

*На правах рукописи*



**Осипов Сергей Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ И НЕТЕПЛОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ  
С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЧАСТИЦАМИ**

01.03.02 — Астрофизика и радиоастрономия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2009

Работа выполнена в секторе теоретической астрофизики Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН и Учреждении Российской академии наук Академическом физико-технологическом университете.

- Научный руководитель: - профессор, доктор физ.-мат. наук  
**А. М. Быков** (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)
- Официальные оппоненты: - профессор, доктор физ.-мат. наук  
**В. А. Догель** (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва)
- профессор, доктор физ.-мат. наук  
**В. М. Остряков** (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург)
- Ведущая организация: - Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулковое (Пулковское шоссе, д. 65/1, 196140, Санкт-Петербург)

Защита состоится 10 декабря 2009 года в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Автореферат разослан 9 ноября 2009 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета:  
кандидат физ.-мат. наук



А. М. Красильщиков

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Процессы быстрого выделения энергии в астрофизической плазме часто сопровождаются сверхзвуковыми течениями и формированием ударных волн. Особую роль ударные волны играют в ускорении заряженных частиц до ультррелятивистских энергий, формировании спектров нетеплового излучения и генерации магнитных полей в объектах различной природы. Примеры составляют длинный ряд, включающий гамма-всплески, остатки сверхновых звезд (ОСН), скопления галактик и межгалактическую среду [1–6].

Наблюдения остатков сверхновых звезд на черенковских телескопах позволили за последние пять лет получить убедительные доказательства ускорения частиц до энергий свыше  $10^{14}$  эВ в этих источниках [3]. В это же время, наблюдения с разрешением около секунды дуги на современных орбитальных рентгеновских обсерваториях обнаружили в остатках сверхновых переменные во времени нетепловые структуры, вероятно синхротронного происхождения. Два недавно открытых протяженных ОСН RXJ1713.7-3946 и G266.2-1. (Vela Jr.) имеют континуальные рентгеновские спектры, наиболее вероятно, синхротронного происхождения [7–10]. Синхротронная компонента также была обнаружена в тонких нитях на периферии молодых ОСН Тихо, Кеплер, Кассиопея А [11–15]. Наличие переменных структур синхротронного происхождения интерпретируются как возможное доказательство процессов быстрого ускорения частиц до энергий свыше  $10^{14}$  эВ с одновременным сильным (до нескольких порядков величины) сверхадиабатическим усилением локального магнитного поля в окрестности бесстолкновительных ударных волн в ОСН. Адекватная интерпретация данных наблюдений требует количественного моделирования и детального понимания нетепловых процессов в бесстолкновительных ударных волнах.

Важным аспектом моделирования процессов, происходящих вблизи сильных бесстолкновительных ударных волн в остатках сверхновых, является возможность значительного усиления турбулентных магнитных полей в префронте. Усиление магнитных флуктуаций может быть реализовано за счет неустойчивостей анизотропных распределений энергичных частиц в префронте сильной ударной волны. В свою очередь, турбулентные магнитные поля влияют на рассеяние заряженных частиц, ускоряемых на фронте ударной волны. В совокупности процессы ускорения частиц и генерации магнитного поля определяют спектры наблюдаемого излучения, пространственную структуру и переменность наблюдаемого рентгеновского излучения.

Лазерная плазма с успехом используется для изучения в лабораторных условиях физических процессов, играющих существенную роль в астрофизической плазме. В частности, исследуются процессы генерации сильных магнитных полей релятивистскими частицами и их нетепловое излучение. Хотя пространственные масштабы лабораторных и космических объектов различаются на многие порядки величин, характерные безразмерные параметры, определяющие физическое состояние и эволюцию таких объектов, в ряде случаев оказываются близкими, что позволяет экспериментально проверять некоторые важные качественные и количественные предсказания моделей астрофизической плазмы. Особый интерес представляет возможность количественной проверки моделей, применяемых для расчетов явлений в астрофизической плазме с ускоренными частицами. Кинетические модели, гибридные и прямые численные модели плазмы, могут быть детально проверены в лабораторных экспериментах с плазмой, содержащей релятивистские электроны, ускоренные лазерным импульсом.

В силу вышесказанного, данная работа посвящена исследованию процессов генерации магнитных полей и формированию нетеплового излучения в плазме с релятивистскими частицами с приложением как к астрофизическим объектам (остатки сверхновых), так и к экспериментам с лазерной плазмой [16, 17].

### **Цели работы**

1. Развить метод описания плазмы с анизотропными распределениями релятивистских частиц. Получить уравнения, описывающие длинноволновую динамику плазмы, содержащей релятивистские частицы с анизотропной функцией распределения.

2. Исследовать длинноволновые неустойчивости плазмы с током релятивистских частиц в префронте ударной волны в остатке сверхновой звезды. Оценить величину усиления крупномасштабных магнитных полей в префронте.

3. Исследовать влияние размытия границ мишени и амбиполярного поля на спектры переходного излучения электронов, ускоренных лазерным импульсом.

4. Исследовать влияние полного внутреннего отражения на спектры излучения Вавилова–Черенкова электронов, ускоренных лазерным импульсом.

### **Научная новизна**

1. Впервые получены усредненные уравнения, описывающие длинноволновую динамику плазмы, содержащей анизотропное распределение ускоренных частиц. Полученные уравнения применимы для исследования длинноволновых возмущений в префронте ударных волн в остатках сверхновых звезд.

2. Впервые в рамках усредненных уравнений, описывающих длинноволновую динамику плазмы с ускоренными частицами, получены показатели роста длинноволновых возмущений. Показана возможность существенного усиления магнитных полей в префронте ударных волн в остатках сверхновых звезд.

3. Впервые исследовано влияние размытия границ мишени и амбиполярного поля на когерентное переходное излучение электронов, ускоренных лазерным импульсом. Предложен метод экспериментального определения размытия границы и величины амбиполярного поля по спектрам переходного излучения ускоренных электронов.

