

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИКИ РАН)

УДК 524.3 524.5 520.85

Номер государственной регистрации 122042500015-8

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук
чл.-корр. РАН

А.А. Петрукович

«20» декабря 2022 г.

М.П.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследования физических процессов внутри звезд, звездоподобных объектов и их
окрестностях, в экстремальных условиях нестационарности, сильной гравитации и
больших магнитных полей

(промежуточный, этап №1)

Тема ЗВЁЗДЫ

FFWG-2022-0004

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор

Г.С. Бисноватый-Коган

Москва
2022

Список исполнителей

Руководитель темы



г.н.с., д.ф.-м.н.

20.12.22

Бисноватый-Коган Г.С.

Исполнители темы:

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.22

Минаев П.Ю.

раздел 1

в.н.с., д.ф.-м.н.



20.12.22

Моисеенко С.Г.

раздел 1

в.н.с. к.ф.-м.н.



20.12.22

Позаненко А.С.

разделы 1,2

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.22

Торопина О.Д.

раздел 1

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.22

Цупко О.Ю.

раздел 1

зав. сектором



20.12.22

Маслов И.А.

раздел 2

Нормоконтроль



20.12.22

Аксенова Т.М.

РЕФЕРАТ

Отчет – 24 с., 8 рисунков, 23 источника.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ АСТРОФИЗИКА,
РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ОБЪЕКТЫ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ, ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ,
СВЕРХНОВЫЕ, ГАММА-ВСПЛЕСКИ, ПЛАЗМА, ГРАВИТАЦИОННОЕ
ЛИНЗИРОВАНИЕ, МГД, ТУМАННОСТИ, ПОЛЯРИМЕТРИЯ, МЕЗОСФЕРА

В отчете рассматриваются следующие задачи:

Решение МГД-уравнений в аксиально-симметричном приближении с учётом градиента температуры и вектора диффузии для описания процессов переноса в веществе коры замагниченной нейтронной звезды.

Разработка метода и программного комплекса для решения уравнений газовой динамики с самогравитацией на подвижной вращающейся сетке.

Гравитационное линзирование аккреционного диска на Шварцшильдовской черной дыре

Численное моделирование формирования и коллимации астрофизических джетов.

Расчет движения замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду.

Исследование модели излучения космических гамма-всплесков, и их классификация.

Наблюдение излучения и рассеивания света пылью около звезд и других астрономических объектов.

Содержание

	Стр.
Введение	5
1 Раздел 1. Исследования звёзд	6
2 Раздел 2. Физика околоземного пространства	16
Заключение	18
Список использованных Источников	19

ВВЕДЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в соответствии с государственным заданием ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ по следующим научным направлениям:

- Научные исследования в области астрофизики и радиоастрономии
- Фундаментальные и прикладные научные исследования в области Физики космической плазмы, энергичных частиц, Солнца и солнечно-земных связей
- Фундаментальные и прикладные научные исследования планет и малых тел Солнечной системы)
- Фундаментальные и прикладные научные исследования планеты Земля
- Фундаментальные и прикладные научные исследования в области механики, систем управления и информатики
- Развитие исследовательской, конструкторской, опытно-экспериментальной базы научного космического приборостроения и методов экспериментальной физики

Фундаментальные и прикладные научные исследования физических процессов внутри звезд, звездоподобных объектов и их окрестностях, в экстремальных условиях нестационарности, сильной гравитации и больших магнитных полей проводятся по теме FFWG-2022-0004 ЗВЁЗДЫ.

Тема FFWG-2022-0004 ЗВЁЗДЫ является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2022г. по теме ЗВЁЗДЫ Исследования физических процессов внутри звезд, звездоподобных объектов и их окрестностях, в экстремальных условиях нестационарности, сильной гравитации и больших магнитных полей.

ЗВЁЗДЫ

Исследования физических процессов внутри звезд, звездоподобных объектов и их окрестностях, в экстремальных условиях нестационарности, сильной гравитации и больших магнитных полей

Гос.рег. № FFWG-2022-0004

Раздел 1 Исследования звезд.

1.1 Решение МГД-уравнений в аксиально-симметричном приближении с учётом градиента температуры и вектора диффузии для описания процессов переноса в веществе коры замагниченной нейтронной звезды

Одной из важных задач физики нейтронных звёзд является моделирование структуры и эволюции их магнитного поля.

На поверхности и в коре одиночной замагниченной нейтронной звезды тепловые потоки и электрические токи формируют сложную геометрическую структуру, так как кинетические коэффициенты вещества коры нейтронной звезды имеют тензорную форму. Для случая аксиальной симметрии в однородном магнитном поле рассмотрен электрический ток, который создан температурным градиентом, возникающим в коре нейтронной звезды, от сильно разогретых центральных областей к относительно холодным областям на поверхности. Написаны программы для получения численного решения в общем случае для двух приближений: постоянного градиента температуры и постоянного радиального потока тепла в цилиндре. Получены оценки влияния эффекта Холла на магнитное поле замагниченной нейтронной звезды с учётом токов, созданных градиентом температуры при нулевом значении вектора диффузии.

1.2 Разработка метода и пакета программ для решения уравнений газовой динамики с самогравитацией на подвижной вращающейся сетке

Течения с крупномасштабным дифференциальным вращением являются ключевым предметом рассмотрения при исследовании таких астрофизических процессов, как, строение и эволюция аккреционных дисков, магниторотационный механизм взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром. Для численного исследования таких течений нами разработан комплекс программ с реализацией решения двумерных и трехмерных нестационарных уравнений газовой динамики на подвижной вращающейся сетке в цилиндрической и сферической геометриях. Такой подход относится к классу смешанных Эйлера-Лагранжевых методов. Он позволяет двигать сетку квазилагранжевым образом вместе с фоновым (дифференциальным и твердотельным) крупномасштабным вращением, существенно снижая численную диффузию метода, связанную с адвекцией в азимутальном направлении, а также повышая устойчивость численной схемы. На Рис.1 представлена поверхность подвижной сферической трехмерной сетки. В качестве

основного подхода используется метод конечного объема. Для решения уравнений, записанных в виде конечных разностей, используются: явная схема Годуновского типа с приближенным решением задачи о распаде разрыва, и полунеявная схема для с неявным учетом акустических волн. Последний подход позволяет решать уравнения газовой динамики единообразно для всех чисел Маха, не внося сильную численную диффузию для плохо сжимаемых течений, характерную для схем типа Годунова. При этом условие устойчивости схемы перестает зависеть от скорости звука, что делает полунеявный подход более эффективным, чем широко используемые явные схемы, для задач с сильно переменным числом Маха. Течения такого рода характерны для коллапсирующих сверхновых. При этом, на подвижных сетках данный подход был реализован впервые. Для уточнения решения используются метод Рунге-Кутты со вторым порядком точности для эволюции по времени, а также ограниченная кусочно-линейная реконструкция расчётных величин, которая позволяет увеличить порядок аппроксимации численного метода по пространству до второго. Для учета самогравитации было реализовано решение уравнения Пуассона для гравитационного потенциала на сетке криволинейной геометрии. На Рис.2 представлен пример расчета неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в цилиндрических координатах. Разработанный комплекс программ позволяет моделировать широкий класс астрофизических сжимаемых течений.

