

# ВЫЧИСЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Ж.А. Кудышев

КазНУ им. аль – Фараби, г. Алматы

В данной работе рассматривается сечение ионизации в частично ионизованной водородной плазме. Сечение ионизации вычисляется с помощью псевдопотенциала взаимодействия, учитывающего корреляционные эффекты. Анализ полученных результатов показывает, что учет корреляционных эффектов важен для адекватного описания элементарных процессов в плазме.

## 1 Введение

Существуют различные подходы к рассмотрению процесса ионизации. Одним из подходов является классическое рассмотрение, предложенное Томсоном [1]. Она основана на модели, в которой при рассмотрении обмена энергией между ионизирующим и атомным электроном, последний предполагается свободным. Процесс ионизации в такой модели рассматривается с помощью классических уравнений движения. Поперечное сечение, полученное на основе этой модели, дает хорошее описание зависимости сечения от энергии налетающего электрона. В отличие от модели Томсона, модель Гризинского [2] учитывает движение связанного электрона, с помощью полуэмпирической функции распределения. Такой подход, качественно хорошо отображает зависимость сечения ионизации от энергии налетающего электрона. Следует отметить, что учет движения связанного электрона приводит к сдвигу максимума в область больших энергий и к более медленному спаду кривой зависимости с ростом энергии.

Известно, что поле заряда экранируется в плазме. Этот эффект приводит к потенциалу Дебая в полностью ионизованной плазме. В частично ионизованной плазме процесс ионизации проходит в присутствии нейтральной компоненты, поэтому очень важно учитывать влияния корреляционных эффектов на взаимодействие частиц плазмы. В работе [3] были получены потенциалы взаимодействия, которые учитывают корреляционные эффекты.

В данной работе, рассматриваются процессы ионизации в частично ионизованной плазме с низкой степенью ионизации. В таком случае, потенциал взаимодействия между электроном и атомом имеет вид:

$$V_{en}(r) = -\frac{e^2}{\beta_n} \left( \frac{1}{a_B} + \frac{1}{r} \right) \exp\left[-\frac{2r}{a_B}\right] + \frac{2(1-\beta_n)e^2}{\beta_n^2 r} \exp\left[-\sqrt{2(2-\beta_n)}r/a_B\right] \quad (1)$$

Следует отметить, что эта работа основана на классическом подходе, предложенном Томсоном. В отличие от модели Томсона, в которой дифференциальное сечение рассеяния вычисляется с помощью потенциала Кулона, в данной работе при вычислении дифференциального сечения используется потенциал (1), т.е. учитываются корреляционные эффекты.

## 2 Вычисление дифференциального сечения рассеяния.

Дифференциальное сечение рассеяния вычисляется с помощью квантомеханического метода. Следует отметить, что квантомеханический метод и классический эквивалентны друг к другу.

Рассеяние частиц при столкновении можно рассматривать как квантовый переход в состояниях непрерывного спектра из начального состояния, соответствующего свободному движению с импульсом  $\mathbf{p}_a = \hbar\mathbf{k}_a$ , в конечное состояние с импульсом  $\mathbf{p}_b = \hbar\mathbf{k}_b$  под влиянием

оператора возмущения  $V(\mathbf{r})$ , определяющего энергию взаимодействия сталкивающихся частиц. Тогда волновые функции налетающего электрона до и после рассеяния:

$$\varphi_a = \exp(i\mathbf{k}_a \mathbf{r}) \quad (2.1)$$

$$\varphi_b = \exp(i\mathbf{k}_b \mathbf{r}) \quad (2.2)$$

В соответствии с квантовой теорией рассеяния, дифференциальное сечение рассеяния вычисляется по формуле:

$$d\sigma = \left( \frac{\mu}{2\pi\hbar^2} \right)^2 \left| \langle \varphi_b | V(\mathbf{r}) | \varphi_a \rangle \right|^2 d\Omega \quad (2.3)$$

где

$$\langle \varphi_b | V(\mathbf{r}) | \varphi_a \rangle = \int V(r) e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}} d^3r \equiv V(q) \quad (2.4)$$

здесь  $\mathbf{q} = \mathbf{k}_b - \mathbf{k}_a$ .

