

М.К.Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Д. Хоффманн²

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

²Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики,
Германия, г. Дармштадт

*e-mail: issanova@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация. В данной работе были исследованы динамические характеристики неизоотермической, плотной плазмы. На основе эффективного потенциала взаимодействия частиц для двухтемпературной, неизоотермической, плотной плазмы был получен кулоновский логарифм. Данный потенциал учитывает квантово-механические эффекты дифракции на малых расстояниях и эффекты экранировки - на больших в плотной плазме. Используемая модель надежна только при относительно низких скоростях налетающей частицы, адекватно описывается важная область вокруг максимума тормозной способности. Поэтому это позволило нам изучить зависимость тормозной способности от параметров плазмы и исследовать чувствительность расчетного времени релаксации и соответствующую температуру выравнивания плазмы по качеству описания экранирующего эффекта в плотной плазме. Рассчитанное температурное равновесие в плотной плазме может быть очень чувствительным к приближению, сделанному в описании экранирующего эффекта. По полученным результатам следует, что динамические характеристики плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Рассчитаны потери энергии ионов и время релаксации в плазме при различных значениях температуры и плотности плазмы. Полученные результаты сравнены с теоретическими работами других авторов и с результатами моделирования молекулярной динамики и имеют хорошее согласие.

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

Введение

Исследование процессов взаимодействия ионных пучков с плотной плазмой является одной из важнейших задач физики инерционного термоядерного синтеза (ИТС), горячей плотной материи и лазерной физики [1-3]. Плотная плазма образуется в экспериментах на тяжелоионных пучках [4-6] в National Ignition Facility [7] и замагниченных экспериментах Z-пинча [8]. В настоящее время проводится большое количество теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, определяющих конструкцию термоядерной мишени. Изучение энергетических потерь заряженных частиц в плазме имеет большое значение для физики плотной плазмы, а также для решения задач инерционного синтеза [15-16]. Характер и результаты этих взаимодействий зависят от типа энергии пучка заряженных частиц, а также от типа, состояния, плотности, состава и размера

мишеней. Поэтому моделирование тяжелых и сильно заряженных ионов для инерционного термоядерного синтеза требует как качественного, так и количественного описания взаимодействия тяжелых частиц с веществом в широком диапазоне плотностей и температур. Особенно важно определить потери энергии ионов в плотной плазме, так как их экспериментальное исследование имеет определенные трудности, связанные с определением плотности свободных электронов в плазме, необходимой для расчета их тормозной способности. Тормозная способность была рассчитана во многих теоретических работах с использованием различных подходов, теорий и вычислительных экспериментов [17-20]. Было обнаружено, что тормозная способность увеличивается в двух случаях, то есть при увеличении эффективного заряда снаряда и при увеличении значения кулоновского логарифма. Традиционная формула для кулоновского логарифма

рифма неправильно учитывает столкновительные процессы в системах, поскольку она получается с использованием неэкранированного кулоновского потенциала. В этой работе кулоновский логарифм получен на основе сильно экранированного эффективного потенциала, который учитывает квантовые эффекты на малых расстояниях и эффекты многочастичного экранирования на больших расстояниях.

В настоящей работе модель, предложенная ранее в работах [21-27] для описания свойств плотной плазмы на основе эффективных потенциалов взаимодействия используется для расчета динамических свойств дейтерий-тритиевой плазмы ИТС. Эффективный потенциал получен с использованием длинноволнового расширения поляризационной функции и квантового потенциала с учетом конечного значения потенциала взаимодействия на близком расстоянии.

В разделе 2 приведена модель расчета динамических свойств плотной плазмы с использованием эффективных потенциалов электрон-ионного взаимодействия. В разделе 3 представлены и обсуждаются результаты расчета тормозной способности и температурной релаксации плазмы ИТС. Чтобы показать достоверность модели, результаты сравнены с данными моделирования молекулярной динамики (MD) и моделирования частиц в ячейке (PIC). В последнем разделе приведено заключение.

