

М.К. Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Э.Е. Шокпарбаева¹, Д. Хоффманн²

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

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

*e-mail: moldir.issanova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Аннотация. В данной работе исследованы транспортные свойства неизотермической, плотной дейтерий-тритиевой 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. С помощью кулоновского логарифма исследованы коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности в неизотермической плотной плазме. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами с теоретическими результатами других авторов, рассчитанных на основе теории функционала плотности при конечных температурах с применением теоремы Кона-Шэма в комбинации с молекулярной динамикой и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы и квантовой молекулярной динамики при значении $\Gamma \sim 1$, и, следовательно, метод эффективных потенциалов может быть использован в этом режиме. По полученным результатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов.

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

Введение

Передовые технологии, основанные на использовании плазмы, в которой идет реакция синтеза, и инерционное удержание за счет мощных источников нагрева, таких как лазеры и пучки тяжелых ионов, необходимы в отраслях энергетической промышленности. В настоящий момент управляемый термоядерный синтез с инерционным удержанием (ИТС) является одним из главных кандидатов для производства энергии в будущем [1-3]. Важными задачами современной физики вещества при экстремальных условиях и управляемого термоядерного синтеза является поиск новых технических решений и анализ перспективных систем для создания оптимальных условий работы реактора. Транспортные свойства плотной неидеальной плазмы могут быть определены, используя моделирование методом молекулярной динамики (МД) [4-5]. Од-

нако, расчеты на основе метода МД требуют больших вычислительных мощностей и занимают долгое время. Метод эффективных потенциалов при корректном выборе модели взаимодействия частиц позволяет производить расчеты транспортных свойств напрямую, решая задачу классического рассеяния при парном столкновении без привлечения громоздких и долгих расчетов [6-9].

Отсутствие достаточно точных экспериментальных данных о коэффициентах переноса сверхплотной дейтерий-тритиевой (ДТ) плазмы требует адекватного теоретического описания транспортных свойств плотной плазмы в широком диапазоне параметров. Точное знание коэффициентов переноса плотной ДТ плазмы имеет важное значение для правильного описания процессов, происходящих при ИТС.

Диффузия и вязкость плотной дейтерий-тритиевой плазмы

Рассмотрим частицы плотной ДТ плазмы, взаимодействующие посредством эффективного потенциала [10-12]. Коэффициенты диффузии и вязкости плотной плазмы связаны с эффективной частотой столкновений:

$$D = \frac{k_B T}{m_e v_{eff}}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{5}{4} \sqrt{\frac{m}{\pi}} \frac{(k_B T)^{5/2}}{e^4 \lambda}, \quad (2)$$

где e - заряд электрона, m_e - масса электрона, n - плотность частиц плазмы, и

$$v_{eff} = (4/3) \sqrt{2\pi} e^4 \lambda / \sqrt{m_e} (k_B T)^{3/2} \quad (3)$$

эффективная частота столкновений прямо пропорциональна кулоновскому логарифму. Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [13-14]:

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{b_{\max}} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) b db, \quad (4)$$

Угол рассеяния в системе центра масс определяется как [13]:

$$\theta_c = \pi - 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ - энергия в системе центра масс, $m_{\alpha\beta} = m_{\alpha} m_{\beta} / (m_{\alpha} + m_{\beta})$ - приведенная масса частиц сорта α и β ; $b_{\perp} = Z_{\alpha} Z_{\beta} / (m_{\alpha\beta} v^2)$. В качестве минимального прицельного параметра принято брать $b_{\min} = \max\{b_{\perp}, \lambda_{\alpha\beta}\}$, где $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ - тепловая длина волны де-Бройля. В формуле (5) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

$$1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (6)$$

Введем следующие безразмерные значения коэффициентов диффузии D и вязкости η :