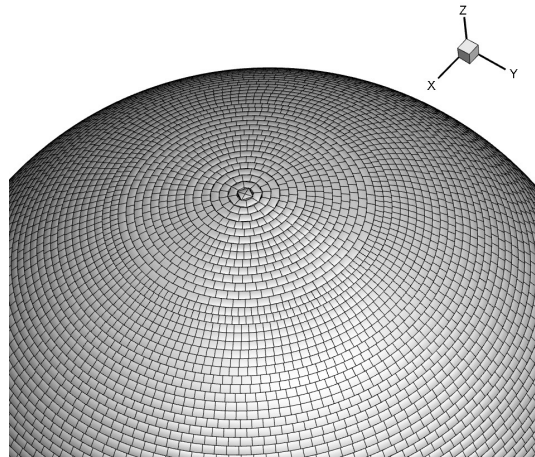


Рис.1. Поверхность сферической трехмерной сетки с вращающимися рядами ячеек с фиксированными радиальной координатой и шириной.

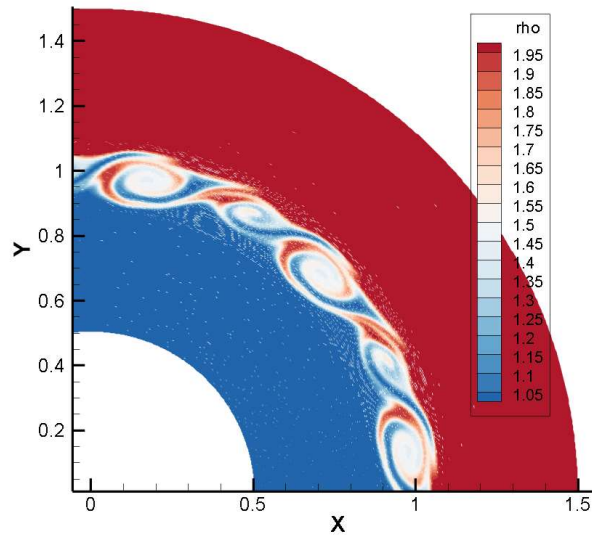


Рис.2. Плотность в цилиндрической задаче о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Распределение получено на подвижной сетке с использованием квазилагранжевого подхода, ввиду чего разрешение вихрей выше, чем при использовании чисто Эйлерового описания сплошной среды.

1.3 Гравитационное линзирование аккреционного диска на Шварцшильдовской черной дыре

Было исследовано гравитационное линзирование светящегося аккреционного диска на Шварцшильдовской черной дыре, вокруг которой он расположен. Аккреционный диск предполагается геометрически тонким, с заданным внутренним и внешним радиусами, а наблюдатель находится на оси симметрии. Наблюдатель видит последовательность кольцевых изображений, размеры которых были рассчитаны численно и аналитически. Прямое (первичное) изображение диска немного увеличено за счет отклонения лучей. Вторичное кольцо представляет собой изображение задней части диска и образовано лучами, совершившими пол-оборота вокруг черной дыры. Угловые размеры и телесные углы первичного и вторичного изображений были найдены с помощью численного интегрирования траекторий лучей света. Лучи, обернувшиеся вокруг черной дыры один или более раз, формируют кольцевые изображения высокого порядка. Угловые размеры и телесные углы этих колец были найдены аналитически, с использованием приближения сильного отклонения лучей света. Кольца концентрируются вблизи границы тени черной дыры, а их толщины экспоненциально убывают с увеличением номера кольца. Были также сделаны оценки потоков от линзированных изображений. Найдено, что усиление первичного изображения по сравнению с нелинзированным диском меньше единицы, хотя телесный угол, занимаемый первичным изображением, немного больше соответствующего телесного угла нелинзированного диска. Это отличается от известного утверждения в гравитационном линзировании далеких источников, где коэффициент усиления для первичного изображения всегда больше единицы. Различие связано с тем, что в случае аккреционного диска излучающие источники расположены вблизи черной

дыры, и становится необходимым учитывать изменение частоты и изменение яркости из-за гравитационного красного смещения.

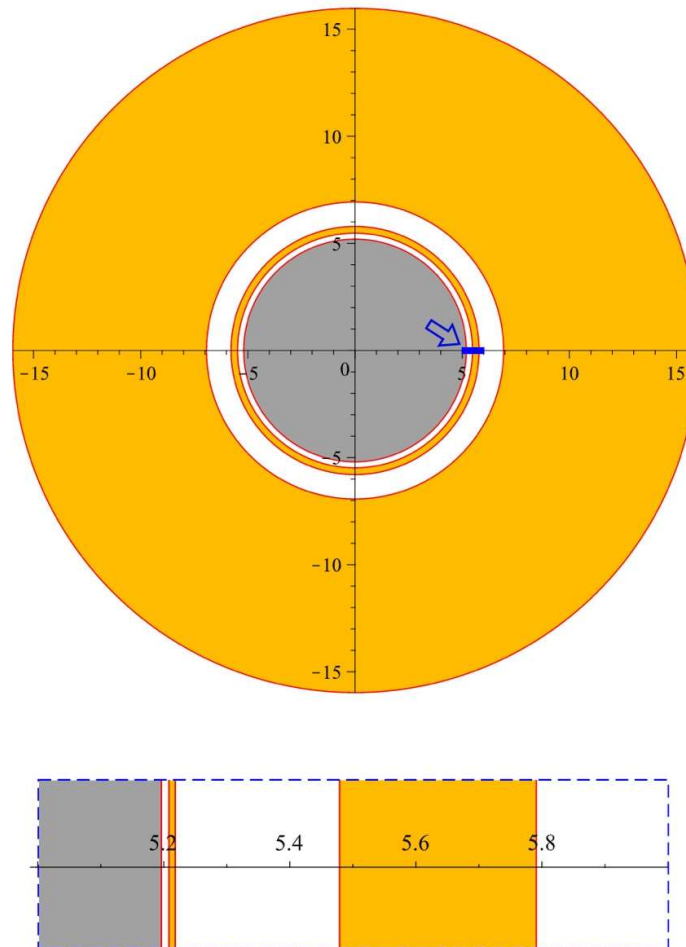


Рис.3: Линзированные изображения светящегося аккреционного диска вокруг Шварцшильдовской черной дыры. На основном рисунке видны первичное изображение и вторичное изображение в виде тонкого кольца. Серым цветом показана тень черной дыры. В нижней части рисунка представлено увеличенное изображение участка верхнего изображения (выделенное синим прямоугольником), на котором видна часть очень тонкого третичного кольца.

1.4 Численное моделирование формирования и коллимации астрофизических джетов

Было проведено численное МГД моделирование процесса формирования и коллимации астрофизических джетов в тороидальном магнитном поле при различных значениях индукции поля.

В предыдущих исследованиях мы изучали образование джетов во внешнем постоянном полоидальном магнитном поле, направленном перпендикулярно мишени. В отчетном периоде мы моделировали образование джетов во внешнем тороидальном магнитном поле при разных значениях магнитной индукции (B_f) и при различной проводимости. Во всех расчетах втекающий поток вещества несет магнитное поле, также тороидальное. В этой конфигурации вещество коллимируется в узконаправленный джет, форма поперечного сечения которого зависит от величины магнитного поля. Мы нашли распределение плотности и энергии плазмы, выявили структуру джета на различных расстояниях и в различные моменты времени.

