

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 АААА-А18-118012290404-8

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Института космических исследований

Российской академии наук

чл.-корр. РАН

А.А. Петрукович

«20» декабря 2021 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 2)

Тема ЗВЁЗДЫ

0024-2021-0008

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

 Г.С. Бисноватый-Коган

Москва
2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы
г.н.с., д.ф.-м.н.



20.12.21

Бисноватый-Коган Г.С.

Исполнители темы:

зав. сектором



20.12.21

Маслов И.А.
раздел 2

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.21

Минаев П.Ю.
раздел 1

в.н.с., д.ф.-м.н.



20.12.21

Моисеенко С.Г.
раздел 1

зав. сектором к.ф.-м.н.



20.12.21

Позаненко А.С.
разделы 1,2

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.21

Торопина О.Д.
раздел 1

с.н.с., к.ф.-м.н.



20.12.21

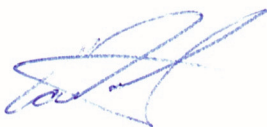
Цупко О.Ю.
раздел 1

Нормоконтроль



20.12.21

Аксенова Т.М.



РЕФЕРАТ

Отчет – 22 с., 8 рисунков, 25 источников.

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

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 0024-2021-0008 ЗВЁЗДЫ.

Тема 0024-2021-0008 ЗВЁЗДЫ является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2021г. 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. № АААА-А18-118012290404-8

Раздел 1 Исследования звезд.

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

Для изучения процессов переноса в нейтронной звезде необходимо знать свойства вещества при сверхъядерных плотностях и сверхсильных магнитных полях. Так как магнитное поле ограничивает движение электронов в направлении, перпендикулярном к силовым линиям и, поскольку электроны являются основными переносчиками тепла и заряда, тепло- и электропроводность в этих направлениях подавляется, а вдоль силовых линий остается неизменной. Можно сказать, что магнитное поле оставляет на поверхности звёзд наблюдаемый «отпечаток» и является причиной сильной анизотропии температуры, которую можно наблюдать на поверхности одиночных нейтронных звёзд. Для того, чтобы описать тепловое излучение и понять процессы, влияющие на распределение заряда и тепла по поверхности нейтронной звезды, необходимо выписать точные магнито-гидродинамические уравнения.

Для случая аксиальной симметрии в однородном магнитном поле получено решение уравнений Максвелла при условии, когда электрический ток связан только с градиентом температуры. Учтено влияние токов Холла на полное магнитное поле в замагниченной нейтронной звезде.

1.2 Исследование термодинамических свойств электронного газа в сильных магнитных полях при наличии вырождения и релятивизма

Термодинамические свойства электронного газа в экстремальных условиях высоких температуры, плотности материи и/или сильных магнитных полей во многом определяют поведение вещества во внешних слоях нейтронных звезд, а также в аккреционных колонках замагниченных нейтронных звезд в двойных системах. В перечисленных объектах при наличии сильного магнитного поля важной чертой является существенно квантовый характер движения электронов поперек него, а также возможные вырождение и релятивизм электронного газа. При исследовании аккреции на магнитар в двойной системе необходимо также учитывать рождение большого количества электрон-позитронных пар в квантующем магнитном поле. В настоящей работе детально рассмотрены термодинамические свойства газа невзаимодействующих электронов в сильных магнитных полях с учетом их релятивизма и вырождения, а также рассмотрено равновесное рождение электрон-позитронных пар в высокотемпературной плазме при наличии квантующего магнитного поля. На Рис.1 представлены осцилляции давления сильно вырожденного электронного газа в квантующем магнитном поле.

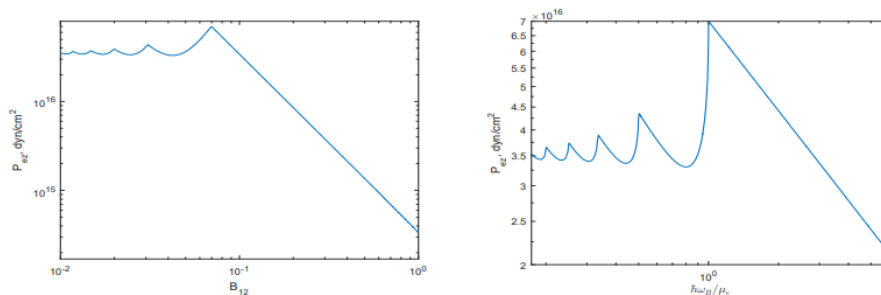


Рис.1: Давление вырожденного электронного газа при $n_e = 8 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-3}$ как функция магнитного поля (слева – в единицах 10^{12} Гс, справа – как функция отношения разницы между энергиями соседних уровней Ландау к химическому потенциалу).

1.3 Моделирование синтетических тепловых кривых блеска замагниченных нейтронных звезд

В продолжение работы по моделированию процессов анизотропного переноса тепла во внешних слоях нейтронных звезд в трехмерной постановке был разработан компьютерный код, позволяющий рассчитывать тепловые спектры и кривые блеска по имеющемуся распределению (картам) поверхностной температуры, являющимися результатами трехмерного моделирования. В качестве модели взято локально-чернотельное приближение с учетом эффектов общей теории относительности (ОТО) и межзвездного поглощения. Учтены два эффекта ОТО, наиболее сильно влияющие на наблюдательные проявления нейтронных звезд – гравитационное красное смещение фотонов, что приводит к уменьшению фиксируемой наблюдателем энергии фотона, а также искривление траектории фотонов вблизи компактного объекта, что ведет к эффективному увеличению наблюдаемой части поверхности нейтронной звезды. Рассчитаны кривые блеска для нескольких разных несоосных комбинаций дипольного и квадрупольного магнитных полей, а также температур ядра нейтронной звезды и положений наблюдателя. Получено, что амплитуда пульсаций в некоторых случаях может существенно вырасти по сравнению со случаем простого дипольного магнитного поля, при этом сами формы пиков могут иметь существенно неправильную форму (см. Рис.2). Имеющиеся программы могут быть использованы в дальнейшем для выяснения конфигурации магнитного поля в реальных источниках путем сравнения результатов наблюдений с модельными кривыми блеска. На Рис.2 представлена модельная кривая блеска для отношения индукций квадрупольного поля к дипольному, равного 0.75 (значения берутся на осях), и углом наклона между магнитными осями 60 градусов.