$$D^* = D / \omega_p a^2, \quad (7)$$

$$\eta^* = \eta / n_i M \omega_p a^2, \quad (8)$$

где

$$\omega_p = (4\pi n_i / M)^{1/2} Z e, \quad (9)$$

плазменная частота ионов с массой M . В данной работе для рассматриваемой ДТ смеси используется [15]:

$$M = (2 + 3)/2 = 2.5 \text{ а.е.м.} \quad (10)$$

Вычислена диффузия и вязкость дейтерий-третиевой плазмы для плотности $\rho = 5 \text{ г/см}^3$ и температуры в диапазоне от 2 до 10 эВ с использованием кулоновского логарифма на основе эффективного потенциала с учетом квантового эффекта дифракции на малых расстояниях и эффекта экранирования на больших расстояниях. На рисунках 1 и 2 показаны сравнения расчетных данных по диффузии и вязкости в ДТ плазме с теоретическими результатами других авторов [16], рассчитанных на основе теории функционала плотности при конечных температурах с применением теоремы Кона-Шэма в комбинации с молекулярной динамикой и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы (ТФТМД). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами квантовой молекулярной динамики (КМД) и ТФТМД моделирования при более высоких температурах, и, следовательно, мы приходим к выводу, что наш метод может быть использован в этом режиме. При низких температурах ниже 3 эВ сравнение с КМД и ТФТМД результатами показывает ухудшение согласия, так как при этих температурах эффект неидеальности становится важным. По сравнению с результатами КМД, полученные данные по вязкости не так хороши, как для диффузии, где температурная зависимость существенно отличается, в то время как результаты, полученные для вязкости на основе эффективного потенциала, согласуются с результатами моделирования ТФТМД.

На рисунках 3 - 4 приведены коэффициенты диффузии и вязкости для плотной ДТ плазмы, вычисленные с использованием кулоновского логарифма на основе эффективного потенциала с учетом квантового эффекта дифракции на малых расстояниях и эффекта экранирования на больших расстояниях в зависимости от параметра связи (Γ) при плотности плазмы $\rho = 300 \text{ г/см}^3$.

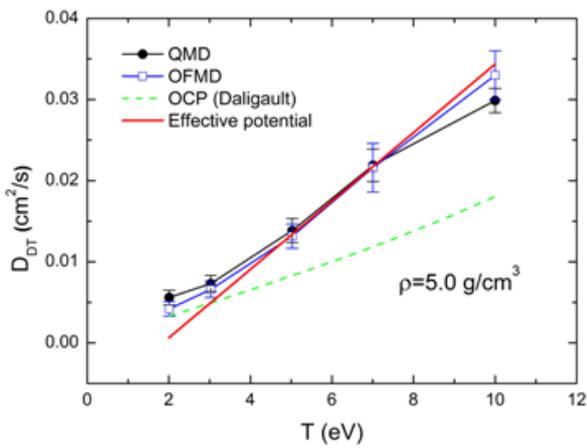


Рисунок 1 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от температуры при $\rho = 5.0 \text{ г/см}^3$

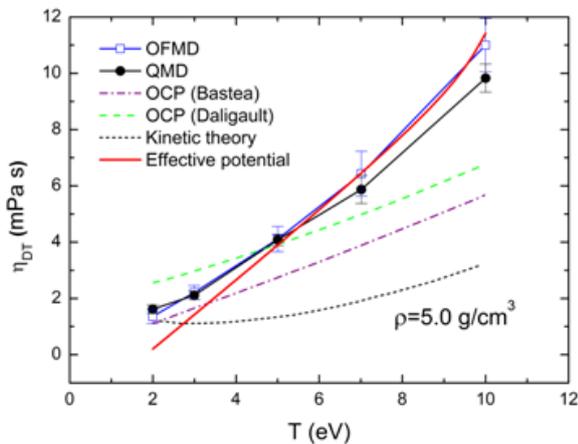


Рисунок 2 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от температуры при $\rho = 5.0 \text{ г/см}^3$

На рисунках показаны сравнения расчетных данных по диффузии и вязкости в зависимости от параметра связи в ДТ плазме с теоретическими результатами других авторов [15], рассчитанных на основе молекулярной динамики и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы (ТФТМД) с использованием пакета AVINIT [17].

