

# ГЕНЕРАЦИЯ АТТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. Стрелков

*теоретический отдел ИОФ РАН*

Начиная с появления лазеров развитие лазерной физики и нелинейной оптики было тесно связано с получением всё более коротких лазерных импульсов. На современных лазерных установках получены фемтосекундные импульсы с длительностью, сравнимой с периодом светового поля. Таким образом, дальнейшее укорочение световых импульсов с длиной волны, лежащей в видимом диапазоне, невозможно.

Наши исследования направлены на получение и применение аттосекундных (1 аттосекунда= $10^{-18}$  с) ультрафиолетовых и рентгеновских импульсов. Для ультрафиолетового и рентгеновского излучения упомянутое выше ограничение неактуально, т.к. период этого поля много короче, чем у видимого света. Примерно пять лет назад аттосекундные импульсы были впервые получены несколькими экспериментальными группами. На сегодня рекордные длительности аттосекундных импульсов составляют около 100 аттосекунд, их энергия очень мала (порядка десятков наноджоулей).

Механизм излучения аттосекундных импульсов связан с генерацией высоких гармоник лазерного поля: при взаимодействии интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с газообразной средой происходит генерация гармоник лазерного поля, т.е. когерентного излучения с частотой, кратной частоте лазера; максимальные номера гармоник составляют от нескольких десятков до нескольких сотен. Оказывается, что при определенных условиях фазы различных гармоник могут быть синхронизованы таким образом, что, складываясь, поля гармоник образуют цуг аттосекундных ультрафиолетовых импульсов. Нами была разработана аналитическая квантово-механическая теория генерации высоких гармоник интенсивного лазерного излучения атомами благородных газов в лазерном поле произвольной эллиптичности; затем эта теория была развита для описания генерации аттосекундных импульсов [1].

С точки зрения приложений особый интерес представляет получение не цуга, а *одиночного* аттосекундного импульса (аттоимпульса). В конце девяностых годов был

предложен способ генерации одиночного аттоимпульса в лазерном поле переменной во времени эллиптичности. Этот способ был недавно экспериментально реализован; теоретическая интерпретация экспериментальных результатов проводилась нами [3, 4, 7, 8, 14]. В частности, на основе нашей теории рассчитывались длительность получаемых импульсов, были предложены пути её сокращения. Кроме того, нами предложен новый путь получения одиночного аттосекундного импульса, использующий изменение условий фазового синхронизма при генерации УФ-излучения [15, 16]. Выполнение условий фазового синхронизма в момент излучения одиночного аттоимпульса обеспечивает относительно высокую эффективность генерации, т.е. получение аттоимпульса большой энергии (порядка микроджоулей).

Новый раздел атомной и молекулярной физики и химии, связанный с получением и применением аттосекундных импульсов, получил название аттофизики, или, шире, "аттонауки" (attoscience). В частности, применение аттоимпульсов открывает новую область метрологии – аттометрию, т.е. непосредственное измерение процессов, проходящих на атомарных временах (1 атомная единица времени составляет примерно 24 аттосекунды). Недавно возможности этой области были продемонстрированы в так называемой томографии атомного состояния: была экспериментально получена томограмма состояния электрона в молекуле водорода. Нами было показано, что разрешающая способность этой методики может быть существенно улучшена при использовании когерентных электронных волновых пакетов аттосекундной длительности [3]. Кроме того, с помощью теории [1] была показана возможность перестройки частоты гармоник для использования ГТВП в ВУФ спектроскопии со временным разрешением [9].

Для определения точности и пределов применимости нашей теории была разработана методика численного решения уравнения Шредингера для одноэлектронного атома, находящегося в лазерном поле. Было показано, что теория имеет очень хорошую точность при туннельном режиме ионизации [1] и удовлетворительную точность при надбарьерном режиме [6, 12]. Численно было исследовано влияние ионизованной среды, в которой находится генерирующий атом или ион, на ГТВП [2] и на генерацию аттосекундных импульсов [11, 13]. Результаты численного решения уравнения Шредингера были использованы при интерпретации

экспериментов по исследованию временной динамики ионизации в лазерной микроплазме [5].