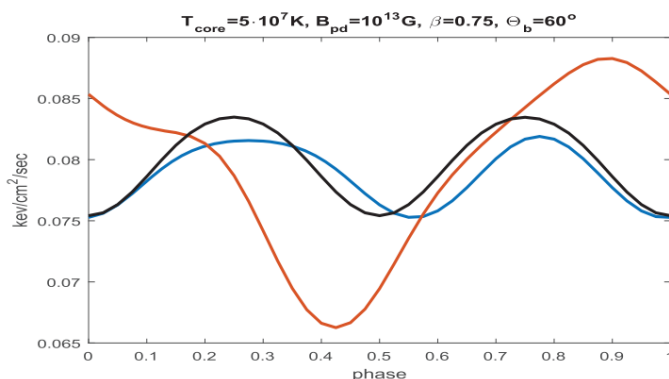


Рис.2: Синтетические кривые блеска для отношения индукций квадрупольного поля к дипольному, равного 0.75, и углом наклона между магнитными осями 60 градусов. Дипольное поле на оси $B_{\text{dipole}} = 10^{13}$ Гс, углы наклона оси диполя положения наблюдателя к оси вращения равны 90 градусов. Температура ядра нейтронной звезды $T_{\text{core}} = 5 \cdot 10^7$ К. Представлены случаи: а) ось квадрупольного поля в одной плоскости с осью диполя и положением наблюдателя (красная кривая); б) ось квадрупольного поля в одной плоскости с осью диполя и осью вращения (синяя кривая); в) кривая блеска с чисто дипольным магнитным полем (черная кривая).

1.4 Отклонение световых лучей сферически-симметричной черной дырой в диспергирующей среде. Размер тени черной дыры, окруженной средой с произвольным показателем преломления

Влияние среды на гравитационное отклонение световых лучей ранее широко обсуждалось в литературе для простейшего нетривиального случая: холодной немагнитной плазмы. В данной работе мы обобщили эти исследования на случай произвольной прозрачной диспергирующей среды с заданным показателем преломления. Рассчитан угол отклонения светового луча, движущегося в сферически-симметричной метрике общего вида, при наличии среды со сферически-симметричным показателем преломления. Также выведено уравнение для радиуса круговых световых орбит. Подробно изучены свойства этих результатов и различные частные случаи. В частности, мы показываем, что умножение показателя преломления на константу не влияет на угол отклонения и радиус круговых орбит. В то же время наличие дисперсии приводит к отличию траектории от случая вакуума даже в пространственно однородной среде, в которой нет преломления.

В качестве одного из приложений наших результатов мы вычислили поправку к углу вакуумного гравитационного отклонения для случая, когда массивный объект окружен однородной, но диспергирующей средой.

В качестве другого приложения мы вывели формулу для углового размера тени черной дыры, окруженной средой с произвольным показателем преломления. Расчет размера тени основывается на подстановке радиуса круговой световой орбиты в уравнение, определяющее наклон луча, испущенного наблюдателем и проходящего мимо черной дыры. Наши результаты могут служить основой для исследования различных моделей плазмы, выходящих за рамки случая холодной плазмы. Опубликовано в журнале Physical Review D.

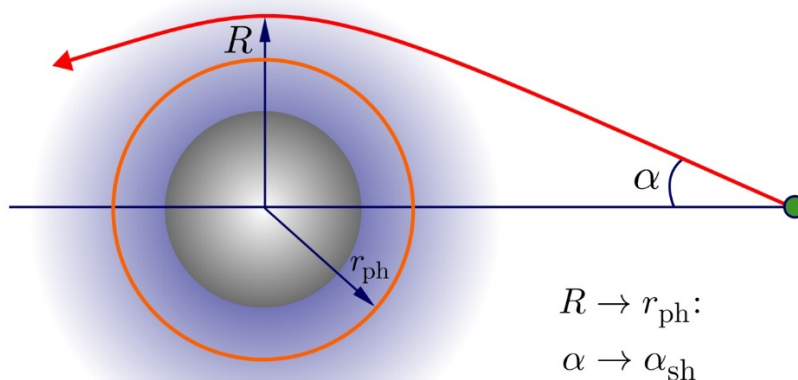


Рис.3: Формирование тени черной дыры, окруженной веществом. Наблюдатель излучает луч света в прошлое под углом α по отношению к радиальному направлению, и этот луч проходит мимо черной дыры на расстоянии максимального сближения R . Если в качестве R подставить радиус фотонной сферы r_{ph} , то мы получим угловой радиус тени черной дыры α_{sh} .

1.5 Численное моделирование формирования и коллимации астрофизических джетов

Было продолжено МГД моделирование процесса формирования и коллимации астрофизических джетов во внешнем магнитном поле и сопоставление полученных результатов с результатами по формированию джетов в лабораторном эксперименте на установке НЕОДИМ в ЦНИИМАШ.

Ранее мы исследовали формирование и коллимацию джета во внешнем постоянном полоидальном магнитном поле, направленном перпендикулярно мишени. На настоящем этапе мы изучаем образование джетов во внешнем тороидальном магнитном поле. Мы исследовали два случая. В первом случае в область с начальным тороидальным полем втекал немагнитный поток вещества. Коллимация джета не происходила. Во втором случае втекающий поток вещества нес магнитное поле. В этой конфигурации вещество коллимируется в направленный джет и в лабораторном эксперименте может наблюдаться в виде кольцевой структуры на противоположной стенке камеры. Размеры кольца зависят от величины магнитного поля. Мы нашли распределение плотности и энергии плазмы, выявили структуру джета на различных расстояниях и в различные моменты времени.

