

На правах рукописи

Филиппов Евгений Дмитриевич

**РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА СВЕРХЗВУКОВЫХ
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С
АСТРОФИЗИЧЕСКИМ ПОДОБИЕМ**
Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2018

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и Объединенном институте высоких температур Российской Академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: **Скобелев Игорь Юрьевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Объединенного института высоких температур
Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Гордиенко Вячеслав Михайлович**
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
сверхсильных световых полей
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова.

Крауз Вячеслав Иванович
кандидат физико-математических наук
начальник лаборатории быстрых процессов
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Ведущая организация: **Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)**

Защита состоится «20» июня 2018 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.130.05, д.ф.-м.н

Р. С. Стариков

1.1. Актуальность работы

Настоящая работа посвящена исследованию сверхзвуковых плазменных струй с астрофизическим подобием с помощью методов рентгеновской диагностики.

Следует подчеркнуть, что наблюдаемые изображения астрофизических плазменных объектов дают информацию лишь о текущем состоянии объекта, медленно эволюционирующего на протяжении миллионов лет. Это означает, что фактически у исследователей нет никакого экспериментального материала, описывающего динамику таких объектов, поскольку даже данные, полученные с интервалом в десятки лет, в масштабе времен изменения свойств большинства астрофизических объектов будут относиться практически к одному и тому же моменту времени. В силу этого, до недавнего времени наше понимание многих астрофизических процессов зависело полностью от компьютерного моделирования, проверка адекватности которого могла основываться только на сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов, полученных для единственной временной точки. Ситуация заметно улучшилась лишь недавно после появления нового направления исследований – лабораторной астрофизики, позволяющей экспериментально исследовать в лабораторных условиях динамику короткоживущих плазменных объектов, являющихся аналогами долгоживущих астрофизических.

Несмотря на большое количество, как астрофизических наблюдений, так и предложенных теоретических моделей, многие вопросы формирования таких астрофизических объектов, как, например, молодых звезд, являются до сих пор не раскрытыми. В частности существуют противоречия в вопросах, связанных с интерпретацией влияния магнитных полей на эволюцию молодой звезды или образованием аккреционных колонн в звездной системе. Поэтому лабораторные лазерно-плазменные эксперименты с применением крупномасштабного внешнего сильного магнитного поля, несомненно, являются актуальными, поскольку могут позволить абсолютно по-новому взглянуть на эти процессы. Используя «разумные» начальные условия, как это обычно делается при численном моделировании, мы можем детально изучить сложные астрофизические явления в повторяемом и доступном виде. Лабораторные астрофизические эксперименты могут быть очень полезны при изучении нелинейных трехмерных явлений, где численное моделирование особенно сложно выполнить.

Несмотря на то, что в проведенных в настоящей работе исследованиях основной упор делался на использовании радиографических методов в лабораторном астрофизическом эксперименте, область применения развитых методик гораздо шире. Фактически они могут использоваться в самых разнообразных экспериментальных исследованиях по физике высоких плотностей энергии, например, в диагностике корональных областей инерциально-удерживаемой термоядерной плазмы или для получения данных о степени сжатия в

ударной волне, что также обуславливает актуальность проведенных нами исследований.

1.2. Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка диагностических методов для исследования лазерно-индуцированных сверхзвуковых плазменных струй сложной конфигурации, позволяющая определить их параметры и топологию в экспериментах по лабораторному моделированию астрофизических аккреционных процессов.

1.3. Научная новизна

1. Впервые на основе рентгеноспектральных данных получены пространственные профили электронной температуры и плотности сверхзвуковой лазерно-индуцированной плазменной струи с астрофизическим подобием и аспектным соотношением > 10 в присутствии полоидального магнитного поля 20Тл. Впервые показано, что коллимация такого плазменного потока сохраняется при увеличении угла между линиями напряженности магнитного поля и нормалью к поверхности лазерно-облучаемой мишени от 0 вплоть до 45 градусов.
2. Впервые в лабораторных эксперименте, моделирующем процессы формирования аккреционных колонн в молодых звездах, рентгеноспектральным методом измерены температура и плотность плазмы в области взаимодействия сверхзвуковой плазменной струи с твердотельным препятствием. Показана двухкомпонентность плазмы, что проявляется в образовании горячей плазменной оболочки и плотной центральной области.
3. Развита методика квазимонохроматической рентгеновской радиографии с использованием лазерно-плазменного источника пикосекундной длительности, позволившая впервые измерить линейную плотность плазмы в экспериментах по лабораторному моделированию формирования аккреционных колонн в магнитных катаклизмических переменных полярного типа.

1.4. Научная и практическая значимость

Результаты работы могут найти свое применение в верификации теоретических моделей целого ряда астрофизических объектов, в частности, молодых звезд и магнитных катаклизмических переменных полярного типа. Например, это дает возможность оценить начальный угол между магнитным полем и осью вращения молодой звезды или объяснить в них снижение наблюдаемой светимости аккреционных колонн в рентгеновском диапазоне.

Развитые в работе рентгеноспектральные диагностические находят свое применение в целом классе экспериментов по физике высоких плотностей энергий с использованием сверхмощных лазерных комплексов, в том числе, в диагностике корональных областей инерциально-удерживаемой термоядерной плазмы или для получения данных о степени сжатия в ударной волне.

1.5. Степень достоверности и апробация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы были получены на основе экспериментальных данных, полученных при помощи современной техники в крупном международном лазерном центре LULI в университете Ecole Polytechnique, позволяющем получать плотности потока порядка $\sim 10^{18}$ Вт/см². Использовались актуальные программные и физические модели для определения параметров плазменного объекта с помощью рентгеноспектральных и радиографических данных. Кроме того, достоверность подтверждалась сопоставлением с данными других диагностических методов, например оптической интерферометрии и пирометрии. Заметная часть диссертационной работы посвящена обоснованию физического соответствия лабораторных данных астрофизическому объекту.

Основные результаты диссертационной работы были доложены на 17 международных и российских научных конференциях:

XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, п. Эльбрус, Россия, 1-6 марта 2018; International conference on extreme light, ICEL – 2017, Венгрия, г. Сегед, 6-9 ноября 2017; 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Сен-Мало, Франция, 11-15 сентября, 2017; International Symposium “Topical problems of nonlinear wave physics”, Москва – Санкт-Петербург, Москва, Россия, 22-28 июля 2017; 44th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Белфаст, Великобритания, 26-30 июня 2017; 230th American Astronomical Society Meeting, Остин, Техас, США, 4-8 июня, 2017; 2nd European Conference on Plasma Diagnostics, Бордо, Франция, 18-21 апреля, 2017; International Workshop «Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation», Москва, Россия, 5-7 апреля, 2017; XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, п. Эльбрус, Россия, 1-6 марта 2017; International School for young scientists «Visions in Fundamental Physics», Москва, Россия, 10-26 декабря, 2016; X российская конференция "Современные средства диагностики плазмы и их применение", Москва, Россия, 14-16 ноября, 2016; 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2016, Москва, Россия, 18-23 сентября, 2016; 11th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics HEDLA-2016, Менло-парк, США, 16-20 мая 2016; International Conference on High Energy Density Sciences 2016 (HEDS 2016). Йокогама, Япония, 17-20 мая 2016; 14th Workshop on Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation, Москва, Россия, 13-15 апреля 2016; XXXI International Conference on Equations of State for Matter, п. Эльбрус, Россия, 1-6 марта 2016; 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Саванна, США, 16-20 ноября, 2015.

1.6. Личный вклад автора

Во всех поставленных экспериментах по астрофизическому моделированию плазменных потоков, которые проходили в лаборатории LULI Ecole Polytechnique, установка рентгеновской диагностики, ее калибровка, получение рентгеноспектральных и радиографических экспериментальных данных, их последующая обработка и анализ выполнялись лично автором. Также он принимал

участие в проведении экспериментальных интерферометрических и пирометрических измерений. Автором было написано несколько прикладных компьютерных приложений, в частности, для корректного учета деформации рентгеноспектральных изображений протяженных плазменных объектов.

С использованием различных моделей плазмы, лично автором был проведен анализ спектральных линий He- и H- подобных ионов фтора и определены параметры лазерной плазмы на разном удалении от мишени. Им было исследовано влияние ориентации внешнего магнитного поля на коллимацию сверхзвуковой плазменной струи с большим аспектным соотношением. При экспериментальном моделировании формирования замагниченных аккреционных колонн молодых звезд соискателем показано образование горячей плазменной оболочки, а также исследован вопрос о возможности влияния ее оптической толщины на конечную эмиссию объекта.

Автором развита методика квазимонохроматической рентгеновской радиографии с использованием лазерно-плазменного источника пикосекундной длительности и в экспериментах по моделированию магнитных катаклизмических переменных полярного типа получены карты линейных плотностей плазмы, зарегистрировано образование короткоживущей обратной ударной волны и определены ее параметры.

