

На правах рукописи

И. Сиз

Семилетов Иван Мстиславович

**Влияние индуцированного
и постоянного дипольных моментов
на туннельную ионизацию
атомов и двухатомных молекул**

01.04.02 — Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Корнев Алексей Станиславович.

Официальные оппоненты: Астапенко Валерий Александрович, доктор
физико-математических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Московский физико-технический инсти-
тут (государственный университет)», кафедра
радиоэлектроники и прикладной информати-
ки, главный научный сотрудник.

Рябкин Михаил Юрьевич, кандидат физико-
математических наук, ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр Институт приклад-
ной физики Российской академии наук», от-
дел сверхбыстрых процессов, ведущий науч-
ный сотрудник.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государ-
ственный университет».

Защита состоится 1 июня 2017 г. в 15¹⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.038.06 при Воронежском государственном университете, 394018,
г. Воронеж, Университетская пл., д. 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Воро-
нежского государственного университета и на сайте вуза по адресу
<http://www.science.vsu.ru/disser>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дрождин С. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последнее время активно изучаются теоретически и экспериментально различные физические явления, происходящие в поле ультракоротких лазерных импульсов, в том числе и аттосекундного диапазона (см., напр., обзор [1], содержащий обширный список литературы). Эти исследования позволяют изучать динамику атомных и молекулярных электронов, а также динамику движения ядер в молекулах, что представляет несомненный интерес как для физики атомов и молекул, так и для химии простейших систем.

В частности, особенности туннельного эффекта в атомах в поле ультракороткого лазерного импульса исследовались в работе [2], где была обнаружена когерентность волновых функций основного и возбужденных состояний образуемого иона. Эта когерентность проявляется в том, что относительная фаза указанных волновых функций не является случайной величиной, равномерно распределенной на интервале $[0, 2\pi]$. Описание данного явления в работах [3–5] основано на численном решении временного уравнения Шредингера.

Помимо этих, достаточно тонких исследований, в последнее время с более высокой точностью (десятки процентов вместо сотен процентов) измерены абсолютные значения вероятности туннельного эффекта в атомах (см., напр., недавнюю публикацию [6]). Интерпретация всех этих экспериментальных данных также требует уточнения существующей теории.

Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с молекулами является предметом активных теоретических и экспериментальных исследований последних десятилетий [7–9]. По сравнению с атомами, в молекулах картина усложняется наличием колебательных и вращательных степеней свободы. Вместе с тем, открываются новые горизонты для изучения, например, процессов прохождения излучения через атмосферные газы (развитие искры) и лазерного разделения изотопов [10].

Однако существующая теория туннельной ионизации молекул не так подробно разработана по сравнению с теорией для атомов. Поэтому развитие этой теории представляется вполне актуальной задачей.

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы является теоретическое исследование влияния индуцированного и постоянного дипольных моментов на туннельную ионизацию атомов и двухатомных молекул лазерным излучением.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Уточнить существующую теорию туннельной ионизации атомов для случая лазерного импульса с малым числом осцилляций (ультракороткий импульс) с учетом влияния наведенного дипольного момента и возбуждения остаточного иона.
2. Исследовать возбуждение мультиплетной структуры иона, образуемого в результате туннельной ионизации атома, как за счет прямого воздействия лазерного излучения, так и вследствие перерассеяния фотоэлектрона на родительском ионе.
3. Сравнить полученные результаты с результатами расчетов *ab initio* для некоторых инертных атомов и на основе этого сравнения оценить границы применимости классических балансных уравнений в задаче о туннельной ионизации атомов ультракоротким лазерным импульсом.
4. Проанализировать роль постоянного дипольного момента в переменном поле в многофотонном и туннельном режимах ионизации полярных молекул лазерным излучением и исследовать влияние постоянного дипольного момента на ионизацию двухатомных молекул в туннельном режиме.

Научная новизна:

1. Теоретически исследовано возбуждение тонкой структуры мультиплета без изменения главного квантового числа посредством перерассеяния фотоэлектрона на родительском ионе в рамках «трехшагового сценария» без использования эмпирических формул.
2. Оценены границы применимости классических балансных уравнений при туннельной ионизации атомов.
3. Показано, что постоянный дипольный момент не влияет на ионизацию полярных молекул лазерным излучением в многофотонном режиме, но проявляется в туннельном режиме; количественно величина эффекта продемонстрирована на примере молекулы CO.