Физическая модель

Основой управляемого термоядерного синтеза является обеспечение протекания реакции слияния легких ядер. Наибольший интерес с этой точки зрения представляют реакции с участием изотопов водорода: дейтерия и трития (DT-цикл). Для термоядерного горения часть энергии синтеза должна быть вложена в топливо. В случае DT-реакции $D + T \rightarrow \alpha (3.5 \text{ МэВ}) + n (14.1 \text{ МэВ})$. В этой реакции общая энергия равная 17.6 МэВ распределяется между α -частицей с энергией 3.54 МэВ и нейтроном с энергией 14.1 МэВ. Чтобы поглотить энергию α -частицы (3.54 МэВ), размеры топлива должны превышать длину ее пробега R . Эффек-

тивный пробег определяется по формуле [28]:

$$R = \int_E^{E_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (1)$$

где $\frac{dE}{dx}$ тормозная способность, E_0 - начальная энергия частицы.

Зная величины тормозных потерь можно определить части поглощаемой энергии ионом и электроном [29]:

$$E_i = \int_0^{E_i} dE_i = \int_0^{E_0} dE \frac{dE_i/dx}{dE/dx}, \quad (2)$$

$$E_e = \int_0^{E_e} dE_e = \int_0^{E_0} dE \frac{dE_e/dx}{dE/dx}, \quad (3)$$

где $\frac{dE_i}{dx}$ и $\frac{dE_e}{dx}$ ионные и электронные компоненты тормозной способности альфа-частицы, $\frac{dE}{dx}$ суммарная тормозная способность:

$$\frac{dE_i}{dx} + \frac{dE_e}{dx} = \frac{dE}{dx}, \quad (4)$$

таким образом:

$$E_i + E_e = E_0. \quad (5)$$

В этой работе динамические свойства получены на основе кулоновского логарифма с использованием эффективных потенциалов для плазмы ИТС. Тормозная способность определяется как средняя потеря энергии на единицу длины пути заряженных частиц, проходящих через вещество из-за кулоновских взаимодействий с электронами или ионами. Рассчитаем тормозную мощность в приближении парного столкновения [30-31]:

$$\frac{dE}{dx} = 8\pi n \left(\frac{m_{\alpha\beta}}{m_\beta} \right) \cdot E_c \cdot b_\perp^2 \cdot \lambda_{ei}, \quad (6)$$

здесь $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ - энергия в системе центра масс сталкивающихся частиц; v - относительная скорость пробной частицы; $b_\perp = Z_\alpha Z_\beta / (m_{\alpha\beta} v^2)$, λ_{ei} - кулоновский логарифм. Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [21, 30-31]:

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{1}{b_\perp^2} \int_0^{b_\perp^{\max}} \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) b db, \quad (7)$$

Угол рассеяния θ_c в системе центра масс определяется как [30]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ - приведенная масса частиц сорта α и β . В качестве минимального прицельного параметра принято брать $b_{\min} = \max\{b_\perp, \lambda_{\alpha\beta}\}$, где

$\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ - тепловая длина волны де-Бройля. В формуле (8) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (9)$$

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. Далее при расчете кулоновского логарифма будем использовать эффективный потенциал, учитывает как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования на больших расстояниях [25-27]:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta}{r} \frac{1}{\gamma^2 \sqrt{1 - (2k_D / \lambda_{ee} \gamma^2)^2}} \left(\left(\frac{1/\lambda_{ee}^2 - B^2}{1 - B^2 \lambda_{\alpha\beta}^2} \right) \exp(-Br) - \left(\frac{1/\lambda_{ee}^2 - A^2}{1 - A^2 \lambda_{\alpha\beta}^2} \right) \exp(-Ar) \right) \quad (10)$$

$$- \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{r} \frac{(1 - \delta_{\alpha\beta})}{1 + C_{\alpha\beta}} \exp(-r/\lambda_{\alpha\beta}),$$

здесь

$$A^2 = \frac{\gamma^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee} \gamma^2} \right)^2} \right),$$

$$B^2 = \frac{\gamma^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee} \gamma^2} \right)^2} \right),$$

$$C_{\alpha\beta} = \frac{k_D^2 \lambda_{\alpha\beta}^2 - k_i^2 \lambda_{ee}^2}{\lambda_{ee}^2 / \lambda_{\alpha\beta}^2 - 1},$$

