

УДК 533.93

С.К. Коданова*, М.А. Абдиманапова
 НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
 *E-mail: kodanova@mail.ru

Тормозная способность тяжелых частиц в частично-ионизованной плазме

Аннотация. В настоящей работе исследована особенность торможения тяжелых частиц в частично-ионизованной плазме. Кулоновский логарифм наиболее точно определен с помощью угла рассеяния центра масс на основе псевдопотенциальной модели, учитывающей эффект экранировки на больших расстояниях. Полученные значения кулоновского логарифма от температуры плазмы сравнены с экспериментальными данными и с результатами других авторов.

Ключевые слова: частично-ионизованная плазма, псевдопотенциальная модель, кулоновский логарифм, эффект экранировки.

Исследование энергетических потерь заряженных частиц в веществе и, в частности в плазме, имеет большое значение для физики плазмы, а также для задач инерциального термоядерного синтеза [1-3]. Действительно, прохождение заряженных частиц через вещество мишени сопровождается разнообразными процессами взаимодействия с элементарными частицами, атомами. Характер и результаты этих взаимодействий зависят от типа энергии потока заряженных частиц, а также типа, состояния, плотности, состава и размера мишеней. Еще одной важной задачей, возникающей в рамках ИТС, является контроль параметров плазмы термоядерной мишени и установление соответствия между этими параметрами и тормозной способностью вещества. Трудности возникают в основном при измерении параметров плазмы с плотностью свободных электронов, когда возможности стандартных оптических и спектроскопических методов резко уменьшаются в связи с ростом оптической толщины плазмы. Поэтому моделирование тяжелых многозарядных ионов для инерциального термоядерного синтеза требует как качественного, так и количественного описания процессов взаимодействия тяжелых частиц с веществом в широком диапазоне параметров плотностей и температур. Особый интерес представляет определение потерь энергий ионов для частично-ионизо-

ванной плазмы, поскольку экспериментальное исследование наталкивается на определенные трудности, связанные с плотностью свободных электронов плазмы [4-5].

В настоящей работе исследована особенность торможения тяжелых частиц в частично-ионизованной плазме. В общем случае, кулоновская тормозная способность ионизованного вещества для налетающего точечного иона может быть представлена как сумма тормозных способностей свободных электронов (f_e) и ионов плазмы (f_i):

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{f_e} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{f_i} \quad (1)$$

Пренебрегая малым вкладом в тормозную способность ионов плазмы в силу их большой массы, тормозные потери для налетающего иона можно записать как:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 n_e Z_{eff}^2}{m_e v_p^2} \lambda_{f_e}, \quad (2)$$

где v_p и Z_{eff} – скорость и эффективный заряд налетающего иона, соответственно.

Кулоновский логарифм λ_{f_e} для свободных электронов возникают в результате интегрирования Резерфордского сечения по

области изменения прицельного параметра или, что эквивалентно, по области переданного импульса.

В общем случае, кулоновский логарифм может быть представлен как $\lambda = \ln(p_{\max}/p_{\min})$, где $p_{\max} = 2m_e v$ есть максимальный переданный импульс и p_{\min} есть минимальный переданный импульс, меньше которого формула Резерфорда становится неприменима.

В настоящей работе кулоновский логарифм определен с помощью угла рассеяния центра масс при парном кулоновском столкновении:

$$\lambda = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{\infty} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) b db, \quad (3)$$

где b_{\perp} – прицельный параметр при рассеянии на 90° , μ – приведенная масса частиц, θ_c – угол рассеяния в системе центра масс, b – прицельный параметр.

Угол рассеяния в системе центра масс и форма траектории частицы определяются прицельным расстоянием b . Значение b может изменяться от нуля до больших значений, при которых силы взаимодействия малы (далекие столкновения). Соответственно изменяется от нуля до π . В классическом парном столкновении угол рассеяния в системе центра масс в классическом парном столкновении определяется с помощью законов сохранения энергии и момента количества движения [6]:

$$\theta_c = \pi - \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = 2b \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{\Phi(r)}{E_c} - \frac{b^2}{r^2} \right)^{-1/2}, \quad (4)$$

здесь r_0 – расстояние максимального сближения, при котором обращается в нуль знаменатель подынтегрального выражения

$$1 - \frac{\Phi(r_0)}{E_c} - \frac{b^2}{r_0^2} = 0. \quad (7)$$

С помощью замены переменных $R = \frac{r}{r_d}$, $\Lambda = \frac{2r_d E_c}{e^2}$, $\beta = \frac{b}{r_d}$ кулоновский логарифм можно записать в виде

$$\lambda = \Lambda^2 \int_0^{\infty} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \beta d\beta. \quad (8)$$

В качестве потенциального взаимодействия частиц был использован псевдопотенциал, который учитывает корреляционные эффекты высших порядков на больших расстояниях

$$\Phi(R) = \frac{\gamma}{R} e^{-R} \frac{1 + \frac{\gamma}{2} f(R)}{1 + c(\gamma)}, \quad (9)$$

где $f(R) = [\exp(-\sqrt{\gamma} R) - 1][1 - \exp(-2R)]^5$, $c(\gamma) = -0.008617 + 0.455861\gamma - 0.108389\gamma^2 + 0.009377\gamma^3$.

