

Российская академия наук

«Утверждаю»

Президент Российской академии наук

Академик В.Е. Фортов

«___» _____ 2016 г.

ПРОГРАММА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРЕЗИДИУМА РАН

Программа № I.7

**«Экспериментальные и теоретические исследования объектов
Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и
взрывные процессы в астрофизике»**

Аннотационный отчет за 2016 г.

Кураторы Программы

Академик Л.М. Зеленый

Чл.-корр. Б.М. Шустов

«___» _____ 2016 г.

2016

Программа № 1.7 Президиума РАН была принята постановлением Президиума РАН № 176 от 23.12.2014 «Об утверждении Перечня программ фундаментальных исследований РАН по приоритетным направлениям, определяемым РАН на 2015 год.

В соответствии с постановлением Президиума РАН в перечень программ фундаментальных исследований на 2016 г. включена Программа 1.7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы - академик Л.М. Зеленый и член-корр. РАН Б.М. Шустов).

Структура отчета

Часть 1

Подпрограмма 1.7а

Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд

координатор акад. Л.М.Зеленый

Часть 2

Подпрограмма 1.7б

Переходные и взрывные процессы в астрофизике

координатор чл.-корр. Б.М. Шустов

Часть 2

Подпрограмма 1.76

Переходные и взрывные процессы в астрофизике

координатор чл.-корр. Б.М. Шустов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Эволюция и свойства одиночных и двойных звезд	7
2. Звездная переменность: наблюдения и теория	15
3. Сверхновые, пульсары, нейтронные звезды	25
4. Нестационарные процессы с участием магнитных полей в астрофизической плазме	36
5. Процессы аккреции и физика астрофизических дисков и джетов.	40
6. Переменность гамма-, рентгеновских, радио– и инфракрасных источников	50
7. Активные процессы в галактиках; нестационарные явления и структура нашей Галактики	61
8. Космологические аспекты	71

Введение

Согласно утвержденной Комиссией Президиума РАН по формированию перечня программ фундаментальных исследований на 2016 г. структуре программы фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук П-7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы – академик Л.М.Зеленый и член-корр. РАН Б.М.Шустов), исследования в рамках подпрограммы Б «Переходные и взрывные процессы в астрофизике» должны были проводиться по 38 проектам в рамках 8 направлений:

- Эволюция и свойства одиночных и двойных звезд (3 проекта).
- Звездная переменность: наблюдения и теория (4 проекта).
- Сверхновые, пульсары, нейтронные звезды (8 проектов).
- Нестационарные процессы с участием магнитных полей в астрофизической плазме (4 проекта).
- Процессы аккреции и физика астрофизических дисков и джетов (4 проекта).
- Переменность гамма-, рентгеновских, радио– и инфракрасных источников (4 проекта).
- Активные процессы в галактиках; нестационарные явления и структура нашей Галактики (8 проектов).
- Космологические аспекты (3 проекта).

В выполнении Программы должны были принимать участие 10 ведущих астрофизических учреждений центральной части Российской академии наук, а также (вне рамок целевого финансирования Программы П-41) два учреждения Сибирского отделения Российской академии наук. Однако, поскольку в CAO РАН все полученное по Программе финансирование было направлено на работы по подпрограмме П-7А «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд», и работы по проектам подпрограммы П-7Б «Переходные и взрывные процессы в астрофизике» в 2016 г. не выполнялись.

В связи с этим, работы были проведены по 33 проектам из 38. В их выполнении принимали участие следующие учреждения РАН:

- Астрокосмический центр Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук (ИПМ РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау Российской академии наук (ИТФ РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук (ФТИ РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН).

Кроме того, в работе по данной программе принимали участие (вне рамок целевого финансирования Программы П-7) следующие организации:

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН),
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа им. Г.К.Борескова Сибирского отделения Российской академии наук (ИК СО РАН),

В ходе выполнения Программы коллективами этих институтов в 2016 г. были получены важные и интересные результаты. Результаты работы были представлены в докладах и научных статьях. Общее количество находящихся в печати и вышедших из печати статей составляет 150 названий, кроме того, было сделано 85 докладов на конференциях. Кроме расходов на выплату заработной платы, выделенные средства были затра-

чены на приобретение и ремонт оборудования (в том числе компьютерной техники), используемого для обработки и анализа наблюдательных данных и выполнения численных расчетов, на закупку необходимых расходных материалов, на расходы по обеспечению связи и транспортные расходы, на обеспечение участия исполнителей программы в научных конференциях, симпозиумах и рабочих совещаниях, на организацию конференций, на затраты по командировкам для проведения совместных исследований, обеспечение расходов учреждений на научную литературу, и прочее (в соответствии с представляемым финансовым отчетом).

Ниже приводятся наиболее важные результаты исследований, полученные в рамках работы по программе фундаментальных исследований Президиума РАН П-7, подпрограмма Б «Переходные и взрывные процессы в астрофизике», в 2016 г., и избранные публикации.

1 Эволюция и свойства одиночных и двойных звезд

Проект 1.1 Исследование структуры течения вещества в двойных звездах с оболочками и эволюции ультракомпактных тесных двойных систем

В рамках Проекта была разработана численная модель для изучения процессов формирования и эволюции протозвездных объектов с солнечными и суб-солнечными массами (рис. 1). Модель может быть применена для исследования нескольких последовательных эволюционных фаз, начиная с гравитационного коллапса неустойчивого протозвездного облака, через формирование и коллапс первичного гидростатического ядра и заканчивая полной диссипацией первоначального облака, формированием протозвезды и протозвездного диска. Модель использует систему МГД-уравнений, включающую в себя омическую и амбиполярную диффузию, а также расчет тепловой и ионизационной структуры облака. Для расчета тепловой и ионизационной структуры протозвездного облака используется многокомпонентный подход, при котором пыль и газ рассматриваются отдельно, что позволяет с хорошей точностью описать начальные стадии гравитационного сжатия и коллапса облака.

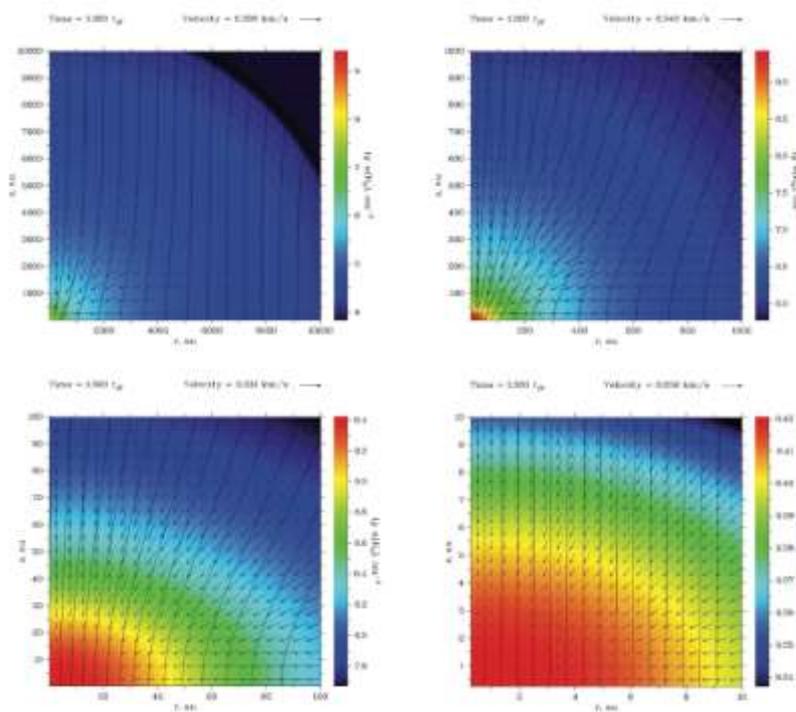


Рис. 1 – Результаты тестовых расчетов коллапса протозвездного облака. Показан логарифм плотности, вектора скорости и силовые линии магнитного поля на разных масштабах, от 10000 а.е. (левая верхняя панель) до 10 а.е. (правая нижняя панель) для времени $t=1.3 T_{eff}$ с начала расчета.

Проведено численное моделирование структуры течения в двойной звезде, находящейся в режиме «суперпропеллера». Моделировалась система АЕ Аqг, как типичный представитель класса. Период собственного вращения белого карлика в этой звезде приблизительно в 1000 раз меньше орбитального периода системы, а наличие у быстровращающегося белого карлика магнитного поля не позволяет веществу аккрецировать. Интересной особенностью АЕ Аqг является наличие вспышек. В активной фазе светимость этой звезды может меняться более чем на одну звездную величину за время порядка нескольких часов. Нами был предложен механизм развития вспышек, основанный на гипотезе о переключении режима течения с ламинарного на турбулентный и обратно. Для проверки этой гипотезы было проведено трехмерное МГД-моделирование структуры течения в системе АЕ Аqг, по результатам которого получены распределения плотности, скорости, температуры и напряженности магнитного поля в полости Роша белого карлика. Было показано, что в ламинарном режиме магнитное поле слабо проникает в плазму, перетекающую через внутреннюю точку Лагранжа, что позволяет веществу сформировать кольцо вокруг аккретора. Вещество в кольце, в свою очередь, турбулизуется под действием ударных волн. После переключения в турбулентный режим, проникновение магнитного поля в плазму становится гораздо более эффективным и она выбрасывается из системы центробежными силами, что и является причиной вспышки. После очистки полости Роша белого карлика течение снова переходит в ламинарный режим и процесс повторяется.

Построены модели популяций Новых звезд в галактиках с вспышкой звездообразования («эллиптических»), с постоянной скоростью звездообразования («спиральных») и с переменной по времени скоростью, соответствующей наблюдениям галактики М31. Использован разработанный ранее «гибридный» подход, в котором модель популяции тесных двойных звезд с компонентами – белыми карликами и маломассивными звездами главной последовательности строится при помощи программы популяционного синтеза, а дальнейшая эволюция аппроксимируется с помощью предварительно рассчитанной по программе MESA сетки из ~40000 эволюционных треков.

Найдено, что в эллиптических галактиках при возрасте 10 млрд. лет частота вспышек Новых в ~ 10–20 раз ниже, чем в спиральных галактиках той же массы. Для большинства Новых в эллиптических галактиках при $T=10$ млрд. лет характерны малые массы БК, малые амплитуды вспышек, продолжительное время падения блеска после вспышки, большие периоды рекуррентности. По контрасту, для Новых в спиральных галактиках характерны большие массы БК, относительно яркие вспышки, короткие времена падения блеска и короткие периоды рекуррентности.

Модели согласуются с наблюдениями после учета эффектов селекции, но имеют дефицит ярких Новых по сравнению с наблюдениями, что может быть обусловлено неопределенностями в шкале болометрических поправок, принимаемой для Новых.

Руководитель проекта:

чл.-корр. РАН Д.В.Бисикало.

Состав группы:

д.ф.-м.н. Л.Р.Юнгельсон, к.ф.-м.н. П.В.Кайгородов (ИНАСАН).

Публикации:

1. А.М. Fateeva, A.G. Zhilkin, Ya.N. Pavlyuchenkov, E.I. Vorobyov, «A numerical model for the formation and long-term evolution of protostars and protostellar disks» // AIP Conference Proceedings, V. 1714, id.020001, doi: 10.1063/1.4942563 (2016)
2. A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo, P.A. Mason, «A study of higher order white dwarf magnetic fields in asynchronous polars» // AIP Conference Proceedings, V. 1714, id.020002, doi: 10.1063/1.4942564 (2016)
3. P.V. Isakova, A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo, N. R. Ikhsanov, «A possible scenario of the flaring activity in AE Aqr» // AIP Conference Proceedings, V. 1714, id.020003, doi: 10.1063/1.4942565 (2016)
4. А.А. Боярчук, Б.М. Шустов, И.С. Саванов, М.Е. Сачков, Д.В. Бисикало, Л.И. Машонкина, Д.З. Вибе, В.И. Шематович, Ю.А. Щекинов, Т.А. Рябчикова, Н.Н. Чугай, П.Б. Иванов, Н.В. Вошинников, А.И. Гомез де Кастро, С.А. Ламзин, Н. Пискунов, Т. Айрес, К.Г. Штрассмайер, С. Джефри, С.К. Цвинтц, Д. Шуляк, Ж.-К. Жерар, Б. Хуберт, Л. Фоссати, Х. Ламмер, К. Вернер, А.Г. Жилкин, П.В. Кайгородов, С.Г. Сичевский, С. Устамужик, Е.Н. Канев, Е.Ю. Кильпио «Научные задачи космического проекта “Спектр-УФ” (“Всемирная Космическая Обсерватория – Ультрафиолет”))» // Астрономический Журнал, т. 93, №1, С. 3-48 (2016)
5. Chen, H.-L., Woods, T.E., Yungelson, L.R., Gilfanov, M., Han, Z. 2016, Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 458, 2916

Проект 1.2 Диагностика физических условий в атмосферах и оболочках звезд на основе спектральных наблюдений

Для 11 гигантов с большим дефицитом металлов в карликовой галактике в созвездии Скульптор (Scl dSph), одной звезды в For dSph и двух звезд в Sex dSph проведены не-ЛТР расчеты для Na I, Mg I, Al I, Si I, Ca I, Ti I-II, Fe I-II, Sr II и Ba II в моделях атмосфер с параметрами, определенными на предыдущем этапе выполнения проекта. Для 10 звезд анализ линий в наблюдаемых спектрах (включая спектры высокого разрешения $R \sim 40000$) позволил определить ЛТР содержание для 16 элементов, и для 10 из них также не-ЛТР содержание. Элементные отношения $[X/Fe]$ для 7 звезд в Scl dSph представлены на рис. 2.

У большинства звезд в Scl dSph (9 из 11) и звезд в For и Sex dSph наблюдается избыток элементов α -процесса – Mg, Si, Ca и Ti относительно железа. В пределах ошибки определения он одинаков для разных элементов и составляет $[\alpha/Fe] \approx 0.3$. Это свидетельствует о том, что, как и в нашей Галактике, сверхновые II типа доминировали в начальном обогащении межзвездной среды этих галактик. Среди звезд в Scl dSph выделяется ET0381 ($[Fe/H] = -2.16$), у которой все элементы, кроме Ni, в дефиците относительно железа.

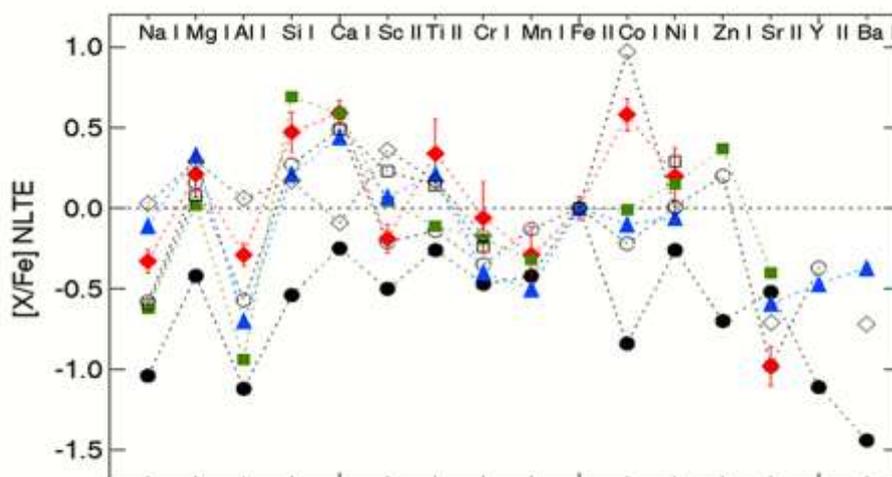


Рис. 2 – Относительное не-ЛТР содержание $[X/Fe]$ в звездах Scl002_06 (светлые кружки), ET0381 (черные кружки), Scl031_11 (красные ромбы), Scl03_059 (синие треугольники), Scl074_02 (зеленые квадраты), Scl07-49 (светлые квадраты) и Scl07-50 (светлые ромбы).

Проведено исследование стратификации элементов по глубине атмосферы магнитной, химически пекулярной звезды HD 188041. Были использованы спектры с разрешающей силой $R=80000$, полученные на спектрографе UVES 8 м телескопа Европейской Южной обсерватории. Проведен анализ химического состава звезды через измерение эквивалентных ширин одиночных или малоблендированных линий и изучена стратификация элементов железа и хрома в ее атмосфере. Среднее содержание большинства элементов определялось по эквивалентным ширинам с учетом магнитного (зеemanовского) расщепления спектральных линий. Для исследования стратификации было отобрано 26 линий Fe I и Fe II и 17 линий Cr I и Cr II, потенциал возбуждения которых E_i лежит в широком диапазоне энергий, и которые имеют различную интенсивность. Оба обстоятельства предполагают формирование спектральных линий на разных оптических глубинах, что дает возможность исследовать различные слои атмосферы звезды. Кроме того, стратификационный анализ позволяет уточнить параметры атмосферы, примерную геометрию магнитного поля и скорость вращения. Показано, что стратификация наилучшим образом описывается для модели атмосферы звезды с эффективной температурой $T_{eff} = 8800$ К, ускорением силы тяжести $\lg g$ 4.0, проекцией скорости вращения на луч зрения $V \sin i = 3$ км/с. Проведенное исследование стратификации по линиям железа Fe и хрома Cr показывает, что элементы имеют скачок содержания на оптических глубинах $\lg \tau_{5000} \sim -1.5$ (рис. 3). Полученное из наблюдений распределение элементов в целом согласуется с теоретическими диффузионными расчетами.

Впервые выполнены точные фотометрические наблюдения активного красного гиганта PZ Mon общей длительностью более одного периода. Проведен сравнительный анализ новых наблюдений с эфемеридой, определенной нами ранее. Анализ показал существование между ними небольшого сдвига фаз (рис. 4), который может быть объяснен либо уточнением периода $P=34.12$ дней, либо дифференциальным вращением и неравномерностью распределения пятен на поверхности гиганта. Установлено, что активная долгота стабильно расположена на поверхности полушария, направленного в сторону вторичного компонента системы PZ Mon. Таким образом, новые наблюдения подтвердили факт синхронизации вращения активного гиганта и обращения вторичного компонента. Это делает систему PZ Mon уникальной и единственной известной в настоящее время звездой типа RS CVn с синхронным вращением и столь малым отношением масс компонентов (1:11).

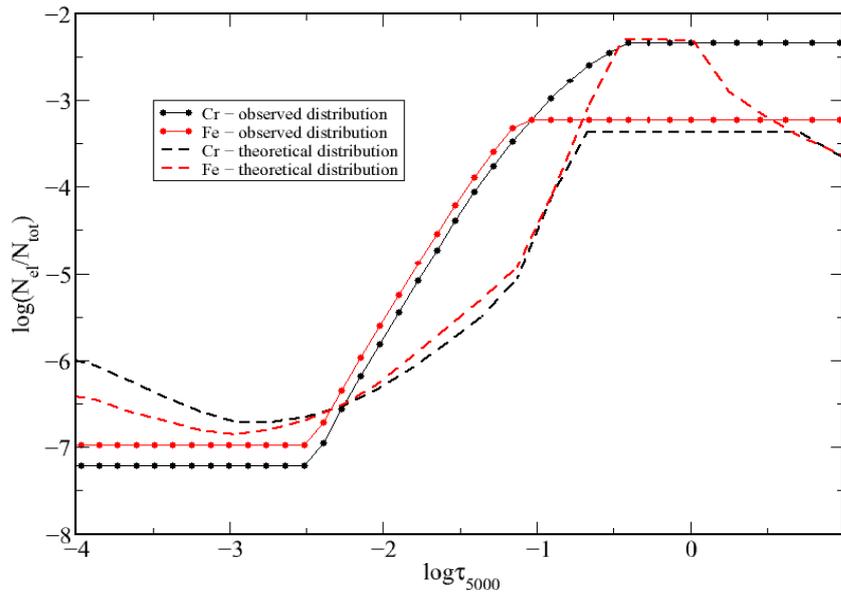


Рис. 3 – Распределение Cr (сплошная черная линия с точками) и Fe (сплошная красная линия с точками) в атмосфере Ar-звезды HD 188041. Теоретическое распределение этих элементов для модели 9000g4.0 показано пунктирными линиями.

