



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**



**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦИНА**

АСТРОФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Отчет за 2022 год

*Москва
2023*

УДК 539.165:537,591
БИК 22.38

**АСТРОФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
И КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

Отчет за 2022 год
Под редакцией член-корр. РАН Э.Э. Бооса, Е.А. Сигаевой

АСТРОФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.
Отчет за 2022 год /Под редакцией член-корр.РАН Э.Э. Бооса,
Е.А. Сигаевой; Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына. — М., 2023.

В сборнике содержится краткое описание полученных в НИИЯФ МГУ в 2022 г. результатов исследований в области астрофизики космических лучей и космической физики, составленное отделом научной информации на основе данных, предоставляемых информационно-аналитической системой «Наука — МГУ» и опубликованных в отечественной и зарубежной литературе.

**К 270-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**



СОДЕРЖАНИЕ

Исследования в области астрофизики космических лучей и космической физики в НИИЯФ МГУ. Краткая справка	5
Основные результаты, полученные в НИИЯФ МГУ в 2022 г. в области астрофизики космических лучей и космической физики	7
<i>Астрофизика космических лучей</i>	7
Астрофизический комплекс TAIGA	7
Космический эксперимент НУКЛОН	8
Орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий	10
Стратосферная обсерватория EUSO-SPB2	10
Проект СФЕРА-3	11
Поиск частиц темной материи	12
Мюонная радиография	14
<i>Космическая физика</i>	15
Исследование процессов в недрах Солнца	15
Механизмы солнечной подфотосферной конвекции	17
Исследование солнечных протонных событий	18
Модели распространения солнечного ветра	19
Надтепловые ионы высокоскоростных потоков солнечного ветра	19
Прогнозирование потоков релятивистских электронов	20
Динамика магнитосферных частиц по данным спутниковых измерений	21
Магнитосферы планет и экзопланет	23
Космическое материаловедение	23
События 2022 года	24
<i>Мультиспутниковая группировка Московского университета</i>	24
<i>37-я Всероссийская конференция по космическим лучам</i>	25
<i>Всероссийский Фестиваль науки</i>	25

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АСТРОФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В НИИЯФ МГУ. КРАТКАЯ СПРАВКА

Космические исследования в области астрофизики и физики космоса ведутся в НИИЯФ МГУ экспериментальными и теоретическими методами с момента основания института.

Изучение происхождения космических лучей и их распространения до Земли — одна из важнейших задач астрофизики и ведущее направление исследований в НИИЯФ МГУ. Основы этого направления были заложены академиками АН СССР Д.В. Скобельцыным и С.Н. Верновым — первыми директорами института — еще при его создании в сороковые годы двадцатого столетия. Вопросы астрофизики космических лучей обращены к таким фундаментальным проблемам, как происхождение и природа материи, энергии и Вселенной.

Космическая физика — наука, изучающая космические излучения за пределами атмосферы планеты. Исследования в НИИЯФ МГУ проводятся как на искусственных спутниках Земли, Международной космической станции и автоматических межпланетных станциях, так и наземными средствами. Они важны как с точки зрения фундаментальной науки, для понимания физических процессов, протекающих в космическом пространстве, так и для развития прикладных исследований, связанных с созданием моделей, необходимых для определения уровня радиационной опасности космических полетов и для предотвращения опасных проявлений космофизической погоды.



Тематический план научно-исследовательских работ НИИЯФ МГУ включает в себя 9 тем исследований в области астрофизики космических лучей и космической физики:

- «Исследования химического состава галактических космических лучей на космических аппаратах и аэростатах»;
- «Гамма-астрономия высоких энергий и исследование космических лучей с помощью наземных установок»;
- «Исследования космических лучей предельно высоких энергий на космических аппаратах»;
- «Теоретическое и экспериментальное исследование переноса излучения в земных и астрофизических средах»;
- «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве»;
- «Исследования экстремальных явлений в рентгеновском и гамма-диапазонах во вселенной на космических аппаратах»;

- «Теоретические модели магнитосфер планет солнечной системы»;
- «Космическое материаловедение»;
- «Исследования транзиентных энергичных процессов в верхней атмосфере Земли».

НИИЯФ МГУ активно участвует в реализации проектов Научно-образовательной школы МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования Космоса» и реализует проекты:

- «Эксперимент TAIGA», направленный на развертывание первой очереди экспериментального комплекса TAIGA на базе уникальной научной установки «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ»;
- «Монитор», с целью развития системы мультиспутникового мониторинга радиационного состояния околоземного космического пространства;
- «Полярный патруль», его задачи – развитие экспериментальных и теоретических методов мониторинга радиационных полей в околоземном космическом пространстве;
- «Транзиенты», в его рамках осуществляется разработка телескопов для регистрации свечения широких атмосферных ливней, производимых космическими лучами предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) и транзиентных оптических явлений в атмосфере Земли;
- «Биоконтейнер» с целью изучить динамику выживания земных микроорганизмов в условиях космического полета;
- «Токовый канал», направленный на разработку микроэлектронных компонентов и устройств с конструкционной радиационной стойкостью;
- «Астрочастицы и темная материя», «Сигналы DM», «DarkSide», их цель – построить теории взаимодействия полей Стандартной модели с темной материей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В НИИЯФ МГУ В 2022 г. В ОБЛАСТИ АСТРОФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Астрофизика космических лучей

Астрофизический комплекс TAIGA

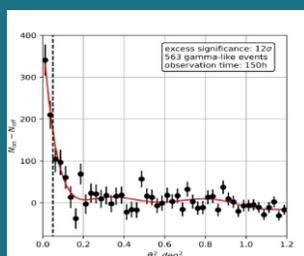
Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности

В 2022 году завершено развертывание первой очереди Астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), состоящего из трех атмосферных черенковских гамма-телескопов (АЧТ) с восстановлением углового распределения черенковского света от ШАЛ. В программу наблюдения обсерватории входят источники, время наблюдения которых достаточно большое для северного расположения обсерватории, такие как Крабовидная туманность, Dragonfly Nebula, остатки сверхновых Тихо Браге и др.

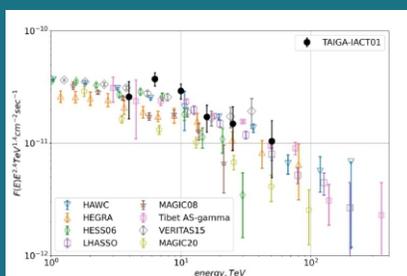
Гамма-источник в Крабовидной туманности наблюдался первым АЧТ в течении 150 часов во время двух сезонов (2019-2020 и 2020-2021гг.). Выделены 563 события гамма-квантов в энергетическом диапазоне 5-100 ТэВ с уровнем значимости над фоном 12σ . Разработана методика восстановления энергии гамма-квантов по данным только одного атмосферного телескопа на основе метода Монте-Карло с точностью около 30%, позволяющая восстановить энергетический спектр событий. Полученный спектр частиц достаточно хорошо совпадает с мировыми данными в области от 5 до 100 ТэВ. Работы выполнены с участием сотрудников НИИЯФ МГУ в составе коллаборации TAIGA.