Практическая значимость работы. В диссертации предложены теоретические методы, позволяющие адекватно анализировать физические явления, возникающие при взаимодействии атомов и молекул с сильными лазерными полями, в том числе и ультракороткой длительности. Их практическая реализация не требует использования супер-ЭВМ.

Теория Келдыша, обобщенная на ультракороткие лазерные импульсы и учитывающая внутренние степени свободы, а также возмущение ионизуемых систем внешним полем, вполне удовлетворительно описывает процессы ионизации атомов и молекул лазерным излучением ближнего инфракрасного диапазона с интенсивностью $\sim 10^{14}$ Вт/см², характерной для современных источников. Отказ от приближения бесструктурного остова дает возможность учета многочисленных конкурирующих каналов ионизации. Разработанный относительно простой алгоритм позволяет вычислять выход атомных и молекулярных ионов в заданных состояниях в зависимости от параметров лазерного излучения. Результаты расчетов в рамках предложенной модели хорошо согласуются с результатами численного решения зависящего от времени уравнения для матрицы плотности в случае атомов неона и ксенона.

Результаты диссертации целесообразно использовать в научно-исследовательских организациях и центрах, занимающихся изучением взаимодействия сильного лазерного излучения с веществом: Институт общей физики РАН, Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Международный учебно-научный лазерный центр МГУ, НИЦ Курчатовский институт, Санкт-Петербургский государственный университет, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт прикладной физики РАН, Воронежский государственный университет.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теория туннельной ионизации атомов ультракоротким лазерным импульсом, учитывающая влияние наведенного дипольного момента и возбуждение остаточного иона.
2. Влияние перераспределения фотоэлектрона на заселенности мультиплетных состояний атомного иона.
3. Оценка границ применимости классических балансных уравнений в задаче туннельной ионизации атомов коротким лазерным импульсом.
4. Существенное влияние постоянного дипольного момента в туннельном режиме ионизации полярных молекул и пренебрежимо малое влияние в многофотонном режиме.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Научные сессии Воронежского государственного университета (2013–2016).
2. 22nd Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic, July 15–19, 2013.
3. XX Конференция по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-XX), Воронеж, 23–27 сентября 2013.

4. 24th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'15), Shanghai, China, August 21–25, 2015.
5. 25th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'16), Yerevan, Republic of Armenia, July 11–15, 2016.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в семи печатных работах. В их числе три статьи [A1–A3] в научных журналах, входящих в установленный ВАК РФ перечень ведущих изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций и четыре публикации в сборниках тезисов конференций [A4–A7].

Личный вклад автора. Большинство представленных в диссертации результатов численных расчетов получено лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад автора был существенным. Содержание диссертации отражает личный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, списка сокращений и условных обозначений, трех глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Общий объем диссертации 127 страниц, из них 97 страниц основного текста, включая 12 рисунков и шесть таблиц. Список сокращений и условных обозначений содержит четыре страницы, приложения — восемь страниц. Список литературы включает 145 наименований на 15 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1 является реферативной. В ней дается обзор основной литературы, посвященной теоретическому исследованию туннельной ионизации атомов и молекул лазерным излучением.

В **разделе 1.1** приведены основные результаты теории туннельной ионизации сложного атома постоянным полем с напряженностью F . В частности, в одноэлектронном приближении скорость туннельной ионизации электрона из потенциала с кулоновской асимптотикой дается формулой Смирнова–Чибисова [11], в которую входят такие параметры, как потенциал ионизации I_p , волновое число $\kappa = (2I_p)^{1/2}$, заряд остаточного иона Z , эффективное главное квантовое число $\nu = Z/\kappa$, квантовые числа l , m и безразмерная константа $C_{\nu l}$ асимптотического вида волновой функции активного электрона. Для линейных молекул данная теория может быть обобщена учетом аксиальной симметрии потенциала и несохранения квантового числа l .

В **разделе 1.2** изложены идеи адиабатического приближения Борна–Фока в медленно меняющемся с течением времени внешнем поле. Адиабатическое приближение является ключевым в данной диссертации.

