

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Скобелева Сергея Александровича
«САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ
ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Значительный прогресс в лазерной физике связан с исследованием сверхкоротких оптических импульсов с длительностями в несколько периодов и многочисленных приложений в различных областях физики, а также в других разделах современной науки и техники. При получении сверхкоротких, в том числе предельно коротких импульсов увеличивается мощность в импульсе, приближаясь в настоящее время к петоваттному уровню с длительностями из аттосекундного диапазона. В результате возникает уникальное состояние вещества в виде полностью ионизированной плазмы, взаимодействующей с мощным лазерным излучением. Следует отметить, что излучение петаваттной мощности интересно само по себе, поскольку в этом состоянии становится возможным рождение электронно-позитронных пар и соответственно появление новой - электронно-позитронной плазмы, что весьма интересно с точки зрения различных астрофизических приложений. С другой стороны, как известно, взаимодействие мощного излучения с плазмой открывает новые возможности для ускорительной техники для создания высокоточных источников электронов и протонов за счет формирования кильватерной волны. При меньших мощностях и соответственно длительностях необходимость получения сверхкоротких импульсов связана также с многочисленными приложениями, например, для оптоволоконных линий связи, химии и медицины. Речь идет об источниках в широком диапазоне от УФ до ИК при достаточно умеренных энергиях в импульсе.

Стандартный способ получения сверхкоротких импульсов основан на использовании линейных механизмов за счет формирования фазовых модуляций (чирпованных импульсов). Другой метод получения сверхкоротких импульсов базируется на использовании различных нелинейно-оптических механизмов. Эти механизмы существенно различаются в зависимости от мощности оптического поля, длительности импульсов и их частотного спектра. Данная диссертация посвящена исследованию формирования сверхкоротких импульсов на основе нелинейных механизмов в широком диапазоне мощностей, начиная с 100 мегаватт вплоть до петаваттного уровня. Для небольших мощностей порядка нескольких гигаватт главным нелинейным механизмом является керровская нелинейность, далее становятся существенно взаимодействие филаментационного характера, при дальнейшем увеличении мощности в пределах сотен гигаватт в игру вступают ионизационные нелинейности, а при больших – нелинейные взаимодействия с плазменными волнами. Наконец, при мощностях петаваттного уровня одним из главных механизмов формирования импульсов аттосекундной длительности является нелинейное взаимодействие с кильватерной волной релятивистского характера. В данной диссертации автора представлены результаты теоретических исследований, численного моделирования, а также экспериментальных работ, что является уникальным сочетанием, по крайней мере, для современной российской физики. Следует отметить, что на протяжении последних десятилетий один из главных способов описания оптических импульсов был основан на уравнениях для огибающих, которые справедливы для волновых пакетов с большим числом осцилляций. Переход к длительностям в несколько периодов существенно меняет способ описания таких импульсов, меняются также привычные механизмы их нелинейного поведения. Автором диссертации развит подход, во многом пионерский, для описания импульсов солитонного типа в области прозрачности при учете керровской нелинейности с помощью универсальных уравнений

типа КП, на основе безотражательного распространения волнового пакета. Универсальными оказываются и найденные одномерные солитонные решения, включающие в себя в одном пределе солитоны огибающих, а в другом сверхкороткие импульсы с конечным числом периодов поля. В численных экспериментах эти солитоны демонстрируют упругое взаимодействие, что типично для интегрируемых уравнений. Другой оригинальный результат диссертации связан с теоретическим предсказанием формирования ударных фронтов для локализованных трехмерных импульсов за счет керровской нелинейности, предшествующего возникновению фокуса благодаря самофокусировке. Важным результатом диссертации, основанном на численном моделировании и эксперименте в диэлектрическом капилляре, является выяснение роли ионизационно-индуцированной нелинейности при компрессии импульса до фемтосекундных длительностей при формировании плазменного канала. Заслуживают особого внимания результаты автора по изучению механизмов формирования предельно коротких импульсов при обратном рамановском рассеянии и сверхкороткого релятивистски сильного лазерного импульса за счет возбуждения кильваторной плазменной волны.

