

О МЕХАНИЗМЕ ДВУХЭЛЕКТРОННОЙ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

*Н.Б.Делоне, Б.А.Зон, В.П.Крайнов,
М.А.Преображенский*

Предлагается механизм образования двухзарядных ионов, экспериментально наблюдавшихся при многофотонной ионизации ряда атомов [1]. Этот механизм основан на процессе диффузионной ионизации возбужденных атомов [2], реализующемся в данном случае в оптическом диапазоне частот.

Недавно было экспериментально обнаружено новое явление — образование двухзарядных ионов при многофотонной ионизации атомов стронция, самария, европия и бария [1]. Во всех указанных случаях двухзарядные ионы образовывались одновременно с однозарядными с вероятностью W , всего на один — два порядка величины меньшей. Степень нелинейности образования двухзарядных ионов $K_2^+ = \partial \lg W / \partial \lg \mathcal{E}^2$ во всех случаях была гораздо меньше числа квантов, поглощение которых необходимо для выполнения закона сохранения энергии, а в случае атома бария даже меньшей, чем степень нелинейности для однозарядных ионов. Оба экспериментальных факта — относительно очень большая вероятность образования двухзарядных ионов и небольшая степень нелинейности — не находят даже качественного объяснения в рамках теории возмущений. Однако экспериментальные факты можно объяснить, если предположить, что ионизация двухэлектронного связанного состояния происходит за счет диффузии электрона по квазиконтинууму высоковозбужденных уровней. Диффузионный механизм ионизации возбужденных атомов был обоснован в работе [2] и применен для описания результатов экспериментов по ионизации полем СВЧ диапазона частот [3]. Здесь мы покажем, что этот механизм может иметь место и в световом диапазоне частот.

Для реализации диффузионного механизма необходимо выполнение трех условий. Во-первых, напряженность поля должна быть достаточно велика для того, чтобы полностью снять вырождение. Во-вторых, необходимо, чтобы переход электрона из состояния с квантовым числом в непрерывный спектр носил многофотонный характер. В третьих, необходимо наличие независимого уширения, обуславливающего образование квазиконтинуума возбужденных уровней. Уширение, очевидно, должно превышать расстояние между возмущенными уровнями, т. е., иметь величину $\Delta\omega \gtrsim Z^2/R_{\text{уп}}^5$. Уширение может быть обусловлено конечной шириной спектра возбуждающего поля, столкновениями атомов и прочими причинами.

При выполнении указанных условий электрон переходит из состояния с главным квантовым числом n в непрерывный спектр за счет большого числа квантов однофотонного поглощения и испускания квантов в квазиконтинууме. Этот процесс описывается уравнением диффузии

[2], его вероятность пропорциональна первой степени интенсивности излучения.

Для интересующих нас атомов с двумя внешними электронами диффузионный механизм образования двухзарядных ионов в световом диапазоне частот реализуется для $n = 6$ при напряженности поля $\mathcal{E} = 5 \cdot 10^6$ В/см и $\Delta\omega \approx 10$ см⁻¹, т. е. в условиях, соответствующих эксперименту [1], в котором использовалось многомодовое лазерное излучение с шириной спектра $\Delta\omega = 14$ см⁻¹. Как показывает расчет, вероятность диффузионной ионизации при этом имеет величину $W_{nE} \sim 10^{15}$ сек⁻¹, т. е., за время длительности лазерного импульса ($\sim 10^{-8}$ сек) все возбужденные атомы ионизируются. Соответственно вероятность ионизации атома определяется вероятностью возбуждения резонансного состояния, что, тем самым, обуславливает малую степень нелинейности и большую вероятность образования двухзарядных ионов, наблюдаемую экспериментально.

Однозарядные ионы образуются за счет конкурирующего процесса одноэлектронной многофотонной ионизации, который может носить как прямой характер (для атомов стронция и европия), так и резонансный характер (для атома бария). Отметим, что при возникновении резонансов с достаточно высокими одноэлектронными состояниями, в том числе, и при $n = 6$, не выполняется условие многоквантовости, а потому диффузия не имеет места. Таким образом, процесс многофотонной одноэлектронной ионизации описывается в рамках теории возмущений [4].

Количественное описание экспериментальных данных на основе предложенной модели было проведено нами для атома бария. В этом случае для отрыва одного электрона необходимо поглотить $K_0^+ = 5$, а двух электронов — $K_0^{2+} = 13$ квантов излучения. Экспериментально наблюдаются степени нелинейности $K_3^+ = 4$ и $K_3^{2+} = 3$, а вероятности образования ионов Ba^+ и Ba^{2+} имеют один порядок величины при напряженности поля $\mathcal{E} \approx 7 \cdot 10^5$ В/см [1]. Из спектра атома бария видно, что имеет место четырехфотонный резонанс между основным состоянием и возбужденным двухэлектронным состоянием $5d6d$. Так как ширина возбужденного состояния определяется диффузионным механизмом ионизации, т. е., она $\sim \mathcal{E}^2$, то в соответствии с известной формулой, описывающей резонансный процесс ионизации [4], получаем, что $K_T^{2+} = 3$ в согласии с экспериментом. Для однозарядных ионов также имеет место четырехфотонный резонанс, причем однофотонный переход из резонансного состояния в непрерывный спектр происходит за атомные времена, а потому не влияет на полную вероятность. Вероятности образования однозарядных и двухзарядных ионов, практически определяемые процессом четырехфотонного возбуждения резонансных состояний, были рассчитаны по теории возмущений в приближении квантового дефекта. Они оказались равными при напряженности поля $\mathcal{E} \approx 5 \cdot 10^5$ В/см, что хорошо согласуется с данными эксперимента.

В заключение отметим, что утверждение о неприменимости модели диффузионной ионизации к высоковозбужденным состояниям, высказанное в работе [5], основано на недоразумении. Делая это утверждение, авторы работы [5] предполагали, что возбуждающее поле строго монохроматично. Однако в работе [2] в действительности предполагалось наличие сторонних возмущений, обуславливающих возникновение ква-

зиконтинуума. В частности, в экспериментах по ионизации высоковозбужденного водорода в поле СВЧ диапазона частот [3], которые обсуждались в работе [2], имеет место пролетное уширение атомных уровней при движении атома в поле стоячей волны СВЧ резонатора.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 июля 1979 г.
После переработки
8 августа 1979 г.

Литература

- [1] И.С.Алексахин, Н.Б.Делоне, И.П.Запесочный, В.В.Суран. ЖЭТФ, 76, 887, 1979.
 - [2] Н.Б.Делоне, Б.А.Зон, В.П.Крайнов. ЖЭТФ, 75, 445, 1978.
 - [3] J. Bayfield. Multiphoton Processes, N. Y., 1978, p. 121.
 - [4] Н.Б.Делоне, В.П.Крайнов. Атом в сильном световом поле, М., Атомиздат, 1978; Б.А.Зон, Н.Л.Манакон, Л.П.Рапопорт. Теория многофотонных процессов в атомах, М., Атомиздат, 1978.
 - [5] Б.И.Меерсон, Е.А.Окс, П.В.Сасоров. Письма в ЖЭТФ, 29, 79, 1979.
-