Раздел 1.3 посвящен теории ионизации атома сильным электромагнитным монохроматическим полем (теории Келдыша [12]), которая пригодна и для туннельного режима ионизации, характерного для излучения современных мощных инфракрасных лазеров. Однако применимость теории Келдыша ограничена случаем короткодействующего потенциала.

Для потенциала с кулоновской асимптотикой в адиабатическом приближении можно получить усредненную по периоду скорость ионизации монохроматическим лазерным излучением с амплитудой \tilde{F} . Данное выражение называется формулой Переломова–Попова–Терентьева (ППТ) [13] или Аммосова–Делоне–Крайнова (АДК) [14]. Теория ППТ (АДК) обобщается на случай молекулярных орбиталей и называется МО-АДК [15].

В **разделе 1.4** говорится о современных модификациях ППТ (АДК, МО-АДК) для учета влияния внутренних степеней свободы (см., например,

работы [16, 17] и ссылки в них). Наиболее важными эффектами здесь являются возбуждение электронной конфигурации образованного иона (неупругое туннелирование), а также изменение колебательного квантового числа. Их учет осуществляется заменой в формулах ППТ (АДК, МО-АДК)

$$I_p \rightarrow I_{\text{exp}} + \Delta_e + E_f^{(v_f)} - E_f^{(0)} + E_i^{(0)} - E_i^{(v_i)}. \quad (1)$$

Здесь индекс i соответствует нейтральной молекуле, f — иону; I_{exp} — экспериментальное значение потенциала ионизации, Δ_e — энергия возбуждения электронов иона, $E^{(v)}$ — v -й колебательный уровень энергии.

Во **второй главе** модифицируется теория Келдыша для ионизации атома сверхкоротким лазерным импульсом. Полученные результаты сравниваются с результатами расчета ab initio [18]. Рассматривается линейно поляризованный импульс $F(t) = \tilde{F} \sin \omega t$, содержащий четыре осцилляции, с прямоугольной огибающей. Длина волны выбирается равной 800 нм.

В **разделе 2.1** модифицируется подход, обобщающий теорию Келдыша для короткого импульса, содержащего небольшое число осцилляций. Суть модификации состоит в том, что в формуле Смирнова–Чибисова выполняется замена $F \rightarrow |F(t)|$ (в соответствии с идеей адиабатического приближения), а также замена (1). В отличие от формулы ППТ (АДК) полученные скорости ионизации не усредняются по времени. Они используются в качестве кинетических коэффициентов в классических балансных уравнениях (**раздел 2.2**) для заселенностей различных состояний образованных ионов с учетом возможности возбуждения дублета ${}^2P_{3/2,1/2}$.

В **разделе 2.3** в адиабатическом приближении исследуется эволюция наведенного дипольного момента в нейтральном атоме инертного газа в лазерном импульсе с прямоугольной огибающей вдали от резонансных частот. На примере атома Хе демонстрируется установление динамического квадратичного эффекта Штарка за время, превышающее 4–5 периодов излучения.

В **разделах 2.4, 2.5** исследуется влияние наведенного дипольного момента на туннельную ионизацию атомов Ne и Хе вышеупомянутым импуль-

сом $F(t)$. Для этого в соответствии с идеей адиабатического приближения (см. раздел 1.2) к замене (1) добавляются слагаемые $\frac{1}{2} \alpha_{a00} F^2(t) + \frac{1}{24} \gamma_{a00} F^4(t)$, где α_{a00} и γ_{a00} — экспериментальные значения соответственно статических поляризуемости и гиперполяризуемости нейтральных атомов. Отмечается хорошее согласие с результатами *ab initio*, а также преждевременная ионизация в случае пренебрежения наведенным дипольным моментом.

В **разделе 2.6** развит метод учета влияния перерассеяния фотоэлектрона на возбуждение ионного дублета. За основу берется полуклассический метод, предложенный в [19] для исследования возбуждения He^+ . Учет перерассеяния приводит к незначительному сдвигу графиков в требуемом направлении, не устраняя полностью имеющиеся расхождения с результатами расчета *ab initio*. Делается вывод об ограниченности применимости метода классических балансных уравнений для сверхкороткого лазерного импульса (менее 4–5 периодов), когда важна интерференция вкладов соседних полупериодов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию влияния постоянного дипольного момента на туннельную ионизацию двухатомных полярных молекул лазерным излучением.