### Список публикаций

1. "Theory of high-order harmonic generation and attosecond pulse emission by a low-frequency elliptically polarized laser field", V. V. Strelkov, *Phys. Rev. A* **74**, 013405 (2006).
2. "High-harmonic generation in a dense medium", V. V. Strelkov, V. T. Platonenko, and A. Becker, *Phys. Rev. A* **71**, 053808 (2005).
3. "Controlling attosecond electron dynamics by phase-stabilized polarization gating", I. J. Sola, E. Mevel, L. Elouga, E. Constant, V. Strelkov, L. Poletto, P. Villoresi, E. Benedetti, J.-P. Caumes, S. Stagira, C. Vozzi, G. Sansone and M. Nisoli, *Nature Physics* **2**, 281 (2006).
4. "Temporal and spectral studies of high-order harmonics generated by polarization-modulated infrared fields", I. J. Sola, A. Zaïr, R. López-Martens, P. Johnsson, K. Varjú, E. Cormier, J. Mauritsson, A. L'Huillier, V. Strelkov, E. Mével and E. Constant, *Phys. Rev. A* **74**, 013810 (2006).
5. "Фемтосекундная лазерная микроплазма оптического пробоя газов: динамика процессов ионизации и постиионизации", В.В. Букин, С.В. Гарнов, А.А. Малютин, В.В. Стрелков, *Квантовая электроника*, **37** N10, стр. 961 (2007).
6. "XUV generation with several-cycle laser pulse in barrier-suppression regime", V V Strelkov, A F Sterjantov, N Yu Shubin and V T Platonenko, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39**, 577 (2006).
7. "Single attosecond pulse production with an ellipticity-modulated driving IR pulse", V. Strelkov, A. Zair, O. Tcherbakoff, R. Lopez-Martens, E. Cormier, E. Mevel and E. Constant, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38**, L161–L167 (2005).
8. "Generation of attosecond pulses with ellipticity-modulated fundamental", V. Strelkov, A. Zaïr, O. Tcherbakoff, R. López-Martens, E. Cormier, E. Mével and E. Constant, *Appl. Phys. B*, **78**, 879–884 (2004)

9. "Tunable light sources based on high harmonics generation for time-resolved VUV spectroscopy", P. Martin, A. Belsky, E. Constant, E. Mevel, A. Philippov, V. Strelkov, *Appl. Phys. B*, **78**, 1005–1008 (2004)
10. "Sub 100 attosecond XUV pulses", E. Mevel, I. J. Sola, L. Elouga, E. Constant, V. Strelkov, L. Poletto, P. Villoresi, E. Benedetti, J.-P. Caumes, S. Stagira, C. Vozzi, G. Sansone and M. Nisoli, *Springer Series in Chemical Physics*, **88**, 5, (2007).
11. "High harmonic generation and attosecond pulse production in dense medium", V.V. Strelkov, V.T. Platonenko, A. Becker, *Proceedings of SPIE Vol. 5975, 59750A* (2006).
12. "Decrease of the high harmonic generation yield under barrier-suppression ionization", Platonenko V.T., Sterjantov A.F., Strelkov V.V., *Laser Physics*, 2003, **13**, Issue 4, pp 443-449.
13. "Generation of attosecond pulses in a dense medium", V. V. Strelkov, V. T. Platonenko, and A. Becker, *Laser Physics*, Vol. **15**, No. 6, 799 (2005).
14. "Attosecond Pulses Generation with an Ellipticity-Modulated Laser Pulse", V. Strelkov, A. Zair, O. Tcherbakoff, R. Lopez-Martens, E. Cormier, E. Mevel and E. Constant, *Laser Physics*, Vol. 15, No. 6, pp. 871–879 (2005).
15. "Generation of isolated attosecond pulses by spatial shaping of a femtosecond laser beam", V V Strelkov, E Mével and E Constant, *New Journal of Physics*, **10**, 083040 (18pp) (2008).
16. "Isolated attosecond pulse generated by spatial shaping of femtosecond laser beam", V V Strelkov, E Mével and E Constant, *European Physical Journal*, **175**, 15–20 (2009).