

38-ая Всероссийская конференция
по космическим лучам

ВККЛ-2024

1-5 июля 2024, Москва

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА

ПКЛ-1: Прямые измерения и теория

ПКЛ-2: Наземные измерения и теория

МН: Мюоны и нейтрино

СКЛ: Солнечные космические лучи

МОД: Модуляции галактических КЛ

ГЕО: Геофизические эффекты КЛ

Программный комитет

Л.А. Кузьмичев (НИИЯФ МГУ) — сопредседатель

В.А. Рябов (ФИАН) — сопредседатель

Г.А. Базилевская (ФИАН)

А.М. Быков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

В.Н. Зиракашвили (ИЗМИРАН)

А.С. Лидванский (ИЯИ РАН)

Л.И. Мирошниченко (ИЗМИРАН)

А.Д. Панов (НИИЯФ МГУ)

А.А. Петрухин (НИЯУ МИФИ)

Г.И. Рубцов (ИЯИ РАН)

С.И. Свертилов (НИИЯФ МГУ)

Л.Г. Свешникова (НИИЯФ МГУ)

Ю.В. Стенькин (ИЯИ РАН)

С.А. Стародубцев (ИКФИА СО РАН)

Ю.И. Стожков (ФИАН)

В.Г. Янке (ИЗМИРАН)

И.И. Яшин (НИЯУ МИФИ)

Организационный комитет

М.В. Либанов (ИЯИ РАН) — председатель

Г.И. Рубцов (ИЯИ РАН) — зам. председателя

В.А. Рябов (ФИАН) — зам. председателя

А.С. Лидванский (ИЯИ РАН) —
ответственный секретарь

А.Г. Лавыгина (ФИАН)

Н.Ю. Агафонова (ИЯИ РАН)

С.В. Ингерман (ИЯИ РАН)

В.Ю. Синицина (ФИАН)

Р.И. Еникеев (ИЯИ РАН)

М.А. Абунина (ИЗМИРАН)

Д.А. Кулешов (ИЯИ РАН)

К.О. Куринов (ИЯИ РАН)

И.И. Яшин (НИЯУ МИФИ)

Организаторы: **ИЯИ РАН, ФИАН**

Сайт: <https://events.sinp.msu.ru/event/12/overview>

**Сборник
тезисов**



Место проведения:
Москва, ФИАН,
Ленинский проспект, 53

Оглавление

Обзорные доклады	8
Происхождение космических лучей	9
Баксанская нейтринная обсерватория. Современное состояние и перспективы развития	10
Мюнография крупномасштабных промышленных объектов	11
Широкие атмосферные ливни и атмосферные электрические поля.....	12
Экспериментальный комплекс НЕВОД в 2022 – 2024 гг.	13
Якутская комплексная установка ШАЛ. Статус и перспективы	14
Новые идеи о земном электричестве	15
Астрофизический комплекс TAIGA – статус, результаты и перспектива	16
Новые результаты и перспективы исследований на многофункциональном комплексе Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН	17
Избранные результаты Обсерватории Telescope Array.....	18
Секция ПКЛ1: Прямые измерения и теория (ядра, электроны, гамма)	19
Свойства излучения гамма-всплесков в высокоэнергетическом диапазоне по данным Fermi/LAT, КОРОНАС-Ф/АВС-Ф и ФОТОН/НАТАЛЬЯ-2М	20
Система регистрации высокоэнергичных событий космического Гамма-телескопа	21
Использование аномальных событий в детекторе ТУС для калибровки фотодетектора.....	22
Ускорение космических лучей ударными волнами в Галактическом гало	23
Исследование нетеплового рентгеновского излучения Westerlund 2 по данным SRG/ART-XC и Chandra	24
Орбитальный детектор ОЛВЭ-HERO: Монте-Карло моделирование, разработка и изготовление прототипа	25
Малый флуоресцентный телескоп ШАЛ. Концепция и выбор конструктивных элементов	26
Модель быстрого остывания странных кварковых звезд и ее возможные следствия	27
Калибровка нейтронных мониторов с помощью данных спектрометра AMS-02.....	28
Спектры протонов и ядер гелия от тэватронов по данным спутниковых экспериментов: указание на неклассический характер диффузии космических лучей	29
Жесткость магнитного обрезания космических лучей в Галактике	30
Тест прототипа детектора ОЛВЭ-HERO на SPS в ЦЕРН	31
Экспериментальное изучение потоков галактических космических лучей в области энергий солнечной модуляции	32
Ускорение космических лучей и нетепловое излучение Быстрых Голубых Оптических Транзиентов.....	33

Разработка и изготовление телескопа для исследования корреляций TGF и грозových разрядов	34
Об источниках космических лучей	35
Метод идентификации ТэВных электронов и позитронов в эксперименте СОНЯ	36
Возможность использования аппаратуры ОЛВЭ для регистрации высокоэнергичных ядер дейтерия и трития.....	37
Самосогласованная модель проникновения космических лучей в молекулярные облака	38
Космические лучи о возможном существовании странной кварковой материи	39
Моделирование восходящих ШАЛ.....	40
Параметризация локального межзвездного спектра ядер ГКЛ по данным Voyager 1 и околоземных спутниковых экспериментов.....	41
Секция ПКЛ2: Наземные измерения и теория (ядра, электроны, гамма).....	42
Оценка направления прихода ШАЛ по характеристикам отраженного от снега черенковского света в эксперименте СФЕРА-2 и телескопе СФЕРА-3.....	43
Исследование пространственных неоднородностей космических лучей в синтетическом турбулентном магнитном поле	44
О возможности многофакторной природы аномально слабого поглощения адронов космических лучей сверхвысоких энергий в свинцовых калориметрах	45
Функция пространственного распределения черенковского излучения широких атмосферных ливней и устойчивые законы: быстрый метод моделирования для кода CORSIKA	46
Определение чувствительности установки TAIGA-IACT	47
Регистрация гамма-квантов от Крабовидной туманности телескопами TAIGA-IACT в стерео-режиме по данным 2020-2022 гг.	48
Поиск вариаций частоты регистрации запаздывающих частиц на установке ШАЛ МГУ	49
Анизотропия космических лучей с энергией выше 10^{19} эВ по данным Якутской установки ШАЛ	50
Гигантские атмосферные ливни по данным Якутской установки ШАЛ	51
Установка ПРИЗМА-36 для исследования ШАЛ и вариаций нейтронного фона.....	52
Характеристики ШАЛ, зарегистрированных установкой УРАН.....	53
Анализ данных флуоресцентных телескопов с помощью методов машинного обучения	54
Возможности оценки массы первичного ядра по образу отраженного от снега черенковского света ШАЛ.....	55
Исследование пространственно-временной структуры ШАЛ по данным установки TUNKA-GRANDE	56

Площадки для развертывания полномасштабной гамма-обсерватории TAIGA-100.....	57
Энергетическая калибровка сцинтилляционных установок астрофизического комплекса TAIGA	58
Реконструкция параметров высокоэнергетического события установки «Ковёр-2» ассоциированного с гамма всплеском GRB221009A	59
Оценка первичной энергии ШАЛ телескопом отраженного черенковского света установки СФЕРА-3	60
Определение параметров ШАЛ для установки TAIGA-HiSCORE с помощью нейронных сетей	61
Численная модель транспорта космических лучей в анизотропном магнитном поле	62
Близкий источник космических лучей ультравысоких энергий	63
Новый класс сцинтилляторов для регистрации частиц ШАЛ.....	64
Определение MIP для установки ENDA.....	65
Исследование влияния метеорологических элементов на плотность потока широких атмосферных ливней по данным установки TUNKA-GRANDE.....	66
О некоторых возможностях высокогорного ионизационного калориметра Адрон-55	67
Модель адронизации на основе фрагментации кварк-глюонных релятивистских струн Намбу-Гото с массивными кварками на концах	68
Реконструкция направлений широких атмосферных ливней по данным установки НЕВОД-ШАЛ.....	69
Возможности оценки массы первичного ядра по угловому распределению прямого черенковского света ШАЛ компактным телескопом	70
Поиск избытка гамма-квантов от источника Boomerang в гибридном режим наблюдений в эксперименте TAIGA.....	71
Детектирование сигнала от блазаров Mrk421 и Mrk501 с помощью телескопов установки TAIGA-IACT в моно-режиме наблюдения	72
Три сезона поисков наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения с использованием черенковской установки TAIGA-HiSCORE в 2019-2022 гг.	73
Численное моделирование механизма смены транспорта галактических космических лучей.....	74
Реконструкция массового состава космических лучей по архивным данным эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения	75
Спектр и состав космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE.....	76
Результаты стерео-наблюдений источников HAWC J2019+368 и LHAASO J0341+5258 с помощью установок TAIGA-IACT.....	77
Разработка нового метода реконструкции ШАЛ на установке «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН	78

Перспективы поиска гамма-квантов суб-пэвного диапазона при совместном анализе данных черенковской и сцинтилляционной установок комплекса TAIGA.....	79
Оценка углового разрешения и эффективной площади установки TAIGA-HiSCORE при использовании периферийных станций.....	80
Оценка спектра легкой компоненты космических лучей в области энергий 200 -10000 ТэВ гибридным методом в эксперименте TAIGA.....	81
О форме каскадных кривых широких атмосферных ливней при различных параметрах первичных космических частиц.....	82
Подземные черенковские водные детекторы в гамма-обсерватории TAIGA: моделирование и перспективы.....	83
Разработка считывающей электроники с детекторов на основе кремниевых фотоумножителей.....	84
Ядра железа в космических лучах предельно высоких энергий у Земли.....	85
О возможности гамма-адронной сепарации посредством измерения доли УФ-излучения ШАЛ малоразмерным черенковским телескопом с камерой на SiPM.....	86
NEVOD-НРС – высокопроизводительная аппаратно-программная система для обработки, анализа и хранения данных мультикомпонентных исследований широких атмосферных ливней.....	87
Возможности метода тени Луны для регистрации антипротонов космических лучей высоких энергий.....	88
Оценка направления прихода ШАЛ по прямому черенковскому свету в верхнем телескопе СФЕРА-3.....	89
Разработка проекта СФЕРА для изучения состава ПКЛ в области 1-1000 ПэВ. Статус 2024 года.....	90
Статус установки ENDA-LHAASO.....	91
Характеристики электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ, регистрируемых установками ЭК НЕВОД.....	92
Секция МОД: Модуляции галактических космических лучей.....	93
Анализ событий 2024 года в солнечном ветре и космических лучах с использованием новых программных инструментов.....	94
Мониторинг геоэффективных КВМ в мае 2024 года в потоке солнечного ветра и космических лучей на уровне Земли.....	95
Анализ Форбуш-понижений 2024 года по экспериментальным данным незранированных нейтронных детекторов ЭК НЕВОД.....	96
Моделирование вариаций потоков галактических космических лучей в пакете программ GT.....	97
Характеристики эффекта Форбуша в потоках протонов и ядер гелия по данным АМС-02.....	98

Об интенсивности ГКЛ по данным эксперимента РБМ и солнечных и гелиосферных характеристиках в минимумах и максимумах солнечного цикла.....	99
Интенсивность ГКЛ по данным эксперимента Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей. I. Первое приближение.....	100
Вариации космических лучей во время экстремальных геомагнитных возмущений 9-15 мая 2024	101
Анализ частотных спектров вариаций космических лучей, параметров солнечной активности и межпланетной среды в 19 – 24 циклах солнечной активности.....	102
Гравитационное воздействие планет на солнечную активность и через нее на потоки космических лучей.....	103
Электромагнитный механизм формирования анизотропии интенсивности галактических космических лучей.....	104
Возможность применения потенциала солнечной модуляции для описания 27-дневных вариаций ГКЛ.....	105
Дипольное магнитное поле Солнца и модуляция галактических космических лучей...	106
Исследование жестких спектров Форбуш-эффектов в 25-м цикле солнечной активности	107
Секция ГЕО: Геофизические эффекты КЛ и их влияние на климат	108
Источники фоновых событий в детекторе LVD	109
Измерения спектра фонового гамма-излучения во время возрастания при осадках	110
Возможная связь бидекадных колебаний траекторий циклонов в северной атлантике с магнитным циклом Хейла и вариациями космических лучей	111
Сравнительный анализ влияния техногенных и сейсмических факторов на скорость счета фоновых гамма-квантов в подземных экспериментах LSD и LVD	112
Изучение поведения концентраций ионов при увеличении активности радона в закрытом помещении	113
Оценка магнитосферных и атмосферных параметров в период геомагнитной бури в марте 2023 г. по эффектам в космических лучах	114
Расчет жесткости геомагнитного обрезания с помощью трейсинга на основе метода Бунемана-Бориса.....	115
Аномальные события в данных орбитального детектора ТУС.....	116
Изучение корреляции электромагнитной солнечной активности и параметров распадов изотопов Fe-55 и Co-60.....	117
Метод расчёта анизотропных потоков высокоэнергичных заряженных частиц, захваченных во внутреннем радиационном поясе Земли, в приближении ведущего центра.....	118
Изменения химического состава мезосферы вызванные солнечными протонными событиями.....	119

