УДК 539.9

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

Однако, 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 столкновений без привлечения громоздких и долгих расчетов [6-9].

Отсутствие достаточно точных экспериментальных данных о коэффициентах переноса сверхплотной дейтерийтритиевой (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:

$$D = \frac{k_B T}{m_e v_{eff}},\tag{1}$$

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

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

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

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

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

$$\theta_{c} = \pi - 2b \int_{r_{0}}^{\infty} \frac{dr}{r^{2}} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_{c}} - \frac{b^{2}}{r^{2}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

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 $b_{\min} = \max\{b_{\perp}, \hat{\lambda}_{\alpha\beta}\},$ где $\hat{\lambda}_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ - тепловая длина волны де-Бройля. В формуле (5) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

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

Введем следующие безразмерные значения коэффициентов диффузии *D* и вязкости *η* :

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

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

где

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

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

$$M = (2+3)/2 = 2.5 amu$$
(10)

Вычислена диффузия и вязкость дейтерий-тритиевой плазмы для плотности $\rho = 5 c/cm^3$ 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 ЗэВ 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

Журнал проблем эволюции открытых систем

малых расстояниях и эффекта экранирования на больших расстояниях в зависимости от параметра связи (Γ) при плотности плазмы $\rho = 300 \text{ g/cm}^3$.



Рисунок 1 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от темпера-

туры при $\rho = 5.0 \, c/cm^3$



Рисунок 2 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от температуры при $\rho = 5.0 \ c/cm^3$

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 ABINIT [17].



Рисунок 3 - Диффузия ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра

связи (Г) при $\rho = 300 \, c/cm^3$



Рисунок 4 - Вязкость ДТ плотной плазмы в зависимости в зависимости от параметра связи (Γ) при $\rho = 300 \, e/cm^3$

В ΜД электроны квантовомеханический 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 Г~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 потенциала находятся в хорошем согласии с результатами других работ в слабосвязанном пределе Г≤1, но различается при Г≥1. Различие в случае Г≥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:

$$\kappa = \frac{5n_e k_B^2 T}{m_e v_{eff}}.$$
 (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 значений плотностей $\rho = 43.105 c/cm^3$. 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:

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



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

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

Журнал проблем эволюции открытых систем

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, No 12. - P. R1.

3 Tahir N.A., Deutch C., Fortov V. et al. Proposal for the Study of Thermophysical Properties og 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 Faussuier 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, No 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 mix-

tures 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., Semiclassical 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, hightemperature 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 selfconsistent 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: <u>moldir.issanova@gmail.com</u>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕР-ЦИОННОГО 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.

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

¹ЭТФҒЗИ, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан ²Дармштадт техникалық университеті, Ядеролық физика институты, Германия, Дармштадт қ-сы

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ТРАНСПОРТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтез изотермиялық емес, тығыз плазмасының транспорттық қасиеттері зерттелді. дейтерий-тритий Бөлшектердің эсерлесуінің эффективті потенциалы негізінде екі температуралы, изотермиялық емес, тығыз плазма үшін Кулон логарифмі алынды. Бұл потенциал екі температуралы плазмада кіші арақашықтықта 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 Г~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

¹IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan ²Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt

INVESTIGATION OF TRANSPORT PROPERTIES OF INERTIAL CONFINEMENT FU-SION 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 quantummechanical effects in two-temperature plasmas. Diffusion, viscosity and thermalconductivity 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.

Key words: Dense plasma, inertial confinement fusion, Coulomb logarithm, effective potential, transport properties. М.К. Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Д. Хоффманн² ¹НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан ²Технический университет Дармитадт, Институт Ядерной физики, Германия, г. Дармитадт *e-mail: moldir.issanova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТКИК ПЛОТНОЙ, ДВУХ-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В данной работе исследованы динамические характеристики неизотермической, плотной дейтерий-тритиевой 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 двухтемпературной плазме. С помощью кулоновского логарифма получены тормозная способность, потери энергии в неизотермической плотной плазме. По полученным результатам следует, что динамические характеристики плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Показана, что при больших скоростях быстрые частицы слабо взаимодействуют со средой. По мере того как они тормозятся, т.е. уменьшают свою энергию, они начинают отдавать кинетическую энергию, поэтому при малых энергиях наблюдается пик поглощения. В пределах, когда у быстрых частиц совсем малая скорость, кинетическая энергия становится сравнимой с тепловой энергией среды, т.е. разница в энергиях становится маленькой, скорость отдаваемой энергии уменьшается. Знание величин пробегов и профилей энерговыделения тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно определить параметры конструкции термоядерной мишени.