4. Впервые исследовано влияние полного внутреннего отражения на спектр излучения Вавилова–Черенкова в лазерных мишенях. Предложен метод экспериментального определения энергии быстрых электронов по форме спектра излучения Вавилова–Черенкова.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность результатов, полученных аналитически и путем численного моделирования, подтверждается использованием апробированных математических и численных методов в рамках физических приближений, применимость которых ограничена четко сформулированными критериями. Применяемый метод усреднения уравнений МГД сравнивается с методами теории  $\alpha$ -динамо, результаты которой подтверждаются численными расчетами. Теоретически рассчитанные спектры когерентного переходного излучения электронов, ускоренных лазерным импульсом, хорошо согласуются с совокупностью данных лабораторных экспериментов.

### **Научная и практическая ценность работы**

Результаты исследований генерации длинноволновых возмущений в префронте ударных волн в остатках сверхновых важны для построения моделей ускорения частиц в области энергий порядка и выше  $10^{14}$  эВ. Эти результаты позволяют детально описывать нелинейные процессы ускорения частиц в окрестности фронта ударной волны, модифицированной ускоренными частицами. Проведенные расчеты позволяют оценивать максимальные энергии ускоренных частиц и величины усиленных магнитных полей, что необходимо для детальной интерпретации наблюдаемого нетеплового излучения остатков сверхновых звезд в диапазоне от радио- до гамма лучей.

Результаты работы, относящиеся к исследованиям свойств электронов, ускоренных лазерным импульсом, позволяют определять по наблюдаемому когерентному переходному излучению ускоренных электронов такие характеристики экспериментальной системы, как масштаб размытия задней границы мишени и величину амбиполярного поля на ее задней границе. Эти результаты позволяют определять энергию ускоренных лазер-

ным импульсом электронов по спектрам когерентного излучения Вавилова–Черенкова.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Метод описания динамики длинноволновых возмущений турбулентной космической плазмы с анизотропным распределением релятивистских частиц.

2. Результаты исследования дисперсионных характеристик плазмы с током релятивистских частиц и развитой мелкомасштабной турбулентностью.

3. Механизм усиления длинноволновых возмущений магнитного поля перед фронтом сильной бесстолкновительной ударной волны в остатках сверхновых звезд.

4. Исследование влияния размытия задней границы мишени и амбиполярного поля на интенсивность когерентного переходного излучения электронов мишени, ускоренных лазерным импульсом. Метод оценки масштаба размытия границы плазмы и напряженности амбиполярного поля по соотношению амплитуд гармоник в спектре переходного излучения ускоренных электронов.

5. Исследование спектра когерентного излучения Вавилова–Черенкова в лазерных мишенях. Метод определения энергии ускоренных электронов, связанный с эффектом полного внутреннего отражения.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2006 по 2009 гг. и изложены в 8 печатных работах (включая 4 статьи в реферируемых журналах, входящих в Перечень ВАК). Представленные результаты докладывались на четырех международных конференциях.

1. Bykov A., Osipov S., Toptygin I. Long-wavelength non-resonant instabilities in cosmic ray shock precursors // 37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, in Montreal, Canada., p. 428, 2008.

2. Bocchino F., Krassilchtchikov A.M., Kretschmar P., Bykov A.M., Uvarov Yu.A., Osipov S.M., INTEGRAL observations of the region of the supernova remnant IC443 // 36th COSPAR Scientific Assembly. Held 16 - 23 July 2006, in Beijing, China, 2006.

3. С.М. Осипов, К.Ю. Платонов Переходное излучение быстрых электронов лазерной плазмы в тонких фольгах с учетом амбиполярного поля и размытия границы фольги // «Laser Optics 2006», LO'2006, June 30 – July 3, St.-Petersburg, Russia, 2006.

4. S.M. Osipov, K.Yu. Platonov, A.A. Andreev Coherent X-ray bremsstrahlung of laser plasma fast electrons from layer target // «Laser Optics 2008», LO'2008, June 30 – July 3, St.-Petersburg, Russia, 2008.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения (глава 1), пяти глав и заключения, содержит 102 страницы печатного текста, 22 рисунка и список литературы, включающий 104 наименования.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении (глава 1)** к диссертации сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность работы, новизна и достоверность результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В **главе 2** выполнено усреднение уравнений динамики плазмы, содержащей ускоренные частицы, по масштабам меньше длины пробега релятивистских частиц.

После введения (параграф 2.1), в параграфе 2.2 приведен кинетический вывод дисперсионного соотношения мелкомасштабных мод, которые усиливаются за счет механизма Белла [18]. На основе дисперсионных и поляризационных свойств данных мод в последующих параграфах выполнено усреднение уравнений динамики плазмы. В работе [18] использована система гидродинамических уравнений, которая дает тот же результат, что и кинетический подход.

В параграфе 2.3 выполнено усреднение уравнений посредством построения уравнения для средней электродвижущей силы с учетом наличия в системе анизотропного распределения релятивистских частиц. Получена система уравнений, описывающих динамику крупномасштабных МГД-величин. Уравнение движения плазмы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}}\nabla)\bar{\mathbf{V}} = & -\frac{1}{\rho}\nabla(P + P_{cr}) + \frac{\eta_t}{c\rho}((\bar{j}_x^{cr} - en_{cr}\bar{V}_x)\mathbf{e}_y - (\bar{j}_y^{cr} - en_{cr}\bar{V}_y)\mathbf{e}_x) + \\ & + \frac{1}{4\pi\rho}((\nabla \times \bar{\mathbf{B}}) \times \bar{\mathbf{B}}) + \nu_{\Delta}\bar{\mathbf{V}}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\eta_t = \tau_{cor} \int_{k_{z0}}^{\infty} dk_z \frac{1}{\sqrt{4\pi\rho}} \sqrt{k_1 k_z} \langle b^2(k_z) \rangle, \quad (2)$$