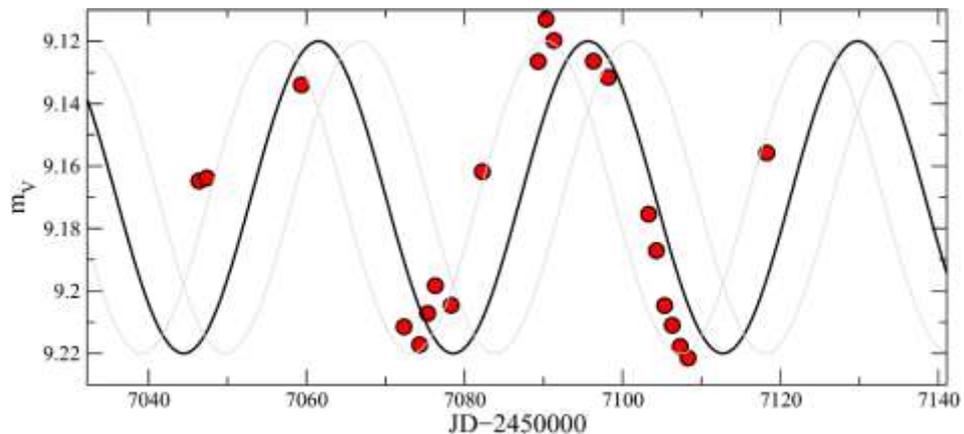


Рис. 4 – Кривая блеска активного гиганта PZ Mon (кружки) в сравнении с ранее определенной эфемеридой (жирная линия) с учетом ошибок периода (тонкие линии).

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. Л.И.Машонкина.

Состав группы:

д.ф.-м.н. Н.Н.Чугай, д.ф.-м.н. Т.А.Рябчикова, к.ф.-м.н. Ю.В.Пахомов (ИНАСАН).

Публикации:

1. Машонкина Л., Ситнова Т., Пахомов Ю., Влияние отклонений от ЛТР на определение содержания кальция, титана и железа у холодных гигантов разной металличности. // Письма в АЖ, 42, 667 (2016)
2. Ситнова Т. М., Эволюция содержания титана и кислорода по наблюдениям FGK карликов в широком диапазоне металличности. // Письма в АЖ, 42, 734 (2016)
3. Mashonkina L., Jablonka P., North P., Sitnova T., Impact of NLTE on research of early chemical enrichment of the dwarf galaxies. // In: Proceedings of the IAU, IAUS317, p. 334 (2016)
4. Chugai N. N. SN 2011ht: A weak explosion in a massive extended envelope. // Astron. Letters, 42, 82 (2016)
5. Rusomarov N., Kochukhov O., Ryabchikova T., and Ilyin I. «Magnetic Doppler Imaging of the chemically peculiar star HD125248» // 2016, Astron. Astrophys., 588, A138.

Проект 1.3 Сложные молекулы в протозвездных и протопланетных объектах

Проанализированы наблюдения областей звездообразования S 231–S 235, входящих в гигантское молекулярное облако G 174+2.5, в радиолиниях монооксида углерода (CO), аммиака (NH₃), цианоацетилена (HC₃N) и в мазерных линиях метанола (CH₃OH) и водяного пара (H₂O). Впервые зарегистрированы линии NH₃ и HC₃N в источниках WB 89673 и WB 89668, что указывает на присутствие в них вещества с высокой плотностью. По линии CO определены размеры, лучевые концентрации и массы молекулярных сгустков. По линии NH₃ определены температуры и концентрации газа в них. Установлено, что значения температуры и концентрации молекулярного газа заключены в пределах 16–30 К и $2.8\text{--}7.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, соответственно. В источнике WB 89673 впервые зарегистрирована линия метанола на частоте 36.2 ГГц, являющаяся индикатором присутствия ударных волн в межзвездной среде.

Разработан метод восстановления параметров турбулентности по наблюдениям оптически тонких эмиссионных линий в астрофизических дисках. При помощи этого метода проведен анализ зависимости флуктуаций интенсивности линий от углового разрешения инструмента, используемого для наблюдений. Метод позволяет восстановить наклон степенного спектра турбулентных флуктуаций скорости и внешний масштаб турбулентности.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. Д.З.Вибе (ИНАСАН).

Публикации:

1. Bisikalo D.V., Kurbatov E.P., Pavlyuchenkov Ya.N., Zhilkin A.G., Kaygorodov P.V. «On the technique for the recovery of the spectrum of turbulence in astrophysical discs» // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 458, 3892, 2016.
2. Ладейщиков Д.А., Кирсанова М.С., Цивилев А.П., Соболев А.М., «Излучение молекул в направлении на массивные сгустки областей звездообразования S231-S235» // Астрофиз. бюлл., 71, 225, 2016.
3. Кочина О.В., Вибе Д.З. «Возможности диагностики начального элементного состава протозвездного объекта по наблюдениям сложных молекул». // Труды 45-й Международной студенческой научной конференции "Физика космоса", Екатеринбург, Изд-во УрФУ, (Екатеринбург, 1-5.02. 2016), с. 252, 2016.
4. Молярова Т.С. «Сравнительный анализ астрохимических баз данных» // Труды 45-й Международной студенческой научной конференции "Физика космоса", Екатеринбург, Изд-во УрФУ, (Екатеринбург, 1-5.02. 2016), с. 199, 2016.

2 Звездная переменность: наблюдения и теория

Проект 2.1 Наблюдательные и теоретические исследования ключевых классов переменных звезд – пульсирующих переменных и оптически переменных рентгеновских источников

При поиске новых переменных звезд по оцифрованным пластинкам московской фототеки в поле 104 Геркулеса проведено сравнение классификации новых переменных звезд, основанной на экспертной оценке (по кривым блеска), с автоматической классификацией на базе компьютерной программы с обучающей выборкой. Для пульсирующих звезд предварительные результаты оказались следующими. Экспертными оценками среди 305 новых переменных звезд классифицировано 47 звезд типа RR Лиры, одна звезда типа RV Тельца, 4 высокоамплитудных звезды типа δ Щита (HADS), 14 полуправильных пульсирующих звезд. По этим же данным автоматическими методами к звездам типа RR Лиры отнесено 56 звезд (44 звезды типа RRAB и 12 звезд типа RRC), к звездам типа HADS – 3 звезды, к полуправильным – 4 звезды, звезд типа RV Тельца не выявлено. Отличия, вероятно, в основном связаны с ошибочным автоматическим отнесением звезд типа RRC и RV Тельца к затменным переменным. На этой основе будут предложены усовершенствования системы автоматической классификации (совместно с К. Pichara, I. Becker, Чили и США).

По ПЗС-наблюдениям на обсерватории СибГАУ (Красноярск) открыты и исследованы 25 новых переменных звезд, в том числе пульсирующие звезды – 16 звезд типа δ Щита и две пульсирующих переменных других типов. Около 200 переменных, в основном пульсирующих, изучены методами data mining. Продолжены массовые измерения лучевых скоростей с корреляционным спектрометром ИЛС; программа наблюдений состоит преимущественно из пульсирующих переменных звезд – классических цефеид, в 2016 г. количество индивидуальных измерений лучевых скоростей пульсирующих переменных (около 70 объектов) превысило 300.

Подведены итоги исследования по доплеровской 3D томографии рентгеновской двойной V1357 Cyg = Cyg X-1 с использованием результатов спектрального мониторинга июня 2007 г. в линии HeII 4686 Å. Впервые получена информация о движениях газовых потоков в системе в направлениях, отличных от орбитальной плоскости.

Проведены расчеты эволюции звезд от начальной главной последовательности до заключительной стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ). Отдельные модели эволюционных последовательностей были использованы как начальные условия при ре-

шении задачи о нелинейных пульсациях переменных звезд типа Миры Кита. Результаты надежно подтверждают предположение, что пульсирующие переменные типа Миры Кита являются звездами АВГ.

Руководитель проекта:

проф. Н.Н.Самусь.

Состав группы:

Н.Н.Самусь, д.ф.-м.н. Ю.А.Фадеев (ИНАСАН).

Публикации:

1. Фадеев Ю.А. Нелинейные пульсации звезд с начальной массой $3M(\text{Sun})$ на асимптотической ветви гигантов. Письма в *Астрономический Журнал*, т. 42, № 10, 731–740 (2016).
2. Larukhin E.G., Veselkov S.A., Zubareva A.M. 25 new small-amplitude variable stars in Lacetra. *Переменные звезды (Приложение)*, т. 16, № 4 (2016).

Проект 2.2 Вариации вспышечного излучения Солнца и звёзд, колебательные и циклические явления

Дано объяснение незатухающих изгибных колебаний солнечных корональных магнитных петель в терминах автоколебательного процесса, вызванного действием отрицательного трения. Источником энергии является внешние квазистационарные потоки вещества, например, супергрануляция у оснований петель или потоки вещества в короне. Взаимодействие потока с корональной петлей описывается уравнением осциллятора Рэля. Автоколебательными решениями уравнения осциллятора Рэля являются гармонические колебания постоянной амплитуды, что согласуется с наблюдаемыми свойствами незатухающих изгибных колебаний. Аналогом таких колебаний являются автоколебания, воспроизводящие мелодию при перемещении смычка по струне.

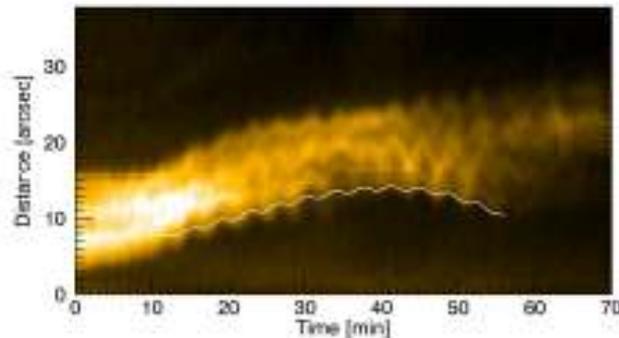


Рис. 5 – Пример незатухающих колебаний корональной арки в виде диаграммы «амплитуда-время» для солнечной вспышки 8 марта 2011 г (19:40 UT) в активной области AR 11165, измеренных с помощью прибора AIA космической обсерватории SDO.

На основе рентгеновских наблюдений, проведенных на борту космического аппарата RHESSI, и уравнения теплового баланса для события 23.08.2005 г. получены указания, свидетельствующие о важной роли тепловых механизмов энерговыделения. В рамках стандартной модели, используя спутниковые данные, установлено, что в событии 09.11.2013 г. ускоренные в вершине вспышечной петли электроны не способны обеспечить наблюдаемые потоки жесткого рентгеновского излучения в ее основаниях из-за сильных кулоновских потерь в короне. Полученные результаты свидетельствуют, о необходимости пересмотра «стандартной» модели солнечной вспышки, по крайней мере, применительно к некоторым событиям, а также согласуются с гипотезой Брауна-Зайцева-Степанова об эффективном ускорении электронов в хромосфере Солнца.

Ряд среднегодового относительного числа пятен в новой версии SN_2 продлен в прошлое вплоть до 1610 г. Показано, что разумным продолжением среднемесячных и среднегодовых значений суммарной площади пятен Гринвичского ряда после 1976 г. является кисловодский ряд с масштабирующим коэффициентом $b = 1.0094 \pm 0.0059$. Отмечено, что в своем втором максимуме 24-й цикл солнечной активности был не малым: не меньше, чем 6 из последних 13 циклов. Построен ряд A_2 суммарной площади солнечных пятен в 1610 – 2015 гг., «комплементарный» к новым версиям рядов относительных чисел пятен SN_2 и чисел групп пятен GN_2 . При необходимости ряд может быть масштабирован к шкале индекса, имеющего ясный физический смысл – пятенного абсолютного магнитного потока $\Phi_\Sigma(t)[\text{Mx}] = 2.16 \times 10^{19} A(t)[\text{mvh}]$. Отмечено, что максимальная площадь пятен в новой версии в Маундеровском минимуме резко возросла по сравнению с предыдущей. Это, по крайней мере, отчасти подтверждает правомерность

доводов ряда работ, ставящих под сомнение anomalно низкую амплитуду циклов в Маундеровском минимуме, принимаемую исследователями ранее.

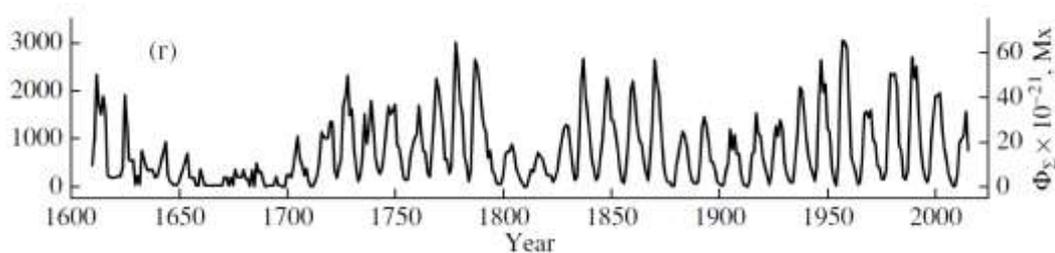


Рис. 6 – Новая продленная в прошлое версия суммарных площадей солнечных пятен (левая шкала – в мдп) и абсолютного пятенного магнитного потока (правая шкала).

Руководитель проекта:

чл.-корр. РАН А.В.Степанов.

Состав группы:

А.В.Степанов, д.ф.-м.н. Ю.А.Наговицын (ГАО РАН).

Публикации:

1. V.V.Zaitsev, P.V.Kronshtadtov, A.V.Stepanov: Rayleigh-Taylor Instability and Excitation of Super-Dreicer Electric Fields in the Solar Chromosphere // Solar Physics (2016) doi 10.1007/s11207-016-0983-1
2. Nakariakov, V. M.; Anfinogentov, S. A.; Nisticò, G.; Lee, D.-H. Undamped transverse oscillations of coronal loops as a self-oscillatory process // A&A **591**, id.L5, 4 pp (2016)
3. Цап Ю.Т., Моторина Г.Г., Копылова Ю.Г. Ускорение электронов и нагрев вспышечной плазмы корональных петель // Труды всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». – 2015. – Санкт-Петербург. – С.379-382.
4. Tsap Yu.T., Motorina G.G., and Kopylova Yu.G. Flare coronal loop heating and hard X-ray emission from solar flares of August 23, 2005, and November 9, 2013 // Geomagnetism and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 8 (в печати).
5. Цап Ю.Т., Моторина Г.Г., Копылова Ю.Г. Диагностика вспышечной плазмы по данным рентгеновских и ультрафиолетовых наблюдений: механизмы энерговыделения и излучения. Изв. Крымск. астрофиз. обсер., 2016, т.112, N2, 137-145.Наговицын Ю.А., Тлатов А.А., Наговицына Е.Ю. Площадь и абсолютный магнитный поток солнечных пятен в последние 400 лет. // Астрон. журн., т.93, № 9, с. 819-826, 2016.

6. Ivanov V.G., Miletsky E.V. Characteristics of Sunspot Longitudinal Distribution and their Correlation with Solar Activity in Pre-Greenwich Data // *Geomagnetism and aeronomy*, Vol. 56, No. 7, 848-852, 2016
7. Miletsky E.V., Ivanov V.G. Relations of Latitudinal Characteristics of Sunspot Groups to the 11-Year Cycle Amplitude at Different Phases // *Geomagnetism and aeronomy*, Vol. 56, No. 7, 863-866, 2016
8. Наговицын Ю. А., Певцов А. А., Осипова А. А., Тлатов А. Г., Милецкий Е. В., Наговицына Е. Ю. Две популяции солнечных пятен и вековые изменения их характеристик // *Письма в Астрон. журн.* том 42, №10, с. 773–782, 2016.

Проект 2.3 Фотометрические наблюдения и исследования нестационарных астрофизических объектов на телескопе АЗТ-33ИК

В 2016 году на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН установлена камера Xeva-1.7-320 с матричным InGaAs детектором для наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне. Разработан программный модуль управления камерой и драйвер, осуществляющий её программную поддержку в распределённой системе управления ПЗС-камерами обсерватории. Отработана методика инфракрасных наблюдений с использованием матричного фотоприёмного устройства.

В конце 2015 года телескоп АЗТ-33ИК оснащён новой спектрометрической аппаратурой (спектрометр среднего и низкого разрешения АДАМ) с целью подготовки к использованию телескопа в качестве составной части наземного научного комплекса космической обсерватории «Спектр-РГ». Основные идеи и научные задачи прибора были сформулированы в ИКИ РАН, разработан и изготовлен он был в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Выполнены различные технические работы по доработке узлов и калибровке прибора. Результаты пробных спектрометрических наблюдений различных астрофизических объектов позволяют сделать выводы о том, что существенная часть оптических наблюдений по программе наземной оптической поддержки обзора всего неба обсерватории «Спектр-РГ» может быть обеспечена на телескопе АЗТ-33ИК. В текущем году при проведении спектроскопического обзора 18 кандидатов в квазары из каталога K16, открыт один из наиболее далёких ($z=5.1$) оптически ярких ($i' < 21$) квазаров, обнаруженных в рентгеновских обзорах.

Руководитель проекта:

чл.-корр. РАН В.М. Григорьев (ИСЗФ СО РАН).

Публикации:

1. Kiehlmann S. et al. Polarization angle swings in blazars: The case of 3C 279 // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. 590. С А10.
2. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Хорунжев Г.А., Яскович А.Л., Павлинский М.Н. Наблюдательные возможности нового спектрографа среднего и низкого разрешения на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории// *Письма в Астрономический журнал*. 2016. Т. 42. №5. С. 333-345.
3. Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г., Ткаченко А.Ю., Воробьев В.С., Семена А.Н., Мещеряков А.В., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Павлинский М.Н. Выборка катаклизмических переменных, обнаруженных в рентгеновском обзоре площадью 400 кв. градусов// *Письма в Астрономический журнал*. 2016. Т. 42. № 4. С. 273.
4. De Pasquale M. et al. The central engine of GRB 130831A and the energy breakdown of a relativistic explosion// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 455(1). 1027-1042. DOI: 10.1093/ *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc./stv2280*.

Проект 2.4 Исследование влияния вспышечного излучения звёзд на планетные системы

Продолжен анализ 279 звезд спектрального класса G с супервспышками с энергиями в диапазоне $10^{33} - 10^{36}$ эрг. Выполнены вычисления параметра SFL (доля поверхности звезды, которая излучает в ходе вспышки). Оценки SFL получены из соотношения, связывающего эту величину с амплитудой вспышки и ее излучением в предположении о чернотельном характере излучения вспышки в моменты, близкие к ее максимуму. Большинство величин SFL находятся в интервале 0 – 0.1, достигая для отдельных сильных вспышек величин 0.2 – 0.4. Зависимость SFL от эффективной температуры для звезд с супервспышками повторяет по характеру установленную нами ранее зависимость для запятненности. Распределение SFL достигает своего максимума в области температур около 5100 – 5250 К и спадает при увеличении величины эффективной температуры. Высказано предположение о присутствии у данных на диаграмме "SFL – период вращения" бимодального распределения, с провалом для объектов с периодом

вращения P около 10 суток. Для группы звезд с P менее 10 суток приведенные данные могут указывать на уменьшение площадей вспышек при увеличении величины P . Наш анализ показал, что у одной и той же звезды при малых изменениях площадей холодных пятен S могут достигаться значительные изменения как энергии вспышек, так и размеров площади поверхности звезды, на которой происходят вспышки.