1.7. Научные положения, выносимые на защиту

1. Измеренные с помощью рентгеноспектральных методов пространственные профили электронной температуры и плотности сверхзвуковой плазменной струи с аспектным отношением > 10 и астрофизическим подобием, сформированные в результате взаимодействия лазерного излучения с интенсивностью 10^{13} Вт/см² с твердотельной мишенью во внешнем полоидальном магнитном поле 20 Тл.
2. Эффект влияния ориентации магнитного поля 20 Тл на коллимацию сверхзвуковой плазменной струи с астрофизическим подобием в диапазоне углов от 0 до 45 градусов относительно изначального направления распространения струи.
3. Доказательство формирования горячей плазменной оболочки при взаимодействии сверхзвуковой плазменной струи с твердотельным препятствием во внешнем магнитном поле и результаты измерения ее параметров методами рентгеновской спектроскопии в эксперименте по моделированию аккреционных колонн молодых звезд.
4. Адаптация метода теневой рентгеновской радиографии с использованием лазерно-плазменного источника для получения спектрально-селектированных изображений и измерения плотности короткоживущих плазменных объектов и его апробация в экспериментах по моделированию аккреционных колонн в магнитных катаклизмических переменных полярного типа.

1.8. Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Её объём составляет 136 страниц, она включает 64 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 176 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта новизна работы, её практическая и теоретическая значимость, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

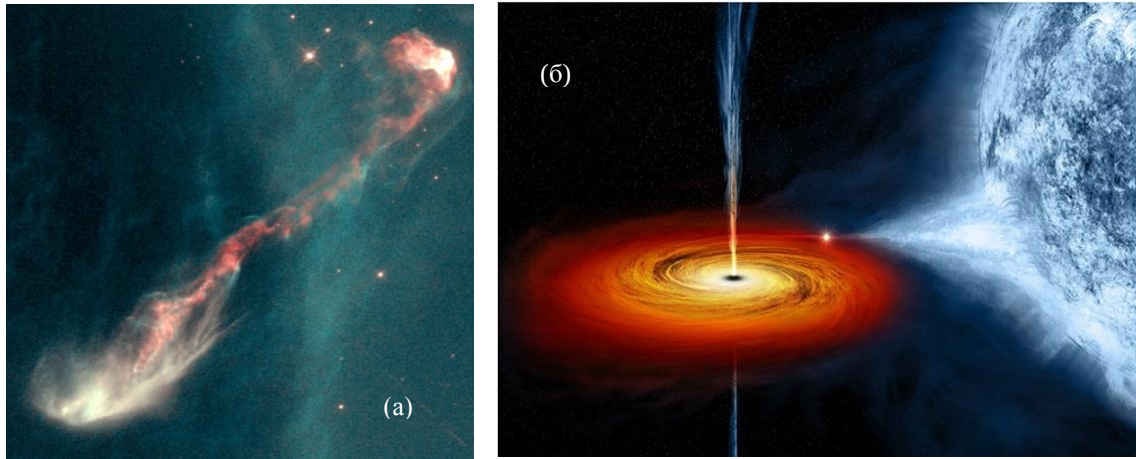


Рисунок 1. (а) Изображение объекта Хербига-Аро HH 47, полученное телескопом Хаббл (команды NASA, ESA). (б) Художественное представление процесса аккреции в двойной системе с черной дырой Cygnus X-1.

В астрофизике наблюдается много интересных динамических объектов, но при этом их масштабы эволюции могут составлять сотни и более лет. В этом случае отсутствует возможность прямого экспериментального исследования их динамики, что сильно затрудняет создание их теоретического описания. В качестве примера таких астрофизических объектов могут выступать различные плазменные потоки сложной конфигурации (рисунок 1). Например, к таким потокам относятся объекты Хербига-Аро, которые представляют собой протяженные участки туманностей, связанные с образованием молодых звёзд. Они образуются, когда вещество молодой звезды вследствие аккреционных процессов выбрасывается в виде коллимированных струй и вступает во взаимодействие с близлежащими облаками газа и пыли на скоростях в несколько сотен километров в секунду. Кроме того, интересным объектом для исследования также являются аккреционные колонны, образующиеся как в процессе формирования молодой звезды, так и в двойных системах. При этом вещество в виде потока или струи перетекает на фотосферу центрального объекта, а наличие магнитных полей может играть существенную роль в динамике этого процесса. Единственный способ экспериментально

исследовать такие процессы – физическое моделирование в лабораторных условиях, которое основывается на законах подобия, или масштабирования, впервые сформулированных в работе (Ryutov D.D. et al. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2000. Т.127, № 2. С. 465–468). Смысл моделирования состоит в том, что динамика двух объектов, описываемых системами МГД-уравнений, будет подобной, если сохранить одинаковыми определенные параметры, называемые инвариантами.

В настоящее время астрофизиков интересуют объекты, для моделирования которых необходимо создать в лаборатории плазменные струи с высоким аспектным отношением, то есть отношением длины струи к ее диаметру более 10, а также со сверхзвуковой скоростью распространения. При этом надо не просто создать, но и обеспечить возможность измерения их параметров. В настоящей работе впервые струи с такими параметрами созданы и продиагностированы в **Главе 1** настоящей работы. Прототипом таких плазменных струй служат, в частности, объекты Хербига-Аро, которые распространяются от молодой звезды со скоростями порядка сотен км/с и типичными длинами пробега до 0.5 парсек. Сохранение полного набора инвариантов, к сожалению, не представляется возможным и при постановке эксперимента необходимо выбирать конкретные параметры, по которым происходит моделирование. В настоящей работе этот подход был применен для исследования сложных конфигураций плазменных потоков с использованием только гидродинамического подобия, т.е. при выполнении инвариантности таких параметров, как числа Струхала и Альфвена.

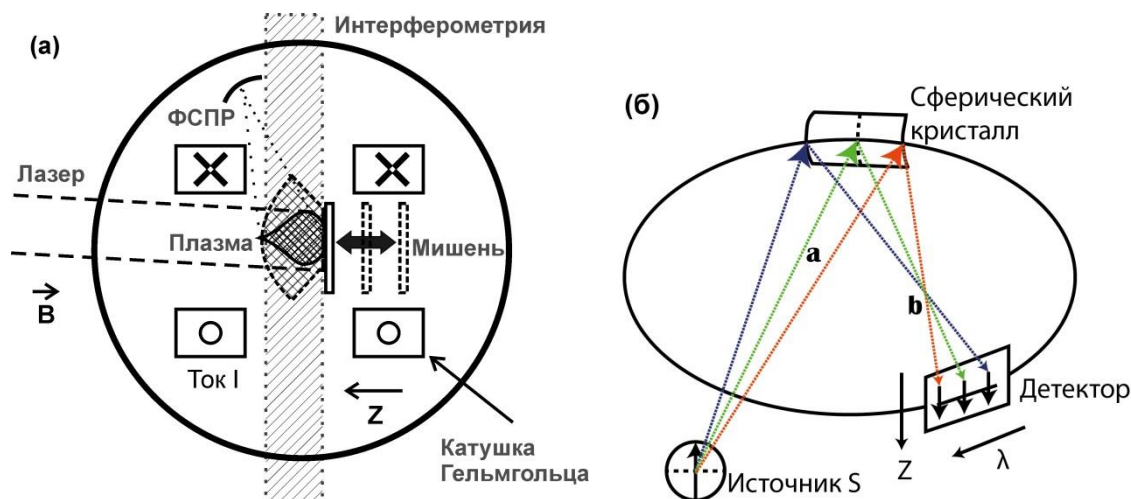


Рисунок 2. (а) Схема эксперимента. Мишень помещена внутрь катушки Гельмгольца с внешним диаметром 100 мм и внутренним отверстием $d=11$ мм. Лазерный пучок воздействовал под углом 10° к поверхности твердотельной мишени из $(CF_2)_n$. Плазменный объект зондировался в интересующей зоне в поперечном направлении с помощью оптической интерферометрии и рентгеновского спектрометра ФСПР с пространственным разрешением вдоль плазменной струи. (б) Схема использования спектрометра ФСПР в эксперименте.

Ранее в работе (Albertazzi B. et al. Science 2014. Т. 346, № 6207. С. 325–328.) было показано, что применение внешнего магнитного поля при воздействии наносекундного лазерного импульса на твердотельную мишень действительно помогает достичь эффекта коллимации плазменной струи. Поэтому первостепенной задачей являлось создание сверхзвуковых лазерно-индуцированных плазменных струй в сильном внешнем магнитном поле в широком диапазоне расстояний и исследование их динамики. В **разделе 1.1** приведено описание экспериментальной установки, схема эксперимента (рисунок 2а), а также используемые средства диагностики. Применение внешнего магнитного поля к лазерно-индуцированному плазменному потоку позволило исследовать воспроизводимые плазменные струи с большим аспектным отношением. Эксперименты проводились на территории французского университета Ecole Polytechnique в лаборатории LULI. Одной из основных диагностик являлась рентгеновская спектроскопия с использованием сферически изогнутого кристалла слюды. Плазменная струя создавалась с помощью лазерного пучка с основной длиной волны $\lambda=1057$ нм, временем импульса ~ 0.6 нс и энергией порядка 40 Дж, сфокусированного на толстую, твердотельную тефлоновую $(\text{CF}_2)_n$ мишень. Лазерный импульс попадал на мишень под углом 10° к поверхности, обеспечивая плотность потока $\sim 1 \times 10^{13}$ Вт/см². Выбор мишени был обусловлен возможностью диагностировать параметры яркого протяженного источника рентгеновского излучения плазменного объекта, чувствительного к изменению внешнего магнитного поля. Полоидальное магнитное поле в 20 Тл создавалось при помощи катушки Гельмгольца с силовыми линиями, перпендикулярными поверхности мишени.