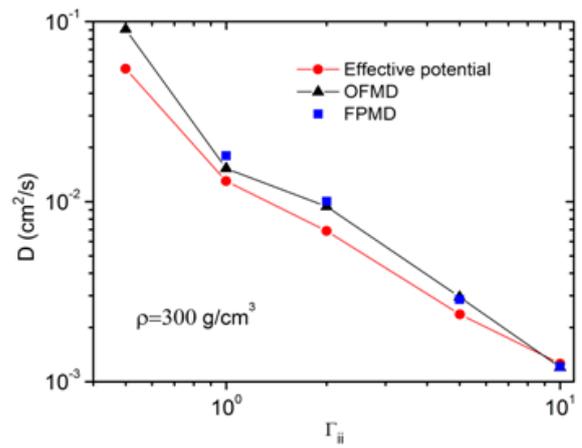


Рисунок 3 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра связи (Γ) при $\rho = 300 \text{ г/см}^3$

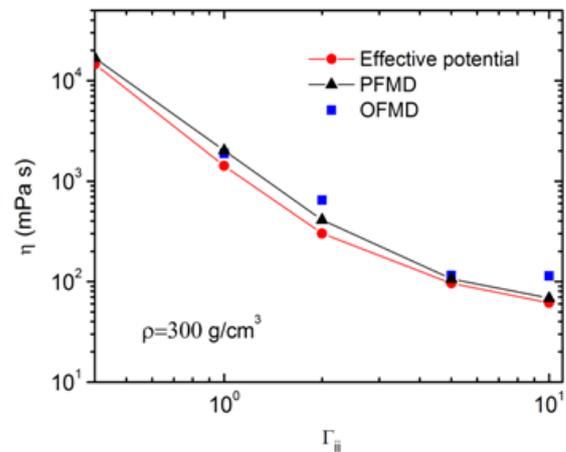


Рисунок 4 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра связи (Γ) при $\rho = 300 \text{ г/см}^3$

В МД электроны квантово-механический обрабатываются с помощью теории функционала плотности без обменного члена после введения приближения Борна-Оппенгеймера. Что касается ТФТМД моделирования, то орбитальный функционал получается из квазиклассического развития функционала Мермина [18], что приводит к конечному выражению температуры Томаса-Ферми для кинетической части. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами КМД и ТФТМД моделирования при значении $\Gamma \sim 1$, и, следовательно, мы приходим к выводу, что наш метод может быть использован в этом режиме. Рисунки 3-4 показывают, что результаты, полученные на основе эффективного потен-

циала находятся в хорошем согласии с результатами других работ в слабосвязанном пределе $\Gamma \leq 1$, но различается при $\Gamma \geq 1$. Различие в случае $\Gamma \geq 1$ вызвана неидеальностью и квантовыми эффектами.

Теплопроводность плотной плазмы ИТС

Рассмотрим теплопроводность плотной ДТ плазмы, где частицы взаимодействуют согласно эффективному потенциалу [10]. Коэффициент теплопроводности определяется по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{5n_e k_B^2 T}{m_e \nu_{eff}} \tag{11}$$

Для удобства расчетов и сравнения обезразмерим коэффициент теплопроводности (11):

$$\kappa^* = \kappa / (m_e \omega_p / a) \tag{12}$$

Одним из наиболее важных механизмов передачи энергии в высокотемпературной плазме является электронная теплопроводность. Поскольку масса электрона мала, а температура плазменной короны мишени, представляющей собой разлетающееся облако плазмы, достаточно высока, то и теплопроводность плазмы оказывается достаточно большой. Хотя процесс обычной теплопроводности в плазме исследован достаточно хорошо; в плазме, получаемой при инерционном синтезе, происходят новые явления, которые приводят к существенному усложнению процесса теплопроводности. При поглощении энергии нагревающего излучения в плазме происходит образование электронов с очень большими энергиями. Так как электроны обладают достаточно большой подвижностью, обусловленной их малой массой, плазма оказывается очень хорошим проводником теплоты.