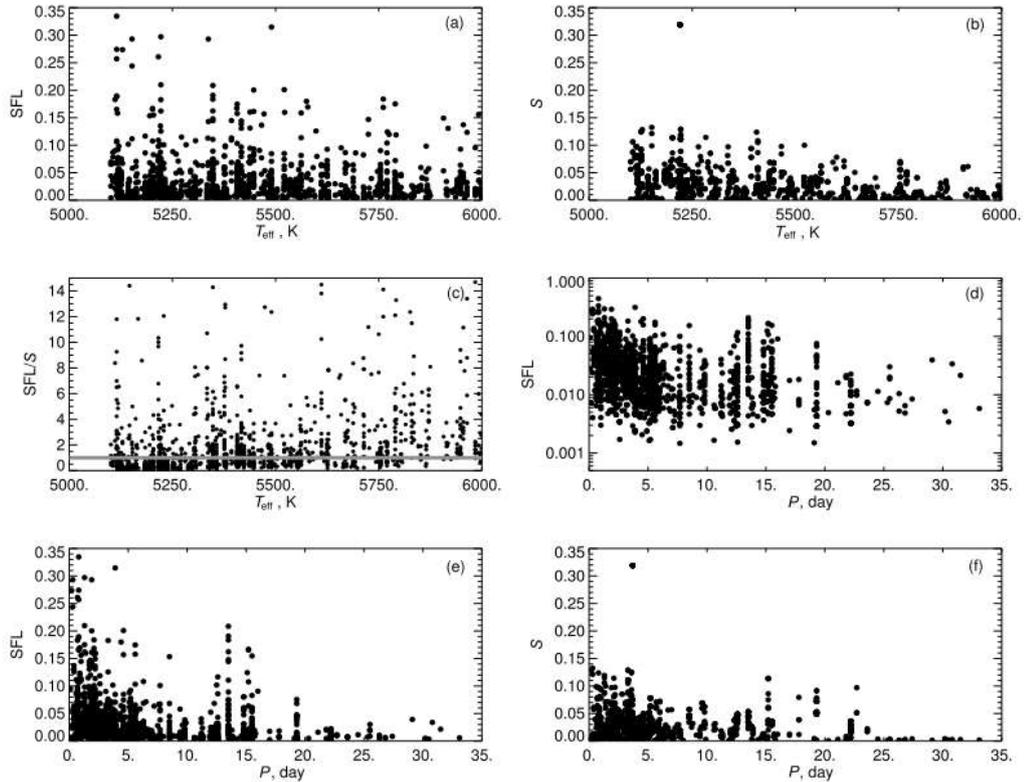


Рис. 7 – Зависимости величин площадей вспышек SFL (a) и площадей холодных пятен S (b) на поверхности изученных звезд от их эффективной температуры; отношения параметров SFL и S (c) (сплошная линия соответствует величине отношения, равной 1); величины SFL и S в зависимости от периодов осевого вращения звезд P (d,e и f; на диаграмме d ось ординат приведена в логарифмической шкале). Выделяющийся объект с S выше 0.3 – звезда KIC 7174505.

На основе наиболее полного наблюдательного материала, полученного на космическом телескопе “Кеплер”, исследована фотометрическая переменность KIC 1572802 — карлика спектрального класса M. Спектры мощности, построенные по 59 488 единичным измерениям блеска в интервале 1460 суток (~ 4 года), показали достаточно сложный характер изменений блеска звезды. Предполагается, что два пика, соответствующих периодам $P = 0.37088$ и 0.37100 сут., связаны с наличием активных областей на различных широтах у дифференциально вращающейся звезды. По полученным картам по-

верхностных температурных неоднородностей определены положения активных областей. Анализ карт выявил переключение положений активных долгот, произошедшее через 590 сут. с момента начала наблюдений. Проведен анализ изменений положений активных областей. Впервые с высоким временным разрешением наблюдалось кратковременное событие смены долгот, занимавшее около 7 сут., после которого последовало основное событие “флип-флопа”. Доля поверхности КIC 1572802, покрытая пятнами (S), составляет $\sim 7\%$. Сопоставление с литературными источниками показало, что найденная нами для КIC 1572802 величина S значительно превосходит среднюю запятненность звезд в температурном диапазоне 3500–4500 К, что можно считать свидетельством о повышенной активности КIC 1572802. Выполнены оценки параметров дифференциального вращения звезды, согласно которым КIC 1572802 имеет параметр $\Omega = 0.0056 \pm 0.0010$, что существенно меньше солнечной величины, но сопоставимо с результатами для двух холодных карликов НК Aqг и EY Dга. Найдено значение числа Россби, $Ro = 0.011$, которое указывает, что на диаграмме, связывающей параметры Ro и рентгеновскую светимость, объект находится в области насыщения. При столь малом значении Ro у КIC 1572802 следует ожидать присутствия магнитного поля порядка нескольких десятков и даже сотен Гаусс.

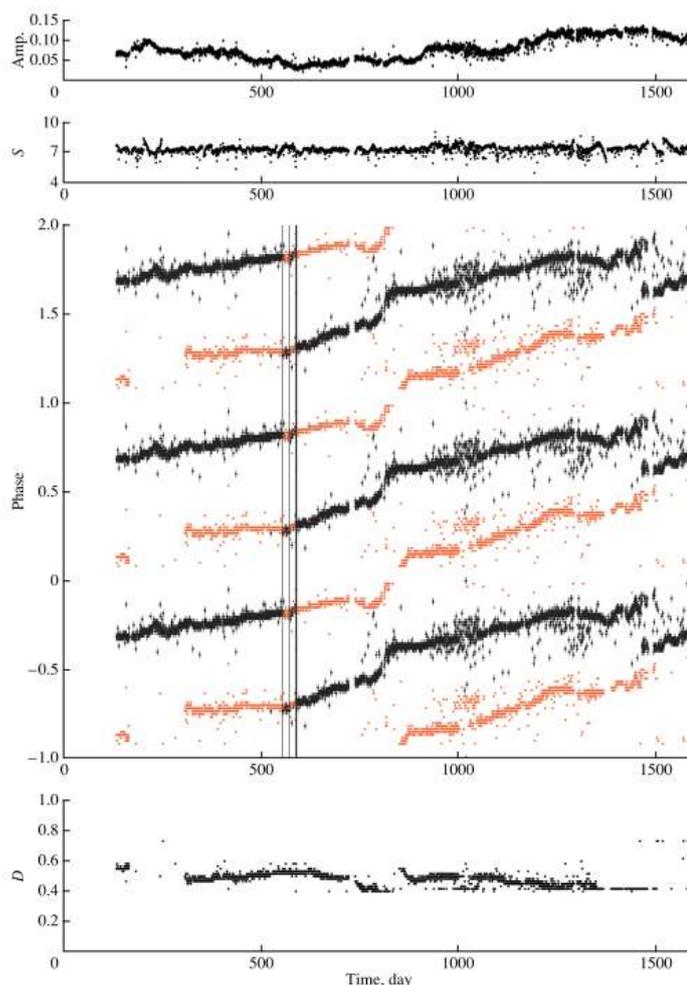


Рис. 8 – Нумерация сверху вниз: 1 — Изменение амплитуды переменности блеска, выраженной в долях нормированной интенсивности KIC 1572802 со временем. 2 — Изменение запятненности (S) поверхности звезды KIC 1572802, где S определяется как отношение площади всех пятен на поверхности к площади видимой поверхности звезды. 3 — Положения на поверхности KIC 1572802 более активной (темные символы) и менее активной (светлые символы) областей. Погрешности величин даны только для более активной области, для менее активной области они примерно вдвое выше. Кратковременное событие смены долгот, длившееся $\sim 7 d$, после которого последовало основное событие флип-флопа, помечено вертикальными линиями. Смене положений активных областей по долготе (флип-флоп) соответствует толстая вертикальная линия. Для наглядности диаграмма, соответствующая поверхности звезды, повторена со смещением по вертикали три раза. 4 — Расстояние между активными областями D в долях фазы.

Руководитель проекта:

д.-ф.м.н. И.С.Саванов (ИНАСАН).

Публикации:

1. Саванов И.С., Дмитриенко Е.С. «Параметры супервспышек звезд спектрального класса G по наблюдениям с космическим телескопом Kepler» // *Астрофизический Бюллетень*, 2016, том 71, № 1, с. 62–67
2. Саванов И.С., Гладилина Н.Г., Дмитриенко Е.С. «Пятна и активность карлика КIC 1572802 спектрального класса M» // *Астрономический журнал*, 2016, том 93, № 11, с. 980–989
3. Дмитриенко Е.С., Саванов И.С., Гладилина Н.Г. Пятна и активность карликов спектрального класса M по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер // *Астрономический журнал*, 2016, в печати.

3 Сверхновые, пульсары, нейтронные звезды

Проект 3.1 Численное моделирование несимметричного взрыва сверхновых с учетом конвективных и турбулентных процессов и расчет нуклеосинтеза. Природа гамма-бастеров и их моделирование. Магнитное поле в природе джетов

В рамках работ по моделированию взрывов массивных звезд предложена новая парадигма, объясняющая природу космологических гамма-всплесков (GRB). Ключевая идея – это полностью несимметричный взрыв с полным разрушением ядра звезды. Для исследования вопроса о возможной связи гамма-всплесков с взрывом сверхмассивных звезд в ранней вселенной (сверхновых PISN) проведено численное моделирование таких звезд в рамках различных моделей. Одномерная модель, включающая в себя единственный параметр – массу предсверхновой, с альфа-цепочкой термоядерных реакций позволила провести самосогласованные расчеты финальной стадии эволюции массивных звезд и воспроизвести соотношение Амати – корреляцию между полной энергией взрыва и пиковой температурой. Двумерная модель, рассчитанная с использованием оригинального метода PPML для решения нестационарных уравнений гидродинамики, позволила изучить развитие гидродинамических неустойчивостей в процессе несферического взрыва. В трехмерной постановке получены крупномасштабные вихревые структуры в модели массивной звезды на стадии предсверхновой. Развитие гидродинамических неустойчивостей в процессе дефрагментации звезды позволило предложить математическое описание спектра и кривых блеска для сверхновых типа PISN, согласующееся с наблюдениями гамма-всплесков (рис. 9). Проведен анализ распределения гамма-всплесков и сверхновых PISN в зависимости от красного смещения, также подтверждающий предположение об их связи.

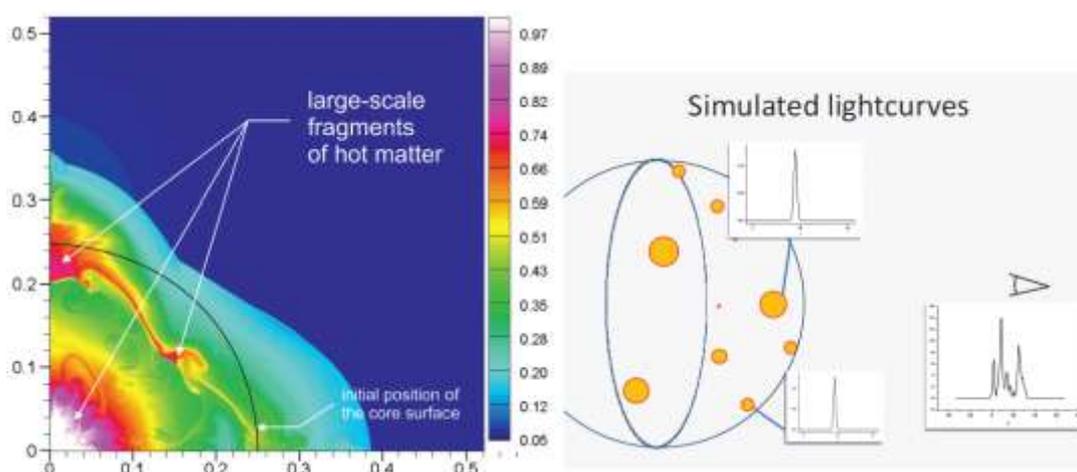


Рис. 9 – Слева – результат моделирования взрыва кислородного ядра звезды массой в 100 солнечных масс. Получена фрагментация ядра и области высокой температуры. Справа – иллюстрация возможного механизма излучения, состоящего из чернотельного и тормозного. Возникающие на поверхности горячие пятна соответствуют пикам на кривых блеска.

В рамках работ по моделированию Сверхновых начато исследование, посвященное изучению гамма-излучения от молодых нейтронных звезд. Проведен расчет сброса массивной оболочки звезды при взрыве сверхновой II типа при наличии компактного остатка и проведен расчет нуклеосинтеза в оболочке. Расчеты показали, что изучение химического состава оболочки может дать информацию о характерных временах, когда центральные области звезды становятся видимыми в гамма-диапазоне, и временах начала наблюдений линии различных элементов.

Руководитель проекта:

проф. В.М. Чечеткин (ИПМ РАН).

Публикации:

1. Chardonnet P., Filina A., Popov M., Chechetkin V., Baranov A., “Gamma-ray bursts appear simpler than expected?” // *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2016, Vol. 29, Issue 2, p. 109-128.
2. Бабаков А.В., Попов М.В., Чечеткин В.М., «Математическое моделирование эволюции массивной звезды на основе газодинамической модели» // *Мат. Моделирование*, 2017 (в печати).

Проект № 3.2 Магнитоплазменные процессы в астрофизике

Было продолжено исследование магниторотационной (MP) неустойчивости, возникающей при MP взрыве сверхновой с коллапсирующим ядром. MP неустойчивость, возникающая в наших расчетах, является неустойчивостью типа Тейлора (тороидальная компонента энергии магнитного поля превышает полоидальную компоненту энергии магнитного поля), в отличие расчетов других авторов, в расчетах которых развивается MP неустойчивость типа Велихова. Проводится модификация перестройки Лагранжевой треугольной сетки для консервативного пересчета сеточных функций.

Было проведено численное МГД моделирование лабораторного эксперимента, имитирующего образование астрофизических струйных выбросов (джетов). Для описания процессов, происходящих с веществом мишени при мгновенном нагреве лазерным пучком и моделирования течения плазмы был выбран численный метод, определены граничные и начальные условия. Было проведено исследование двух основных случаев: случай без магнитного поля и случай внешним постоянным полоидальным магнитным полем, направленным перпендикулярно мишени. Исследована картина течения вещества для различных параметров среды и магнитного поля и сопоставили ее с экспериментом. Найдено распределение плотности вещества на различных расстояниях от мишени и в различные моменты времени, и исследовали возможные структуры вещества на поверхности детектора.

Были проведены исследования последних устойчивых круговых орбит пробных тел с собственным моментом вращения в гравитационном поле черной дыры. Были исследованы параметры таких орбит для шварцшильдовской и керровской черных дыр. Записана система уравнений для определения параметров последних устойчивых круговых орбит при различных значениях момента вращения черной дыры и собственного момента вращения пробной частицы, система решена численно для различных значений этих характеристик черной дыры и частицы. Получены формулы для аналитического вычисления параметров орбит для случая, когда собственный момент вращающейся частицы является малым. Была исследована энергия связи частиц на последних устойчивых круговых орбитах для шварцшильдовской и керровской черных дыр. В частности, показано, что доля энергии, извлекаемая за счет излучения при аккреционном процессе, может достигать величин, больших, чем 0.42, если пробное тело имеет спин.

На основе решения уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога получены аналитические выражения для компонент тензора теплопроводности электронов в плотной плазме коры нейтронных звезд и в белых карликах. С помощью метода асимптотического разложения впервые получены асимптотически точные значения для коэффициентов теплопроводности сильно вырожденных электронов в присутствии магнитного поля.

Проводились наблюдения родительских галактик космических гамма-всплесков, в частности, наблюдения родительской галактики GRB141121A, поведение которой позволяет предположить наличие активного галактического ядра в ней. Проведен анализ кривых блеска коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Проведен статистический анализ суммарной кривой блеска всей выборки. Получены оценки верхних пределов относительной интенсивности возможных

регулярных предвсплесков. Убедительные свидетельства в пользу существования предвсплесков для коротких гамма-всплесков не найдены.

Руководитель проекта:

проф. Г.С.Бисноватый-Коган (ИКИ РАН).

Публикации:

1. Bisnovatyı-Kogan G.S. “Soft Gamma Repeaters and Anomalous X-ray Pulsars beyond Magnetars” // Odessa Astronomical publications 2016 (в печати)
2. Moiseenko S.G., Bisnovatyı-Kogan G.S, Ardelyan N.V., “Application of Lagrangian completely conservative implicit operator-difference scheme for the simulation of magnetorotational processes in astrophysics” // Lobachevsky Journal of Mathematics 2016-2017 (в печати)
3. Tsupko O.Yu., Bisnovatyı-Kogan G.S., and Jefremov P.I., “Parameters of Innermost Stable Circular Orbits of Spinning Test Particles: Numerical and Analytical Calculations” // Gravitation and Cosmology, 2016, Vol. 22, No. 2, pp. 138–147.
4. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., «Предвсплески коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL» // 2017, Письма в Астрономический журнал, 43, 1.
5. Glushikhina M.V., Moiseenko S.G. “MHD processes near compact objects” // WSPC Proceedings of Proceedings of the 14-th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (в печати)
6. Bisnovatyı-Kogan G. S.; Glushikhina M. V. “Calculation of thermal conductivity coefficients of electrons in magnetized dense matter” // arXiv:1606.05226

Проект 3.3 Исследование динамики излучающих структур пульсарных туманностей и механизмов вспышечной активности в рентгеновском и гамма-диапазоне: формирование магнитных структур в межзвездной среде

Исследованы механизмы формирования нетепловых структур в космической плазме, а также механизмы диссипации энергии крупномасштабных движений в этих структурах, приводящие к формированию бесстолкновительных ударных волн, нагреву плазмы и формированию популяций нетепловых частиц. Формирование нетепловых структур в космической плазме зачастую связано с процессами ускорения энергичных излучающих частиц в окрестности бесстолкновительных ударных волн, в том числе, релятиви-

стских ударных волн в таких космических объектах как пульсарные туманности, источники гамма-всплесков и активные ядра галактик. Полномасштабной теории этих процессов в настоящее время не существует; исследование процессов ускорения энергичных частиц производится как аналитическими методами, так и методами численного моделирования. В частности, в рамках работ по проекту исследован вопрос о влиянии различных механизмов рассеяния частиц в окрестности релятивистских ударных волн на эффективность ускорения и форму спектра ускоренных частиц. Методом Монте-Карло проведено моделирование формирования релятивистских ударных волн и ускорения частиц на этих волнах с учетом нелинейного влияния энергичных частиц на структуру магнитной турбулентности межзвездной среды в окрестности таких волн. Показано, что наряду с влиянием на размер предфронта, зависимость длины свободного пробега ускоренных частиц от импульса существенно влияет на эффективность ускорения и форму спектра ускоренных частиц. Важно подчеркнуть, что подобная связь отсутствует у нерелятивистских волн, а в случае релятивистских волн может быть изучена только в рамках самосогласованных нелинейных моделей. Для ряда частных случаев зависимости длины свободного пробега ускоренных частиц от импульса также показано, как именно изменения процесса ускорения частиц отражаются на спектре гамма-излучения, вызванного р-р столкновениями энергичных частиц с последующим распадом ρ -мезонов.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. А.М.Быков (ФТИ РАН).

Публикация:

1. Ellison D.C., Warren D.C., Bykov A.M., «Particle spectra and efficiency in nonlinear relativistic shock acceleration – survey of scattering models» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 456 (2016), pp. 3090-3099.

Проект 3.4 Тепловое состояние транзитно аккрецирующих нейтронных звезд

Теория диффузии ионов разного сорта в теплоизолирующих оболочках аккрецирующих нейтронных звезд использована для построения новых моделей теплоизолирующих оболочек при разном составе аккрецированного вещества. Найдены профили температуры и концентрации ионов разного сорта в таких оболочках. Результаты пред-

ставлены в виде, удобном для численного моделирования теплового состояния и наблюдательных проявлений транзиентно аккрецирующих нейтронных звезд с целью интерпретации наблюдений этих звезд в спокойном состоянии рентгеновских транзиентов и получения информации о внутреннем строении этих звезд.

Научн. рук. – д.ф.-м.н. Д.Г.Яковлев (ФТИ РАН)

Публикации:

1. Beznogov M.V., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G., «Diffusive heat blanketing envelopes of neutron stars» // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 459, 1569, 2016;
2. Beznogov M.V., Yakovlev D.G., «Diffusion in non-isothermal ion plasma» // J. Phys.: Conf. Ser. 769, 012001, 2016.

Проект 3.5 Теоретическое и численное исследование развития вейбелевской неустойчивости в космической плазме

Проведено детальное численное моделирование развития вейбелевской неустойчивости в условиях релятивистских бесстолкновительных ударных волн в применении к джетам в активных ядрах галактик и в источниках гамма-всплесков. При помощи численного метода частиц в ячейках проанализировано возникновение турбулентного магнитного поля в бесстолкновительной плазме при длительной инжекции электрон-позитронных пар с анизотропным распределением по импульсу в первоначально изотропную фоновую плазму (указанное распределение частиц формируется высокоэнергичным излучением ударной волны в релятивистском потоке – джете). Исследованы законы нарастания и затухания магнитного поля в пространстве. Обнаружено, что длительная инжекция частиц с анизотропным распределением по импульсу приводит к формированию крупномасштабных магнитных структур в области до фронта ударной волны, тогда как мелкомасштабные структуры практически отсутствуют. Такие крупномасштабные магнитные структуры усиливаются при прохождении фронта ударной волны и затем медленно затухают в области за фронтом. Длина затухания пропорциональна длительности инжекции частиц с анизотропным распределением по импульсу в области до фронта. Наблюдаемый в расчётах пространственный закон затухания магнитного поля находится в хорошем согласии с аналитическими предсказаниями теории фазового перемешивания. Обнаруженные в расчётах долгоживущие крупномасштабные магнитные неод-

нородности в релятивистских бесстолкновительных ударных волнах способны обеспечить эффективную генерацию синхротронного излучения в источниках гамма-всплесков.