Вид на второй и третий черенковские гамма-телескопы



θ^2 – распределение событий после вычитания фоновых событий.
Избыток событий над фоном при $\theta^2 < 0,05 \text{ град}^2$ равно 563. Значимость такого превышения над фоном 12σ .
 θ – угол между направлением на источник и восстановленным направлением прихода событий



Восстановленный энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого телескопа эксперимента TAIGA в сравнении с результатами измерений других обсерваторий

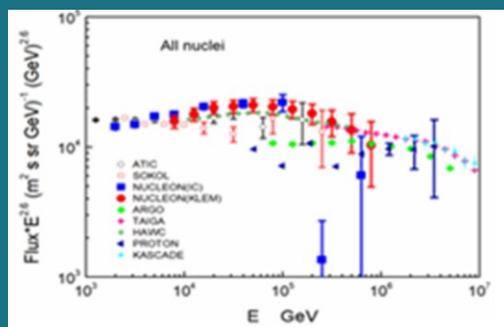
Космический эксперимент НУКЛОН **Спектры ядер космических лучей**

Получены новые результаты обработки данных космического эксперимента НУКЛОН. В подтверждение определенного ранее статистически обеспеченного излома в спектре всех элементов космических лучей (КЛ) по магнитной жесткости впервые проведено сравнение спектров всех частиц по прямым измерениям и регистрации ШАЛ. Получено совпадение результатов по интенсивности потока частиц и определена разница между спектром и степенным приближением.

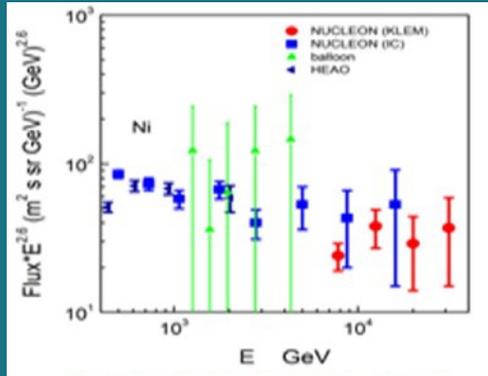
Впервые измерен спектр высокоэнергетических ядер никеля (до ~ 40 ТэВ), дающий важную информацию о процессах нуклеосинтеза.

Со статистической надежностью в 3.4 стандартных отклонения получено, что спектры редких нечетных ядер систематически более пологие, чем спектры четных обильных ядер, что противоречит ожиданиям – подавляющая часть потока обильных четных ядер представляют собой ядра, ускоренные в источниках, в то время как можно ожидать, что существенная часть потока нечетных ядер обусловлена вторичными ядрами, получаемыми в процессе фрагментации первичных ядер на межзвездном газе.

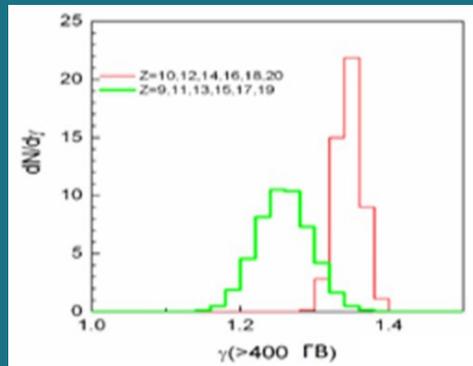
Проведено исследование наклона спектров магнитной жесткости ядер космических лучей в зависимости от заряда для обильных четных ядер. Получено статистически обеспеченное подтверждение указания эксперимента АТИС о росте крутизны спектров в источнике с ростом заряда ядра. По совокупности данных статистическая надежность вывода о росте крутизны спектров достигла девяти стандартных отклонений.



*Спектр всех частиц. Данные НУКЛОН
в сравнении с данными
АТИС, Sokol, ARGP, TAIGA, HAWC,
PROTON, CASCADE*



Спектр никеля. Продление данных HEAO

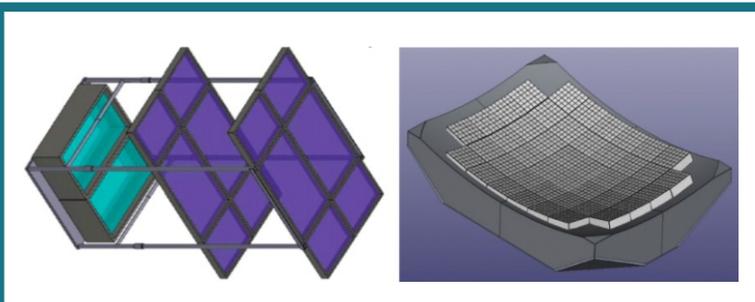


Показатели спектров редких нечетных ядер и обильных четных ядер

Орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий

Линзовый вариант научной аппаратуры

«КЛПВЭ» (K-EUSO) – планируемый космический эксперимент, направленный на исследование космических лучей предельно высоких энергий путем регистрации с околоземной орбиты флуоресцентного черенковского излучения широких атмосферных ливней в ночной атмосфере Земли. Разработана новая конфигурация детектора (см. рис.). Моделирование показало, что годовая экспозиция зависит от пороговой энергии регистрации и для «КЛПВЭ» выходит на плато в районе $\sim 18000 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$ в год при энергиях выше 100 ЭэВ. Эффективность 50% достигается около 40 ЭэВ. Ожидаемая частота событий КЛПВЭ оценивается примерно в 65 событий в год выше 50 ЭэВ. Угловое разрешение прибора детектора лежит в области $3^\circ\text{-}7^\circ$ при малых зенитных углах и улучшается до $1^\circ - 2^\circ$ для квазигоризонтальных событий. Разрешение по энергии варьируется от 20% до 35% при малых зенитных углах и повышается до 5-15% для квазигоризонтальных событий.

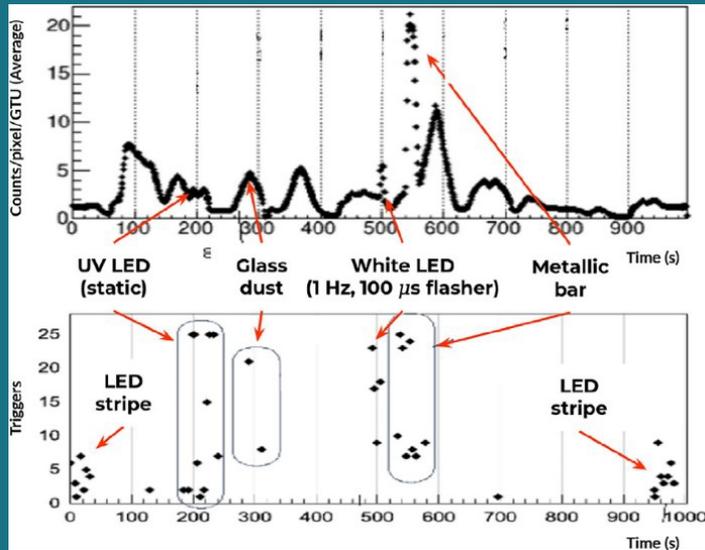


Слева: схема детектора «КЛПВЭ» с сегментированной преломляющей оптикой и прямоугольной апертурой. Справа: 3D-модель фокальной поверхности, построенная из 44 фотодетекторных модулей. Фотоприемник размещен в двух зеленых блоках, показанных на левой панели