При упругом рассеянии:

$$|\mathbf{k}_b| = |\mathbf{k}_a| = k \text{ и } q = 2k \sin\left[\frac{\theta}{2}\right] \quad (2.5)$$

В результате подстановки (2.1), (2.2) в (2.3) и при учете (2.5), получаем дифференциальное сечение рассеяния:

$$d\sigma = \frac{4}{\beta_n^2} a_B^2 \left[ \frac{2(1-\beta_n)}{\beta_n} \frac{1}{(2(2-\beta_n) + a_B^2 q^2)} - \frac{1}{(4 + a_B^2 q^2)} \left( \frac{4}{(4 + a_B^2 q^2)} + 1 \right) \right]^2 d\Omega \quad (2.6)$$

здесь  $q = 2k \sin\left[\frac{\theta}{2}\right]$ ;

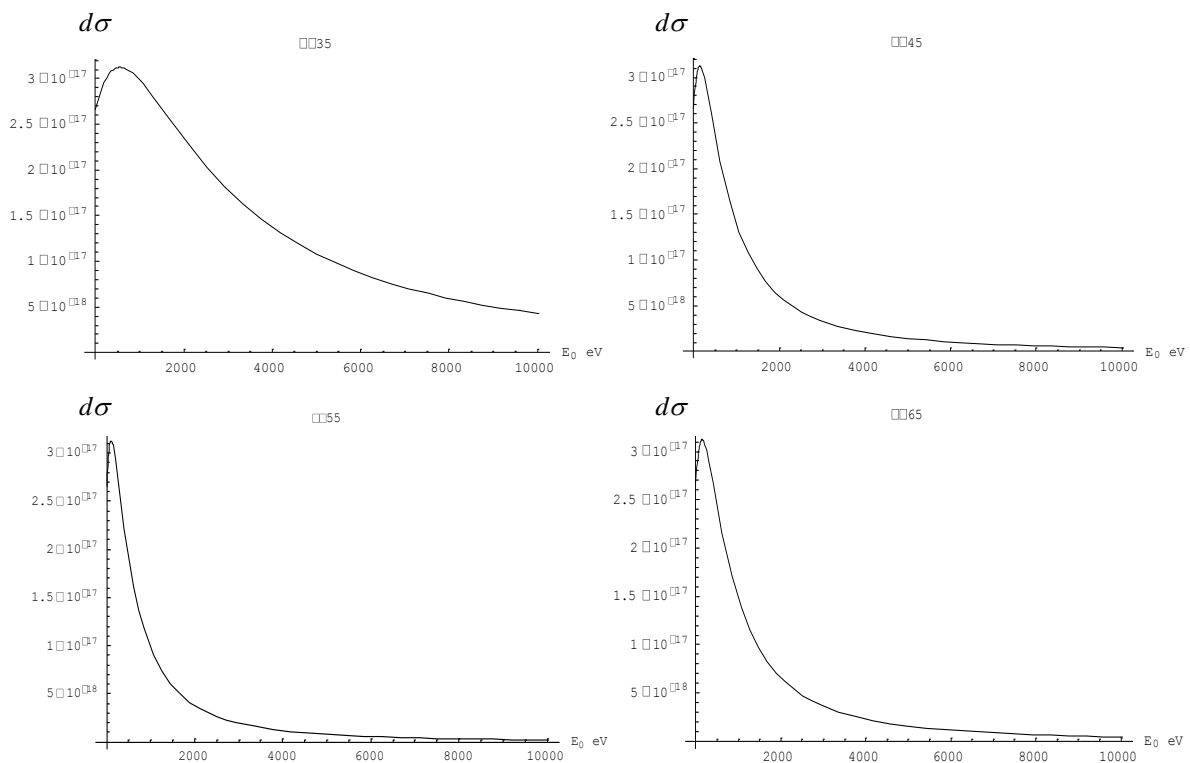


Рис. 1. Зависимость дифференциального сечения от энергии налетающего электрона при различных углах рассеяния.

На рисунке 1 показаны зависимости дифференциального сечения от энергии налетающего электрона при различных углах рассеяния. Сечение (2.6) было сравнена с аналогичными результатами других авторов.

### 3 Вычисление сечения ионизации

Для расчета сечения ионизации необходимо проинтегрировать дифференциальное сечение упругого рассеяния по телесному углу, но с учетом закона сохранения энергии [1].

Связь между передаваемой энергией и углом рассеяния определяется следующим выражением:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(1 - \cos[\theta])E_k = E_k \sin^2\left[\frac{\theta}{2}\right] \quad (3.1)$$

Минимальная энергия соответствует:

$$\begin{aligned} \Delta E_k = E_i &\Rightarrow E_i = E_k \sin^2\left[\frac{\theta_{\min}}{2}\right] \\ \theta_{\min} &= 2 \operatorname{ArcSin}\left[\sqrt{\frac{E_i}{E_k}}\right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Тогда сечение ионизации:

$$\sigma_i = 2\pi \int_{\theta_{\min}}^{\pi} d\sigma \sin[\theta] d\theta \quad (3.3)$$

здесь  $d\sigma$  - дифференциальное сечение упругого рассеяния, в нашем случае имеет вид (2.6),

$$\theta_{\min} = 2 \operatorname{ArcSin}\left[\sqrt{\frac{E_i}{E_k}}\right].$$

Следует отметить, что в данной работе, сечение ионизации было получено численно. На рисунке 2 приведена зависимость сечения ионизации от энергии налетающего электрона. Для сравнения на рисунке 3 показаны сечения ионизации модели Томсона, полуэмпирической модели Гризинского и данной работы.