Актуальность диссертации С.А. Скобелева не вызывает никаких сомнений. Автором предложены новые способы формирования оптических импульсов с длительностью, соизмеримой с периодом поля, в широком диапазоне энергии от нДж до кДж, на основе нелинейных механизмов компрессии.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, заключения и списка литературы из 267 наименований. Общий объем диссертации 479 страниц.

Во Введении изложены цель данной диссертации, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, кратко перечислены ее основные результаты, а также подчеркнута актуальность диссертации.

Первая глава представляет собой одну из центральных в диссертации. Во-первых, в этой главе дан вывод универсального уравнения для описания однонаправленного распространения оптических импульсов с произвольным числом колебаний поля в среде с керровской нелинейностью в достаточно широкой области прозрачности, когда дисперсия имеет универсальное поведение: диэлектрическая проницаемость при малых частотах имеет «плазменное поведение» (аномальная дисперсия), а при больших имеет квадратичный рост (нормальная дисперсия). В отличие от соответствующего уравнения для огибающих – нелинейного уравнения Шредингера, в этом уравнении керровская нелинейность выступает в качестве гидродинамической, ответственной за опрокидывание и формирование ударных волн. В отсутствие высокочастотной дисперсии это уравнение (для линейной поляризации) на Западе получило название Short Pulse Equation (SPE) после работы 2004 Schafer и Wayne, т.е. годом позднее работ Карташева, Кима и Скобелева, в которых получено более полное уравнение с учетом высокочастотной дисперсии и произвольной поляризации электромагнитной волны. Интерес к SPE связан с тем, что оно допускает интегрирование с помощью метода обратной задачи рассеяния, что было продемонстрировано Сахновичами в 2005-2006 гг. В уже упомянутых работах 2003 года был найден новый класс одномерных солитонных решений для циркулярно поляризованного излучения с произвольным числом колебаний поля. Эти решения для длинных импульсов с большим числом осцилляций приближаются к солитонам огибающих НУШ. Наиболее интересной особенностью этого класса решений связано с существованием предельного оптического импульса с двумя-тремя колебаниями поля в виде видеоимпульса с максимально допустимой энергией. Такое же поведение демонстрируют солитоны SPE. В этой главе продемонстрировано численно, что рассеяние циркулярно поляризованных солитонов можно считать упругим. Численно выяснено также, что в случае эллиптической поляризации солитоны оказываются структурно

устойчивыми. Все это свидетельствует в пользу интегрируемости модели в случае произвольной поляризации. Следует отметить также, что, как и для НУШ, для импульсов в рамках этой системы возможна самокомпрессия на небольших дистанциях. При больших длинах распространения импульс разбивается на солитоны.

Во второй главе рассматривается вопрос относительно структурных особенностях самофокусировки лазерных импульсов произвольной длительности. Приводятся как аналитические, так и численные результаты для трехмерной модели, которая получается из одномерной, полученной в первой главе, с учетом дифракции. Такая модель подобна уравнению Кадомцева-Первиашвили для волн звукового типа со слабой дисперсией или уравнению Хохлова-Заболоцкой при учете затухания вязкого типа. В начале этой главы на основе критерия, подобного критерию Власова-Петрищева-Таланова для НУШ, показано, что в области аномальной (плазменной) дисперсии для линейной дисперсии самофокусировка (в поперечном направлении) имеет место для распределений с отрицательным гамильтонианом. Этот критерий, однако, являясь достаточным, не дает ответ относительно вида особенности. В этой главе предъявлены аргументы, основанные на использовании линзового преобразования, показывающие, что при приближении к особенности дисперсионные эффекты ослабевают и существенную роль начинает играть нелинейная дисперсия (зависимость групповой скорости от амплитуды поля). В результате оказывается, что самофокусировка волнового поля сопровождается опрокидыванием продольного профиля импульса и происходит формирование особенности нового типа, в которой на фоне неограниченного роста поля за счет самофокусировки происходит градиентная катастрофа. При этом сам импульс на оси укорачивается, а его частотный спектр соответственно сильно уширяется. Численное моделирование подтверждает, что самофокусировка сверхкоротких импульсов сопровождается укрупнением продольного распределения и формированием ударных фронтов. Это приводит к аномальному уширению спектра излучения, спадающего при больших частотах степенным образом, что свидетельствует о формировании структуры в виде ударной волны. Результаты этой главы являются одним из главных достижений этой диссертации.