Стратосферная обсерватория EUSO-SPB2

Испытания триггерной системы флуоресцентного телескопа

Коллаборацией JEM-EUSO (при участии НИИЯФ МГУ) проведены предполетные испытания триггерной системы флуоресцентного телескопа стратосферного эксперимента EUSO-SPB2 в лаборатории TurLab Туринского университета. EUSO-SPB2 планируется к запуску весной 2023 года, длительность полета составит порядка 100 дней на высоте 33 км в циркумполярном вихре. Флуоресцентный телескоп проекта предназначен для регистрации треков широких атмосферных ливней по флуоресцентному свечению. Показано, что разработанные алгоритмы триггера корректно избегают срабатывания на медленно меняющемся фоне. Только два ложных триггера были обнаружены за 15 минут сбора данных.



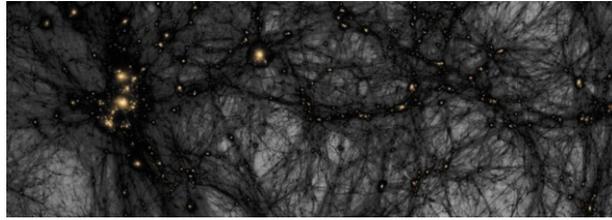
Сверху - кривая свечения, измеренная в ходе эксперимента.
Снизу - срабатывания триггерной системы

Проект СФЕРА-3

Аппроксимация функции пространственного распределения черенковского света широких атмосферных ливней в диапазоне первичных энергий 1 - 100 ПэВ

Определение состава первичных космических лучей в области (10^{12} - 10^{18}) эВ является важным направлением в изучении процессов возникновения и распространения космических лучей. На основе опыта эксплуатации аэростатной установки СФЕРА-2 разрабатывается установка СФЕРА-3 с большей светосилой и лучшим оптическим разрешением. В рамках проекта СФЕРА была разработана аппроксимация функции поперечного распределения черенковского света, описывающая индивидуальные искусственные события ШАЛ от любых ядер с энергиями (10^{12} - 10^{17}) эВ в диапазоне 0-500 м, полученные с помощью кода CORSIKA, с ошибкой не более 6%. Аппроксимация хорошо работает для зенитных углов 0-30°. Хотя работа велась в рамках проекта СФЕРА, значение полученной аппроксимации выходит далеко этого проекта. Не вызывает сомнения возможность ее использования для других уровней наблюдения и для более широкого диапазона энергий вплоть до (10^{12} - 10^{18}) эВ, что обозначает ее реальную универсальность.

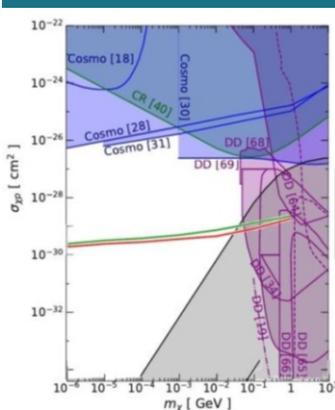
Поиск частиц темной материи



Оценка сигнала от гипотетических частиц темной материи с массой от 1 кэВ до 1 ГэВ, ускоренных при упругом взаимодействии с космическими лучами, в веществе ядерной эмульсии детектора NEWSdm

Эксперимент NEWSdm направлен на обнаружение треков ядер отдачи от взаимодействия частиц темной материи с веществом детектора. В качестве мишени рассматривается ядерная эмульсия нового поколения с размером зерен 40-80 нм, что позволяет визуализировать в эмульсии короткие, порядка 100 нм, треки ядер отдачи и оценивать преимущественное направление потока частиц до взаимодействия с мишенью. Проведено моделирование треков ядер отдачи от упругого взаимодействия частиц темной материи от 1 кэВ до 1 ГэВ, ускоренных при упругом взаимодействии с различными ядрами высокоэнергичными космическими лучами при различных сечениях процесса (10^{-31} – 10^{-28} см²), в детекторе, расположенном на уровне земли и на уровне подземной лаборатории Гран-Сассо (INFN, Италия). В качестве источника сигнала рассмотрен центр Галактики (± 5 градусов).

Получена чувствительность детектора в виде 10 кг эмульсии для регистрации частиц темной материи. Показано, что возможность эмульсионного детектора позволяет реализовать направленные измерения, и годовая экспозиция позволит выделить избыток сигнала от темной материи по направлению на центр Галактики.



Чувствительность 10 кг ядерной эмульсии на уровне земли (красная кривая) и на уровне подземной лаборатории Gran Sasso (зеленая кривая) для регистрации частиц темной материи различных масс. Учитывались треки ядер отдачи водорода, углерода, азота с длинами больше 70 нм

Моделирование взаимодействий нейтрино в детекторе SND@LHC и определение сигнатур для поиска частиц легкой темной материи на нейтринном поле

Эксперимент SND@LHC (Scattering and Neutrino Detector at the LHC) предназначен для исследования взаимодействий нейтрино, генерируемых на LHC, в неисследованной области псевдобыстрот $7.2 < \eta < 8.4$. Установка расположена на расстоянии 480 м по касательной к точке p-p взаимодействия в детекторе ATLAS. Детектор представляет собой гибридную систему из вольфрамовых пластин, чередующихся с эмульсией, электронных трекеров, которые являются в то же время электромагнитным калориметром, и системы идентификации мюонов.

В 2022 году при участии группы НИИЯФ МГУ проведен эксперимент, моделирование сигнала и калибровка мюонной системы (рис.1). Рассмотрен процесс рождения легкой темной материи (LDM) при распаде нейтральных мезонов. В качестве модели LDM выбрана фермионная темная материя, взаимодействующая с веществом Стандартной Модели посредством так называемого «темного» фотона, смешанного с гиперзарядом. Показано, что в поле параметров «псевдобыстрота - энергия» заряженных вторичных частиц события, связанные с взаимодействием LDM и нейтрино, можно разделить (рис.2).