Для диагностики использовался рентгеновский спектрометр ФСПР, основанный на сферически изогнутом кристалле слюды. За счет своей сферической формы он объединяет в себе дисперсионные свойства кристалла и зеркала, что позволяет получить одно- или двумерные изображения протяженных плазменных объектов. Так как диагностическое окно в катушке Гельмгольца составляло всего 11 мм при протяженности джета порядка 20 мм, мишень размещалась на различных последовательных позициях вдоль лазерной оси внутри магнитной катушки. Пример получаемого двумерного изображения по рентгеновской спектроскопической диагностике, и склеенного, совмещая 3 различных кадра по пространству, показан на рисунке 3а. При этом использовалось излучение многозарядных ионов фтора в диапазоне длин волн 13–16 Å, включая в себя резонансную линию $\text{Lu}\alpha$ и ее диэлектронные сателлиты, а также резонансную серию излучения He-подобных ионов. Данная диагностика позволила получить спектры на различном удалении от мишени (рисунок 3б).

В **разделе 1.2** для возможности использования методики определения плазменных параметров на основе анализа относительных интенсивностей линий при разлете плазменной струи от мишени было разработано программное

приложение “AnDi” в среде Matlab. Оно позволяет корректно учитывать эффекты дисторсии рентгеноспектрального изображения, проявляющиеся в зависимости коэффициента увеличения плазменного объекта от длины волны (рисунок 3в). Приложение позволяет устранить как эффект простой линейной дисторсии на изображении, так и имеет возможность вручную задавать кривую дисторсии для нелинейного случая. Реализован пользовательский интерфейс, позволяющий работать напрямую без установки специальных приложений.

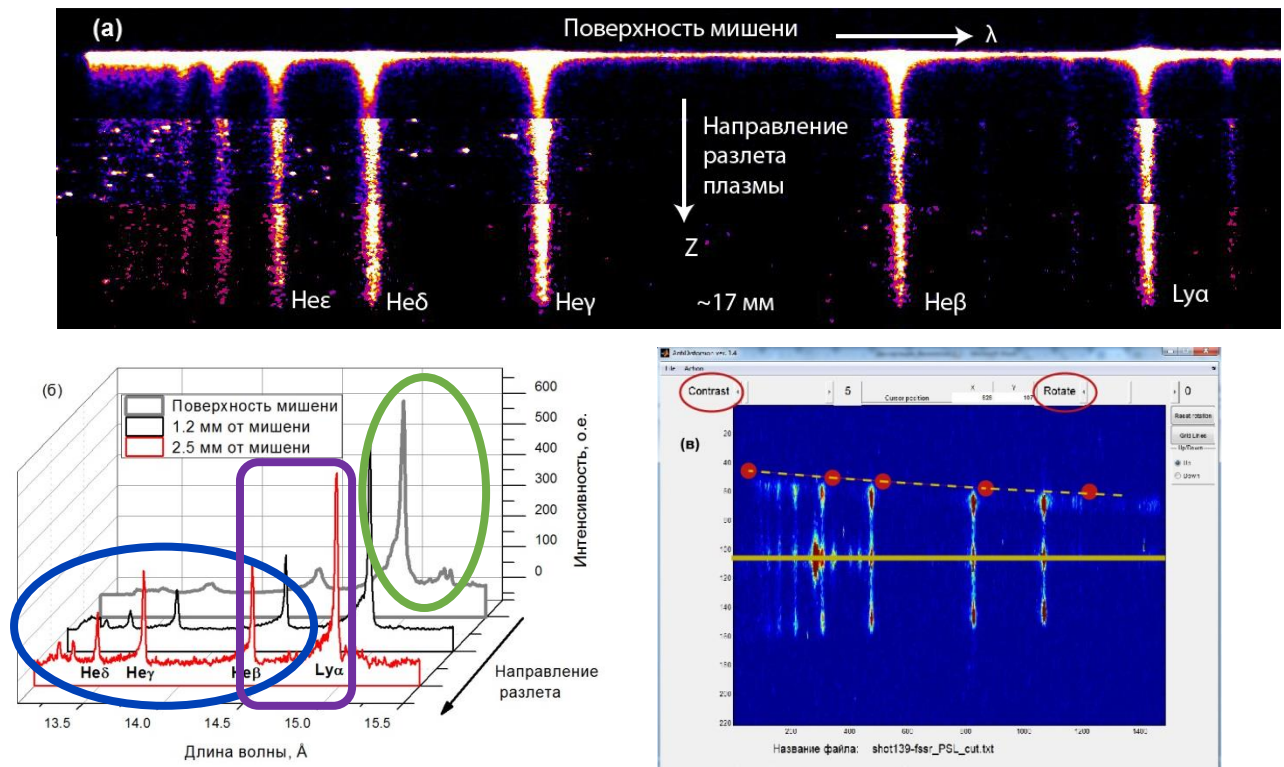


Рисунок 3. (а) Рентгеновское изображение плазменной струи составленное из трех последовательных кадров, полученных для разных выстрелов греющего лазера при различном удалении мишени внутри катушки Гельмгольца. (б) Соответствующие спектры на различном удалении от мишени. Графически цветом выделены наборы спектральных компонент, по которым ведется определение плазменных параметров. (в) Вид программы AnDi при обработке экспериментального спектрометрического изображения с выраженным эффектом дисторсии.

В разделе 1.3 показаны результаты создания коллимированной сверхзвуковой плазменной струи при использовании внешнего сильного полоидального магнитного поля с силовыми линиями, параллельными оси разлета. Найдены зависимости электронной температуры и плотности от расстояния до поверхности мишени (рисунок 4) на большом удалении от мишени. Благодаря пространственному разрешению, анализ параметров плазмы на поверхности мишени, в месте ее ионизации, производился по отношению интенсивностей диэлектронных сателлитов к резонансной линии Ly α . Это было сделано при помощи ударно-излучательной модели плазмы, используя доступный код

PrismSpect для моделирования спектральных компонент. При дальнейшем разлете плазменной струи предполагался рекомбинационный характер и измерение было получено по взаимным отношениям интенсивностей линий внутри резонансной серии гелие-подобных ионов фтора с использованием квазистационарного приближения, подробно описанного в работе (Ryazantsev S.N. et al. JETP Lett. 2015. Т. 102, № 11. С. 707–712). Электронная температура на поверхности мишени составила 320 эВ, уменьшаясь по мере удаления от мишени. Однако, на большом расстоянии от мишени и электронная температура, и электронная плотность оставались на фактически постоянном уровне – $T_e \sim 10$ эВ, $N_e \sim 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, рентгеновская диагностика подтвердила сильную коллимацию струи, распространяющуюся на большое расстояние от мишени, и показала, что она может быть результатом присутствия полоидального магнитного поля с силовыми линиями параллельными оси разлета потока. Теперь, исследованная плазменная струя с высоким пространственным аспектным соотношением может быть использована для лабораторного моделирования астрофизических объектов и в более сложных конфигурациях.

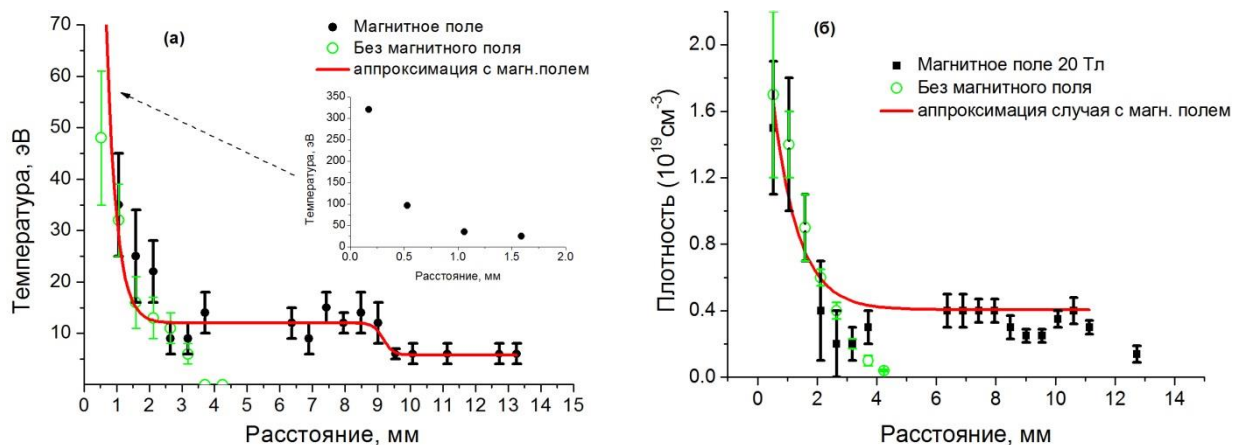


Рисунок 4. Фактическая зависимость (а) электронной температуры и (б) электронной плотности плазмы от расстояния до поверхности мишени в присутствии магнитного поля (черные символы) и в случае свободного расширения (зеленые символы).