Метод восстановления границ и толщин облачного покрова в ночное время в районе расположения гамма-обсерватории TAIGA по данным спутниковых наблюдений.....	120
Антипротоны, захваченные во внутреннем радиационном поясе Земли, по данным эксперимента PAMELA.....	121
Мониторинг солнечной активности с помощью сетевой системы.....	122
Долговременные наблюдения вариаций природного потока тепловых нейтронов и продуктов распада радона в атмосфере Приэльбрусья.....	123
Исследование атмосферных процессов методом азимутального сканирования.....	124
Суточная волна приземного электрического поля «хорошей погоды» в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов.....	125
Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей.....	126
Частотно-временной анализ, измеряемых гамма-квантов в детекторе LVD.....	127
Секция МН: Мюоны и нейтрино	128
Восстановление трековых событий по данным отдельной гирлянды черенковского водного детектора.....	129
Интенсивность групп мюонов, зарегистрированных в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР.....	130
Генерация нейтрино высоких энергий в струях от сверхмассивных черных дыр.....	131
Регистрирующая система детектора на дрейфовых камерах для изучения окологоризонтальных групп мюонов.....	132
Модернизированный черенковский водный калориметр НЕВОД-96.....	133
Зенитно-угловая зависимость спектров локальной плотности мюонов ШАЛ вблизи горизонта.....	134
Зарядовый состав мюонов по данным Баксанского подземного скинтилляционного телескопа.....	135
Фон одиночных мюонов на Баксанском подземном скинтилляционном телескопе.....	136
Функции сбора, отклика и связи мюонного годоскопа УРАГАН.....	137
Три механизма генерации мюонов с энергией выше 100 ГэВ в широких атмосферных ливнях в области энергий $10^5 \div 10^7$ ГэВ.....	138
Измерение низкоэнергетической части спектра космических мюонов в диапазоне энергий до 1400 МэВ.....	139
Гибридный мюонный годоскоп для мюонографии крупномасштабных объектов.....	140
Поиск гео-антинейтрино от 40К по данным детектора Борексина.....	141
Регистрация атмосферных мюонов с помощью детектора LVD.....	142
О возможности использования детектора WCDA эксперимента LHAASO в качестве параметра для измерения энергетического спектра атмосферных мюонов.....	143
Применение многопроволочных дрейфовых камер, экранированных слоями поглотителя, для исследования околовертикальных мюонов высоких энергий.....	144

Поиск нейтринных событий на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе в совпадении с гамма-всплесками.....	145
Мобильный мюонный годоскоп для мюнографии различных объектов	146
Секция СКЛ: Солнечные космические лучи.....	147
Жесткое гамма-излучение солнечных вспышек по данным экспериментов ГАММА-1, АВС-Ф/КОРОНАС-Ф, НАТАЛЬЯ-2М/ФОТОН и LAT/Fermi	148
Что регистрирует нейтронный монитор во время ШАЛ?.....	149
Синхронные события множественности на двух нейтронных мониторах	150
Прогноз протонных возрастаний на основе данных о солнечных вспышках и выбросах	151
Солнечные космические лучи и жесткое рентгеновское излучение солнечных вспышек в первой половине 2024 г. по данным экспериментов на спутниках Московского университета формата кубсат	152
Вариации характеристик средней атмосферы северного полушария в ходе солнечных протонных событий января 2005 года	153
Некоторые особенности солнечного протонного события 27.08.2022.....	154
GLE73 (28 октября 2021 г.) – первое событие в 25-м цикле солнечной активности: спектры и анизотропия.....	155
О возможности краткосрочного прогноза солнечных протонных событий по величине флюенса рентгеновского излучения во время солнечной вспышки.....	156
Моделирование взаимодействия протонов солнечных космических лучей с атмосферой Земли во время событий SEP.....	157
Солнечные супервспышки за последние 15 тысяч лет: миф или реальность?	158
Сравнение результатов определения времени начала инжекции солнечных протонов в СПС со скейлингом с результатами их определения по начальным измерениям потоков протонов.....	159
МГД моделирование с целью изучения генерации СКЛ: протяженная поверхность, проходящая через цепочку максимумов плотности тока	160
Энергия первых пришедших протонов и их темп ускорения	161
Регистрация солнечных космических лучей детекторами мюонов в Якутске	162
Обзор исследований субмиллиметрового излучения Солнца и астрофизических источников.....	163
Специальная сессия GLE.....	164
События GLE в потоке мюонов космических лучей.....	165
Регистрация сетью детекторов СЕВАН солнечных событий 25 цикла.....	166

Обзорные доклады

Происхождение космических лучей

Зиракашвили В. (ИЗМИРАН)

Дается краткое состояние проблемы происхождения космических лучей. Основная часть галактических космических лучей с энергиями меньше 10^{14} эВ ускоряется в остатках сверхновых, что подтверждается современными наблюдениями в радио, рентгеновском и гамма диапазонах электромагнитного излучения. Частицы с энергиями больше 10^{18} эВ могут ускоряться во внегалактических объектах - активных галактических ядрах, скоплениях галактик, гамма-всплесках, что следует из малой анизотропии и отсутствии корреляции направлений прихода частиц с плоскостью Галактики. Источником частиц с энергиями 10^{14} - 10^{18} эВ скорее всего являются редкие типы сверхновых, пульсарные туманности или релятивистские выбросы и ударные волны, связанные с активностью сверхмассивной черной дыры в центре Галактики. Космические лучи, вышедшие из источников, взаимодействуют с галактическим магнитным полем, в результате чего их распространение сводится к конвекции и диффузии. Обсуждаются параметры модели распространения частиц, выведенные из имеющихся современных наблюдательных данных по спектрам отдельных элементов.

Баксанская нейтринная обсерватория. Современное состояние и перспективы развития

Петков В. (ИЯИ РАН)

Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) Института ядерных исследований РАН представляет собой уникальный комплекс наземных и подземных установок, созданных для решения фундаментальных задач в различных областях науки: от нейтринной астрофизики до геофизики. Программа научных исследований БНО постоянно изменяется, по мере исчерпания старых и появления новых задач, и ввода в строй новых физических установок.

В докладе приведен обзор современного состояния и обсуждается программа развития Баксанской нейтринной обсерватории. Представлены новые результаты, полученные на действующих установках БНО.

Мюонография крупномасштабных промышленных объектов

Яшин И. (НИЯУ МИФИ), Пасюк Н. (НИЯУ МИФИ)

Методы дистанционного просвечивания различных объектов, основанные на поглощении и рассеянии атмосферных мюонов, под общим названием «мюонография» (по аналогии с рентенографией), используют естественный проникающий поток мюонов, образующихся в результате взаимодействия космических лучей в атмосфере. В последние годы наблюдается резкий рост интереса к развитию методов мюонографии в дистанционном зондировании природных или искусственных структур, таких как вулканы, ледники, археологические объекты и объекты культурного наследия, крупные промышленные объекты и др. Особый интерес к мюонографии был вызван в связи с аварией на АЭС Фукусима-Даичи, когда мюонография оказалась единственной технологией, которая дала возможность оценить распределение ядерного топлива в аварийных реакторах. Важная роль отводится мюонографии в разработке методов контроля за несанкционированным перемещением тяжелых делящихся веществ. В докладе рассматриваются различные аспекты, методы и конкретные примеры мюонографии, в частности, в применении к исследованию структуры ядерных реакторов. Обсуждаются результаты, полученные при мюонографии энергоблока Калининской АЭС в 2022-2023 гг. с помощью гибридного мюонного годоскопа большой площади, разработанного и созданного в НИЯУ МИФИ.

Широкие атмосферные ливни и атмосферные электрические поля

Чилингарян А. (Ереванский физический институт)

Различные ускорители частиц работают в космической плазме, наполняя Галактику высокоэнергетическими частицами (первичными космическими лучами). Достигнув земной атмосферы, эти частицы порождают обширные воздушные ливни (ОВЛ), состоящие из миллионов элементарных частиц (вторичных космических лучей) и покрывающие на земле площадь в несколько км². Во время грозы сильные электрические поля модулируют энергетические спектры вторичных частиц EAS, изменяя размер ливня (количество электронов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) и изменяя расчетную энергию первичной частицы и частоту срабатывания детекторов. Импульсные усиления потоков частиц (так называемые грозовые наземные усиления, TGE) проявляются в виде больших пиков во временных рядах скоростей счета детекторов частиц, расположенных на поверхности Земли. Свободные электроны в изобилии присутствуют на любой высоте в атмосфере, от малых до больших ШАЛ. Эти электроны служат затравкой для ускорителей электронов, которые работают в грозовой атмосфере и посылают лавины частиц в направлении поверхности Земли и в космос (наземные гамма-вспышки, TGF). Ядра EAS, случайно попадающие в массивы детекторов частиц, также генерируют короткие всплески релятивистских частиц. В течение многих лет детекторы частиц, датчики электрических полей и локаторы молний расположенные на Арагаце, собирали информацию о сложном взаимодействии потоков вторичных частиц, электрических полей и вспышек молний. Эта информация крайне важна для создания нового направления физики высоких энергий в атмосфере.

Коррелированные измерения потоков частиц, модулированных сильными атмосферными электрическими полями, регистрация широкополосного радио- и оптического излучения атмосферных разрядов, а также регистрация электрических полей и различных метеорологических параметров позволяют лучше понять сложные процессы взаимодействия частиц и полей в земной атмосфере. Взаимодействие космических лучей и физики атмосферы привело к разработке моделей происхождения всплесков частиц, регистрируемых на поверхности Земли, вертикальных и горизонтальных профилей электрических полей, инициирования вспышек молний и т.д. Междисциплинарная наука об атмосфере требует, прежде всего, круглосуточного мониторинга потоков частиц с помощью синхронизированных сетей идентичных датчиков, регистрирующих и хранящих многомерные данные в базах данных с открытым, быстрым и надежным доступом. Достижения в области многомерных измерений за последнее десятилетие значительно активизировали разработку новых интегрированных моделей атмосферного электричества и ускорения электронов, что позволило лучше понять модуляционные эффекты, возникающие у частиц EAS в сильных атмосферных электрических полях.

Экспериментальный комплекс НЕВОД в 2022 – 2024 гг.

Компаниец К.Г.¹ от коллектива УНУ НЕВОД

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва, KGKompaniyets@mephi.ru*

Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД» является единственной в мире установкой, которая позволяет проводить фундаментальные (физика частиц и астрофизика) и прикладные (мониторинг и прогнозирование состояния околоземного пространства) исследования с использованием природных потоков частиц на поверхности Земли во всем интервале зенитных (от 0° до 180°) и азимутальных (0° – 360°) углов и в рекордно широком диапазоне энергий частиц первичных космических лучей (109-1019 эВ). В докладе представлено текущее состояние дел и планы на будущее. Ведутся работы по изменению конфигурации НЕВОД 91 в НЕВОД 96 с увеличением чувствительного объема в 1.5 раза. Проведена полная модернизация нейтронного детектора ПРИЗМА. Завершена сборка обеих плоскостей установки ТРЕК. Проводится отладка работы дрейфовых камер в бестриггерном режиме. Продолжается непрерывный мониторинг вариаций потока мюонов на годоскопе УРАГАН. Проводится подготовка к измерениям характеристик оптического модуля Baikal-GVD. Обсуждается возможность и необходимые изменения в триггерной системе ЭК НЕВОД для проведения поисковых исследований гамма квантов высоких энергий.

