора и от учета вкладов ионов. В рамках использованной модели показано, что полученные результаты по кулоновскому логарифму имеют хорошее согласие с результатами, полученными на основе других методов, в частности компьютерного моделирования.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта AP05134366 Исследование фундаментальных свойств неидеальной комплексной плазмы на основе моделей взаимодействия частиц (2018).

Список литературы

- 1 Филиппов А.В., Старостин А.Н., Грязнов В.К. Кулоновский логарифм в неидеальной и вырожденной плазме // ЖЭТФ. – 2018. – Т. 153. – Вып. 3. – С. 514–524.
- 2 Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. – М.: Наука, 1979. – с. 211.
- 3 Силин В.П. введение в кинетическую теорию газов. – М.: Наука, 1971. – с. 134.
- 4 Spitzer L., Physics of Fully Ionized Gases. – N.Y.: Interscience, 1962. – P. 586.
- 5 Temko S.V. On the Derivation of the Fokker-Planck Equation for a Plasma // JETP. - 1957. - Vol. 31. - P. 1021.
- 6 Ziman J.M. A theory of the electrical properties of liquid metals. I: The monovalent metals // Phil. Mag. - 1961. - Vol. 6. - P. 1013.
- 7 Грязнов В.К., Иванов Ю.В., Старостин А.Н., Фортов В.Е. Теплофизические свойства ударно-сжатого аргона и ксенона // ТВТ. - 1976. - Vol. 14. - P. 643.
- 8 Dingle R.B. Scattering of electrons and holes by charged donors and acceptors in semiconductors // Phil. Mag. J. Sci. - 1955. - Vol. 46 - P. 831.
- 9 Barrie R. Electronic Conduction in Solids with Spherically. Symmetric Band Structure // Proc. Phys. Soc. B. - 1956. - Vol. 69. - P. 553.
- 10 Ziman J.M. A theory of the electrical properties of liquid metals. I: The monovalent metals // Phil. Mag. - 1961. - Vol. 6. - P. 1013.
- 11 Benedict L.X., et al. Molecular Dynamics Simulations of Electron-Ion Temperature Equilibration in an SF6 Plasma // Phys. Rev. Lett. - 2009. - Vol. 102. - P. 205004.
- 12 Vorberger J., Gericke D.O. Comparison of electron-ion energy transfer in dense plasmas obtained from numerical simulations and quantum kinetic theory // High Energy Density Physics. - 2014. - Vol.10. - P.1-8.
- 13 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. Effective screened potentials of strongly coupled semiclassical plasma // Phys. Plasmas. - 2002. - Vol. 9. - P. 3758-3761.
- 14 Ramazanov T. S., Moldabekov Zh.A., Gabdullin M.T. Effective potentials of interactions and thermodynamic properties of a nonideal two-temperature dense plasma // Phys.Rev. E. – 2015. – Vol. 92. – P. 023104.
- 15 Seufferling P., Vogel J. and Toepffer C. Correlations in a 2-temperature plasma // Phys. Rev. A. - 1989. - Vol. 40. - P. 323-329.
- 16 Bredow R., Bornath Th., Kraeft W.D., Redmer R. Hypernetted Chain Calculations for Multi-Component and NonEquilibrium Plasmas // Contrib. Plasma Phys. - 2013. - Vol. 53. - P. 276-284.
- 17 Коданова С.К., Рамазанов Т.С., Исанова М.К., Хоффманн Д.Х.Х., Молдабеков Ж.А.. Исследование кулоновского логарифма и релаксационных процессов плотной плазмы на основе эффективного потенциала // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2014. – №4(51). – С. 77-84.
- 18 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // Phys. Plasmas. - 1994. - Vol. 1. - P. 2515.
- 19 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // Phys. Plasmas. - 2001. - Vol. 8. - P. 5049.
- 20 Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Isanova M.K., Moldabekov Zh.A., Nigmatova G. Investigation of Coulomb Logarithm and Relaxation Processes in Dense Plasma on the Basis of Effective Potentials // Contrib. Plasma Phys. – 2015. - Vol. 55. № 2-3. – P. 271 – 276.

21 Gabdullin M.T., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Issanova M.K., Moldabekov Zh.A. Thermodynamic and dynamical properties of dense ICF plasma // *Nukleonika*. - 2016, - Vol. 61, №2. – P. 125.

22 Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Moldabekov

Zh.A., Meister C.-V. Classical scattering and stopping power in dense plasmas: the effect of diffraction and dynamic screening // *Laser and Particle Beams*. – 2016. – Vol. 34. – P. 457-466.