Руководитель проекта:

чл.-корр. РАН В.В.Кочаровский (ИПФ РАН).

Публикации:

1. Garasev M., Derishev E., «Impact of continuous particle injection on generation and decay of the magnetic field in collisionless shocks» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 461, no. 1, p. 641–646, 2016.
2. Garasev M., Derishev E., «Generation and decay of the magnetic field in collisionless shocks» // International Astronomical Union Proceedings Series, 2016 (в печати).
3. Гарасёв М. А., Деришев Е. В., «Генерация долгоживущего магнитного поля в релятивистских ударных волнах» // Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2016)»: Тезисы докладов, 20–23 декабря 2016 г., Москва, изд-во ИКИ РАН, 2016 (в печати).

Проект 3.6 Сравнительный анализ условий генерации зебра-структуры в радиоизлучении различных астрофизических объектов (пульсар в Крабовидной туманности, солнечная корона, магнитосферы больших планет). Модели источников, основанные на эффекте двойного плазменного резонанса

Проведён сравнительный анализ генерации зебра-структуры в радиоизлучении Солнца, Юпитера и пульсара в Крабовидной туманности. Разнообразие рассмотренных астрономических объектов и успешная интерпретация спектров с зебра-структурой на основе эффекта двойного плазменного резонанса указывает на универсальный характер этого явления и допускает возможное действие общего механизма излучения в различных астрофизических условиях. Сравнение данных наблюдений зебра-структуры в солнечном радиоизлучении с предсказаниями теории позволяет получить сведения о поведении магнитного поля в короне, распределении электронной концентрации в корональных магнитных петлях, параметрах быстрых магнитозвуковых колебаний магнитных трубок, существовании захваченных электронов с относительно высокими (но нерелятивистскими) скоростями. Интерпретация зебра-структуры в километровом излучении

Юпитера на основе эффекта двойного плазменного резонанса указывает на присутствие в магнитосфере планеты источников зебра-структуры, локализованных вне плазменного слоя и содержащих электрон-протонную равновесную плазму с примесью захваченных энергичных электронов и протонов. Совершенно неожиданное (на фоне сорокалетних исследований радиоизлучения пульсаров) обнаружение зебра-структуры в радиоизлучении пульсара в Крабовидной туманности открывает новые возможности решения проблемы происхождения излучения пульсара. Объяснение сложного характера динамического спектра — системы квазигармонических полос с монотонным изменением расстояния между соседними гармониками существенно ограничивает выбор механизма радиоизлучения и условий в области генерации этого излучения. Сопоставление динамических спектров солнечного радиоизлучения с зебра-структурой и динамических спектров микроволнового радиоизлучения в промежуточном импульсе пульсара в Крабе обнаруживает глубокую аналогию этих явлений. Поскольку реальность выдвинутого 40 лет назад механизма радиоизлучения, основанного на эффекте сильной неустойчивости на частотах двойного плазменного резонанса, в применении к солнечной зебра-структуре можно считать доказанной (в частности, благодаря наблюдениям Чена и др, 2011), это открывает возможность перенести его действие и в магнитосферу вращающейся нейтронной звезды — пульсара в Крабе. Указанный механизм может действовать в неравновесной нерелятивистской электронно-протонной плазме, помещённой в относительно слабое магнитное поле (по сравнению с сильным магнитным полем нейтронных звезд). Отсюда следует важный вывод о том, что наряду с релятивистской плазмой, заполняющей магнитосферу нейтронной звезды, в ней существуют области с нерелятивистской плазмой. Последние и служат источником зебра-структуры в микроволновой части промежуточного импульса пульсара.

Руководитель проекта:

академик В.В.Железняков (ИПФ РАН).

Публикации:

1. Железняков В. В., Злотник Е. Я., Зайцев В. В., Шапошников В. Е., «Эффект двойного плазменного резонанса и его роль в радиоастрономии» // Успехи физических наук, т. 186, № 10, с. 1090–1116, 2016.
2. Zlotnik E. Ya., Shaposhnikov V. E., Zaitsev V. V., «Interpretation of the zebra pattern in the Jovian kilometric radiation» // Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 121, Iss. 6, p. 5307–5318, 2016.

Проект 3.7 Изучение свойств гигантских радиоимпульсов от пульсара в Крабе на частотах 327 и 1670 МГц. Определение параметров межзвездного газа. Определение спектральных, статистических характеристик и параметров переменности АЯГ

Для исследования распределения по энергиям гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности использовались данные радиоинтерферометрических наблюдений пульсара B0531+21, которые проводились в рамках выполнения научной программы миссии «Радиоастрон» совместно с 10-метровым космическим радиотелескопом «Спектр-Р» и наземными телескопами. Наблюдения пульсара в Крабовидной туманности производилось на двух частотах: 324 МГц («P»-диапазон, длина волны 92 см) и 1668 МГц («L»-диапазон, длина волны 18 см).

Всего было проведено девять сеансов: в рамках первичного поиска лепестков (код экспериментов RAFS) проводился один сеанс длительностью 1 час на длине волны 18 см (RAFS01); в рамках ранней научной программы (код экспериментов RAES) – 3 сеанса на длине волны 18 см, два из которых имели продолжительность 4 часа каждый (RAES04A, RAES04B) и один сеанс продолжительностью 2 часа (RAES04D); в рамках ключевой научной программы (код экспериментов RAKS) – 2 сеанса – один на длине волны 18 см (RAKS02AD) и общей продолжительностью 3 часа, второй на длине волны 92 см (RAKS02AE) и общей продолжительностью 12 часов; два сеанса на длине волны 18 см по заявке на общее наблюдательное время (код экспериментов RAGS).

На наземных радиотелескопах регистрация данных проводилась в формате MARK5B с двухбитной оцифровкой. Анализировались данные наиболее чувствительных наземных баз с телескопами: Вестерброк (WB), Аресибо (AR) и Эффельсберг (EF). Для воспроизведения этих данных использовалась библиотека чтения форматов MARKIV и MARK5B – mark5access, разработанная Уолтером Брискеном [Brisken et. al. 2010, Brisken et. al, 2008].

Получаемые при первичной обработке кросскорреляционные функции (функции видности) содержат в себе информацию о мощности зарегистрированного сигнала, которая определяется для произвольной базы из двух телескопов «*i*» и «*j*» максимальным значением амплитуды функции $|V_{ij}(\tau)|$. После корреляционной обработки максимум функции видности находится при $\tau=0$, т.е. $|V_{ij}(0)|$.

Таким образом, используя получаемые на выходе коррелятора кросс-спектры, можно оценить распределение зарегистрированных гигантских импульсов по энергиям. Большое преимущество такого подхода заключается в том, что, во-первых минимизируется

шумовая составляющая в распределении по энергиям, а во-вторых оценка не привязана к ширине зарегистрированного импульса.

Распределение гигантских импульсов по энергиям носит степенной характер $N(E) \propto E^\gamma$. Анализировались кумулятивные распределения (CPD) гигантских импульсов по энергиям для главного импульса (рис. 10). В рамках этих оценок, данные для интерпульса не анализировались ввиду меньшей статистики. Полная энергия в единицах Ян \times мкс вычислялась как $S_{Jy} \times \delta t$, где $\delta t_{18\text{cm}} = 32$ мкс и $\delta t_{92\text{cm}} = 64$ мкс – ширина окна корреляции в микросекундах, которая выбиралась при корреляционной обработке для 18 см и 92 см соответственно, S_{Jy} – коррелированный поток в Янских.

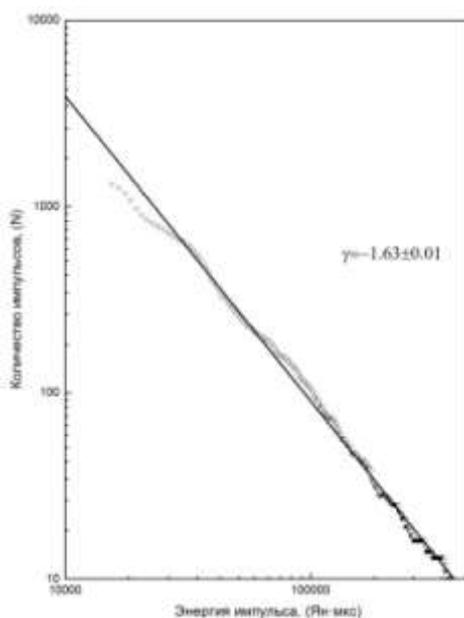


Рис. 10 – Кумулятивные распределения (CPD) гигантских импульсов по энергиям для главного импульса (сеанс RAGS10A, 10.01.2015).

Результаты полученных оценок находятся в хорошем соответствии с ранее полученными измерениями. При этом не выявляется излом в низкоэнергичной области, что обусловлено ограничениями на чувствительность по интерферометрическому отклику. Похожие значения показателя распределения импульсов по энергиям были получены для миллисекундного пульсара B1937+21, который тоже является источником гигантских импульсов ($\gamma \sim -1.4$, длительность импульсов $\sim 1-2$ мкс).

Руководитель проекта:
академик Н.С. Кардашев.

Состав группы:

Н.С. Кардашев, д.ф.-м.н. М.В.Попов (АКЦ ФИАН)

Публикация:

1. Рудницкий А.Г., Попов М.В., Согласнов В. А., «Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности», *Астрономический журнал*, 2016 (в печати).

Проект 3.8 Исследование особенностей излучения пульсаров различных типов

Проанализированы результаты новых наблюдений аномального пульсара 0943+10. Наблюдения были проведены в течение трех лет (2013-2016 гг.) на радиотелескопах ДКР-1000 и БСА Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН. Эти (частично одновременные) наблюдения пульсара на частотах 112 МГц (на радиотелескопе БСА) и 62 МГц (ДКР-1000) подтвердили ранее обнаруженные особенности поведения пульсара во вспышечной моде, в том числе систематическое запаздывание моментов прихода импульсов (МПИ) в течение вспышечной моды. МПИ уклоняются на обеих частотах от предвычисленных моментов согласованно (коэффициент корреляции 0.62). Показано, что опираясь на нелинейный характер зависимости величины запаздывания МПИ от времени, прошедшего от начала вспышечной моды, можно определять сам момент установления вспышечной моды по измеренной производной запаздывания МПИ.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. Р.Д.Дагкесаманский (АКЦ ФИАН).

Публикация:

1. Сулейманова С.А., Пугачев В.Д., «Нелинейный характер запаздывания импульса при вспышках радиоизлучения пульсара PSRB0943+10» // *Астрономический журнал*, 2016 (в печати).

4 Нестационарные процессы с участием магнитных полей в астрофизической плазме

Проект 4.1 Эволюция магнитного поля в процессах аккреции вещества на активные ядра галактик и в звездах с оболочками

Разработан новый механизм генерации поляризованного излучения для объяснения поляриметрических наблюдений активных ядер галактик типа Сейферт 1. Объяснено необычное распределение позиционных углов поляризованного излучения, которое вступает в противоречие с ожидаемой картиной собственного излучения стандартного аккреционного диска. Предложенный механизм детально учитывает отражение оптического излучения основания джета аккреционным диском с магнитным полем, что приводит к полному соответствию с данными поляриметрических наблюдений.

Получено соотношение, которое определяет связь между спином (безразмерным моментом вращения) сверхмассивной черной дыры и фактором Эддингтона, т.е. отношением между болометрической и эддингтоновской светимостями для аккреционного диска в активных ядрах галактик. Полученное соотношение зависит также от отношения между величинами давления магнитного поля и потока аккрецирующего вещества на радиусе горизонта событий черной дыры. В результате разработанный нами метод позволяет определить величину этого отношения для активных ядер галактик, у которых надежно определено значение спина черной дыры.

Руководитель проекта:

проф. Ю.Н.Гнедин (ГАО РАН).

Публикации:

1. M.Yu. Piotrovich, Yu.N. Gnedin, N.A. Silant'ev, T.M. Natsvlishvili, S.D. Buliga "Gamma Ray Emitting Globular Clusters: Possible Contribution from Relativistic Jets of Intermediate Mass Black Holes" // *New Astronomy*, 2016, v.45, p.29.
2. М.Ю. Пиотрович, Ю.Н. Гнедин, Н.А. Силантьев, Т.М. Нацвлишвили, С.Д. Булига "О структуре магнитного поля в стационарном аккреционном диске" // *Астрономический журнал*, 2016, т.93, №5, с.463.
3. Yu.N. Gnedin, M.Yu. Piotrovich "New results in searching for axions by astronomical methods" // *International Journal of Modern Physics A*, 2016, v.31, 1641019.

4. N.A. Silant'ev, Yu.N. Gnedin, M.Yu. Piotrovich, T.M. Natsvlshvili, S.D. Buliga "New mechanism of radiation polarization in type 1 Seyfert active galactic nuclei" // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 2016, v.462, p.2 (arXiv: 1606.09050).
5. М.Ю. Пиотрович, Ю.Н. Гнедин, С.Д. Булига, А.Г. Михайлов, Т.М. Нацвлишвили "Зависимость величины спина сверхмассивной черной дыры от фактора Эддингтона для аккреционного диска в активных ядрах галактик" // Астрофизика, 2016, т.59, №4, с.493.
6. M.Yu. Piotrovich, N.A. Silant'ev, Yu.N. Gnedin, T.M. Natsvlshvili, S.D. Buliga "Determination of magnetic fields in broad line region of active galactic nuclei from polarimetric observations" // New Astronomy, 2017, v.51, 65.
7. Scchöller, M.; Pogodin, M. A.; Cahuasquí, J. A.; et al. "Spectroscopic signatures of magnetospheric accretion in Herbig Ae/Be stars. I. The case of HD 101412 //Astronomy & Astrophysics, 2016, Volume 592, id.A50, 8 pp.

Проект 4.3 Влияние квантовых автоионизационных состояний электронов и протонов с положительной энергией на тормозное излучение в фотосферах одиночных белых карликов с сильным магнитным полем

В фотосферах одиночных белых карликов с температурой порядка одного электрон-вольта и магнитным полем свыше 10 мегагаусс в кулоновской системе частиц «электрон+протон» реализуются полностью связанные классические траектории не только при отрицательной, но и при положительной энергии. Такие связанные траектории существенно уменьшают объём фазового пространства, в котором могут находиться свободные электроны при столкновении с ядрами. Указанное ограничение в движении свободных частиц проявляется в уменьшении спектральной мощности их тормозного излучения на частотах ниже электронной частоты, а следовательно просветлению фотосферной плазмы для необыкновенных волн, линейно поляризованных поперёк силовых линий внешнего магнитного поля.

При квантовом подходе полностью связанным классическим траекториям соответствуют так называемые автоионизационные состояния — состояния с положительной механической энергией, которые отличаются резко повышенной вероятностью нахождения электрона около ядра и реализуются в узких резонансных интервалах энергии. В работе показано, что вероятность радиационного перехода электрона резко возрастает в случае, когда начальное и конечное состояния являются автоионизационными.

В свою очередь, вероятности радиационного перехода из «обычного» (неавтоионизационного) свободного состояния не отличаются по порядку величины для перехода в «обычное» и автоионизационное состояния. Такое свойство радиационных вероятностей порождает спектральные линии в частотной зависимости излучательной способности свободного электрона, которые соответствуют переходам между резонансными состояниями. Спектральные линии не перекрываются между собой из-за теплового движения частиц. Поэтому формирование автоионизационных состояний в системе «электрон+протон» и возрастание их времени жизни при увеличении индукции магнитного поля приводят к сосредоточению спектральной мощности тормозного излучения в узких спектральных линиях с уменьшением её уровня в континууме, а следовательно, к просветлению замагниченной плазмы фотосфер одиночных магнитных белых карликов в инфракрасном континууме не только при классическом, но и квантовом движении частиц. Поляризационное просветление фотосферы белого карлика с квантующим магнитным полем вплоть до гигагусса может быть причиной высокой линейной поляризации его излучения в инфракрасном диапазоне.

Руководитель проекта:

академик В.В.Железняков (ИПФ РАН).

Публикация:

1. Корягин С. А., Баландин И. А., «Вероятности тормозного излучения фотонов при низкоэнергичных электрон-ядерных столкновениях в магнитном поле», Известия вузов. Радиофизика, т. 60, 2017 (в печати).

Проект 4.4 Вспышечная активность вырожденных звездных объектов

Выполнена оценка параметров и построена схема эволюции уникальной двойной системы AR Скорпиона, в состав которой входит белый карлик, находящийся в состоянии эжектора и являющийся пульсаром в радио-, инфракрасном и оптическом диапазонах спектра. Впервые информация об этом источнике появилась в журнале Nature в июле 2016 года, где было отмечено, что белый карлик испускает пульсирующее излучение в оптическом и радиодиапазоне с периодом 102 секунды. Высокая интенсивность импульсов и нетепловой характер спектра не оставляют сомнений в том, что белый карлик в этой системе находится в состоянии эжектора. Нами было показано, что эта сис-

тема по основным своим проявлениям напоминает хорошо изученный нами ранее объект АЕ Водолея. В обоих случаях белый карлик находится в состоянии эжектора и напряженность магнитного поля на его поверхности порядка 50 МГс. Обе эти системы образовались вследствие аккреционной раскрутки, происходившей в предыдущую эпоху, в течение которой магнитное поле белого карлика было экранировано аккреционным потоком.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. Н.Р.Ихсанов (ГАО РАН).

Публикации:

1. Исакова П.Б., Ихсанов Н.Р., Жилкин А.Г., Бисикало Д.В., Бескровная Н.Г. "Особенности течения вещества в пекулярной (катаклизмической) переменной АЕ Водолея" // Астрон. журн., т. 93, № 5, 474-485 (2016).
2. Yudin, R.V., Potter, S.B., Townsend, L.J. « First multicolour polarimetry of TeV gamma-ray binary HESS J0632+057 close to periastron passage» // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 2016 (в печати).
3. Kim, V.Yu., Ikhsanov, N.R. «Magnetization of stellar wind in the HMXB OAO 1657-415» // ASP Conference Series, 2016 (в печати)
4. Beskrovnaya N.G., Ikhsanov N.R. «AR Sco – a new white dwarf in the ejector state» ASP Conference Series, 2016 (в печати)
5. Valyavin G., Ikhsanov N.R., Beskrovnaya N.G., et al. // In « Possible detection of magnetic field in X Persei», ASP Conference Series, 2016 (в печати)

5 Процессы аккреции и физика астрофизических дисков и джетов

Проект 5.1 Моделирование структуры аккреционных дисков с учетом сдвиговой неустойчивости и магнитных полей. Исследование взаимодействия релятивистских и нерелятивистских потоков вещества в присутствии магнитного поля

Рассмотрена математическая модель формирования аккреционного диска в двойной полуразделенной звездной системе. Математическая модель включает в себя систему уравнений трехмерной газовой динамики для невязкого газа с учетом гравитационного потенциала Роша и радиационного охлаждения вещества, записанную во вращающейся системе отсчета.

С помощью разработанного параллельного программного комплекса, реализующего численное решение уравнений модели, проведен расчет гидродинамических и радиационных процессов в аккреционном диске двойной звездной системы, включающей красный карлик (донор) и белый карлик (аккретор). В месте контакта аккреционной струи и диска образуется локальное сгущение аккрецирующей плазмы в форме протяженной структуры на внешней границе аккреционного диска (рис. 11), приводящее к повышенному энерговыделению в форме излучения. По полученной картине течения плазмы и объемного энерговыделения в аккреционном диске построены синтетические кривые блеска (рис. 12). Показано хорошее соответствие данных моделирования и наблюдательных данных.