Якутская комплексная установка ШАЛ. Статус и перспективы

Ксенофонтов Л.Т. (ИКФИА СО РАН), Боякинов А.Ф. (ИКФИА СО РАН), Глушков А.В. (ИКФИА СО РАН), Иванов А.А. (ИКФИА СО РАН), Кнуренко С.П. (ИКФИА СО РАН), Красильников А.Д. (ИКФИА СО РАН), Лебедев К.Г. (ИКФИА СО РАН), Матаркин С.В. (ИКФИА СО РАН), Мохначевская В.П. (ИКФИА СО РАН), Муксунов Н.Я. (ИКФИА СО РАН), Петров И.С. (ИКФИА СО РАН), Сабуров А.В., Слепцов И.Е. (ИКФИА СО РАН)

Якутская комплексная установка ШАЛ представляет собой стационарный исследовательский полигон, расположенный в 55 км к югу от г. Якутска (~100 м над уровнем моря). Предназначена для исследования космических лучей сверхвысоких энергий выше 10^{16} эВ. Наблюдения ведутся уже более 50-ти лет. Приведен обзор текущего состояния установки. Представлены текущие результаты по спектру и массовому составу космических лучей в области энергий выше 10^{16} эВ, результаты связанные с «мюонной загадкой». Рассмотрены перспективы регистрации гамма-квантов сверхвысоких энергий и связанной с этим планируемой модернизацией.

Новые идеи о земном электричестве

Безруков Л. (ИЯИ РАН), Агафонова Н. (ИЯИ РАН), Добрынина Е. (ИЯИ РАН), Еникеев Р. (ИЯИ РАН), Ерошенко Ю. (ИЯИ РАН), Ингерман С. (ИЯИ РАН), Казалов В. (ИЯИ РАН), Маргалюк В. (ИНЭОС РАН), Межох А. (ИЯИ РАН), Синёв В. (ИЯИ РАН), Шакирьянова И. (ИЯИ РАН)

Введено понятие «Земное электричество», включающее все земные электрические явления, в частности, и атмосферные. Рассмотрены два процесса, которые важны для понимания явлений Земного электричества. Это – испарение воды, при котором избыток положительного заряда переходит в водный пар, а жидкая фаза становится отрицательно заряженной. Также рассмотрена эстафетная диффузия положительного заряда во влажной газовой среде. Важно, что эстафетная диффузия возможна против гравитационного поля и атмосферного электрического поля. В докладе приводятся, полученные нами, экспериментальные подтверждения существования этих процессов. В качестве основных источников ионизации рассматриваются: диссоциация, космические лучи, радон. В качестве основного процесса переноса положительного заряда на глубинах до 10 км рассматривается процесс дегазации земной коры. Упомянутые процессы позволяют понять все известные явления земного электричества. В докладе рассматриваются с единой точки зрения: процесс поддержания атмосферного электрического поля, унитарная вариация поля хорошей погоды, электродный эффект, заряд грозовой тучи, теллурические токи, увеличение электрического поля атмосферы при землетрясениях.

Астрофизический комплекс TAIGA – статус, результаты и перспектива

Кузьмичев Л.А. (НИИЯФ МГУ)

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) включает ряд установок для проведения исследований в области физики космических лучей и гамма-астрономии. В докладе более подробно представлен статус двух установок комплекса TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT, нацеленных на исследования в области гамма-астрономии и космических лучей с энергией ниже 10^{16} эВ. Будут представлены результаты по исследованию локальных источников гамма-квантов, поиску гамма-квантов ТэВного диапазон от гамма-всплесков и спектру легкой компоненты (протоны и гелий) в диапазоне 200 ТэВ- 10 ПэВ.

Будут рассмотрены планы развития установки, как на ближайшие три года, так и на более дальнюю перспективу.

Новые результаты и перспективы исследований на многофункциональном комплексе Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН

Рябов В. (ФИАН)

В докладе рассмотрено современное состояние исследований на многофункциональном детекторном комплексе Тянь-Шаньской высокогорной научной станции. Представлены результаты по поиску новых явлений в области астрофизики космических лучей, атмосферной физики высоких энергий и геофизики. В области астрофизики космических лучей получены новые результаты в области исследования феноменологических характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ) при энергиях “колена” в спектре космических лучей (0.1-10 ПэВ), построена карта углового распределения направлений прихода ШАЛ и начат поиск возможных астрофизических источников космических лучей, предложена интерпретация аномальных процессов в ШАЛ: глубокопроникающей компоненты, многоствольных ливней, нарушения скейлинга. Рассмотрены стратегия и перспективы использования комплекса детекторов ТШВНС в качестве гамма-астрономической установки. В области атмосферной физики высоких энергий проведена регистрация жестких излучений в грозовых облаках, исследованы различные процессы генерации излучений, сопровождающих молниевые разряды, рассчитаны энергетические спектры гамма-излучения внутри грозовых облаков, зарегистрированные в максимуме интенсивности излучения в событиях TGE. В области геофизики на сейсмологическом комплексе зарегистрированы глобальные возмущения атмосферы и ионосферы, сопровождающие извержение вулкана Хунга Тонга на расстоянии 12000 км от эпицентра вулкана. Изучены ионосферные эффекты от катастрофического землетрясения M7.8 6 февраля 2023 в Турции. Проведен многоканальный мониторинг радиационного фона и поиск сигналов-предвестников сейсмической активности. Проведен анализ акустических сигналов, коррелированных с прохождением ШАЛ и сейсмической активностью.

Избранные результаты Обсерватории Telescope Array

Рубцов Г. (ИЯИ РАН), Кузнецов М. (ИЯИ РАН)

Telescope Array (TA) — крупнейшая в Северном полушарии обсерватория космических лучей. Цель эксперимента - исследование свойств космических лучей в широком диапазоне энергий. TA с его низкоэнергетическим расширением (TALE) наблюдает широкие атмосферные ливни, вызванные космическими лучами с энергией от 2 ПэВ до 200 ЭэВ в гибридном режиме с использованием нескольких инструментов, включая наземную решетку сцинтилляционных детекторов и телескопы для измерения флуоресцентного и черенковского света. Статистика при самых высоких энергиях улучшается благодаря строительству эксперимента TAx4, который увеличит эффективную площадь в четыре раза. В докладе представлены последние результаты TA по анизотропии, химическому составу и энергетическому спектру космических лучей, а также результаты поиска фотонов ультравысоких энергий. Представлены результаты наблюдения события с энергией 244 ЭэВ.

**Секция ПКЛ1:
Прямые измерения и теория (ядра, электроны, гамма)**

Свойства излучения гамма-всплесков в высокоэнергетическом диапазоне по данным Fermi/LAT, КОРОНАС-Ф/АВС-Ф и ФОТОН/НАТАЛЬЯ-2М

Архангельская И.В., Архангельский А.И.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Россия, Москва, IVArkhangelskaya@mephi.ru

Несколько тысяч гамма-всплесков зарегистрировано в настоящее время по данным более 40 спутниковых и наземных экспериментов. Во время некоторых GRBs были зарегистрированы гамма-кванты очень высоких энергий как в космических, так и в наземных экспериментах (до нескольких десятков ГэВ и до нескольких ТэВ соответственно). Например, GRB 190114C зарегистрирован Fermi и MAGIC в очень широком энергетическом диапазоне вплоть до субТэВной области.

В настоящее время зарегистрировано высокоэнергетическое гамма-излучение послесвечения как длинных, так и коротких GRBs, но фотоны в области $E > 0.1 \text{ TeV}$ обычно наблюдаются во время длинных GRBs (к примеру, GRB090926 и GRB090510 соответственно), причем его длительность иногда в десятки раз превышала длительность низкоэнергетического излучения, что позволило говорить о жестких послесвечениях гамма-всплесков.

Большинство источников GRBs имеют космологическое происхождение (например, красные смещения GRB050904 и GRB090429B составляют, соответственно 6.3 и ~ 9.2), соответственно, необходимо рассматривать коррекцию на космологическое растяжение длительности GRBs.

В представленной работе обсуждаются свойства энергетических спектров и временных профилей GRBs по данным приборов Fermi/LAT, КОРОНАС-Ф/АВС-Ф и ФОТОН/НАТАЛЬЯ-2М. Периоды функционирования аппаратуры АВС-Ф на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф и прибора НАТАЛЬЯ-2М на борту ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН были 31.07.2001- 6.12.2005 и 31.01.2009-30.11.2009 соответственно. В каждом из этих экспериментов было зарегистрировано несколько десятков GRBs. В настоящее время функционирует эксперимент FERMI/LAT, начавшийся с 11.06.2008. В нем было зарегистрировано более двухсот GRBs в энергетическом диапазоне $E > 100 \text{ МэВ}$.

Новый параметр R_t вводится как отношение времени прихода фотона с максимальной энергией к длительности всплеска, причем он не требует учета космологического растяжения. Как минимум 2 группы длинных GRBs выделяются при использовании параметра R_t : для 25% событий фотон с максимальной энергией регистрировался в пределах длительности всплеска t_{90} , но для остальных 75% GRBs такие фотоны наблюдались более чем через 10 с после его окончания. Таким образом, результаты предварительного анализа позволяют сделать вывод о неоднородности популяции источников длинных GRBs.

Система регистрации высокоэнергичных событий космического Гамма-телескопа

Архангельский А.И.¹, Архангельская И.В.¹, Коротков М.Г.¹, Паппе Н.Ю.², Сучков С.И.², Юркин Ю.Т.¹, Воронов С.А.¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Россия, Москва, AIArkhangelskij@mephi.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия, Москва, soutch@mail.ru

Система отбора событий является важной составной частью космического гамма-телескопа, обеспечивая регистрацию с высокой вероятностью высокоэнергичного гамма-излучения в условиях значительного превышения уровня фона над полезным сигналом. Для типичных условий наблюдения, поток фоновых частиц, главным образом протонов, электронов и позитронов, превышает поток «полезных» событий на три-четыре порядка. Обсуждаемая система отбора событий перспективного космического гамма-телескопа позволяет с высокой эффективностью регистрировать гамма-излучение, значительно подавляя при этом фоновые события, что выгодно отличает ее от аналогов, реализованных в космических комплексах последних десятилетий. Это достигается применением комплексной методики компенсации эффекта «обратного тока», вызванного воздействием на антисовпадательную систему АС телескопа низкоэнергичных вторичных электронов и позитронов; использованием в качестве фотоприемников сцинтилляционных детекторов гамма-телескопа матриц кремниевых фотоумножителей; применением в качестве регистрирующих элементов конвертера-трекера телескопа сцинтилляционно-волоконных детекторов; выработкой быстрого триггера телескопа при помощи времяпролетной системы, регистрирующей вторичные электроны и позитроны, возникающих при взаимодействии первичных гамма-квантов с веществом конвертера-трекера и т.д. Для проработки и обоснования технических решений по созданию системы, дающих представление о принципах ее работы и потенциальных возможностях был разработан и изготовлен макет системы, включающий следующие прототипы узлов: антисовпадательной системы (два детектора на основе поливинилтолуола ВС-408 размером $1280 \times 100 \times 10$ мм³); времяпролетной системы (два детектора на основе ВС-408 размером $900 \times 100 \times 10$ мм³ и два размером $500 \times 100 \times 10$ мм³, образующих годоскоп), а также калориметра, состоящего из двух детекторов на основе ВС-408 размером $1000 \times 100 \times 10$ мм³ и четырех детекторов на основе кристаллов CsI(Tl) размером $372 \times 36 \times 36$ мм³ и $330 \times 50 \times 20$ мм³. В качестве фотоприемников сцинтилляционных детекторов применены матрицы кремниевых фотоумножителей. Все детекторы вместе с соответствующими электронными узлами размещены на приборной ферме размером $1350 \times 990 \times 380$ мм³, выполненной из конструкционного алюминиевого профиля сечением 45×45 мм². В процессе экспериментальной отработки были проведены калибровочные испытания узлов макета, как в лабораторных условиях, так и на пучке позитронов с энергией 25-300 МэВ синхротрона С-25Р «ПАХРА» Физического института им. П.Н.Лебедева РАН. При энергии позитронов ~300 МэВ для детекторов на основе ВС-408 получено собственное временное разрешение ~200 пс, а энергетическое разрешение ~30%. Для детекторов на основе CsI(Tl) измеренное энергетическое разрешение составило ~10%. В докладе обсуждаются особенности реализации, основные технические характеристики системы, а также результаты, полученные в ходе экспериментальной отработки. В настоящее время ведется подготовка к калибровке макета в целом на пучке позитронов синхротрона С-25Р «ПАХРА».

Использование аномальных событий в детекторе ТУС для калибровки фотодетектора

Блинов А.В.^{1,2}

¹ *Объединённый институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, 141980, РФ*

² *Государственный университет «Дубна», Университетская 19, Дубна, 141980, РФ*

Эксперимент ТУС стал первым детектором, измерившим флуоресцентное и черенковское излучение широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли с космической орбиты. Вместе с тем он зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно. По техническим причинам на первых витках спутника не сработала система регулирования напряжения фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Из-за этого возникла необходимость в калибровке ФЭУ с использованием полученных данных. Предполагается, что причиной аномальных событий являются атмосферные гамма-вспышки (TGF), диффузно отраженные в солнечных панелях спутника. Это дало возможность использования отраженных вспышек для проведения относительной калибровки матрицы фотодетектора, результаты которой приведены в данной работе.

