

ДИЭЛЕКТРОННАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ ЧЕРЕЗ ЗАПРЕЩЕННЫЕ УРОВНИ

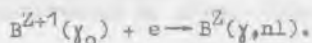
И. Л. Бейтман, Б. Н. Чичков

УДК 539.182

Рассмотрена диэлектронная рекомбинация через обычно не учитывавшиеся запрещенные уровни. Скорость процесса того же порядка величины, что и скорость фоторекомбинации. Учет этого процесса особенно важен в условиях разреженной плазмы с сравнительно низкой температурой и высокой степенью ионизации. Конкретные расчеты приведены для ОI.

На существенную роль диэлектронной рекомбинации в установлении ионизационного равновесия в разреженной горячей плазме впервые было указано в работе /1/.

Механизм диэлектронной рекомбинации состоит из нескольких этапов. На I этапе происходит резонансный захват налетающего электрона на один из высоких уровней ( $n1$ ) с одновременным возбуждением рекомбинирующего иона:



На II этапе происходит распад образовавшегося таким образом автоионизационного состояния ( $\gamma, n1$ ). Возможны следующие каналы распада: 1) автоионизация — возвращение электрона обратно в непрерывный спектр; 2) радиационный распад на нижележащий уровень.

Обычно принимают во внимание переходы типа  $\gamma, n1 \rightarrow \gamma_0, n1$ , соответствующие разрешенным переходам  $\gamma \rightarrow \gamma_0$  исходного иона. Как правило энергия  $B_{\gamma\gamma_0}$  довольно велика, что приводит к экспоненциальному уменьшению скорости диэлектронной рекомбинации при температурах, для которых наблюдается данный ион.

В настоящей работе мы рассмотрим переходы типа  $\gamma, n1 \rightarrow \gamma, n'1'$ , которые играют роль в том случае, когда переход  $\gamma \rightarrow \gamma_0$  запрещен. Поскольку энергия  $B_{\gamma\gamma_0}$  запрещенных переходов может быть

существенно меньше, чем разрешенных, то такой процесс (в дальнейшем его будем называть диэлектронной рекомбинацией через запрещенные уровни) будет играть роль при существенно меньших температурах, чем обычная диэлектронная рекомбинация через разрешенные уровни.

Выражение для скорости диэлектронной рекомбинации через наименьший запрещенный уровень совпадает с обычным выражением для скорости диэлектронной рекомбинации /1-3/

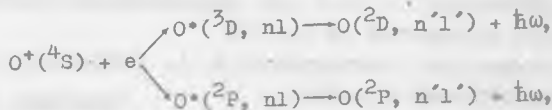
$$z(\gamma) = \sum_{n,l} S_{nl}^{-1} \frac{A(\gamma, nl)}{1 + A(\gamma, nl)/W(\gamma, nl)},$$

$$S_{nl} = \frac{2g(\gamma_0)}{g(\gamma, nl)} \left( \frac{mkt}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left[ (E_{\gamma_0} - E_{\gamma, nl})/kT \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  - наименьший возбужденный терм,  $S_{nl}$  - фактор, определяющий населенность уровней  $(\gamma, nl)$  по отношению к континууму,  $E(\gamma_0)$ ,  $g(\gamma, nl) = 2g(\gamma)(2l+1)$  - статистические веса состояний  $\gamma_0$  исходного иона  $V^{Z+1}$  и образовавшегося автоионизационного состояния  $(\gamma, nl)$  иона  $V^Z$ ,  $m$  и  $kT$  - масса и температура электронов,  $E_{\gamma_0}$  - энергия перехода  $\gamma \rightarrow \gamma_0$ ,  $E_{\gamma, nl}$  - энергия уровня  $(\gamma, nl)$ , отсчитанная от границы ионизации иона в состоянии  $(\gamma)$ :  $E_{\gamma} = E_{\gamma_0} + E_{\gamma\gamma_0}$  ( $E_{\gamma_0}$  - обычная энергия ионизации атома в основное состояние  $\gamma_0$ ). В формуле (1)  $w$  - полная вероятность автоионизационного распада,  $A = \sum_{n'l'} A(\gamma, nl \rightarrow \gamma, n'l')$  -

суммарная вероятность радиационного распада уровня  $(\gamma, nl)$  на все уровни  $(\gamma, n'l')$ , лежащие ниже границы ионизации  $V^Z$ . При достаточно больших  $n$   $A$  и  $w$  пропорциональны  $1/n^3$ , причем всегда  $A \ll w$ , поэтому отношением  $A/w$  в формуле (1) можно пренебречь.

В качестве иллюстрации рассмотрим диэлектронную рекомбинацию через запрещенные уровни для ионов кислорода  $OII$ . При малых энергиях рекомбинирующего электрона; кроме прямой фоторекомбинации возможны следующие процессы:

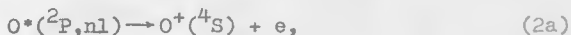


где состояния  $^2D, n'l'$  и  $^2P, n'l'$  включают в себя и случай эквива-

лентных электронов ( $2p^4 + 3p, 1D, 1S$ ).