где $2k_D / (\lambda_{ee} \gamma^2) < 1$, $k_D^2 = k_e^2 + k_i^2$ - параметр экранирования, который учитывает как вклад электронов, так и ионов,

$\gamma^2 = k_i^2 + 1/\lambda_{ee}^2$. Для неизотермической плазмы используется электрон-ионная характеристическая температура T_{ei} [32-34]. В работе [32] показано, что для корректного описания свойств плазмы электрон-ионная температура должна быть выражена в виде: $T_{ei} = \sqrt{T_e T_i}$. Эффективный потенциал (10) можно использовать как для изотермической, так и для неизотермической плазмы.

Численные расчеты и обсуждение результатов

В этом разделе мы рассмотрим результаты исследования динамических свойств плотной плазмы на основе кулоновского логарифма с использованием эффективного потенциала (10). Тормозные процессы в плотной плазме представляет значительный интерес в различных областях науки и техники (физика плазмы, ИТС, физика теплого плотного вещества и т. д.) [35-36]. В частности, интенсивные исследования ИТС требуют более достоверной информации о динамических характеристиках, то есть о тормозной способности и температурной релаксации. Рассмотрим частицы плотные ДТ-плазмы, взаимодействующие через эффективный потенциал (10).

Качество описания динамических свойств, основанных на эффективном потенциале, проверяется сравнением тормозной способности, рассчитанной с использованием комбинированной модели, метода Т-матрицы и борновского приближения первого порядка с данными, полученными с использованием эффективного электрон-ионного потенциала (10).

На рисунках 1-2 проиллюстрирована энергетическая зависимость электронной и ионной составляющих тормозной способности в плотной плазме при плотности электронов $n_e = 10^{26} \text{ см}^{-3}$ при разных значениях температуры. Температура плазмы от $T = 10 \text{ keV}$ до $T = 60 \text{ keV}$, а плотность электронов равна $n_e = 10^{26} \text{ см}^{-3}$, что характерно для плазмы ИТС вскоре после зажигания. Энергетическая область лежит между нулем и энергией α -частиц $E_0 = 3.54 \text{ MeV}$, полученного в реакции ДТ. В этом случае большая часть энергии α -частиц переносится на

электроны. Как показано на рисунках 1-2, для налетающей частицы потери энергии на электроны в плазме доминируют над потерями ионов, когда энергия налетающей частицы становится достаточно большой по шкале температуры. На основе полученных данных были оценены вклады энергии, поглощенной ионом E_i электроном E_e . Энергетические доли, переносимые на электроны и ионы рассчитаны по формулам 2 и 3, равны $E_e = 3,38 \text{ МэВ}$ и $E_i = 0,14 \text{ МэВ}$ соответственно. Интересно отметить, что значения тормозной способности вокруг максимума остаются почти постоянными, когда температура удваивается от 10 до 20 кэВ, а увеличение температуры от 40 до 60 кэВ приводит к значительному уменьшению тормозной способности вокруг ее максимального значения.

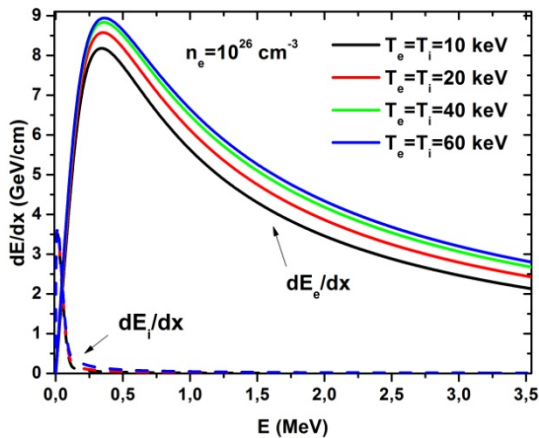


Рисунок 1 - Тормозные потери альфа-частицы при $T_i = T_e = 10 \div 60 \text{ кэВ}$

На рисунке 2 показана тормозная способность на основе данной модели, теории БПС [29] и модели среднего атома (АА) [37]. Результаты, полученные с использованием эффективного потенциального подхода ближе к данным Бина [37], а не к данным из [29]. Это указывает на важность электронных квантовых эффектов, которые учитываются в работе [37]. Различие между нашими результатами и результатом Бина [37] обусловлено эффектом неупругого рассеяния, который включен в [37], поскольку рассматривалась плотная плазма Au. Последнее не имеет значения при рассмотрении случая полностью ионизованной плотной ДТ-плазмы.