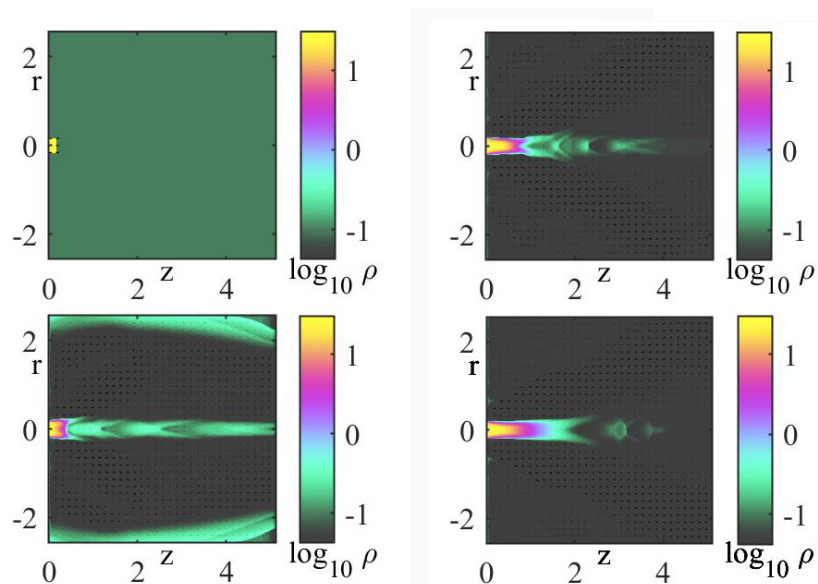


Рис.4: Картина течения вещества в различные моменты времени. Заливкой показан логарифм плотности. После выброса вещество начинает расширяться во всех направлениях, затем происходит коллимация потока.

1.6 Расчет движения замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду

Было продолжено МГД моделирование задачи о сверхзвуковом движении замагниченных старых нейтронных звезд и пульсарных туманностей в неоднородной межзвездной среде и взаимодействия их магнитосфер с веществом межзвездной среды. В отличие от предыдущих этапов решения задачи, на которых мы исследовали поведение туманностей при различных уровнях замагниченности ветра и их взаимодействие с мелкомасштабными неоднородностями межзвездной среды, в отчетном году было изучено взаимодействие пульсарных туманностей и протяженных магнитосфер старых нейтронных звезд с крупномасштабными неоднородностями межзвездной среды. Получена картина течения вещества в зависимости от параметров среды, скорости движения и магнитного поля звезды, а для пульсарных туманностей также от уровня замагниченности пульсарного ветра. Было показано, каким образом крупномасштабные скачки плотности 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, в частности, с существующими наблюдениями Гитарной туманности, туманности Мышь вокруг пульсара PSR J1747-2958, туманности пульсара PSR J1509-5850 и некоторых других.

1.7 Исследование образования неравновесного химического состава нейтронных звезд

В работе рассматривается эволюция химического состава в оболочках нейтронных звёзд при высоких плотностях и температурах. Предложена модель нуклеосинтеза, основанная на приближении ядерного статистического равновесия (ЯСР). Проведен ряд расчётов по изучению зависимости результатов нуклеосинтеза от параметров среды в статическом приближении. Результаты текущей работы демонстрируют качественное сходство с более ранними работами других авторов (например, *F. E. Clifford and R. J. Tayler*, MNRAS, V. 129, p. 104 (1965) [CT65]). Показано, что предложенная модель даже в статическом приближении неплохо описывает распространенность химических элементов. На рис.5 продемонстрированы начальное и итоговое распределения ядер для одного из эволюционных треков.

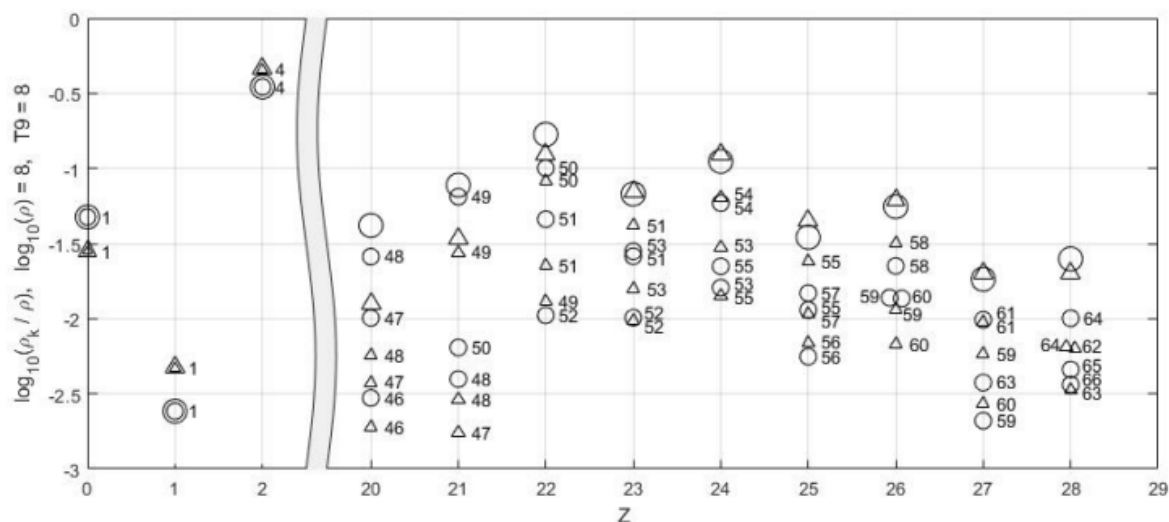


Рис.5: Δ – начальное распределение изотопов этой работы; ∇ – начальное распределение изотопов работы [CT65]; $\circ$ – конечное распределение изотопов текущей работы; $\square$ – конечное распределение изотопов работы [CT65]; увеличенные метки обозначают суммарный вклад изотопов при одном зарядовом числе Z ; каждый изотоп подписан своим массовым числом A ; $T=8 \cdot 10^9$ К; $\rho=10^8$ г см $^{-3}$.