В сильном тороидальном поле джет расширяется незначительно, что подтверждает модель магнитного механизма коллимации астрофизических джетов. Угол раствора конуса джета зависит от величины магнитной индукции поля. Чем больше B_f , тем меньше угол отклонения потока. При определённых значениях B_f возможно распределение плотности в виде кольцевых структур, характеристики которых зависят от величины поля. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее полученными результатами МГД моделирования образования джетов в полоидальном магнитном поле.

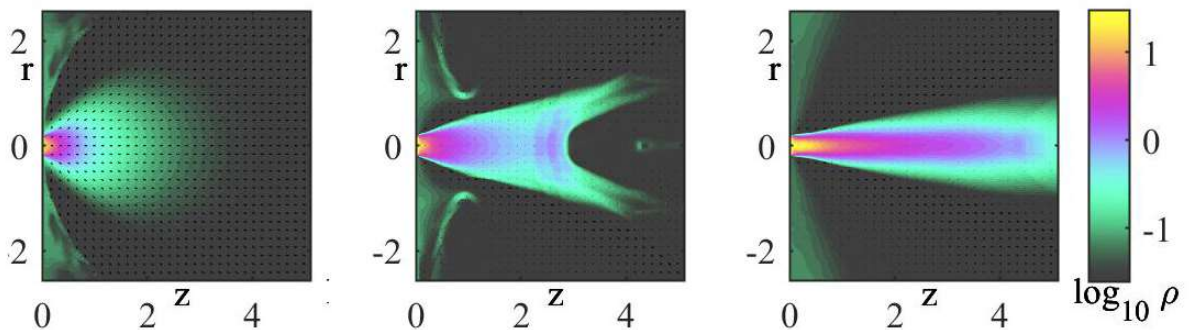


Рис.4: Картина течения вещества для разных значений магнитной индукции тороидального поля (B_f). Заливкой показан логарифм плотности. После выброса вещество начинает расширяться во всех направлениях, затем происходит коллимация потока. Угол раствора конуса джета зависит от величины B_f

1.5 Расчет движения замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду

Было продолжено численное МГД моделирование сверхзвукового движения замагниченных нейтронных звезд в неоднородной межзвездной среде. В ходе расчетов получена картина взаимодействия магнитосфер старых нейтронных звезд и пульсарных туманностей с неоднородностями межзвездной среды, которые имеют плавный градиент плотности и температуры. Исследованы мелкомасштабные и крупномасштабные неоднородности. Показано, что изменения плотности и температуры межзвездной среды приводят к изменениям формы головной ударной волны и хвоста магнитосфер старых

нейтронных звезд, а также пульсарных туманностей. Полученная картина течения соответствует наблюдениям пульсарных туманностей, в которых имеются неоднородности формы головной ударной волны и хвоста магнитосферы. Исследована неустойчивость формы магнитосферных хвостов при сверхзвуковых скоростях движения звезд. Результаты моделирования сравнивались с существующими наблюдениями туманностей пульсаров PSR J1747-2958 и PSR J1509-5850.

1.6 Модель образования неравновесного химического состава в оболочках молодых одиночных остывающих нейтронных звёзд

Рассмотрен процесс образования неравновесного химического состава при охлаждении за счет нейтринных потерь энергии оболочек горячих сформировавшихся нейтронных звезд. Построена модель, объясняющая образование большого запаса ядерной энергии, который может поддерживать рентгеновскую светимость таких компактных объектов на протяжении десятков тысяч лет, а также может привести к появлению транзиентов. Проведено изучение зависимости численно полученного итогового химического состава от различных параметров модели. Пример начального и конечного химического состава в слое коры нейтронной звезды с плотностью 10^{11} г/см³ приведен на рис 7,8.

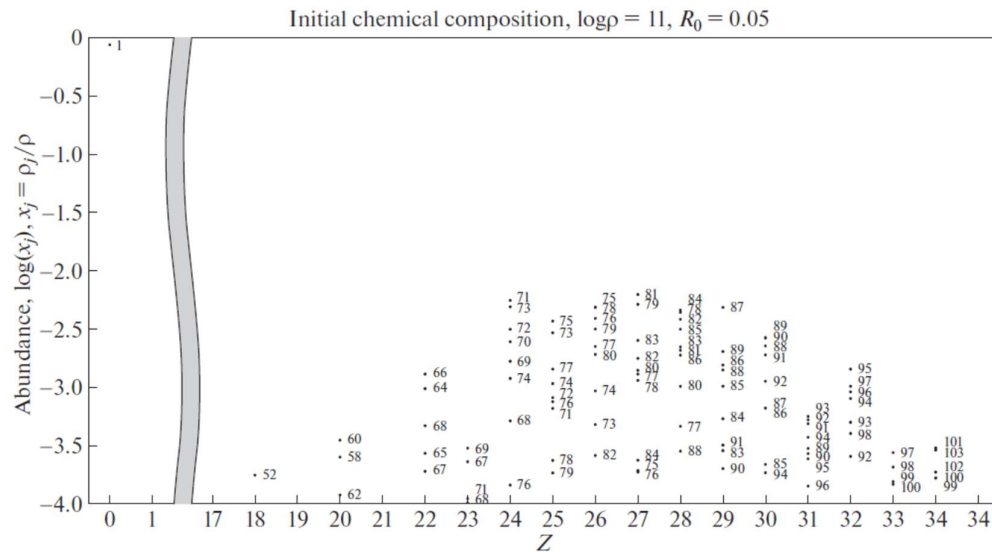


Рис. 7. Начальный химический состав при $\log \rho = 11$, $T_9 = 10$ и $R_0 = 0.05$. Каждый изотоп пронумерован атомным массовым числом A .

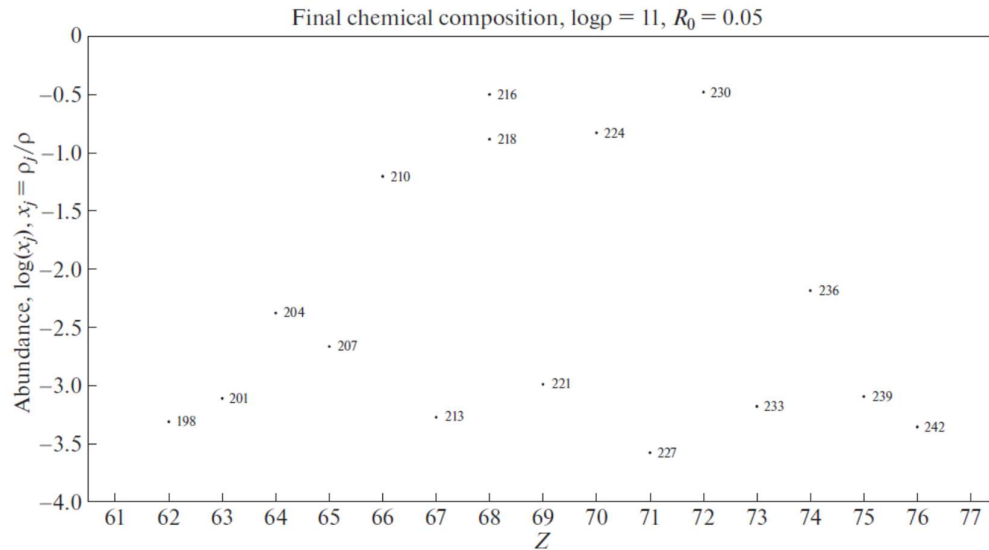


Рис. 8. Химический состав в последней расчетной точке $t = 200$ с при $\log \rho = 11$, $T_9 = 0.1$ и $R_0 = 0.05$. Каждый изотоп пронумерован атомным массовым числом A .