Для определения состава алюминиевой плазмы решалось уравнение Саха с учетом снижения потенциала ионизации атомов, возникающего вследствие учета взаимодействия частиц. Определяя степень ионизации как отношение количества свободных электронов к их полному числу, уравнение Саха записывается в виде:

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} = n_0 \lambda^3 \exp\left[\frac{I - \Delta I}{k_B T}\right], \quad (10)$$

где I , ΔI – потенциал ионизации атома и его снижение, соответственно. Для алюминиевой плазмы кратность ионизации атомов ограничена значением 3. Потенциалы ионизации атома алюминиевой плазмы $I_1 = 5.99$ эВ, $I_2 = 18.8$ эВ, $I_3 = 28.4$ эВ. Система нелинейных уравнений Саха для неидеальной плазмы, где снижение потенциала ионизации взято в дебаевском приближении $\Delta I = -\frac{e^2}{2r}$, решается методом

Ньютона. Состав определяется при увеличении температуры системы, которая меняется в диапазоне 0.5-12 эВ. На рис. 1 представлены результаты расчета химического состава плазмы алюминия с учетом трехкратной ионизации. По мере роста температуры увеличивается число многократно ионизованных ионов, потенциальная энергия взаимодействия которых в несколько раз больше, чем у электронов, атомов и однозарядных ионов. Следовательно, возрастает роль эффектов неидеальности, что сказывается на величине неидеальной части свободной энергии.

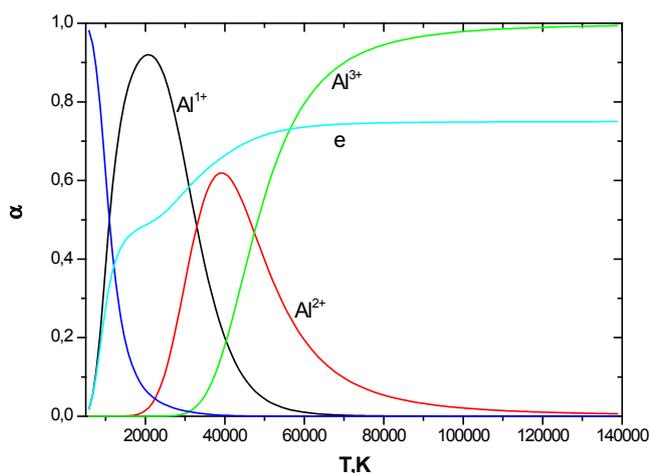
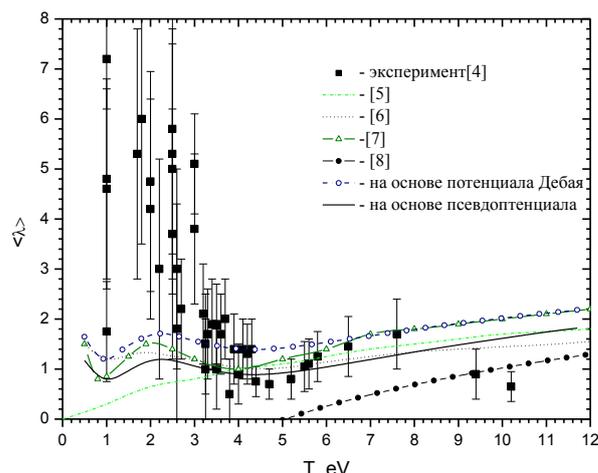


Рисунок 1 – Зависимость относительных концентраций ионов алюминия разной кратности от температуры. Плотность $n=3.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$



■ – экспериментальные данные [7], - - - - [8], - [9], -Δ-Δ-Δ - [10], -●-●-●- классический кулоновский логарифм $\lambda = \ln \Lambda$, -○-○-○- на основе потенциала Дебая-Хюккеля, — на основе псевдопотенциала.

Рисунок 2 – Зависимость кулоновского логарифма от температуры плазмы

Среднее значение кулоновского логарифма определяется следующим образом:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\sum Z_i^2 n_i \lambda}{\langle Z \rangle n_e}, \quad (11)$$

где $\langle Z \rangle = \sum Z_i n_i / \sum n_i$ – средний заряд ионов, $n_e = \sum Z_i n_i$. Результаты расчета кулоновского логарифма для экспериментальных значений температур и плотности представлены на рисунке 2.

