

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ АЛЮМИНИЯ

А.Ж. Акбар

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, НИИЭТФ, г. Алматы

Исследованы фазовые сдвиги и сечения рассеяния электрон-ионного и электрон-атомного взаимодействия в плотной квазиклассической плазме алюминия. Показано, что учет эффекта экранировки заряда на больших расстояниях и квантового эффекта дифракции во взаимодействии заряженных частиц приводит к уменьшению фазовых сдвигов и соответствующему снижению сечений рассеяния. Задача решалась квантово-механически с помощью уравнения Калоджеро.

Введение

Исследование свойств металлической, в частности, алюминиевой плазмы, является актуальной проблемой на сегодняшний день. Большая практическая значимость алюминия как конструкционного материала в авиакосмической отрасли требует знания всех его химико-физических свойств и характеристик.

В данной работе представлены результаты исследования кинетических свойств плотной квазиклассической плазмы алюминия. Была рассмотрена как полностью, так и частично-ионизованная плазма. Изучение столкновительных процессов необходимо для исследования транспортных характеристик плазмы.

Для описания состояния плазмы удобно пользоваться безразмерными параметрами:

$\Gamma = (Ze)^2 / ak_B T$ — параметр связи, показывающий во сколько раз значение потенциальной энергии взаимодействия частиц отличается от значения их кинетической энергии; $r_s = a/a_B$ — параметр плотности, определенный как отношение среднего межчастичного расстояния $a = \sqrt[3]{3/4n_e}$ к радиусу Бора $a_B = \hbar^2 / me^2$.

Модели взаимодействия частиц

Взаимодействие заряд-заряд

В качестве модели взаимодействия заряженных частиц использовался псевдопотенциал [1]:

$$\Phi_{ei}(r) = \frac{(Ze)^2}{\sqrt{1 - 4\tilde{\lambda}^2/r_D^2}} \left(\frac{e^{-Ar}}{r} - \frac{e^{-Br}}{r} \right), \quad (1)$$

где $\tilde{\lambda} = \hbar / \sqrt{3mk_B T}$ — длина волны де Бройля частицы; $r_D = \sqrt{k_B T / 4\pi n_e e^2}$ — дебаевский радиус

экранирования заряда; $A = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 4\tilde{\lambda}^2/r_D^2}}{2\tilde{\lambda}^2}}$ и $B = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - 4\tilde{\lambda}^2/r_D^2}}{2\tilde{\lambda}^2}}$.

Видно, что в потенциале (1) имеется некоторое ограничение на возможные значения $\tilde{\lambda}$ и r_D :

$$2\tilde{\lambda} < r_D, \quad (2)$$

что приводит к следующим значениям температуры и плотности:

$$T = 10^5 \div 10^7 \text{ K} \text{ и } n = 10^{21} \div 10^{24} \text{ cm}^{-3}. \quad (3)$$

Особенностью данного потенциала является то, что в нем учитываются коллективные эффекты экранировки на больших расстояниях и квантовые эффекты дифракции на малых расстояниях.

Взаимодействие заряд-нейтрал

В качестве модели взаимодействия заряд-нейтрал использовался следующий псевдопотенциал [2]:

$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha_D}{8\pi \epsilon_0 (r^2 + r_0^2)^2} \exp\left(-\frac{2r}{r_D}\right) \times \left(1 + \frac{r}{r_D}\right)^2, \quad (4)$$

где α — дипольная поляризуемость, для атома алюминия $\alpha = 56,28a_B^3$; r_0 — «радиус» атома.

Данный потенциал также учитывает коллективный эффект экранировки заряда на больших расстояниях и конечность размера атома.

Столкновительные процессы

Фазовые сдвиги

Для определения фазовых сдвигов $\delta_l(r)$ решалось уравнение Калоджеро [3]:

$$\frac{d}{dr} \delta_l(r) = -\frac{1}{k} \frac{2m}{\hbar^2} \Phi_{ec}(r) [\cos \delta_l(r) j_l(kr) - \sin \delta_l(r) n_l(kr)]^2, \quad (5)$$

$$\delta_l(0) = 0.$$

где $\Phi_{ec}(r)$ — соответствующий потенциал взаимодействия; k — волновое число частицы; $j_l(kr)$ и $n_l(kr)$ — регулярное и нерегулярное решения уравнения Шредингера.

На рисунках 1 и 2 представлены фазовые сдвиги в зависимости от расстояния для потенциалов (1) и (4):

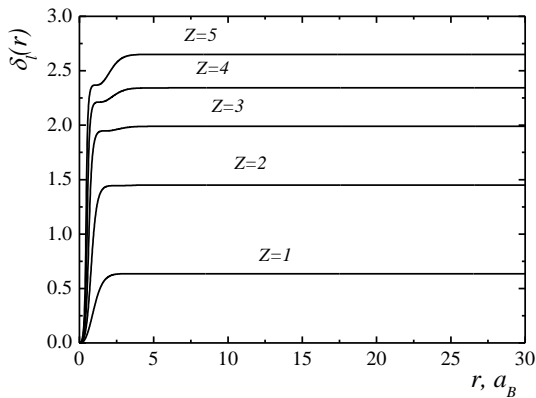


Рис.1. Фазовые сдвиги рассеяния электрона $l=0$ на ионах алюминия различной кратности. Потенциал взаимодействия (1). Параметры системы: $\Gamma = 0,7$, $r_S = 3$; волновое число частицы $ka_B = 0,7$.