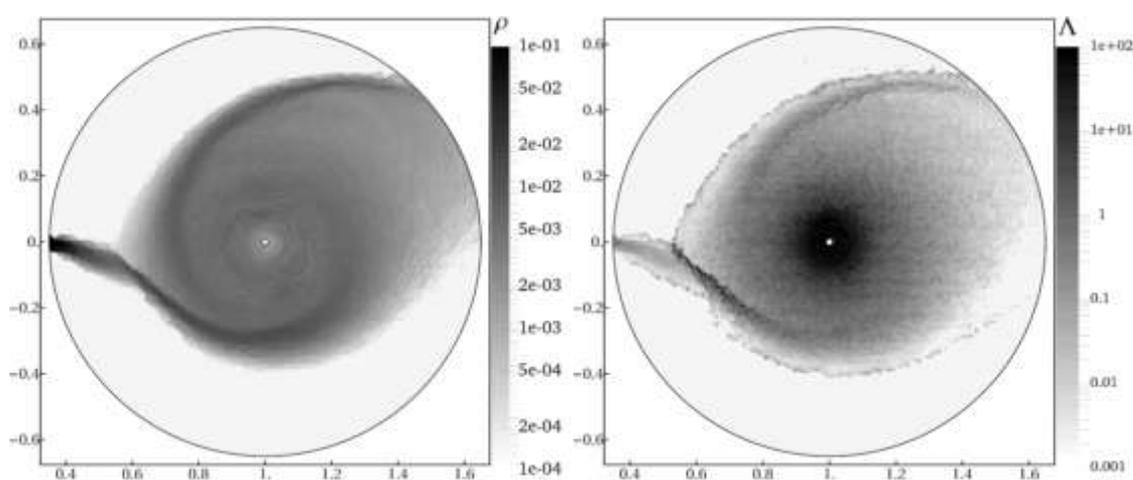


Рис. 11 – Распределения плотности и функции охлаждения в экваториальной плоскости аккреционного диска.

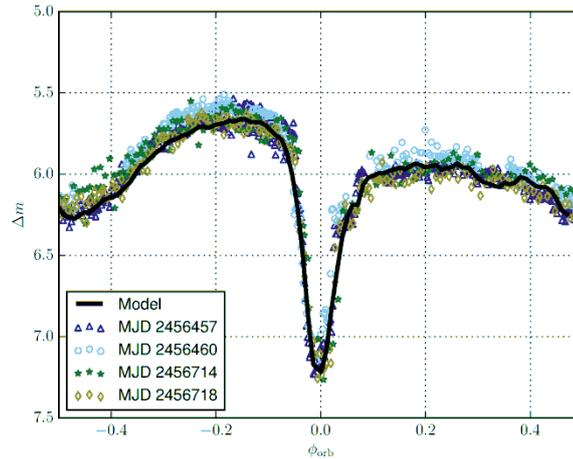


Рис. 12 – Сравнение синтетической кривой блеска и наблюдательных данных для системы V1239Her.

Вычислительные сложности, связанные с моделированием взаимодействия релятивистского и нерелятивистского ветров обусловлены тем обстоятельством, что эти течения описываются различными системами уравнений. Кроме того, положение границы между областями релятивистского и нерелятивистского течений (тангенциального разрыва) заранее не известно. Неизвестно также положение ударных волн, в которых происходит торможение и нагрев потоков холодной плазмы, текущих от пульсара и Ве-звезды. Дополнительная сложность состоит в том, что плазма до прохождения через тормозящую ударную волну имеет практически нулевое давление. Кроме того, имеет место существенное различие в скоростях релятивистской и нерелятивистской плазм, скорость релятивистской плазмы на три порядка превосходит скорость нерелятивистской плазмы. Пространственные масштабы течений одного порядка и требуют одинакового разрешения при численном моделировании. Это означает, что при интегрировании уравнений газовой динамики и релятивистской газовой динамики явными схемами временной шаг будет лимитироваться условием Куранта в области релятивистского течения. При этом в области нерелятивистского течения этот шаг будет на три порядка меньше допустимого из соображений устойчивости счета.

В связи с этим разработан специальный вычислительный алгоритм для совместного численного интегрирования нестационарных уравнений газовой динамики и релятивистской газовой динамики. Интегрирование уравнений газовой динамики проводилось в области, ограниченной нерелятивистской ударной волной и тангенциальным разрывом. Аналогично, интегрирование уравнений релятивистской газовой динамики проводилось в области, ограниченной релятивистской ударной волной и тангенциальным разрывом. Вне этих областей течение считалось заданным. Расчетная сетка адаптирова-

лась к решению в том смысле, что ее граничные узлы "привязывались" к фронтам ударных волн и тангенциальному разрыву. Соответствующим образом двигались и остальные узлы сетки. Расчетная сетка строилась таким образом, что ее узлы "скользили" вдоль семейства прямолинейных направляющих. В качестве этих направляющих использовались либо прямые, параллельные оси симметрии, либо лучи, выходящие из одной точки. На каждой направляющей выделялись узлы, расположенные на релятивистской ударной волне, тангенциальном разрыве и нерелятивистской ударной волне соответственно. На интервалах между тангенциальным разрывом и ударными волнами узлы распределялись равномерно.

Для численного интегрирования уравнений газовой динамики и релятивистской газовой динамики на подвижной сетке разработан вычислительный алгоритм, основанный на явной разностной схеме годуновского типа второго порядка аппроксимации. Для определения положений и скоростей фронтов ударных волн и тангенциального разрыва решались задачи о распаде разрыва между состояниями, разделенными соответствующими фронтами. Для расчета скорости нерелятивистской ударной волны задача Римана решалась точно (с использованием итерационной процедуры). Для расчета скорости релятивистской ударной волны и тангенциального разрыва задача Римана решалась в акустическом приближении. Чтобы избежать сложностей, связанных с большой разницей скоростей плазмы в релятивистской и нерелятивистской областях, выполнено перемасштабирование переменных.

На рис. 13 показана типичная картина течения релятивистской и нерелятивистской плазмы, возникающая после столкновения двух ветров.

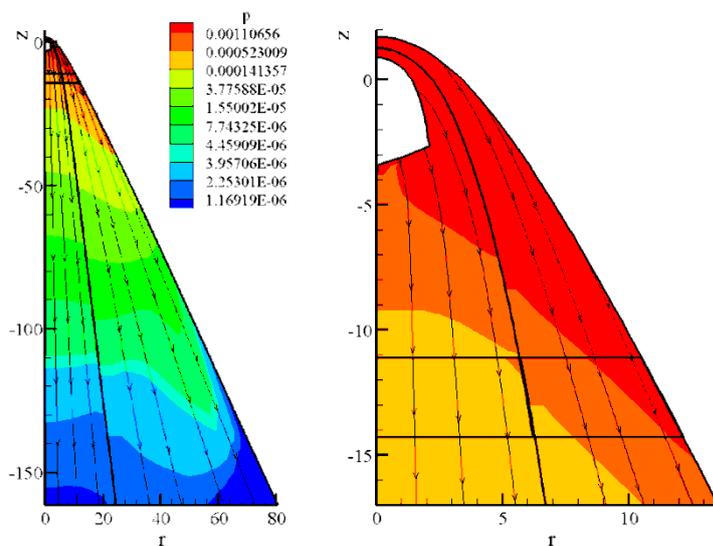


Рис. 13 – Типичная картина течения релятивистской и нерелятивистской плазмы после столкновения двух ветров (давление).

Руководитель проекта:

чл.-корр. РАН Ю.П. Попов.

Состав группы:

Ю.П. Попов, д.ф.-м.н. В.М. Чечеткин (ИПМ РАН).

Публикации:

1. Lukin V.V., Malanchev K.L., Shakura N.I., Postnov K.A., Chechetkin V.M., Utrobin V.P. "3D-modeling of accretion disc in eclipsing binary system V1239 Her" // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc. (в печати).
2. Koldoba A. V, Ustyugova G. V, Lii P.S., Comins M.L., Dyda S., Romanova M.M., Lovelace R.V.L., "Numerical MHD codes for modeling astrophysical flows" // New Astronomy, Volume 45, p. 60-76, 2016.
3. Comins M.L., Romanova M.M., Koldoba A. V, Ustyugova G. V, Blinova A. A., "Lovelace R.V.L., The effects of a magnetic field on planetary migration in laminar and turbulent discs" // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 459, Issue 4, p. 3482-3497, 2016.
4. Фимин Н.Н., Орлов Ю.Н., Чечёткин В.М., "Применение методов теории обыкновенных дифференциальных уравнений для исследования свойств решений уравнений Клейна-Гордона в ОТО" // Мат. моделирование, N 4, 2017 (в печати).
5. Фимин Н.Н., Чечёткин В.М., "Геометрические основания когерентности гидродинамических вихревых систем" // Нелинейная динамика, N 3, 2017 (в печати).

Проект 5.2 Динамические процессы в околозвездном окружении молодых звезд и их наблюдательные проявления

С помощью разработанного пакета программ проведены расчеты движения планетезималей в остаточных (безгазовых) дисках двойных и одиночных звезд с планетой. Впервые было показано, что планета в планетезимальном диске формирует многополосную структуру: коорбитальное с планетой кольцо, заполненное веществом, две полости, отделяющие кольцо от остального диска, а также две полости в резонансах 2:1 и 1:2 с планетой (рис. 14). Расчеты показали, что переход от одиночной звезды в центре диска к двойной существенно увеличивает время жизни коорбитального кольца.

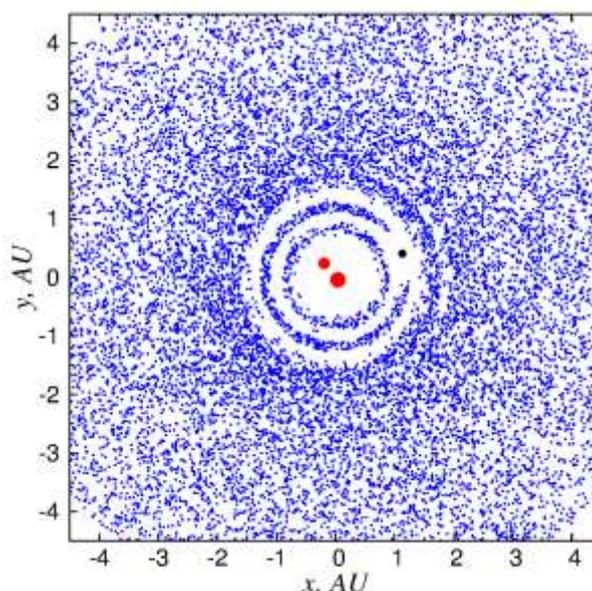


Рис. 14 – Планета в планетезимальном диске формирует многополосную структуру: коорбитальное с планетой кольцо, заполненное веществом, две полости, отделяющие кольцо от остального диска, а также две полости в резонансах 2:1 и 1:2 с планетой.

Завершено исследование фотометрической активности звезд типа UX Ori в оптической и ближней инфракрасной областях спектра на большой временной шкале (около 15 лет). У одной из программных звезд (SV Ser) обнаружен инфракрасный цикл с периодом около 7 лет (рис. 15). Моделирование периодической компоненты инфракрасного излучения показало, что оно образуется при температуре 2500-3000 К во внутреннем

газовом диске звезды. Источником возмущений может быть либо протопланета, либо субзвездный компаньон с большой полуосью орбиты около 5 а.е.

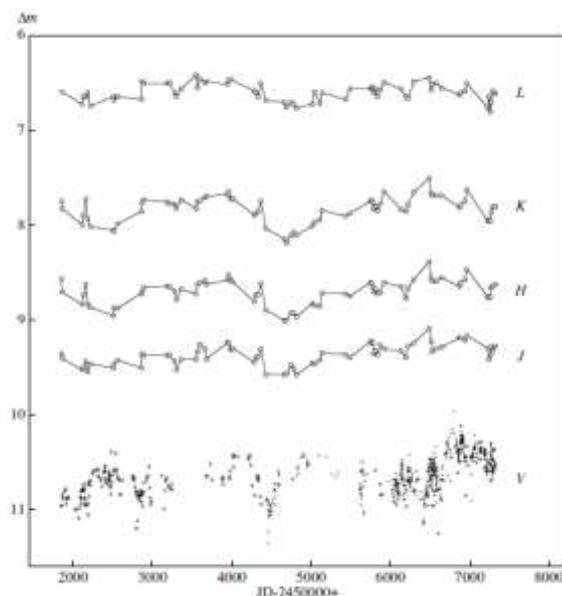


Рис. 15 – Инфракрасный цикл звезды SV Сер.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. В.П. Гринин (ГАО РАН).

Публикации:

1. Шенаврин В.И., Гринин В.П., Ростопчина-Шаховская А.Н., и др. “"Цунами" в протопланетном диске SV Сер” // Астрон. Ж, 93, N 12, 2016.
2. Demidova T.V., Shevchenko I.I., “Three-lane and multilane signatures of planets in planetesimal discs” // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 463, L22, 2016.

Проект 5.3 Результаты исследований сверхтонкой структуры астрономических объектов

Процессы, протекающие в ядрах галактик, являются одним из важнейших и малоисследованных направлений современной астрофизики, что связано с их необычайно малыми угловыми размерами. Усовершенствование метода сверхдальней радиоинтерферометрии позволило существенно продвинуться в этом направлении. Исследована тонкая структура активных ядер галактик Лебедь А, NGC 1275 и 3С 273 и 3С 454.3. Достигну-

то предельное угловое разрешение, достигающее 1.2 мксек. дуги ($1 \mu\text{as} = 2 \text{ мм}$ на Луне). Получены уникальные результаты по сверхтонкой структуре активных зон ядер галактик. Выделены сопла и эжектируемые биполярные потоки – джеты и контрджеты. Установлена чрезвычайно высокая яркостная температура потоков на выходе сопел $T_b \gg 10^{12} \text{ К}$, которая определяется излучением эжектируемых релятивистских электронов. Скорости эжекции потоков $V \approx 0.1c$, размеры биполярных потоков $\rho \approx 1 \text{ пк}$ и определяются временем высвечивания электронов $t \approx 3 \text{ лет}$. Увеличенные размеры джета, наблюдаемые на уровне нескольких процентов, определяются их послесвечением, ускорением, компенсирующим потери излучения. Установлено, что во вращающихся биполярных потоках возбуждаются кольцевые токи – магнитные поля. Тангенциальные направления колец наблюдаются в виде параллельных цепочек компонент. Эжекция джета и контрджета равновероятна. Отличие определяется движением потока джета по полю – поток ускоряется и контрджета против поля – тормозится.

Полученные результаты является значительным вкладом в понимание протекающих процессов в ядрах галактик. Показано, что кинематика протекающих процессов соответствует вихревой природе – антицентрифуге. Окружающая тепловая плазма поступает на “аккреционный диск” и перетекает по спиральной траектории – рукавам к центру. Преобладает круговая составляющая скорости над радиальной. Возникающий избыточный угловой момент по мере накопления уносится вращающимся биполярным потоком, формируется высокоскоростной поток, окруженный низкоскоростными составляющими. Вращающиеся потоки ускоряются и коллимируются, что определяется газовой динамикой. Тепловая плазма по мере перетекания ускоряется, разогревается до релятивистских температур и эжектируется. Остаток вещества выпадает на формирующееся центральное тело – черную дыру. Получены радио карты объектов с активными ядрами за многолетний период с различными угловыми разрешениями (пример на рис. 16).

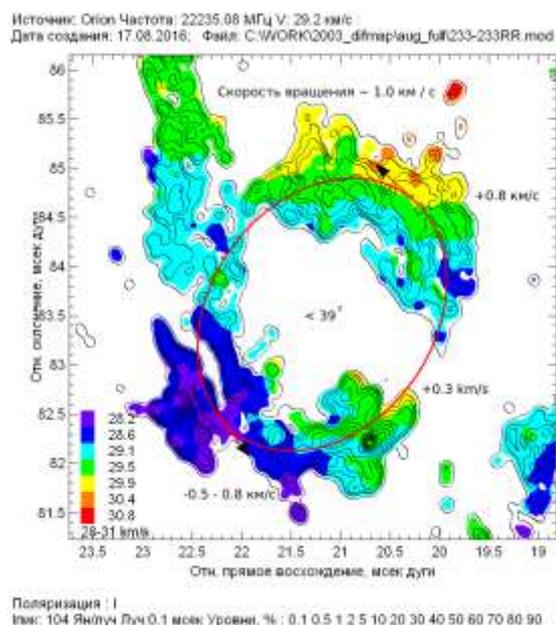


Рис. 16 – Кольцевая структура в Орионе КЛ.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. Л.И.Матвеевко (ИКИ РАН).

Публикации

1. Матвеевко Л.И., Сиваконь С.С. "Активная область ядра блазара 3С 454.3" // Письма в *Астрономический журнал*, 2016, том 42, №10, с. 703–716.
2. Матвеевко Л.И., Селезнев С.В. "Особенности тонкой структуры ядра галактики ngs 1275" // Письма в *Астрономический журнал*, 2016, том 42, №4, с. 237–245.
3. Матвеевко Л.И., "Многоликое единство" // Препринт ИКИ № 2179, 2016
4. Матвеевко Л.И., Сиваконь С.С. "Активная зона ядра квазара 3С 273" // Письма в *Астрономический журнал*, 2016 (в печати).

Проект 5.4 Локальные гравитационные коллапсы при планетообразовании

Проведен анализ и систематизация результатов численного моделирования развития неустойчивости и формирования самогравитирующих сгустков вещества (зародышей протопланет) в тонком газовом околозвездном диске (рис. 17). Численные эксперименты проводились по модели диска, основанной на комбинации гидродинамики сглаженных частиц (SPH) и метода Хокни для решения уравнения Пуассона на равномерной декартовой сетке. Показано, что процесс образования сгущений может быть охарактере-

ризован средней скоростью нарастания суммарной массы сгустков во всем диске, которая значительно зависит от физических параметров диска и незначительно зависит от параметров численной модели. Подтверждено, что существует диапазон параметров диска, для которого появление или отсутствие сгустков в диске зависит от используемого разрешения и деталей численного алгоритма, в то время как за пределами этого диапазона такая зависимость отсутствует. Показано, что при комбинировании метода SPH с сеточным методом для вычисления гравитационной силы необходимо, чтобы гидродинамический радиус сглаживания не превосходил длину ячейки сетки, в противном случае в решении возникают выраженные счетные эффекты: диск приобретает квадратную форму и появляется искусственное разбиение модельных частиц на группы из-за развития парной (клампинговой) неустойчивости в SPH.

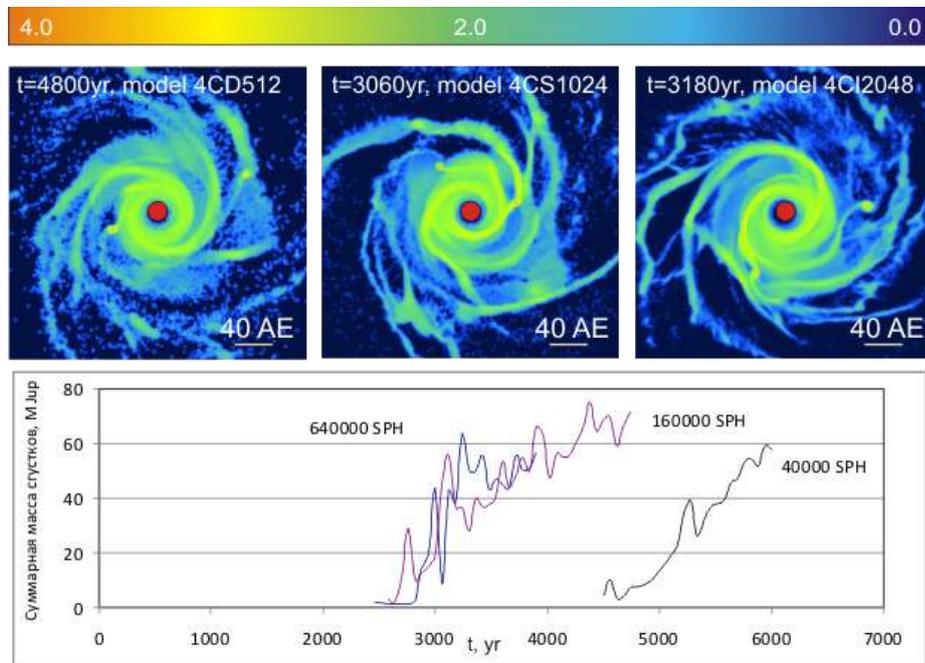


Рис. 17 – Вверху – логарифм поверхностной плотности газа для модели одного и того же диска, рассчитанной с использованием разного количества SPH-частиц.