где  $\bar{\mathbf{V}}$ ,  $\bar{\mathbf{B}}$  - крупномасштабные скорость среды и магнитное поле,  $\tau_{cor}$  - корреляционное время мелкомасштабной турбулентности,  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  - единичные вектора вдоль осей, перпендикулярных магнитному полю,  $\bar{j}^{cr}$  - крупномасштабный ток ускоренных частиц,  $P$ ,  $P_{cr}$  - давления фоновой плазмы и ускоренных частиц,  $\langle b^2(k_z) \rangle$  - спектр мелкомасштабной турбулентности,

$k_1 = \frac{4\pi}{c} \frac{\dot{j}^{cr}}{\mathbf{B}}$ ,  $n_{cr}$  - концентрация ускоренных частиц. В уравнении (1) при

усреднении были оставлены слагаемые, дающие наибольший вклад в рассмотренные далее дисперсионные соотношения. Впервые полученное второе слагаемое в правой части уравнения (1) приводит к развитию крупномасштабной неустойчивости. Метод усреднения электродвижущей силы использованный в работе является обобщением методов теории среднего поля, используемых в  $\alpha$ -динамо теории [20], на системы с токами релятивистских частиц.

В главе 3 впервые исследованы длинноволновые неустойчивости замагниченной турбулентной плазмы с анизотропными распределениями релятивистских частиц. Особенности анализа связаны с необходимостью расчета кинетического отклика распределения релятивистских частиц на длинноволновые возмущения магнитного поля.

В параграфе 3.1. приводится вывод выражений для фурье-образов отклика тока и давления ускоренных частиц на возмущения магнитного поля. Расчет выполнен на основе модельного кинетического уравнения с интегралом столкновений в приближении сильного (бомовского) рассеяния релятивистских частиц:

$$\begin{aligned}\delta \mathbf{j}^{cr} &= \frac{eu_{0\parallel}n_{cr}}{B_0} \frac{k_{\parallel}}{k_{\parallel}^2 + \frac{1}{\eta^2}k^2} \left\{ k_{\parallel} \delta \mathbf{b} + \frac{1}{\eta} \mathbf{k} \times \delta \mathbf{b} \right\}, \\ \delta P_{cr} &= \frac{iB_0}{c} \frac{eu_{0\parallel}n_{cr}}{B_0} \frac{e_{\parallel}}{k_{\parallel}^2 + \frac{1}{\eta^2}k^2} \frac{1}{\eta} \left\{ k_{\parallel} \delta \mathbf{b} + \frac{1}{\eta} \mathbf{k} \times \delta \mathbf{b} \right\},\end{aligned}\quad (3)$$

где  $B_0$  - постоянное магнитное поле,  $n_{cr}$  - концентрация ускоренных частиц,  $\mathbf{k}$  - волновой вектор,  $u_{0\parallel}$  - скорость ударной волны (направление скорости совпадает с направлением постоянного магнитного поля),  $\delta \mathbf{b}$  - возмущение крупномасштабного магнитного поля,  $\eta$  - отношение длины пробега релятивистской частицы к ее гирорадиусу.

В параграфе 3.2 получено и исследовано дисперсионное соотношение для длинноволновых мод:

$$\begin{aligned}(\omega^2 - k_{\parallel}^2 v_a^2 - ik_{\parallel} B_0 W_0) \{ \omega^4 - (a_0^2 + v_a^2) k^2 \omega^2 + k_{\parallel}^2 k^2 v_a^2 a_0^2 - ik_{\parallel} B_0 [(\omega^2 - a_0^2 k_{\parallel}^2) W_3 + \\ + k_{\perp} k_{\parallel} a_0^2 W_4] \} - k_{\parallel}^2 B_0^2 W_1 [(\omega^2 - k_{\parallel}^2 a_0^2) W_2 - k_{\perp} k_{\parallel} a_0^2 W_5] = 0,\end{aligned}\quad (4)$$

где коэффициенты  $W_0 - W_5$  - функции волнового вектора и параметров фурье-образов тока и давления ускоренных частиц (3). Характерная угловая зависимость частот мод приведена на рис. 1. Здесь  $\theta$  - угол между волновым вектором и постоянным магнитным полем. Показатель роста для наиболее быстро растущей моды имеет максимум при  $\cos \theta = 1/\eta$ . Поэтому в режиме слабого рассеяния частиц (т.е. при безразмерном пробеге  $\eta \gg 1$ ) наиболее быстро растущая мода распространяется почти поперек постоянного магнитного поля, в отличие от случая мелкомасштабных мод [18, 19], для которых максимум усиления соответствует распространению моды вдоль постоянного магнитного поля. Более того, длинноволновые моды растут только



для одного направления распространения и затухают для противоположного. Особый интерес представляет вопрос о генерации длинноволновых возмущений магнитного поля в окрестности сильных ударных волн оболочек остатков сверхновых волн. Наблюдения указывают на ударные волны оболочек как наиболее вероятный источник ультрарелятивистских частиц с энергиями достигающими  $10^{14}$  эВ. Быстрое ускорение ультрарелятивистских частиц требует наличия длинноволновых магнитных флуктуаций в префронте ударной волны. Механизм неустойчивости магнитных флуктуаций может усиливать длинноволновые магнитные флуктуации. Поэтому в работе выполнен анализ показателя роста магнитных флуктуаций при характерных для ударных волн в остатках сверхновых звезд параметрах. Показано что время роста турбулентности меньше времени выноса магнитных флуктуаций из области неустойчивости, что позволяет получить необходимое усиление магнитных полей вблизи фронтов сильных ударных волн остатков сверхновых. Исследованы поляризации неустойчивых мод. Показано, что поляризации мод, связанных с быстрой нерезонансной токовой неустойчивостью, заметно отличаются от поляризаций стандартных МГД возмущений альвеновского типа, генерированных резонансными механизмами.