Принято в печать 3.11.2018

М.К.Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Б.У. Куанбаева², Д. Хоффманн³

¹*НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

²*Атырауский государственный университет имени Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан*

³*Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики,
г. Дармштадт, Германия*

**e-mail: issanova@physics.kz*

ИССЛЕДОВАНИЕ КУЛОНОВСКОГО ЛОГАРИФМА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

В данной работе было проведено исследование кулоновского логарифма плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза. На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц для двухтемпературной, неизотермической, плотной плазмы был получен кулоновский логарифм. Данный потенциал учитывает квантово-механические эффекты дифракции на малых расстояниях и эффекты экранировки - на больших в двухтемпературной плазме. Рассмотрены различные методы вычисления кулоновского логарифма в кинетической теории переноса и разные варианты выбора постоянной экранирования плазмы с учетом или без учета вклада ионов и значения волнового вектора электронов. Выявлено, что в невырожденной плазме учет вкладов ионной компоненты оказывается малой, а в вырожденной плазме учет вклада ионов необходим, если экранирование определяется электронной компонентой. Знание кулоновского логарифма плотной плазмы необходимо для описания многих процессов, таких как диффузия, теплопроводность, электропроводность, тормозная способность, релаксация температур и т.д. Также, корректное знание величин кулоновского логарифма очень важно, поскольку он используется в различных приложениях, включая численные методы, такие как моделирование методом Монте Карло, метод частицы в ячейке, также моделирование физических систем, в том числе пылевой плазмы, ультрахолодной плазмы, лазерной абляции, ИТС и других систем.

Ключевые слова: плотная плазма, инерционный термоядерный синтез, кулоновский логарифм, эффективный потенциал.

М.К.Исанова, С.К. Коданова, Т.С. Рамазанов, Б.У. Куанбаева, Д. Хоффманн

¹*ЭТФЗИ, эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан*

²*Х. Досмухамедов атындағы Атырауский мемлекеттік университеті, Атырау, Қазақстан*

³*Дармштадт техникалық университеті, Ядролық физика институты,
Германия, Дармштадт қ-сы*

ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАДА ЭФФЕКТИВТІ ПОТЕНЦИАЛ НЕГІЗІНДЕ КУЛОН ЛОГАРИФМІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтездің тығыз плазмадағы кулондық логарифмін зерттеу жүргізілді. Бөлшектердің әсерлесуінің эффективті потенциалы негізінде екі температуралы, изотермиялық емес, тығыз плазма үшін Кулон логарифмі алынды. Бұл

потенциал екі температуралы плазмада кіші ара-қашықтықта квантты-механикалық дифракция эффектісін, үлкен ара-қашықтықта экрандалу эффектісін ескереді. Кинетикалық тасымалдау теориясында кулондық логарифмді есептеудің әртүрлі әдістері және иондардың үлесімен немесе үлесінсіз плазмалық экрандалудың тұрақтыларын таңдаудың әр түрлі варианттары мен электрондардың толқындық вектор мәндері қарастырылды. Азғындалмаған плазмада ион компонентінің үлесінің әсері кішігірім, ал азғындалған плазмада экрандалу электрондық компонент арқылы анықталса, иондардың үлесін ескеру қажет екені анықталды. Тығыз плазмадағы кулондық логарифмді білу диффузия, жылу өткізгіштік, электрөткізгіштігі, электр қуатын тоқтату, температура релаксациясы және т.б. сияқты көптеген процестерді сипаттау үшін қажет. Сондай-ақ, кулон логарифмінің мәнін дұрыс анықтау өте маңызды, өйткені ол әртүрлі қолданбаларда, оның ішінде Монте-Карло моделдеуі, ұяшықтағы бөлшектердің әдісі, сондай-ақ тозаңды плазма, ультрасалқын плазма, лазерлік абляция, ИТС және басқа жүйелерде пайдаланылады.

Түйін сөздер: тығыз плазма, инерциялық термоядролық синтез, кулон логарифмы, эффективті потенциал.

M.K. Issanova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, B.U. Kuanbayeva, D. Hoffmann

IETP, al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

²*Dosmuhamedov Atyrau State University, Atyrau, Kazakhstan*

³*Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt*

INVESTIGATION OF COULOMB LOGARITHM ON THE BASIS OF THE EFFECTIVE POTENTIALS IN DENSE PLASMA

In this work, the Coulomb logarithm of inertial confinement fusion dense plasmas were studied. Based on the effective interaction potentials between particles, the Coulomb logarithm for a two-temperature nonisothermal dense plasma was obtained. These potentials take into consideration long-range multi-particle screening effects and short-range quantum-mechanical effects in two-temperature plasmas. Different methods for calculating the Coulomb logarithm in the kinetic transport theory and various choices of the constant plasma screening with or without the influence of ions contribution and the wave vector of electrons are considered. It was revealed that in non-degenerate plasma, taking into account the contributions of the ionic component is small, and in a degenerate plasma, taking into account the contribution of ions is necessary if the screening is determined by the electronic component. Knowledge of the Coulomb logarithm of a dense plasma is necessary to describe many processes, such as diffusion, thermal conductivity, electrical conductivity, stopping power, temperature relaxation, etc. Also, correct knowledge of the Coulomb logarithm is very important because it is used in various applications, including numerical methods, such as Monte Carlo simulation, particle in a cell method, also physical systems, including dusty plasma, ultracold plasma, laser ablation, ICF and other systems.

Keywords: Dense plasma, inertial confinement fusion, Coulomb logarithm, effective potential.