На рисунке 5 приведены результаты по теплопроводности дейтериевой плазмы в зависимости от температуры при значении плотностей $\rho = 43.105 \text{ г/см}^3$. В работе [19] были сделаны расчеты КМД моделирования теплопроводности дейтериевой плазмы в широком диапазоне плотностей и температур. С.Х. Ху и др. [19] использовали следующую функцию, чтобы описать результаты расчетов КМД моделирования

дейтериевой теплопроводности на ИТС взрывах:

$$\kappa_{QMD} = \frac{20(2/\pi)^{3/2} k_B^{7/2} T^{5/2} \cdot 0.095(Z_{eff} + 0.24)}{\sqrt{m_e Z_{eff}} e^4} \frac{1}{1 + 0.24 Z_{eff}} \tag{13}$$

$$\frac{1}{\ln \Lambda_{QMD}}$$

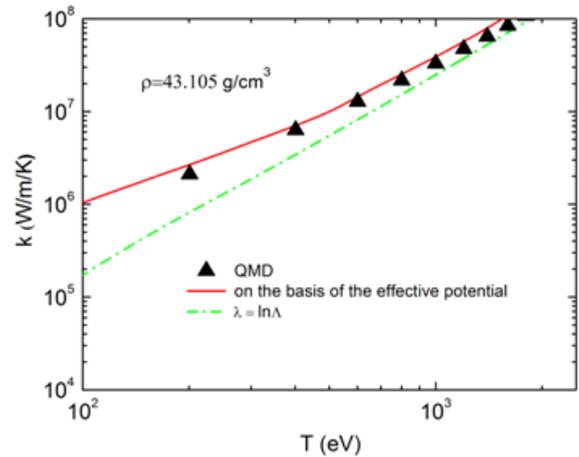


Рисунок 5 - Теплопроводность плотной плазмы в зависимости от температуры при $\rho = 43.105 \text{ г/см}^3$, $n = 9.445 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$

На рисунке 6 показаны зависимости теплопроводности от температуры по сравнению с результатами, полученными на основе модели Хаббарда-Спитцера [20-21], Ли-Мора [22], Ишимару [23-24] и метода МД [25].

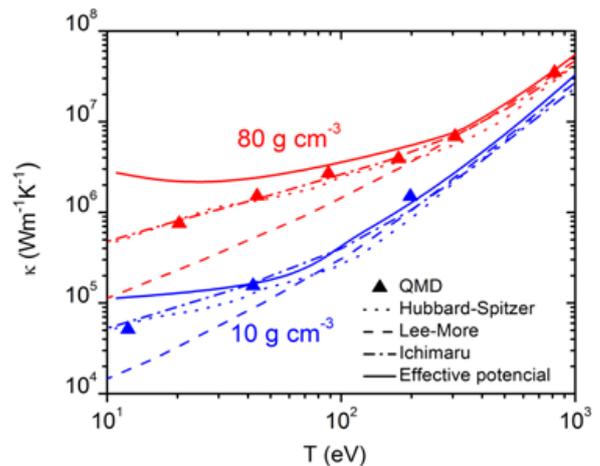


Рисунок 6 - Теплопроводность плотной плазмы в зависимости от температуры в сравнении с результатами различных теоретических подходов

Полученные результаты показывают при очень высоких температурах, за пределами температуры Ферми, все модели

плавно сливаются с теплопроводностью Хаббарда-Спитцера, которая пропорциональна $T^{5/2}$. Результаты с использованием эффективного потенциала хорошо согласуются с результатами КМД и с моделью Хаббарда-Спитцера до температуры Ферми.

