

ПЕРТУРБАТИВНАЯ ТЕОРИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ТРЁХФОТОННОЙ ДВОЙНОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

А.С. Четвёркина^{1,2}, Е.В. Грызлова¹, А.Н. Грум-Гржимайло¹,
С.И. Страхова¹, С.Н. Голованов²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

² Физический факультет

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

E-mail: asybit@yandex.ru

Нелинейные процессы, происходящие при взаимодействии лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с изолированными атомами представляют фундаментальный интерес для понимания физики взаимодействия сильных высокочастотных полей с различными квантовыми системами: молекулами, кластерами и твердым телом. Простейшие нелинейные процессы, такие как двух- и трёхфотонная ионизация атомов, привлекают повышенное внимание, так как являются основой для исследования механизмов нелинейного отклика атомов в интенсивных вакуумно-ультрафиолетовых (ВУФ) и рентгеновских полях.

В литературе обсуждаются два основных механизма двойной ионизации атомов несколькими фотонами в интенсивном высокочастотном поле. Если фотоны поглощаются одновременно коррелированной парой электронов, то ионизация называется прямой. Если поглощение первого фотона ведет к образованию однократно заряженного иона, в свою очередь ионизируемого еще одним или двумя фотонами, то ионизация называется последовательной.

Метод расчёта угловых распределений и корреляционных функций фотоэлектронов при последовательной двойной двухфотонной ионизации был предложен и апробирован нашей научной группой для атомов неона и аргона [1,2], с последующими расчетами для атомов ксенона и криптона [3], [4].

В данной работе исследуется процесс последовательной трёхфотонной двойной ионизации атомов инертных газов (Рис. 1). Вторая ступень процесса – двухфотонная ионизация иона - может протекать через возбуждение промежуточного дискретного состояния [5] (резонансно), через последовательное возбуждение дискретного и автоионизационного состояний [6] (дважды резонансно) или нерезонансно. Впервые процесс последовательной трёхфотонной двойной ионизации атомов наблюдался именно для резонансного случая [7], [8]. Мы применили метод, предложенный в [2] к описанию резонансного и дважды резонансного процессов [5,6].

Здесь мы рассматриваем процесс последовательной трёхфотонной двойной нерезонансной ионизации (ПТДНИ) атомов инертных газов. Такой процесс наблюдался экспериментально [7]. Для его теоретического описания

мы развиваем формализм на случай, когда двухфотонная ионизация выстроенного иона происходит нерезонансно.

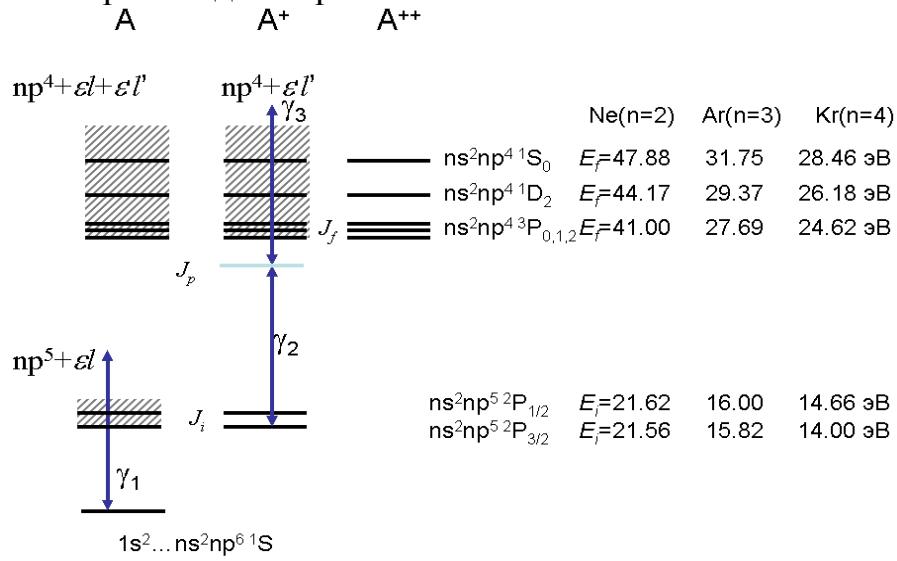


Рис. 1 Схема последовательной трехфотонной двойной ионизации для атомов инертных газов. Пороги однократной ионизации атомов отсчитываются от энергии основного состояния атома; пороги ионизации однократно заряженного иона отсчитываются от энергии основного состояния иона $^2P_{3/2}$.

Описание поляризации атомов, ионов, электронов и фотонов представлено в формализме статистических тензоров [9], связанных с элементами матрицы плотности:

$$\rho_{kq}(J; J') = \sum_{MM'} (-1)^{J'-M'} (JM, J'-M' | kq) \langle J' M' | \hat{\rho} | JM \rangle, \quad (1)$$

где введено стандартное обозначение $(JM, J'-M' | kq)$ для коэффициентов Клебша-Гордона. Ранг статистического тензора ограничен условием $k \leq J + J'$ и $|q| \leq k$.