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

Введение

На сегодняшний день в мире проводится большое количество теоретических [1-8] и экспериментальных работ по изучению физических процессов, определяющих конструкцию термоядерной мишени и необходимых параметров будущего драйвера. Расчет параметров драйвера тяжелоионного инерционного синтеза требует адекватного и точного количественного описания процесса взаимодействия тяжелоионного пучка с плотной плазмой в широком диапазоне параметров мишени. Потребность в новых теоретических и экспериментальных данных по торможению тяжелых ионов в плазме с электронной плотностью выше $n_e > 10^{21} c M^{-3}$, необходимых для адекватного качественного описания процессов взаимодействия тяжелоионных пучков с плотной плазмой в широком диапазоне параметров, является

принципиальным обоснованием актуальности исследований в области ИТС. Основной энерговклад пучка тяжелых ионов в разных типах термоядерных мишеней происходит в плотной, высокотемпературной плазме, образованной этим же энерговкладом. В настоящее время экспериментально получить плазму, необходимую для проведения исследования в рамках ИТС, с помощью пучка ионов затруднительно за счет дороговизны экспериментов. Поэтому, для изучения процессов, происходящих при торможении ионов в ионизированном веществе, используют плазму, созданную другими способами (разряд в газе [9-10], лазерная плазма [11], плазма взрывного генератора [12] и т.д.). Эксперименты по измерению энергетических потерь в плазме различных газов [13-17] позволили изучить особенности торможения тяжелых заряженных частиц в ионизованном веществе.

Таким образом, пробеги тяжелых многозарядных ионов в мишени и ионизационные потери будут обусловлены тормозной способностью плотной высокотемпературной плазмы. Следовательно, знание величин пробегов и профилей энерговыделения тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно рассчитать конструкцию термоядерной мишени.

Торможение и потери энергии ионов в плазме инерционного термоядерного синтеза

Известно, что тормозная способность – параметр, характеризующий скорость потери средней энергии для быстродвижущихся электронов или ионов плазмы. В процессе прохождения иона через вещество в результате совместного действия разнообразных физических процессов ион теряет свою энергию, замедляется и в конце концов останавливается [18-19]. Для пробной частицы, подвергнутой N парным столкновениям и перемещенной на расстояние δl , ее полная потеря энергии есть:

$$\delta E = \sum_{i=1}^{N} \Delta E_i, \qquad (1)$$

где ΔE_i - потеря энергии при *i* - том столкновении. Тормозная способность *s* определяется как $\int_{0}^{\delta l} Sdl = \delta E$. При увеличении чис-

ла N столкновений имеем $\int_{0}^{\delta l} Sdl = S \cdot \delta l$;

 $S = \frac{\delta E}{\delta l}$. Потеря энергии в результате соударения пробной частицы с частицами плазмы есть:

$$\Delta E = 4 \left(\frac{\mu_{\alpha\beta}}{m_{\beta}} \right) \cdot E_c \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right), \qquad (2)$$

здесь $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} \upsilon^2$ - энергия в системе центра масс сталкивающихся частиц; υ - относительная скорость пробной частицы; θ_c угол рассеяния в системе центра масс. Для удобства значение потери энергии пробной частицы в одном парном соударении обозначим как ΔE . Следовательно, тормозная способность [18-21]:

$$\frac{dE}{dx} = 8\pi n \left(\frac{m_{\alpha\beta}}{m_{\beta}} \right) \cdot E_c \cdot b_{\perp}^2 \cdot \lambda_{ei} , \qquad (3)$$

здесь $b_{\perp} = Z_{\alpha}Z_{\beta}/(m_{\alpha\beta}v^2)$, λ_{ei} - кулоновский логарифм. Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния в системе центра масс при парном кулоновском столкновении [22-23]:

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

Угол рассеяния в системе центра масс определяется как [22]:

$$\theta_{c} = \pi - 2b \int_{r_{0}}^{\infty} \frac{dr}{r^{2}} \left(1 - \frac{\Phi_{\alpha\beta}(r)}{E_{c}} - \frac{b^{2}}{r^{2}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

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 $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar/\sqrt{2\pi m_{\alpha\beta}k_{\beta}T}$ - тепловая длина волны де-Бройля. В формуле (5) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_{0} определяется из уравнения:

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

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 [24-25]:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_{\alpha}Z_{\beta}}{r} \frac{1}{\gamma^{2}\sqrt{1 - (2k_{D}/\lambda_{ee}\gamma^{2})^{2}}} \\ \left(\left(\frac{1/\lambda_{ee}^{2} - B^{2}}{1 - B^{2}\lambda_{\alpha\beta}^{2}} \right) \exp(-Br) - \left(\frac{1/\lambda_{ee}^{2} - A^{2}}{1 - A^{2}\lambda_{\alpha\beta}^{2}} \right) \exp(-Ar) \right) (7) \\ - \frac{Z_{\alpha}Z_{\beta}e^{2}}{r} \frac{(1 - \delta_{\alpha\beta})}{1 + C_{\alpha\beta}} \exp(-r/\lambda_{\alpha\beta}),$$

здесь

$$\begin{split} A^2 &= \frac{\gamma^2}{2} \Biggl(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee}\gamma^2}\right)^2} \Biggr), \\ B^2 &= \frac{\gamma^2}{2} \Biggl(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2k_D}{\lambda_{ee}\gamma^2}\right)^2} \Biggr), \\ C_{\alpha\beta} &= \frac{k_D^2 \lambda_{\alpha\beta}^2 - k_i^2 \lambda_{ee}^2}{\lambda_{ee}^2 / \lambda_{\alpha\beta}^2 - 1}, \end{split}$$

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} [26-27]. В работе [26] показано, что для корректного описания свойств плазмы электрон-ионная температура должна быть выражена в виде: $T_{ei} = \sqrt{T_e T_i} \ .$

Для осуществления ИТС необходимо нагреть плазму ДТ топлива до температур термоядерного синтеза и удержать ее при такой температуре в течение времени, достаточного для того, чтобы выделившаяся энергия синтеза превзошла энергию, затраченную на нагрев и удержание топлива. Схема осуществления термоядерной вспышки следующая: за очень короткое время холодная ДТ топливо, ограниченная оболочкой, нагревается до термоядерных температур и затем, в течение времени её разлёта, в плазме протекают интенсивные термоядерные реакции. Самый важный процесс в реакциях синтеза - это использование энергии, выделяемой альфа-частицей для самонагрева топлива, что уменьшает затраты энергии для зажигания. В связи с этим, одним из наиболее важных параметров, используемых, для описания взаимодействия ионов с веществом, являются тормозные характеристики альфа-частиц.

На основе вышеописанного метода для α-частицы вычислена длина пробега, в течение которого они теряют энергию. С потерей энергии связан пробег иона в веществе. Под пробегом ионов в веществе обычно понимают глубину их проникновения в вещество. В качестве примера применения проведенных расчетов кулоновского логарифма определены эффективные пробеги частиц с различной энергией, образующихся в ДТ плазме. Эффективный пробег определяется по формуле [28]:

$$R = \int_{E}^{E_0} \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE,$$
 (8)

где значение тормозной способности $\frac{dE}{dx}$ вычисляется согласно (3), E_0 - начальная энергия частицы.

На рисунках 1-2 приведены значения тормозной способности и энергии замедления для альфа-частицы и трития при реальных условиях в мишенях ИТС. При больших скоростях быстрые частицы слабо взаимодействуют со средой. По мере того как они тормозятся, т.е. уменьшают свою энергию, они начинают отдавать кинетическую энергию, поэтому при малых энергиях наблюдается пик поглощения.