Вообще говоря, исходный разлет струи в астрофизическом случае может быть не коллинеарным магнитному полю. Например, в работе (Ménard F. et al. Astron. Astrophys. 2004. Т. 425, № 3. С. 973–980) высказано предположение, что магнитное поле при выбросе плазменного потока молодой звезды может быть ориентировано случайно, а коллимация струи напрямую зависит от ориентации магнитного поля. Для исследования этого явления в **разделе 1.4** на созданной экспериментальной платформе варьировался угол поворота мишени относительно линий магнитного поля при облучении твердотельной мишени лазерным импульсом с плотностью потока 10^{13} Вт/см^2 . Варьирование угла создавалось за счет наклона мишени внутри катушки Гельмгольца (рисунок 5а).

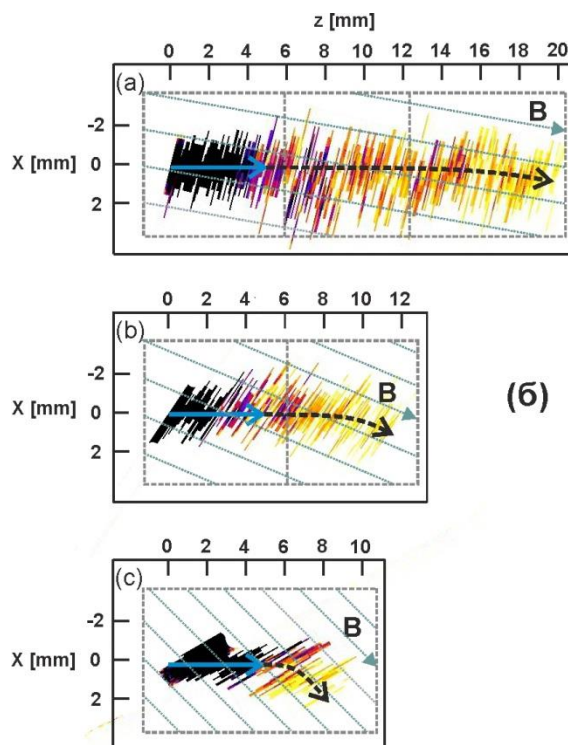
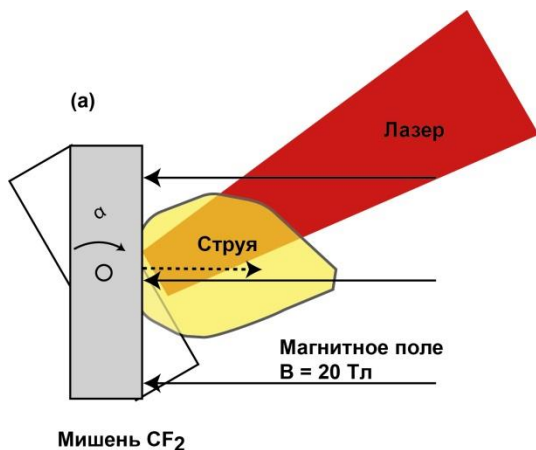


Рисунок 5. (а) Схема экспериментального подхода. (б) Рентгеновское изображение плазменной струи, полученное по линии $\text{He}\gamma$, (переход в атоме фтора $\text{F He } 4p-1s$), для случая 20 Тл, когда наклон мишени к нормали был (а) 10, (б) 20, и (с) 45 градусов. Изображения объединены для нескольких кадров.

Ввиду различия коэффициентов увеличения в сагиттальной и меридиональной плоскости оптической схемы спектрометра ФСПР было произведено преобразование полученного спектрометрического изображения в истинное рентгеновское двумерное изображение плазменной струи (рисунок 5б). Было продемонстрировано, что около лазерно-облучаемой поверхности мишени распространение плазменной струи не зависит от варьирования угла магнитного поля. Кроме того, это расширение происходит по нормали к поверхности мишени и идентично случаю, когда магнитное поле отсутствует (рисунок 6а). Причиной такого поведения является газокINETическое давление плазмы P_{dyn} , которое сильно превосходит давление магнитного поля P_m в этой области, где электронная температура и плотность ожидаются выше 100 эВ и $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Затем, как следует из приведенных данных, магнитное поле серьезно влияло на геометрию плазменного потока на расстояниях 6–15 мм от мишени, заставляя плазменный поток распространяться вдоль силовых линий магнитного поля, даже при больших углах отклонения, вплоть до 45 градусов. Несмотря на наблюдение эффективного перенаправления потока плазмы вдоль линий магнитного поля, устойчивость коллимации потока плазмы, т.е. накопление вещества в струйной структуре, становилась все менее эффективной. Так, например, в случае 45° плазма локализована намного ближе к мишени, а значения электронной плотности для разлета в магнитном поле, нормированные на плотность свободно расширяющегося плазменного факела, значительно снижаются (рисунок 6б).

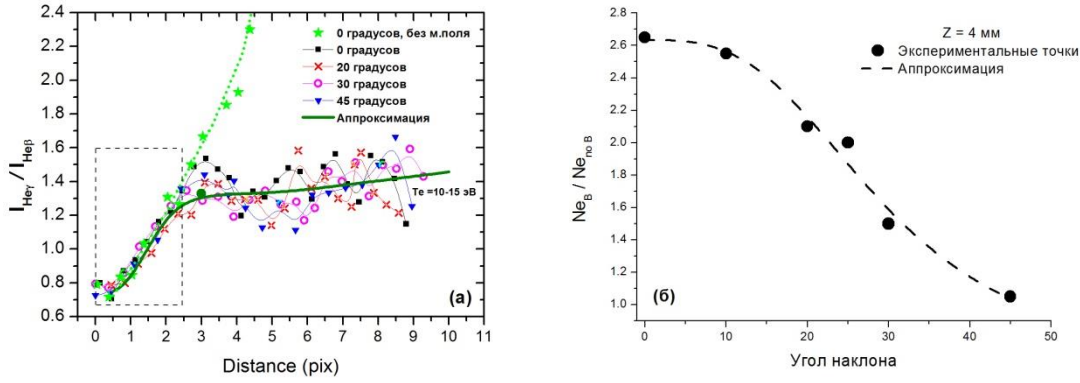


Рисунок 6. (а) Отношение интенсивностей спектральных линий фтора F He γ и F He β , измеренное вдоль оси распространения плазменной струи для различной ориентации магнитного поля – 0, 20, 30, 45 градусов и для случая без магнитного поля. (б) Зависимость электронной плотности от угла поворота мишени относительно линий магнитного поля 20Тл, для сечения на расстоянии 4 мм от лазерно-облученной мишени.

Глава 2 посвящена лабораторному моделированию процессов формирования аккреционных колонн в молодых звездах в присутствии внешнего магнитного поля. В астрофизическом случае вещество, направляясь вдоль линий магнитного поля, соединяющего окружающий материал со звездой, падает на звездную фотосферу (рисунок 7а). При таком взаимодействии между падающим потоком и фотосферой формируются ударные волны, при этом плазма после удара нагревается до нескольких миллионов градусов. Однако, наблюдения, например, в работе (Curran R.L. et al. *Astron. Astrophys.* 2011. Т. 526. С. 104) показывают, что существуют значительные расхождения между скоростями аккреции вещества, рассчитанными по наблюдаемой рентгеновской светимости и по измерениям в оптическом диапазоне (рисунок 7б). В **разделе 2.1** применялась прежняя экспериментальная платформа для исследования этого явления, с расположением на пути плазменной струи твердотельного препятствия, моделирующего фотосферу звезды (рисунок 8а). Приводятся рентгеновские спектры, измеренные в области около препятствия. Излучение вблизи поверхности обладает очень интересными свойствами, оно заметно растет по интенсивности и может включать в свой состав новые спектральные компоненты излучения вещества преграды.