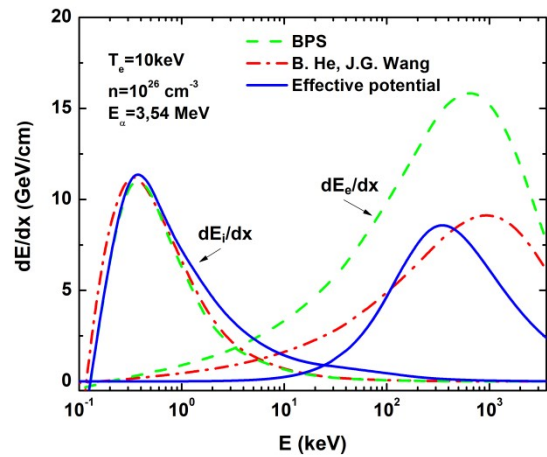


Рисунок 2 – Тормозная способность частиц снаряда, проходящих через ДТ плазму в зависимости от энергии снаряда, разделенной на ионные и электронные вклады

На рисунке 3 показан диапазон α -частиц R_α в микрометрах для начальной энергии $E_0 = 3,54 \text{ МэВ}$ в зависимости от электронной температуры T_e . Кривые для различных плотностей электронов обозначены следующим образом: сплошная линия $n_e = 10^{26} \text{ см}^{-3}$; пунктирная линия $n_e = 10^{25} \text{ см}^{-3}$; пунктирно-точечная линия $n_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$. При рассматриваемых плотностях диапазон α -частиц насыщается после резкого увеличения при более низких температурах. Стоит отметить, что меньший диапазон α -частиц лучше для эффективного переноса энергии от α -частицы в плазму, что означает, что первоначальное энергетическое осаждение α -частицы в плазму более эффективно при более высоких плотностях плазмы.

На рисунке 4 показана температурная релаксация иона гелия ($Z = 2$) в водородной плазме с $T_e = T_i = 100 \text{ эВ}$ и $n_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$ для двух начальных температур, то есть 10 и 1000 эВ. Результаты сравниваются с классическим многокомпонентным МД-моделированием [38], используя код, основанный на работах Хансена и Макдональда и Глосли и др. [44].

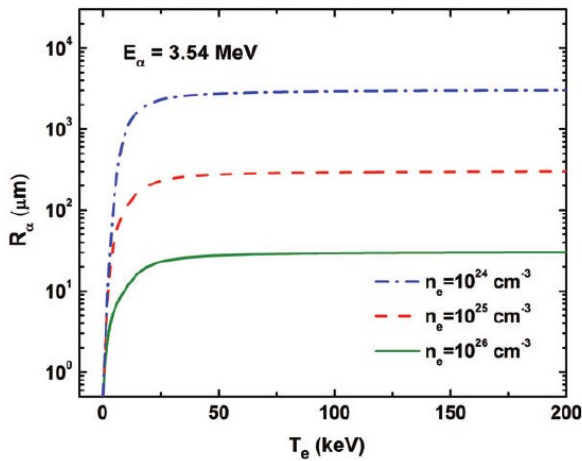


Рисунок 3 - Диапазон α -частиц (в микрометрах) в зависимости от электронной температуры