В пределах, когда у быстрых частиц совсем малая скорость, кинетическая энергия становится сравнимой с тепловой энергией среды, т.е. разница в энергиях становится маленькой, скорость отдаваемой энергии уменьшается. На рисунке 2 приведено сравнение полученных результатов с теоретическим результатом Ли, Петрассо [29]. Из рисунка видно, что полученные результаты имеют согласие с результатами Ли, Петрассо при больших энергиях, а при низких энергиях имеют различие, так как результат Ли, Петрассо не учитывает эффект неидеальности. Результаты на основе эффективного потенциала показывают, что при $E_{\alpha} = 3,54 M \mathcal{B}$ ион проходит $r = 3.6 \mu M$, ресоответствует Ли, Петрассо зультат r = 2.67 μ м.

Зная величины тормозных потерь можно определить части поглощаемой энергии ионом и электроном [30]:

$$E_{i} = \int_{0}^{E_{i}} dE_{i} = \int_{0}^{E_{0}} dE \frac{dE_{i}/dx}{dE/dx},$$
 (9)

$$E_{e} = \int_{0}^{E_{e}} dE_{i} = \int_{0}^{E_{0}} dE \, \frac{dE_{e}/dx}{dE/dx} \,, \tag{10}$$

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

$$\frac{dE_i}{dx} + \frac{dE_e}{dx} = \frac{dE}{dx},\tag{11}$$

таким образом:

$$E_i + E_e = E_0. \tag{12}$$



Рисунок 1 – Тормозная способность альфачастицы в ДТ плазме с начальной энергией $E_0 = 3,54 M \Im B$



Рисунок 2 – Энергия торможения альфачастицы с начальной энергией $E_0 = 3,54 M_{\Im}B$ в реакции $D + T \rightarrow \alpha + n$

Электронные и ионные компоненты тормозной способности альфа- частицы получены с использованием эффективных потенциалов взаимодействия [24-25], соответственно. На рисунке 3 представлены результаты расчета тормозной способности альфа-частицы с энергией $E_{\alpha} = 3.54 M \Im B$, начальной при $T_i = T_e = 10 \div 60 \kappa \mathfrak{B}$ температурах И $n = 10^{26} \, cm^{-3}$. Ha плотности основе полученных данных были оценены части поглощаемой энергии ионом Е, и электро- E_{ρ} . ном Части энергии, переданные

электронам и ионом, вычисленные по формулам (11-12) при температурах $T_i = T_e = 10 \div 60 \kappa \Im B$ составляют $E_e = 3.38 M \Im B$ и $E_i = 0.14 M \Im B$, соответственно (рис. 4).



Рисунок 3 - Тормозные потери альфа- частицы при $T_i = T_e = 10 \div 60 \kappa \mathfrak{B} B$



Рисунок 4 - Потери энергии на ионы в зависимости от температуры плазмы α-частицы в ДТ плазме

Как упомянуто выше, еще одной важной задачей в реализации ИТС является достижение таких плотностей топлива, при которых становится возможным захват значительной доли энергии частиц. Частицами в случае ДТ реакций являются альфа-частицы с энергией $E = 3,54 M \Rightarrow B$, поэтому можно рассматривать самонагрев только за счет поглощения энергии альфа- частицы. Следовательно, основные процессы, происходящие в термоядерном топливе, влияют на эффективность термоядерного горения, нагрев и выгорание таблетки. Как известно, для инерционного УТС параметром характеризующим эффективность протекания реакции синтеза является параметр удержания, т.е. произведение плотности плазмы на радиус мишени *рR*. Реализация термоядерного синтеза с положительным энерговыделением возможна при условии критерия Лоусона больше 1, т.е. выделяемая энергия больше затрачиваемой [31-33]. При современном развитии ускорителей и лазеров степень сжатия соответствует n=10³. Известно, что реакция синтеза происходит от 20 до 80 кэВ. Как видно из рисунка 5 длина пробега α -частицы с энергией 3.54 МэВ в плазме с температурой до 100 кэВ дает $\rho R = 1.5 \ e/cm^2$. Если параметр удержания $\rho R > 1.5 \ e/cm^2$, то эффективность самонагрева повышается, поскольку пик поглощения энергии находится в самой мишени. Следовательно, для того, чтобы реализовать эффективный самонагрев топлива за счет поглощения энергии а -частицы, необходимо довести его до таких условий, когда параметр удержания $\rho R > 1.5 c / cm^2$.



