

Д. И. ТЮРИН<sup>1</sup>, С. В. ПОПРУЖЕНКО<sup>1</sup>, В. В. СТРЕЛКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, Россия

## КОЛЛЕКТИВНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ДВОЙНОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМНЫХ СИСТЕМ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Предложена теория коллективного туннелирования в атомных системах под действием сильных ультракратких электромагнитных импульсов. С использованием квазиклассических методов и численного решения нестационарного уравнения Шредингера, продемонстрировано наличие коллективного канала коррелированной двойной ионизации в нейтральном атоме ксенона и отрицательном ионе брома. Развита теория учитывает эффект электрон-электронного отталкивания. Показано, что для совместного туннелирования двух электронов требуется движение электронной пары по криволинейной двумерной траектории. Импульсные распределения электронных пар в направлении, поперечном к поляризации поля, демонстрируют особенности, связанные с присутствием коллективного канала. Эти особенности в виде дополнительных локальных максимумов могут быть использованы для экспериментального поиска коллективного канала ионизации.

D. I. TYURIN<sup>1</sup>, S. V. POPRUZHENKO<sup>1</sup>, V.V. Strelkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## COLLECTIVE TUNNELING IN DOUBLE IONIZATION OF ATOMIC SYSTEMS SUBJECT TO ULTRASHORT ELECTROMAGNETIC PULSES

We present a theory of collective tunneling in atomic systems subject to strong electromagnetic pulses. Using analytical semi-classical methods and numerical solutions of the time-dependent Schrödinger equation, we demonstrate the collective channel of the nonsequential double ionization in the neutral xenon atom and in the negative bromine ion. The theory includes electron-electron repulsion, and it is shown that the simultaneous tunneling of two electrons requires the motion of the pair along a curved two-dimensional trajectory. We show that the momentum distributions of electron pairs contain clear signatures of the collective channel in the direction lateral to the polarization of the field. These signatures in form of additional local maxima can serve in an experimental search for the collective ionization channel.

В сильных низкочастотных лазерных полях наблюдается оптический туннельный эффект – однократная и многократная ионизация атомов за счет одновременного поглощения большого количества фотонов. Наиболее простой подход к описанию многократной ионизации основывается на модели последовательного независимого отделения электронов от их атомного остова. Однако, приближение последовательного туннелирования далеко не всегда адекватно даже на качественном уровне: электрон-электронное взаимодействие может значительно влиять на процесс многократной ионизации, полностью разрушая последовательный механизм. Одним из примеров коррелированного канала ионизации является перерассеяние электрона на родительском ионе, приводящее к ударной ионизации второго электрона. Этот механизм сейчас достаточно хорошо изучен теоретически и проверен в эксперименте [1]. Надежно установлено, что он дает доминирующий вклад в двойную ионизацию в линейно поляризованных полях.

Другие механизмы коррелированной ионизации, включая модель shake-off [2] и модель коллективного туннелирования [3,4], обсуждались теоретически, но пока не наблюдались в экспериментах. Основным препятствием для их поиска является сильное доминирование канала перерассеяния в линейно поляризованных полях, вклад которого заведомо превосходит возможный вклад альтернативных механизмов.

В данной работе мы исследуем коллективный канал ионизации в униполярном электромагнитном импульсе, в котором перерассеяние полностью подавлено. С помощью численного решения двухчастичного нестационарного уравнения Шредингера для одномерных (1D) и двумерных (2D) электронов показаны присутствие канала коллективного туннелирования в достаточно коротких импульсах (~1-10 фс), а также воспроизводимость предельного перехода к модели последовательной ионизации в случае длинных импульсов (~40 фс). Анализ эволюции волновой функции показывает, что коллективное туннелирование возможно вдоль специфической криволинейной двумерной траектории, предполагающей поперечное к поляризации поля разделение электронов. Это объясняет, почему коллективный канал отсутствовал в решении одномерного уравнения Шредингера, исследованного в работах [5,6].

В рамках квазиклассического приближения с экспоненциальной точностью вычислена скорость коллективного туннелирования с учетом электрон-электронного отталкивания. Показано, что развитая квазиклассическая модель воспроизводит положение наблюдаемых в численных расчетах вторичных пиков в поперечных импульсных распределениях электронной пары. Появление этих дополнительных максимумов является качественным свидетельством присутствия коллективного канала ионизации и могло бы быть положено в основу экспериментальных подходов к поиску коллективного туннелирования в атомных системах.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №25-22-00308.

*Список литературы*

1. Becker W. et al., Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1011.
2. L. Dimauro and P. Agostini, in Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, Vol. 35 (Elsevier, 1995) pp. 79–120.
3. Зон Б.А., ЖЭТФ. 1999. Т. 116. С. 410.
4. Popruzhenko and D. Tyurin, Bulletin of the Lebedev Physics Institute 50, S922 (2023).
5. U. Eichmann, M. D'orr, H. Maeda, W. Becker, and W. Sandner, Phys. Rev. Lett. 84, 3550 (2000).
6. M. Lein, E. K. Gross, and V. Engel, Phys. Rev. Lett. 85, 4707 (2000).