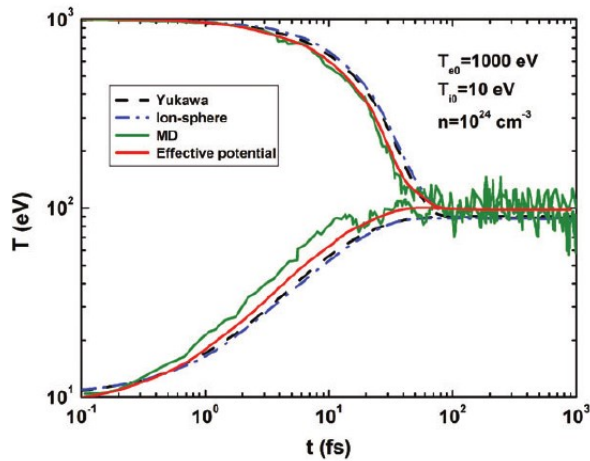


Рисунок 4 – Сравнение значения ионной релаксации гелия в водородной плазме для двух начальных энергии $T_{i0} = 10$ эВ и $T_{e0} = 1000$ эВ с молекулярной динамикой (МД) [38], потенциал Юкавы, потенциал [39-41] и ионная сфера [42]

Полученные результаты согласуются с результатами моделирования МД. Из рисунка 4 видно значительное отличие от результата, полученного с использованием более простого потенциала Юкавы. Например, при параметрах, показанных на рисунке 4, равновесное значение температуры, рассчитанное с использованием эффективного потенциала (10), больше на 10 эВ, чем рассчитанное с использованием потенциала Юкавы. Отметим, что эффективный потенциал (10) согласуется с потенциалом Юкавы, если пренебречь эффектами электронной квантовой нелокальности (дифракции). Поэтому аккуратное описание экранирующего эф-

фекта очень важно для точного описания температурного равновесия в плотной плазме.

Заключение

Динамические процессы в плотной ДТ-плазме изучались на основе двухтемпературного эффективного потенциала взаимодействия с учетом квантовых дифракционных эффектов на малых расстояниях и экранирования на больших расстояниях. Хотя используемая модель надежна только при относительно низких скоростях налетающей частицы, адекватно описывается важная область вокруг максимума тормозной способности. Поэтому это позволило нам изучить зависимость тормозной способности от параметров плазмы и исследовать чувствительность расчетного времени релаксации и соответствующую температуру выравнивания плазмы по качеству описания экранирующего эффекта в плотной плазме. Основные выводы обобщены следующим образом:

1. Торможение в плотной плазме имеет немонотонную зависимость от температуры плазмы. При $T > 20$ кэВ тормозная способность при малых скоростях уменьшается с увеличением температуры плазмы, а при 10 кэВ $< T < 20$ кэВ тормозная способность не имеет существенного изменения из-за варьирования температуры.

2. Теоретически рассчитанное температурное равновесие в плотной плазме может быть очень чувствительным к приближению, сделанному в описании экранирующего эффекта. В частности, пренебрежение электронной квантовой нелокальностью может привести к значительному недооценке равновесной температуры после термализации. Причиной этого является то, что температурная релаксация определяется столкновениями с малыми скоростями ионов (относительно тепловой температуры электронов). Поэтому температурное равновесие в плотной плазме нуждается в дальнейшем изучении, в реализации более сложных теорий для описания экранирования.