Эффекты ускорения частиц до релятивистских энергий и генерации магнитных полей наблюдаются в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой. Некоторые процессы в лазерной плазме по физической природе сходны с процессами в остатках сверхновых звезд и других астрофизических объектах, содержащих ускоренные частицы. Исследования лазерной плазмы связанные с инерциальным синтезом [21, 22] активно ведутся с 1970-х гг. Другой широкой областью исследования является использование лазерной плазмы в качестве источника пучков ускоренных ионов (см. 23] и цитируемую там литературу). Экспериментальные и теоретические исследования лазерной плазмы позволяют моделировать (после соответствующего масштабирования) процессы, которые происходят в астрофизических объектах (см. например [24]). Потенциально важную роль могут также играть эксперименты, позволяющие проверить точность численных моделей плазмы с высокой плотностью энергии для дальнейшего их применения в астрофизической плазме. Последующие главы диссертации посвящены исследованию ряда аспектов диагностики лазерной плазмы, необходимых для установления точных параметров лазерной системы, таких как энергетическое распределение релятивистских электронов, величина амбиполярного поля, масштаб размытия границ плазменной мишени.

В главе 4 исследовано влияние эффектов размытия границ мишени и амбиполярного поля на переходное излучение электронов, ускоренных лазерным импульсом. Теория переходного излучения в лазерных мишенях разрабатывалась в работах [17, 25], но в этих работах не учитывалась возможность влияния размытия границ и амбиполярного поля на излучение.

В параграфе 4.2 (после вводного параграфа 4.1) приводится вывод

основных уравнений, описывающих переходное излучение при произвольном пространственном изменении диэлектрической проницаемости мишени и произвольном изменении тока ускоренных частиц вдоль оси их распространения.

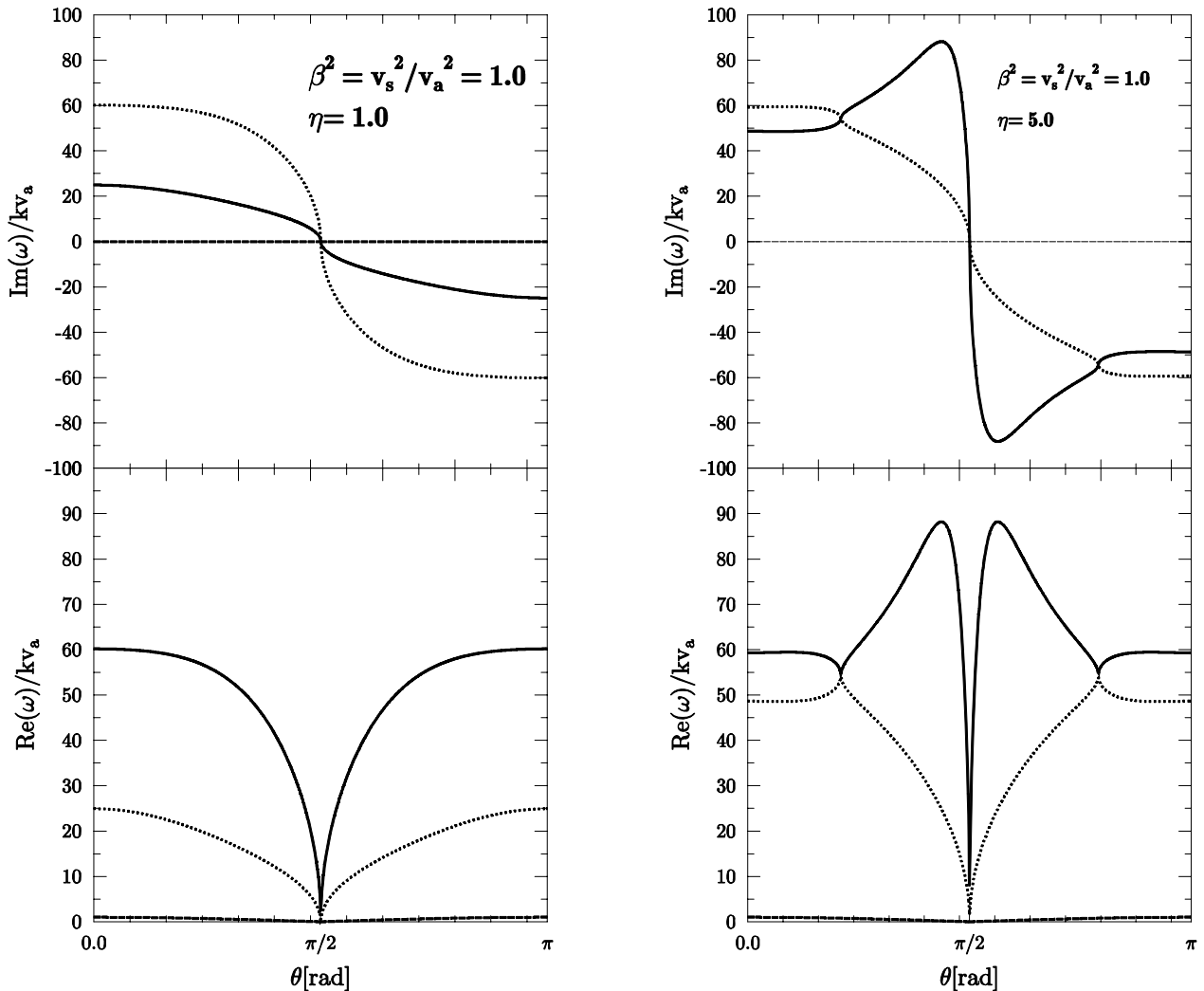


Рис.1. Дисперсное соотношение (угловые зависимости действительной и мнимой части безразмерной частоты) для длинноволновой неустойчивости при безразмерном пробеге ускоренных частиц  $\eta = 1$  (слева) и  $\eta = 5$  (справа)

В параграфе 4.3 рассмотрено влияние размытия границы на спектр излучения. Спектры излучения при резкой задней границе фольги и при границе, размытой на определенном масштабе, приводятся на рис. 2. Энергия переходного излучения падает с увеличением масштаба размытия, то есть при увеличении плавности границы. Размытие границы существенно уменьшает энергию излучения, когда длина волны излучения становится меньше размытия границы, что приводит к уменьшению интенсивности более высоких по частоте излучения гармоник в спектре когерентного пе-

реходного излучения. Это позволяет по соотношению амплитуд гармоник в спектре излучения оценивать масштаб размытия границ мишени.