1.7 Исследование модели излучения космических гамма-всплесков, и их классификация

Исследованы спектрально-временные свойства гамма-всплеска GRB 201015A в гамма-диапазоне по данным эксперимента GBM/Fermi. Показано, что всплеск имеет длительность около 10 с и мягкий энергетический спектр ($E_p = 14$ кэВ). С помощью корреляции $E_p - E_{iso}$ и диаграммы $T_{90,i} - E_N$ всплеск классифицирован как длинный (коллапсар), что было в дальнейшем подтверждено обнаружением компонента сверхновой в оптическом диапазоне.

Детально исследованы спектрально-временные свойства гамма-всплеска GRB 200829A в гамма-диапазоне по данным экспериментов GBM/Fermi, BAT/Swift и SPI-ACS/INTEGRAL. Показано, что кривая блеска этого всплеска состоит из нескольких эпизодов излучения общей длительностью около 30 с. Спектральный анализ, проведенный по данным эксперимента GBM/Fermi как для всего всплеска, так и для его отдельных эпизодов, показал, что всплеск имеет нетепловой степенной спектр с изломом на энергии $E_p = 360$ кэВ. Вследствие чего всплеск классифицирован как длинный (коллапсар) на диаграммах $E_p - E_{iso}$ и $T_{90,i} - E_N$. В кривой блеска эксперимента BAT/Swift в мягком гамма-диапазоне 15-50 кэВ обнаружено значимое продленное излучение длительностью более 1000 с, представляющее собой отдельный компонент. Обнаруженное продленное излучение может быть началом послесвечения, на что указывает степенной характер падения потока со временем на поздних стадиях.

Исследована кривая блеска гамма-всплеска GRB 221009A в гамма-диапазоне по данным различных экспериментов. Показано, что инструментальные эффекты мертвого времени значительно искажают наблюдаемый энергетический поток от источника всплеска. С помощью гамма-детектора на борту Vericolombo проведено восстановление кривой блеска всплеска по данным SPI-ACS/INTEGRAL и показано, что интегральный поток от всплеска в гамма-диапазоне превышает $1.5e-2$ эрг/см².

В рамках совместной работы проведен анализ спектральной эволюции гамма-всплеска GRB 190530A и его трех отдельных эпизодов излучения кросс-корреляционным методом по данным эксперимента GBM/Fermi. Для всех исследованных эпизодов характерна типичная для длинных гамма-всплесков эволюция энергетического спектра от

жесткого к мягкому, однако зависимость спектральной задержки от энергии имеет сложную форму, и лишь на некоторых участках описывается логарифмической моделью, характерной для индивидуальных импульсов гамма-всплесков. Это подтверждает сложную структуру кривой блеска GRB 190530A, в том числе и его отдельных эпизодов излучения.

Проведен «слепой» поиск сверхдлинных гамма- транзиентных событий с использованием данных обсерватории INTEGRAL (в основном, детекторы SPI-ACS и IREM). Интервалы поиска варьировались от 120 до 1000 секунд, что позволило найти ~5000 событий. Для них проводилась классификация различными методами: сравнение кривых блеска, найденных в данных различных детекторов, кросс-идентификация с известными каталогами гамма-всплесков и солнечных вспышек, уменьшение размерности методами машинного обучения. Показано что кандидаты не выделяются в отдельную группу на распределении длительности гамма-всплесков, что подтверждает группу кандидатов в сверхдлинные гамма-всплески. (Мозгунов и др, 2022, постерный доклад на конференции HEA-2022)

Проведены оценки частоты регистрации космических гамма-всплесков планируемой космической миссией ГАММА-400 в энергетическом диапазоне свыше 10 МэВ. Показано, что комбинация основной и боковой апертуры телескопа ГАММА-400 сможет регистрировать 10-15 ярких гамма-всплесков в год.

Проведены исследования методологии измерения мертвого времени и измерения тестовой сборки сцинтиллятора BGO совместно с кремниевым фотоумножителем (SiPM) двумя различными методами: метод разных источников и метод расстояний, а также построена калибровочная кривая, по которой можно восстановить истинный темп регистрации от загрузки на входе. Данные измерения были выполнены для отработки методики для микроспутника Чибис-АИ.

Начато исследование калибровки при регистрации степени линейной поляризации и влияния мёртвого времени на измерения линейной поляризации сцинтилляционными детекторами в гамма-диапазоне (космические гамма-всплески GRB, гамма-вспышки земного происхождения TGF). В частности, получены оценки влияния мертвого времени на измерения поляризации в упрощенной модели сегментированного сцинтилляционного детектора (Мкртчян и др., 2022); построена энергетическая матрица отклика сцинтиллятора BGO с использованием программного обеспечения и библиотек Geant4.

Проведено исследование родительской галактики гамма-всплеска GRB 211023A, спектроскопическое красное смещение которой было получено на БТА по заявке команды IKI GRB-FuN. На основе многоцветной фотометрии, полученной с помощью телескопов сети IKI GRB-FuN, и полученного красного смещения $z = 0.39$, было проведено моделирование широкополосного спектрального распределения галактики и оценены её основные физические параметры: родительская галактика гамма-всплеска GRB 211023A с наибольшей вероятностью является спиральной галактикой со средним поглощением $E_{(b-v)} = 0.2^m$, массой $1.5 \cdot 10^9 M_{\text{Sun}}$, возрастом около 1 млрд. лет и малым звездообразованием около $1.5 M_{\text{Sun}}$ в год. Модельный спектр галактики вместе с экспериментальными точками, полученными фотометрическим способом, приведены на Рис.5.