Ускорение космических лучей ударными волнами в Галактическом гало

Зиракашвили В. (ИЗМИРАН), Птускин В. (ИЗМИРАН), Роговая С. (ИЗМИРАН)

Наблюдаемые в гало рентгеновские пузыри eRosita образовались при распространении пары ударных волн от прошлой активности Галактического центра несколько миллионов лет назад. Исследуется ускорение космических лучей этими ударными волнами. Показано, что на этих ударных волнах протоны могли ускоряться до ПэВных энергий и их количество достаточно для объяснения наблюдаемого спектра космических лучей при этих энергиях. Обсуждается также происхождение частиц более высоких энергий, связанных с активностью Галактического центра.

Исследование нетеплового рентгеновского излучения Westerlund 2 по данным SRG/ART-XC и Chandra

Быков А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Уваров Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Каляшова М. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Бадмаев Д. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Лапшов И. (ИКИ), Лутовинов А. (ИКИ)

Скопления молодых массивных звезд являются потенциальными источниками космических лучей высоких энергий. Компактное скопление массивных звезд Westerlund 2 (Wd 2) наблюдалось в высокоэнергичных гамма-лучах, что указывает на возможность ускорения космических лучей с энергиями выше десятков ТэВ в этом скоплении. Детектирование Westerlund 2 телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского на борту обсерватории Спектр Рентген-Гамма позволило выполнить совместный с обсерваторией Chandra спектральный анализ диффузного излучения нескольких областей вблизи ядра Westerlund 2 в области энергий 0.4-20 кэВ.

В докладе обсуждаются результаты анализа данных наблюдений жесткого рентгеновского излучения Wd 2 в контексте поиска излучения нетепловых электронов и позитронов с энергиями выше ТэВ. Показано, что для того, чтобы удовлетворить наблюдательным данным на энергиях порядка нескольких кэВ, необходима либо нетепловая степенная компонента излучения, либо горячая компонента с температурой порядка 5 кэВ. Проведенное магнитогидродинамическое моделирование плазмы вблизи Westerlund 2 предсказывает значительно более низкие температуры электронов, поэтому наличие нетепловой компоненты является предпочтительным. Кинетическая модель ускорения частиц показывает, что нетепловая компонента рентгеновского излучения может объясняться синхротронным излучением электронов и позитронов, рожденных в скоплении.

Работа поддержана грантом РФФ 21-72-20020

Орбитальный детектор ОЛВЭ-HERO: Монте-Карло моделирование, разработка и изготовление прототипа

Караташ Х.^{1,2,3}, Сатышев И.^{1,2}

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, 141980, Российская Федерация

² Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан

³ Государственный университет «Дубна», Университетская 19, Дубна, 141980, Российская Федерация

Обсерватория лучей высоких энергий (ОЛВЭ-HERO) — космический эксперимент на основе вольфрам-сцинтилляционного калориметра с высокой гранулярностью для изучения космических лучей (КЛ). Детектор ОЛВЭ-HERO позволит с высоким энергетическим и зарядовым разрешением измерить состав и спектр ядер КЛ для энергий до 10000ТэВ. Эффективный геометрический фактор установки составит более 12 м²ср для протонов. Планируемое использование борированного сцинтиллятора позволит измерять дополнительный сигнал от замедленных до тепловых энергий нейтронов, который даст возможность улучшить энергетическое разрешение калориметра и, главное, повысит уровень режекции между электромагнитной и адрон-ядерной компонентами КЛ во всем диапазоне энергий. Представлено Монте-Карло моделирование установки, а также ее прототипа для тестов на пучках ускорителей.

Малый флуоресцентный телескоп ШАЛ. Концепция и выбор конструктивных элементов

Климов П. (НИИЯФ МГУ), Зотов М. (НИИЯФ МГУ), Белов А. (НИИЯФ МГУ), Шаракин С. (НИИЯФ МГУ), Чернов Д. (НИИЯФ МГУ), Кондратьев В. (Химический факультет МГУ), Морозов О. (Химический факультет МГУ), Сапрыкин О. (ГЕОХИ РАН)

Регистрация ШАЛ по флуоресцентному излучению по-прежнему остается одним из основных методов исследования космических лучей, поскольку он обеспечивает надежное калориметрическое определение энергии первичной частицы. А измерение кривой свечения ШАЛ дает возможность исследовать продольное развитие ШАЛ и напрямую определять глубину максимума, а следовательно, и тип первичной частицы.

При использовании современных разработок как в области фотосенсоров (кремниевые фотоэлектронные умножители), цифровых электронных схем и ПЛИС (система-на-кристалле), а также компактных и легких оптических элементов (линзы Френеля или композитные зеркала) возможно создание компактного флуоресцентного телескопа, обладающего широким полем зрения и порогом регистрации ШАЛ порядка 10^{18} эВ.

В докладе представлена концепция малого телескопа флуоресценции ШАЛ, проведен анализ и выбор конструктивных элементов, электронных и оптических схем, предварительные оценки пороговой энергии и статистики регистрируемых событий. Прототип такого детектора в настоящее время работает в составе проекта RAIPS на Кольском полуострове. Идет отработка алгоритмов поиска и реконструкции трековых событий, а также планируются его полевые испытания на высокогорной станции Арагац.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-62-00010.

Модель быстрого остывания странных кварковых звезд и ее возможные следствия

Куприянова Е.А. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН), Шаулов С.Б. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

Странные кварковые звезды – звезды, недра которых состоят из странной кварковой материи (СКМ) – вещества, образованного из примерно равного количества u -, d -, s - кварков, свободно распределенных внутри некоторого объема.

Существуют два основных сценария образования таких звезд. Первый предполагает, что странная кварковая звезда может быть последней стадией эволюции нейтронной звезды. Второй говорит о том, что вскоре после Большого взрыва, во время фазового перехода кварк-глюонной плазмы в адроны, образовалась не только ядерная материя, но и некоторые скопления странной кварковой материи.

В работе рассмотрены процессы, приводящие к остыванию горячих странных кварковых звезд до температуры фонового излучения. В рамках простой теоретической модели получены оценки соответствующего времени остывания.

В результате самое быстрое остывание ожидается для странной кварковой звезды с высокой плотностью барионной материи (соответствует большой массе звезды) при условии существования кварковой цветной сверхпроводимости (фаза CFL или *small gaps*) в СКМ в её ядре. Время остывания может быть очень малым и составлять от сотен до тысяч лет. Это позволит звездам, дошедшим до стадии странной кварковой звезды, быстро стать «невидимыми» по сравнению с реликтовым фоном.

Потенциальное существование достаточно большого количества холодных «невидимых на реликтовом фоне» странных кварковых звезд открывает интересные возможности для объяснения по крайней мере части вещества темной материи.

Холодные странные кварковые звезды нашей Галактики также могут быть источником «гипотетических» стабильных квазиядер, состоящих из u -, d -, s - кварков. Присутствие квазиядер в космических лучах может объяснить экспериментально наблюдаемые аномалии, которые не удается описать в рамках ядерной модели состава космических лучей. Например, эффекты уменьшения наклона адронных спектров при первичных энергиях $E_0=3-20$ ПэВ и избыток мюонов в ШАЛ, образованных протонами при тех же энергиях, задетектированные в высокогорном эксперименте АДРОН на Тянь-Шане (685 г/см²).

Квазиядра могут быть испущены в космос в результате столкновения в двойных звездных системах, в состав которых входит кварковая звезда. Экспериментальное определение величины этого потока станет уникальным источником информации о количестве странных звезд в нашей Галактике и их вкладе в темную материю.

Калибровка нейтронных мониторов с помощью данных спектрометра AMS-02

Лагойда И. (НИЯУ МИФИ)

На сегодняшний день основная часть научной аппаратуры предназначенной для регистрации потоков частиц космических лучей расположена на поверхности Земли, и регистрирует потоки частиц образовавшиеся после взаимодействия космических лучей с земной атмосферой. С появлением спектрометрической аппаратуры установленной на космических спутниках, стали возможны прямые измерения потоков космических лучей в широком диапазоне энергий. Однако, данные о прямых измерениях потоков частиц космических лучей не всегда доступны. Более того, спектрометрическая аппаратура в условиях открытого космоса подвержена радиационному износу, что проявляется в значительном ухудшении эффективности регистрации частиц на временных интервалах в несколько лет. В тоже время нейтронные мониторы расположенные на поверхности Земли стабильно ведут измерения интенсивностей космических лучей на протяжении нескольких десятков лет. В работе представлена процедура калибровки нейтронных мониторов, основанная на данных о потоках космических протонов и ядер гелия, зарегистрированных спектрометром AMS-02 в период с 2011 по 2019 г. Изучены возможности ее использования для восстановления дневных значений потоков космических лучей, в том числе во время Форбуш понижений.

Спектры протонов и ядер гелия от тэватронов по данным спутниковых экспериментов: указание на неклассический характер диффузии космических лучей

Лагутин А. (АлГУ), Волков Н. (АлГУ)

Последние результаты спутниковых обсерваторий DAMPE и CALET по спектрам протонов и ядер гелия стимулировали разработку новых подходов для астрофизической интерпретации структуры и механизмов формирования их спектров. Данные DAMPE и CALET подтвердили уполаживание спектров и He в области ТэВ-ных энергий, обнаруженное ранее в экспериментах ATIC2, AMS-02, CREAM, NUCLEON. Установлено наличие изломов в спектрах при энергиях ~ 10 ТэВ и ~ 30 ТэВ, соответственно. Показано, что в точках изломов показатели спектров имеют значения -2.7 для протонов и -2.6 для ядер гелия. Установлен степенной характер поведения спектров обеих компонент до и после точек изломов.

Выявленные особенности спектров являются указанием на необходимость пересмотра основных положений стандартного сценария происхождения, ускорения и распространения КЛ в Галактике, принятого сегодня научным сообществом. В частности, полученные значения показателей наблюдаемого спектра в точках изломов свидетельствуют о мягком спектре генерации частиц в источниках, степенные асимптотики спектров до и после точек изломов являются указанием на неклассический характер диффузии КЛ в Галактике.

В работе в рамках модели неклассической диффузии, созданной авторами, проведены расчеты спектров и He. Показано, что установленные в экспериментах DAMPE и CALET особенности спектров могут быть объяснены учетом вкладов от группы источников-тэватронов, находящихся на расстоянии 150-200 пк от Земли и имеющих возраст лет.

Жесткость магнитного обрезания космических лучей в Галактике

Майоров А. (НИЯУ МИФИ), Юлбарисов Р. (НИЯУ МИФИ)

Сегодня до сих пор остается неясной природа космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ), нет понимания возможных источников, механизмов ускорения космических лучей и их распространения к наблюдателю через межгалактическую среду. Важным аспектом исследований является анализ движения заряженных частиц КЛУВЭ в магнитном поле Галактики, подразумевающий, прежде всего, численные расчеты. Новые работы, посвященные такому анализу, появляются по мере накопления экспериментальных наблюдений магнитного поля Галактики и разработки соответствующих моделей.

Настоящая работа посвящена расчету жесткости магнитного обрезания космических лучей в магнитном поле Галактики. На основе решения уравнения движения проводится расчёт траекторий заряженных космических лучей в Млечном Пути с помощью пакета программ GT. Расчет выполнен в модифицированной модели магнитного поля JF12. Кроме собственно проникновения частиц к плоскости галактического диска из межгалактического пространства, исследуются энергетические границы эффекта (т.н. жёсткость магнитного обрезания) и время пребывания частиц с разными энергиями в галактическом диске. Рассмотрено влияние моделируемых размеров турбулентных неоднородностей на результат.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей» № FSWU2023-006

Тест прототипа детектора ОЛВЭ-HERO на SPS в ЦЕРН

Пан А.^{1,2}

¹ *Объединённый институт ядерных исследований, Жюлио-Кюри 6, Дубна, 141980, Российская Федерация*

² *Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан*

Обсерватория лучей высоких энергий (ОЛВЭ-HERO) — космический эксперимент на основе вольфрам-сцинтилляционного калориметра с высокой гранулярностью для изучения космических лучей (КЛ). Детектор ОЛВЭ-HERO позволит с высоким энергетическим и зарядовым разрешением измерить состав и спектр ядер КЛ в области колоена. Планируется использование борированного сцинтиллятора, что даст возможность повысить уровень режекции между электромагнитной и адрон-ядерной компонентами.