В третьей главе продолжено исследование самофокусировки сверхкоротких импульсов с точки зрения самокомпрессии лазерных импульсов в области плазменной дисперсии. Показано, что динамика лазерных импульсов является сильно анизотропной: длительность импульса вдоль трассы распространения сужается сильнее, чем в поперечном направлении. При этом самофокусировка является главной причиной уменьшения продольного размера (адиабатически) волнового пакета вплоть до длительности, соизмеримой с периодом колебаний поля. В этом режиме сильно вытянутое распределение волнового пакета сохраняется на всех стадиях эволюции системы. Этот результат получен на основе вариационного подхода и подтвержден численными расчетами. При дальнейшем сжатии керровская нелинейность уже выступает в качестве гидродинамической, что приводит к формированию ударного профиля на оси импульса. При этом аномальное уширение спектра излучения, спадающего по степенному закону, приводит, благодаря формированию вблизи заднего фронта сужающейся области, к существенному сжатию импульсов. Предлагается использовать этот механизм для получения импульсов с аттосекундной длительностью.

В четвертой главе рассмотрены вопросы об одновременном влиянии керровской и ионизационной нелинейностей на самокомпрессию лазерных импульсах в газах. Речь идет о сжатии фемтосекундных импульсов в смеси двух газов с заметно отличающимися потенциалами ионизации. Благодаря этой разнице можно контролировать влияние обеих нелинейностей, когда газ с более высоким потенциалом и большей плотностью обеспечивает керровскую нелинейность, что приводит в условиях волноводной дисперсии к образованию солитона, а второй сорт газа с меньшим потенциалом ионизации ответствен за ионизационную нелинейность, приводящая к повышению

частоты, и соответственно, к уменьшению длительности солитонного импульса. Основная модель, используемая в этой главе, учитывает однонаправленность распространения импульса в предположении о плазменной дисперсии, обеспечиваемой газовой компонентой с большим потенциалом или за счет «геометрической» дисперсии, если речь идет о волноводе, и ионизацию второй газовой компоненты с меньшим потенциалом ионизации. Численно и аналитически продемонстрировано, что на второй стадии процесс компрессии сопровождается существенным уширением спектра при сохранении однопериодичности солитона. Данный механизм может быть использован для получения лазерных импульсов с длительностью в несколько сотен аттосекунд в ультрафиолетовой области с эффективностью в десятки процентов. К недостаткам этой главы следует отнести отсутствие критериев применимости при выводе уравнения для огибающих (4.39b), когда учитывается влияние изменение частоты солитона за счет ионизации.

Пятая глава диссертации посвящена аналитическим, численным и экспериментальным исследованиям по распространению мощного лазерного импульса в диэлектрическом капилляре, заполненном газом, когда основным нелинейным механизмом является ионизация газа. Для конкретных параметров эксперимента численное моделирование показало, что при возбуждении моды с длиной волны значительно ниже размера капилляра на стадии ионизации происходит формирование узкого плазменного канала, в котором может быть сосредоточено до 30 процентов всей мощности. Площадь плазменного канала составляла примерно 50-ю часть от сечения капилляра. При этом очевидно, что такой уровень локализации энергии не может быть обусловлен линейными механизмами, поскольку плазма в этом случае представляет собой дефокусирующую среду. Такая сильная локализация обеспечивается ионизационной нелинейностью, приводящей к смещению спектра в область высоких частот при одновременном уширении самого спектра. В результате происходит сильная компрессия лазерного импульса вплоть до одного колебания поля. Данное численное моделирование объясняет полученные в эксперименте (в котором принимал участие также автор диссертации) данные по сжатию фемтосекундных импульсов. По моему мнению, эти результаты очень интересные и многообещающие, особенно с точки зрения экспериментальной реализуемости этого метода.