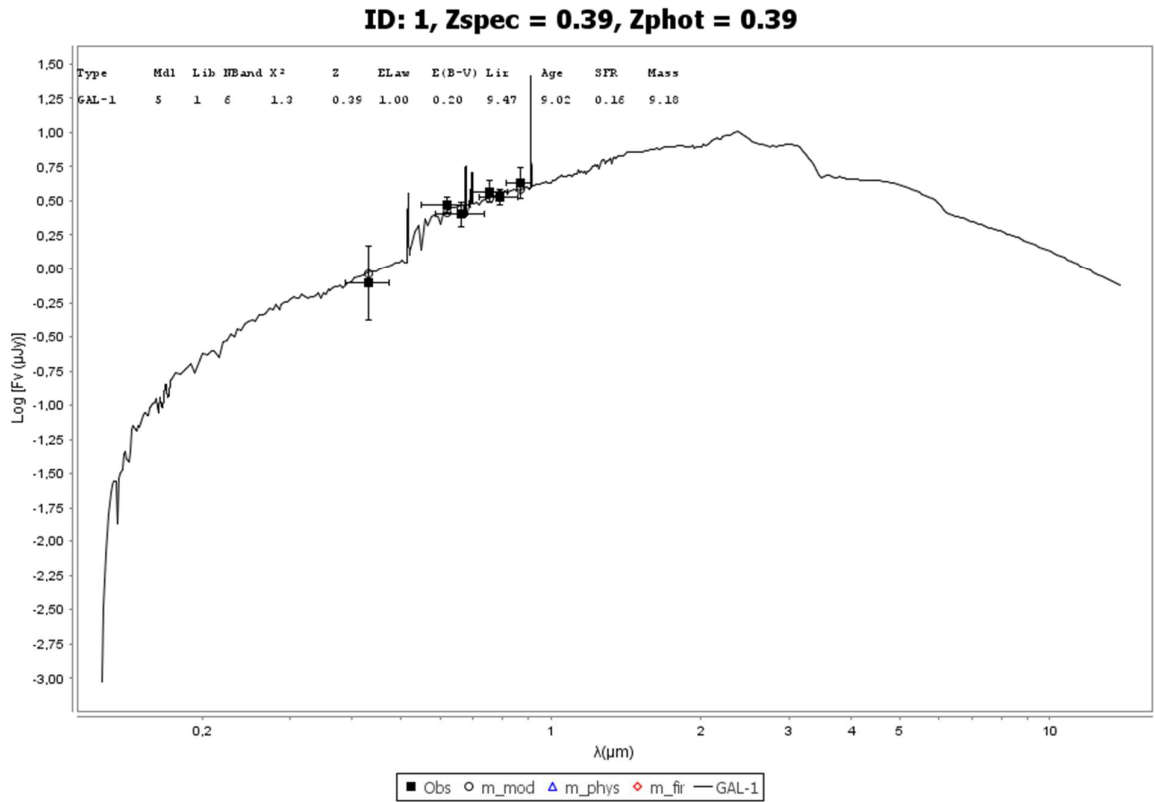


Рис.5: Спектральное распределение энергии родительской галактики гамма-всплеска GRB211023A.

Аналогичное исследование проводилось для родительской галактики гамма-всплеска GRB220306B, однако для этого всплеска отсутствует оценка красного смещения. Была проведена попытка определения красного смещения фотометрическим способом на основе широкополосной фотометрии. Однако имеющиеся данные не позволяют однозначно подобрать наилучшую модель спектрального распределения энергии. Для ограничения семейства моделей необходимо провести дополнительные наблюдения галактики в инфракрасном фильтре J или K. Наблюдения планируется провести в следующем семестре по заявке на 2.5-метровый телескоп КГО.

Была проведена фотометрическая обработка наблюдений оптических компонентов гамма-всплесков GRB220107A, GRB220117A, транзиента AT2022cva, а также архивных наблюдений всплеска GRB210610B.

Продолжается совместная работа с международной коллаборацией SNAD (SuperNova Anomaly Detection) в качестве эксперта для обучения машинных алгоритмов. Среди кандидатов в аномалии с помощью алгоритма Active Anomaly Detection, работающего под руководством эксперта, в поле обзора Zwicky Transient Facility был найден транзист AT2018lzi, который был отобран как кандидат в сверхновые. В архивных изображениях каталога Pan-STARRS была найдена родительская галактика этого события с $r \sim 22.8$. Командой соавторов из группы IKI GRB-FuN была подана заявка на спектральные наблюдения этого объекта на БТА с целью определения красного смещения. Однако полученный спектр не показал явно выраженных линий, которые бы помогли определить

красное смещение. Предварительное моделирование кривой блеска обнаруженного транзиента показывают удовлетворительное сходство с модельной кривой блеска сверхяркой сверхновой (см. Рис.6), однако без оценки расстояния такой результат может считаться лишь приблизительным. В настоящее время года подана заявка для спектроскопических наблюдений этого объекта на 10-метровом телескопе Кеск I.

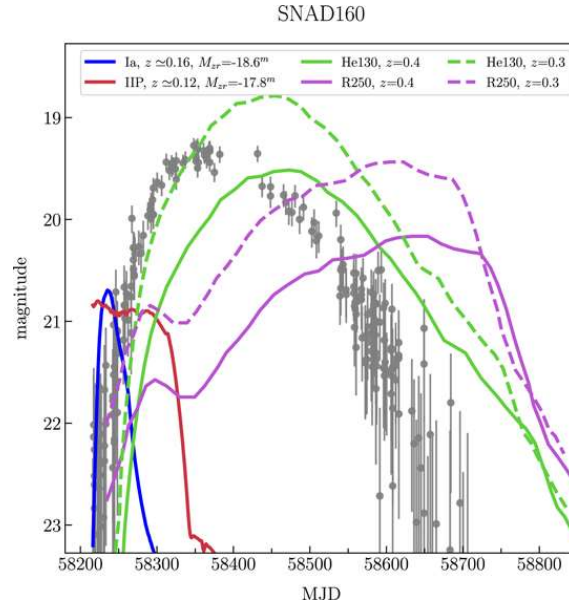


Рис.6: Наблюдательная кривая блеска транзиента AT2018lzi (SNAD160 – серые кружки) и модельные кривые блеска различных типов сверхновых на красном смещении $z = 0.3$ (пунктирные линии) и $z = 0.4$ (сплошные линии).

Продолжились работы по построению кривых блеска Сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками. Для этого использовались новые наблюдения и архивные данные. Проведены исследования селективных эффектов, влияющих на статистическое распределение кривых блеска. Показано, что мощность статистической выборки (18 кривых блеска) все еще не достаточна для проведения надежных статистических исследований выборки (Белкин и др., 2022).

Мы получили оптические фотометрические данные GRB 110213A с хорошей выборкой, включая Swift/UVOT, IKI GRB-FuN и XRT. В результате получено 15 многоцветных кривых блеска, с двумя пиками. Напротив, в рентгеновском диапазоне наблюдается только один пик между этими двумя оптическими пиками. Эти данные свидетельствуют о том, что в оптическом и рентгеновском излучении преобладают разные компоненты излучения. Синхротронное каскадное излучение электрон-позитронных пар включено в стандартную модель внешней ударной волны, в которой доминируют синхротронное излучение и комптонизация (SSC). Мы обнаружили, что в оптическом диапазоне преобладает каскадное излучение + SSC на ранней стадии, тогда как первичное синхротронное + SSC излучение доминирует в рентгеновском диапазоне. На поздних стадиях, как в рентгеновском, так и в оптическом диапазонах преобладает излучение первичного синхротронного + SSC-излучения. Показано, что каскадная

составляющая может объяснить первый оптический пик, в то же время основной вклад во второй пик вносит первичное синхротронное + SSC излучение (Wang et al., 2022).

Начата работа по использованию нейронных сетей и машинного обучения с целью ускорения процесса выделения и разделения (де-блендирования) источников различных типов (точечных, диффузных) на астрономических изображениях. Работа проводится в целях подготовки к оптическому сопровождению источников, регистрируемых после гравитационно-волновых слияний нейтронных звезд, регистрируемых в цикле O4 LIGO/Virgo/KAGRA.