Изготовленный в ОИЯИ прототип детектора с борированным сцинтиллятором испытан на тестовых пучках SPS в ЦЕРН. Представлены результаты испытаний и моделирования прототипа методом Монте-Карло.

Экспериментальное изучение потоков галактических космических лучей в области энергий солнечной модуляции

Подорожный Д.М. (НИИЯФ МГУ), Калегаев В.В. (НИИЯФ МГУ), Карманов Д.Е. (НИИЯФ МГУ), Ковалев И.М. (НИИЯФ МГУ), Курганов А.А. (НИИЯФ МГУ), Панов А.Д. (НИИЯФ МГУ), Подзолко М.В. (НИИЯФ МГУ), Турундаевский А.Н. (НИИЯФ МГУ)

Рассмотрены предложения по новому подходу в создании научной аппаратуры для изучения потоков галактических и солнечных космических лучей в области энергий солнечной модуляции ($30=1000$ МэВ/нуклон). Аппаратура предлагается для размещения на российской космической станции, РОС, (проект «Модуляция»), и при развитии международной научной лунной станции, МНЛС, (проект «Луна - Модуляция»). Проекты предполагают создание банка данных ГКЛ и СКЛ за весь цикл солнечной активности. Такой банк необходим для совершенствования численных моделей потоков энергичных гелиосферных частиц в межпланетном и околоземном пространстве.

Ускорение космических лучей и нетепловое излучение Быстрых Голубых Оптических Транзиентов

Романский В., Быков А., Осипов С. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Быстрые Голубые Оптические Транзиенты (FBOTs) - недавно открытый класс источников [1,2,3,4,5], обладающих высокими светимостями $L > 10^{43}$ эрг/с и наблюдающихся в диапазонах от радио до рентгеновского излучения. Спектры радиоизлучения указывают на умеренно релятивистские скорости течения вещества в этих объектах, что создает благоприятные условия для ускорения космических лучей до высоких энергий. В данной работе мы провели согласованные моделирования ускорения частиц умеренно релятивистскими ударными волнами методами Particle in Cell и Монте-Карло, что позволило получить спектры ускоренных частиц в широком диапазоне энергий. Показано, что подобные системы могут ускорять частицы до энергий выше 10 ПэВ. Так же объяснены наблюдаемые спектры радио [6] и рентгеновского [7] излучения объекта CSS161010 [3], обладающего наибольшей скоростью выброшенной эжекты среди известных FBOTs (> 0.55 с) и поэтому наиболее перспективного с точки зрения ускорения космических лучей. Для объяснения наблюдаемых спектров рассматривалось излучение выброшенной эжекты, без предположения о центральном источнике рентгеновского излучения. Рассмотрены две модели – синхротронное излучение ускоренных высокоэнергичных электронов в квазисферической оболочке остатка, а также модель излучения за счет обратного комптоновского рассеяния электронов при взаимодействии узкого джета с ветром близкой соседней звезды. В обоих моделях получены потоки рентгеновского излучения согласующиеся с наблюдаемыми.

Работа поддержана грантом РФФ 21-72-20020

Список литературы

1. Drout M. R., Chornock R., Soderberg A. M. et al. ApJ.— 2014.— Vol. 794, no. 1.—P. 23.
2. Margutti R., Milisavljevic D., Soderberg A. M. et al. ApJ.— 2014.— Vol. 797, no. 2.— P. 107.
3. Coppejans D. L., Margutti R., Terreran G. et al. ApJ Lett.— 2020.—may.— Vol. 895, no. 1.— P. L23.
4. Ho Anna Y. Q., Perley Daniel A., Kulkarni S. R. et al. ApJ.— 2020.—may.— Vol. 895, no. 1.—P. 49.
5. Bright Joe S., Margutti Raffaella, Matthews David et al. arXiv-prints.— 2021.—oct.— P. arXiv:2110.05514.
6. Bykov A. M., Romansky V. I, Osipov S. M. P Universe. - 2022. Vol. 8, issue 1, P. 32
7. Romansky V. I., Bykov A. M., Osipov S. M. Advances in Space Research – 2024 arXiv:2402.10497

Разработка и изготовление телескопа для исследования корреляций TGF и грозových разрядов

Садовский А.Б. (ОИЯИ)

Орбитальный детектор ТУС измерял флуоресцентное излучение ШАЛ от космических лучей предельно высокой энергии. Вместе с тем он зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно. Анализ уникальных и не похожих на ШАЛ аномальных событий привел к предположению о том, что наблюдаемые события суть атмосферные гамма-всплески, так называемые TGF (Terrestrial Gamma Ray Flashes), возникающие при грозových разрядах молний. В ОИЯИ создается телескоп с фотодетектором на кремниевых умножителях (SiPM) для детального изучения корреляций TGF с грозowymi явлениями в условиях ТШВГС. Будет представлен проект и статус изготовления телескопа

Об источниках космических лучей

Стожков Ю.И.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Космические лучи (далее КЛ) в Галактике могут быть образованы вспышками на активных карликовых звездах. Эти звезды являются основным звездным населением Галактики. Рассматриваются вопросы энергетики КЛ от звездных вспышек и механизм образования избытка позитронов в КЛ.

Метод идентификации ТэВных электронов и позитронов в эксперименте СОНЯ

Стужин А.П.¹, Михайлов В.В.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия, Москва, astuzhin9@gmail.com

²Шаньдунский институт передовых технологий (SDIAT), Китай, Цзинань, vladimir.mikhailov@iat.cn

В рамках исследований потоков электронов и позитронов галактических космических лучей (ГКЛ) высоких энергий (>1 ТэВ) большую важность представляют эксперименты, способные проводить их отдельные измерения. Современные магнитные спектрометры сталкиваются с трудностями при измерениях в данном диапазоне энергий из-за малого потока частиц, поэтому актуальной задачей является создание эффективного прибора на основе других физических методов.

Перспективной представляется методика, предложенная для применения в эксперименте СОНЯ, в которой магнитное поле Земли используется в качестве спектрометра [1]. Эксперимент основан на регистрации синхротронного излучения электронов и позитронов, движущихся по криволинейным траекториям в геомагнитном поле. Прибор представляет комбинацию детектора синхротронных фотонов (SRD), электромагнитного калориметра и триггерных сцинтилляционных детекторов. Такой эксперимент может позволить не только регистрировать электроны и позитроны по их синхротронному излучению, но и определять знак заряда по расположению фотонов относительно трека частицы. Однако одной из трудностей этой конструкции может являться обратный ток электромагнитного калориметра, также регистрируемый в SRD и являющийся важной компонентой фона. Настоящая работа посвящена возможности идентификации электронов и позитронов в эксперименте СОНЯ с учетом обратного тока от электромагнитного калориметра.

Проведено Монте-Карло моделирование траекторий частиц в магнитном поле Земли на основе модели IGRF и прохождения через детектор электронов, позитронов и их синхротронных фотонов с использованием инструментария Geant4. На основании пространственных и энергетических распределений сигналов выработаны критерии отбора событий, подтверждающие возможность разделения электронов и позитронов в диапазоне энергий 1–50 ТэВ в эксперименте СОНЯ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей» № FSWU2023-0068.

[1] A. M. Galper, S. V. Koldashov, V. V. Mikhailov, and O. F. Prilutskii, J. Phys.: Conf. Ser. 798, 012176 (2017).

Возможность использования аппаратуры ОЛВЭ для регистрации высокоэнергичных ядер дейтерия и трития

Турундаевский А. (НИИЯФ МГУ), Карманов Д. (НИИЯФ МГУ), Панов А. (НИИЯФ МГУ), Подорожный Д. (НИИЯФ МГУ), Рахимчанова К. (НИИЯФ МГУ)

Планируемый эксперимент ОЛВЭ должен существенно продвинуть прямые исследования протонов и ядер космических лучей в область высоких энергий. В случае длительного экспонирования – до ~ 10 ПэВ. Энергию частиц планируется измерять с помощью мелкосекционированного ионизационного калориметра, заряд – с помощью кремниевых детекторов. Однако научная задача эксперимента может быть существенно расширена без дополнительных затрат. Потoki дейтронов представляют большой астрофизический интерес. На высоких энергиях также возможно обнаружение ядер трития, образующихся при фрагментации первичных ядер. Поскольку тритий радиоактивен, его спектры могут дать информацию об условиях распространения космических лучей вблизи Солнечной системы. Для разделения изотопов водорода предлагается использовать анализ формы каскадов в калориметре, ранее применявшийся при обработке результатов эксперимента СОКОЛ-2. Было проведено моделирование каскадов, инициированных протонами, дейтронами и тритонами в будущем эксперименте ОЛВЭ. Показана возможность их разделения.

Самосогласованная модель проникновения космических лучей в молекулярные облака

Чернышов Д.О.¹, Ивлев А.В.², Киселев А.М.¹

¹Физический институт им. Лебедева РАН, Россия, Москва, chernyshov@lpi.ru

²Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Германия, Мюнхен, e-mail2@e-mail.ru

Недавние измерения Fermi LAT показали, что гамма-излучение из молекулярных облаков оказывается ниже по амплитуде теоретических значения, полученных в предположении, что спектр космических лучей в молекулярных облаках совпадает со спектром, наблюдаемым в окрестности Земли (Yang et al., 2023). Это различие может быть вызвано нехваткой космических лучей с энергией меньше 10 ГэВ в молекулярном газе.

Мы предполагаем, что указанная выше нехватка космических лучей может быть связана с их взаимодействием с возбужденной ими турбулентностью в оболочках молекулярных облаков (самомодуляцией). В 2018 году мы рассмотрели влияние самомодуляции в оболочке постоянной плотности на гамма-излучение для молекулярных облаков и установили, что значимый эффект может наблюдаться лишь в очень плотных облаках.

В данном исследовании мы рассмотрели оболочку молекулярного облака с переменной плотностью. Для такой модели модуляция космических лучей становится возможной в газе очень малой плотности, и за счет этого заметное уменьшение интенсивности гамма-излучения происходит даже в относительно маленьких облаках с колонковой плотностью около 10^{22} см⁻². При этом модулированный поток космических лучей, проникающий в облако, на релятивистских энергиях не зависит от распределения плотности газа в оболочке. Наши результаты отлично согласуются с измерениями, которые выполнены в работе Yang et al., 2023. Поскольку самомодуляция затрагивает весь спектр космических лучей ниже определенной энергии, данная модель важна как для исследования космических лучей с энергиями ниже 10 ГэВ, так и для оценки вклада космических лучей в ионизацию молекулярного газа.

Космические лучи о возможном существовании странной кварковой материи

Шаулов С. (ФИАН), Жуков В. (ТШВНС ФИАН), Куприянова Е. (ФИАН), Рябов В. (ФИАН), Щепетов Л. (ФИАН)

Открытие Цвейгом и Гелл-Манном кварковой структуры адронов привело к теоретическому предсказанию существования в природе странной кварковой материи (СКМ), состоящей из u, d, s кварков. Расчеты показали, что при барионных числах более $A=103$ частицы СКМ становятся стабильными и в области $A=103-1010$ обладают положительным электрическим зарядом, напоминая ядра. Такие частицы получили название странглеты. Подчеркивая их сходства с обычными ядрами, мы будем использовать для них название квазиядра. В статье формулируется гипотеза, предполагающая, что колено в спектре космических лучей (КЛ) формируется квазиядрами. Приводятся экспериментальные указания на возможность такой гипотезы и некоторые, вытекающие из нее следствия.

Моделирование восходящих ШАЛ

Шолтан Е.^{1, 2, 3}

¹ *Объединённый институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, 141980, Российская Федерация*

² *Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан*

³ *Государственный университет «Дубна», Университетская 19, Дубна, 141980, Российская Федерация*

Эксперимент ТУС является первым орбитальным детектором, предназначенным для измерения черенковского и флуоресцентного излучения широких атмосферных ливней в атмосфере Земли. Детектором ТУС было зарегистрировано события необычной природы. Одной из интерпретаций этих событий являются восходящие ШАЛ, инициированные тау-нейтрино. В ОИЯИ рассматривается проект орбитального эксперимента ИВГШАЛ, предназначенного для исследования восходящих и горизонтальных ШАЛ. В представляемой работе приводится метод параметрического моделирования восходящих ШАЛ.