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

Обнаружено, что в работе (Minaev et al. MNRAS, 2021) было использовано некорректное значение красного смещения для 12 из 320 гамма-всплесков. При этом значения красного смещения для 4 гамма-всплесков являются недостоверными, вследствие чего эти события исключены из выборки. Для оставшихся 8 событий сделан перерасчет всех наблюдаемых энергетических и временных характеристик с использованием корректных значений красного смещения. Показано, что, несмотря на эти изменения, основные результаты исходной работы, в частности, классификация данных 8 гамма-всплесков, не изменилась. В качестве примера на рис. 6 приведены некоторые результаты, полученные на основе работы. Выделены проблемы классификации транзиентов в гамма-диапазоне (Minaev, Pozanenko, Communications in Computer and Information Science, 2021).

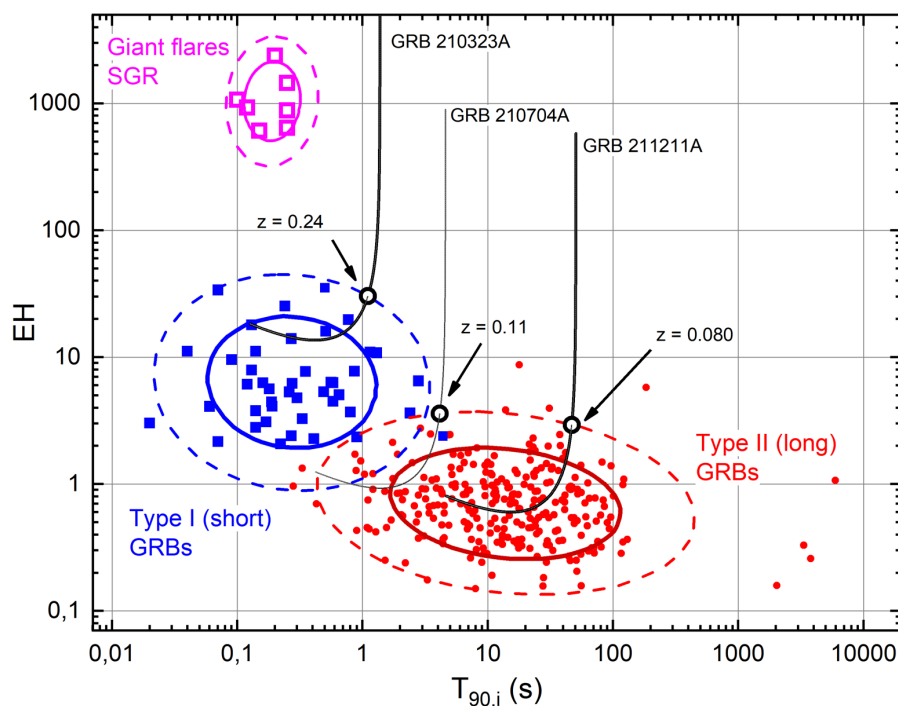


Рис.6: Диаграмма $T_{90,i}$ - E_H для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек источников SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами кластерного анализа (1 сигма и 2 сигма области кластеров показаны жирными сплошными и тонкими штриховыми кривыми). Гладкими черными кривыми показаны траектории гамма-всплесков GRB 210323A, GRB 210704A и GRB 211211A в зависимости от красного смещения. Положение траекторий на диаграмме позволяет классифицировать GRB 210704A и GRB 211211A как гамма-всплески типа II (длинные), а GRB 210323A как всплеск типа I (короткий). По точкам пересечения траекторий с границами 2 сигма областей соответствующих кластеров (незаполненные кружки) можно оценить нижний предел красных смещений источников данных всплесков.

Написана обзорная статья о современном состоянии исследований (наблюдения и теоретические модели) космических гамма-всплесков (Позаненко и др. ПАЖ 2021).

В рамках работы по исследованию возможности регистрации гамма-всплесков боковой апертурой планируемой космической миссии ГАММА-400 в диапазоне (10, 100) МэВ проведен спектральный анализ данных 4 наиболее ярких в диапазоне выше 30 МэВ гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте LAT/Fermi. На примере модельных спектров, полученных из спектрального анализа этих всплесков показано, что боковая апертура ГАММА-400 позволит регистрировать не только подобные ярчайшие гамма-всплески, но и существенно (на порядок) менее значимые события. Сделаны оценки нижнего порога чувствительности данной моды эксперимента (Leonov, et al. Advances in Space Research 2021).

В рамках работы по многоволновому исследованию гамма-всплеска GRB 140102A, проведен анализ положения всплеска на диаграмме $E_{p,i}$ – E_{iso} (Амати), подтвердивший связь данного события с классом длинных гамма-всплесков (Gupta et al, MNRAS, 2021).

Проведен анализ данных эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL для гамма-всплесков GRB 210619B и GRB 210704A. Сделаны оценки энергетического потока, в кривых блеска обоих всплесков не обнаружено продленное излучение и предвсплеск, получены соответствующие верхние пределы энергетического потока. Для GRB 210704A проведен также комплексный спектрально-временной анализ данных эксперимента GBM/Fermi. С помощью диаграммы T90,i – ЕН всплеск классифицирован как длинный, а также была исключена ассоциация его источника с галактикой ($z = 0.0817$), расположенной вблизи оптического компонента всплеска.

1.9 Построение конвейерных программных систем для потоковой обработки астрономических данных и каталогов

Продолжается работа по проекту SNAD (SuperNova Anomaly Detection), проводимая совместно с коллегами из ГАИШ МГУ и университета Клермон Оверн (Клермон-Ферран, Франция). Проведён поиск аномалий в кривых блеска объектов в обзоре Zwicky Transient Facility DR3. Было изучено около 2000 кривых блеска объектов, отобранных в качестве аномальных, алгоритмом машинного обучения. В результате было найдено несколько десятков не детектированных ранее сверхновых, несколько вспышек красных карликов, несколько десятков квазаров и активных ядер галактик. Всем изученным источникам присвоены маркеры с наиболее вероятным их типом. По результатам работы опубликовано несколько статей (Ishida et al. *Astronomy & Astrophysics* 2021; Malanchev et al. *MNRAS* 2021).