Рисунок 5 – Параметр удержания альфачастицы в ДТ плазме

Проведено исследование динамических процессов в плотной плазме на основе эффективного потенциала взаимодействия, который учитывает квантовые эффекты дифракции на малых расстояниях и экранировку полей зарядов - на больших. Знание величин пробегов и профилей энерговыделения тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно определить параметры конструкции термоядерной мишени. По полученным результатам следует, что динамические характеристики плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта 3086/ГФ4 (2017).

Список литературы

1 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.

2 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.

3 Arkhipov Yu.V., Ashikbayeva A.B., Askaruly A., Davletov A.E., Tkachenko I.M. Stopping of relativistic projectiles in twocomponent plasmas // EPL. – 2013. – Vol. 104. – P. 35003-1-6.

4 Arkhipov Yu. V., Ashikbayeva A.B., Askaruly A., Davletov A.E. and Tkachenko I.M. Dielectric function of dense plasmas, their stopping power, and sum rules // Phys. Rev. E. -2014. - Vol. 90. - P. 053102.

5 Tashev B., Baimbetov F., Deutsch C., and Fromy P. Low velocity ion stopping in binary ionic mixtures // Phys. of Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 102701.

6 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.

7 Barriga-Carrasco M.D. Dynamical local field corrections on energy loss in plasmas of all degeneracies // Phys. Rev. E. – 2009. – Vol. 79. – P. 027401.

8 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.

9 Skupsky S. Energy loss of ions moving through high-density matter // Phys. Rev. A. – 1977. – Vol. 16. – P. 727-731.

10 Maynard G., Gardes D., Chabot M., Nectoux M., Deutsch C. Nucl. Instr. and Meth. A. – 1998. – Vol. 146. – P. 88-94.

11 Kemp A.J., Fiuza F., Debayle A., Johzaki T., Mori W.B., Patel P.K., Sentoku Y. and Silva L.O. Laser–plasma interactions for fast ignition // Nucl. Fusion. – 2014. – Vol. 54. – P. 054002. 12 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.

13 Roth M., Stockl C., Suss W., Iwase O., Bock R., Hoffmann D.H.H., Geissei M., Seeling W. Energy loss of heavy ions in laserproduced plasm // Europhys. Lett. – 2000. – Vol. 50. – P. 28-34.

14 Mintsev V., Gryaznov V., Kulish M., Fortov V., Sharkov B., Golubev A., Fertman A., Mescheryakov N., Suss W., Hoffmann D.H.H., Stetter M., Bock R., Roth M., Stockl C., Gardes D. On measurements of stopping power in explosively driven plasma targets // Nucl. Instr. and Meth. A. – 1998. – Vol. 415. – P. 715.

15 Hoffmann D.H.H., Weyrich K., Wahl H., Peter Th., Meyer-ter-Vehn J., Jacoby J., Rimbot R., Gardes D., Rivet M.F., Dumail M., Fleurier C., Sanba A., Deutch C., Maynard G., Noll R., Haas R., Arnold R. and Maurmann S. Experimental observation of enhanced stopping of heavy ions in a hydrogen plasma // Z. Phys. A – Atomic Nuclei. 1988. – Vol. 30. – P. 339.

16 Roth M., Stockle C., Suss W., Iwase O., Gericke D.O., Bock R., Hoffmann D.H.H., Geissel M. and Seelig W. Energy loss of heavy ions in laser-produced plasmas // Europhysics Letters. -2000. - Vol. 50, No 1. - P. 28-34.

17 Deutsch C., Maynard G., Bimbot R., Gardes D., Della-Negra S., Dumail M., Kubica B., Richard A., Rivet M.F., Servajean A., Fleurier C., Sanba A., Hoffmann D.H.H., Weyrich K., Wahl H. Ion beam-plasma interaction: A standard model approach // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 1986. – Vol. 278. – P. 38.

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 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.

21 Fertman A.D., Mutin T.Yu., Golubev A., Basko M. et al. Stopping power measurements for 100-keV/u Cu ions in hydrogen and nitrogen // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B. - 2006. - Vol. 247. - P. 119–204.

22 Ordonez C.A., Molina M.I.. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // Phys. Plasmas. -1994. - Vol. 1. - P. 2515.

23 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // Phys. Plasmas. - 2001. - Vol. 8. - P. 5049.