Первый столбец – 40 000, второй – 160 000, третий – 640000 SPH частиц;

внизу – суммарная масса сгустков в диске как функция времени.

Масса диска составляет 0.25 массы Солнца.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. В.Н.Снытников (ИК СО РАН).

Публикации:

1. Стояновская О.П. "Численное моделирование развития гравитационной неустойчивости и образования сгустков вещества в массивных околозвездных дисках с использованием интегральной характеристики для интерпретации результатов" // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2016. Т.17. С.339-352
2. Снытников В.Н., Стояновская О.П. "К вопросу о корректности численного моделирования гравитационной неустойчивости с развитием множественных гравитационных коллапсов" // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2016. Т.17. С.365-379.

6 Переменность гамма-, рентгеновских, радио– и инфракрасных источников

Проект 6.1 Экспериментальное исследование гамма-всплесков космологического происхождения и мягких гамма-репитеров

Выполнен систематический анализ 150 гамма-всплесков с надежными оценками космологического красного смещения, зарегистрированных прибором КОНУС-ВИНД в триггерном режиме в период с начала 1997 г. по середину 2016 г. Представленная выборка является наиболее полным, на сегодня, набором данных о подобных событиях, исследованном в широком диапазоне энергий 20 кэВ – 15 МэВ. В результате проведенного нами временного и спектрального анализа для каждого всплеска определены длительности (T_{100} , T_{90} , T_{50}), спектральные параметры излучения для моделей CPL и Band, вычислен пиковый (F_{peak}) и интегральный (S) потоки энергии в диапазоне 20 кэВ – 10 МэВ. Для ~50 событий вычислены спектральные задержки между кривыми блеска в разных диапазонах энергии. Подготовлен к публикации каталог с данными о временных и спектральных характеристиках 150 космических гамма-всплесков эксперимента Конус-ВИНД, для которых на наземных телескопах было измерено космологическое красное смещение.

Создан каталог коротких гамма-всплесков. База данных каталога охватывает период с 1994г. до 2010г. и включает в себя 296 коротких всплесков. Выполнен временной и спектральный анализ коротких всплесков, зарегистрированных в эксперименте КОНУС-ВИНД. Показано наличие дополнительной степенной спектральной компоненты в гамма-излучении коротких всплесков. Проанализирована дополнительная компонента в излучении коротких всплесков, получившая название «продленное излучение» (extended emission, EE). Выполнено сравнение данных об этой компоненте, полученных в экспериментах КОНУС-ВИНД, БАТ/Свифт и БАТСЕ.

В эксперименте КОНУС-ВИНД был выполнен временной и спектральный анализ данных по первому промежуточному всплеску от гамма-репитера SGR 1935+2154. Длительность события и его наблюдаемая энергетика позволяют заключить, что всплеск действительно является первым зарегистрированным промежуточным всплеском от нового гамма-репитера.

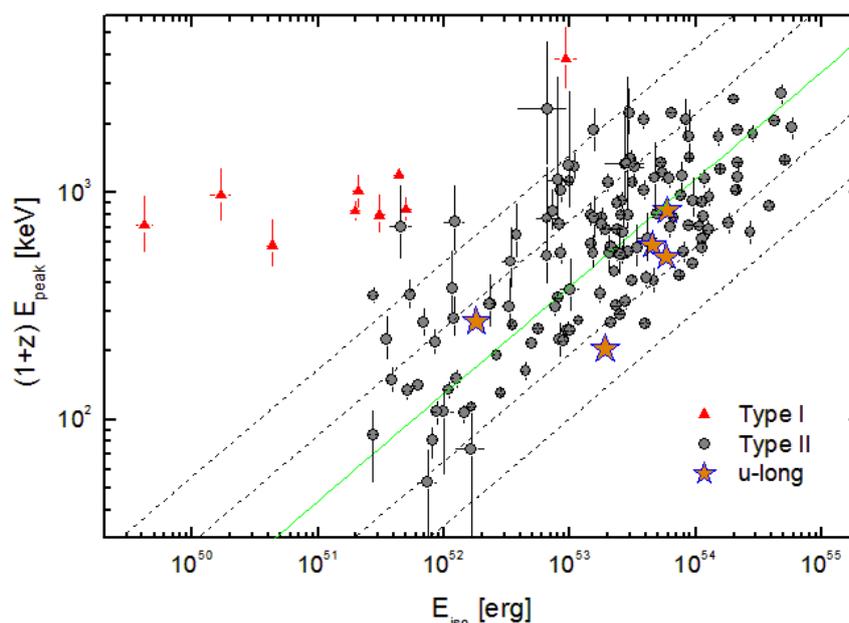


Рис. 18 – Корреляция параметров жесткости и интенсивности гамма-всплесков, представленных в каталоге, в космологической системе отсчета. GRB типа II (круглые символы), следуют соотношению Амати [$E_{p,z} \sim E_{iso}^{1/2}$] на высоком уровне достоверности (ранговый коэффициент корреляции 0.69 для 131 события). Сплошная линия – наилучшая аппроксимация выборки степенным законом с показателем 0.472, прерывистые линии – коридор стандартных отклонений на уровнях 1 и 2 сигма. Той же корреляции следуют и «сверхдлинные» гамма-всплески, зарегистрированные прибором Конус-ВИНД в фоновом режиме (показаны звездочками), а «короткие/жесткие» GRB (треугольники) лежат вне коридора ± 3 сигма для всплесков типа II.

Руководитель проекта:

к.ф.-м.н. В.Л. Аптекарь (ФТИ РАН).

Публикации:

1. D.S. Svinkin, D.D. Frederiks, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, V.D. Pal'shin, Ph.P. Oleynik, A.E. Tsvetkova, M.V. Ulanov, T.L. Cline, and K. Hurley, "The second Konus-Wind catalog of short gamma-ray bursts" // 2016, ApJS, 224: 10;
2. A.V. Kozlova, G.L. Israel, D.S. Svinkin, D.D. Frederiks, V.D. Pal'shin, A.E. Tsvetkova, K. Hurley, J. Goldsten, D.V. Golovin, I.G. Mitrofanov, and X.-L. Zhang "The first

observation of an intermediate flare from SGR 1935+2154, 20" // 2016, Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 460, 2008-2014

Проект 6.2 Нестационарные и взрывные процессы, сопровождающие рождение, жизнь и смерть черных дыр, нейтронных звезд и белых карликов в рентгеновских двойных

Одно из важнейших достижений обсерватории гамма-лучей ИНТЕГРАЛ – открытие ранее неизвестной популяции галактических рентгеновских двойных систем, так называемых "быстрых рентгеновских транзиентов". Это системы, состоящие из рентгеновского пульсара и сверхгиганта раннего спектрального класса. До их открытия было известно всего несколько рентгеновских двойных со сверхгигантами – квазипостоянных источников, излучающих за счет аккреции из звездного ветра сверхгиганта, как для таких систем и ожидается. Было не понятно, почему их так мало. С открытием "быстрых транзиентов" число систем со сверхгигантами заметно возросло и уже достигает нескольких десятков. Согласно предложенной сотрудниками ИКИ РАН модели "быстрых транзиентов", причина, почему постоянно излучающих систем со сверхгигантами так мало, кроется в действии центробежного барьера на границе магнитосферы нейтронной звезды, останавливающего аккрецию ("эффект пропеллера"); тогда как вспышки "быстрых транзиентов" связаны с кратковременным преодолением этого барьера из-за локального повышения плотности или уменьшения скорости звездного ветра. Хотя качественно модель хорошо объясняет наблюдаемое явление, для ее количественной проверки необходимо надежное определение орбитальных и других параметров двойной системы у ряда "быстрых транзиентов", что является сложной задачей. В 2016 г. завершено подобное исследование оптической звезды-спутника одного из эталонных "быстрых рентгеновских транзиентов", источника IGR J17544-2619. В работе, основанной на данных многолетних фотометрических и спектральных наблюдений источника на российско-турецком телескопе РТТ-150, надежно, методами доплеровской спектроскопии, определен период и другие орбитальные параметры системы, измерена функция масс и масса оптической звезды. Полученные значения хорошо согласуются с упомянутой моделью "быстрых транзиентов".

Предложен новый механизм, объясняющий бимодальное распределение светимости сверхэддингтоновских рентгеновских пульсаров в двойных системах (ультраярких

рентгеновских источников). В основе механизма лежит возможность превышения при высоких темпах аккреции радиуса сферизации аккреционного потока над радиусом магнитосферы нейтронной звезды. С помощью этого механизма объяснено поведение ультраяркого рентгеновского пульсара М 82 X-2, недавно открытого спутником NuSTAR. Показано, что предложенная модель естественным образом объясняет и измеренное ускорение периода этого пульсара, которое не удается объяснить никаким другим образом.

В ходе наблюдения ряда рентгеновских барстеров телескопом JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ открыты серии близких повторяющихся рентгеновских всплесков I-го рода, состоящих из 2-3 событий с временем рекуррентности, много меньшим характерного (при наблюдаемом среднем темпе аккреции) времени накопления вещества, необходимого для инициирования термоядерного взрыва на поверхности нейтронной звезды. Ясно, что наблюдаются термоядерные взрывы, происходящие в разных областях на поверхности нейтронной звезды. Показано, что такие серии всплесков находят естественное объяснение в модели "слоя растекания" аккрецирующего вещества по поверхности нейтронной звезды в случае достаточно высокого темпа аккреции. Существование тройных всплесков требует некоторого уточнения модели – показана важность центральной кольцевой зоны "слоя растекания".

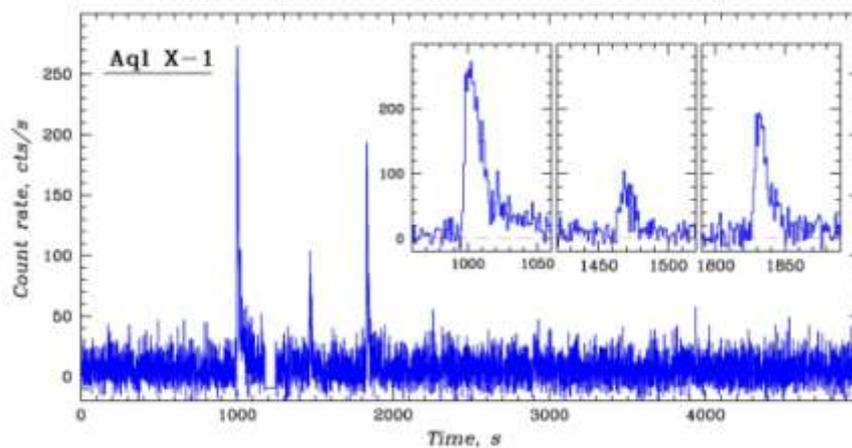


Рис. 19 – Кривые блеска серии из трех почти одновременных всплесков от рентгеновского барстера Aql X-1.

На 1.5-м российско-турецком телескопе РТТ-150, а также 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории удалось провести длительную серию подробных наблюдений уникального события гравитационного микролинзирования на двойной системе Gaia1baue в галактическом диске, в том числе – проследить прохождение ею 4-й каустики и детально промерить профиль ее пика. Дальнейший анализ позволит определить

параметры звезд, участвовавших в этом событии, и даже измерить их радиусы, а также определить орбитальные параметры двойной системы.

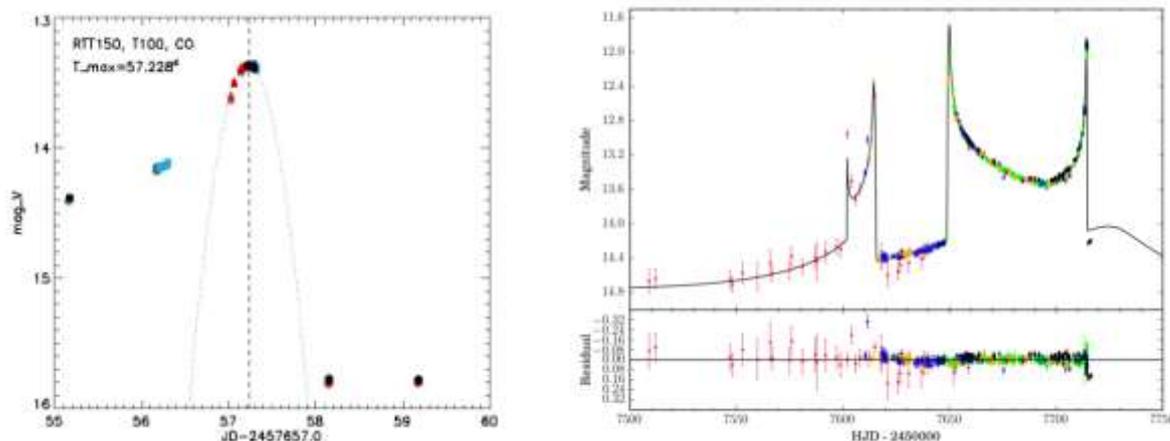


Рис. 20 – Кривая блеска всего события Gaia16aye (слева) и профиль пика его 4-й каустики (справа).

Руководитель группы:

д.ф.-м.н. С.А.Гребенев (ИКИ РАН).

Публикации:

1. С.А. Гребенев, «Причина бимодального распределения светимости ультраяркого рентгеновского пульсара M82 X-2» // Письма в Астрономический журнал, т. 43, № 4, 2017 (в печати).
2. С.А. Гребенев, И.В. Человеков «Кратные рентгеновские всплески и модель "слоя растекания" аккрецирующего вещества по поверхности нейтронной звезды» // Письма в Астрономический журнал, т. 43, № 4, 2017 (в печати).
3. И.Ф. Бикмаев, Е.А. Николаева, В.В. Шиманский, А.И. Галеев, Р.Я. Жучков, Э.Н. Иртуганов, С.С. Мельников, Н.А. Сахибуллин, С.А. Гребенев, Л.М. Шарипова «Спектроскопическое исследование оптического спутника быстрого рентгеновского транзита IGR J17544-2619 по наблюдениям на 1.5-м телескопе РТТ-150» // Письма в Астрономический журнал, т. 43 № 4-5, 2017 (в печати).
4. I. Khamitov, I. Bikmaev, R. Burenin, S. Grebenev, A. Tkachenko, E. Irtuganov, S. Melnikov, N. Sakhbullin, M. Pavlinsky, R. Sunyaev, H. Esenoglu, D. Koseoglu, V. Bakis, E. Sipahi «RTT-150 detected the new brightening of the Gaia16aye binary microlensing system» // The Astronomer's Telegram, # 9753, 2016.
5. I. Khamitov, I. Bikmaev, R. Burenin, S. Grebenev, M. Tanriver, A. Avci, S. Kaynar,

D. Gumus, M. Kocak, T. Ozisik, M. Dindar, H. Esenoglu, H. Kirbiyik, O. Okuyan, T. Saygacan, A. Semena, A. Tkachenko, E. Irtuganov, S. Melnikov, M. Pavlinsky, N. Sakhibullin, R. Sunyaev «Detection of the 4th caustic crossing in the Gaia16aye binary microlensing system» // The Astronomer's Telegram, # 9780, 2016.

Проект 6.3 Поиск внутрисуточной переменности внегалактических радиоисточников на радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская» ИПА РАН

Целью проведения радиометрических наблюдений внегалактических источников с вариациями плотности потока на масштабах в несколько дней и меньше (IDV) является решение вопроса о природе этих мерцаний. Периодические наблюдения подобных источников через месячные интервалы помогут подтвердить или опровергнуть гипотезу, связывающую мерцания с дифракцией на турбулентной межзвёздной среде, временной масштаб которой зависит от взаимной скорости Земли и дифрагирующей среды.

За отчётный период (с января по октябрь 2016 г.) проведено 86 сеансов наблюдений внегалактических IDV-источников на двух радиотелескопах РТ-32 обсерваторий ИПА РАН «Зеленчукская» (41 сеансов) и «Бадары» (45 сеансов). Наблюдения проводились в диапазонах длин волн 3.5 см, 6.2 см и 13 см. Общая продолжительность сеансов составила около 37 суток. Исследуемые радиоисточники – блазары: J2253+1608, J0238+1636, J1504+1029. Исходные данные исследуемых и опорных объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сведения о наблюдаемых объектах

№	Источник	Прямое восхождение (2000) чч:мм:сс	Склонение (2000) гг:мм:сс	плотность потока на длине волны 3.5 см, Ян	плотность потока на длине волны 6.2 см, Ян	Тип
1	J2253+1608	22:53:57.748	16:08:53.56	~10-15	~10-15	исследуемый
	J2250+1419	22:50:25.344	14:19:52.04	0.76	1.06	опорный
2	J0238+1636	02:38:38.90	16:36:59.3			исследуемый
	J0318+1628	03:18:57.80	16:28:32.706	1.72	3.09	опорный
3	J1504+1029	15:04:24.98	10:29:39.2			исследуемый
	J1631+1156	16:31:45.29	11:56:03.2	0.525	0.760	опорный

Проведена обработка и анализ наблюдений источника J2253+1608 за периоды 2014 – 2015 гг. Наблюдения 2016 года находятся на начальной стадии обработки. Для обработки радиометрических наблюдений использовалось ПО «Class Visual» и «База данных радиометрических наблюдений», разработанные в ИПА РАН.

Объект J2253+1608 (3 C454.3) обладает сильной переменностью изученной во всём электромагнитном диапазоне. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн хорошо изучена долговременная переменность этого блазара, которая представляет собой мощные вспышки с характерными временами 1.5 – 2 года. Согласно полученным нами результатам наблюдений блазар J2253+1608 в период 2014-2015 гг. показал рост плотности потока с 7 до 18 Ян (рис. 21). Эффект IDV был уверенно обнаружен в сеансах 2014 года (23 и 30 ноября, и 28 декабря) и 2015 года (11 и 18 января, 29 марта, 8 и 9 ноября (рис. 22)).

Также в 2016 году было проведено несколько РСДБ-сеансов по картографированию IDV-источников на базе пяти станций («Светлое» РТ-32, «Зеленчукская» РТ-32 и РТ-13, и «Бадары» РТ-32 и РТ-13). Получено изображение источника J2253+1608 по сеансу RU499 от 16-17 июля на длине волны 13 см (рис. 23). Обработка остальных РСДБ-сеансов продолжается.

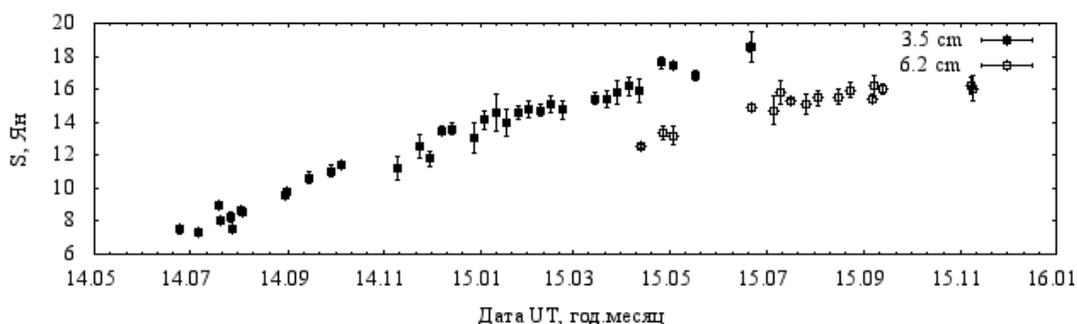


Рис. 21 – Кривые блеска радиоисточника J2253+1608. Тёмные и светлые квадраты – усреднённые за сеанс (~12ч) наблюдения на РТ-32 на длинах волн 3.5 и 6.2 см.