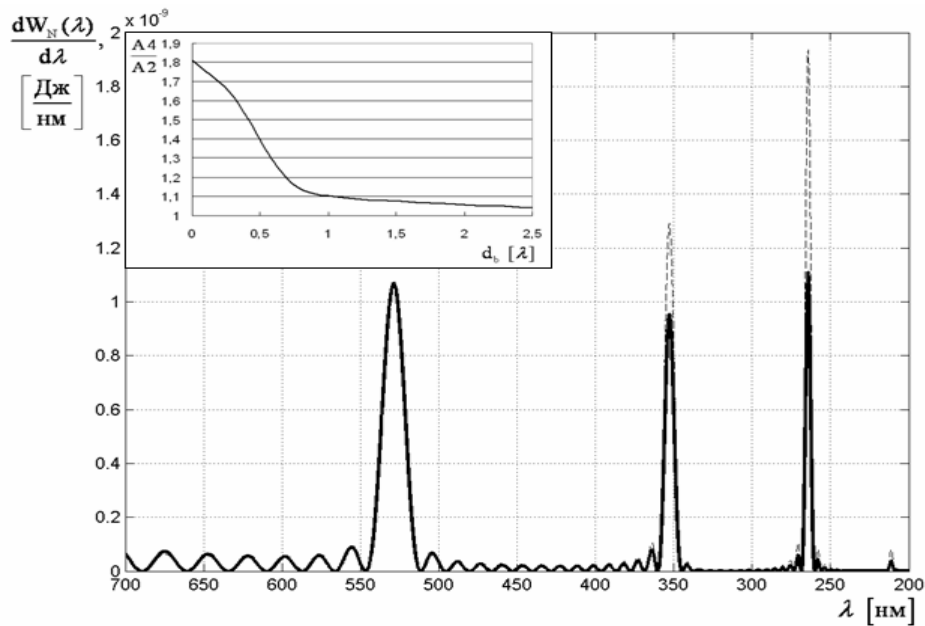
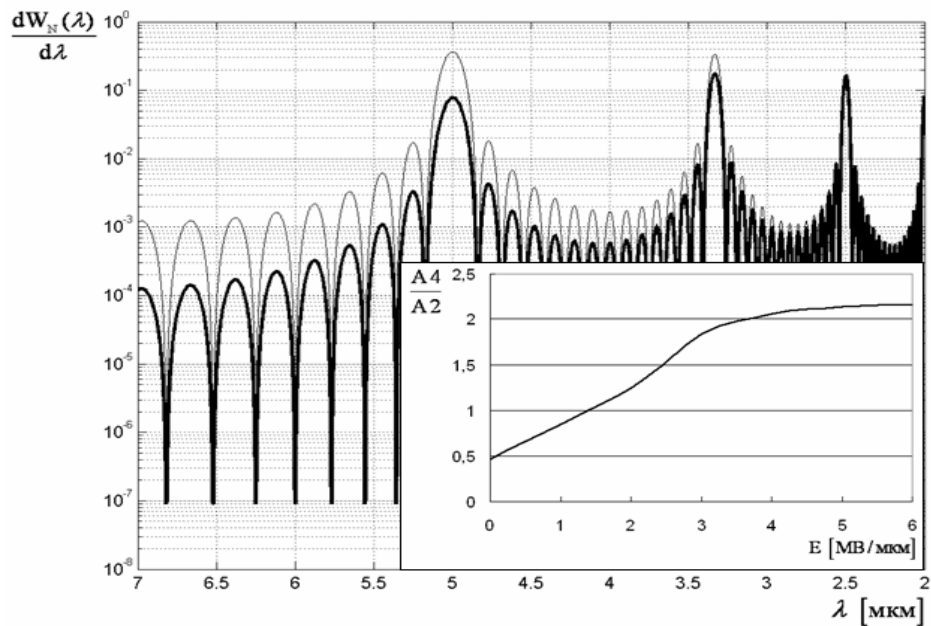


Рис.2. **Вверху:** Влияние размытия границы на спектр переходного излучения. Пунктирная кривая соответствует резкой границе, жирная сплошная кривая – плавной границе,  $d_b = 2.5 \lambda_L$  – длина размытия, где  $\lambda_L$  – длина волны лазерного излучения. На врезке показана зависимость отношения амплитуд четвертой и второй гармоник как функция масштаба неоднородности границы.

**Внизу:** Влияние амбиполярного поля на спектр переходного излучения. Серая кривая соответствует нулевому полю, черная - полю с длиной торможения  $d_a = 0.012 \lambda_L$ . На врезке показана зависимость отношения амплитуды четвертой гармоники к амплитуде второй от величины амбиполярного поля

В параграфе 4.4 рассмотрено влияние амбиполярного поля на спектр когерентного переходного излучения (рис. 2). Энергия переходного излучения падает с увеличением напряженности амбиполярного поля, то есть при уменьшении длины торможения электронов после вылета из мишени. Амбиполярное поле существенно уменьшает энергию излучения, когда длина волны излучения, деленная на  $\sim \pi^2$ , становится больше длины торможения, что приводит к уменьшению интенсивности более низких по частоте излучения гармоник в спектре когерентного переходного излучения. Это позволяет предложить метод определения величины амбиполярного поля по наблюдаемому соотношению амплитуд гармоник в спектре излучения.

В **главе 5** рассмотрен спектр излучения электронов, ускоренных лазерным импульсом, при выполнении условия Вавилова–Черенкова в мишени для быстрых электронов

$$\varepsilon(\omega) > \left(\frac{v}{c}\right)^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды на частоте  $\omega$ ,  $v$  - скорость релятивистской частицы,  $c$  - скорость света. При выполнении условия (5) энергия излучения на несколько порядков превышает энергию излучения переходного излучения частиц, для которых данное условие не выполняется. При выполнении условия

$$\varepsilon(\omega) > \left(\frac{v}{c}\right)^2 + 1, \quad (6)$$

излучение Вавилова–Черенкова претерпевает полное внутреннее отражение на задней границе мишени и не может выйти из мишени в вакуум. Эффект полного внутреннего отражения при определенной зависимости диэлектрической проницаемости мишени от частоты излучения может быть использован для определения энергии излучающих электронов, ускоренных лазерным импульсом.