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 Фортвов В.Е. Экстремальные состояния вещества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 345.
- 2 Fortov V.E., Petrov O.F., Vaulina O.S., Timirkhanov R.A. Viscosity of a Strongly Coupled Dust Component in a Weakly Ionized Plasma // *Phys. Rev. Lett.* - 2012. - Vol. 109. - P. 055002.
- 3 Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapak A.G., Morfill G.E. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // *Phys. Rep.* - 2005. - Vol. 424. - P. 1.
- 4 Hoffmann D.H.H., Blazevic A., Ni P., Rosmej O., Roth M., Tahir N.A., Tauschwitz A., Udrea S., Varentsov D., Weyrich K., and Maron Y. Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams // *Laser and Particle Beams.* - 2005. - Vol. 23. - P. 47–53.
- 5 Sharkov B.Y., Hoffmann D.H.H., Golubev A.A., Zhao Y. High energy density physics with intense ion beams // *Matter Radiat. Extremes.* - 2016. - Vol. 1. - P. 28.
- 6 Kawata S., Karino T., Ogoyski A.I. Review of heavy-ion inertial fusion physics // *Matter Radiat. Extremes.* - 2016. - Vol. 1. - P. 89.
- 7 Hurricane O. et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion // *Nature.* – 2014. – Vol. 506. – P. 343.
- 8 Gomez M.R., Slutz S.A., Sefkow A.B., Sinars D.B., Hahn K.D., Hansen S.B., Harding E.C., Knapp P.F., Schmit P.F., Jennings C.A., Awe T.J., Geissel M., Rovang D.C., Chandler G.A., Cooper G.W., Cuneo M.E., Harvey-Thompson A.J., Herrmann M.C., Hess M.H., Johns O., Lippa D.C., Martin M.R., McBride R.D., Peterson K.J., Porter J.L., Robertson G.K., Rochau G.A., Ruiz C.L., Savage M.E., Smith I.C., Stygar W.A, Vesey R.A. Experimental demonstration of fusion-relevant conditions in magnetized liner inertial fusion // *Phys.Rev.Lett.* - 2014. - Vol. 113. - P. 155003.
- 9 Casas D., Barriga-Carrasco M.D. and Rubio J. Evaluation of slowing down of proton and deuteron beams in CH₂, LiH, and Al partially ionized plasmas // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 88. - P. 033102.
- 10 Arkhipov Yu.V., Baimbetov F. B., Davletov A. E. and Starikov K.V. Stopping Power in Semiclassical, Collisional Plasmas // *Physica Scripta.* – 2001. - Vol. 63. – P. 194-196.
- 11 Arkhipov Yu.V., Ashikbayeva A.B., Askaruly A., Davletov A.E., Tkachenko I.M. Stopping of relativistic projectiles in two-component plasmas // *EPL.* – 2013. – Vol. 104. – P. 35003-1-6.
- 12 Deutsch C., Leger D., Tashev B. Low velocity ion slowing down in a de-mixing binary ionic mixture // *Laser and Particle Beams.* – 2011. – Vol. 29. – P. 121–124.
- 13 Barriga-Carrasco M.D. Dynamical local field corrections on energy loss in plasmas of all degeneracies // *Phys. Rev. E.* – 2009. – Vol. 79. – P. 027401.
- 14 Barriga-Carrasco M.D. Proton stopping using a full conserving dielectric function in plasmas at any degeneracy // *Phys. Rev. E.* – 2010. – Vol. 82. – P. 046403.
- 15 Belyaev G., Basko M., Cherkasov A., Golubev A., Fertman A., Roudskoy I., Savin S., Sharkov B., Turtikov V., Arzumanov A., Borisenko A., Gorlachev I., Lysukhin S., Hoffmann D. H. H. and Tauschwitz A. Measurement of the Coulomb energy loss by fast protons in a plasma target // *Phys. Rev. E.* – 1996. – Vol. 53. – P. 2701-2707.
- 16 Golubev A., Basko M., Fertman A., Kozodaev A., Mesheryakov N., Sharkov B., Vishnevskiy A., Fortov V., M. Kulish, Gryaznov V., Mintsev V., Golubev E., Pukhov A., Smirnov V., Funk U., Stoewe S., Stetter M., Flierl H.-P., Hoffmann D.H.H., Jacoby J., and Iosilevski I. Dense plasma diagnostics by fast proton beams // *Phys. Rev. E.* – 1998. – Vol. 57. – P. 3363.
- 17 Gericke D.O. and Schlanges M. Beam-plasma coupling effects on the stopping power of dense plasmas // *Phys.Rev. E.* – 1999. – Vol. 60. – P. 904.
- 18 Zwicknagel G. Theory and simulation of heavy ion stopping in plasma// *Laser and Particle Beams.* – 2009. – Vol. 27. – P. 399.
- 19 Gericke D.O., Murillo M.S., Schlanges M.. Dense plasma temperature equilibration in the binary collision approximation // *Phys. Rev. E.* - 2002. - Vol. 65. - P.036418.
- 20 Shibata K., Sakumi A. Experimental investigation of the Coulomb logarithm in