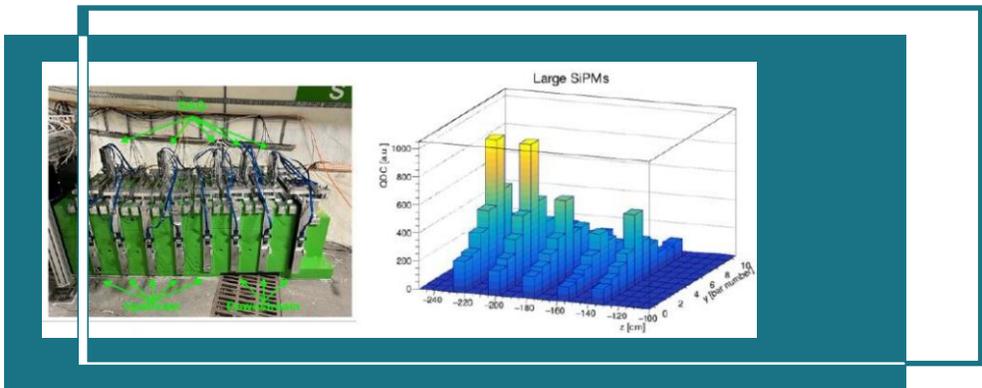


Рис.1. Слева: адронный калориметр и мюонная система SND@LHC. Справа: результат моделирования прохождения мюонов через слои мюонной системы

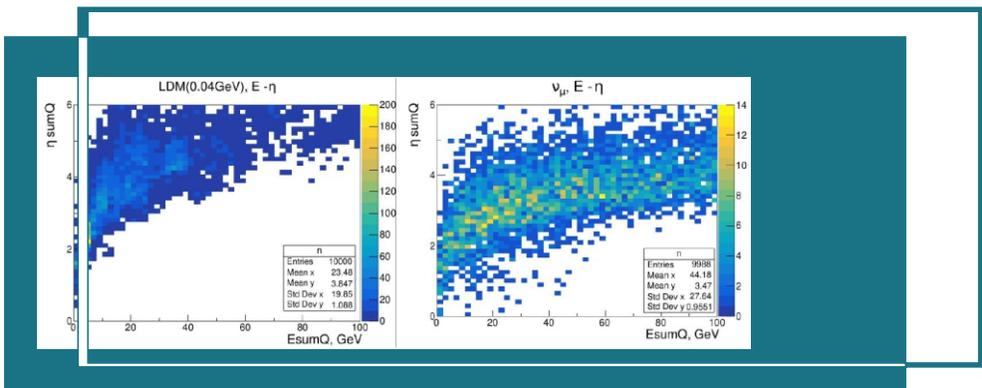
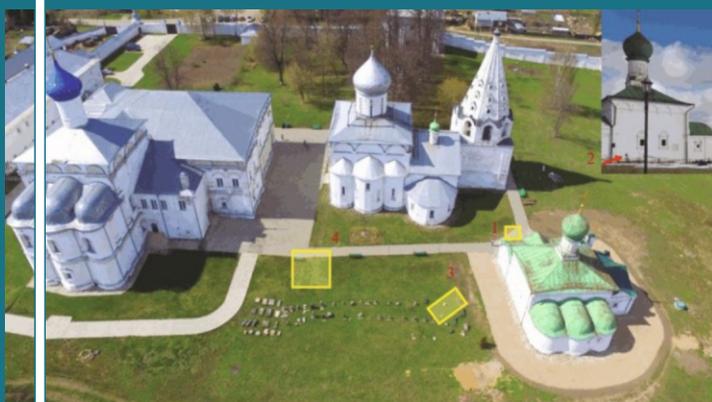


Рис.2. События, связанные с взаимодействием LDM (слева) и нейтрино (справа), в поле кинематических параметров

Мюонная радиография Поиск скрытых объектов на территории Свято-Троицкого Данилова монастыря

В основе метода мюнографии лежит регистрация изменений потоков мюонов космического происхождения при прохождении изучаемого объекта. В качестве экспериментального оборудования использованы ядерные фотоэмульсии. Метод мюонной радиографии на основе эмульсионных трековых детекторов является перспективным методом зондирования крупномасштабных геологических и промышленных объектов. Эмульсионные детекторы обладают рядом неоспоримых преимуществ, к которым относятся высокое пространственное (менее 1 мкм) и угловое (около 1 мср) разрешение, большая информационная емкость, небольшие размеры, удобство транспортировки и простота эксплуатации в сложных условиях. При помощи разработанных авторских методических подходов и прототипов технических решений по реализации метода мюонной радиографии с использованием эмульсионных трековых детекторов исследовано состояние объекта культурного наследия ЮНЕСКО – Свято-Троицкого Данилова монастыря в Переславле-Залесском, обнаружено несколько неизвестных ранее пустот. Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований имеет большое значение с точки зрения дальнейших перспектив внедрения метода мюнографии в России.



Территория монастыря, где желтыми прямоугольниками указаны местоположения ранее неизвестных пустот, обнаруженных методом мюнографии

Космическая физика

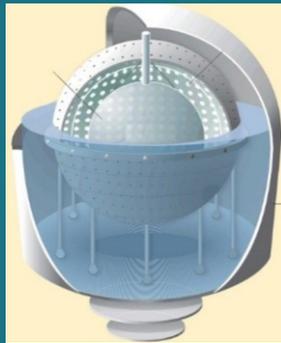
Исследование процессов в недрах Солнца

Особенность звездного CNO-цикла с энергичными частицами

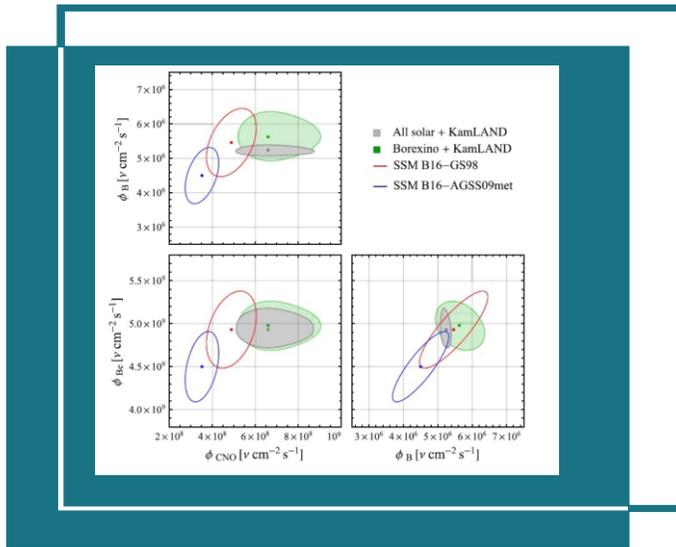
Исследована особенность протекания CNO-цикла в недрах звезд, вызванная мэвными протонами и α -частицами – продуктами различных звездных реакций. Показано, что эти энергичные частицы могут инициировать надтепловые ядерные процессы в центральной области звезды, способные формировать нестандартный ядерный поток $^{14}\text{N} \rightarrow ^{17}\text{O}$ во второй ветви CNO-цикла.