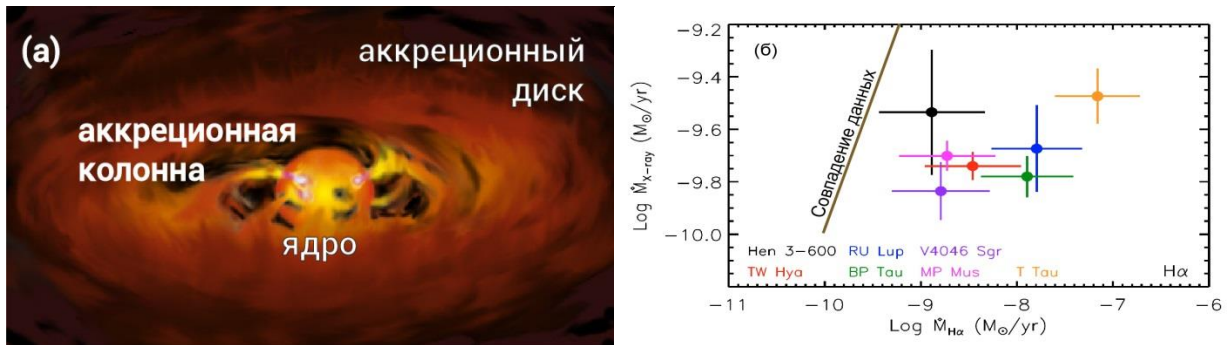


Рисунок 7. (а) Иллюстрация формирования молодой звезды. Колонна материала падает с диска на звезду, просачиваясь вдоль линий магнитного поля. Аккреционная

колонна образует горячие области, обеспечивая увеличение в УФ и рентгеновском диапазоне излучения. (б) Различия в оценке скорости массовой аккреции исходя из оптических и рентгеновских данных. На графике дополнительно указана линия, для которой расчеты совпадали бы друг с другом.

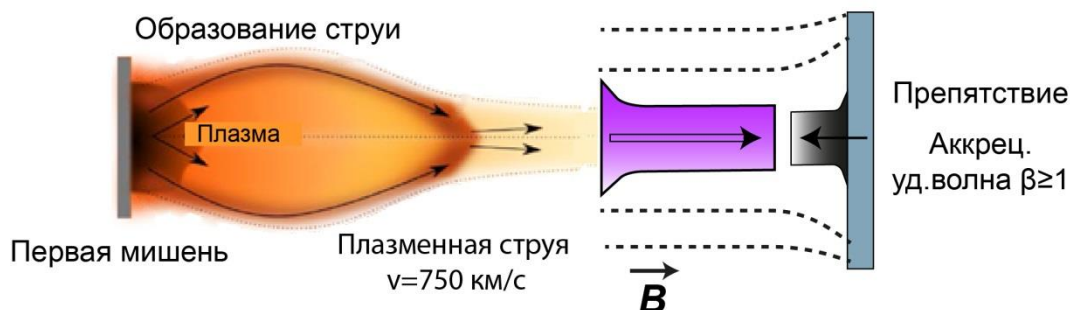


Рисунок 8. Схема создания лабораторной модели для исследования формирования аккреционной колонны.

Раздел 2.2 посвящен анализу относительных интенсивностей зарегистрированных спектральных компонент. Показано, что полученный в эксперименте спектр в области около препятствия не удастся полностью описать при использовании только одной модели с одним набором параметров электронной температуры и плотности (рисунки 9а, 9б). Предполагая наличие двухкомпонентной плазмы и используя относительные интенсивности полученных спектральных компонент, а именно отношение резонансной водородоподобной линии и диэлектронных сателлитов к ней, а также отношения внутри резонансной Не-подобной серии фтора, были вычислены параметры центральной и периферийной плазмы для различной амплитуды магнитного поля. Необходимо отметить, что в этом случае спектр полностью и однозначно описывается данным набором параметров (рисунок 9в). Однако, при этом изначально не известно, относительное расположение плазменных областей. Поэтому анализируя абсолютную светимость каждой плазменной компоненты в линиях Не-серии и $Ly\alpha$, а также взятую из данных интерферометрии геометрию плазменного объекта было получено окончательное расположение и параметры плазменных компонент: для 20 Тл: $T_{shell} = 50$ эВ, $N_{shell} = 2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $T_{core} = (320-600)$ эВ, $N_{core} = 3.8-4.9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; для случая 6Тл: $T_{shell} = 40$ эВ, $N_{shell} = 3.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T_{core} = (320-600)$ эВ, $N_{core} = 3.7-4.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, получено, что плазменная оболочка является более горячей, а центральная компонента – более плотной (рисунок 9б).

В **разделе 2.3** показывается, что самопоглощение в плазме рассматриваемых спектральных компонент не превышает 10 % и, соответственно, влияние оптической толщины на измерение параметров лабораторной плазмы в проведенных экспериментах можно не учитывать. **Раздел 2.4** посвящен астрофизической интерпретации результатов лабораторного эксперимента. В частности, для астрофизического случая обсуждается возможность уменьшения

потока рентгеновского излучения, идущего от области аккреции за счет эффекта абсорбции в горячей плазменной оболочке.

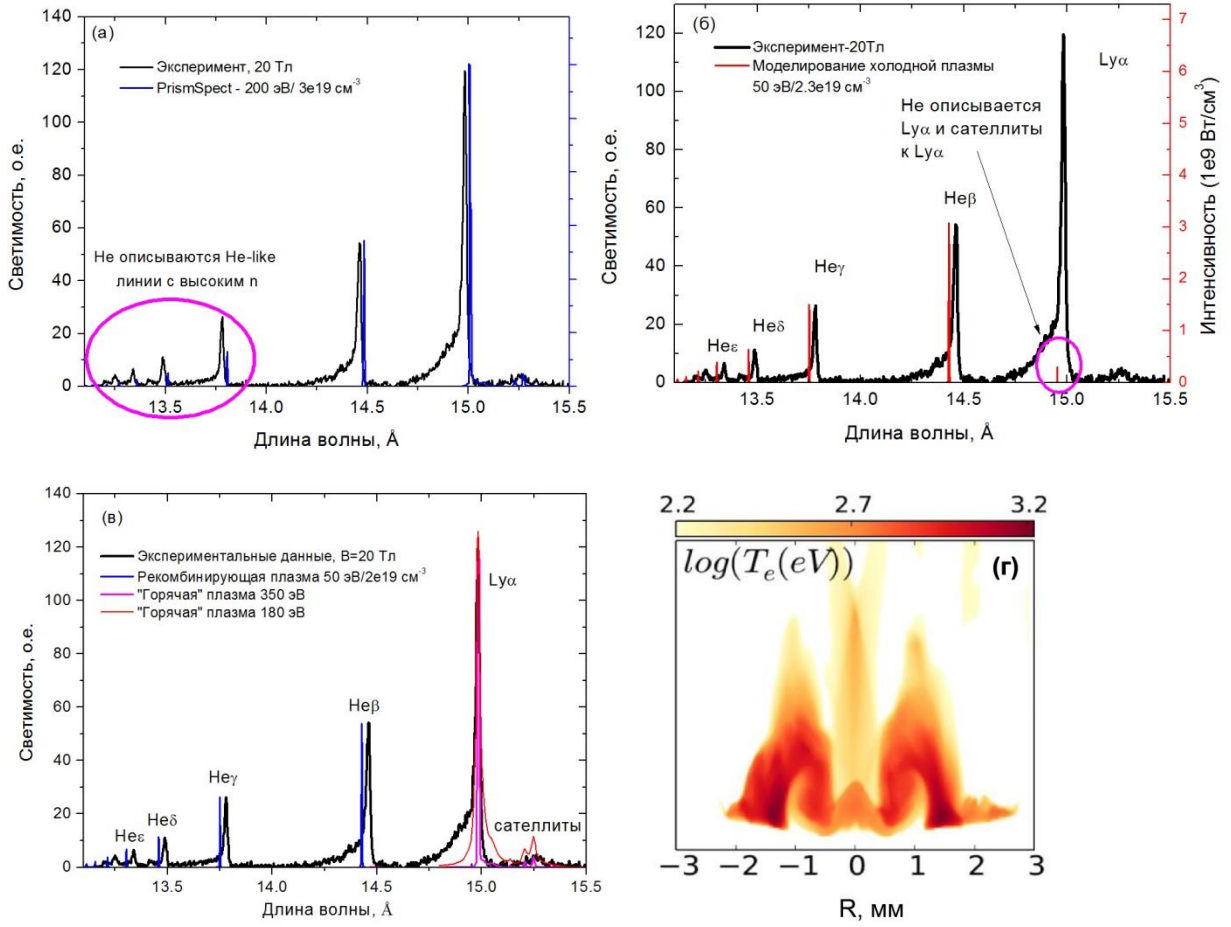


Рисунок 9. (а) Моделирование спектра в случае применения стационарной ударно-излучательной модели для лабораторной плазмы, находящейся во внешнем стационарном однородном магнитном поле 20 Тл. Моделирование получено по коду PrismSPECT для электронной температуры 200 эВ. (в) Подход с двухкомпонентной плазмой. Более холодная плазма оценена с помощью рекомбинационной модели, в то время как параметры горячей части получены с помощью программного кода PrismSPECT из соотношения интенсивностей диэлектронных сателлитов к резонансной линии $Ly\alpha$. (г) Карта электронной температуры, полученная с помощью компьютерного кода Gorgon для магнитного 20 Тл и момента времени 12 нс после взаимодействия плазменного потока с препятствием.