1.10 Исследование однородных моделей белых карликов с учетом влияния конечной температуры и эффектов общей теории относительности

При исследовании белых карликов было обнаружено, что их равновесие возможно только для масс, не превышающих предел, известный как предел Чандрасекара. В работе рассматривались однородные модели белых карликов с учетом эффектов общей теории относительности и влияния конечной температуры.

Для приближенного рассмотрения однородных звезд использован энергетический метод. Распределение плотности принимается заданным с единственным параметром в виде постоянной по звезде плотности. Равновесное и устойчивое состояния определяются равенством нулю первой производной и положительным знаком второй производной соответственно. Воспользовавшись соотношением для равновесия и уравнением состояния для холодных белых карликов, была получена приближенная зависимость массы от плотности для белого карлика в однородной модели. Учитывая малые поправки за счет отклонения от ультрарелятивистского газа и малые температурные поправки, получаем в однородной модели зависимость массы от плотности при больших плотностях. В работе впервые были рассмотрены модели однородных белых карликов с учетом пост-ньютоновских поправок на общую теорию относительности (ОТО). Для равновесных звезд пост-ньютоновские поправки к энергии для однородного шара вычисляются аналитически. При учете рассчитанной поправки на ОТО получили приближенное уравнение равновесия, из которого следует зависимость массы от плотности в однородной модели белого карлика с учетом эффектов ОТО. Сравнивая кривые для однородной модели и кривые для белых карликов в точной политропной модели, увидели, что в первом случае кривые примерно на 20% выше и теряют устойчивость за счет эффектов ОТО при плотности приблизительно в 5 раз меньшей из-за большого влияния этих эффектов в однородной модели. В работе также было получено

уравнение для массы однородного белого карлика с учетом эффектов ОТО при конечной температуре.

1.11 Разработка трехмерного кода с решением уравнений газовой динамики на неструктурированной тетраэдрической сетке

Разработан комплекс программ с реализацией решения трехмерных нестационарных уравнений газовой динамики на неструктурированной сетке, состоящей из тетраэдров. Тетраэдрические сетки позволяют увеличивать разрешение в областях больших градиентов вычисляемых параметров газа, а также использовать сложные формы расчетных областей без усложнений кода программы, что делает разрабатываемый комплекс программ достаточно универсальным инструментом для моделирования сложных сжимаемых течений газа. В качестве основного подхода используется операторно-разностный метод, для вычисления потоков используется приближенное решение задачи о распаде разрыва (метод Годунова), реализовано несколько широко используемых подходов – схема Рusanова, методы HLL, HLLC. Для уточнения решения используется ограниченная кусочно-линейная реконструкция расчётных величин, которая позволяет увеличить порядок аппроксимации метода по времени и пространству до второго. На Рис.7 представлено решение задачи о распаде произвольного газодинамического разрыва (тест Сода), часто использующийся в качестве теста для газодинамических кодов. Ударная волна, возникающая в результате распада, размазана на ~ 3 расчетные ячейки, что говорит о достаточно низких диссипативных свойствах метода. Разработанный код предполагается использовать при моделировании астрофизических течений плазмы.

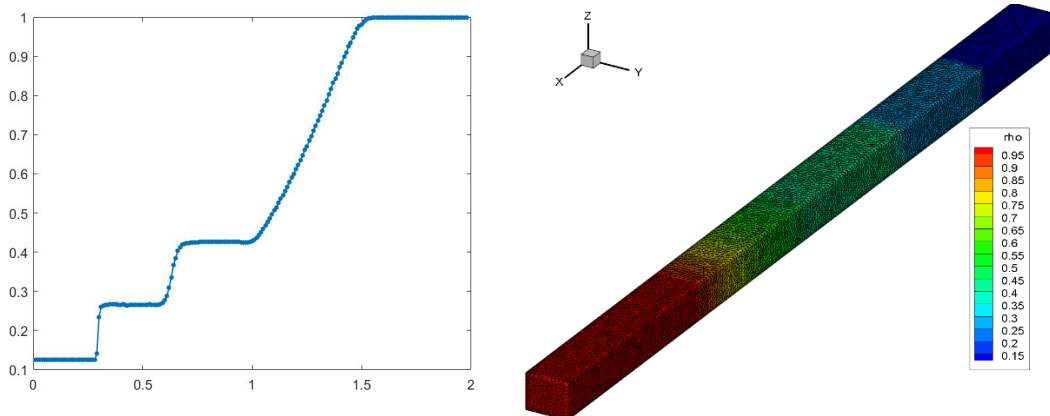


Рис.7: Распределение плотности решения задачи о распаде разрыва (тест Сода; слева – одномерное сечение, справа – граница трехмерной области с изображенной границей расчетной сетки) при $T=0.4$ (начальные условия $\rho = 0.125$, $P = 0.1$, $V = 0$, $x < 1$; $\rho = 1.0$, $P = 1.0$, $V = 0$, $x \geq 1$). При расчете использовалось $N = 200$ узлов в направлении оси x .

1.12 Многослойные сферические звездные скопления однородной плотности.

Равновесие бесстолкновительных самогравитирующих скоплений определяется решением, следующим из бесстолкновительного кинетического уравнения Больцмана с самосогласованным гравитационным полем, определяемым уравнением Пуассона. Рассматривались три типа моделей со сферически симметричной функцией распределения: модель с круговыми орбитами (модель Эйнштейна), модель с

радиальными орбитами, и модель более общего типа с плавно меняющимся эксцентриситетом. В настоящей работе получены новые решения для однородного шара, с некруговыми траекториями частиц, сохраняющих сферическую симметрию в фазовом пространстве, и имеющие в центре полую сферу с центральной тяготеющей массой. Это может имитировать область галактического ядра со сверхмассивной черной дырой в центре. Полученные решения описывают модель с эллиптическими траекториями, промежуточную между моделью с радиальными и круговыми траекториями. На основе этих решений получена аналитическая многослойная сферически симметричная модель однородной плотности, как с полым, так и с заполненным ядром, с различными функциями распределения ядра и в отдельном слое.