Статистический тензор $\rho_{k_i q_i}(J_i; J'_i)$, описывающий поляризационное состояние системы после поглощения i -го фотона, определяется статистическими тензорами предшествующего этапа и фотона:

$$\rho_{k_i q_i}(J_i, J'_i) = (\pi \alpha \omega) \sum_{k_{i-1} q_{i-1} k_{\gamma_i}} \hat{k}_{i-1} \hat{k}_{\gamma_i} \rho_{k_{i-1} q_{i-1}}(J_{i-1}; J'_{i-1}) \rho_{k_{\gamma_i} 0}^{\gamma} \times \\ \times \begin{pmatrix} J_{i-1} & 1 & J_i \\ J'_{i-1} & 1 & J'_i \\ k_{i-1} & k_{\gamma_i} & k_i \end{pmatrix} \langle J_i \| \hat{D} \| J_{i-1} \rangle \langle J'_i \| \hat{D} \| J'_{i-1} \rangle, \quad (2)$$

где α – постоянная тонкой структуры, ω – энергия фотона (используется атомная система единиц). Ось квантования z зафиксирована вдоль направления вектора поляризации лазерного излучения.

В (2) входят суммы дипольных матричных элементов переходов через все стационарные состояния невозмущенного иона, включая состояния непрерывного спектра. Во втором порядке нестационарной теории возмущений амплитуда двухфотонного нерезонансного перехода, выраженная через матричные элементы, имеет следующий вид:

$$A_0 = \int d\varepsilon_2 \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\tau} d\tau' e^{i\varepsilon_3\tau} E(\tau) e^{-i\varepsilon_2(\tau-\tau')} E(\tau') e^{-i\varepsilon_1\tau'} \langle J_3 \| \hat{D} \| J_2 \rangle \langle J_2 \| \hat{D} \| J_1 \rangle, \quad (3)$$

где принято во внимание, что огибающая напряженности лазерного импульса $E(t)$ изменяется со временем; ε_1, J_1 , ε_2, J_2 и ε_3, J_3 - энергия и момент системы после первой ступени, промежуточного (виртуального) возбуждения и после второй ступени, соответственно. Если длительность импульса велика, то (3) стремится к известному стационарному выражению

$$\rightarrow \int \frac{\langle J_3 \| \hat{D} \| J_2 \rangle \langle J_2 \| \hat{D} \| J_1 \rangle}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \omega} d\varepsilon_2. \quad (4)$$

За основу расчёта интеграла по промежуточным состояниям атомного континуума мы берём метод, предложенный в [10]. Далее, используя значения амплитуд двухфотонных переходов A_0 , вычисляем угловые распределения фотоэлектронов (параметры анизотропии).

Данная работа предлагает метод теоретического описания спектров и угловых характеристик ПТДНИ атомов инертных газов. Мы рассчитываем, что дальнейшее развитие этого метода внесет вклад в понимание последовательной кратной ионизации атомов и позволит объяснить данные различных экспериментальных групп, использующих источники интенсивного высокочастотного излучения, таких как ЛСЭ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-6509.2012.2 и гранта РФФИ № 12-02-0112.

1. Е.В. Грызлова, А.Н. Грум-Гржимайло, Н. М. Кабачник и S. Fritzsche. Угловые распределения электронов в последовательной двойной двухфотонной ионизации атомов излучением лазера на свободных электронах. Вестник Ужгородского университета, 24:73–77, 2009.
2. S. Fritzsche, A.N. Grum-Grzhimailo, E.V. Gryzlova, and N.M. Kabachnik. Angular distributions and angular correlations in sequential two-photon double ionization of atoms. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 41:165601, 2008.
3. S. Fritzsche, A.N. Grum-Grzhimailo, E.V. Gryzlova, and N.M. Kabachnik. Sequential two-photon double ionization of Kr atoms. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 42:145602, 2009.
4. S. Fritzsche, A.N. Grum-Grzhimailo, E.V. Gryzlova, and N.M. Kabachnik. Sequential two-photon double ionization of the 4d shell in xenon. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 44:175602, 2011.
5. H. Fukuzawa, E.V. Gryzlova, K. Motomura, A. Yamada, K. Ueda, A.N. Grum-Grzhimailo, S.I. Strakhova, K. Nagaya, A. Sugishima, Y. Mizoguchi, H. Iwayama, M. Yao, N. Saito, P. Piseri, T. Mazza, M. Devetta, M. Coreno, M. Nagasono, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, H. Kimura, T. Togashi and Y. Senba. Photoelectron spectroscopy of sequential three-photon double ionization of Ar irradiated by EUV free-electron laser pulses. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 43, 111001 (2010).
6. E.V. Gryzlova, Ri Ma, H. Fukuzawa, K. Motomura, A. Yamada, K.Ueda, A.N. Grum-Grzhimailo, N.M. Kabachnik, A. Rouzée, A. Hundermark, M. Vrakking, P. Johnsson, K. Nagaya, S. Yase, Y. Mizoguchi, M. Yao, M. Nagasono, K. Tono, T. Togashi, Y.Senba, H. Ohashi, M. Yabashi, and T. Ishikawa. Doubly resonant three-

- photon double ionization of Ar atoms induced by an EUV free electron laser. *Phys. Rev. A*, 84, 063405, 2011.
7. M. Braune et al. XXV Int. conf. on photonic electronic and atomic collisions (Freiburg, Germany, 2007). Abstracts, p. Fr034 and private communications.
 8. M. Kurka et al. XI Int. conf. on multiphoton processes (Heidelberg, Germany, 2008). Abstracts, p. Fr23 and private communications.
 9. V.V. Balashov, A. N. Grum-Grzhimailo, N. M. Kabachnik. *Polarization and Correlation Phenomena in Atomic Collisions. A Practical Theory Course*, N.Y., 2000.
 10. Th. Mercouris, Y. Komninos, S. Dionissopolou and C. Nicolaides. Computation of strong-field multiphoton processes in polyelectronic atoms: State-specific method and applications to H and Li. *Phys. Rev. A* 50, 4109, 1994.