Раздел 2 Физика околоземного пространства.

2.1 Наблюдение излучения и рассеивания света пылью около звезд и других астрономических объектов.

Совместные наблюдения ИКИ РАН, ИНАСАН и ГАИШ МГУ кометы C/2017 K2 (PanSTARRS) в видимой и инфракрасной областях спектра позволили установить наличие в ее коме горячей (~ 500 K) пыли при расстоянии 3.4-2.6 а.е. кометы от Солнца. Исследование зависимости яркости комы от расстояния до ядра позволяет предположить, что при приближении к Солнцу с кометы начинают вылетать фрагменты больших размеров, которые медленнее распадаются на газ и пыль. 13 мая 2022 г. для спектральных полос JHKLM наблюдалось различное несимметричное распределение яркости комы по прямому восхождению (см. рисунок), что скорее всего было вызвано выбросом на солнечной стороне кометы холодного вещества, а с другой стороны от нее -- светили горячие пылинки.

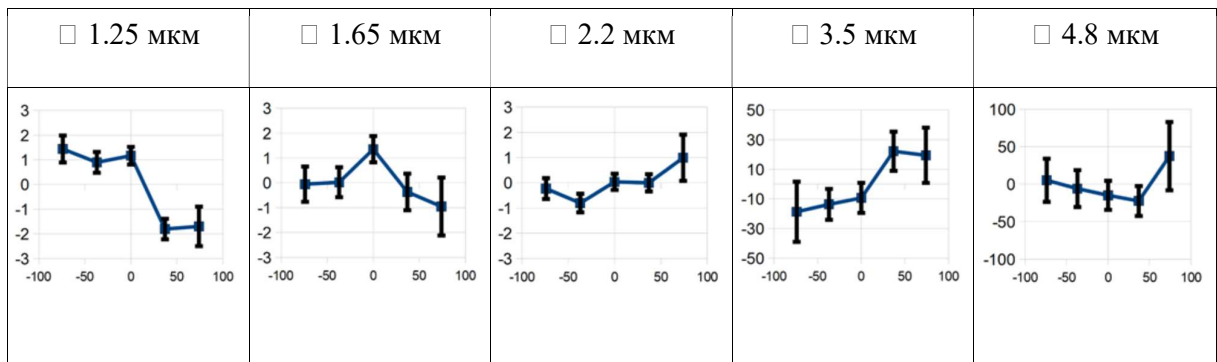


Рис.7: Распределение альбеда (в единицах 10^{-6}) комы кометы C/2017 K2 в зависимости от расстояния до ядра (в тыс.км). Солнце слева. Среднее значение (из-за возможностей наблюдений) приравнено нулю.

Завершено создание методики определения высоты и среднего размера частиц серебристых облаков на основе трехцветной (RGB) камеры всего неба. Результаты по своей точности сопоставимы с современными методами наземного и космического зондирования серебристых облаков (рисунок). Соответствующая работа принята к печати и будет опубликована в начале 2023 г. Проведены наблюдения ансамбля серебристых облаков, модулированных одномерной плоскопараллельной акустико-гравитационной волной, в этом случае методика позволяет отследить изменения высоты и радиуса поперек волнового профиля.

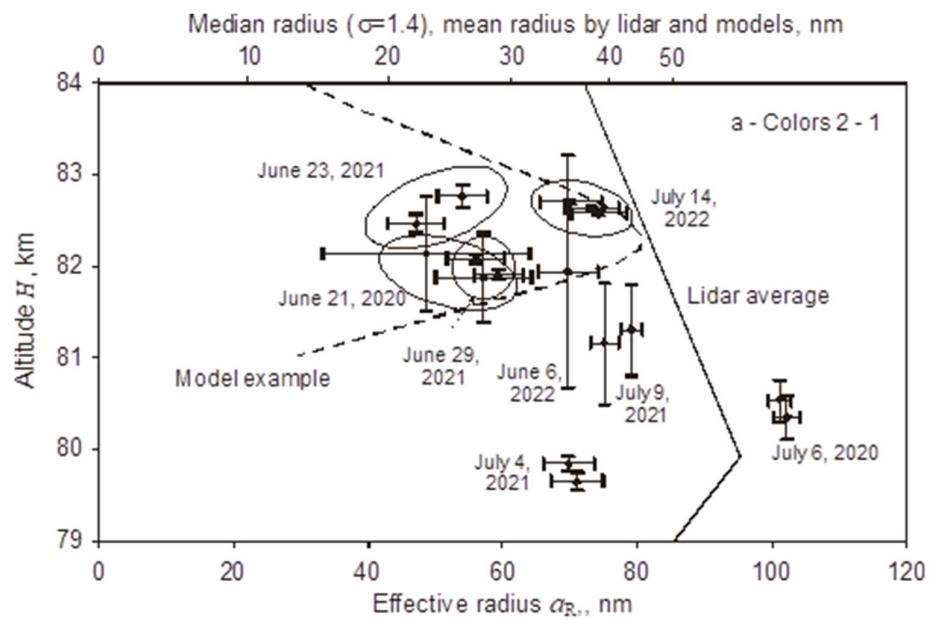


Рис.8: Высота, эффективный и медианный радиус частиц серебристых облаков по наблюдениям 2020-2022 годов (сопоставление полос G и B) в сравнении с модельным профилем и усредненными лидарными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2022 г. по теме «Звёзды: физических процессов внутри звезд, звездоподобных объектов и их окрестностях, в экстремальных условиях нестационарности, сильной гравитации и больших магнитных полей». По результатам этих исследований сотрудниками ИКИ РАН в 2022 г. было опубликовано 25 научных публикаций. Из них опубликовано:

- статьи в зарубежных изданиях - 13
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах - 3
- монография - 0
- статьи в сборниках материалов конференций - 9
- доклады, тезисы, циркуляры - 19
- статьи в научно-популярных изданиях - 0
- публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными - 7
- число публикаций работников научной организации в базах Web of Science и Scopus - 16, из них входят в **Q1** - 7, входят в **Q2** - 2
- статьи со ссылками на РНФ: 4
- статьи по теме (без РНФ): 21

Наиболее важные результаты, полученные по теме «Звёзды»:

1. Гравитационное линзирование аккреционного диска на Шварцшильдовской черной дыре
2. Исследованы спектрально-временные свойства гамма-всплеска GRB 201015A в гамма-диапазоне по данным эксперимента GBM/Fermi.

В заключение отметим, что работы по теме «Звёзды» проводились в соответствии с утвержденным планом и полностью выполнены.