В **разделе 3.1** рассматриваются различные типы дипольного момента в молекулах. Во-первых, наведенный внешним полем дипольный момент обуславливает квадратичный эффект Штарка в постоянном и монохроматическом полях. Во-вторых, наведенный дипольный момент приводит к изменению колебательных параметров молекулы под воздействием внешнего поля [20]. В-третьих, дипольный момент остова нейтральной молекулы p_c существенно влияет на величину констант в асимптотическом выражении для волновой функции активного электрона. В-четвертых, постоянный дипольный момент нейтральной молекулы p_{mol} и ее иона p_{ion} определяют линейный штарковский сдвиг энергии в постоянном внешнем электрическом поле. Обсуждается эффект Штарка в переменном поле на основе работы [21].

В разделе 3.2 качественно анализируется роль постоянного дипольного момента в процессе ионизации молекулы лазерным полем. Важная роль постоянного дипольного момента в ионизации постоянным полем показана в работе [22]. Однако вероятность туннельной ионизации молекул HF, HCl лазерным полем оказывается мало чувствительной к величине постоянного дипольного момента ввиду специфической симметрии π -орбиталей (см. [23]). Поэтому необходима количественная проверка гипотезы о роли постоянного дипольного момента для полярной молекулы с высшей занятой σ -орбиталью.

В разделе 3.3 излагается метод практического получения констант в асимптотическом виде волновой функции высшей занятой орбитали полярной молекулы. Стабильность констант в 4–5 значащих цифрах достигается на расстояниях 15–20 боровских радиусов от центра заряда ядер.

В разделе 3.4 в приближении Борна–Оппенгеймера выводятся общие формулы для вероятности туннельной ионизации полярной молекулы постоянным и монохроматическим полями с учетом перечисленных в разделе 1.4 структурных эффектов и влияния перечисленных в разделе 3.1 дипольных моментов. В этом случае к выражению для потенциала ионизации (1) в соответствии с идеей адиабатического приближения добавляются слагаемые

$$(\mathbf{p}_{\text{mol}} - \mathbf{p}_{\text{ion}})\mathbf{F}(t) + \frac{1}{2}\mathbf{F}^T(t)(\boldsymbol{\alpha}_{\text{mol}} - \boldsymbol{\alpha}_{\text{ion}})\mathbf{F}(t).$$

Здесь $\boldsymbol{\alpha}_{\text{mol(ion)}}$ — тензор дипольной поляризуемости нейтральной молекулы (или ее иона), $\mathbf{F}(t) = F(t)\mathbf{e}_z$, \mathbf{e}_z — вектор направления постоянного поля $F(t) = F$ либо вектор поляризации излучения $F(t) = \tilde{F} \sin \omega t$.

Разделы 3.5, 3.6 посвящены исследованию роли постоянного дипольного момента в туннельной ионизации полярной молекулы CO с высшей занятой σ -орбиталью с использованием формул, полученных в разделе 3.4.

Вычисляется вероятность ионизации молекулы с учетом и без учета постоянного дипольного момента. Для постоянного поля отличие результатов достигает одного порядка. Для монохроматического излучения усреднение скорости ионизации по периоду приводит к аналогичному результату.

Усреднение по углам случайной ориентации молекул приводит к отличию в ~ 3.5 раза. В более реалистичном случае ионизации лазерным импульсом с длительностью 100 фс в сфокусированном пучке учет влияния постоянных дипольных моментов изменяет выход ионов также в ~ 3.5 раза.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **приложениях** приведены промежуточные вычисления.