24 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.

25 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, N_{0} 5. – P. 425-431.

26 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.

27 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.

28 Mahdavi M. and Koohrokhi 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 Li C.K., Petrasso R.D. Charged-particle stopping powers in inertial confinement fusion plasmas // Phys. Rev. Lett. - 1993. - Vol. 70. -P. 3063.

30 L. S. Brown, D. L. Preston, and R. L. Singleton Jr. Charged particle motion in a highly ionized plasma // Phys. Rep. - 2005. - Vol. 410. - P.237.

 Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез / пер. с англ. –
М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с. 32 Lindl J. D. Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive // New York: Springer, Verlag. – 1998. – P. 204.

33 S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Inte-

raction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics. – Clarendon: Oxford, 2004. – P. 480.

Принято к печати 30.09.17

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: moldir.issanova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТКИК ПЛОТНОЙ, ДВУХ-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В данной работе исследованы динамические характеристики неизотермической, плотной дейтерий-тритиевой 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 двухтемпературной плазме. С помощью кулоновского логарифма получены тормозная способность, потери энергии в неизотермической плотной плазме. По полученным результатам следует, что динамические характеристики плотной плазмы могут быть адекватно выражены через кулоновский логарифм на основе эффективных потенциалов. Показана, что при больших скоростях быстрые частицы слабо взаимодействуют со средой. По мере того как они тормозятся, т.е. уменьшают свою энергию, они начинают отдавать кинетическую энергию, поэтому при малых энергиях наблюдается пик поглощения. В пределах, когда у быстрых частиц совсем малая скорость, кинетическая энергия становится сравнимой с тепловой энергией среды, т.е. разница в энергиях становится маленькой, скорость отдаваемой энергии уменьшается. Знание величин пробегов и профилей энерговыделения тяжелых, заряженных частиц в плазме позволят более точно определить параметры конструкции термоядерной мишени.

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

М.К. Исанова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, Д. Хоффманн² ¹ЭТФҒЗИ, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан ²Дармштадт техникалық университеті, Ядеролық физика институты, Германия, Дармштадт қ-сы

ИНЕРЦИЯЛЫҚ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ТЫҒЫЗ ЕКІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста изотермиялық емес, тығыз дейтерий-тритий 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. Кулон логарифмі көмегімен изотермиялық емес тығыз плазманың тежегіштік қасиеттері мен

Журнал проблем эволюции открытых систем

энергия жоғалтулары зерттелді. Алынған нәтижелер бойынша тығыз плазманың транспорттық қасиеттері эффективті потенциал негізіндегі Кулон логарифмі арқылы толық анықтала алады. Жоғары жылдамдықтағы жылдам бөлшектер ортада нашар әрекеттесетіндігі көрсетілген. Олар тежелген кезде, яғни, өздерінің энергиясын азайтқанда, кинетикалық энергиясын жоғалтады, сондықтан төмен энергияларда жұтылу шыңы байқалады. Шапшаң бөлшектердің жылдамдығы өте төмен болса, кинетикалық энергия ортаның жылу энергиясымен сәйкес болады, яғни, энергиядағы айырмашылық аз болады, берілген энергияның жылдамдығы төмендейді. Плазмадағы ауыр, зарядталған бөлшектердің диапазондары мен энергияны жоғалту профилдерін білу термоядролық нысанды жобалау параметрлерін дәл анықтауға мүмкіндік береді.

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

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

¹IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan ²Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt

INVESTIGATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF INERTIAL CONFINEMENT FUSION DENSE, TWO-TEMPERATURE PLASMAS

In this paper the dynamic characteristics of 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. Stopping power and energy loss in such plasmas were studied using the Coulomb logarithm. 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. It is shown that at high velocities the fast particles weakly interacted with the environment. As they slowed down, i.e., they reduce their energy, they begin to give up kinetic energy, so at low energies an absorption peak is observed. Within the limits when fast particles have a very low velocity, the kinetic energy becomes comparable with the thermal energy of the environment, i.e. the difference in energies becomes small, the velocity of the given energy decreases. Knowledge of the ranges and energy release profiles of heavy, charged particles in a plasma will allow us to more accurately determine the parameters of the design of a thermonuclear target.

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