Список использованных источников
Список опубликованных работ в 2022 по теме «ЗВЕЗДЫ»:
Статьи в зарубежных изданиях

1. Gennady S. Bisnovatyi-Kogan and Oleg Yu. Tsupko, Analytical study of higher-order ring images of the accretion disk around a black hole, *Physical Review D*, 105, 064040 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.105.064040 **(Q1)**
2. Oleg Yu. Tsupko, Shape of higher-order images of equatorial emission rings around a Schwarzschild black hole: Analytical description with polar curves, *Physical Review D*, 106, 064033 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.106.064033 **(Q1) (PHΦ)**
3. Volker Perlick and Oleg Yu. Tsupko, Calculating black hole shadows: Review of analytical studies, *Physics Reports*, 947, 1-39 (2022). DOI: 10.1016/j.physrep.2021.10.004 **(Q1)**
4. Dalin P., Suzuki, H., Pertsev N., Perminov V., Efremov D., Voegler P., Narayanan V.L., Mann I., Haggstrom I., Zalcik M., Ugolnikov O., Hedin J., Gumbel J., Latteck R., Baumgarten G., 2022. Studies of noctilucent clouds from the stratosphere during the SONC balloon-borne experiment in 2021, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 240, 105959. DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105959. **(Q3)**
5. Ugolnikov O.S., 2023. Altitude and particle size measurements of noctilucent clouds by RGB photometry: Radiative transfer and correlation analysis // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 296, 108433. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108433. **(Q1)**
6. Gupta Rahul, Minaev P., Pozanenko A., Belkin S. et al. Probing into emission mechanisms of GRB 190530A using time-resolved spectra and polarization studies: synchrotron origin?, *MNRAS*, Volume 511, Issue 2, pp.1694-1713 (2022)., Doi: 10.1093/mnras/stac015 **(Q1) (PHΦ)**
7. Rossi A., Pozanenko A.S., Minaev P.Y., Volnova A.A., The Peculiar Short-duration GRB 200826A and Its Supernova , *The Astrophysical Journal*, Volume 932, Issue 1, id.1, 15 pp. (2022)., Doi: 10.3847/1538-4357/ac60a2 **(Q1) (PHΦ)**
8. Topchiev N. P., Minaev P. Yu. et al., Gamma- and Cosmic-Ray observations with the GAMMA-400 Gamma-Ray telescope, *Advances in Space Research*, Volume 70, Issue 9, p. 2773-2793 (2022). Doi: 10.1016/j.asr.2022.01.036 **(Q2)**
9. Belkin S., Pozanenko A. (2022). The Diversity of Light Curves of Supernovae Associated with Gamma-Ray Bursts. In: Pozanenko, A., Stupnikov, S., Thalheim, B., Mendez, E., Kiselyova, N. (eds) *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2021. Communications in Computer and Information Science*, vol 1620. Springer, Cham. (2022) https://doi.org/10.1007/978-3-031-12285-9_5 **(Q3)**

10. Pankov N., Pozanenko A., Kouprianov V., Belkin S. (2022). Pipeline for Detection of Transient Objects in Optical Surveys. In: Pozanenko, A., Stupnikov, S., Thalheim, B., Mendez, E., Kiselyova, N. (eds) Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2021. Communications in Computer and Information Science, vol 1620. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12285-9_7 (**Q3**)
11. Wang, Xiang-Gao; Chen, Yuan-Zhuo; Huang, Xiao-Li; Chen, Liang-Jun; Zheng, WeiKang; D'Elia, Valerio; De Pasquale, Massimiliano; Pozanenko, Alexei S.; Xin, Li-Ping; Stratta, Giulia; Ukwatta, Tilan; Akerlof, Carl; Geng, Jin-Jun; Han, Xu-Hui; Hentunen, Veli-Pekka; Klunko, E. V.; Kuin, N. Paul M.; Nissinen, Markku; Rujopakarn, W.; Rummyantsev, V. V.; Rykoff, E. S.; Salmi, Tuomo; Schaefer, B. E.; Volnova, A. A.; Wu, Xue-Feng; Wei, Jian-Yan; Liang, En-Wei; Zhang, Bing; Filippenko, Alexei V. GRB 110213A: A Study of Afterglow Electromagnetic Cascade Radiation. // The Astrophysical Journal, Volume 939, Issue 1, id.39, 13 pp. (2022) (**Q1**)
12. Aleo, P. D.; Malanchev, K. L.; Pruzhinskaya, M. V.; Ishida, E. E. O.; Russeil, E.; Kornilov, M. V.; Korolev, V. S.; Sreejith, S.; Volnova, A. A.; Narayan, G. S. SNAD transient miner: Finding missed transient events in ZTF DR4 using k-D trees. // New Astronomy, Volume 96, article id. 101846 (2022) (**Q3**) (A.A.V. is supported by RSFC grant 18-12-00378 for anomalies light curves analysis.)
13. Pruzhinskaya, Maria; Volnova, Alina; Kornilov, Matvey; Malanchev, Konstantin; Aleo, Patrick D.; Ishida, Emille E. O.; Korolev, Vladimir; Novinskaya, Alexandra; Russeil, Etienne; Sreejith, Sreevarsha; Blondin, Stéphane; Kozyreva, Alexandra; SNAD Team. Could SNAD160 be a Pair-instability Supernova? // Research Notes of the AAS, Volume 6, Issue 6, id.122 (2022) (**Q4**) (RFBR research project No21-52-15024)

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

1. Маслов И.А., Николенко И.В. 2022. Поляриметр для наблюдений комет на телескопе Цейсс-1000. // Научные труды Института астрономии РАН, 7(2), 129-131. DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.005
2. Игнатовский, А.Ю., Бисноватый-Коган Г.С. «Динамическая модель образования неравновесного химического состава в оболочках одиночных нейтронных звезд». Астрономический журнал 2022, том 99, № 3, с. 211–226
3. Бисноватый-Коган Г.С. О наблюдательном тесте для выбора модели излучения мягких гамма повторителей (SGR). Astronomy Reports, 2022, Vol. 66 No. 8, pp. 644–647. DOI: 10.1134/S1063772922090037 (**РНФ**)

Статьи в сборниках материалов конференций

1. Maslov I., Shenavrin V., Safronov B., The epsilon Aurigae Observation. Infrared Photometry and Speckle-polarimetry. ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES. Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021, 177. DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.058 (2022)
2. Toropina O. D., Bisnovaty-Kogan G. S., Moiseenko S. G., "MHD simulation of magnetized laboratory jets", The Fifteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity. Edited by E. S. Battistelli, R.T. Jantzen, and R. Ruffini. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2022. ISBN #9789811258251, pp. 304-309, DOI: 10.1142/9789811258251_0030
3. Boris P. Rybakin and Sergey G. Moiseenko Simulation of the dense protostellar cores formation in the collision of molecular clouds. The Fifteenth Marcel Grossmann Meeting, pp. 293-297 (2022) DOI: 10.1142/9789811258251_0028
4. Sergey G. Moiseenko, Gennady S. Bisnovaty-Kogan and Nikolai V. Ardelyan Implicit Lagrangian numerical approach for magnetorotational supernova simulations. The Fifteenth Marcel Grossmann Meeting, pp. 321-326 (2022) DOI: 10.1142/9789811258251_0033
5. Glushikhina M. V., Bisnovaty-Kogan G. S., "Four tensors determining thermal and electric conductivities of degenerate electrons in magnetized plasma", The Fifteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity. Edited by E. S. Battistelli, R.T. Jantzen, and R. Ruffini. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2022. ISBN #9789811258251, pp. 276-283, doi:10.1142/9789811258251_0025
6. Toropina, O. D. ; Romanova, M. M. ; Lovelace, R. V. E., "The bow shock pulsar wind nebulae propagating through a non-uniform ISM", The Fifteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity. Edited by E. S. Battistelli, R.T. Jantzen, and R. Ruffini. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2022. ISBN #9789811258251, pp. 298-303, DOI: 10.1142/9789811258251_0029
7. Буянхишиг Р., Тунгалаг Н., Молотов И., Позаненко А.РОССИЙСКО-МОНГОЛЬСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБСЕРВАТОРИИ ХУРЭЛТОГООТ труды Международной научной конференции. Иркутск, 2022 стр. 231-235, Издательство: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук (Иркутск), DOI: 10.53954/9785604859506
8. Novinskaya, A.; Pruzhinskaya, M. V.; Malanchev, K. L.; Kornilov, M. V.; Mondon, F.; Volnova, A. A.; Aleo, P. D.; Ishida, E. E. O.; Korolev, V. S.; Sreejith, S. Supernovae search in the Zwicky Transient Facility Data Releases. // Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proceedings of the VAK-2021 conference, held 23-28 August, 2021 in Moscow., pp.182-184 (2022) (Q4) (RFBR research project No21-52-15024)
9. Мкртчян А. А., Позаненко А. С., Минаев П. Ю. Влияние мёртвого времени на измерение линейной поляризации в комптоновских детекторах // 19-я Конф. молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования": сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2022. DOI: 10.21046/KMU-2022-66-71.