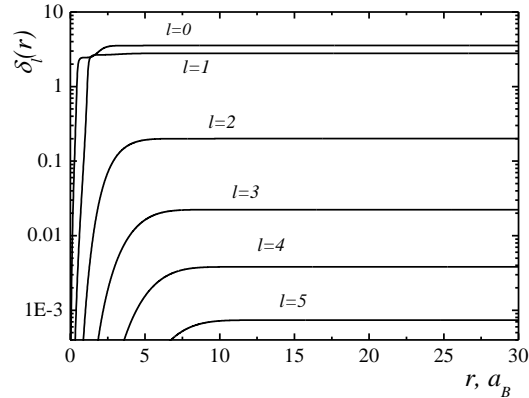


Рис.2. Фазовые сдвиги рассеяния электрона на атоме алюминия. Потенциал взаимодействия (4). Параметры системы: $\Gamma = 0,7$, $r_S = 3$; волновое число частицы $ka_B = 0,7$.

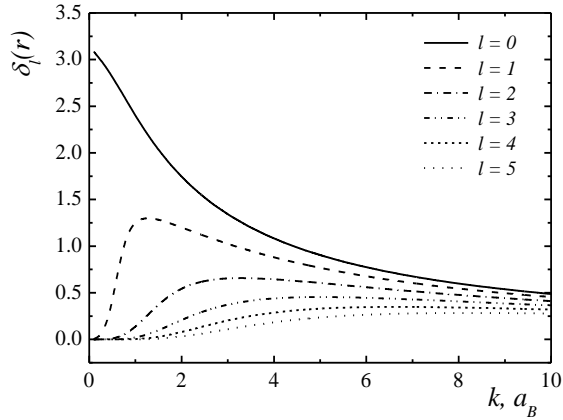


Рис.3. Фазовые сдвиги рассеяния электрона на ионе алюминия $Z = 5$ в зависимости от волнового вектора для потенциала (1). Параметры системы: $\Gamma = 0,7$, $r_s = 3$.

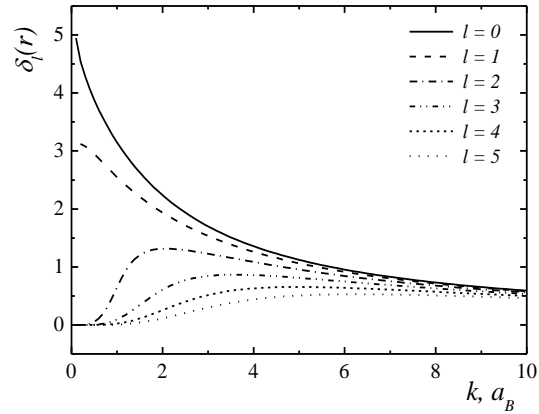


Рис.4. Фазовые сдвиги рассеяния электрона на атоме алюминия в зависимости от волнового вектора. Параметры системы: $\Gamma = 0,7$, $r_s = 3$, $\alpha = 56,28$.

Из рисунка 1 видно, что при данном l интенсивность взаимодействия электрона с ионом усиливается при увеличении кратности ионизации. Во взаимодействии же электрона с атомом основной вклад в процесс рассеяния вносит s -волна.

На рисунках 3 и 4 представлены фазовые сдвиги рассеяния в зависимости от волнового вектора. Видно, что с увеличением энергии налетающей частицы интенсивность взаимодействия уменьшается. При этом порядки величин фазовых сдвигов, как для электрон-ионного, так и для электрон-атомного взаимодействия одинаковы.

Сечения рассеяния

Парциальные сечения рассеяния вычислялись в квантово-механическом приближении:

$$Q_l^P(k) = \frac{4\pi}{k^2} (l+1) \sin^2 \delta_l. \quad (6)$$

Полные сечения рассеяния определяются как сумма парциальных:

$$Q^F(k) = \sum_{l=0}^n Q_l^P(k). \quad (7)$$

На следующих графиках представлены результаты по расчету полного сечения рассеяния. На рисунке 5 показаны графики полного и парциальных сечений рассеяния на основе модели (4). Для парциального сечения рассеяния при $l=0$ наблюдаются anomalously резкий минимум, который указывает на эффект Рамзауэра. На рисунке 6 показаны полные сечения рассеяния для различных Γ и r_s . Локальные минимумы объясняются влиянием эффекта Рамзауэра, который наблюдается на парциальном сечении рассеяния s -волны. В работе [4] были исследованы элементарные процессы с участием нескольких элементов, в том числе, алюминия. В качестве модели был использован потенциал Томаса-Ферми. Учитывалась электронная конфигурация атома в так называемом суперконфигурационном приближении. Были рассмотрены случаи с учетом вклада отдельных электронных оболочек и в т.н. приближении среднего атома. На рисунке 7 представлены графики полного сечения рассеяния на основе псевдопотенциала (4) и кривая, полученная в работе [4]. Видно, что

имеется качественное совпадение результатов со схожим характерным поведением кривых. Различие в величинах является следствием разных моделей: в работе [4] используется физическая модель плазмы, в представленной работе модель является химической.