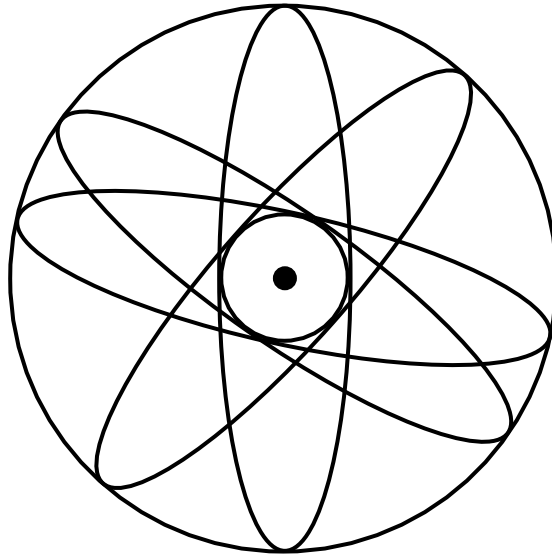


Рис.8 Схематическая фигура шара с полым ядром и центральным центром тяготения (например, сверхмассивная черная дыра), и траекториями частиц в виде одинаковых эллипсов с центрами в начале координат - однослойная модель. (рисунок О.Ю. Цупко)

Раздел 2 Физика околоземного пространства.

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

На основе длительного цикла фотометрических наблюдений в инфракрасных диапазонах JHKLM затменной звезды эпсилон Возничего на 1.25-метровом телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ обнаружено изменение инфракрасного цвета звезды в зависимости от фазы ее периода. Это изменение можно объяснить различием рассеяния света Сверхгиганта на пылевом диске окружающем невидимый компонент.

Проведены спекл-поляризметрические наблюдения этой звезды в полосе с центром в 625 нм при полуширине 50 нм на 2.5 - метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ.

Полученное значение поляризации: 2.0 ± 0.2 % при позиционном угле $145 \pm 5^\circ$ объясняется, в основном, межзвездной поляризацией. Поляризованной оболочки мы не обнаружили.

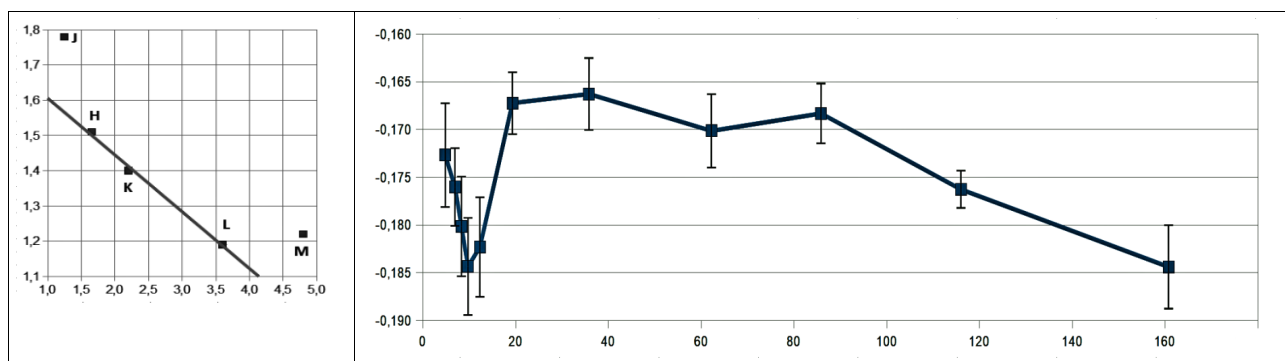


Рис.8: Слева – спектральная зависимость звездной величины от длины волны (мкм) для эпсилон Возничего и ее линейная аппроксимация. Справа – наклон спектра для полос HKL в зависимости от угла рассеяния (градусы) на пылевом диске.

Этот результат был представлен на **Всероссийской астрономической конференции, проходившей в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова 23 – 28 августа 2021 г.**

На основе наблюдений на телескопе Цейсс-1000 Института астрономии РАН, находящимся в п. Симеиз (Крым) получены величины линейной поляризации комы кометы C/2020 F3 (NEOWISE) в июле 2020 г. в спектральной области 570 – 700 нм. Степень поляризации при фазовом угле солнечного освещения около 80° достигала 25 %. Сравнение поляризаций в центре и на расстоянии $1' - 2'$ от ядра кометы показывает более высокую поляризацию на периферии. Поляризация в узких полосах пылевого континуума выше, чем в широкой полосе и в полосе центрированной на линию излучения NH_2 .

2.2 Разработка методов контроля и исследования свойств атмосферы, моря и поверхности Земли для проведения астрономических наблюдений и навигации летательных аппаратов

С целью контроля состояния атмосферы, при астрономических наблюдениях низко над горизонтом в южном направлении на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории

ИНАСАН, была разработана и установлена камера формата 32×32 работающая в диапазоне 8 – 12 мкм. Камера позволяет определять яркостные температуры суши, моря и атмосферы.

2.3 Проведение систематических поляризационных измерений фона рассеянной радиации в мезосфере Земли. Оценка поляризационных свойств, размеров пылевых частиц в мезосфере, и измерение температуры в верхней мезосфере и мезопаузе

На основе многоцветных измерений фона полярных мезосферных (серебристых) облаков разрабатываются методы определения среднего размера частиц и высоты облаков. Размер частиц определяется на основе эффекта рассеяния Ми на малых частиц, характеризующего смещение цвета в синюю сторону на малых углах рассеяния и в красную сторону на больших углах рассеяния. Определение высоты основано на цветовых изменениях по ходу погружения в тень стратосферы, а затем тропосферы Земли, с учетом релеевского и аэрозольного рассеяния, поглощения в полосах O_3 и NO_2 . Сопоставление размера частиц и высоты облаков позволит уточнить модели намерзания льда на частицах пыли в мезосфере и временные тренды этих величин, вызванные похолоданием летней мезосферы на высоте около 80 км.