Результаты шестой главы диссертации также очень перспективны. В этой главе теоретически обосновывается и экспериментально продемонстрирован новый метод компрессии релятивистски сильных лазерных импульсов до нескольких колебаний поля с мощностью петаваттного уровня за счет возбуждении кильватерной плазменной волны. В основе развиваемой модели лежит предположение о квазиодномерности кильватерной волны, взаимодействие с которой является главным нелинейным механизмом сжатия лазерных импульсов. Сжатие лазерного импульса обязано тому, что в задней части импульса происходит вытеснение электронов, а в передней части, наоборот, плотность электронов растет. Так как групповая скорость в плазме увеличивается с уменьшением плотности электронов, то задняя часть импульса догоняет переднюю часть. В этой главе аналитически и численно установлено, что темп сжатия импульса существенно зависит от величины амплитуды. При амплитудах, малых по сравнению с релятивистским значением, лазерный импульс испытывает самофокусировку, что приводит к дополнительному усилению поля. В этом случае характерная длина должна экспоненциально уменьшаться с увеличением мощности. При амплитудах, больших релятивистских значений, самофокусировка подавляется из-за насыщения нелинейности и процесс сжатия становится квазиодномерным. При этом инкремент укорочения оказывается ниже, при этом длина компрессии зависит степенным образом от амплитуды лазерного импульса.

В этой главе также представлены результаты теоретических и численных исследований шланговой неустойчивости релятивистски сильных лазерных импульсов с длительностью менее периода кильватерной плазменной волны. Найдено выражение для

смещения центра масс волнового пучка и проанализировано влияние этой неустойчивости на процесс модификации спектра лазерного излучения для широкой области начальных параметров. Показано, что развитие неустойчивости не приводит к ухудшению режима компрессии, когда кильватерная волна имеет размер меньше длины волны.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Несколько слов о замечаниях общего характера, которые имеют отношение к диссертации в целом. По моему мнению, главный недостаток данной диссертации связан с ее большим объемом. В частности это привело во многих местах к повторениям, этим особенно страдают первые три главы. Сокращение объема диссертации привело бы большей лаконичности и соответственно улучшило бы качество диссертации. Другим замечанием общего характера является предпочтение автора к рассмотрению волн циркулярной поляризации. Объяснение, данное при обсуждении с автором, кажется оппоненту не совсем правильным.

Подчеркну, что все отмеченные замечания несущественны для общей оценки диссертации, они не умаляют достоинств и важности выполненной работы. Данная диссертация значительно превышает требования, предъявляемые к докторским диссертациям. Следует отметить, что в диссертации очень хорошо сочетаются аналитические и численные расчеты, дополняя друг друга. Особо отметим экспериментальные работы, в которых принял участие диссертант. Результаты, полученные С.А. Скобелевым в диссертации, широко известны как у нас в России, так и за рубежом. Основные результаты опубликованы в 22 статьях в ведущих физических российских и международных журналах, в том числе в ЖЭТФ, Письмах ЖЭТФ, Phys. Rev. Letters, Phys. Rev., Phys. Plasma, а также доложены на самых престижных научных конференциях. В целом диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне, ее актуальность не вызывает никаких сомнений. Диссертация полностью отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Скобелев Сергей Александрович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

Кузнецов Евгений Александрович
профессор, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
главный научный сотрудник
Ленинский проспект, 53, г. Москва
kuznetso@itp.ac.ru
+7(499) 132-68-19

Подпись Е.А. Кузнецова

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ФИАН
к.ф.-м.н. М.М. Цветух