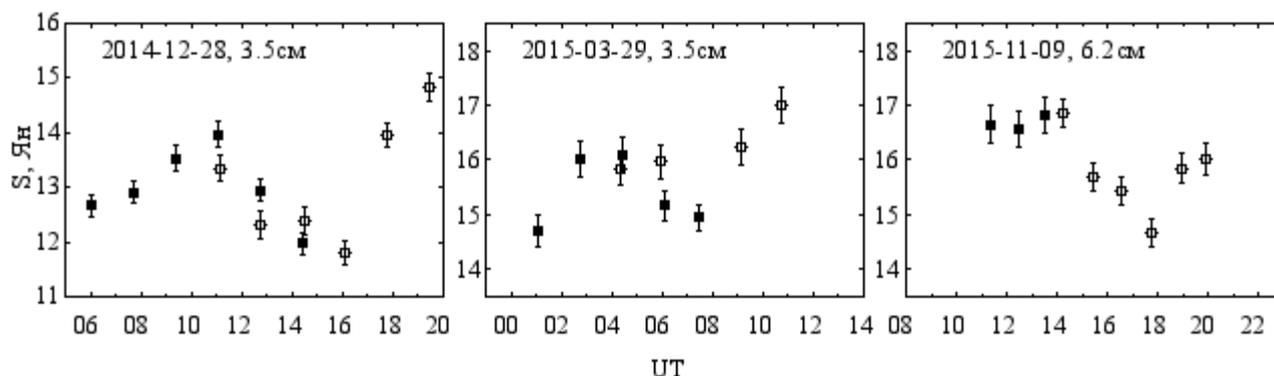


Рис. 22 – Кривые блеска радиоисточника J2253+1608 в течение сеанса (~12ч) наблюдений на РТ-32 в обсерваториях «Бадары» (тёмные квадраты) и «Зеленчукская» (светлые квадраты) в периоды обнаружения IDV. Каждая точка на графике – усреднённая за цикл плотность потока.

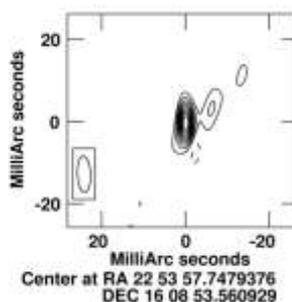


Рис. 23 – Изображение радиоисточника J2253+1608.

Руководитель проекта:

к.ф.-м.н. М.А. Харинов (ИПА РАН).

Публикации:

1. А. Г. Горшков, А. В. Ипатов, И. А. Ипатов, В. К. Конникова, В. В. Мардышкин, М. Г. Мингалиев, М. А. Харинов, А. А. Евстигнеев. – Короткая переменность плотности потока радиоизлучения блазара J0530+1331 // Письма в *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 42. – № 8. – С. 560-570.
2. М. А. Kharinov, V. K. Konnikova, A. V. Ipatov, A. G. Mikhailov, V. V. Mardyshkin, A. E. Melnikov, A. D. Smirnov. – Observation of intraday variability of extragalactic radio sources on IAA antennas // 13th European VLBI network symposium & users meeting. Program & Abstracts book. St.Petersburg, Russia, 20-23 september 2016. – P. 68.

3. А. Г. Горшков, В. К. Конникова, А. В. Ипатов, М. А. Харинов, А. Г. Михайлов, В. В. Мардышкин. – Поиск внутрисуточной переменности на антеннах ИПА РАН // Труды ИПА РАН. – 2016. – Вып. 38. – С. 80-89.

Проект 6.4 Изучение характера переменности источников высоких энергий на основе регулярных фотометрических и спектральных наблюдений в оптическом и ИК-диапазонах

В соответствии с согласованной программой международной кооперации WEBT получены длительные ряды фотометрических данных для источников, входящих в программу; в тех случаях, когда блеск объекта превышал 18 величину в полосе R, выполнялась также поляриметрия.

Завершен анализ данных мониторинга S5 0716+71, проведенного в марте 2014 в BVRI и NIR полосах. В результате получены беспрецедентные данные непрерывных синхронных многоволновых наблюдений в течение 110 часов, включающих 2 серии плотных рядов поляриметрических данных в полосе R. Во время этой кампании источник продемонстрировал сильную переменность с вариациями от пика к пику примерно в 30% и спектральной эволюцией «чем ярче, тем голубее», содержащей модуляцию на суточной временной шкале с наложением микровспышек порядка 0.1^m , длящихся около часа. На основе анализа эволюции микровспышки в блазаре S5 0716+714 и в рамках геометрического подхода сделано заключение о том, что такие микровспышки происходят в отдельных однородных эмиссионных областях, обладающих магнитным полем с высокой степенью упорядоченности.

После нескольких лет спокойного состояния блазар СТА 102 претерпел исключительно мощную вспышку в сентябре-октябре 2012 г. Вспышка наблюдалась на частотах от гамма до БИК диапазона, включая Fermi and Swift data, а также фотометрические и поляриметрические данные нескольких обсерваторий. Интенсивная кампания, проведенная коллаборацией GASP-WEBT в оптике и БИК, вместе с архивными данными позволяет сделать сравнение вспышки с прежним периодом активности этого блазара в 2004-2005 гг. Обнаружено замечательное сходство поведения объекта в оптике и гамма во время вспышки с временем задержки между двумя кривыми блеска около 1 часа, что обозначает пространственное совпадение областей, ответственных за оптическое и гамма излучение.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о существовании новых физических механизмов генерации жесткого электромагнитного излучения струями релятивистской плазмы, создаваемыми сверхмассивными черными дырами – энергетическими машинами, находящимися в центрах галактик.

Как следствие, появились новые, совершенно свежие данные о возобновлении необыкновенной активности блазара СТА 102 (см. телеграммы ниже). Новые очень быстрые и сильные оптические вспышки блазара наблюдались 26/27 октября 2016. Яркость в полосе R возросла на 1 величину, достигнув значения $R=13.946$, при этом степень поляризации увеличилась вдвое. Именно такое развитие событий предсказывалось в работе Larionov et al. (2016, Monthly Notices of the Royal Astron. Soc., 461, 3047) и через 10 дней прогноз подтвердился. После падения блеска на 0.9 величины объект снова вспыхнул, на этот раз превысив исторический максимум, $R=13.4$. Этот рекорд продержался ровно неделю, 13 ноября объект вышел на новый исторический максимум, $R=12.7^m$! В настоящее время блазар СТА 102 интенсивно наблюдается на многих телескопах мира в различных спектральных диапазонах, в том числе на телескопах ГАО РАН.

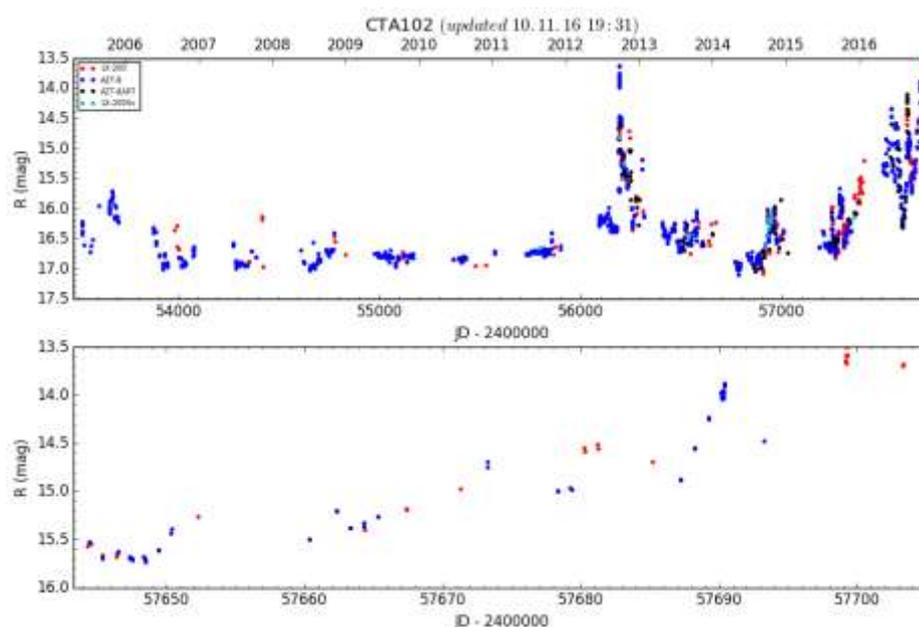


Рис. 24 – Кривая блеска в полосе R блазара СТА 102 на эпоху 10 ноября 2016.

Руководитель проекта:

к.ф.-м.н. А.А.Архаров (ГАО РАН).

Публикации:

1. Larionov, V. M.; Villata, M.; Raiteri, C. M.; et al. «Exceptional outburst of the blazar CTA 102 in 2012: the GASP-WEBT campaign and its extension» // 2016 Monthly Notices of the Royal Astron. Soc..461.3047L.
2. Casadio, Carolina; Gómez, José; Jorstad, Svetlana; et al. «The Connection between the Radio Jet and the γ -ray Emission in the Radio Galaxy 3C 120 and the Blazar CTA 102» // 2016Galax...4...34C
3. Bhatta, G.; Stawarz, Ł.; Ostrowski, M.; Markowitz, A.; et al. «Multifrequency Photopolarimetric WEBT Observation Campaign on the Blazar S5 0716+714: Source Microvariability and Search for Characteristic Timescales» // 2016ApJ...831...92B
4. Jorstad, S., Larionov, V., & Mokrushina, A., "A fast optical outburst of the quasar CTA102" // 2016, The Astronomer's Telegram, 9676
5. Larionov, V., Mokrushina, A. A., & Grishina, T. S., "Violent optical activity of the blazar OJ 287" // 2016, The Astronomer's Telegram, 9650
6. Larionov, V. M., Kopatskaya, E. N., Arkharov, A. A., & Klimanov, S. A., "Violent activity of quasar 3C 454.3" // 2016, The Astronomer's Telegram, 9192
7. Larionov V.M., Kopatskaya E.N. "Enhanced optical activity of blazar CTA102" // The Astronomer's Telegram, 9192

7 Активные процессы в галактиках; нестационарные явления и структура нашей Галактики

Проект 7.1 Физические процессы в ядрах активных галактик, центральных областях нормальных галактик и в скоплениях галактик

Выполнен большой объем работ по исследованию скоплений галактик и микроволнового фонового излучения по данным обзора всего неба обсерваторией Planck: поиск скоплений осуществлялся в микроволновом диапазоне по искажению спектра реликтового излучения в горячем газе скоплений (эффект Сюняева-Зельдовича), оптическое отождествление — по наблюдению кандидатов в скопления на 1.5-м Российско-Турецком Телескопе RTT-150, 6-м телескопе БТА САО РАН, 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, а также на ряде зарубежных телескопов. В ходе оптических наблюдений было измерено красное смещение скоплений, определено 'богатство' скоплений. Целью работы было составление большой выборки (каталога) скоплений галактик, пригодной для последующих точных измерений функции масс скоплений, а затем, при сравнении этой функции с результатами космологических моделирований, — определения основных космологических параметров. Активная работа велась по построению карт эффекта Сюняева-Зельдовича, по исследованию корреляции наблюдаемой величины этого эффекта с инфракрасным фоном, а также во многих других направлениях работы с данными обсерватории Planck. Работы выполнены большим международным коллективом авторов при активном участии Р.А.Буренина, Р.А.Сюняева и Е.М.Чуразова.

Руководитель проекта:

академик Р.А.Сюняев (ИКИ РАН).

Публикации:

1. Planck Collaboration, ... Burenin R.A., ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results», *Astron.Astrophys.*, 594, A1, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A...1P>).
2. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. IX. Diffuse component separation: CMB maps», *Astron. Astrophys.*, 594, A9, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A...9P>).
3. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XI. CMB power

spectra, likelihoods, and robustness of parameters», *Astron. Astrophys.*, 594, A11, 2016
(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..11P>).

4. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters», *Astron. Astrophys.*, 594, A13, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..13P>).

5. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity», *Astron. Astrophys.*, 594, A14, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..14P>).

6. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XVI. Isotropy and statistics of the CMB», *Astron. Astrophys.* 594, A16, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..16P>).

7. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XVII. Constraints on primordial non-Gaussianity», *Astron. Astrophys.*, 594, A17, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..17P>).

8. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XIX. Constraints on primordial magnetic fields», *Astron. Astrophys.*, 594, A19, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..19P>).

9. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XX. Constraints on inflation», *Astron. Astrophys.*, 594, A20, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..20P>).

10. Planck Collaboration, ... Churazov E.M., ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXII. A map of the thermal Sunyaev-Zeldovich effect», *Astron. Astrophys.*, 594, A22, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..22P>).

11. Planck Collaboration, ... Churazov E.M., ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXIII. The thermal Sunyaev-Zeldovich effect-cosmic infrared background correlation», *Astron. Astrophys.*, 594, A23, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..23P>).

12. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXIV. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts», *Astron. Astrophys.*, 594, A24, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..24P>).

13. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXV. Diffuse low-frequency Galactic foregrounds», *Astron. Astrophys.*, 594, A25, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..25P>).

14. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXVI. The Second Planck Catalogue of Compact Sources», *Astron. Astrophys.*, 594, A26, 2016

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..26P>).

15. Planck Collaboration, ... Burenin R.A., ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXVII. The second Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources», *Astron. Astrophys.*, 594, A27, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..27P>).
16. Planck Collaboration, ... Sunyaev R.A., ... «Planck 2015 results. XXVIII. The Planck Catalogue of Galactic cold clumps», *Astron. Astrophys.*, 594, A28, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...594A..28P>).
17. Planck Collaboration, ... Burenin R.A., ... Sunyaev R.A., ... «Planck intermediate results. XXXVI. Optical identification and redshifts of Planck SZ sources with telescopes at the Canary Islands observatories», *Astron. Astrophys.*, 586, A139, 2016 (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016A%26A...586A.139P>).

Проект 7.3 Вспышечные процессы в активных галактических ядрах (АГЯ) в радио- и гамма-диапазонах

Проведен кинематический анализ джетов на парсековых масштабах на основе 19-летних VLBA наблюдений на 15 ГГц. Получено 1625 новых VLBA (на 15 ГГц) изображений 295 джетов, связанных с активными ядрами галактик (АЯГ) из программы MOJAVE и 2см VLBA обзоров, охватывающих наблюдения за период с 31 августа 1994 по 20 августа 2013. На рис. 25 представлены карты некоторых из них. Для 274 АЯГ, по крайней мере, с 5 эпохами VLBA наблюдений, проанализирована кинематика 961 яркой индивидуальной детали их джетов на парсековых масштабах. 122 из этих джетов не были проанализированы ранее в программе MOJAVE. В случае 451 деталей джетов, которые имели по крайней мере 10 эпох, также проанализирована их кинематика на предмет возможных ускорений. Как минимум, половина деталей показывают нерадиальные и /или траектории ускорений, указывая на то, что не баллистическое движение является общим для струй в АЯГ. Поскольку невозможно экстраполировать ускорения, которые произошли до нашего мониторинга, мы можем только определить достоверные даты выброса для 24 % деталей, которые имели значительные собственные движения. Распределения максимальных видимых скоростей джетов всех 295 АЯГ, измеренных в нашей программе, находится ниже 5с. При этом только очень небольшая часть видимых скоростей выше 30с. Самая большая скорость в обзоре равна 50с, которая измерена в джете квазара PKS 0805-07 и свидетельствует о максимальном Лоренц-факторе струи, равном 50, в родительской популяции.

Источник 1ES 1011+496 ($z = 0.212$) был обнаружен на высоких энергиях ($E > 100$ ГэВ) гамма-телескопом MAGIC в 2007 г. Отсутствие одновременных наблюдений на более низких энергиях приводило к неполному описанию распределения энергии широкополосного спектра. Проведен анализ данных в диапазоне от очень высоких энергий до радио в течение 2011-2012 гг. с помощью таких инструментов и обсерваторий как MAGIC, Fermi-LAT, Swift, KVA, OVRO и Metsähovi в дополнение к данным оптической поляриметрии с Liverpool Telescope и радиоданных проекта MOJAVE. Источник 1ES 1011+496, в основном, находился в спокойном состоянии во всех диапазонах наблюдений, показывая лишь умеренную переменность от радио до рентгеновского диапазона. В оптическом диапазоне степень поляризации составила менее 10%, тогда как отдельные области структуры в радиодиапазоне показывали поляризацию вплоть до 60%. В радио- и оптическом диапазонах были найдены схожие тренды вращения позиционного угла электрического вектора. По данным РСДБ-наблюдений обнаружена сверхсветовая видимая скорость выброса, составляющая $1.8 \pm 0.4 c$, что является максимальным значением для объектов типа BL Lac с пиком энергетического спектра на высоких энергиях. Впервые, энергетический спектр источника 1ES 1011+496 был параметризован в диапазоне от 0.1 ГэВ до 1 ТэВ, позволив провести более надежную интерпретацию наблюдаемых свойств источника в рамках однозонного синхротрон-комptonного сценария.

Проведено широкополосное исследование радиогалактики 3C 120 и блазара СТА 102 в течение беспрецедентных вспышек обоих источников в гамма-диапазоне. Для каждого из источников выполнен совместный анализ данных в гамма-лучах и радиодиапазоне с использованием восстановленных VLBA изображений объектов на частоте 43 ГГц, полученных в рамках программы Бостонского университета по изучению ядер активных галактик, обеспечивших необходимое пространственное разрешение для зондирования выброса на парсековых масштабах во время вспышек в диапазоне высоких энергий. Для обогащения радиоданных для 3C 120 были также использованы VLBA наблюдения источника на частоте 15 ГГц, проведенные в рамках программы MOJAVE. Вспышки в гамма-диапазоне ассоциируются с прохождением новым компонентом струи, распространяющимся вдоль выброса с видимой сверхсветовой скоростью, через область РСДБ-ядра. При этом, не все выбросы новых компонент приводят к активности источника в гамма-лучах. В обоих источниках гамма-вспышки происходили только в тех случаях, когда новые компоненты двигались под меньшими углами к лучу зрения. Сделан вывод, что зона гамма-излучения находится в окрестностях положения радиоядра, но за пределами области образования широких

эмиссионных линий. Это указывает, что наиболее вероятным механизмом формирования гамма-излучения является комптоновское рассеяние.

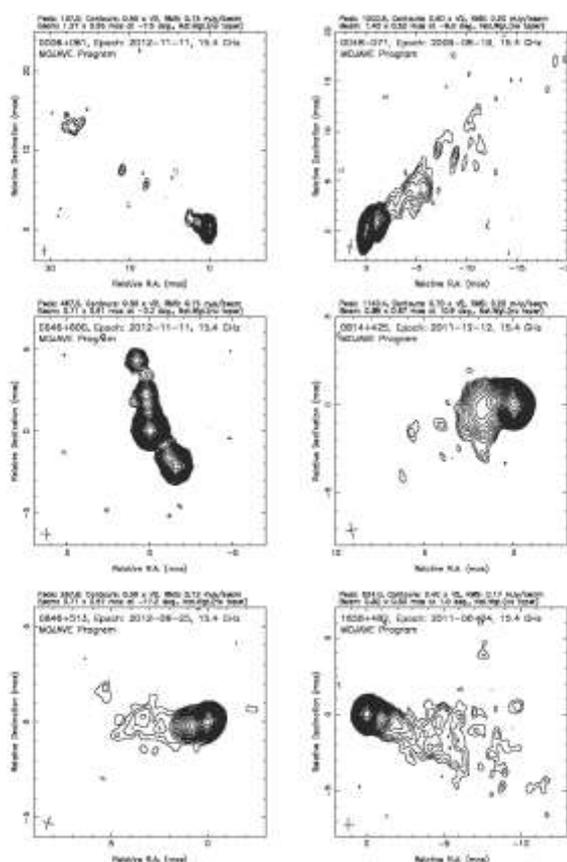


Рис. 25 – Карты некоторых джетов, связанных с АЯГ.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. А.Т.Байкова (ГАО РАН).

Публикации:

1. Casadio C.,...Pushkarev A.B. et al. "The Connection between the Radio Jet and the γ -ray Emission in the Radio Galaxy 3C 120 and the Blazar CTA 102" // *Galaxies*, vol. 4, issue 4, p. 34
2. Lister M.L.,... Pushkarev A.B. et al. "MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz" // *The Astronomical Journal*, Volume 152, Issue 1, 16 pp. (2016)
3. Aleksic J., ...,Pushkarev A.B., et al. "Insights into the emission of the blazar 1ES 1011+496 through unprecedented broadband observations during 2011 and 2012" // *Astronomy & Astrophysics*, Volume 591, 14 pp.

Проект 7.7 Изучение спиральной структуры Галактики по объектам в областях активного звездообразования

Получены новые оценки расстояния от Солнца до плоскости симметрии Z_0 и вертикальной шкалы диска h с использованием выборок различных объектов. Для этого нами были взяты современные данные о 91 звездной ОБ-ассоциации, 187 зонах НП, 148 звездах Вольфа-Райе, 90 мазерных источниках в областях активного звездообразования и 496 классических цефеидах. Ко всем этим выборкам были применены три модели распределения плотности: модель экспоненциального распределения, модель самогравитирующего изотермального диска и модель гауссового распределения плотности. Показано, что при использовании любой из этих трех моделей имеется зависимость найденных значений вертикальной шкалы диска h от возраста объектов выборки. При этом оказалось, что значения h , найденные по выборке мазеров, заметно отскакивают от этой зависимости. На основе индивидуальных результатов определения Z_0 , полученными по различным четырем выборкам (без выборки мазеров), было вычислено среднее значение $Z_0 = -16 \pm 2$ пк. Эта оценка является новой, но в тоже время она находится в хорошем согласии с другими известными оценками этой величины.

