

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 ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОЙ, ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Аннотация. В данной работе исследованы динамические характеристики неизотермической, плотной дейтерий-третиевой 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 $n_e > 10^{21} \text{ см}^{-3}$, необходимых для адекватного качественного описания процессов взаимодействия тяжелоионных пучков с плотной плазмой в широком диапазоне параметров, является принци-

пиальным обоснованием актуальности исследований в области ИТС. Основной энергетический вклад пучка тяжелых ионов в разных типах термоядерных мишеней происходит в плотной, высокотемпературной плазме, образованной этим же энергетическим вкладом. 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 ионизированном 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 быстро движущихся 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:

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

где ΔE_i - потеря энергии при i -том столкновении. Тормозная способность S определяется как $\int_0^{\delta l} S dl = \delta E$. При увеличении числа

N столкновений имеем $\int_0^{\delta l} S dl = S \cdot \delta l$; $S = \frac{\delta E}{\delta l}$

. Потеря энергии в результате соударения пробной частицы с частицами плазмы есть:

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

здесь $E_c = \frac{1}{2} m_{\alpha\beta} v^2$ - энергия в системе центра масс сталкивающихся частиц; v - 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]:

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

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]:

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

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

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

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 $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ - тепловая длина волны де Бройля. В формуле (5) $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ - потенциал взаимодействия частиц и r_0 определяется из уравнения:

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

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, учитывающий как квантовые эффекты на малых расстояниях, так и эффект экранирования на больших расстояниях [24-25]:

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

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} [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 опре-

делены эффективные пробеги частиц с различной энергией, образующихся в ДТ плазме. Эффективный пробег определяется по формуле [28]:

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

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 $E_\alpha = 3,54 \text{ МэВ}$ ион проходит $r = 3.6 \mu\text{м}$, результат Ли, Петрассо соответствует $r = 2.67 \mu\text{м}$.

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

$$E_i = \int_0^{E_i} dE_i = \int_0^{E_0} dE \frac{dE_i/dx}{dE/dx}, \quad (9)$$

$$E_e = \int_0^{E_e} dE_e = \int_0^{E_0} dE \frac{dE_e/dx}{dE/dx}, \quad (10)$$

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

$$\frac{dE_i}{dx} + \frac{dE_e}{dx} = \frac{dE}{dx}, \quad (11)$$

таким образом:

$$E_i + E_e = E_0. \quad (12)$$

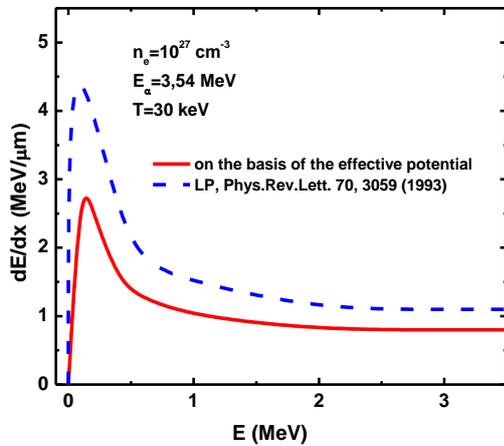


Рисунок 1 – Тормозная способность альфа-частицы в ДТ плазме с начальной энергией $E_0 = 3,54 \text{ МэВ}$

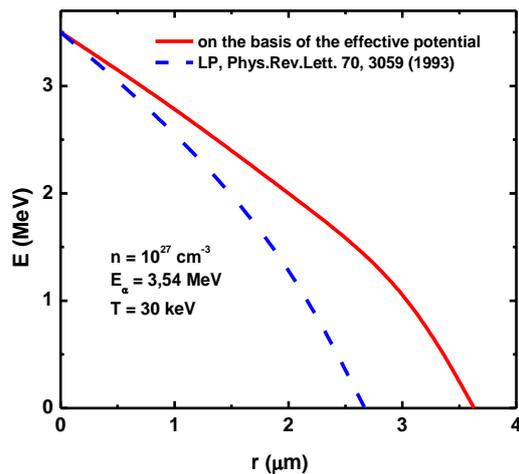


Рисунок 2 – Энергия торможения альфа-частицы с начальной энергией $E_0 = 3,54 \text{ МэВ}$ в реакции $D + T \rightarrow \alpha + n$

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 начальной энергией $E_\alpha = 3,54 \text{ МэВ}$, при температурах $T_i = T_e = 10 \div 60 \text{ кэВ}$ и плотности $n = 10^{26} \text{ см}^{-3}$. На основе полученных данных были оценены части поглощаемой энергии ионом E_i и электроном E_e . Части энергии, переданные электронам и

ионом, вычисленные по формулам (11-12) при температурах $T_i = T_e = 10 \div 60 \text{ кэВ}$ составляют $E_e = 3,38 \text{ МэВ}$ и $E_i = 0,14 \text{ МэВ}$, соответственно (рис. 4).