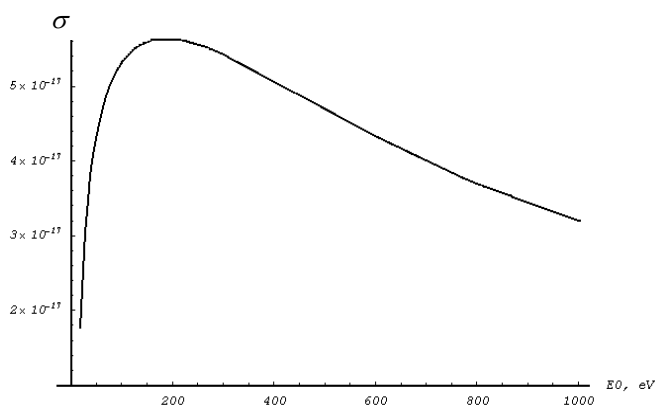


Рис.2. Зависимость сечения ионизации от энергии налетающего электрона

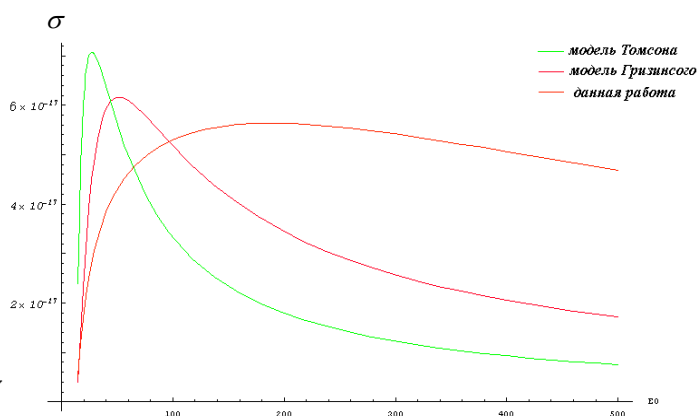


Рис. 3. График сравнения сечений ионизации классической модели Томсона, полуэмпирической модели Гризинского и классического сечение данной работы

#### **4 Заключение**

Известно, что классическая модель является наиболее простой и грубой моделью при рассмотрении ионизации атома электронным ударом. Полученный на ее основе результат дает правильную качественную картину для зависимости сечения ионизации от энергии налетающего электрона, но такие параметры ее, как положения максимума сечения и его величина, плохо соответствуют экспериментальным данным [1, 4]. Отметим, что полученные нами результаты по сравнению с результатами других авторов, использующих различные модели взаимодействия электрона с атомом, лучше согласуются с экспериментальными данными.

#### **Литература**

1. В.Е. Голант, А.П. Жилинский, С.А. Сахаров Основы физики плазмы // Атомиздат – 1977. стр. 47 – 64.
2. Б.М. Смирнов Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме // Атомиздат – 1968. стр. 157 – 178.
3. Baimbetov F.B., Arkhipov Yu.V., Davletov A.E. Thermodynamics of partially ionized hydrogen plasmas: Pseudopotential approach in chemical models // Phys. Plasma 2005, v.5, p. 315-321.
4. Н. Мотт, Г. Месси Теория атомных столкновений // Издательство «МИР». – 1969. стр. 432 – 471.
5. А.С. Давыдов Квантовая механика // Издательство «Наука». – 1973. стр. 536 – 550.

### **КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ЭФФЕКТИЛЕРДІ ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП ЖАРТЫЛАЙ ИОНДАЛҒАН СУТЕГІ ПЛАЗМАСЫНДАҒЫ ИОНДАНУ ҚИМАСЫН ЕСЕПТЕУ**

**Ж.А. Кудышев**

Бұл жұмыста жартылай иондалған сутегі плазмасындағы иондану қимасы қарастырылған. Иондану қимасы корреляциялық эффектілерді ескеретін псевдопотенциалдың көмегімен есептелген. Алынған нәтижелер плазмадағы элементар процестерді дұрыс қарастыру үшін корреляциялық эффектілер маңызды екенін көрсетті.

### **IONIZATION CROSS SECTION CALCULATION OF PARTIALLY IONIZED HYDROGEN PLASMA WITH ACCOUNT OF CORRELATION EFFECTS**

**Zh.A. Kudyshev**

In represented work the electron impact ionization cross section is considered. The electron impact ionization cross section is calculated, based on pseudopotential model of interaction between partially ionized hydrogen plasma particles, which accounts correlation effects. Analysis of obtained results shows, that it is very important to account correlation effects, when the elementary processes are considered.