Основные результаты и выводы диссертации

1. На основе адиабатического приближения учтено влияние наведенного дипольного момента в атоме на туннельную ионизацию. Показано, что для расчета заселенностей мультиплетных состояний атомного иона, помимо его возбуждения, необходимо также учитывать влияние наведенного дипольного момента. Получено хорошее согласие с результатами численного расчета *ab initio*.
2. Развита метод учета влияния перерассеяния фотоэлектрона на атомном ионе, основанный на классической модели трехшагового сценария, в котором вместо эмпирических формул используются сечения рассеяния фотоэлектрона на ионе, рассчитанные методом сильной связи каналов. С помощью данного метода исследовано влияние перерассеяния на возбуждение иона без изменения главных квантовых чисел. Выявлена высокая чувствительность метода к выбору эмпирической модели рассеяния. Показано, что для рассматриваемых атомов и параметров лазерного излучения учет перерассеяния не приводит к заметному изменению заселенностей мультиплетных состояний в результате ионизации. Тем самым оценены границы применимости классических балансных уравнений в задаче об ионизации атома ультракоротким лазерным импульсом: импульс должен содержать не менее четырех–пяти осцилляций.
3. Показано, что влияние постоянного дипольного момента в поле лазер-

ного излучения не проявляется в многофотонном режиме ионизации полярных молекул, но существенно в туннельном режиме. Продемонстрировано, что влияние постоянного дипольного момента на туннельную ионизацию остается существенным и после усреднения скорости ионизации по случайным ориентациям молекул.

Список публикаций

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

- A1. Kornev, A. S. Keldysh theory in a few-cycle laser pulse, inelastic tunneling and Stark shift: comparison with *ab initio* calculation / A. S. Kornev, I. M. Semiletov, B. A. Zon // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. — 2014. — Vol. 47. — P. 204026 (7 pp.).
- A2. Корнев, А. С. Возбуждение дублетных термов при ионизации атомов благородных газов коротким лазерным импульсом / А. С. Корнев, И. М. Семилетов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. — 2015. — № 2. — С. 26–39.
- A3. Kornev, A. S. The influence of a permanent dipole moment on the tunnelling ionization of a CO molecule / A. S. Kornev, I. M. Semiletov, B. A. Zon // Laser Phys. — 2016. — Vol. 26. — P. 055302 (8 pp.).

Другие статьи и материалы конференций

- A4. Kornev, A. S. Keldysh Theory of Tunnel Ionization of a Complex Atom by a Few-Cycle Laser Pulse / A. S. Kornev, I. M. Semiletov, B. A. Zon // Book of Abstracts of the 22nd Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic, July 15–19, 2013. — P. 73 (1 p.).
- A5. Зон, Б. А. Теория Келдыша для туннельной ионизации атома малопериодным лазерным импульсом / Б. А. Зон, А. С. Корнев, И. М. Семилетов // Сборник тезисов докладов XX конференции по фундаментальной

атомной спектроскопии (ФАС-XX), Воронеж, 23–27 сентября 2013. — С. 243–244.

- A6. Kornev, A. S. Many-Body Theory of Tunneling Ionization of a Complex Atom by a Few-Cycle Laser Pulse / A. S. Kornev, I. M. Semiletov, B. A. Zon // Book of Abstracts of the 24th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'15), Shanghai, China, August 21–25, 2015. — P. P.S2.9 (1 p.). — Номер страницы указан для доступа по эл. адресу <http://www.lasphys.com/workshops/lasphys15/program-poster-session>.
- A7. Kornev, A. S. Influence of Permanent Dipole Moment on Tunnelling Ionization of a CO Molecule / A. S. Kornev, I. M. Semiletov, B. A. Zon // Book of Abstracts of the 25th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'16), Yerevan, Republic of Armenia, July 11–15, 2016. — P. S2.3.2 (1 p.). — Номер страницы указан для доступа по эл. адресу <http://www.lasphys.com/workshops/lasphys16/program-seminar-2>.

Список цитированной литературы

1. Krausz, F. Attosecond physics / F. Krausz, M. Ivanov // *Rev. Mod. Phys.* — 2009. — Vol. 81. — P. 163–234.
2. Goulielmakis, E. Real-time observation of valence electron motion / E. Goulielmakis [et al.] // *Nature*. — 2010. — Vol. 466. — P. 739–743.
3. Greenman, L. Implementation of the time-dependent configuration-interaction singles method for atomic strong-field processes / L. Greenman [et al.] // *Phys. Rev. A*. — 2010. — Vol. 82. — P. 023406 (12 pp.).
4. Santra, R. Theory of attosecond transient absorption spectroscopy of strong-field-generated ions / R. Santra [et al.] // *Phys. Rev. A*. — 2011. — Vol. 83. — P. 033405 (9 pp.).
5. Pabst, S. Decoherence in Attosecond Photoionization / S. Pabst [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Vol. 106. — P. 053003 (4 pp.).