Параметризация локального межзвездного спектра ядер ГКЛ по данным Voyager 1 и околоземных спутниковых экспериментов

Юлбарисов Р. (НИЯУ МИФИ), Майоров А. (НИЯУ МИФИ)

Галактические космические лучи приходят в Солнечную систему из межзвёздного пространства. Распространяясь в гелиосфере, они взаимодействуют с солнечным ветром и межпланетным магнитным полем, что приводит к изменению их потока. Дифференциальный энергетический спектр космических лучей в околоземном пространстве является решением уравнения переноса ГКЛ, выведенного Паркером в 1958 году [1]. Принимая упрощающие предположения о сферической симметрии задачи и пренебрегая механизмом дрейфа, Глисон и Аксфорд в 1968 году получили связь спектра КЛ около Земли с локальным межзвездным спектром (LIS) [2]. С этого момента научным сообществом прикладываются усилия по восстановлению LIS на основе экспериментальных измерений ГКЛ в космосе.

В текущей работе предлагается параметризация LIS для ядер ГКЛ от H до Fe. В основу анализа положены измерения магнитного спектрометра AMS-02 [3], с 2012 года выполняющего прецизионные измерения космических лучей на борту Международной космической станции, и космического аппарата Voyager 1 [4], вышедшего в 2012 году за пределы гелиосферы и, таким образом, измеряющего низкоэнергетическую часть LIS напрямую. В дополнение к ним в работе использованы данные HEAO3-C2, CALET, DAMPE, CREAM-III, NUCLEON. Вместе они позволяют параметризовать LIS в диапазоне энергий от 1 МэВ/н до 10 ТэВ/н. На основе полученной параметризации восстановлен временной ряд потенциала солнечной модуляции по данным AMS-02 и PAMELA.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FSWU-2023-0068 «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей»

- [1] Parker E. N. The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planetary and Space Science*. – 1965. – Т. 13. – №. 1. – С. 9-49.
- [2] Gleeson L. J., Axford W. I. Solar modulation of galactic cosmic rays // *Astrophysical Journal*, vol. 154, p. 1011. – 1968. – Т. 154. – С. 1011.
- [3] Ali C. L. et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years // *Physics Reports*. – 2020.
- [4] Cummings A. C. et al. Galactic cosmic rays in the local interstellar medium: Voyager 1 observations and model results // *The Astrophysical Journal*. – 2016. – Т. 831. – №. 1. – С. 18.

**Секция ПКЛ2:
Наземные измерения и теория (ядра, электроны, гамма)**

Оценка направления прихода ШАЛ по характеристикам отраженного от снега черенковского света в эксперименте СФЕРА-2 и телескопе СФЕРА-3

Азра К.Ж.¹, Бонвеч Е.А.¹, Галкин В.И.¹, Подгрудков Д.А.¹, Роганова Т.М.¹, Черкесова О.В.¹, Зива М.Д.¹, Иванов В.А.¹, Колодкин Т.А.¹, Овчаренко Н.О.¹, Чернов Д.В.¹, Энтина Е.Л.²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва, clemenceanastasia@gmail.com

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва

Разработан алгоритм восстановления направления прихода широких атмосферных ливней по отраженному от снега черенковскому свету ШАЛ для телескопа СФЕРА-2 и проектируемого телескопа СФЕРА-3, основанный на параболической аппроксимации фронта света. Алгоритм протестирован на банке искусственных событий фотонных сигналов ШАЛ и соответствующих сигналов, прошедших через электронику детектора. Средние ошибки определения направления 1.7° для всех выборок. Результаты для телескопа СФЕРА-3 демонстрируют преимущества новой конструкции детектора. Алгоритм применен для обработки экспериментальных событий, полученных телескопом СФЕРА-2.

Исследование пространственных неоднородностей космических лучей в синтетическом турбулентном магнитном поле

Батраков П. (МГУ, физический факультет), Юровский В., Кудряшов И.

Авторами разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать спектры синхротронного излучения релятивистских частиц в синтетическом магнитном поле, имитирующим турбулентную компоненту галактического. Основная цель исследования заключается в анализе связи спектральной плотности неоднородностей турбулентного магнитного поля и наблюдаемых пространственных неоднородностей синхротронного излучения.

Главные результаты работы заключаются в следующем:

- 1) Математическая модель синхротронного излучения демонстрирует влияние локальных параметров магнитного поля на регистрируемый спектр.
- 2) Была сгенерирована модельная картина неба в синхротронном спектре, содержащая структуры пространственных неоднородностей, которые вызваны неоднородностью магнитного поля.
- 3) Двумерный изотропный Вейвлет анализ модельной картины неба в синхротронном спектре, позволяет выявлять структуры пространственной неоднородности.

О возможности многофакторной природы аномально слабого поглощения адронов космических лучей сверхвысоких энергий в свинцовых калориметрах

Борисов А.С. (ФИАН), Каневская Е.А. (ФИАН), Коган М.Г. (ФИАН), Мухамедшин Р.А. (ИЯИ РАН), Пучков В.С. (ФИАН), Йормамадов Ш. (ФТИ им. С.Умарова НАН, Таджикистан, Душанбе)

В ходе дальнейшей обработки данных двух аналогичных экспериментов с космическими лучами, проведенных в горах Тянь-Шаня и Памира с использованием свинцовых калориметров в виде двухъярусных рентгеноэмульсионных камер (РЭК) с большими воздушными зазорами (2,16 и 2,5 м соответственно), получены уточненные распределения числа пятен почернений, создаваемых электронно-фотонными каскадами (ЭПК) на рентгеновских пленках, в зависимости от глубины наблюдения в камере.

Эти распределения, в целом, хорошо согласуются друг с другом, принимая во внимание небольшие различия в конструкции двух РЭК, различную чувствительность использовавшихся для регистрации пленок, а также разную глубину расположения РЭК в атмосфере Земли (3340 м и 4370 м, соответственно).

С другой стороны, полученные экспериментальные распределения также хорошо воспроизводятся модельными расчетами, выполненными в рамках феноменологической модели сильных взаимодействий FANSIY 1.0, которая учитывает образование очарованных адронов и позволяет варьировать быстроту роста сечения их рождения с энергией столкновения частиц, наблюдаемое в экспериментах на БАК в ЦЕРНе. Компьютерное моделирование экспериментов также включает в себя детальное моделирование отклика РЭК конкретной конструкции.

В частности, учет образования очарованных адронов, которые эффективно распадаются в воздушном зазоре между двумя свинцовыми блоками калориметра по электромагнитным каналам с испусканием электронов и гамма-излучения, позволяет и качественно, и количественно описать экспериментально наблюдаемый пик на кривых поглощения на глубине $t_0 = 9,0$ рад.ед. в нижнем свинцовом блоке РЭК. Амплитуда этого пика, чувствительная к сечению образования очарованных частиц, позволяет заключить, что сечение рождения чарма составляет $\sigma_{pp \rightarrow cc} \sim 8$ мб при $\langle E_{\text{лаб}} \rangle \sim 75$ ТэВ и $x_{\text{лаб}} \approx 0,1$.

Неожиданным результатом обоих экспериментов стал избыток пятен почернения, образованных, по-видимому, какими-то нетрадиционными адронами (возможно, странглетами), на больших глубинах нижних свинцовых блоков (в частности, при $t_0 \sim 29$ рад.ед. и $t_0 = 54$ рад.ед., соответственно). Этот результат нуждается в более тщательном изучении и анализе.

Функция пространственного распределения черенковского излучения широких атмосферных ливней и устойчивые законы: быстрый метод моделирования для кода CORSIKA

Волков Н. (АлГУ), Лагутин А. (АлГУ), Ревякин А. (АлГУ)

В работе предлагается новый подход для аппроксимации функций пространственного распределения (ФПР) черенковского излучения, испускаемого электромагнитной компонентой широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли. Информационной основой исследования является серия вычислительных экспериментов по моделированию ШАЛ с использованием кода CORSIKA. Проведены расчеты ФПР черенковского излучения от ШАЛ инициированных первичными гамма-квантами, протонами и ядрами железа с энергиями 10^4 – 10^9 ГэВ, углами прихода 0° , 15° и 30° и глубиной первого взаимодействия в атмосфере 0, 2.5 и 260 г/см². Для аппроксимации полученных ФПР в работе использовались функции плотностей вероятностей одномерных дробно-устойчивых распределений $\Psi(\alpha, \beta)1(r)$ с параметрами $0 < \alpha < 2$ и $0 < \beta < 1$. Показано, что имеющиеся особенности устойчивых распределений (наличие степенных асимптотик и точки излома) позволяют удовлетворительно описать характерные формы ФПР черенковского света, рассчитанных с использованием кода CORSIKA. Установлена корреляционная связь между параметром точки излома ФПР черенковского излучения RCh и среднеквадратичным радиусом электронной компоненты ШАЛ R_e , полученным в рамках скейлингового подхода к описанию ФПР электронов, предложенного в АлГУ. Полученные в работе результаты позволяют предложить быстрый метод моделирования для кода CORSIKA с использованием процедуры, аналогичной NKG-опции для расчета ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ.

Определение чувствительности установки TAIGA-IACT

Волчугов П.А.^{1,2} от коллаборации TAIGA

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Россия, Москва, pvol4@ya.ru

²Научно-исследовательский институт прикладной физики ИГУ, Россия, Москва

Астрофизический комплекс TAIGA [1] расположенный в Тункинской долине республики Бурятия в настоящее время занимает площадь в 1.1 км² и нацелен на регистрацию гамма-квантов в области энергий свыше 3-4 ТэВ и космических лучей в области выше 200 ТэВ. Комплекс включает в свой состав такие установки как TAIGA-IACT [2], TAIGA-HiSCORE [3], TAIGA-MUON [4], Tunka-Grande [5] и Tunka-133 [6]. Комплекс позволяет решать актуальные задачи физики космических лучей и гамма-астрономии, в частности исследование спектров PWN, SNR и близких блазаров в области очень высоких энергий, изучение массового состава космических лучей, а также поиск высокоэнергичного диффузного гамма излучения.

Установка TAIGA-IACT в настоящее время находится в процессе развертывания - в работу запущено 3 из 5 телескопов. Ожидается, что еще два будут введены в работу в ближайшие 2 года. Каждый телескоп имеет регистрирующую камеру с полем зрения 10x10 градусов, в фокусе которой расположен отражатель диаметром 4.3 м. Расстояние между телескопами в законченной конфигурации установки будет составлять 250 метров.

В данной работе анализируются возможности установки TAIGA-IACT в стереорежиме - когда ШАЛ регистрируется несколькими IACT телескопами одновременно. При таком подходе существенно улучшается точность восстановления параметров ШАЛ и эффективность гамма-адронного разделения, по сравнению с работой одиночного телескопа. Доклад в частности посвящен определению чувствительности и эффективной площади установки TAIGA-IACT состоящей из 5 телескопов и уточняет результаты, полученные в [7].

Литература

1. L. A. Kuzmichev et al. Cosmic ray study at the astrophysical complex taiga: Results and plans // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, no. 6. — P. 966–974.
2. N. B. Lubsandorzhev Camera of the first TAIGA-IACT: construction and calibration, *PoS ICRC2017*. 757
3. O. A. Gress et al. The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning, *Nucl. Instrum. Meth. A* 845 (2017) 367.
4. A. L. Ivanova et al. Design features and data acquisition system of the taiga-muon scintillation array // *Journal of Instrumentation*. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. C06057.
5. R.D. Monkhoev et al. The Tunka-Grande experiment // *Journal of Instrumentation* *6F*, № 6 (2017) 06019.
6. S.F. Berezhnev et al., The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011, *Nucl. Instrum. Meth. A* 692 (2012) 98.
7. P. Volchugov et al., Gamma-hadron separation approach to point-like source observations in the TAIGA-IACT experiment in stereo observation mode // *PoS*. — 2023. — T. ICRC2023. — C. 686.

Регистрация гамма-квантов от Крабовидной туманности телескопами TAIGA-IACT в стерео-режиме по данным 2020-2022 гг.

Волчугов П.А.^{1,2} от коллаборации TAIGA

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Россия, Москва, pv014@ya.ru

²Научно-исследовательский институт прикладной физики ИГУ, Россия, Москва

Астрофизический комплекс TAIGA [1] расположенный в Тункинской долине республики Бурятия в настоящее время занимает площадь в 1.1 км² и нацелен на регистрацию гамма-квантов в области энергий свыше 3-4 ТэВ и космических лучей в области выше 200 ТэВ. Комплекс включает в свой состав такие установки как TAIGA-IACT [2], TAIGA-HiSCORE [3], TAIGA-MUON [4], Tunka-Grande [5] и Tunka-133 [6]. Комплекс позволяет решать актуальные задачи физики космических лучей и гамма-астрономии, в частности исследование спектров PWN, SNR и близких блазаров в области очень высоких энергий, изучение массового состава космических лучей, а также поиск высокоэнергичного диффузного гамма излучения.