- beam-plasma interaction // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. - 2001. - Vol. 464. - P. 225.
- 21 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Moldabekov Zh.A., Issanova M.K. Dynamical properties of non-ideal plasma on the basis of effective potentials // Phys. Plasmas. - 2013. - Vol.20. - P. 112702.
- 22 Ramazanov T. S., Moldabekov Zh.A., Gabdullin M.T. Effective potentials of interactions and thermodynamic properties of a non-ideal two-temperature dense plasma // Phys.Rev. E. - 2015. - Vol. 92. - P. 023104.
- 23 Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Issanova 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.
- 24 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.
- 25 Moldabekov Zh., Schoof T., Ludwig P., Bonitz M. and Ramazanov T. Statically screened ion potential and Bohm potential in a quantum plasma // Phys. Plasmas. - 2015. - Vol. 22. - P. 102104.
- 26 Ramazanov T.S., Moldabekov Zh.A., Gabdullin M.T. Interaction between ions in hot dense plasma via screened Cornell potential // Phys. Plasmas. - 2016. - Vol. 23. - P. 042703.
- 27 Kodanova S.K., Issanova M.K., Amirov S.M., Ramazanov T.S., Tikhonov A., Moldabekov Z.A. Relaxation of non-isothermal hot dense plasma parameters // Matter Radiat. Extremes. - 2018. - Vol. 3. - 40.
- 28 Mahdavi M. and Koochrokh T. Energy deposition of multi-MeV protons in compressed targets of dast-ignition inertial confinement fusion // Physical Review E. - 2012. - Vol. 85. - P. 016405.
- 29 Brown L.S., Preston D.L., and Singleton Jr. R.L. Charged particle motion in a highly ionized plasma // Phys. Rep. - 2005. - Vol. 410. - P.237.
- 30 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // Phys. Plasmas. - 1994. - Vol. 1. - P. 2515.
- 31 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // Phys. Plasmas. - 2001. - Vol. 8. - P. 5049.
- 32 Seufferling P., Vogel J. and Toepffer C. Correlations in a 2-temperature plasma // Phys. Rev. A. - 1989. - Vol. 40. - P. 323-329.
- 33 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.
- 34 Stanton L.G., Murillo M.S. Unified description of linear screening in dense plasmas // Phys.Rev.E. - 2015. - Vol. 91. - P. 033104.
- 35 Atzeni S. and Meyer-ter-Vehn J. The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics. - Clarendon: Oxford, 2004. - P. 480.
- 36 Lindl J. D. Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive // New York: Springer, Verlag. - 1998. - P. 204.
- 37 He B., Wang J.G. Stopping power for alpha particles in hot dense Au plasmas // Nucl. Fusion. - 2013. - Vol. 53. - P. 093009.
- 38 Faussurier G., Blancard C., Gauthier M. Nuclear stopping power in warm and hot dense matter Phys. Plasmas. - 2013. - Vol. 20. - P.012705.
- 39 More R.M. Absorption of subpicosecond ultraviolet laser pulses in high-density plasma // Adv. At. Mol. Phys. - 1985. - Vol. 21. - P. 305.
- 40 Chabrier G. An equation of state for fully ionized hydrogen // J. Phys. - 1990. - Vol. 51. - P. 1607.
- 41 Potekhin A.Y., Chabrier G., Gilles D. Electric microfield distributions in electron-ion plasmas // Phys. Rev. E. - 2002. - Vol. 65. - P. 036412.
- 42 Scheibner K., Weishei J.C., Lane N.F. Plasma screening effects on proton-impact excitation of positive ions // Phys. Rev. A. - 1987. - Vol. - 35. - P. 1252.
- 43 Hansen J.P., McDonald L.R. Thermal relaxation in a strongly coupled two-temperature plasma // Phys. Lett. A. - 1983. - Vol. 97. - P. 123.

