

«СОГЛАСОВАНО»  
Академик-секретарь  
Отделения физических наук  
Российской академии наук

«УТВЕРЖДАЮ»  
Вице-президент  
Российской академии наук

академик И.А. Щербаков

академик \_\_\_\_\_

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

**ПРОГРАММА**  
**фундаментальных научных исследований**  
**отделения физических наук РАН**

«Динамика разреженной плазмы в космосе и лаборатории»

Координатор Программы

*Член-корреспондент РАН*  
*Петрукович А.А*

«УТВЕРЖДАЮ»  
Академик-секретарь  
Отделения физических наук РАН

академик И.А. Щербаков

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ**  
**по программе фундаментальных научных исследований**  
**отделения физических наук РАН**  
**«Динамика разреженной плазмы в космосе и лаборатории»**

**Председатель научного совета**

*Петрукович А.А.* - д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, зав. отделом ИКИ РАН, [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru), 915-007-0399

**Заместители председателя научного совета**

*Франк А.Г.* - д.ф.-м.н., гл. научн. сотр. ИОФ РАН

**Ученый секретарь научного совета**

*Зольникова Надежда Николаевна* - к.ф.-м.н., научный сотр. ИКИ РАН, [nzolnik@iki.rssi.ru](mailto:nzolnik@iki.rssi.ru)

**Члены научного совета**

*Голубев Сергей Владимирович* - д.ф.-м.н., профессор, зам. директора ИПФ РАН

*Ерохин Николай Сергеевич* - д.ф.-м.н., зав. отделом ИКИ РАН

*Зеленый Лев Матвеевич* - д.ф.-м.н., академик, директор ИКИ РАН

*Зыбин Кирилл Петрович* - д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, рук. отделения, ФИАН

*Козелов Борис Владимирович* - д.ф.-м.н., вед. научн. сотр. ПГИ КНЦ РАН

*Малова Хельми Витальевна* - д.ф.м.н., вед. научн. сотр. ИКИ РАН

Координатор Программы

Член-корреспондент РАН  
*Петрукович А.А.*

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
**к Программе фундаментальных научных исследований**  
**Отделения Физических наук**  
**Российской академии наук**  
**«Динамика разреженной плазмы в космосе и лаборатории»**

**1. Краткое обзор состояния проблемы, ее актуальность и имеющийся научный задел (наиболее значимые публикации; гранты; монографии; достижения, отмеченные международными и национальными премиями и другие данные, подтверждающие соответствие Программы мировому научному уровню).**

Плазма – наиболее распространенное состояние видимого вещества во Вселенной. Благодаря наличию дальнедействующих электромагнитных сил в плазменных средах протекают интенсивные процессы конверсии и переноса энергии, управляемые коллективными эффектами. В наземных условиях подобная динамика плазмы определяет ее стабильность, удержание и нагрев в лабораторных установках, в том числе в УТС. В космосе эти процессы ответственны за ускорение частиц, динамику магнитного поля, в конечном счете, за излучение в астрофизических объектах, за солнечную и геомагнитную активность. Однако удаленные астрофизические плазменные объекты мы можем изучать только по их излучению, достигающему Земли. В плазменных оболочках Земли и гелиосфере возможно проводить наблюдения «изнутри» плазмы, с борта искусственных спутников. Спутниковые исследования позволяют получать экспериментальные данные в диапазонах масштабов по пространству и времени, а также в условиях высокой разреженности, недоступных в лаборатории. На Земле в лаборатории возможно проводить измерения в повторяемых, контролируемых условиях, что недоступно в природных космических средах. Крупномасштабные магнитоплазменные структуры (хвосты, ударные волны и т.д.) способны сохранять устойчивость, эффективно накапливать и преобразовывать энергию даже в отсутствие столкновений. Пересоединение силовых линий магнитного поля в плазме также в значительной мере определяется бесстолкновительными эффектами. Главную роль в такого рода самоорганизации плазмы играют нелинейные процессы и долгоживущие самосогласованные структуры на малых, по сравнению с размером космических объектов кинетических масштабах, описание которых на основе «первых принципов» существенно затруднено в связи с крайней сложностью и многовариантностью сценариев развития тех или иных процессов. Поэтому необходимым дополняющим элементом подобных исследований и в космосе и в лаборатории является численное моделирование. Часто плазма наблюдается в турбулентном состоянии со свойствами перемежаемости, что существенно влияет на нелокальные свойства турбулентности и аномальные процессы переноса, и может оказаться критичным для проблемы удержания плазмы в установках УТС.