Доклад посвящен регистрации гамма-квантов от Крабовидной туманности атмосферными черенковскими телескопами TAIGA-IACT в стерео-режиме в период 2020-2022 гг. В течении анализируемого периода наблюдений установка включала в свой состав 2 телескопа на расстоянии 320 м друг от друга, каждый из которых имеет регистрирующую камеру с полем зрения 10x10 градусов, в фокусе которой расположен отражатель диаметром 4.3 м. Энергетический порог установки в стерео-режиме наблюдений для гамма-квантов составил ~10 ТэВ.

Доклад уточняет и дополняет работу [7], в частности, в нем представлены:

- Методика восстановления параметров ШАЛ, зарегистрированных в стерео-режиме наблюдений;
- Процедура гамма-адронного разделения;
- Эффективная площадь установки из двух телескопов TAIGA-IACT в период 2020-2022 гг.;
- Энергетический спектр Крабовидной туманности, полученный за 160 часов наблюдения.

Литература

1. L. A. Kuzmichev et al. Cosmic ray study at the astrophysical complex taiga: Results and plans // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, no. 6. — P. 966–974.
2. N. B. Lubsandorzhev Camera of the first TAIGA-IACT: construction and calibration, *PoS ICRC2017*. 757
3. O. A. Gress et al. The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning, *Nucl. Instrum. Meth. A* 845 (2017) 367.
4. A. L. Ivanova et al. Design features and data acquisition system of the taiga-muon scintillation array // *Journal of Instrumentation*. — 2020. — Vol. 15, no. 06. — P. C06057.
5. R.D. Monkhoev et al. The Tunka-Grande experiment // *Journal of Instrumentation* *6*, № 6 (2017) 06019.
6. S.F. Berezhnev et al., The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011, *Nucl. Instrum. Meth. A* 692 (2012) 98.
7. P. Volchugov et al., Detection of TeV Emission from the Crab Nebula Using the First Two IACTs in TAIGA in Stereo Mode of Observation // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — T. 86, № 4.

Поиск вариаций частоты регистрации запаздывающих частиц на установке ШАЛ МГУ

Гарипов Г.К.

НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, ggkmsu@yandex.ru

Исследование временных распределений частиц в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) от космических лучей с энергиями более 10^{14} эВ на установке ШАЛ МГУ с помощью осциллографической установки показало, что примерно в 3% ШАЛ на расстояниях менее 200 метров от оси ливня наблюдались сигналы от одиночных запаздывающих частиц. Время запаздывания этих частиц превышало статистические флуктуации времен прихода частиц диска ливня. Было получено, что независимо от расстояния до оси ливня время запаздывания запаздывающих частиц аппроксимируется спадающей экспонентой с показателем -120 ± 10 нс, а амплитуда их сигнала в пластике сцинтилляционного детектора превышает сигнал от одной релятивистской частицы примерно 1.7 раза. При этом наблюдалось, что частота регистрации запаздывающих частиц изменяется во времени при постоянной частоте регистрации ШАЛ.

В настоящей работе обсуждается временные вариации частоты регистрации запаздывающих частиц наблюдавшиеся с 1987 по 1990 год. Показано, что временной профиль частоты регистрации запаздывающих частиц в этот период можно представить в виде вспышки с максимумом в первом квартале 1987 года. Время нарастания этой вспышки не превышает длительность последнего квартала 1986 года. Спад вспышки, наблюдавшийся с 1987 по 1990 год, описывается степенной функцией с показателем $\gamma \approx -0.35$. При этом временной профиль спада вспышки состоит из серии всплесков длительностью примерно 32 дня каждый, тонкая структура которых состоит из 8 спадающих по амплитуде квазипериодических колебаний с периодом длительностью примерно 4 дня.

Анизотропия космических лучей с энергией выше 10^{19} эВ по данным Якутской установки ШАЛ

Глушков А.В. (ИКФИА СО РАН), Ксенофонтов Л.Т. (ИКФИА СО РАН), Лебедев К.Г. (ИКФИА СО РАН), Сабуров А.В.

Рассмотрены направления прихода космических лучей с энергией выше 10^{19} эВ, зарегистрированных на Якутской установке за весь период наблюдений 1974–2024 гг. Показано, что они образуют заметное количество групп из 2–4 событий в кругах с радиусом 3° , число которых заметно превышает их ожидаемую долю в изотропном потоке. У этих событий наблюдается определенная корреляция с крупномасштабной структурой Вселенной.

Гигантские атмосферные ливни по данным Якутской установки ШАЛ

Глушков А. (ИКФИА СО РАН), Лебедев К. (ИКФИА СО РАН), Ксенофонтов Л. (ИКФИА СО РАН), Сабуров А., Иванов О. (ИКФИА СО РАН), Боякинов А. (ИКФИА СО РАН), Иванов А. (ИКФИА СО РАН), Кнуренко С. (ИКФИА СО РАН), Красильников А. (ИКФИА СО РАН), Матаркин С. (ИКФИА СО РАН), Мохначевская В. (ИКФИА СО РАН), Муксунов Н. (ИКФИА СО РАН), Петров П. (ИКФИА СО РАН), Слепцов И. (ИКФИА СО РАН)

Рассмотрены два самых мощных широких атмосферных ливня, зарегистрированных Якутской установкой за весь период наблюдений с 1974 по 2024 гг. Оба ливня упали вблизи центра установки и вызвали срабатывание всех наземных и подземных мюонных детекторов (с порогом $E_{\mu} = 1.0 \cdot \cos(\theta)$ ГэВ). Предварительная оценка энергии этих событий - порядка 10^{20} эВ. В них отмечено аномально высокое содержание мюонов, которое может изменить существующее представление о природе отдельных событий космических лучей в области предельно высоких энергий.

Установка ПРИЗМА-36 для исследования ШАЛ и вариаций нейтронного фона

Громушкин Д. (НИЯУ МИФИ), Волков Е. (НИЯУ МИФИ), Киндин В. (НИЯУ МИФИ), Коновалова А. (НИЯУ МИФИ), Моргунов Е. (НИЯУ МИФИ), Пасюк Н., Почестнев А. (НИЯУ МИФИ), Стенькин Ю. (ИЯИ РАН), Хомчук Е. (НИЯУ МИФИ), Хохлов С. (НИЯУ МИФИ), Шульженко И. (НИЯУ МИФИ)

Установка ПРИЗМА-36 создана на базе установки ПРИЗМА-32, которая находилась в режиме непрерывной экспозиции по исследованию нейтронов ШАЛ с 2012 г. Цель создания новой установки - расширение ее возможностей путем изменения структуры размещения нейтронных детекторов и увеличения их количества, замены фотоэлектронных умножителей с интегрирующими усилителями и оцифровывающей электроники. Применение в установке ФЭУ с большой площадью фотокатода повышает эффективность выделения сигналов, вызванных захватом нейтронов. Новая электроника позволяет внедрить данные установки в мультикомпонентные исследования ШАЛ, проводимые в Экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД (НИЯУ МИФИ). Помимо исследования нейтронов ШАЛ, на установке создан отдельный канал для исследования вариаций нейтронного фона. Установка ПРИЗМА-36 состоит из трех независимых кластеров по 12 электронно-нейтронных детекторов. Детекторы размещены на четвертом этаже здания ЭК НЕВОД. Расстояние между детекторами 3.6 м×5.3 м, а общая площадь установки составляет около 500 м². Приводятся первые результаты регистрации событий ШАЛ, а также измерения нейтронного фона в периоды солнечных вспышек.

Характеристики ШАЛ, зарегистрированных установкой УРАН

Жежера С. (НИЯУ МИФИ), Амельчаков М. (НИЯУ МИФИ), Богданов А. (НИЯУ МИФИ), Громушкин Д. (НИЯУ МИФИ), Коновалова А. (НИЯУ МИФИ), Хомчук Е. (НИЯУ МИФИ), Хохлов С. (НИЯУ МИФИ), Шульженко И. (НИЯУ МИФИ), Южакова Е. (НИЯУ МИФИ)

С целью изучения широких атмосферных ливней в диапазоне энергий 10^{15} - 10^{17} эВ в Экспериментальном комплексе НЕВОД были созданы установки УРАН и НЕВОД-ШАЛ. УРАН состоит из 6 кластеров, каждый из которых включает 12 эн-детекторов, расположенных на крышах двух зданий Экспериментального комплекса и позволяющих регистрировать электронно-фотонную (э) и нейтронную (н) компоненты ШАЛ одновременно. Там же располагаются 3 кластера установки НЕВОД-ШАЛ.

В докладе обсуждается калибровка эн-детекторов УРАН по совместным событиям с установкой НЕВОД-ШАЛ и приводятся основные характеристики ШАЛ: функции пространственного распределения электронно-фотонной и адронной компонент, спектр мощности и параметры восстановленных осей.

Анализ данных флуоресцентных телескопов с помощью методов машинного обучения

Зотов М. (НИИЯФ МГУ), Захаров П. (ВМК МГУ, Сбер)

Флуоресцентные телескопы (ФТ) являются одним из важных инструментов для регистрации свечения широких атмосферных ливней (ШАЛ), порождаемых космическими лучами сверхвысоких энергий. Мы покажем на примере модельных данных двух ФТ, разработанных в международной коллаборации JEM-EUSO, каким образом нейронные сети и другие методы машинного обучения могут быть использованы для распознавания треков ШАЛ, зарегистрированных с помощью таких приборов, а также для реконструкции энергии и направления прихода первичных частиц.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 22-62-00010.

Возможности оценки массы первичного ядра по образу отраженного от снега черенковского света ШАЛ

Иванов В.А.¹, Черкесова О.В., Галкин В.И., Азра К.Ж., Бонвеч Е.А., Зива М.Д., Овчаренко Н.О., Колодкин Т.А., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Чернов Д.В., Энтина Е.Л.²

¹*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва, ovcharenko.no19@physics.msu.ru*

²*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва*

Исследуется возможность определения массы первичного ядра по образу, отраженного от снега, черенковского света ШАЛ на высоте около 1 км над уровнем моря.

Рассмотрен основной вариант нижнего телескопа для проектируемой установки СФЕРА-3. В качестве характеристики, чувствительной к первичной массе, используется форма поперечного распределения черенковского света ШАЛ.

Исследование пространственно-временной структуры ШАЛ по данным установки TUNKA-GRANDE

Иванова А. Л.^{1,2}, Монхоев Р. Д.^{1,2} от коллаборации TAIGA

¹ НГУ, Россия, Новосибирск, annaiv.86@mail.ru

² НИИПФ ИГУ, Россия, Иркутск

Интерес к исследованию широких атмосферных ливней (ШАЛ) со сложной пространственно-временной структурой по данным сцинтилляционной установки Tunka-Grande связан с поиском нестандартных ливней с несколькими фронтами, отстоящими друг от друга на десятки и сотни наносекунд, а также с поиском гипотетических частиц, запаздывающих относительно фронта ШАЛ, либо опережающих его.

В работе представлен анализ событий, в которых были зарегистрированы импульсы с многопиковой структурой и импульсы, расположенные перед или после основного сигнала ШАЛ. Показано, что многопиковые импульсы в детекторах установки отражают пространственно-временную структуру ШАЛ, их форма определяется ростом толщины ливневого диска при увеличении расстояния до оси ШАЛ. Опережающие импульсы можно объяснить одиночными атмосферными мюонами. Предварительный анализ данных показывает, что не все запаздывающие импульсы можно отнести за счет одиночных атмосферных мюонов и после-импульсов ФЭУ. Одиночных мюонов недостаточно, чтобы обеспечить наблюдаемую статистику по запаздывающим импульсам. Попытка объяснения запаздывающих импульсов, в основном, за счет после-импульсов ФЭУ, вступает в противоречие с наблюдаемой зависимостью запаздывающих импульсов в станции от её положения относительно оси ШАЛ.

Площадки для развертывания полномасштабной гамма-обсерватории TAIGA-100

Лопатин М. Н.¹, Иванова А. Л.^{1,2}, для коллаборации TAIGA

¹ ИГУ, Россия, Иркутск, annaiv.86@mail.ru

² НГУ, Россия, Новосибирск

В докладе обсуждаются возможные площадки для развертывания гамма-обсерватории TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади порядка 100 км², которая позволит открыть эру ПэВной гамма-астрономии и внесет вклад в решение многих фундаментальных проблем астрофизики элементарных частиц.