2.4 Исследование гамма-вспышек земного происхождения

Проведены оценки возможности и количества регистраций гамма-вспышек Земного происхождения (TGF) гамма-детектором планируемого КА Чибис-АИ. Предложена оптимальная (сегментированная) схема эксперимента для регистрации гамма-излучения TGF и GRB, определены его основные задачи. В частности, гамма-детектор позволит регистрировать линейную поляризацию TGF и GRB. Результаты работы вошли в ТЗ на гамма-детектор КА Чибис-АИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2021 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 2021 г. было опубликовано 26 научных публикаций. Из них опубликовано:

- статьи в зарубежных изданиях - 19
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах - 6
- монография - 0
- статьи в сборниках материалов конференций - 1
- доклады, тезисы, циркуляры - 8
- 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 17 из них входят в **Q1** - 9, входят в **Q2** - 3
- статьи со ссылками на РНФ: 6
- статьи по теме (без РНФ): 19

Наиболее важные результаты, полученные по теме «Звёзды»:

1. Исследование термодинамических свойств электронного газа в сильных магнитных полях при наличии возможных релятивизма и вырождения.
2. Исследование отклонения световых лучей сферически-симметричной черной дырой в диспергирующей среде. Вычисление размера тени черной дыры, окруженной средой с произвольным показателем преломления.
3. Проведение систематического анализа кривых блеска гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS обсерватории INTEGRAL с целью поиска продленного излучения.

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

Список опубликованных работ в 2021 по теме «ЗВЕЗДЫ»:

Статьи в зарубежных изданиях

1. Minaev, P. Yu; Pozanenko, A. S., Classification problem and parameter estimating of gamma-ray bursts. *Communications in Computer and Information Science*, 2021, 1427, 134–147 (2021) **(Q3) (PHΦ)**
2. Minaev, P. Y.; Pozanenko, A. S., Erratum: The Ep,i-Eiso correlation: type I gamma-ray bursts and the new classification method *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 504, Issue 1, pp.926-927 (2021) doi: 10.1093/mnras/stab1031 **(Q1)**
3. Gupta, Rahul; Oates, S. R.; Pandey, S. B.; ... ; Minaev, P. Yu., et al. GRB 140102A: insight into prompt spectral evolution and early optical afterglow emission, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 505, Issue 3, pp.4086-4105 (2021) doi: 10.1093/mnras/stab1573 **(Q1)**
4. Ishida, E. E. O., Kornilov, M. V., Malanchev, K. L., Pruzhinskaya, M. V., Volnova, A. A., Korolev, V. S., Mondon, F., Sreejith, S., Malancheva, A. A., Das, S. Active anomaly detection for time-domain discoveries. // *Astronomy & Astrophysics*, Volume 650, id. A195, 9 pp. (2021) **(Q1) (PHΦ)**
5. Malanchev, K. L., Pruzhinskaya, M. V., Korolev, V. S., Aleo, P. D., Kornilov, M. V., Ishida, E. E. O., Krushinsky, V. V., Mondon, F., Sreejith, S., Volnova, A. A., Belinski, A. A., Dodin, A. V., Tatarnikov, A. M., Zheltoukhov, S. G. Anomaly detection in the Zwicky Transient Facility DR3. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 502, Issue 4, pp.5147-5175 (2021) **(Q1)**
6. Volnova A., Pozanenko A., Mazaeva E., Belkin S., Minaev P. Databases of Gamma-Ray Bursts' Optical Observations. // In: Sychev A., Makhortov S., Thalheim B. (eds) *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1427. Springer, Cham, (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-81200-3_11 **(Q3)**
7. ALINA VOLNOVA, ALEXEI POZANENKO, ELENA MAZAEVA, SERGEY BELKIN, IGOR MOLOTOV, LEONID ELENIN, NAMKHAI TUNGALAG & DAVID BUCKLEY. IKI GRB-FuN: observations of GRBs with small-aperture telescopes. // *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, vol. 93(Suppl. 1): e20200883 (2021) DOI 10.1590/0001-3765202120200883 **(Q1)**
8. DAVID A.H. BUCKLEY, VANESSA A. MCBRIDE, ULISSES BARRES DE ALMEIDA, BORIS SHUSTOV, ALEXEI POZANENKO, ALEXANDER LUTOVINOV, AMITESH OMAR, JAYANT MURTHY, MARGARITA SAFONOVA, JIFENG LIU ROBERTO SORIA. Towards a BRICS Optical Transient Network (BRICS-OTN). // *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, vol. 93 (suppl 1): e20200917 (2021) DOI 10.1590/0001-3765202120200917 **(Q1)**
9. Park, I. H. ; Choi, K. -Y. ; Hwang, J. ; Jung, S. ; Kim, D. H. ; Kim, M. H. ; Lee, C. -H. ; Lee, K. H. ; Oh, S. H. ; Park, M. -G. ; Park, S. C. ; Pozanenko, A. ; Rho, C. D. ; Vedenkin, N. ; Won, E. Stellar interferometry for gravitational waves. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Volume 2021, Issue 11, id.008 (2021) DOI 10.1088/1475-7516/2021/11/008 **(Q1) (PHΦ)**
10. Ilya A Kondratyev and Sergey G Moiseenko, A semi-implicit unstructured operator-difference scheme for three-dimensional self-gravitating flows, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2028 012007 (2021) doi:10.1088/1742-6596/2028/1/012007 **(Q3)**
11. Oleg Yu. Tsupko, Deflection of light rays by a spherically symmetric black hole in a dispersive medium, *Physical Review D*, 103, 104019 (2021) <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.104019> **(Q1)**
12. Gennady S. Bisnovaty-Kogan, Cosmological Model with Interconnection between Dark Energy and Matter, *Universe* 7(11), 412 (2021) **(Q2) (PHΦ)**