В случае рекомбинации через уровень  $^2D$  ниже границы ионизации атома кислорода лежат уровни  $2p^4; 2p^3(2D)3s$ . Входящее в формулу (I) суммирование по переходам  $^2Dnd \rightarrow 2p^4$  ( $n \geq 3$ ),  $^2Dns \rightarrow 2p^4$  ( $n \geq 4$ ) и  $^2Dnp \rightarrow 2p^3(2D)3s$  ( $n \geq 3$ ) мы выполняли непосредственно, вычисляя вероятности переходов и учитывая, что при  $n \rightarrow \infty$  эти вероятности пропорциональны  $1/n^3$ . Необходимые силы осцилляторов вычислялись на ЭВМ по программе, описанной в /4/. Суммарный вклад всех переходов через уровень  $^2D$  представлен на рис. I.

При рассмотрении рекомбинации через уровень  $^2P$  надо принять во внимание следующие возможные механизмы распада для уровней, лежащих выше границы ионизации в  $^2D$ :



Поскольку в образовании состояния ( $^2P, n1$ ) участвует только процесс, обратный первому каналу, то вместо выражения (I) будем иметь:

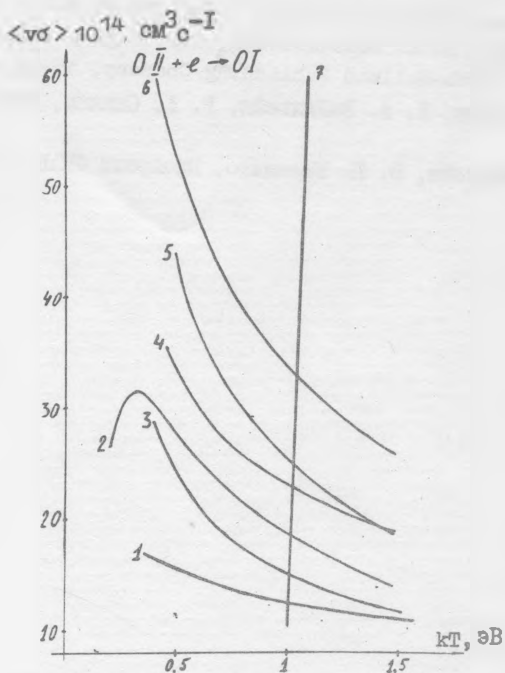
$$\begin{aligned} x(\gamma) = & \sum_{n,1} S_{n1}^{-1} \frac{A(\gamma, n1)}{1 + A(\gamma, n1)/W(a)} + \\ & + \sum_{n_1, l_1} S_{n_1, l_1}^{-1} \frac{A(\gamma, n_1, l_1)}{1 + A(\gamma, n_1, l_1)/W(a) + W(b)/W(a)}, \end{aligned}$$

где индексом I отмечены уровни  $(\gamma, n_1, l_1)$ , лежащие выше границы ионизации в  $^2D$ . Так как вероятность процесса (2a) много меньше вероятности процесса (2b), то второй суммой можно пренебречь. Для кислорода первая сумма по переходам сводится к одному члену  $2p^3(^2P)3s \rightarrow 2p^4$ . Вклад переходов через уровень  $^2P$  в общую скорость диэлектронной рекомбинации через запрещенные уровни представлен на рис. I.

Как видно из рис. I диэлектронная рекомбинация через запрещенные уровни существенно увеличивает скорость рекомбинации в области температур  $0,5 + I$  эВ, представляющих интерес для планетарных туманностей и зон НЛ.

Авторы выражают благодарность Л. А. Вайнштейну за полезные обсуждения и помощь в расчетах.

Поступила в редакцию  
28 февраля 1979 г.



Р и с. 1. Скорости рекомбинации ОI: 1 - скорость фоторекомбинации в состоянии  $2p, 3s, p, d, 4s, p, d$ , 2 - суммарная скорость диэлектронной рекомбинации через запрещенные уровни, 3 - скорость фоторекомбинации с учетом вклада верхних уровней по Крамерсу, 4 - полная скорость фоторекомбинации и скорость диэлектронной рекомбинации через  $2D$ , 5 - полная скорость фоторекомбинации и скорость диэлектронной рекомбинации через  $2P$ , 6 - суммарная скорость фоторекомбинации и диэлектронной рекомбинации через запрещенные уровни, 7 - диэлектронная рекомбинация через разрешенные уровни

## Л и т е р а т у р а

1. A. Burgess, *Astrophys. Journ.*, 139, 776 (1964).
2. P. G. Burke, B. L. Moiseiwitsch, *Atomic processes and applications*, North-Holland Publishing Company, 1976, p. 133.
3. И. Л. Бейтман, Л. А. Вайнштейн, Р. А. Сюняев, *УФН*, 95, 267 (1968).
4. Л. А. Вайнштейн, В. П. Шевелько, *Препринт ФИАН № 26*, 1974 г.