6. Albeck, Y. Intense field double detachment of atomic versus molecular anions / Y. Albeck [et al.] // *Phys. Rev. A.* — 2015. — Vol. 92. — P. 061401(R) (6 pp.).
7. Bandrauk, A. D. *Molecules in laser fields* / ed. by A. D. Bandrauk. — New York : M. Dekker, 1994. — 446 p.
8. Becker, W. Theories of photoelectron correlation in laser-driven multiple atomic ionization / W. Becker [et al.] // *Rev. Mod. Phys.* — 2012. — Vol. 84. — P. 1011–1044.
9. Di Piazza, A. Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems / A. Di Piazza [et al.] // *Rev. Mod. Phys.* — 2012. — Vol. 84. — P. 1177–1228.
10. Akagi, H. Isotope-selective ionization utilizing molecular alignment and non-resonant multiphoton ionization / H. Akagi [et al.] // *Appl. Phys. B.* — 2012. — Vol. 109. — P. 75–80.
11. Смирнов, Б. М. Разрушение атомных частиц электрическим полем и электронным ударом / Б. М. Смирнов, М. И. Чибисов // *ЖЭТФ.* — 1965. — Т. 49, вып. 3. — С. 841–856.
12. Келдыш, Л. В. Ионизация в поле сильной электромагнитной волны / Л. В. Келдыш // *ЖЭТФ.* — 1964. — Т. 47, вып. 5. — С. 1945–1957.
13. Переломов, А. М. Ионизация атомов в переменном электрическом поле / А. М. Переломов, В. С. Попов, М. В. Терентьев // *ЖЭТФ.* — 1966. — Т. 50, вып. 5. — С. 1393–1409.
14. Аммосов, М. В. Туннельная ионизация сложных атомов и атомарных ионов в переменном электромагнитном поле / М. В. Аммосов, Н. Б. Делоне, В. П. Крайнов // *ЖЭТФ.* — 1986. — Т. 91, вып. 6. — С. 2008–2013.
15. Tong, X. M. Theory of molecular tunneling ionization / X. M. Tong, Z. X. Zhao, C. D. Lin // *Phys. Rev. A.* — 2002. — Vol. 66. — P. 033402 (11 pp.).
16. Kornev, A. S. Anti-Stokes-enhanced tunneling ionization of molecules /

- A. S. Kornev, B. A. Zon // *Phys. Rev. A.* — 2012. — Vol. 86. — P. 043401 (9 pp.).
17. Kornev, A. S. Relativistic effects in the many-body theory of extreme multiplicity ion formation in superstrong laser fields / A. S. Kornev, E. B. Tulenko, B. A. Zon // *Laser Phys. Lett.* — 2013. — Vol. 10. — P. 085301 (4 pp.).
 18. Rohringer, N. Multichannel coherence in strong-field ionization / N. Rohringer, R. Santra // *Phys. Rev. A.* — 2009. — Vol. 79. — P. 053402 (10 pp.).
 19. Yudin, G. L. Physics of correlated double ionization of atoms in intense laser fields: Quasistatic tunneling limit / G. L. Yudin, M. Yu. Ivanov // *Phys. Rev. A.* — 2001. — Vol. 63. — P. 033404 (14 pp.).
 20. Zon, B. A. Born-Oppenheimer approximation for molecules in a strong light field / B. A. Zon // *Chem. Phys. Lett.* — 1996. — Vol. 262. — P. 744–746.
 21. Зон, Б. А. Квазиэнергетические спектры дипольной молекулы и атома водорода / Б. А. Зон, Е. И. Шолохов // *ЖЭТФ.* — 1976. — Т. 70, вып. 3. — С. 887–898.
 22. Tolstikhin, O. I. Theory of tunneling ionization of molecules: Weak-field asymptotics including dipole effects / O. I. Tolstikhin, T. Morishita, L. B. Madsen // *Phys. Rev. A.* — 2011. — Vol. 84. — P. 053423 (17 pp.).
 23. Kornev, A. S. Anti-Stokes-enhanced tunnelling ionization of polar molecules / A. S. Kornev, B. A. Zon // *Laser Phys.* — 2014. — Vol. 24. — P. 115302 (11 pp.).