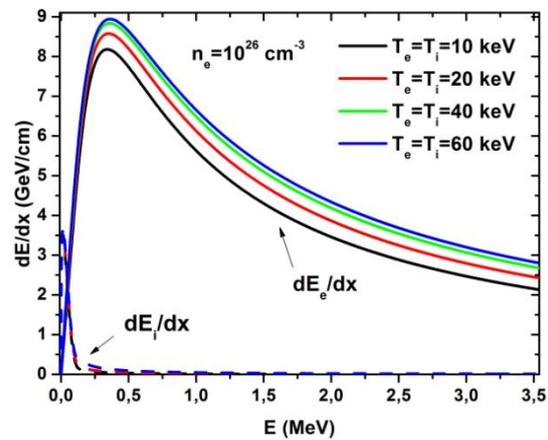


Рисунок 3 - Тормозные потери альфа- частицы при $T_i = T_e = 10 \div 60 \text{ кэВ}$

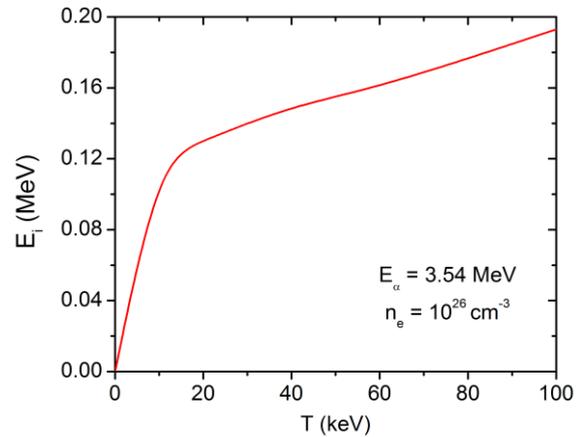


Рисунок 4 - Потери энергии на ионы в зависимости от температуры плазмы α -частицы в ДТ плазме

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 $E = 3,54 \text{ МэВ}$, 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 яв-

ляется параметр удержания, т.е. произведение плотности плазмы на радиус мишени ρR . 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 $\eta=10^3$. 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 $\rho R = 1,5 \text{ г/см}^2$. Если параметр удержания $\rho R > 1,5 \text{ г/см}^2$, то эффективность самонагрева повышается, поскольку пик поглощения энергии находится в самой мишени. Следовательно, для того, чтобы реализовать эффективный самонагрев топлива за счет поглощения энергии α -частицы, необходимо довести его до таких условий, когда параметр удержания $\rho R > 1,5 \text{ г/см}^2$.

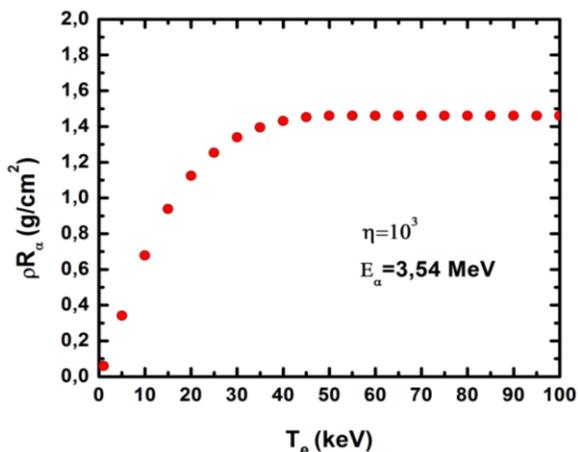


Рисунок 5 – Параметр удержания альфа-частицы в ДТ плазме

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 мо-

гут 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 two-component 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 laser-produced plasma // *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, № 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, № 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.

- 31 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 Interaction, 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 ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОЙ, ДВУХ-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ Инерционного термоядерного синтеза

Аннотация. В данной работе исследованы динамические характеристики неизотермической, плотной дейтерий-третиевой 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 пробега 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

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

²Дармштадт техникалық университеті, Ядеролық физика институты, Германия, Дармштадт қ-сы

ИНЕРЦИАЛЫҚ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ ТЫҒЫЗ ЕКІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Бұл жұмыста изотермиялық емес, тығыз дейтерий-третий плазмасының динамикалық сипаттамалары зерттелді. Белшектердің 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 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

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

²*Technical University Darmstadt, Germany, Darmstadt*

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

Abstract. 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.

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