Измерение потока CNO-нейтрино с помощью детектора Borexino и влияние результатов на Стандартную модель Солнца

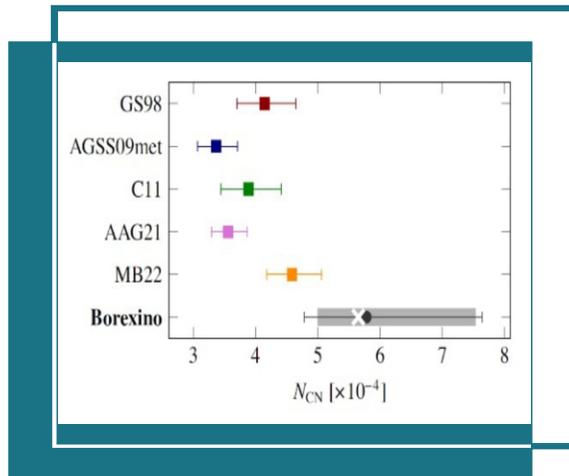
После обработки полного набора данных третьей фазы измерений на детекторе Borexino уточнен поток солнечных нейтрино, возникающих в результате термоядерных реакций CNO-цикла. Зарегистрирована скорость счета нейтринных событий $R_{\text{CNO}} = 6.7^{+2.0}_{-0.8}$ соб/(день $\times 100$ т), которая с учетом осцилляций соответствует потоку CNO-нейтрино $6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Гипотеза отсутствия нейтринного CNO-сигнала исключена с доверительной вероятностью 7σ . Измеренный поток позволил впервые с помощью нейтрино оценить распространенность углерода и азота в Солнце по отношению к распространенности водорода. Отношение равно $N_{\text{CN}} = 5.78^{+1.86}_{-1.00} \times 10^{-4}$ и не согласуется на уровне $\sim 2\sigma$ с результатами спектроскопических фотосферных измерений, указывающих на низкую металличность Солнца. Более того, если использовать вместе потоки ^7Be -, ^8B - и CNO-нейтрино, измеренные на детекторе Borexino, то с доверительной вероятностью 3.1σ можно исключить Стандартную модель Солнца с низкой металличностью версии B16-AGSS09met как альтернативу модели с высокой металличностью версии B16-GS98.



Схематичное изображение
детектора Борексино



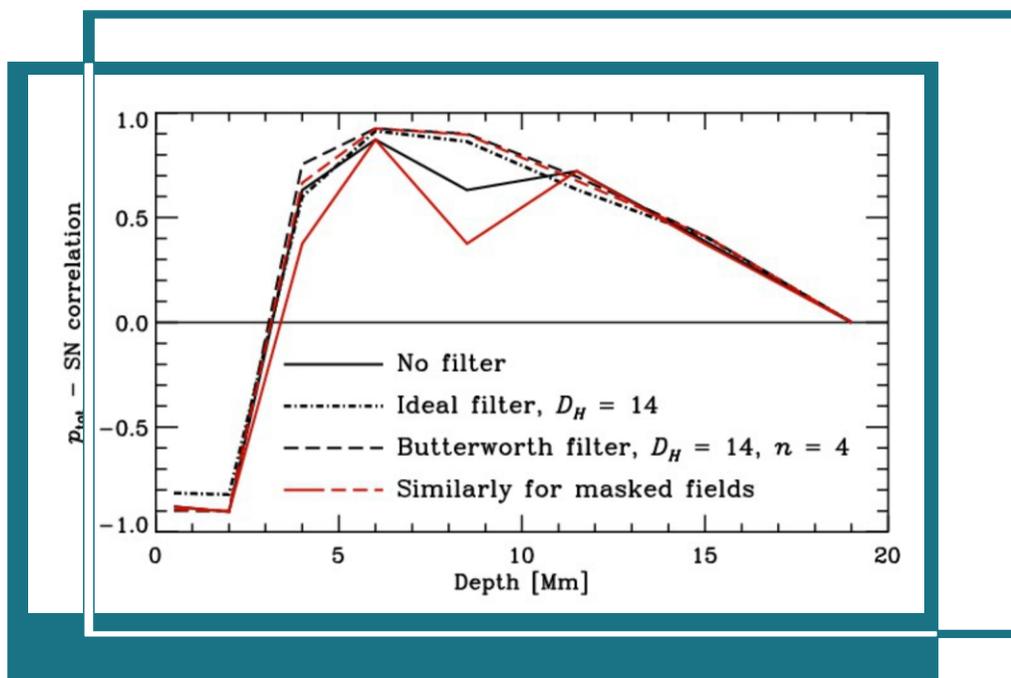
Результаты совместного анализа данных экспериментов по регистрации солнечных нейтрино с учетом ограничений на расщепление масс нейтрино Δm_{12}^2 из эксперимента KamLAND. Показаны 1σ контуры. Результаты измерений сравниваются с предсказаниями Стандартной модели Солнца с низкой металличностью (B16-AGSS09met) и с высокой (B16-GS98)



Сравнение отношений распространенностей углерода с азотом к водороду в солнечной фотосфере из нейтринных измерений на детекторе Borexino и из спектроскопических фотонных измерений. Серая область показывает неопределенность, связанную с точностью измерения скорости счета CNO-нейтрино. Белым крестом отмечен результат повторного анализа данных с применением иной опорной версии Стандартной модели Солнца (замена B16-GS98 на B16-AGSS09met)

Механизмы солнечной подфотосферной конвекции Масштабы и временные вариации мощности течений в конвективной зоне Солнца

Проведены исследования масштабов и временных вариаций мощности течений в конвективной зоне Солнца. Спектральный анализ пространственной структуры солнечной подфотосферной конвекции выполнен по картам подповерхностных скоростей, найденных методами пространственно-временной гелиосейсмологии для глубин d до 19 Мм по данным инструмента HMI/SDO за 2010-2020 гг. Путем анализа пространственных спектров поля дивергенции горизонтальных скоростей исследовались масштабы конвективных течений и вариации их интегральной мощности. Получены свидетельства присутствия гигантских структур. В подповерхностных слоях мощность показывает антикорреляцию с числом солнечных пятен, а на больших глубинах — положительную корреляцию, что может указывать на перераспределение энергии конвективных течений по глубине под действием магнитных полей.



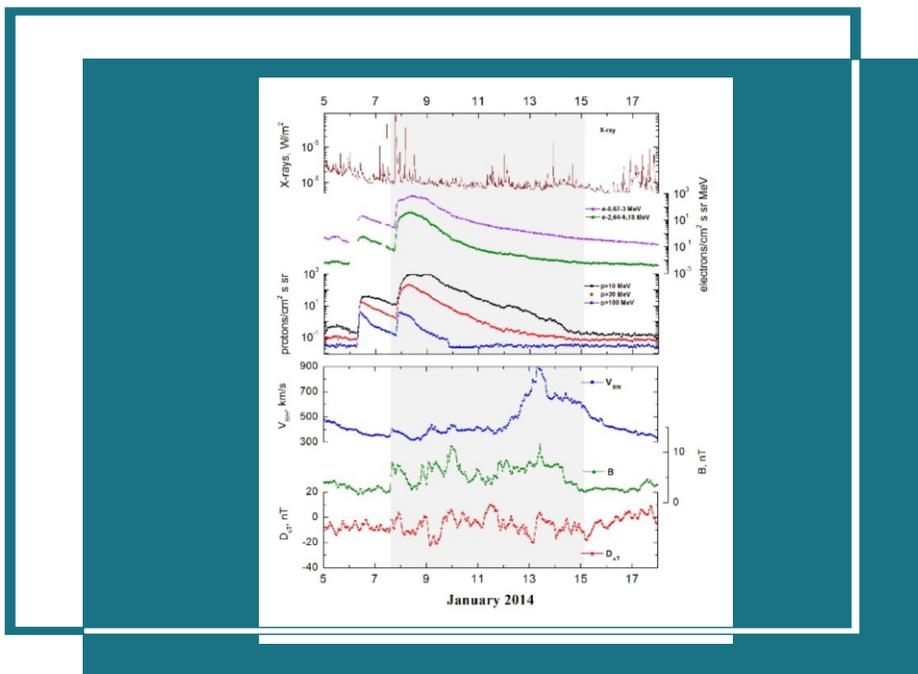
Коэффициент корреляции интегральной мощности течений с числом солнечных пятен как функция глубины

