**Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с веществом**

Попруженко Сергей Васильевич

В работах по фотоионизации атомов и отрицательных ионов [1] дано теоретическое описание эффекта перерассеяния фотоэлектронов в сильном лазерном поле, возникающего вследствие взаимодействия в конечном состоянии с атомным остатком и приводящего к появлению в спектрах фотоионизации электронов с большими энергиями - вплоть до 10 средних колебательных энергий в поле лазерной волны, что составляет, при напряженности лазерного поля порядка внутриатомной, несколько килоэлектронвольт. Основной вклад в теорию эффекта перерассеяния, наблюдавшегося экспериментально с 1994 года [2], состоит в построении аналитической квазиклассической модели, позволившей исследовать зависимость выхода горячих фотоэлектронов от параметров поля и атома и провести количественное сравнение с экспериментальными данными, относящимися, в основном, к атомам благородных газов.

Выполнен цикл работ [3, 4] по проблеме вынужденной генерации высоких гармоник лазерного излучения, возникающей при взаимодействии интенсивного инфракрасного лазера с разреженной атомарной мишенью в присутствии слабой пробной волны на частоте высокой гармоники того же лазера. Задача о вынужденном излучении высоких гармоник в таких условиях поставлена и решена впервые. Обычно суммарный вклад вынужденных процессов в интенсивность излучения оказывается весьма малым в силу высокой степени компенсации процессов вынужденного излучения и поглощения, имеющей место в отсутствие инверсной заселенности в мишени. Различные механизмы разрушения равновесия между излучением и поглощением, основанные на использовании эффекта отдачи, применяются в лазерах на свободных электронах. В случае генерации гармоник в атомарных газах эффект отдачи слишком мал, чтобы его можно было использовать для заметного усиления волны.

В работах [3, 4] предложен принципиально новый механизм разрушения симметрии процессов "излучение-поглощение", основанный на использовании коротких когерентных импульсов накачки и пробной волны. Показано, что, будучи направленным в область взаимодействия с газом с небольшой (не превышающей длительности импульса) временной задержкой по отношению к импульсу накачки, пробный импульс попадает в условия, при которых процессы вынужденного излучения оказываются более вероятными, и поэтому должен усиливаться. Эффект усиления может быть значительным за счет фазового синхронизма атомарных излучателей, обеспечивающих квадратичную зависимость интенсивности волны от числа атомов в мишени, что обычно наблюдается при спонтанной генерации высоких гармоник.

На примере задачи о вынужденном релеевском рассеянии двух когерентных лазерных импульсов с близкими несущими частотами и неколлинеарными волновыми векторами [4] эффект вынужденного усиления за счет временной задержки рассмотрен в рамках безмодельного подхода. Такой механизм усиления не связан с созданием возбужденного состояния рабочей среды до прихода в нее пробного импульса и поэтому является, наряду с хорошо известным примером когерентно заселенной трехуровневой системы, одной из возможных реализацией усиления без инверсии.

Развита квазиклассическая теория двухэлектронной ионизации атомов благородных газов полем сильного линейно поляризованного лазерного излучения [5, 6]. Двухэлектронная ионизация атомов сильным лазерным полем наблюдается с середины 80-х годов. Тогда же стало ясно, что в значительном большинстве случаев, особенно в поле с линейной поляризацией, механизм высвобождения электронов из атома - некаскадный, то есть связан с присутствием электрон-электронного взаимодействия.

Достигнутый в последние годы на установках типа COLTRIM значительный прогресс в измерении импульсных спектров ионов [7] и электронных пар [8] стимулировал быстрое развитие теории некаскадной двойной ионизации атомов. Впервые исследован вопрос о влиянии механизма электрон-электронных корреляций на форму импульсного распределения пар в плоскости поляризации излучения, и показано, что экранировка кулоновского взаимодействия оказывается весьма существенной, особенно при не слишком высоких интенсивностях лазерного поля [6].

Обнаружено количественное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными и сформулирована программа дальнейших исследований в этом направлении. В частности, предсказан эффект резонансного увеличения вероятности двойной ионизации при прохождении границы континуума через порог n-фотонной однократной ионизации, являющийся следствием конструктивной интерференции многих фейнмановских траекторий, приводящих к переходу в одно и то же конечное состояние с двумя электронами в континууме [9].