Существует целый класс астрофизических объектов, который моделируется в лаборатории при электронной температуре плазмы много меньше 100 эВ. В таких условиях методы эмиссионной рентгеновской спектроскопии оказываются неприменимыми. При этом методы теневой рентгеновской радиографии используются для измерения плотности такой плазмы, в особенности, когда объект является непрозрачным в оптическом диапазоне. Глава 3 посвящена диагностике плазмы в экспериментах по лабораторному моделированию явлений аккреции в катаклизмических переменных звездах полярного типа методом рентгеновской

радиографии. **Раздел 3.1** отражает основные проблемы при обеспечении рентгеновской радиографии быстропротекающих гидродинамических процессов в лазерной плазме и подходам для их решения. В частности, рассматривается случай использования в качестве источника излучения плазмы, создаваемой импульсами пикосекундной длительности. Развита методика рентгеновской радиографии (рисунок 10а) для исследования плотной плазмы и определения линейной плотности короткоживущего плазменного объекта, обеспечивающая компромисс между такими параметрами, как пространственное и временное разрешение, яркость рентгеновского источника, соотношение сигнал-шум и спектральный состав в регистрируемых данных. За счет использования лазерного импульса увеличенной длительности в 10 пс на основной лазерной частоте, размещения перед апертурой детектора щели из постоянных магнитов и специального набора фильтров, а также применения мишеней из вертикально ориентированных микронных проволочек обеспечено увеличение соотношения сигнал-шум более чем на порядок при сохранении пространственного разрешения на уровне 20 мкм. В качестве подсветки использовался лазерный пучок Pico-2000 на установке LULI-2000 в университете Ecole Polytechnique с базовой длиной волны (1053 нм) и энергией на мишени 60 Дж. В качестве материала мишени рентгеновского источника использовалась проволочка из титана (Ti) с энергией K_{α} : $E_{K_{\alpha}} \approx 4.5$ кэВ. Для оценки качества радиографического изображения применялась золотая сетка размером 600 lpi (рисунок 10б).

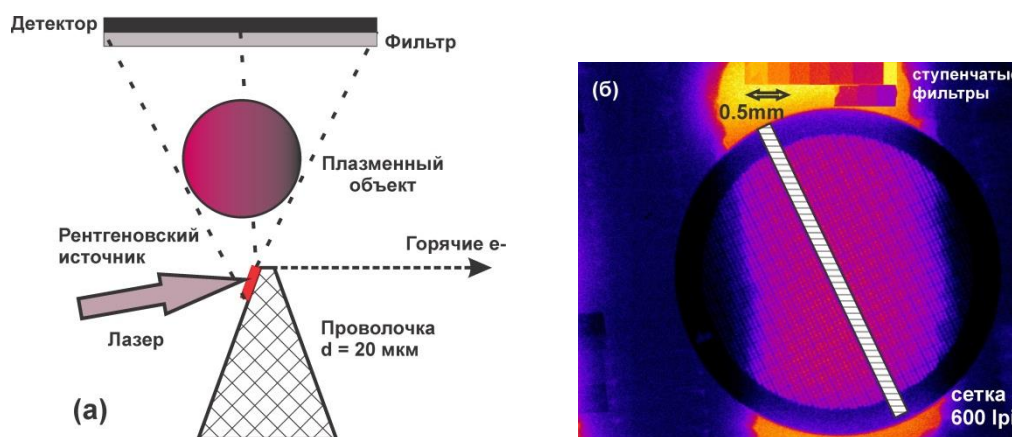


Рисунок 10. (а) Схема с использованием проволочки в вертикальной поточечной проекционной геометрии рентгеновской радиографии. (б) Радиографическое изображение при использовании золотой сетки с разрешением 600 lpi в качестве проецируемого объекта.

Так как лазерная плазма является широкополосным источником рентгеновского излучения, то в **разделе 3.2** описывается методика восстановления значений линейной плотности плазмы из радиографических данных в поточечной проекционной геометрии. Использование перед детектором фильтров из того же материала, что и рентгеновский источник, либо с увеличением Z на + 1, позволило

выделить вклад рентгеновских фотонов в узкой полосе до К края поглощения фильтра, т.е. получить квазимонохроматический спектр в районе наиболее интенсивного характеристического излучения переходов на К-оболочку (рисунок 11а). Решена задача исключения из радиографических данных сигнала, формируемого жесткой частью спектра, для которой плазменный объект оптически прозрачен. Для этого анализировался уровень сигнала за ступенчатыми фильтрами (рисунок 11б) с линейной плотностью много большей, чем плотность плазменного объекта. В рассматриваемой постановке эксперимента уровень сигнала, формируемый жесткой частью, составил 55 %.

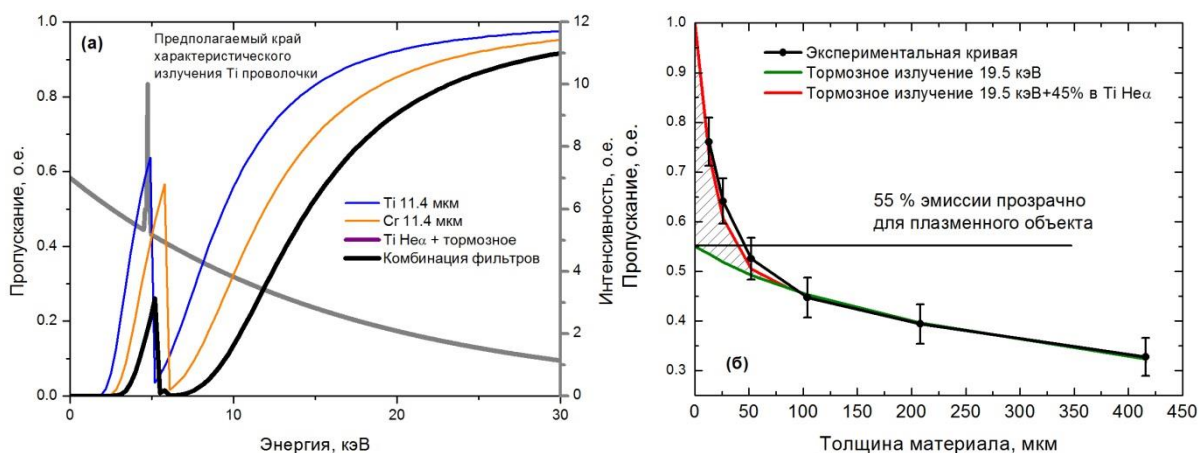


Рисунок 11. (а) комбинация фильтров перед детектором и положение наиболее интенсивной линии He α в случае использования мишени из титана и интенсивности лазерного излучения порядка 10^{17} Вт/см 2 (б) Прохождение рентгеновского спектра излучения предполагаемого вида через дополнительные ступенчатые фильтры перед детектором. Здесь приведены значения для алюминиевой фольги.

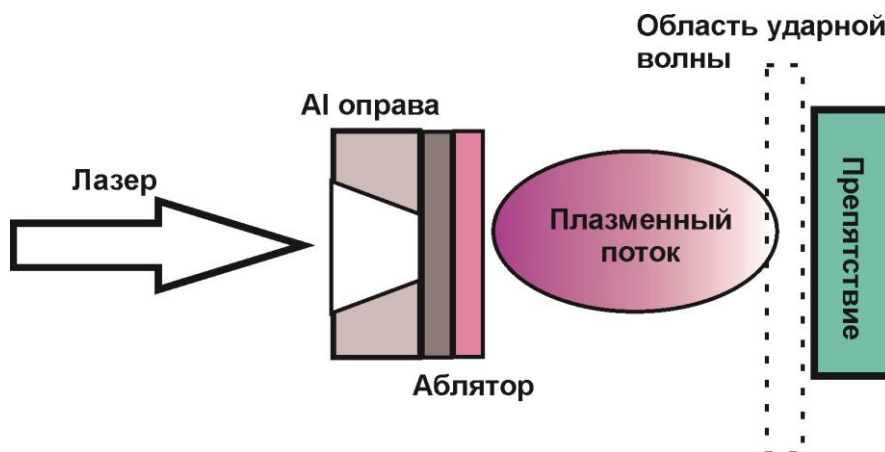


Рисунок 12. Схема эксперимента по моделированию явлений аккреции в лаборатории. Аблятор состоит из нескольких слоев различных материалов – Al-Cu-Au-Ti. Препятствие сделано из материала GGG.