Показано, что с наименьшими ошибками значения вертикальной шкалы диска определяются на основе модели самогравитирующего изотермального диска, на основе которой найдены следующие величины: $h = 40.2 \pm 2.1$ пк по ОБ-ассоциациям, $h = 47.8 \pm 3.9$ пк по звездам Вольфа-Райе, $h = 48.4 \pm 2.5$ пк по зонам НП и $h = 66.2 \pm 1.6$ пк по цефеидам.

По выборке ОБ-ассоциаций получена оценка поверхностной $\Sigma = 6$ кпк⁻² и объемной $D(Z_0) = 50.6$ кпк⁻³ плотности. На основе этих оценок показано, что в Галактике может находиться около 5000 ОБ-ассоциаций.

Получены новые оценки расстояния Солнца от плоскости симметрии Z_0 и вертикальной шкалы диска h с использованием данных о зонах НП, гигантских молекулярных облаках и метанольных мазерах. Для всех этих объектов имеются оценки расстояния. Для определения параметров вращения Галактики использованы рассеянные звездные скопления из каталога MWSC (Milky Way Star Clusters). По данным о более 2000 скоплений разного возраста найдено значение круговой скорости вращения окосолнечной окрестности вокруг центра Галактики $V_0 = 236 \pm 6$ км/с для принятого значения расстояния Солнца до галактического центра $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк. Получены значения параметров угловой скорости вращения Галактики. Влияние спиральной волны плотности обнаружено только в выборке скоплений моложе 50 млн. лет.

Фотометрия из каталогов Tycho-2, 2MASS и WISE для гигантов сгущения и гигантов ветви на расстоянии до 25 кпк в направлении галактических полюсов позволила проанализировать вариации в зависимости от расстояния различных характеристик закона межзвездного поглощения в инфракрасном диапазоне. Результаты, полученные методом экстраполяции закона поглощения, согласуются для разных классов звезд и разных характеристик, а также с предыдущими исследованиями. Привычный закон поглощения с малым поглощением в инфракрасном диапазоне характерен только для тонкого слоя не далее 100 пк от галактической плоскости и для двух тонких слоев около $Z=-600$ и $Z=+500$ пк. Вдали от галактической плоскости, в гало Галактики закон поглощения в инфракрасном диапазоне в диапазоне от 1.4 до 5.4 мкм иной: поглощения в полосах Ks, W1, W2, W3 и W4 составляют, соответственно, 0.17, 0.16, 0.16, 0.07 и 0.03 от поглощения в полосе V. Точность этих коэффициентов – 0.03. Если закон поглощения отражает, прежде всего, распределение пылинок по размеру, то вдали от галактической плоскости доля крупных пылинок больше, чем в околосолнечной межзвездной среде. Мы удалились от галактической плоскости на $|Z|=25$ кпк в направлении северного и южного галактических полюсов. И при этом привычный для околосолнечной окрестности закон поглощения с малым поглощением в ИК диапазоне обнаружили только около галактической плоскости при $|Z|<100$ пк и в двух тонких слоях при $Z\sim-600$ пк и $Z\sim 500$ пк. В остальной части вертикального столба длиной 50 кпк сквозь всю Галактику и околосолнечное пространство поглощение менее селективно, т.е. отношение поглощения длинноволнового излучения к поглощению коротковолнового больше, чем в околосолнечной окрестности. Если закон поглощения зависит, прежде всего, от размера пылинок, то настоящее исследование указывает на увеличение доли крупной пыли при удалении от галактической плоскости, а также – на сохранение этого состояния среды во всем гало Галактики, по крайней мере, до $|Z|<25$ кпк. Обнаружено также увеличение доли крупной пыли в ближайших окрестностях Солнечной системы, при $-2 < Z < 14$ пк, согласующееся с характеристиками потока крупной пыли, вторгающегося в Солнечную систему, видимо, из наиболее запыленных районов пояса Гулда.

Руководитель проекта:

д.ф.-м.н. В.В.Бобылев (ГАО РАН).

Публикации:

1. Бобылев В.В., Байкова А.Т. Анализ Z-распределения молодых объектов тонкого диска Галактики. Письма в АЖ, т. 42, No1, 3-12, 2016.

2. Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематический анализ звезд околосолнечной окрестности по данным каталога RAVE4. Письма в АЖ, т. 42, No2, 110-119, 2016.
3. Бобылев В.В., Байкова А.Т. Z-распределение водородных облаков и мазеров с кинематическими расстояниями. Письма в АЖ, т. 42, No3, 210-220, 2016.
4. Бобылев В.В., Байкова А.Т. Потоки Геркулеса, Вольф 630 и кинематика галактического бара. Письма в АЖ, т. 42, No4, 260-272, 2016.
6. Бобылев В.В. Система молекулярных облаков в поясе Гулда. Письма в АЖ, т. 42, No8, 600-610, 2016.
7. Байкова А.Т., Бобылев В.В. Кривая вращения и распределение массы в Галактике по данным о скоростях объектов на расстояниях до 200 кпк. Письма в АЖ, т. 42, No9, 625-641, 2016.
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Широкова К.С., Кинематика Галактики по данным о рассеянных звездных скоплениях из каталога MWSC. Письма в АЖ, т. 42, No11, 793-806, 2016.
9. Bobylev V.V., Bajkova A.T., Shirokova K.S. Periodic variations in the Galactic masers vertical velocities. *Baltic Astronomy* V.25, No1, 15-22, 2016.
10. Bobylev V.V., Bajkova A.T., Estimation of the vertical disk scale height using young Galactic objects. *Baltic Astronomy*, V.25, 261-266, 2016.
11. Гончаров Г.А. Закон поглощения на расстоянии до 25 кпк в направлении галактических полюсов, Письма в *Астрономический журнал*, 42, № 7, 494-509, 2016.
12. Гончаров Г.А. Межзвёздное поглощение, *Астрофизика*, 59, вып. 4, 617-652, 2016.
13. Rastorguev A.S., M.V. Zabolotskikh, A.K. Dambis, N.D. Utkin, A.T. Bajkova, and V.V. Bobylev, Galactic masers: kinematics, spiral structure and the disk dynamic state. *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.*, 2017.
14. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Кинематика Галактики по ОБ звездам с собственными движениями из каталога Gaia DR1. Письма в АЖ, т. 43, No3, 2017.
15. Бобылев В.В., Кинематика Галактики по цефеидам с собственными движениями из каталога Gaia DR1. Письма в АЖ, т. 43, No3, 2017.
16. Смирнов А.А., Сотникова Н.Я., Кошкин А.А., Моделирование медленных баров в анизотропных дисковых системах, Письма в АЖ, 2017.

Проект 7.8 Генерация и эволюция магнитного поля в источниках гамма-всплесков

Релятивистские плазменные течения образуются в источниках гамма-всплесков, активных ядрах галактик и микроквазарах. Излучение от такого течения возникает на больших расстояниях от центральной «машины» в результате формирования бесстолкновительных релятивистских ударных волн. Согласно стандартной картине, в бесстолкновительной ударной волне усиливается магнитное поле и происходит ускорение частиц, которые и генерируют наблюдаемое излучение. Тем не менее, расчёты показывают, что либо генерируемое на фронте ударной волны магнитное поле затухает очень быстро, либо отсутствует ускорение частиц, если набегающий поток несёт в себе значительное магнитное поле.

Предложена новая модель бесстолкновительной релятивистской ударной волны, которая устраняет противоречия существующих теорий. В модели последовательно учитывается как ускорение и излучение частиц, так и влияние этих процессов на пространственную структуру фронта ударной волны. Отправным обстоятельством служит то, что испущенные за фронтом (комptonизированные) фотоны высоких энергий взаимодействуют с испущенными там же низкоэнергичными синхротронными фотонами и порождают в набегающем течении электрон-позитронные пары, которые передают течению свой импульс и модифицируют ударную волну. Этот процесс общего характера происходит в любой релятивистской ударной волне.

Решение для пространственного профиля скорости в набегающем течении удаётся получить в неявном виде. Однако такой формы решения достаточно для вычисления функции распределения по энергии для электрон-позитронных пар, пересекающих фронт ударной волны, и для вычисления спектра их излучения, который оказывается степенным. Получена зависимость скачка лоренц-фактора на фронте ударной волны от доли энергии излучения перед фронтом, превращённой в электрон-позитронные пары. Показано, что скачкообразная зависимость (соответствующая ударной волне с разрывом) исчезает, если указанная доля превышает пороговую величину примерно 0,14. В этом отношении полученное для оптически тонкой среды решение демонстрирует сходство с известными решениями для радиационно-доминированных ударных волн, существующих в оптически толстой среде.

Полученное решение отличается автоподстройкой параметров, которая происходит посредством отрицательной обратной связи между числом рождённых перед фронтом ударной волны электрон-позитронных пар и энергией, до которой они разогреваются за

фронтом. В результате произвольно заданные начальные параметры системы быстро эволюционируют к устойчивым значениям. При этом типичная энергия комптонизированных фотонов оказывается чуть ниже порога рождения пар при взаимодействии с низкоэнергичными фотонами синхротронного излучения. Таким образом, модель позволяет вычислить энергию излучающих электронов и положение максимума в спектре их синхротронного излучения.

Наконец, модель выявляет механизм формирования долгоживущего магнитного поля, которое необходимо для объяснения синхротронного излучения источников гамма-всплесков. Затравочное магнитное поле формируется в набегающем потоке из-за развития вейбелевской неустойчивости на электрон-позитронных парах, рождённых излучением, прошедшим через фронт ударной волны, и характеризуемых анизотропным распределением по импульсу. Из-за большой длительности процесса развития неустойчивости, пространственный масштаб формируемого магнитного поля на много порядков превышает толщину плазменного скин-слоя. На фронте ударной волны магнитное поле усиливается, сохраняя свой пространственный масштаб. Таким образом, «магнитная» энергия оказывается сосредоточенной в долгоживущих крупномасштабных модах, длина затухания которых сопоставима с пространственным масштабом ударной волны и вполне достаточна для эффективного синхротронного излучения.

С целью проверки модели, проведены численные расчёты генерации и затухания магнитного поля для условий, когда в набегающем потоке происходит пространственно однородная, растянутая во времени инжекция высокоэнергичных частиц. Результаты численных расчётов хорошо согласуются с предсказаниями модели.

Руководитель группы:

чл.-корр. РАН В.В.Кочаровский (ИПФ РАН).

Публикация:

1. Derishev E. V., Piran T., «Particle acceleration, magnetization and radiation in relativistic shocks», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 460, p. 2036–2049, 2016.

8 Космологические аспекты

Проект 8.1 Исследование структуры массивных объектов Вселенной

Существенно улучшен код для подготовки начальных условий космологических численных моделей, позволяющий готовить численные расчеты с переменным в пространстве разрешением.

Данный код был применен для расчетов (совместно с зарубежными коллегами) распределения вещества в Местной Вселенной. Изучена вероятность образования пары галактик типа Млечный путь — Туманность Андромеды в «местном филаменте». Найдено, что данная вероятность существенно превышает таковую для произвольного объема. Таким образом, Местная Группа галактик является объектом, хорошо воспроизводимым в численных расчетах со стандартной космологической моделью.

Также были обнаружены и различия между предсказаниями стандартной модели и результатами наблюдений, но уже на существенно меньших масштабах, много меньше 1 Мпк, для изучения которых потребовался статистический анализ внутреннего строения гало ряда наблюдаемых галактик: спутников Млечного пути, карликовых галактик поля, галактик сверхнизкой яркости. Для сравнения анализировались гало скоплений галактик.

Найдено существенное несоответствие восстановленного по наблюдениям спектра мощности возмущений плотности и стандартного спектра, возможно, говорящее о двухкомпонентном составе темной материи.

Руководители проекта:

академик Н.С.Кардашев, проф. В.В.Лукаш (АКЦ ФИАН).

Публикации:

1. Carlesi E., Sorce J., Hoffman Y., Gottloeber S., Yepes G., Libeskind N., Pilipenko S., Knebe A., Courtois H., Tully B., Steinmetz M., «Constrained Local Universe Simulations: a Local Group factory», *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.*, 458, 900, 2016.
2. Demianski M., Doroshkevich A. G., «Beyond the standard Lambda CDM cosmology: the observed structure of DM halos and the shape of the power spectrum», arXiv astro-ph: 1511.07989 (в печати).

Проект 8.2 Межзвездная и межгалактическая среда на космологических красных смещениях

Уравнение состояния межгалактического газа определяется процессами фотоионизации и адиабатического охлаждения вследствие расширения Вселенной. Эти процессы эволюционируют с красным смещением, определяя температуру и плотность межгалактической среды. Получена оценка параметра $\gamma-1$, определяющего вид зависимости температура-плотность для межгалактического вещества на среднем красном смещении $z \sim 2-3$. Разработана автоматическая процедура анализа абсорбционных линий Лайман-альфа леса, которая позволяет определять доплеровскую ширину линий, b , и лучевые концентрации нейтрального водорода, N . Оценки параметра $\gamma-1$, выполнены на основе предположения, что нижняя граница распределения N - b , соответствует преимущественно тепловому уширению спектральных линий.

Скопления галактик являются самыми большими гравитационно-связанными объектами во Вселенной. Они представляют собой самые протяженные резервуары фотонов тормозного излучения, генерируемого горячим релятивистским газом скоплений. Рассчитаны оптические толщи (по процессу гамма-гамма рождения электрон-позитронных пар) при прохождении гамма-излучения от квазаров и блазаров ($z \sim 2-4$) через скопление галактик ($z \sim 0.5-1$). Оптическая толщина для типичных параметров скопления составляет величину $\sim 10^{-2}$, что в будущем при повышении чувствительности гамма-телескопов, может быть зарегистрировано.

Руководитель проекта:

академик Д.А. Варшалович (ФТИ РАН).

Проект 8.3 Исследование процесса перехода Вселенной к стадии доминирования темной энергии и обратно

Проведено сравнение ранее предложенного авторами класса "волнисто-взбитых" инфляционных моделей ранней Вселенной, описывающих локализованные особенности вида пиков и провалов на фоне гладкого поведения в Фурье-спектре мощности первичных скалярных (адиабатических) неоднородностей во Вселенной, с последними наблюдательными данными коллаборации "Планк" 2015 г. об анизотропии

температуры и поляризации реликтового электромагнитного излучения. Определено, какие из моделей и соответствующих им локальных особенностей в первичном спектре остаются допустимыми при учете как анизотропии, так E-моды поляризации, а также верхнего предела на ее B-моду из карты BISEP-Планк для поляризованного излучения пыли в нашей Галактике. Наиболее простая из этих моделей, содержащая всего 2 дополнительных параметра по сравнению со стандартной космологической моделью с гладким потенциалом инфлатона без особенностей, при наилучшем фитировании всех наблюдательных данных дает выигрыш в χ^2 -статистике более чем на 13 единиц.

Найдено точное решение задачи о том, для каких моделей темной энергии в рамках скалярно-тензорной теории гравитации общего вида индекс скорости роста неоднородных возмущений плотности нерелятивистской материи в однородной изотропной Вселенной является строго постоянным. Показано, что если темная энергия описывается квинтэссенцией (скалярным полем, минимально связанным с эйнштейновской гравитацией), то постоянство индекса исключено, так как либо это потребовало бы перехода к фантомному поведению темной энергии в конечный момент времени, что невозможно для квинтэссенции, либо, если темная энергия следует поведению нерелятивистской материи на стадии доминирования последней, современная плотность материи $\Omega\{m0\}$ оказывается слишком малой. Поэтому в рамках эйнштейновской гравитации индекс роста должен быть переменным. В скалярно-тензорной гравитации фантомное поведение темной энергии допустимо, поэтому там существуют модели, для которых этот индекс постоянен в ходе всей эволюции Вселенной, в том числе такие, в которых темная энергия имеет постоянное уравнение состояния или, наоборот, следует нерелятивистской материи при больших красных смещениях.

Произведено сравнение с последними наблюдательными космологическими данными класса моделей метастабильной темной энергии во Вселенной, для которых скорость распада темной энергии не зависит от внешних условий, включая скорость расширения Вселенной и тензор кривизны Римана ее пространства-времени, и определяется только внутренними микроскопическими параметрами, подобно явлению радиоактивного распада неустойчивых ядер химических элементов. Рассмотрены случаи как простого экспоненциального распада темной энергии с изменением ее уравнения состояния, так и ее распада на темную нерелятивистскую материю или темное излучение. Для всех вариантов не обнаружено признаков распада темной энергии. Получены нижние пределы на отношение скорости распада к постоянной Хаббла меньше 0.3, а для канала распада на темную материю даже меньше 0.02 (1 сигма).

Сформулирована точная связь (дуальность) между решениями для космологических моделей, заполненных скалярными полями, минимально и не-минимально связанными с гравитацией. Исследован специальный класс интегрируемых моделей, у которых потенциал скалярного поля в эйнштейновской системе отсчета выражается через гиперболические функции и которые обладают сравнительно простой динамикой в йордановской системе при конформной связи. Показано, каким образом эта связь обобщается на случаи закрытых и открытых моделей Фридмана. При этом космологическая динамика остается простой. Найдены условия, при которых решения из рассматриваемого класса интегрируемых моделей обладают минимумом масштабного фактора.

Найдены интегрируемые изотропные и анизотропные космологические модели со скалярными полями, минимально и неминимально связанными с гравитацией. На примере модели с постоянным потенциалом и минимальной связью продемонстрированы различия между общими решениями этих моделей в системах отсчета Йордана и Эйнштейна.

В формализме q -теории, где релятивистский квантовый вакуум рассматривается как самоподдерживающаяся система с сохраняющимся релятивистским зарядом, рассматривается динамический процесс его релаксации к равновесию. Показано, что если использовать обратимую динамику, то изотропная пространственно-плоская Вселенная асимптотически приближается к равновесному вакууму Минковского только тогда, когда Большой Взрыв произошел из равновесного начального состояния. Для описания общего случая разработано расширение q -теории как из-за необратимых процессов релаксации q -поля, так и из-за возможной нестабильности вакуума де-Ситтера.

Руководитель проекта:

академик А.А.Старобинский (ИТФ РАН).

Публикации:

1. D. K. Hazra, A. Shafieloo, G. F. Smoot, A. A. Starobinsky, "Primordial features and Planck polarization" //2016, J. Cosm. Astropart. Phys., v. 1609, 009 arXiv:1605.02106.
2. D. Polarski, A. A. Starobinsky, H. Giacomini, "When is the growth index constant?" // 2016, J. Cosm. Astropart. Phys. (в печати); arXiv:1610.00363.
3. Shafieloo, D. K. Hazra, V. Sahni, A. A. Starobinsky, "Metastable dark energy with radioactive-type decay", J. Cosm. Astropart. Phys., submitted; arXiv:1610.05192.

4. Yu. Kamenshchik, E. O. Pozdeeva, A. Troconi, G. Venturi, S. Yu. Vernov, "Interdependence between integrable cosmological models with minimal and non-minimal coupling" // 2016, *Class. Quantum Grav.*, v. 33, 015004.
5. Yu. Kamenshchik, E. O. Pozdeeva, A. Tronconi, G. Venturi, S. Yu. Vernov, "General solutions of integrable cosmological models with non-minimal coupling" //2016, *Phys. Part. Nucl. Lett.* (в печати); arXiv:1604.01959.
6. Yu. Kamenshchik, E. O. Pozdeeva, A. Tronconi, G. Venturi, S. Yu. Vernov, "Integrable cosmological models in the Einstein and in the Jordan frames and Bianchi-I cosmology" // 2016, *Phys. Part. Nucl.* (в печати); arXiv:1606.04260.
7. F. R. Klinkhamer, G .E. Volovik, "Dynamic cancellation of a cosmological constant and approach to the Minkowski vacuum" // 2016, *Mod. Phys. Lett. A* v. 31, 1650160; arXiv:1601.00601.