

Д.И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН–ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ**

Исследовано влияние электрон-электронного взаимодействия на вероятность двукратной туннельной ионизации отрицательного иона брома  $\text{Br}^-$  в поле интенсивного униполярного лазерного импульса, исключая эффект перерасcеяния. С помощью численного решения нестационарного уравнения Шредингера для двухэлектронного одномерного и двумерного иона брома в импульсах различной длительности исследованы возможность коллективного туннелирования двух электронов и применимость одноэлектронного приближения для описания двойной ионизации. Показано, что электрон-электронное взаимодействие подавляет канал коллективной ионизации, однако степень этого подавления уменьшается с увеличением размерности фазового пространства. Было также показано, что учет электронных корреляций в случае коротких лазерных импульсов ( $\sim 1-10$  фс) может на порядок уменьшить вероятность туннелирования второго электрона по сравнению со случаем независимого туннелирования невзаимодействующих электронов. Для более длинных импульсов ( $\sim 30$  фс) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

D. I. TYURIN, S. V. POPRUZHENKO

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **EFFECT OF ELECTRON–ELECTRON CORRELATIONS ON DOUBLE IONIZATION OF NEGATIVE IONS IN INTENSE LASER FIELDS**

We consider the influence of the electron-electron interaction on the probability of double tunnel ionization of negative bromine ion  $\text{Br}^-$  in the field of an intense ultrashort unipolar laser pulse when the effect of rescattering is eliminated. By solving numerically the time-dependent Schrödinger equation for two-electron one- and two-dimensional bromine ion in pulses of different duration we investigate a possible channel of two-electron collective tunneling and applicability of the single-electron approximation for description of double ionization. We show that the electron-electron repulsion suppresses the collective channel, however, this suppression weakens with increasing the phase space dimensionality. We also show that electron-electron correlations in the case of short laser pulses ( $\sim 1-10$  fs) can reduce the probability of tunneling of the second electron by an order of magnitude compared to the independent tunneling of non-interacting electrons. For longer pulses ( $\sim 30$  fs), the probabilities of double ionization calculated in the single-electron approximation and in the case of interacting electrons differ by less than 1%.

Электрон-электронное взаимодействие при многократной ионизации атомов и ионов может значительно влиять на механизм ионизации и приводить к эффектам, которые не описываются в приближении невзаимодействующих электронов. Наиболее сильным эффектом, связанным с электронными корреляциями, является перерасcеяние электрона на родительском ионе. В настоящее время установлено, что этот механизм вносит основной вклад в двойную ионизацию в линейно поляризованных лазерных полях [1]. Однако в циркулярно поляризованных или униполярных импульсах перерасcеяние подавлено, что дает возможность изучать другие, более слабые, корреляционные эффекты. Одним из таких эффектов, обсуждаемых в литературе, является коллективное туннелирование [2]. В работе [3] было показано, что если два электрона могут туннелировать вместе как единая квазичастица, то это должно качественно изменить импульсное распределение двукратных ионов (под двукратным ионом мы понимаем здесь атомную систему, потерявшую два электрона относительно своего исходного состояния: в случае отрицательно заряженных ионов двукратный ион будет иметь заряд  $+1$ ) по сравнению со случаем последовательной независимой ионизации.

В данной работе с помощью численного решения нестационарного двучастичного уравнения Шредингера мы изучаем возможность формирования такой квазичастицы в поле униполярного электромагнитного импульса. Анализ формул Переломова-Попова-Терентьева [4] для вероятности последовательной ионизации и их обобщения [2] на случай коллективной ионизации показал, что коллективный канал должен вносить наиболее сильный вклад при ионизации отрицательного иона брома. Однако численное решение нестационарного уравнения Шредингера демонстрирует, что электрон-электронное отталкивание существенно препятствует образованию квазичастицы из двух электронов, что подавляет коллективный канал ионизации. Сравнение эволюции волновой функции в случае ионизации одномерного и двумерного двухэлектронного иона брома показало, что с увеличением фазового пространства подавление канала коллективной ионизации уменьшается.

Кроме этого в работе обсуждается влияние электрон-электронного взаимодействия на применимость одноэлектронного приближения для описания последовательной ионизации. Численные расчеты показали, что в случае коротких лазерных импульсов длительностью  $1-10$  фс электронные корреляции могут на порядок уменьшать вероятность ионизации второго электрона по сравнению со случаем, когда туннелирование происходит независимо. Однако для более длинных импульсов ( $\sim 30$  фс) вероятности двойной ионизации в одноэлектронном приближении и в случае взаимодействующих электронов отличаются менее чем на 1%.

### *Список литературы*

1. Becker W. et al. // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 84. P. 1011.
2. Зон Б.А. // *ЖЭТФ.* 1999. Т. 116. С. 410.
3. Попруженко С.В., Ломоносова Т.А. // *Письма в ЖЭТФ.* Т. 113. С. 320.
4. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. // *ЖТЭФ.* 1966. Т. 50 С. 1393; Т. 51 С. 309.