Результаты данного подхода апробированы в лазерно-плазменном эксперименте, моделирующем магнитные катаклизмические переменные звезды полярного типа, и представлены в разделе 3.3. Предполагается, что в системах

такого рода сверхзвуковой поток плазмы, исходящий от звезды-компаньона, падает на центральный объект вдоль аккреционной колонны. После воздействия на фотосферу образуется устойчивая обратная ударная волна, которая нагревает аккреционную колонну высоких температур. Поскольку положение обратной ударной волны слишком близко к фотосфере (порядка 100–1000 км), наблюдения не могут обеспечить измерения структурных параметров, такие как высота ударной волны, степень сжатия и т.д., что отражено в работе (Krauland C.M. et al. *Astrophys. J. Lett.* 2013. Т. 762, № 1).

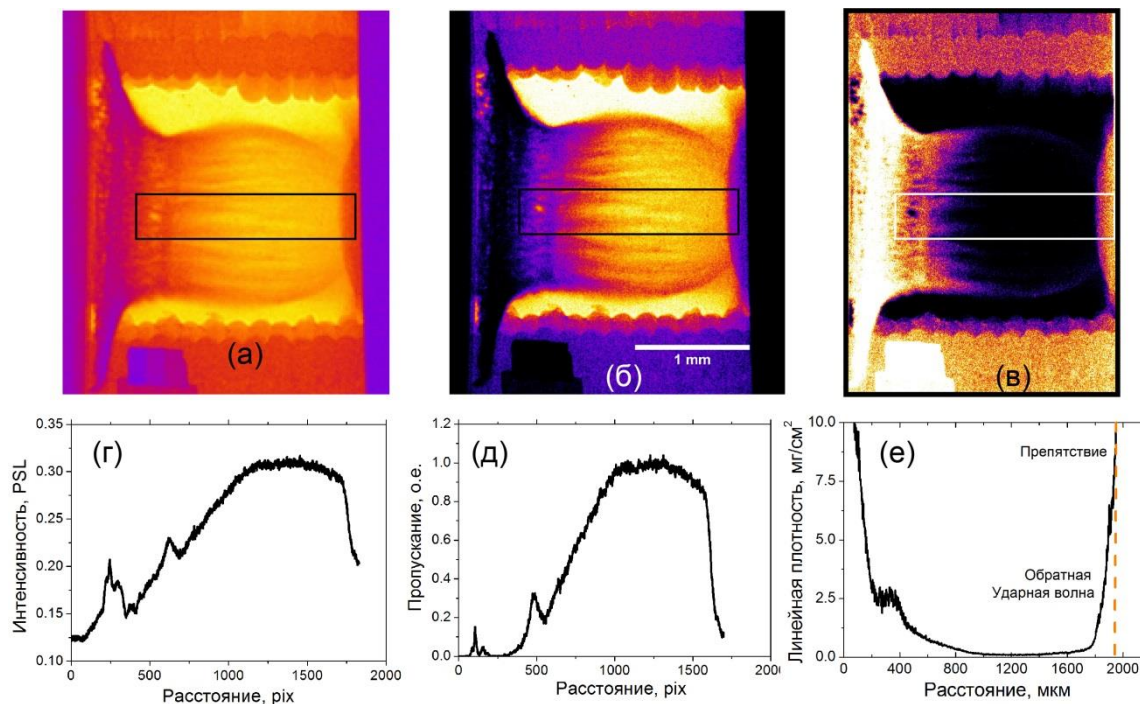


Рисунок 13. Использование метода рентгеновской радиографии. (а) Исходное изображение получено через 90 нс после действия основного лазера. Фон и «жесткая» часть рентгеновского излучения вычитаются в (б). (в) Конечный результат, с переводом в линейную плотность. Ниже в (г, д, е) даны соответствующие прописи для указанного на изображении профиля.

Поэтому был выполнен соответствующий эксперимент, в котором плазменный поток создавался с задней стороны твердотельной мишени и сталкивался с препятствием. Для создания исследуемого плазменного объекта использовался (рисунок 12) лазерный пучок, облучающий с энергией 600 Дж и временем импульса 1.5 нс твердотельную мишень при размере пятна фокусировки 300 мкм. При этом создавался поток, расширяющийся с ее задней стороны и воздействующий на твердотельное препятствие, расположенное на расстоянии ~ 3 мм. На рисунке 13 пошагово показана процедура восстановления профиля линейной плотности из регистрируемых радиографических данных: вычитание вклада жесткой части спектра источника, преобразование карты пропускания объекта в карту линейной плотности в предположении квазимонохроматического источника подсветки. Это позволило определить время зарождения и эволюцию ударной волны в

приповерхностном слое у препятствия, измерить степень сжатия и скорость ее распространения (рисунок 14). Никаким другим способом это сделать нельзя, т.к. в этом диапазоне плотностей плазма непрозрачна для оптического излучения. Скорость налетающего потока плазмы и скорость обратной ударной волны составили $v_{flow} = 50$ км/с и $v_{shock} = 10$ км/с соответственно. Положение фронта ударной волны составило $h = 300$ мкм от поверхности препятствия при достижении максимальной степени сжатия $k = \frac{n_{shock}}{n_{flow}} = 8 \div 15$.

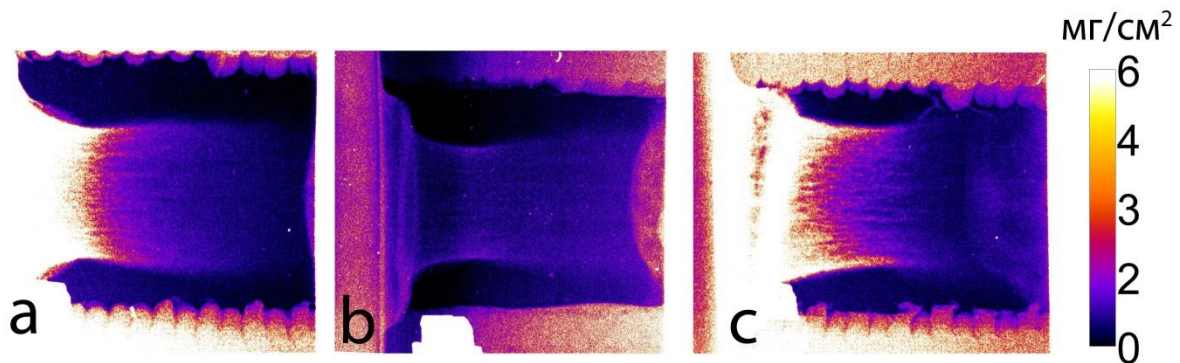


Рисунок 14. Временная эволюция экспериментального потока с помощью использованного в работе метода радиографии. Плазменный поток распространяется слева направо. Задержка времени для радиографии: (a) – 90 нс, (b) – 120 нс, (c) – 180 нс.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. С помощью методов рентгеновской диагностики построены двумерные рентгеновские изображения струй во внешнем полоидальном магнитном поле 20 Тл, образующиеся в результате взаимодействия лазерного излучения с плотностью потока 10^{13} Вт/см² с твердотельной мишенью. Разработан программный код “AnDi” для учета нелинейной дисторсии спектрального изображения, обеспечивший корректность определения пространственных масштабов и точность в определении отношений интенсивности спектральных линий в различных сечениях протяженных плазменных объектов.

2. На основе рентгеноспектральных данных получены пространственные профили электронной температуры и плотности сверхзвуковой плазменной струи с астрофизическим подобием и аспектным соотношением > 10 . Показано, что эффект коллимации плазменного потока вдоль линий напряженности магнитного поля в 20 Тл в момент выравнивания плазменного и магнитного давлений сохраняется при увеличении угла между линиями напряженности магнитного поля и нормалью к поверхности лазерно-облучаемой мишени от 0 вплоть до 45 градусов, при этом качество коллимации с ростом угла ухудшается.

3. При экспериментальном моделировании формирования замагниченных аккреционных колонн молодых звезд доказано образование горячей плазменной оболочки. На основе анализа рентгеновских спектров излучения лабораторной плазмы в области взаимодействия измерены параметры двухкомпонентной плазмы

для амплитуды магнитного поля 6 и 20 Тл. Предложено возможное объяснение снижения наблюдаемой светимости аккреционных колонн в астрофизических объектах в рентгеновском диапазоне спектра за счет эффектов самопоглощения в горячей плазменной оболочке.

4. Развита методика квазимонохроматической рентгеновской радиографии с использованием лазерно-плазменного источника пикосекундной длительности для исследования плотной плазмы и определения линейной плотности короткоживущего плазменного объекта. В радиографических данных обеспечено увеличение соотношения сигнал-шум более чем на порядок, при сохранении пространственного разрешения на уровне 20 мкм, за счет использования лазерного импульса увеличенной длительности в 10 пс на основной лазерной частоте, размещения перед апертурой детектора щели из постоянных магнитов и специального набора фильтров, а также применения мишеней из вертикально ориентированных микронных проволок.