Фундаментальные исследования физики явлений и структур в бесстолкновительной плазме являются исключительно перспективными во многих аспектах. Востребованность в космической науке принято оценивать по количеству космических проектов. За последние 10-20 лет запущены несколько десятков спутников для измерений околоземной плазмы, а объем наблюдательных данных исчисляется терабайтами. Высокое качество экспериментальной техники обеспечивает измерение векторов электрического и магнитного поля и функций распределения частиц по скоростям, что позволяет количественно решать многие задачи плазменной физики. С другой стороны, прогресс во всеволновой наблюдательной астрономии привел к расширению и востребованности плазменной проблематики и в астрофизических исследованиях (джеты, аккреционные диски и колонки, магнитосферы экзопланет, пульсаров и

белых карликов, бесстолкновительные ударные волны в плазме скоплений галактик и остатков взрывов сверхновых).

В самое последнее время, в том числе в рамках реализации Программы ОФН-15 (2012-2014 гг.), удалось установить, что многие существенные черты явлений, которые наблюдаются в лабораторных условиях и магнитосфере, обнаруживают поразительное сходство между собой, несмотря на колоссальные различия в характерных размерах, параметрах плазмы, магнитных полей и токов. Это указывает на единство фундаментальных процессов, происходящих в лабораторной и космической плазме, и вместе с тем свидетельствует об **актуальности** исследования физики плазменных явлений в космосе и лаборатории в рамках единой Программы.

Организации и научные сотрудники РАН, потенциальные участники данной программы обладают необходимым опытом для выполнения данных исследований, являются международно признанными специалистами по данной проблеме, что подтверждается большим количеством высокорейтинговых публикаций, приглашенных докладов на различных конференциях:

#### **Ведущие публикации по теме:**

Artemyev, Anton; Zelenyi, Lev, Kinetic Structure of Current Sheets in the Earth Magnetotail, Microphysics of Cosmic Plasmas, Space Sciences Series of ISSI, Volume 47.

Zelenyi, Lev; Artemyev, Anton; Petrukovich, Anatoli Properties of Magnetic Field Fluctuations in the Earth's Magnetotail and Implications for the General Problem of Structure Formation in Hot Plasmas, Space Science Reviews, 2014.

Balogh, A., Bykov, A., Cargill, P., Dendy, R., Dudok de Wit, T., Raymond, J. (eds) Microphysics of Cosmic Plasmas, Space Sciences Series of ISSI, Volume 47. ISBN 978-1-4899-7412-9. Springer, Science+Business Media New York, 2014

Balogh, A., Bykov, A., Lin, R.P., Raymond, J., Scholer, M. (Eds.) Particle Acceleration in Cosmic Plasmas Space Sciences Series of ISSI, Vol. 45, ISBN 978-1-4614-6454-9, Springer New York, 2012

A.G. Frank. Flare-type events and generation of plasma jets in current sheets evolving in laboratory conditions // EAS Publications Series, C. Stehl'e, C. Joblin and L. d'Hendecourt (eds) 2012. V.58. P. 57-62.

Kocharovsky V.V., Kocharovsky VI.V., Martyanov V.Ju. Self-consistent current sheets and filaments in relativistic collisionless plasma with arbitrary energy distribution of particles // PRL, v. 104 (n. 21), p. 215002, 2010

Malova, H., V. Yu. Popov, O. V. Mingalev, I. V. Mingalev, M. N. Melnik, A. V. Artemyev, A. A. Petrukovich, D. C. Delcourt, C. Shen, and L. M. Zelenyi, Thin current sheets in the presence of a guiding magnetic field in the Earth's magnetosphere, J. Geophys. Res., VOL. 117, A04212, doi:10.1029/2011JA017359, 2012.

A.A. Petrukovich, A.V. Artemyev, I.Y. Vasko, R. Nakamura, L. Zelenyi, Current sheets in the Earth magnetotail: plasma and magnetic field structure with Cluster project observations Space Sci. Rev, accepted, 2014.

В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зеленый, Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса, *УФН*, т. **181**, №9, с. 905-952, 2011.