Исследование солнечных протонных событий ***Понижение потоков протонов солнечных космических лучей*** ***в периоды инверсии магнитного поля Солнца*** ***за последние 6 солнечных циклов***

В 19-24 солнечных циклах найдены интервалы времени длительностью 8-12 месяцев, на которые приходится инверсия магнитного поля Солнца и во время которых наблюдается понижение числа и суммарных потоков (флюенсов) протонов в солнечных протонных событиях (СПС). В большинстве рассмотренных циклов указанные периоды наступают после максимума сглаженных чисел Вольфа, или в циклах с 2 «максимумами Гневышева» – во время локальных минимумов.

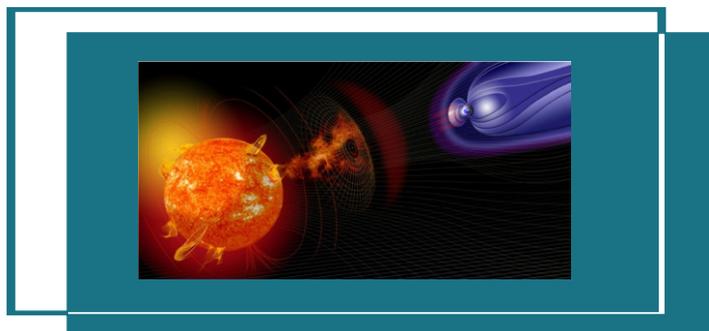
Каталог солнечных протонных событий 24 цикла ***солнечной активности***

Создан каталог солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности (СА), который является продолжением ранее созданных Каталогов за предыдущие циклы с 1955 по 2008 гг. и дополняет однородный ряд данных о СПС. Каталог основан на экспериментальных данных, полученных с максимально возможного количества космических аппаратов (КА), проводивших в 2009 - 2019 гг. регистрацию солнечных протонов в необходимом диапазоне энергий: $1 \div 10^4$ МэВ. На сайте Центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ НИИЯФ МГУ) создана интерактивная форма Каталога.



*Обзорный график из Каталога СПС 24 цикла
СА для СПС 2014.01.07.*

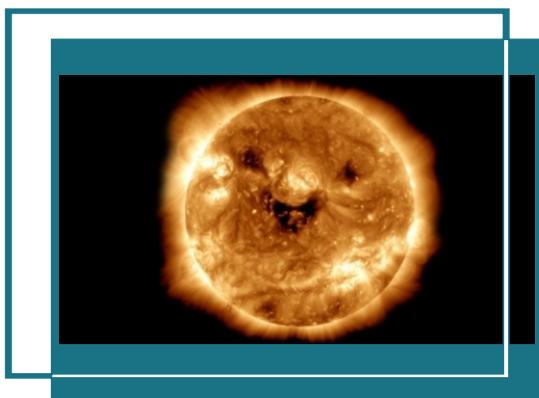
Модели распространения солнечного ветра
Распространение корональных выбросов массы к Земле и прогноз
геоэффективных событий



Разработана операционная модель распространения корональных выбросов массы (КВМ) к орбите Земли с использованием алгоритма DBM, на вход модели подаются наблюдаемые параметры КВМ на расстоянии 20 солнечных радиусов от Солнца и скорость фонового СВ. В качестве скорости фонового ветра была взята прогнозируемая скорость квазистационарных потоков СВ, рассчитываемая по изображениям Солнца на длине 19.3 нм.

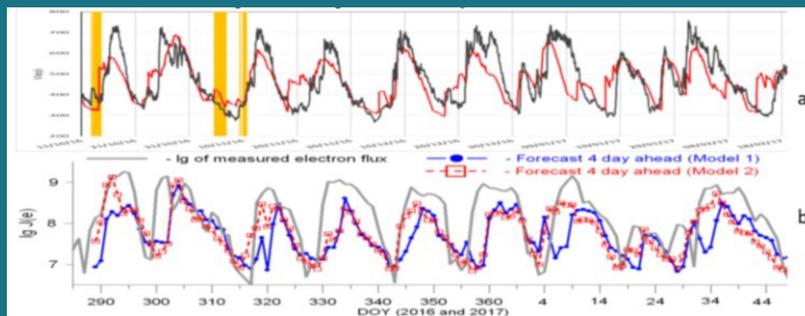
Надтепловые ионы высокоскоростных потоков солнечного ветра
Энергетические спектры надтепловых ионов в потоках частиц
из рекуррентных корональных дыр в 23 цикле солнечной активности

Построены энергетические спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe (0.04 – 2МэВ/нуклон) на 1 а.е. в потоках частиц из приэкваториальных корональных дыр по информации приборов ULEIS, SWICS и SWEPAM, установленных на космическом аппарате ACE. Показано, что надтепловые ионы из корональных дыр являются ионами солнечного ветра, ускоренными на Солнце и/или в межпланетном пространстве и образующими высокоэнергичный “хвост” в энергетическом распределении ионов солнечного ветра.



Прогнозирование потоков релятивистских электронов **Среднесрочный прогноз флюенса релятивистских электронов** **на геостационарной орбите по данным УФ-наблюдений за Солнцем**

Выполнен среднесрочный прогноз флюенса релятивистских электронов на геостационарной орбите с использованием прогноза потоков солнечного ветра на основе наблюдений за Солнцем. Представлены новые подходы к моделированию связи Солнце-солнечный ветер-магнитосфера-радиационные пояса и их реализация в Центре космической погоды МГУ (в Центре Данных Оперативного Космического Мониторинга – ЦДОКМ). Основная идея заключается в использовании данных среднесрочных (3-5 суток) прогнозов скорости квазистационарных потоков солнечного ветра на основе данных, полученных по изображениям Солнца в УФ-диапазоне длин волн, для повышения качества прогнозов магнитосферных факторов. Разработана операционная модель для прогноза суточного флюенса релятивистских электронов (> 2 МэВ) внешнего радиационного пояса Земли, входными параметрами которой является прогноз скорости солнечного ветра.



Временные профили скорости солнечного ветра (а) и суточного флюенса релятивистских электронов с $E > 2$ МэВ внешнего радиационного пояса Земли (б) с 11 октября 2016 г. по 18 февраля 2017 г.