Спектры переходного излучения и излучения Вавилова–Черенкова приведены на рис. 3 для зависимости диэлектрической проницаемости от частоты

$$\varepsilon(u) = 1 + \frac{0.6(1-u^2)}{(1-u^2)^2 + u^2}, \quad (7)$$

где  $u = \frac{\omega}{\omega_0}$ ,  $\omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  - частота, на которой диэлектрическая проницаемость равна 1,  $\lambda_0 = 200 \text{ нм}$ . Такая зависимость характерна для сред вблизи собственных частот атомов, составляющих данные среды.

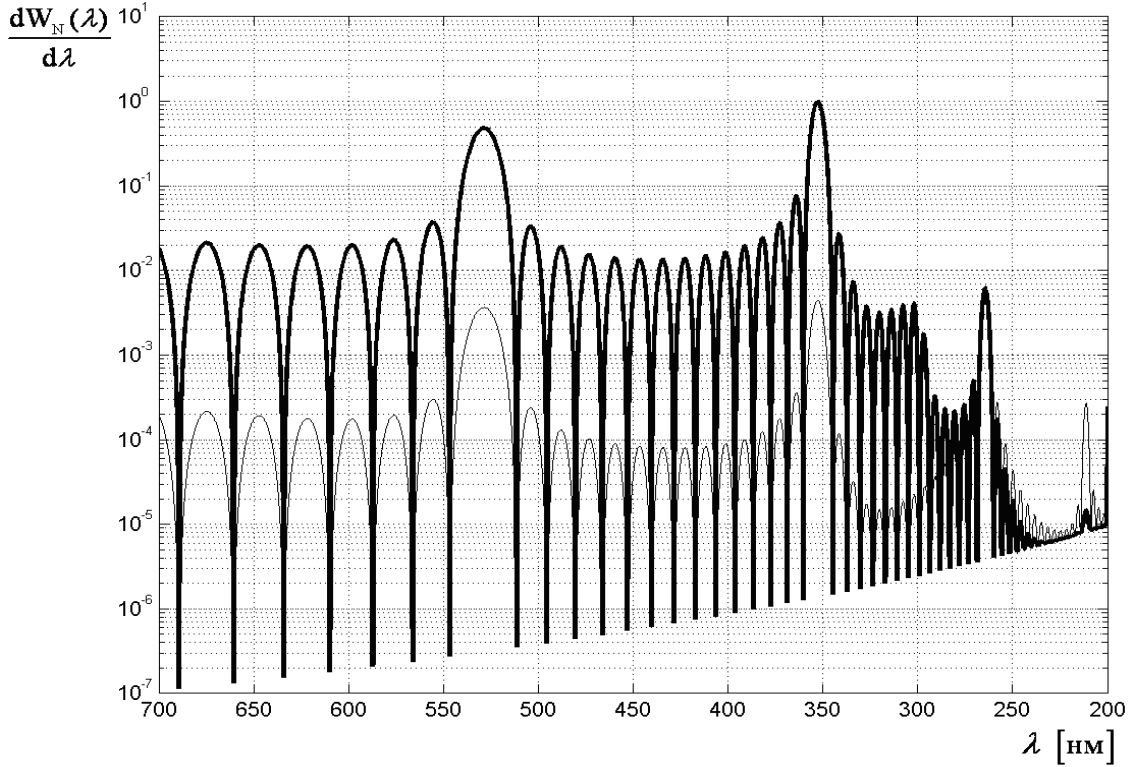


Рис.3. Энергия переходного излучения (серая кривая) и излучения Вавилова-Черенкова (черная кривая) на единицу длины волны

В главе 6 рассмотрено тормозное излучение электронов, ускоренных лазерным импульсом, в слоистой мишени. Поскольку мишень состоит из слоев различной плотности, возникает когерентная составляющая тормозного рентгеновского излучения, которая при определенных условиях может превышать некогерентную. В работе рассчитан спектр излучения моноэнергичных частиц и спектр излучения ускоренных частиц, распределенных по показательному закону (рис. 4). Модельное распределение быстрых электронов по энергии  $\varepsilon_e$  в лазерной мишени, полученное при помощи численного моделирования, может быть аппроксимировано в диапазоне от  $\varepsilon_{\min} = 1$  МэВ до  $\varepsilon_{\max} = 30$  МэВ как:

$$f(\varepsilon_e, t) = \frac{N_{eh}}{\varepsilon_{eh} \left( \exp\left(-\frac{\varepsilon_e^{\min}}{\varepsilon_{eh}}\right) - \exp\left(-\frac{\varepsilon_e^{\max}}{\varepsilon_{eh}}\right) \right)} \exp\left(-\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{eh}}\right), \quad (8)$$

где  $N_{eh} = 2.5 \cdot 10^8$ , характерная энергия  $\varepsilon_{eh}$  соответствует лоренц-фактору горячих электронов  $\gamma_{eh} = 20$ .

В заключении сформулированы основные результаты работы.