L.M. Zelenyi, A.A. Petrukovich, Current Sheets in Space Plasmas, Plenary talk, 41st European Plasma Conference, Berlin, 23.- 27.6.2014

## **2. Основные цели и задачи Программы**

Для исследования в рамках настоящей программы выбраны задачи, которые находятся на переднем крае современной физики плазмы, востребованы в мировой науке и могут быть решены привлекаемыми российскими научными коллективами, доказавшими свою конкурентоспособность на мировом уровне. Несмотря на большое разнообразие временных, пространственных и энергетических характеристик процессов, величины основных безразмерных параметров, характеризующих условия трансформации энергии, в бесстолкновительной магнитосферной, в астрофизической плазме, а также в проводимых лабораторных экспериментах оказываются близкими. Будут изучаться коллективные явления, имеющие универсальный характер для плазменных систем, находящихся во всех трех основных режимах динамики: с доминированием энергии поступательного движения (солнечный ветер, ударные волны), с доминированием тепловой энергии (токовые слои), с доминированием магнитной энергии (магнитосфера). Значительное внимание будет уделено лабораторному моделированию астрофизических процессов, экспериментальному изучению магнитного пересоединения в токовых слоях, поиску корреляций и причинно-следственных связей между основными характеристиками токовых слоев и особенностями их трехмерной структуры.

**Основной целью** программы является определение механизмов, ответственных за наиболее эффективное преобразование энергии и формирование самосогласованных структур в плазме. Эта цель достигается экспериментальным путем (в космосе и лаборатории), теоретическими методами и посредством компьютерного моделирования.

### **Задачи:**

1. Динамика тонких токовых слоев: формирование, структура, разрыв.
2. Нелинейная динамика заряженных частиц, ускорение.
3. Взаимодействие волна-частица и генерация излучений.
4. Возникновение турбулентности и ее роль в процессах переноса.
5. Холловские эффекты в плазме.
6. Развитие экспериментальной техники.
7. Развитие численных методов.

## **3. Номера и наименования направлений фундаментальных исследований Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, к которым относятся направления исследований по Программе.**

Пункт 14.

Современные проблемы физики плазмы, включая физику астрофизической плазмы, физику низкотемпературной плазмы и основы её применения в технологических процессах.

Пункт 16.

Современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, в том числе происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, развитие методов и аппаратуры внеатмосферной астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач.

#### **4. Основные этапы работы и планируемые результаты. Содержание намеченной на предстоящий год работы.**

Основные планируемые результаты

- Развитие моделей тонких токовых слоев в реалистичных условиях космической среды.
- Исследование динамики токовых слоев в лаборатории, сравнительный анализ структуры и эволюции лабораторных и магнитосферного токовых слоев.
- Создание кинетической численной модели токового слоя с реалистичной электронной компонентой.
- Определение эффективности ускорения заряженных частиц нелинейными структурами.
- Лабораторное моделирование электронно-циклотронного мазера.
- Роль перемежаемой турбулентности в переносе массы через плазменные границы.
- Механизмы формирования тонкой структуры магнитного поля в астрофизических объектах.
- Точные модели экранировки в плазме с учетом эффектов пространственного заряда.
- Учет эффектов Холла в динамике магнитоплазменных структур.

Конкретные задачи, этапы и результаты приведены в документации по проектам.

#### **5. Практическая значимость планируемых результатов, возможные области применения.**

Результаты важны для применения в смежных фундаментальных науках: астрофизике, физике плазмы, физике солнечно-земных связей и Солнца, теории нелинейных процессов и турбулентности, физике УТС.

Координатор Программы

*Член-корреспондент РАН  
Петрукович А.А*

Ученый секретарь Научного  
совета Программы

*к.ф.-м.н. Зольникова Н.Н.*

**Структура Программы фундаментальных исследований президиума (отделения) РАН  
« Динамика разреженной плазмы в космосе и лаборатории»**

| №<br>п/п | Направления и проекты   | Организации<br>исполнители | Руководитель<br>проекта         | Объемы<br>финансирован<br>ия на 2015 г.<br>(тыс.рублей) | Ожидаемые<br>результаты  |
|----------|---|----------------------------|---------------------------------|---|--|
|          | 1. Динамика и эволюции токовых слоев в условиях генерации токов Холла – исследования методами лабораторного моделирования | ИОФ РАН                    | д.ф.-м.н. Франк А.Г.            | 600   | Основные параметры токовых слоев в 2D и 3D магнитных конфигурациях, с точки зрения возможностей генерации токов Холла. Пространственно-временные распределения температуры ионов в токовых слоях, в зависимости от расстояния до X линии вдоль ширины слоя. Сопоставление данных спутниковых измерений с результатами лабораторного эксперимента.  |
|          | 2. Аналитическая теория магнитостатических структур в плазме с произвольными энергетическими распределениями частиц       | ИПФ РАН                    | чл.-корр. РАН Кочаровский В. В. | 300   | Универсальный критерий, описывающий порог и область неустойчивых волновых чисел в задаче об апериодической генерации магнитного поля, Аналитическое исследование областей неустойчивых волновых чисел и инкрементов вейбелевской неустойчивости для релятивистских функций распределения частиц в виде по-разному профилированных трубок, Уравнения для плоскостойких структур с широм силовых линий магнитного поля и произвольным распределением частиц по энергиям. |