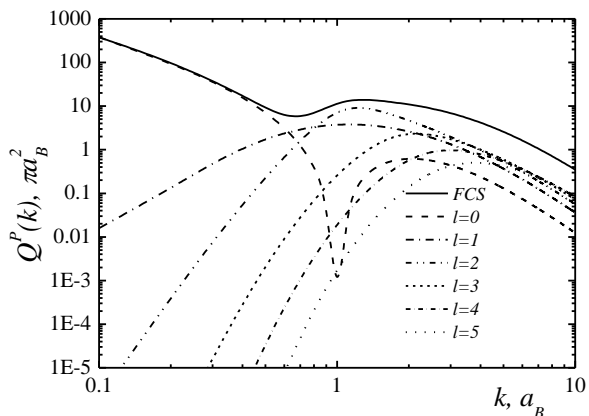


Рис.5. Парциальные и полное (FCS) сечения рассеяния электрона на атоме алюминия. Параметры системы $\Gamma = 0,7$, $r_s = 3$.

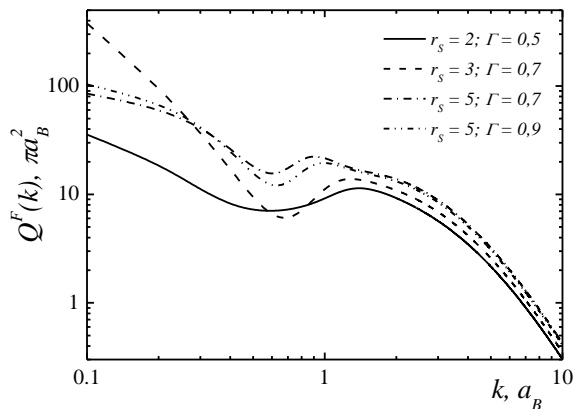


Рис.6. Полные сечения рассеяния электрон-атомного взаимодействия на основе модели (4) при различных параметрах Γ и r_s .

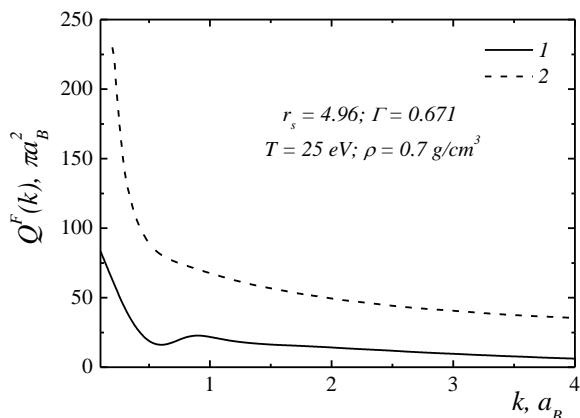


Рис.7. Полное сечение упругого рассеяния электрона на атоме алюминия. Графики: 1 – псевдопотенциал (4), 2 — работа [4].

Заключение

В данной работе были рассчитаны фазовые сдвиги, парциальные и полные сечения рассеяния на основе псевдопотенциальных моделей, учитывающих коллективный эффект экранировки и квантовый эффект дифракции во взаимодействии заряд-заряд. Сравнение с другими авторами показало качественное совпадение результатов.

Литература

- 1 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova // Phys. Plasmas **9**, 3758 (2002)
- 2 D. Kremp, G. Ropke and M. Schlages, in book: Transport properties in dense plasmas, 156 (1984).
- 3 В.В. Бабилов. Метод фазовых функций в квантовой механике. М.: «Наука», 1976.
- 4 J.-C. Pain, T. Blenski. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **81** (2005) 355-369

АЛЮМИНИЙ ПЛАЗМАСЫНЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІ

Ә.Ж. Ақбар

Тығыз квазиклассикалық алюминий плазмасындағы электрон-атом және электрон-ион фазалық ығысуы және шағылу қимасы зерттелген. Зарядталған бөлшектердің әсерлесуінде алыс ара қашықтықта экрандау эффектін және кванттық дифракция эффектін ескеру фазалық ығысудағы азаюна алып келеді, сол себептен шағылу қимасы да азаяды. Есеп Калоджеро тендеуі көмегімен кванттық- механикалық түрде шығарылған.

KINETIC PROCESSES IN ALUMINUM PLASMA

A.Zh. Akbar

The phase shifts and the scattering cross section of electron-ion and electron-atom interaction in dense semi-classical aluminum plasma are investigated. Shown that the taking into account charge screening effect at the long distance and the quantum effects of diffraction in interaction between charge particles leads to reduction of the phase shifts and the scattering cross sections. The task has solved quantum-mechanically by Calogero equation.