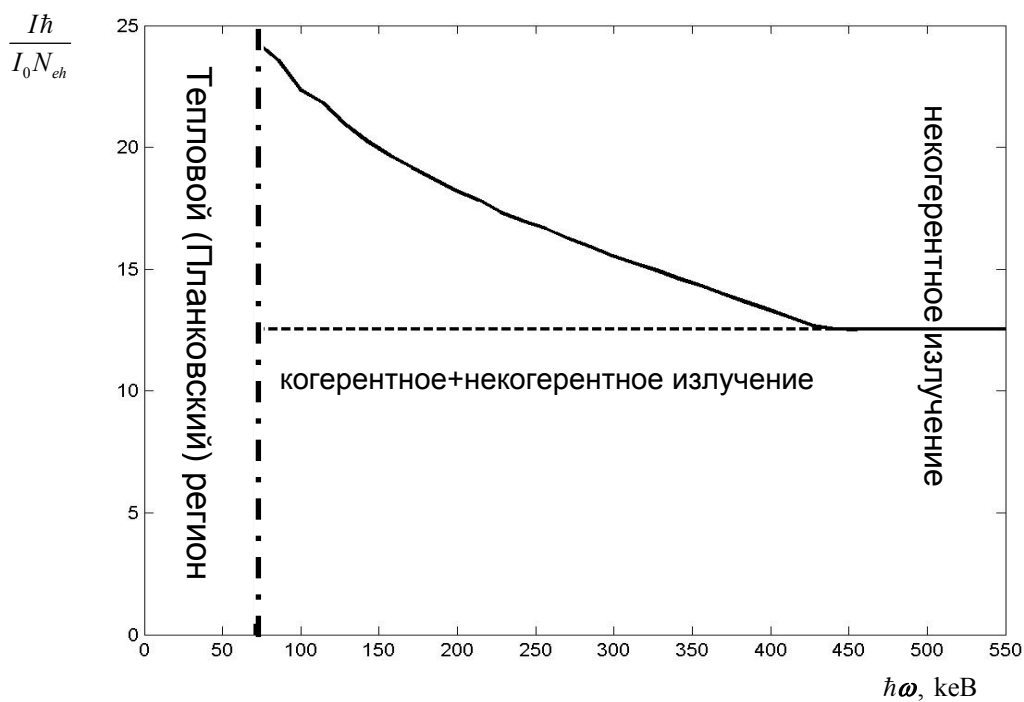
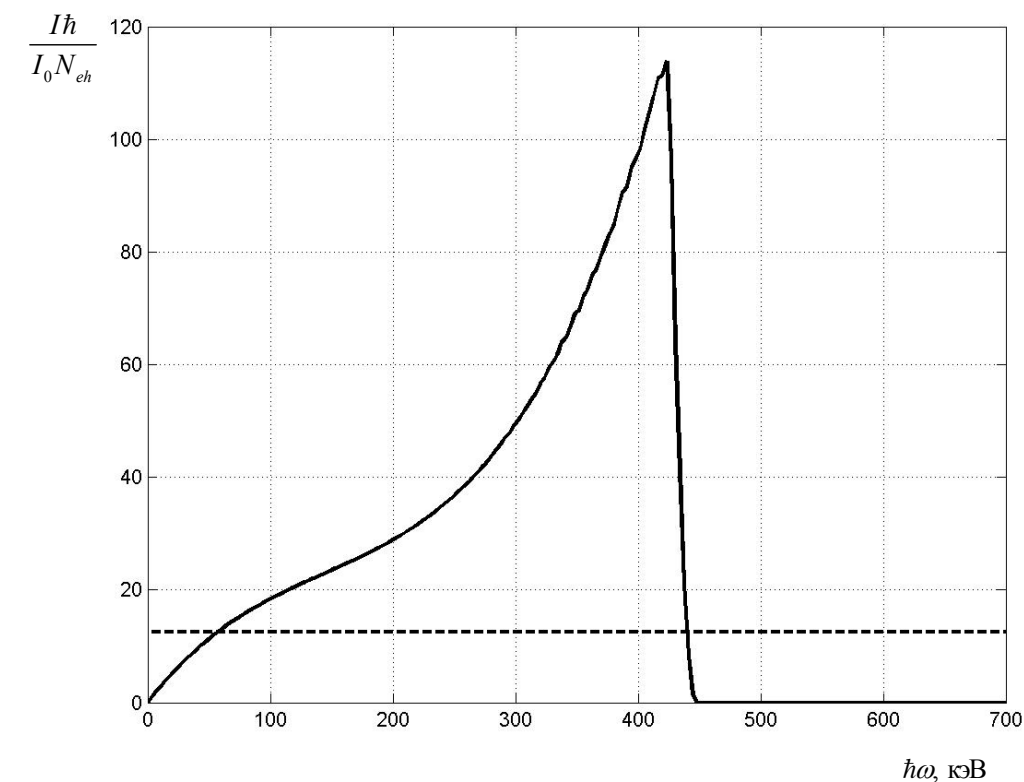


Рис..4. Спектры излучения электронов из мишени толщиной 5 мкм, ускоренных лазерным импульсом с интенсивностью  $10^{20}$  Вт / см<sup>2</sup>.

**Вверху:** Спектр когерентного (сплошная кривая) и некогерентного (пунктирная кривая) жесткого излучения моноэнергичных электронов с лоренц-фактором  $\gamma = 60$ .

**Внизу:** Спектр суммарного (сплошная кривая) и некогерентного (пунктирная кривая) жесткого излучения, проинтегрированный по энергии с  $\gamma = 2 - 60$

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено усреднение уравнений, описывающих магнитогидродинамическое поведение турбулентной плазмы в системе, содержащей электроны, тепловые и обладающие анизотропной функцией распределения по импульсу ускоренные ионы, и получены уравнения, позволяющие описывать динамику длинноволновых возмущений (с длиной волны больше пробега ускоренных частиц) в одножидкостной модели плазмы.

2. Проведен линейный анализ сильной длинноволновой неустойчивости одножидкостной плазмы с ускоренными частицами. Показано, что развитие такой неустойчивости вблизи фронта ударной волны в остатке сверхновой звезды может приводить к тому, что за время сноса турбулентности на фронт крупномасштабные магнитные поля в газе перед фронтом существенно вырастут, и это заметным образом повлияет на процессы ускорения частиц на фронте.

3. Проведено исследование переходного излучения электронов, ускоренных лазерным импульсом, при вылете из мишени. Показано, что размытие границы лазерной мишени приводит к уменьшению интенсивности высоких гармоник в спектре когерентного переходного излучения ускоренных лазерным импульсом электронов, и по соотношению амплитуд гармоник можно оценить масштаб неоднородности плотности плазмы. Показано, что торможение потока ускоренных электронов в амбиполярном электрическом поле приводит к уменьшению интенсивности низких гармоник в спектре когерентного переходного излучения этих электронов, и по соотношению амплитуд гармоник можно оценить напряженность амбиполярного поля.