|  |   |                                 |   |            |   |
|--|---|---------------------------------|---|------------|---|
|  | <p>3. Теоретическое и экспериментальное исследование токовых слоев в магнитосфере</p>                                   | <p>ИКИ РАН, ПГИ<br/>КНЦ РАН</p> | <p>д.ф.-м.н.<br/>Малова Х.В.<br/><br/>к.ф.-м.н.<br/>Мингалев О.В.</p> | <p>350</p> | <p>Структура фазового пространства при движении ионов в токовых слоях с магнитной сдвиговой компонентой. Уравнения, описывающие условие нагрева двухкомпонентной плазмы ионно-звуковой турбулентностью. В рамках численного моделирования будут получены закономерности изменения температуры частиц в зависимости от параметров системы. Новая численная модель 1D3V с реалистичным учетом электростатических эффектов.</p>                                  |
|  | <p>4. Лабораторное моделирование взаимодействия волн и частиц в неравновесной плазме магнитосферы</p>                   | <p>ИПФ РАН</p>                  | <p>д.ф.-м.н.<br/>Костров А.В.</p>                                     | <p>400</p> | <p>Динамические спектры электромагнитных излучений плазменного циклотронного мазера на основе неравновесной плазмы ЭЦР разряда в открытой магнитной ловушке. Нелинейные явления на протяженных трассах распространения интенсивных волн свистового диапазона в лабораторной замагниченной плазме.</p>   |
|  | <p>5. Нелинейное взаимодействие заряженных частиц с когерентными электромагнитными структурами и заряженными телами</p> | <p>ИКИ РАН</p>                  | <p>д.ф.-м.н.<br/>Васильев А.А.<br/>д.ф.-м.н.<br/>Красовский В.Л.</p>  | <p>400</p> | <p>Параметры модели ускорения заряженных частиц пакетами высокоамплитудных свистовых волн и пространственное распределение волнового поля вдоль силовых линий магнитного поля. Вероятности захвата частиц и характерные изменения энергии частиц.<br/>Численные расчеты параметров плазмы, возмущенной поглощающей сферой, включая заряд сферы, заряд экранирующего облака захваченных частиц, пространственно-временные зависимости электрического поля.</p> |

|  |   |         |  |     |   |
|--|---|---------|--|-----|---|
|  | 6. Турбулентные процессы в гигантских молекулярных облаках  | ФИАН    | д.ф.-м.н.<br>Истомин Я.Н.                          | 250 | Расчет параметров спектра магнитного поля и скоростей ионов в молекулярном облаке..   |
|  | 7. Исследование роли внешнемагнитосферных резонансов и перемежаемой турбулентности на перенос через плазменные границы                  | ИКИ РАН | д.ф.-м.н. Савин<br>С.П.                            | 200 | Определение влияния внешнемагнитосферных резонансов на образование плазменных струй с аномальным давлением, их роли в переносе. Исследование развития турбулентных каскадов от солнечного ветра к магнитосферным границам на статистической основе.   |
|  | 8. Исследование холловской магнитной гидродинамики и неустойчивости в предфронте бесстолкновительной ударной волны в космической плазме | ФТИ РАН | д.ф.-м.н. Урпин<br>В.А.<br>д.ф.-м.н. Быков<br>А.М. | 500 | Расчет генерации магнитного поля термомагнитными явлениями в течениях плазмы при наличии градиента скорости. Закономерности формирования химических структур (пятен) под действием эффекта Холла. Алгоритм самосогласованного включения эффектов мезоскопических электрических полей в нелинейную модель структуры УВ, численная самосогласованная модель распространения частиц. |

**Координатор Программы**

*Член-корреспондент РАН  
Петрукович А.А*