5. Развита методика получения спектрально-селектированных радиографических изображений в поточечной проекционной геометрии при использовании фильтров с К-краем поглощения, лежащем в области характеристического излучения источника подсветки, с определением спектра прошедшего излучения методом ступенчатых фильтров. Метод апробирован в эксперименте по лабораторному моделированию магнитных катаклизмических переменных полярного типа, при столкновении сколламированного потока плазмы, движущегося со скоростью 50 км/с, с твердотельной преградой. Получены итоговые карты линейных плотностей плазмы в области взаимодействия в $0.1-10 \text{ мг/см}^2$, зарегистрировано образование короткоживущей обратной ударной волны, определены ее скорость и степень сжатия плазмы.

3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 6 статей в ведущих рецензируемых журналах:

1. Revet, G., Chen, S. N., Bonito, R., Khiar, B., **Filippov, E.**, Argiroffi, C., Higginson, D. P., Orlando, S., Béard, J., Blecher, M., Borghesi, M., Burdonov, K., Khaghani, D., Naughton, K., Pépin, H., Portugall, O., Riquier, R., Rodriguez, R., Ryazantsev, S. N., Skobelev, I. Yu., Soloviev, A., Willi, O., Pikuz, S., Ciardi, A. and Fuchs, J. Laboratory unravelling of matter accretion in young stars // *Science Advances* 2017. Vol. 3 (11), e1700982
2. Higginson, D.P., Revet, G., Khiar, B., Béard, J., Blecher, M., Borghesi, M., Burdonov, K., Chen, S.N., **Filippov, E.**, Khaghani, D., Naughton, K., Pépin, H., Pikuz, S., Portugall, O., Riconda, C., Riquier, R., Ryazantsev, S.N., Skobelev, I.Yu., Soloviev, A., Starodubtsev, M., Vinci, T., Willi, O., Ciardi, A. and Fuchs, J. Detailed characterization of laser-produced astrophysically-relevant jets formed via a poloidal magnetic nozzle // *High Energy Density Phys.* 2017. Vol. 23. P. 48–59.

3. Higginson D.P., Khair B., Revet G., Béard J., Blecher M., Borghesi M., Burdonov K., Chen S.N., **Filippov E.**, Khaghani D., Naughton K., Pépin H., Pikuz S., Portugall O., Riconda C., Riquier R., Rodriguez R., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Soloviev A., Starodubtsev M., Vinci T., Willi O., Ciardi A., Fuchs J. Enhancement of quasistationary shocks and heating via temporal staging in a magnetized laser-plasma jet // *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 119 (25), 255002.
4. **Filippov E.D.**, Pikuz S.A., Skobelev I.Yu., Ryazantsev S.N., Higginson D.P., Khaghani D., Revet G., Chen S.N., Fuchs J. Parameters of supersonic astrophysically-relevant plasma jets collimating via poloidal magnetic field measured by X-ray spectroscopy method// *Journal of Physics: Conference Series* 2016. Vol. 774, 012114.
5. Belyaev, V. S., Zagreev, B. V., Kedrov, A. Y., Lobanov, A. V., Matafonov, A. P., Bolshakov, V. V., A. B. Savel'ev, I.M.Mordvintsev, I. N. Tsymbalov, S. A. Shulyapov, S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, **E. D. Filippov**, A.Ya.Faenov, Krainov, V. P. Promising lines of research in the realms of laboratory nuclear astrophysics by means of powerful lasers // *Physics of Atomic Nuclei* 2016. Vol. 79(5), c. 648–665
6. Soloviev A., Burdonov K., Chen S.N., Ereemeev A., Revet G., Pikuz S., **Filippov E.**, Cerchez M., Gangly T., Sladkov A., Korzhimanov A., Ginzburg V., Khazanov E., Kochetkov A., Kuzmin A., Shaykin I., Shaykin A., Yakovlev I., Starodubtsev M., Fuchs J. Laboratory investigation of magnetized laser plasmas expansion into the vacuum // *Журнал прикладной спектроскопии* 2016. V.83 (6-16), p. 409.
7. **Filippov E.D.**, Revet G., Cerchez M., Skobelev I.Yu., Ryazantsev S.N., Chen S., Pikuz S.A and Fuchs J. Studying the supersonic astrophysically-relevant plasma jets collimating via poloidal magnetic field in laboratory // *Abstracts of 44th EPS Conference on Plasma Physics*, Belfast, UK. 2017. Vol. 41F, O5.417
8. **Filippov E.**, Pikuz S., Ryazantsev S., Skobelev I. Yu., Fuchs J. Studying the supersonic astrophysically-relevant plasma jets collimating via poloidal magnetic field in laboratory // *Book of abstracts of International conference on extreme light ICEL-2017*.
9. **Filippov E D**, Pikuz S A, Skobelev I Yu, Ryazantsev S N, Higginson D P, Khaghani D, Revet G, Chen S N and Fuchs J. Parameters of supersonic astrophysically-relevant plasma jets collimating via poloidal magnetic field measured by X-ray spectroscopy method. // *Book of abstracts of XXXI International Conference on Equations of State for Matter, ELBRUS-2016*.
10. Ciardi A., Fuchs J., Nicolas L., Smets R., Revet G., Gangolf T., Beard J., Chen S.N., Cerchez M., Pikuz S., **Filippov E.**, Safronova M. First results on electromagnetic ion streaming instabilities in magnetized laser experiments // *Book of Abstracts 11th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics HEDLA-2016, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California, USA*
11. **Филиппов Е.Д.**, Пикуз С.А., Скобелев И.Ю., Рязанцев С.Н., Хиггинсон Д.П., Реве Г., Чен С. и Фукс Дж. Определение сверхзвуковых плазменных струй, коллимированных полоидальным магнитным полем с помощью рентгеноспектральных методов с астрофизическим подобием // *Материалы X российской конференции "Современные средства диагностики плазмы и их применение"*, Москва, 2016.

12. **Filippov E D**, Pikuz S A, Skobelev I Yu, Higginson D.P., Khaghani D., Revet G., Chen S.N. and Fuchs J. Spectroscopic measurements on laser-produced plasma jets collimated via poloidal magnetic field // Book of abstracts of 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2016.
13. Kroll F., Pelka A., Albertazzi B., Brack F., Brambrink E., Cowan T., Drake P., Falize E., **Filippov E.**, Kuramitsu Y., Kuranz C., Lamb D., Levesque J., Li C., Manuel M., Michel T., Morita T., Ozaki N., Pikuz S., Rigon G., Rödel M., Sakawa Y., Schramm U., Shimogawara H., Van Box Som L., and Koenig M. Experimental study of accretion processes in X-ray binary stars using an external B-field. // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2017, c. 159.
14. Condamine, F.P., Renner, O., **Filippov, E.D.**, Angelo P., Deschaud, B., Pikuz, S., Kurnaev, V.A., Lisitsa, V.S., Astapenko, V.A., Rosmej, F.B. Study of high-resolution $K\alpha$ emission induced by suprathermal electrons generated by LULI2000 kJ-laser interacting with copper // Book of abstracts of 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2016.
15. Revet G., Chen S.N., Bonito R., Khiar B., **Filippov E.**, Argiroffi C., Higginson D.P., Orlando S., Béard J., Blecher M., Borghesi M., Burdonov K., Khaghani D., Naughton K., Pépin H., Portugall O., Riquier R., Rodriguez R., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Soloviev A., Willi O., Pikuz S., Ciardi A., and Fuchs J. Laboratory unravelling of matter accretion in young low-mass stars. // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2017.
16. Pikuz S. A., **Filippov E. D.**, Ryazantsev S. N., Skobelev I. Yu, Revet G., Higginson D. P., Chen S.N., Albertazzi B., Soloviev A. A., Beard J., Khiar B., Ciardi A., Faenov A. Ya., Pepin H., and Fuchs J. X-ray Spectroscopy Diagnostics on Supersonic Astrophysically-relevant Magnetized Plasma Flows // Book of abstracts of 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2016
17. **Filippov E D**, Pikuz S A, Brambrink E, Koenig M, Albertazzi B and Pelka A. X-ray radiography measurements of short-lived hydrodynamic phenomena in astrophysically relevant plasma flows // Book of abstracts of XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, ELBRUS-2017, c.83.
18. Pikuz S.A., **Filippov E.D.**, Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Revet G., Higginson D.P., Chen S.N., Albertazzi B., Soloviev A.A., Beard J., Khiar B., Ciardi A., Faenov A.Ya., Pepin H., and Fuchs J. X-ray spectroscopy diagnostics to study complex supersonic plasma flows with astrophysical relevance in laser plasma// Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2017, c. 167.
19. Soloviev A., Burdonov K., Chen S. N., Ereameev A., Revet G., Pikuz S., **Filippov E.**, Cerchez M., Gangly T., Sladkov A., Korzhimanov A., Ginzburg V., Khazanov E., Kochetkov A., Kuzmin A., Shaykin I., Shaykin A., Yakovlev I., Starodubtsev M., and Fuchs J. Laboratory investigation of laser plasma expansion across the ambient magnetic field // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, Nizhny Novgorod, 2017.