Таким образом, проведено исследование транспортных характеристик в плотной ДТ плазме на основе двухтемпературного эффективного потенциала взаимодействия, который учитывает квантовые эффекты дифракции на малых расстояниях и экранировку на больших расстояниях. Полученные результаты по коэффициентам переноса для различных параметров плазмы согласуются с теоретическими результатами других авторов, также результатами МД, КМД моделирования. По полученным результатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Таким образом, знание коэффициентов переноса позволяет дать рекомендации по оценке времени разлета иона в ДТ плазме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта 3086/ГФ4 (2017).

Список литературы

- 1 Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 345.
- 2 Cuneo M.E., Vesey R.A., Bennet G.R. et al. Progress in symmetric ICF capsule implosions and wire-array Z-pinch source physics for double-pinch-driven hohlraums // Plasma Phys. and Contr. Fusion. – 2006. – Vol. 48, № 12. – P. R1.
- 3 Tahir N.A., Deutch C., Fortov V. et al. Proposal for the Study of Thermophysical Properties of High-Energy-Density Matter Using Current and Future Heavy-Ion Accelerator Facilities at GSI Darmstadt // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 95, № 3. – P. 035001.
- 4 Baus M. and Hansen J.-P. Statistical mechanics of simple Coulomb systems // Phys. Rep. - 1980. - Vol. - 59. - P. 1.
- 5 Desjarlais M.P., Kress J.D., and Collins L.A. Electrical conductivity for warm, dense aluminum plasmas and liquids // Phys. Rev. E. - 2002. - Vol. 66. - P. 025401.
- 6 Donko Z. Molecular dynamics simulations of strongly coupled plasmas // J. Phys. A - 2009. - Vol. 42. - P. 214029.
- 7 Rosenfeld Y., Nardi E. and Zinamon Z. Corresponding States Hard-Sphere Model for the Diffusion Coefficients of Binary Dense-Plasma Mixtures // Phys. Rev. Lett. - 1995. - Vol. 75. - P. 2490.
- 8 Faussurier G. Description of strongly coupled Yukawa fluids using the variational modified hypernetted chain approach // Phys. Rev. E. - 2004. - Vol. 69. - P. 066402.
- 9 Reinholz H., Redmer R., and Nagel S. Thermodynamic and transport properties of dense hydrogen plasmas // Phys. Rev. E. - 1995. - Vol. 52. - P. 5368.
- 10 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.
- 11 Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., and Hoffmann D.H.H. Transport Properties of Inertial Confinement Fusion Dense Plasmas // Contrib. Plasma Phys. – 2016. – Vol. 56, № 5. – P. 425-431.
- 12 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.
- 13 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // Phys. Plasmas. - 1994. - Vol. 1. - P. 2515.
- 14 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // Phys. Plasmas. - 2001. - Vol. 8. - P. 5049.
- 15 Wang C., Long Y., He X.-T., Wu J.-F., Ye W.-H. and Zhang P. Transport properties of dense deuterium-tritium plasmas // Phys. Rev. E. – 2013. – Vol. 88. – P. 013106.
- 16 Kress J.D., Cohen J.S., Horner D.A., Lambert F., Collins L.A. Viscosity and mutual diffusion of deuterium-tritium mixtures in the warm-dense-matter regime // Phys. Rev. E. – 2010. – Vol. 82. – P. 036404.
- 17 <http://www.abinit.org>

18 Brack M. and Bhaduri R.K., Semi-classical Physics. - Westview, Boulder, CO, 2003.

19 S.X. Hu, L.A. Collins, T.R. Boehly, J.D. Kress et al. First-principles thermal conductivity of warm-dense deuterium plasmas for inertial confinement fusion applications // Phys. Rev. E. – 2014. – Vol. 89. P. 043105.