Динамика магнитосферных частиц по данным спутниковых измерений

Динамика ночных границ аврорального овала во время магнитной бури по данным спутника «МЕТЕОР-М2»

Разработан метод определения границ аврорального овала по данным измерений потоков авроральных электронов спутников «Meteor-M2». С использованием метода исследована динамика полярной и экваториальной границ аврорального овала на ночной стороне в период магнитной бури, наблюдавшейся с 27 по 29 мая 2017 г. Установлено, что во время фазы начала бури определяющим фактором был резкий импульс давления солнечного ветра, а в период главной фазы и фазы восстановления бури динамика границ овала лучше всего коррелировала с вариацией Vz-компоненты межпланетного магнитного поля: при увеличении Vz-компонента овал поднимался по широте.

Пульсирующие полярные сияния в ультрафиолетовом диапазоне и высыпания электронов высокой энергии по данным спутников «Ломоносов» и «МЕТЕОР-М2»

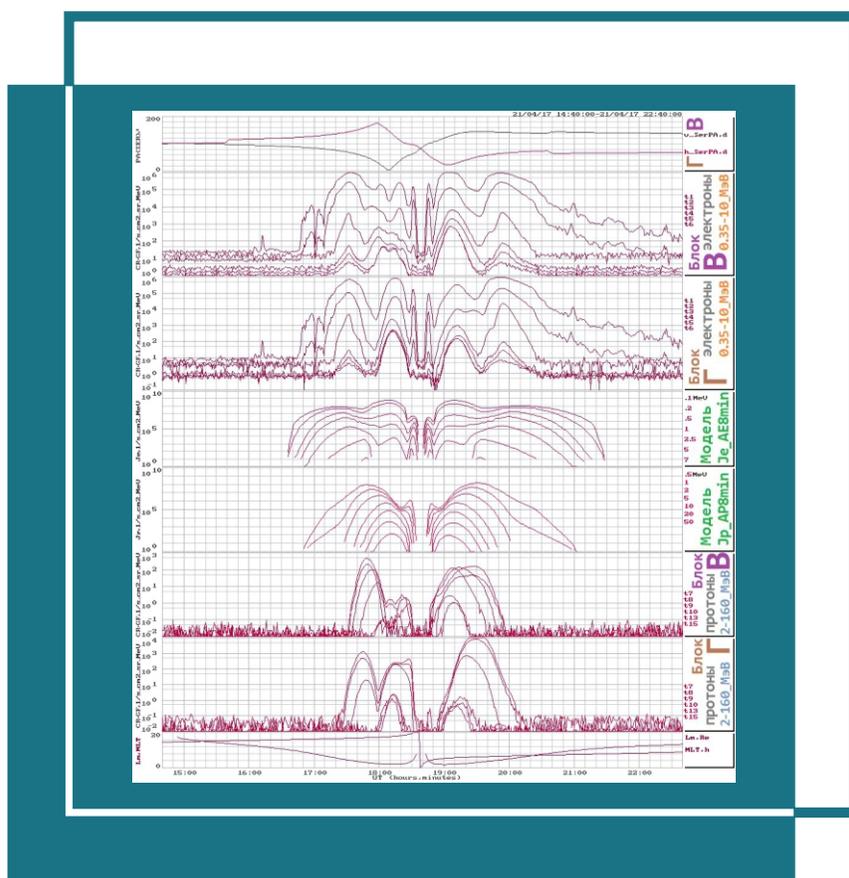
Представлены результаты анализа одновременной регистрации пульсаций ультрафиолетового (УФ) излучения атмосферы Земли телескопом «ТУС» на спутнике «Ломоносов» и потоков заряженных частиц на спутниках «Метеор-М2» и «Ломоносов» с целью определения источников пульсаций УФ-излучения. Показано, что пульсации наблюдаются во время геомагнитной активности, по данным приборов спутников «Метеор-М2» и «Ломоносов» преимущественно в области внешнего радиационного пояса Земли вблизи максимумов потоков электронов с энергиями >100 кэВ и >1 МэВ, соответственно, а также в районе высыпаний потоков электронов с энергией >100 кэВ.



Спутники «Ломоносов» (слева) и «Метеор-М2» (справа)

Мониторинг радиационного состояния околоземного пространства на спутнике «АРКТИКА-М» №1

Оперативный мониторинг радиационных условий на разных орбитах в околоземном космическом пространстве наиболее важный и, пожалуй, единственный инструмент для обеспечения радиационной безопасности космических миссий и создания прогноза космической погоды. Проведен сравнительный анализ распределений потоков энергичных частиц радиационных поясов Земли на орбите «Арктика-М» №1 (рис. 1), а также исследования некоторых особенностей динамики внешнего электронного радиационного пояса в 2021 г. и 2022 г. и солнечного протонного события 28.10.2021 г. по экспериментальным данным с космических аппаратов «Арктика-М» №1, «Метеор-М» №2 и «Электр-Л» №2.



Результаты измерения дифференциального по энергии потока электронов (панели 2, 3) и протонов (панели 6, 7) спектрометром энергичной радиации (СЭР) при пролете радиационных поясов Земли КА «Арктика-М» №1

Магнитосферы планет и экзопланет

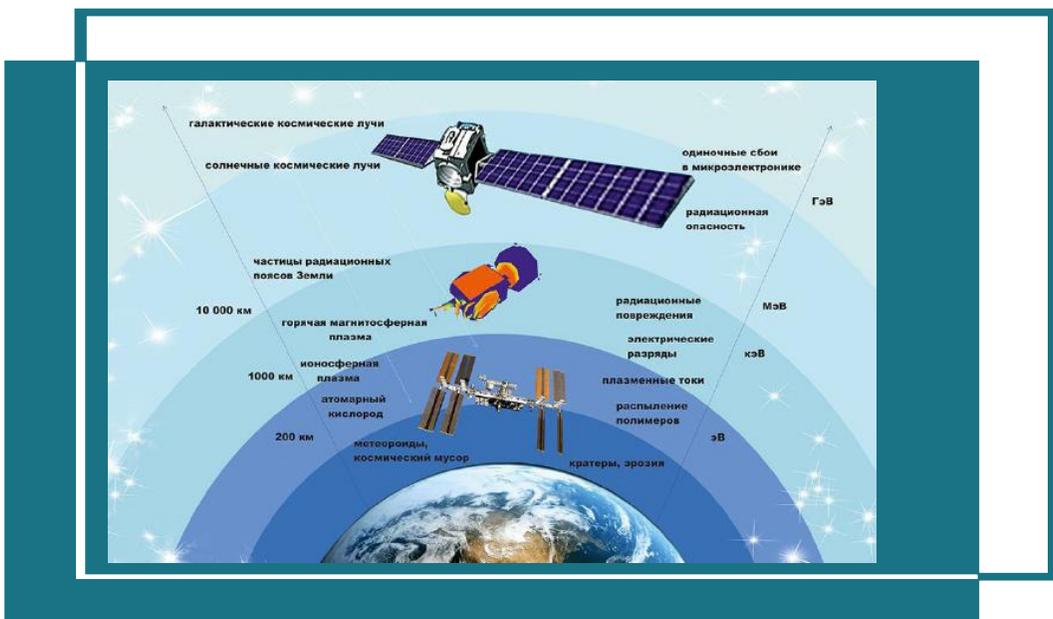
Параболоидная модель магнитосферы экзопланеты земного типа в зоне обитаемости вокруг звезды G-типа

Рассчитана зависимость структуры магнитосферы от направления и величины магнитного поля звездного ветра. Получена зависимость всех параметров параболидной модели от главного параметра: расстояния от центра планеты до лобовой точки магнитопаузы r_{mp} . Особенно чувствительным к этому параметру оказалась величина магнитного поля токовой системы хвоста на внутренней кромке нейтрального слоя, которая, как показано в работе, обратно пропорциональна r_{mp}^3 . Для сильного азимутального и радиального магнитного поля звездного ветра возникает значительная асимметрия между северным и южным полупространствами магнитосферы, увеличивающаяся с ростом r_{mp} .