13. Ugolnikov O.S., Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Roldugin A.V., Retrieval of particle size distribution of polar stratospheric clouds based on wide-angle color and polarization analysis. Planetary and Space Science 200, 105213 (2021) DOI: 10.1016/j.pss.2021.105213 **(Q2)**
14. A. Dorodnitsyn and T. Kallman, A Physical Model for a Radiative, Convective Dusty Disk in AGN, Astrophys J, 910, 67 (2021) DOI: 10.3847/1538-4357/abe121 **(Q1)**
15. Bisnovaty-Kogan G.S., Patraman E.A., White Dwarfs in a Uniform Sphere Approximation, with General Relativity Effects taken into account, Astrophysics, Vol. 64, No. 4 (2021) DOI 10.1007/s10511-021-09711-1 **(Q4)**
16. Бисноватый-Коган Г.С., «Многослойные сферические звездные скопления однородной плотности» Астрофизика, вып.2, 64, 259-266 (2021) DOI: 10.1007/s10511-021-09683-2 **(Q4)**
17. Игнатовский А.Ю., «К вопросу об образовании неравновесного химического состава в оболочках нейтронных звезд», вып.2, 64, 267-282 (2021) DOI: 10.1007/s10511-021-09684-1 **(Q4)**
18. Volnova A., Pozanenko A., Belkin S., Host Galaxies of Cosmic Gamma-Ray Bursts. // 2021 CEUR, 3036, 197 (2021) **(РНФ)**
19. Leonov, A. A.; Galper, A. M.; Topchiev, N. P.; ... Minaev, P. Yu., et al. Capabilities of the GAMMA-400 gamma-ray telescope to detect gamma-ray bursts from lateral directions Advances in Space Research, 69, 514 (2022) doi: 10.1016/j.asr.2021.10.031 **(Q2)**

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

1. Угольников О.С., Маслов И.А., Измерения высоты и размера частиц пост-вулканического аэрозоля на основе поляриметрии сумеречного неба. Космические исследования 59, 2, 111-117 (2021) DOI: 10.31857/S0023420621020096 **(Q3)**
2. И.А. Маслов. «Поляризация кометы C/2020F3 (NEOWISE) в красной области спектра». Астрономический Циркуляр №1648 (2021). <http://www.sai.msu.su/EAAS/AC/1601-/ac1648.pdf>
3. Г.Ю. Мозгунов, П.Ю. Минаев, А.С. Позаненко, «Продленное излучение космических гамма-всплесков, зарегистрированных экспериментом SPI-ACS/INTEGRAL», Письма в Астрономический Журнал, том 47, №3, (с.183-196) (2021) doi: 10.31857/S0320010821030049 **(Q3) (РНФ)**
4. Позаненко, А.; Барков, М.; Минаев, П.; Вольнова, А. Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели, Письма в Астрономический журнал, том 47, №12, с. 823–865 (2021) doi: 10.31857/S0320010821120032 **(Q3)**
5. Бисноватый-Коган Г.С., Кондратьев И.А. «Газ свободных электронов и равновесие электрон-позитронных пар в магнитном поле» Успехи Физических Наук, вып.5, 191 543–557 (2021) DOI: 10.3367/UFNr.2020.08.038827 **(Q2)**
6. Г.С. Бисноватый-Коган, О.Ю. Цупко, «Российско-немецкие исследования тени черных дыр, Вестник Российского фонда фундаментальных исследований», No 1–2 (109–110), стр. 33-37 (2021) DOI: 10.22204/2410-4639-2021-109-110-01-02-33-37

Статьи в сборниках материалов конференций

1. Маслов И.А., Гришин В.А., Николенко И.В. «Тестирование камеры для измерения контрастности границы атмосфера-море в инфракрасном (тепловом) диапазоне длин волн». Материалы 19-й Международной конференции «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.

Доклады, тезисы, циркуляры

1. Oleg Tsupko, Zuhui Fan, Gennady Bisnovaty-Kogan, Black hole shadow as a standard ruler in cosmology, Sixteenth Marcel Grossmann Meeting, 5-10 July 2021 (Virtual Meeting) (устный доклад)
2. Кондратьев И.А., Моисеенко С.Г. «Неявный численный метод для моделирования многомерных самогравитирующих газодинамических течений на неструктурированной сетке», XVIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» 14-16 апреля 2021 г., ИКИ РАН (устный доклад)
3. Кондратьев И.А., Моисеенко С.Г. «(Полу)неявный операторно-разностный метод на неструктурированных тетраэдрических сетках для трехмерных астрофизических задач» Семинар 11 отдела Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П. Попова, Москва, 07.06.2021 (устный доклад)
4. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G. “A semi-implicit operator-difference scheme for three-dimensional self-gravitating flows” Challenges and Innovations in Computational Astrophysics – III, 17-21 June 2021 (устный доклад)
5. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G., Bisnovaty-Kogan G.S., Glushikhina M.V. “Three - dimensional simulation of stationary heat transfer in magnetized neutron star” The Modern Physics of Neutron Stars and Relativistic Gravity - 2021 Ереван, Армения (on - line), 27.09.2021 - 30.09.2021 (устный доклад)
6. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G. “A semi - implicit multidimensional unstructured gas dynamical solver for astrophysical applications” Sixteenth Marcel Grossmann Meeting-MG16 online, 05.07.2021 - 10.07.2021 (устный доклад)
7. Kondratyev I.A., Moiseenko S.G. “A semi-implicit unstructured operator-difference scheme for three-dimensional self-gravitating flows” Fourth Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes Virtual, October 12-14, 2021 (приглашенный доклад)
8. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., GRB 200415A: гигантская вспышка магнетара или короткий гамма-всплеск? Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, 21 - 24 декабря 2021 г., г. Москва <http://heacnf.cosmos.ru/2021/> (устный доклад)