В 2002 году начат цикл работ, посвященных исследованиям динамики и ионизации нанотел, облучаемых интенсивными лазерными импульсами. Взаимодействие мощных лазеров с наномишенями (тонкими пленками, атомарными, молекулярными и металлическими кластерами) является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений последнего десятилетия в физике сильных полей. Повышенный интерес к кластерам и нанопленкам связан с тем, что под воздействием интенсивного лазерного поля они становятся источниками ультрафиолетового и рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от 5 до 100, причем удельная интенсивность такого излучения, как и выход многозарядных ионов, существенно, на много порядков, превышает аналогичный показатель для газовых мишеней из атомов того же сорта.

На основе микроскопической модели взаимодействия кластеров с лазерным излучением, описывающей электронную подсистему в приближении несжимаемой неоднородной жидкости, впервые рассмотрена задача о возбуждении нелинейных колебаний в кластере, электронная подсистема которого нагрета до температур в сотни электронвольт, и, по существу, является классической [10]. Показано, что в условиях, характерных для современных экспериментов по взаимодействию кластеров с мощным лазерным излучением, оказывается возможным трехфотонное возбуждение поверхностного плазмона и, как следствие, возникновение сильного поля утроенной (по отношению к внешнему лазерному полю) частоты как внутри кластера, так и вне его.

Резонансное возбуждение третьей гармоники внутри кластера предложено в качестве одного из возможных механизмов, ответственных за аномально высокую эффективность образования многозарядных ионов и возбуждения многофотонных переходов в кластерах. Рассмотрен эффект рассеяния света на кластере с утроением частоты. Вычислено сечение рождения третьей гармоники лазерного излучения, дана оценка его величины и исследовано поведение в зависимости от параметров кластера и лазерного поля.

Генерация третьей гармоники лазерного излучения в кластерной мишени, возникающая за счет указанного механизма, обнаружена в эксперименте [11]. Исследованиями нелинейной динамики кластеров в интенсивном электромагнитном поле внесен существенный вклад в развитие нового научного направления - оптики горячих нанотел, не обладающих свойством квазиэлектронейтральности. В рамках этого направления рассмотрена задача о бесстолкновительном затухании плазменных колебаний (затухание Ландау) в невырожденной электронной наноплазме. На основе формализма флуктуационно-диссипативной теоремы получено общее выражение для декремента затухания плазменных колебаний функционально зависящего от формы самосогласованного потенциала в нанотеле произвольной размерности с невырожденной электронной подсистемой.

**Список литературы**

[1] С. П. Гореславский, С. В. Попруженко, ЖЭТФ 117 (2000), С. 895;

[2] G. G. Paulus J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys 27 (1994) L703;

[3] E. A. Nersesov, S. V. Popruzhenko, D. F. Zaretsky, P. Agostini, W. Becker, Phys. Rev. A 64 (2001) P. 023419;

[4] M. V. Fedorov, S. V. Popruzhenko, D. F. Zaretsky, W. Becker, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) P. 213001;

[5] S. V. Popruzhenko, S. P. Goreslavski, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys 34 (2001) L239;

[6] S. P. Goreslavski, S. V. Popruzhenko, R. Kopold, W. Becker, Phys. Rev. A 64 (2001) P. 053402;

S. V. Popruzhenko, S. P. Goreslavski, Optics Express 8 (2001) P. 395;

[7] Th. Weber et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) P. 443; R. Moshammer et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) P. 447;

[8] M. Weckenbrock et al., J.Phys. B: At. Mol. Opt. Phys 34 (2001) L449;

[9] S. V. Popruzhenko, Ph. A. Korneev, S. P. Goreslavski, W. Becker, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) P. 023001;

[10] S. V. Fomichev, S. V. Popruzhenko, D. F. Zaretsky, W. Becker, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys 36 (2003) P. 3817;

[11] G. Hays, in Book of Abstracts of International Workshop "Super-Intense Laser Atom Interactions - 2003", November 16-19, 2003, Southfork Ranch, Dallas, Texas, USA.