Космическое материаловедение

Эффекты взаимодействия космических излучений с веществом

- Исследован эффект неаддитивных потерь энергии электронов при прохождении многослойных мишеней.
- Осуществлен синтез полимерных композитов, армированных углеродными нанотрубками, исследована их зарядка под пучком электронов.
- Изучены структура и свойства нанокompозитов на основе полиимидов разной химической структуры и металлоалкоксисилоксанов.
- Исследованы антибликовые покрытия на основе облученных атомарным кислородом полимерных композитов с углеродными нанотрубками.
- Получены результаты облучения потоком кислородной плазмы наноструктурированных покрытий TiAlN, TiAlCN.
- Разработан полуэмпирический подход к объяснению механизма самоизоляции пучков протонов, скользящих вдоль диэлектрической поверхности.



Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты

СОБЫТИЯ 2022 ГОДА

Мультиспутниковая группировка Московского университета. 9 августа 2022 года с космодрома Байконур состоялся успешный запуск ракеты-носителя «Союз-2.1 б»

На орбиту был выведен космический аппарат «Монитор-1», разработанный в лаборатории радиационного мониторинга НИИЯФ МГУ, а также два космических аппарата Сколтеха («Skoltekh-B1» и «Skoltekh-B2»), на которых установлены научные приборы, разработанные в лаборатории космической рентгеновской и гамма-астрономии НИИЯФ МГУ. Научными задачами спутника «Монитор-1» с прибором КОДИЗ является обнаружение в околоземном космическом пространстве радиационно-опасных потоков протонов от солнечных вспышек. Платформа разработана резидентом технологической долины МГУ Воробьевы горы компанией «СПУТНИКС». В составе спутников Сколтеха находится полезная нагрузка – приборы «ДЕКОР-2», предназначенные для мониторинга космической радиации и гамма-всплесков. Работы проходят в рамках проекта «Созвездие-270» и проекта «Space-π» при поддержке Фонда содействия инновациям и междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».



В результате успешного запуска шести космических аппаратов типа кубсат реализована уникальная *мультиспутниковая низкоорбитальная группировка*, позволяющая проводить одновременные измерения потоков энергичных заряженных частиц и гамма-квантов с помощью однотипной аппаратуры в разных точках околоземного пространства. Такие измерения дадут новую информацию о природе вариаций, в том числе кратковременных (с характерными временами менее 1 мс), потоков электронов суб-релятивистских энергий в околоземном пространстве. Помимо прикладных аспектов, связанных с задачей мониторинга космической погоды, такие измерения важны для понимания механизмов ускорения и потерь электронов,



захваченных и квази-захваченных в радиационных поясах Земли.

В качестве дополнительных задач группировки рассматриваются оперативный мониторинг космических объектов техногенного и естественного происхождения, а также изучение электромагнитных транзиентных явлений в верхней атмосфере.

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам



С 27 июня по 1 июля на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с успехом прошла 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, посвященная памяти профессора Михаила Игоревича Панасюка, долгие годы возглавлявшего Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Организаторами конференции выступили Научный совет ОФН РАН по комплексной проблеме «Космические лучи», НИИЯФ и физический факультет МГУ. Председатель программного комитета конференции Л.А. Кузьмичев (НИИЯФ МГУ).

В программу конференции вошли устные и постерные доклады по направлениям: прямые и наземные измерения космических лучей, мюоны и нейтрино, солнечные и галактические космические лучи, геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат.

Всероссийский Фестиваль науки, 7 - 9 октября 2022 года

На тематической площадке «Вселенная» выставочной экспозиции Фестиваля в Фундаментальной библиотеке МГУ сотрудники института рассказали посетителям о прогнозировании космической погоды и представили работу Центра данных оперативного космического мониторинга. Здесь же был представлен молодежный инженерно-образовательный проект «Воздушно-инженерная школа», в котором принимают участие ученые НИИЯФ.

В дни Фестиваля были организованы экскурсии в музей Космоса и Центр прогноза космической погоды НИИЯФ. Посетителям рассказали об истории исследования околоземного космического пространства отечественными учеными, начиная с самых первых экспериментов в космосе и до космических проектов МГУ, реализуемых в настоящее время. В центре прогноза космической погоды гости узнали, что такое космическая погода, как прогнозировать магнитные бури и опасны ли солнечные вспышки, познакомились с основными сервисами прогнозирования и мониторинга состояния космической погоды.

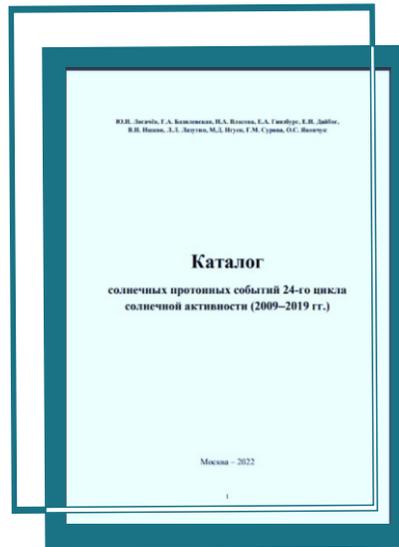


Кандидатская диссертация (физико-математические науки)

Золотарев Иван Анатольевич; диссертация на тему «Определение радиационной нагрузки в космическом аппарате при полете по высокоширотной орбите»; специальность 01.03.03. - Физика Солнца. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 22 июня в диссертационном совете МГУ.01.05.

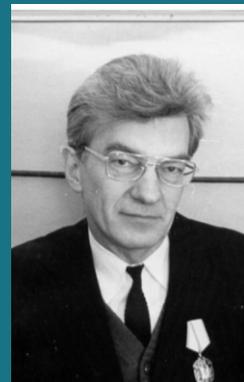
Монография

Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Дайбог Е.И., Ишков В.Н., Лазутин Л.Л., Нгуен М.Д., Сурова Г.М., Яковчук О.С. «Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009-2019 гг.)». Географический центр РАН, Москва, 2022, 970 с.



Научно-популярная статья в сборнике

Власова Н.А. Защитник родной земли, покоритель гелиосферы. Герман Павлович Любимов (1924-2020). «Судьбы творцов российской науки и культуры», т.9, Галлея-Принт, Москва, 2022, с. 107.



Для заметок



Для заметок