Из рисунка видно, что значения кулоновского логарифма плазмы алюминия удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [7] и с результатами других авторов, полученными на основе классических теорий [8-10].

Изменение плотности свободных электронов плазмы приводит к изменению кулоновского логарифма, а это, в свою очередь, приводит к увеличению тормозной способности плазмы. На рис. 3 приведены значения потерь энергий ионов в плазме при различных степенях ионизации. Показано, что тормозная способность тяжелых частиц развивается с увеличением степени ионизации, что связано с умножением концентрации свободных электронов рассеивающих центров в системе.

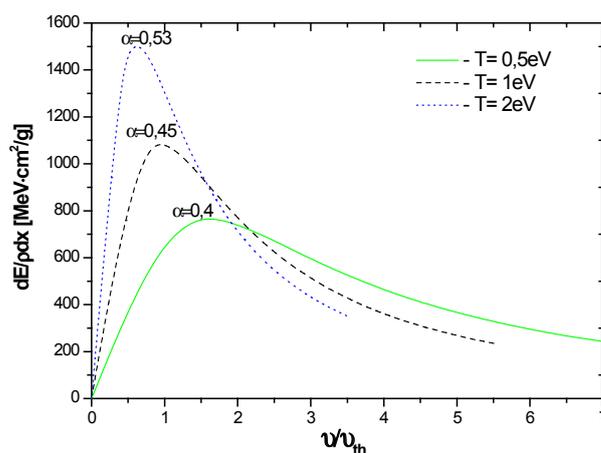


Рисунок 3 – Расчеты энергетических потерь ионов в алюминии при различных степенях ионизации

Литература

- 1 Zwicknagel G., Toepffer G. and Reinhard P.-G. Stopping power of heavy ions in strongly coupled plasmas // Laser and Particle Beams. – 1995. – Vol. 13, № 2. – P. 311.
- 2 Gericke D.O. and Schlanges M. Beam-plasma coupling effects on the stopping power of dense plasmas // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 60. – P. 904-910.
- 3 Young F.G., Mosher D., Stephanakis S.J. et

al. Measurements of Enhanced Stopping of 1-MeV Deuterons in Target-Ablation Plasmas // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 49. – P. 549-553.

4 Belyaev G.E., Basko M.M. et al. Measurement of the Coulomb energy loss by fast protons in a plasma target// Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 53, No 3. – P. 2701-2707.

5 Golubev A., Basko M., Fertman A. et al. Dense plasma diagnostics by fast proton beams // Phys. Rev. E. – 1988. – Vol. 57. – P. 3363-3367.

6 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb interaction potentials // Phys. Plasmas. – 1994. – Vol. 1, №8. – P. 2515-2521.

7 Mostovych A.N., Kearney K.J. Measure-

ments of plasma opacity from strongly coupled Aluminum and Copper plasmas // In book: Physics of Strongly Coupled Plasma ed. H.M. Van Horn and S. Ichimaru. – New York: USA, 1993. – 299 p.

8 Cauble R., Rozmus W. Inverse bremsstrahlung absorption coefficient in collisional plasmas// Phys. Fluids. – 1985. – Vol. 28. – P. 3387-3395.

9 Ichimaru S., Tanaka S. Theory of interparticle correlations in dense, high-temperature plasmas// Phys. Rev. A. – 1985. – Vol. 32. – P. 1790-1796.

10 Dawson J.M., Oberman C. High-frequency conductivity and the emission and absorption coefficients of a fully ionized plasma// Phys. Fluids. – 1962. – Vol. 5. – P. 517-522.

С.К. Қоданова, М.А. Әбдіманапова

Жартылай иондалған тығыз алюминий плазмасында ауыр бөлшектердің тежегіштік қабілеттігі

Бұл жұмыста ауыр бөлшектердің тежелуінің ерекшеліктері зерттелінді. Кулондық логарифм шашырау бұрышы арқылы алыс арақашықтықтан экрандалуды ескеретін псевдопотенциалды модель негізінде дәлірек анықталды. Алынған кулондық логарифмнің температурадан тәуелділік мәндері эксперименттік мәндермен және басқа авторлардың есептеу нәтижелерімен салыстырылды.

Түйін сөздер: жартылай - иондалған плазма, псевдопотенциалды модель, кулондық логарифм, экрандалу эффектісі.

S.K. Kodanova, M.A. Abdimanapova

Stopping power of heavy particles in a partially ionized aluminum plasma

In this paper we investigate the stopping power of heavy particles in a partially ionized plasma. The value of the Coulomb logarithm is most accurately determined using the pseudopotential taking into account the effect of screening at long distances. The obtained values of the Coulomb logarithm depending on the temperature of the plasma are compared with experimental data and with results of other authors.

Keywords: partially ionized plasma, pseudopotential model, Coulomb logarithm, screening effect.