4. Показано, что в спектре когерентного черенковского излучения ускоренных электронов в лазерных мишенях может возникать провал, связанный с полным внутренним отражением черенковского излучения в тонкой фольге. Этот эффект может быть использован для экспериментального определения энергии ускоренных электронов.

### 4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Быков А.М., Осипов С.М., Топтыгин И.Н. Длинноволновая МГД-неустойчивость в префронте бесстолкновительных ударных волн с ускоренными частицами // Письма в астрономический журнал, т. 35, № 7, с. 1-10, 2009. (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

2. Осипов С.М., Платонов К.Ю., Андреев А.А. Влияние амбиполярного поля и размытия границ мишени на переходное излучение быстрых электронов лазерной плазмы // Оптика и спектроскопия, т. 104, № 3,

с. 385-393, 2008 (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

3. A.A. Andreev, K.Yu. Platonov, S.M. Osipov., Influence of the ambipolar field and the target boundaries inhomogeneity onto the transition radiation of fast electrons in laser plasma // Proc. of SPIE, Vol. 6614, 66140C, 2007 (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

4. Bocchino F., Krassilchtchikov A.M., Kretschmar P., Bykov A. M., Uvarov Yu. A., Osipov S.M., INTEGRAL observations of the SNR IC443 region // Advances in Space Research 41, p. 396-400, 2008. (обработка данных, анализ результатов и подготовка статьи к публикации).

5. Bykov A., Osipov S., Toptygin I., Long-wavelength non-resonant instabilities in cosmic ray shock precursors // 37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, in Montreal, Canada., p.428, 2008. (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

6. Bocchino F., Krassilchtchikov A.M., Kretschmar P., Bykov A.M., Uvarov Yu.A., Osipov S.M., INTEGRAL observations of the region of the supernova remnant IC443 // 36th COSPAR Scientific Assembly. Held 16 - 23 July 2006, in Beijing, China, 2006. (обработка данных, анализ результатов и подготовка статьи к публикации).

7. С.М. Осипов, К.Ю. Платонов, Переходное излучение быстрых электронов лазерной плазмы в тонких фольгах с учетом амбиполярного поля и размытия границы фольги // «Laser Optics 2006», LO'2006, June 30 – July 3, St.-Petersburg, Russia, 2006 (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

8. S.M. Osipov, K.Yu. Platonov, A.A. Andreev Coherent X-ray bremsstrahlung of laser plasma fast electrons from layer target // «Laser Optics 2008», LO'2008, June 30 – July 3, St.-Petersburg, Russia, 2008 (участие в постановке задачи, проведение теоретических и численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).

### Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л., Догель В.А., УФН, т. 158, № 1, с. 3-56 (1989)
- [2] Быков А.М., Топтыгин И.Н., УФН, т. 177, № 2, с. 149-182 (2007)
- [3] Bykov A.M., Dolag K., Durret F., Space Science Reviews, v. 134, p. 119-140 (2008)
- [4] Reynolds S.P., Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 49, p. 89-126 (2008)
- [5] Meszaros P., Reports on Progress in Physics, vol. 69, p. 2259-2321 (2006)
- [6] Ryu D., Kang H., Cho J., Das S., Science, v. 320, p. 909 (2008)



- [7] Koyama K., Kinugasa K., Matsuzaki K., et al., *Publ. of the Astronomical Society of Japan*, v. 49, p. L7-L11 (1997)
- [8] Slane P., Gaensler B.M., Dame T.M., et al., *Astrophysical Journal*, v. 525, p. 357-367 (1999)
- [9] Aschenbach B., *Nature*, v. 396, p 141-142 (1998)
- [10] Slane P., Hughes J.P., Edgar R.J., et al., *Astrophysical Journal*, v. 548, p. 814-819 (2001)
- [11] Hwang U., Decourchelle A., Holt S.S., Petre R., *Astrophysical Journal*, v. 581, p. 1101—1115 (2002)
- [12] Warren J.S., Hughes J.P., Badenes C., et al., *Astrophysical Journal*, v. 634, p. 376-389 (2005)
- [13] Cassam-Chenai G., Decourchelle A., Ballet J., et al., *Astronomy and Astrophysics*, v. 414, p. 545-558 (2004)
- [14] Bleeker J.A.M., Willingale R., van der Heyden K., et al., *Cassiopeia A: Astronomy and Astrophysics*, v. 365, p. L225-L230 (2001)
- [15] Gotthelf E.V., Koralesky B., Rudnick, L., et al., *Astrophysical Journal*, v. 552, p. L39-L43 (2001)
- [16] Tajima T. and Dawson J.M., *Phys. Rev. Lett.*, v. 43, p. 267 (1979)
- [17] Santos J.J., Popescu H., Baton S.D., et al., *Phys. Plasmas*, v. 12, p. 063106 (2005)
- [18] Bell A.R., *MNRAS*, v. 353, p. 550–558 (2004)
- [19] Zirakashvili, V. N., Ptuskin, V. S., *Astrophysical Journal*, v. 678, p. 939–949 (2008)
- [20] Blackman E.G. and Field G.B., *Physical Review Letters*, v. 89, p. 265007 (2002)
- [21] Дюдерштадт Дж., Мозес Г., *Инерциальный термоядерный синтез // М.: Энергоатомиздат* (1984)
- [22] Norreys P.A., Scott R.H.H., Lancaster K.L., et al., *Nuclear Fusion*, v. 49, p. 104023 (2009).
- [23] Yin L., Albright B.J., Hegelich B.M., *Physics of Plasmas*, 14, p. 056706 (2007)
- [24] Fujioka S., Takabe H., Yamamoto N., et al., eprint arXiv:0909.0315 (2009)
- [25] Zheng J., Tanaka K.A., Miyakoshi T., et al., *Phys. Plasmas*, v. 10, p. 2994 (2003)