20 Ichimaru S. and Tanaka S. Theory of interparticle correlations in dense, high-temperature plasmas. V. Electric and thermal conductivities // Phys.Rev.A. - 1985. - Vol. 32. P. 1790.

21 Faussurier G., Blancard C., Cosser P., and Renaudin P. Equation of state, transport coefficients, and stopping power of dense plasmas from the average-atom model self-consistent approach for astrophysical and laboratory plasmas // Phys. Plasmas. - 2010. - Vol. 17. P. 052707.

22 Glenzer S.H., MacGowan B.J., Michel P., Meezan N.B. et al., Symmetric Inertial Confinement Fusion Implosions at Ultra-High Laser Energies // Science. - 2010. - Vol. 327. P. 1228.

23 Lambert F., Recoules V., Decoster A., Clerrouin J., and Desjarlais M. On the transport coefficients of hydrogen in the inertial confinement fusion regime // Phys. Plasmas. - 2011. - Vol. 18. P. 056306.

24 Zeldovich Y.B. and Raizer Y.P., Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena. - Academic, New York, 1998.

Clerrouin J.G. and Bernard S. Dense hydrogen plasma: Comparison between models // Phys.Rev.E. - 1997. - Vol. 56. P. 3534.

Принято к печати 30.09.17

М.К. Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Э.Е. Шокпарбаева¹, Д. Хоффманн²

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

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

*e-mail: moldir.issanova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Аннотация. В данной работе исследованы транспортные свойства неизотермической, плотной дейтерий-третиевой 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. С помощью кулоновского логарифма исследованы коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности в неизотермической плотной плазме. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами с теоретическими результатами других авторов, рассчитанных на основе теории функционала плотности при конечных температурах с применением теоремы Кона-Шэма в комбинации с молекулярной динамикой и теорией функционала плотности без обменного члена для описания электронной компоненты плазмы и квантовой молекулярной динамики при значении $\Gamma \sim 1$, и, следовательно, метод эффективных потенциалов может быть использован в этом режиме. По полученным результатам следует, что транспортные свойства плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов.

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

М.К. Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Э.Е. Шокпарбаева¹, Д. Хоффманн²

¹ЭТФЗИ, Эл-Фараби атындагы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ТРАНСПОРТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтез изотермиялық емес, тығыз дейтерий-тритий плазмасының транспорттық қасиеттері 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. Кулон логарифмі көмегімен изотермиялық емес тығыз плазманың тұтқырлық, диффузия және жылуөткізгіштік коэффициенттері зерттелді. Алынған нәтижелер плазманың электрондық компонентін сипаттауға арналған тығыздық функционалы теориясын қолданатын молекулалық динамика және кванттық молекулалық динамика модельдеу нәтижелерімен $\Gamma \sim 1$ мәнінде жақсы сәйкес келеді, демек, эффективті потенциалдар әдісі бұл режимде жақсы жұмыс істейді. Алынған нәтижелер бойынша тығыз плазманың транспорттық қасиеттері эффективті потенциал негізіндегі Кулон логарифмі арқылы толық анықтала алады.

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

M.K. Issanova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, E.E. Shokparbayeva, D. Hoffmann

¹*IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan*

²*Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt*

INVESTIGATION OF TRANSPORT PROPERTIES OF INERTIAL CONFINEMENT FUSION DENSE PLASMAS

In this paper the transport properties of inertial confinement fusion non-isothermal dense deuterium-tritium 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. Diffusion, viscosity and thermal conductivity coefficients in such plasmas were studied using the Coulomb logarithm. The obtained results are in good agreement with the results of molecular dynamics with the density functional theory used to describe the electron component of the plasma and quantum molecular dynamics simulation at a value $\Gamma \sim 1$, and therefore the effective potential method can be used in this regime. The obtained data show that the transport properties of dense plasma can be adequately expressed in terms of the Coulomb logarithm based on the effective potentials.

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