Доклады, тезисы, циркуляры

1. Торопина О.Д., Fifth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, Virtual hosted in Novosibirsk, Russia, October 12-14, 2022 “MHD Simulation of Laboratory Jets in a Toroidal Magnetic Field”, (приглашенный доклад)
2. И.А. Кондратьев, С.Г. Моисеенко "Полунеявный численный метод решения МГД уравнений на подвижной сетке", Восьмая Тарусская школа-семинар Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике, 27.06-1.07.2022 (устный доклад)
3. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., «Гигантские вспышки магнетаров из близких галактик», Восьмая Тарусская школа-семинар Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике, 27.06-1.07.2022 (устный доклад)
4. Позаненко А.С., Белкин С., «Исследования родительских галактик гамма-всплесков», Восьмая Тарусская школа-семинар Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике, 27.06-1.07.2022 (устный доклад)
5. Глушихина М.В., Бисноватый-Коган Г.С., «Нелинейный эффект Холла в цилиндре», Восьмая Тарусская школа-семинар Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике, 27.06-1.07.2022 (устный доклад)
6. I.A. Kondratyev, S.G. Moiseenko “Semi-implicit numerical method for differentially rotating compressible astrophysical flows”, Fifth Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, 12-14 Oct 2022 (приглашенный доклад)
7. I.A. Kondratyev, S.G. Moiseenko “A semi-implicit numerical method for differentially rotating astrophysical flows”, Challenges and Innovations in Computational Astrophysics - IV (ChaICA-4), 21-23 Nov 2022 (устный доклад)
8. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., «Новые оценки энергетики события GRB/GW 190425 и кросс-калибровка детектора SPI-ACS/INTEGRAL” Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, 19 - 22 декабря 2022 г., г. Москва <http://heaconf.cosmos.ru/2022/> (стендовый доклад)
9. Белкин С. О., Позаненко А. С., «Разнообразие кривых блеска сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками», XIX Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", ИКИ РАН, 13–15 апреля, 2022 г. <https://kmu.cosmos.ru/>, (устный доклад)
10. Sergey Belkin, Alexei Pozanenko, “Systematics and biases in observations of supernovae associated with gamma-ray bursts”, XXIV International Conference “Data Analytics and Management in Data Intensive Domains” DAMDID/RCDL’2022, ITMO University, October 4-7, 2022, <https://damdid2022.frccsc.ru/> (устный доклад)

11. Eugene Shekotiin, Nikolay Pankov, Alexei Pozanenko, Pavel Minaev and Sergei Belkin
 “Cross-identification of selected fields of SDSS and PanSTARRS optical catalogues”
 XXIV International Conference “Data Analytics and Management in Data Intensive
 Domains” DAMDID/RCDL’2022, ITMO University, October 4-7, 2022,
<https://damdid2022.frccsc.ru/> (устный доклад)

12. Белкин С., Позаненко А., Минаев П., Панков Н., Вольнова А., Румянцев В., Клунко
 Е., Инасаридзе Р., Москвитин А., Рева И., Бурхонов О., Ким В., Росси А., Елинек
 М., Канн Д. А., Вольвач А., Вольвач Л., Ксу Д., Чжу З., Фу С. «Фотометрическое и
 спектроскопические обнаружения сверхновой, ассоциированной с GRB 201015A»,
 Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022
 (HEA-2022)", ИКИ РАН, 19-22 декабря, 2022, <http://heaconf.cosmos.ru/2022/>,
 (устный доклад)

13. Позаненко А.С., Белкин С., «Исследования родительских галактик космических
 гамма-всплесков с помощью наблюдательной сети IKI GRB-FuN», «Астрофизика
 высоких энергий сегодня и завтра – 2022», Москва, ИКИ РАН, 19-22 декабря 2022
 года, <http://heaconf.cosmos.ru/2022/index.php>, (стендовый доклад)

14. Позаненко А.С., «Сверхновая или килоновая?», Современная звездная астрономия
 – 2022, Кавказская Горная Обсерватория (КГО) ГАИШ МГУ им. М. В. Ломоносова
 8-10 ноября 2022,
http://www.inasan.ru/scientific_activities/conferences/msa/modern_stellar_astronomy_2022/,
 (приглашенный доклад)

15. Alexei Pozanenko, “Multiwavelength Transients Investigation in IKI”, 8th BRICS
 Astronomy Working Group Workshop (BAWG 2022) October 18 – 20, 2022, National
 Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (NAOC),
<https://bawg2022.casconf.cn/page/1559426381950095361> (приглашенный доклад)
 (online)

16. Г. Мозгунов и др., «Определение гамма-фона в диапазоне 0.1 - 2 Мэв в
 эксперименте SPI-ACS космической обсерватории INTEGRAL», Конференция
 молодых учёных ИКИ РАН, ИКИ РАН 19 — 25 апреля 2022 г., (устный доклад)

17. Г. Мозгунов и др., «Поиск и классификация сверхдлинных астрофизических
 транзиентов по данным SPI-ACS и IREM обсерватории INTEGRAL», Астрофизика
 высоких энергий сегодня и завтра, ИКИ РАН, 19-22 декабря 2022 г., (постерный
 доклад)

18. Н. Панков и др. Хроматическое послесвечение гамма-всплеска GRB 200829A
 на красном смещении $z = 1.29$, Астрофизика высоких энергий сегодня и
 завтра, ИКИ РАН, 19-22 декабря 2022 г., (постерный доклад)

19. Г.С. Бисноватый-Коган Многослойная модель сферического звездного скопления. Восьмая Тарусская школа-семинар Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике, 27.06-1.07.2022 г. (устный доклад).

20. Г.С. Бисноватый-Коган О наблюдательном тесте для выбора модели излучения мягких гамма повторителей (SGR).

Международная конференция “Bursting Universe by Robots Eyes 2022.”

ГАИШ МГУ, Москва, август 15-22, 2022 г.(приглашенный доклад)

.