44 Glosli J.N. et al. Molecular dynamics simulations of temperature equilibration in dense hydrogen // Phys. Rev. E. - 2008. - Vol. 78. - P.025401
Moldabekov Z.A., Groth S., Dornheim T., Bonitz M., Ramazanov T.S. Ion potential in

non-ideal dense quantum plasmas // Contrib. PlasmaPhys. 2017. - Vol. 57. - P. 532.

Принято к печати 3.11.18

М.К.Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Д. Хоффманн²

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

²*Технический университет Дармштадт, Институт Ядерной физики, Германия, г. Дармштадт*

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

В данной работе были исследованы динамические характеристики неизотермической, плотной плазмы. 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 плотной плазме. Используемая модель надежна только при относительно низких скоростях налетающей частицы, адекватно описывается важная область вокруг максимума тормозной способности. Поэтому это позволило нам изучить зависимость тормозной способности от параметров плазмы и исследовать чувствительность расчетного времени релаксации и соответствующую температуру выравнивания плазмы по качеству описания экранирующего эффекта в плотной плазме. Рассчитанное температурное равновесие в плотной плазме может быть очень чувствительным к приближению, сделанному в описании экранирующего эффекта. По полученным результатам следует, что динамические характеристики плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Рассчитаны потери энергии ионов и время релаксации в плазме при различных значениях температуры и плотности плазмы. Полученные результаты сравнены с теоретическими работами других авторов и с результатами моделирования молекулярной динамики и имеют хорошее согласие.

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

М.К.Исанова¹, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Д. Хоффманн²

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

²*Дармштадт техникалық университеті, Ядролық физика институты, Германия, Дармштадт қ-сы*

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

ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста изотермиялық емес, тығыз плазмасының динамикалық сипаттамалары зерттелді. 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. Қолданылған модель ұшып келе жатқан бөлшектің тек салыстырмалы төмен жылдамдықтарда сенімді, және тежегіштік қабілеттің максимумы маңындағы маңызды облыс дұрыс сипатталады. Осылайша, тежегіштік қабілеттің плазмалық параметрлерге тәуелділігін зерттеп, тығыз плазмадағы

экрандалу әсерінің сипаттамасына сәйкес плазма температурасының теңесуін және релаксация уақытының есептеу уақытының сезімталдығын зерттеуге мүмкіндік берді. Тығыз плазмадағы есептелген температуралық тепе-теңдік экрандалу әсерін сипаттайтын жуықтауға өте сезімтал. Алынған нәтижелер бойынша тығыз плазманың динамикалық сипаттамалар эффективті потенциал негізіндегі Кулон логарифмі арқылы толық анықтала алады. Иондардың энергия жоғалтуы және плазмадағы релаксация уақыты әр түрлі температура мен плазма тығыздықтарында есептелінді. Алынған нәтижелер басқа авторлардың теориялық жұмыстарымен және молекулалық динамика моделдеу нәтижелерімен салыстырылды және жақсы келісімге ие.

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

M.K. Issanova¹, S.K. Kodanova¹, T.S. Ramazanov¹, D. Hoffmann²

IETP, al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

²Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt

INVESTIGATION OF DYNAMICAL PROPERTIES OF DENSE PLASMAS

In this paper, we studied the dynamic characteristics of a non-isothermal, dense plasma. On the basis of the effective interaction potential of the particles, a Coulomb logarithm was obtained for a two-temperature, non-isothermal, dense plasma. This potential takes into account quantum-mechanical diffraction effects at short distances and screening effects at large distances in dense plasma. The used model is reliable only at relatively low projectile velocities, the important area around the maximum of the stopping power is adequately described. Therefore, this allowed us to study the dependence of the stopping power on plasma parameters and examine the sensitivity of the computed relaxation time and the corresponding equilibrium plasma temperature on the quality of the description of the screening effect in dense plasmas. The computed temperature equilibration in dense plasmas can be very sensitive to the approximation made in the description of the screening effect. According to the obtained results, it follows that the dynamic characteristics of a dense plasma can be adequately expressed in terms of the Coulomb logarithm based on the effective potentials. The energy losses of ions and the relaxation time in plasma are calculated at various temperatures and plasma densities. The results obtained are compared with the theoretical works of other authors and with the results of molecular dynamics simulation and have good agreement.

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