Основные требования к месту создания установки TAIGA-100: астроклимат, в том числе количество безоблачных ночей, влажность и прозрачность атмосферы, уровень фоновой засветки, высота над уровнем моря, рельеф, грунты, наличие пригодной воды, доступная для создания установки площадь, статус землепользования, удаленность от базового научного центра, транспортная доступность, энергообеспечение, наличие оптоволоконной и сотовой связи и т.д.

Высоким потенциалом для астрономических наблюдений обладают степи Южной Сибири в границах Байкальской и Алтае-Саянской горных физико-географических стран. Они характеризуются большой долей безоблачных событий (до 70-75 %), небольшим количеством осадков (менее 300 мм) и высокой степенью прозрачности атмосферы, что подтверждается данными радиометра VIIRS спутниковой платформы Suomi NPP. В пределах этой зоны наиболее перспективными представляются три площадки с разными высотами: окрестности с. Гаханы (500-700 м над уровнем моря), Тажеранская степь (700-800 м над уровнем моря) и Боргойская степь (700 – 1100 м над уровнем моря). Все участки являются инфраструктурно освоенными, по ним проходят улучшенные дороги регионального назначения, линии электропередач (110 кВ для Тажеран и Боргоя, 35 кВ для Гахан). Гаханы располагаются ближе всего к региональному центру г. Иркутск – 100-110 км, до Тажеранских степей 230-240 км от Иркутска. Боргойская степь находится в 200 км от республиканского центра г. Улан-Удэ (660 км от Иркутска, 39 км от железнодорожной станции Джида). Доступная площадь для размещения установки в Гаханах составляет 100 км², в Тажеранах – 200 км², в Боргойской степи – 500 км².

Энергетическая калибровка сцинтилляционных установок астрофизического комплекса TAIGA

Илюшин М.

Иркутский государственный университет

В работе представлены результаты компьютерного моделирования установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon при помощи программного пакета Geant4. Созданные модели детально описывают конструкцию и химический состав элементов станции, учитывают неоднородности светосбора детекторов. В докладе показаны результаты энергетической калибровки сцинтилляционных счетчиков, выполненной путем сравнения их отклика при регистрации вертикальных атмосферных мюонов, полученных экспериментально и при помощи моделирования.

Реконструкция параметров высокоэнергетического события установки «Ковёр-2» ассоциированного с гамма всплеском GRB221009A

Джаппуев Д.Д.¹, Афашоков Ю.З.¹, Джапарова И.М.^{1,2}, Джатдоев Т.А.^{1,2}, Горбачева Е.А.¹, Карпиков И.С.¹, Хаджиев М.М.¹, Клименко Н.Ф.¹, Куджаев А.У.¹, Куреня А.Н.¹, Лидванский А.С.¹, Михайлова О.И.¹, Петков В.Б.¹, Подлесный Е.И.^{1,2}, Позднухов Н.А.^{1,2}, Романенко В.С.¹, Рубцов Г.И.¹, Троицкий С.В.¹, Унатлоков И.Б.¹, Вайман И.А.¹, Васильев Н.А.¹, Янин А.Ф.¹, Журавлева К.В.¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Россия, Москва

²Институт астрономии РАН, Россия, Москва

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва

GRB221009A является самым ярким гамма всплеском. Красное смещение $z=0,1505$. В 14:32:35 UT (4536 с после триггера GBM) установка «Ковёр-2» зафиксировала ливень из того же участка неба. Это событие не привело к срабатыванию мюонного детектора 175 м^2 , но имеет 3 срабатывания в расширенном мюонном детекторе 410 м^2 . Энергия первичной частицы находится в диапазоне 200-250 ТэВ. В данной работе оцениваться вероятность того, что первичная частица является фотон высокой энергии.

Оценка первичной энергии ШАЛ телескопом отраженного черенковского света установки СФЕРА-3

Колодкин Т.А., Галкин В.И., Бонвеч Е.А., Азра К.Ж., Зива М.Д., Иванов В.А., Овчаренко Н.О., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Черкесова О.В., Чернов Д.В., Энтина Е.Л.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва, tka002@mail.ru

Рассмотрен предварительный алгоритм оценки первичной энергии ШАЛ по черенковскому образу в будущем телескопе отраженного света установки СФЕРА-3. Учтены искажения оптической системы телескопа. Оценены ошибки метода для протонов, ядер азота и железа с энергиями 10 и 30 ПэВ.

Определение параметров ШАЛ для установки TAIGA-HiSCORE с помощью нейронных сетей

Крюков А. (НИИЯФ МГУ), Волчугов П. (НИИЯФ МГУ), Гресь Е., Дубенкская Ю. (НИИЯФ МГУ), Журов Д. (ИГУ), Постников Е. (НИИЯФ МГУ)

Одной из основных задач анализа данных по космическим лучам с наземных установок - это определение различных параметров ШАЛ. К ним относятся, в частности, направление ШАЛ и точка его прихода. Значения этих параметров, а также величины сигналов, регистрируемые черенковскими станциями позволяют определить энергию первичных частиц, а следовательно построить спектр космических лучей. В настоящей работе исследуется возможность применения методов машинного обучения для восстановления направления ШАЛ методом глубоких нейронных сетей для анализа с установки TAIGA-HiSCORE. Показано, что сравнительно небольшие по размеру нейронные сети позволяют восстанавливать направление прихода ШАЛ с точностью, сравнимой с традиционными методами.

Численная модель транспорта космических лучей в анизотропном магнитном поле

Кудряшов И.А.¹, Борисов В.Д.²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Россия, Москва, Россия, Москва

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия, Москва

В последнее время возникает ряд актуальных задач, для решения которых необходимо знать концентрации космических лучей в различных точках галактики, в том числе, отличных от положения Земли. Экспериментальные данные указывают на большое число неоднородностей в спектрах космических лучей (КЛ), смену фаз анизотропии, а также на зависимость показателя спектра от галоцентрического радиуса. В то же время результаты численных расчетов свидетельствуют о существенной анизотропии компонентов тензора диффузии. Однако существующие на данный момент модели используют изотропный подход при решении диффузионного уравнения, что может приводить к ошибочным выводам. Таким образом требуется построение модели транспорта КЛ в галактике, корректно описывающей наблюдаемые спектры КЛ. В ходе выполнения работы авторами были решены следующие задачи: Был реализован алгоритм генерации шаблонов разностных схем второго порядка точности для m – мерного дифференциального уравнения с тензорными компонентами. Данный метод применен для решения задачи о диффузионном распространении КЛ. На основании предложенной модели и экспериментальных данных был оценен наклон наблюдаемого спектра в приближении анизотропной диффузии.

В модельном магнитном поле, учитывающем спиральную структуру рукавов и особенности магнитного поля гало, наблюдается немонотонное изменение компонентов тензора диффузии, в зависимости от пространственного положения и энергии распространяющейся частицы. На разных энергиях доминируют различные механизмы переноса заряженных частиц, ориентация постоянного магнитного поля влияет на направление диффузии частиц, т.е. наблюдается анизотропия. В разных частях галактики концентрации частиц одной энергии существенно отличаются. Распространение КЛ носит сложный характер: при низких энергиях доминирует перенос заряженных частиц в плоскости диска галактики, на высоких - существенную роль играет как распределение источников, так и структура магнитного поля. В диапазоне энергий вблизи области смены механизма транспорта наблюдаются выделенные направления переноса КЛ в гало галактики. Показана возможность описания излома в спектре КЛ в области 10 ПэВ (колени КЛ).

Близкий источник космических лучей ультравысоких энергий

Кузнецов М.Ю.

ИЯИ РАН, Россия, Москва, tkuzn@inr.ac.ru

В ноябре 2023 года эксперимент Telescope Array сообщил о наблюдении космического луча с рекордно высокой энергией 244 ЭэВ. Направление прихода этой частицы удается прокоррелировать с распределением локальной внегалактической материи только предположив очень большое отклонение этой частицы в космических магнитных полях. Это указывает на то, что частица с высокой вероятностью является ядром с большим зарядом. При таких энергиях, длина свободного пробега для ядер по отношению к рассеянию на реликтовом излучении мала, что указывает на близость источника этой частицы к нашей Галактике. Используя эти аргументы, мы показываем, что расстояние до ближайшего источника космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) не превышает 5 Мпк, а концентрация таких источников оказывается не меньше чем 0.0001 Мпк^{-3} . Концентрация источников КЛУВЭ излучающих тяжелые ядра ограничена впервые.

Новый класс сцинтилляторов для регистрации частиц ШАЛ

Кулешов Д.А.^{1,2}, Стенькин Ю.В.^{1,2}, Куринов К.О.¹, Малий И.О.^{1,2}

¹ *Институт ядерных исследований РАН, Москва, den_kuleshov481@mail.ru*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

Предлагается использовать в установках по изучению ШАЛ новые недорогие специализированные сцинтилляторы, оптимизированные под разные типы частиц. Основу разработанных в нашей лаборатории сцинтилляторов составляют отечественные люминофоры, погружённые в компаунд – оптически прозрачный силикон, поэтому мы назвали их «силиконовые сцинтилляторы». Одни из первых вариантов таких сцинтилляторов уже успешно применяются в ряде установок для регистрации тепловых нейтронов в ШАЛ. Нами ведётся разработка сцинтилляторов данного типа и для других частиц: быстрых нейтронов, мюонов, электронов и гамма-квантов. В докладе будут представлены предварительные результаты моделирования в программной среде GEANT4 и натурных испытаний различных вариантов силиконовых сцинтилляторов.

Определение MIP для установки ENDA

Куринов К.О.¹, Кулешов Д.А.^{1,2}, Щеголев О.¹, Стенькин Ю.В.^{1,2}, Малий И.О.^{1,2}

¹ *Институт ядерных исследований РАН, Москва, den_kuleshov481@mail.ru*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

В рамках проекта LHAASO (large high altitude air shower observatory) в Китае создается установка ENDA (electron neutron detector array). На территории ИЯИ РАН в Москве создан прототип кластера установки (ENDА-INR) из 16 электронно-нейтронных детекторов для изучения широких атмосферных ливней с энергиями выше 1 ПэВ. Концепция установки состоит в одновременной регистрации электромагнитной и адронной компоненты ШАЛ, с помощью эн-детекторов (разработанных в ИЯИ РАН) на основе неорганического сцинтилляционного компаунда $ZnS(Ag) + B_2O_3$ с необогащенным бором. Из-за малой толщины сцинтиллятора (50 мг/см²) эн-детектор практически нечувствителен к прохождению одиночных заряженных частиц, из-за чего значение мюонного пика, используемое при пересчете от энерговыделения к числу частиц, находится в области фона и лежит ниже порога дискриминатора. Для решения этой задачи, был проведен эксперимент с использованием измерительного стенда и данных с установок ENDA и прототипа ENDA-INR. В докладе представлено описание эксперимента, а также приводится сравнение с данными моделирования из пакета GEANT4.

Исследование влияния метеорологических элементов на плотность потока широких атмосферных ливней по данным установки TUNKA-GRANDE

Малахов С.¹, Ерофеева В.¹, Монхоев Р. Д.^{1,2}

¹ НИИПФ ИГУ, Россия, Иркутск

² НГУ, Россия, Новосибирск

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande входит в состав астрофизического комплекса TAIGA, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал. Установка нацелена на изучение энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей, а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10 - 1000 ПэВ методом регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ. В докладе приведено описание установки Tunka-Grande и представлены результаты исследования влияния атмосферных давления, температуры и напряжённости электрического поля на интенсивность ШАЛ по экспериментальным данным установки.

О некоторых возможностях высокогорного ионизационного калориметра Адрон-55

Мухамедшин Р.А.

ИЯИ РАН, Россия, Москва, rauf_m@mail.ru

Рассматриваются возможности высокогорного ионизационного калориметра Адрон-55 по исследованию эффекта компланарности наиболее энергичных частиц в гамма-адронных семействах (стволах молодых ШАЛ), обнаруженного в рентген-эмульсионных камерах Сотрудничества Памир. Показано, что подобные эффекты могут наблюдаться с помощью Адрон-55 в рамках некоторых моделей взаимодействий адронов при сверхвысоких энергиях.

Модель адронизации на основе фрагментации кварк-глюонных релятивистских струн Намбу-Гото с массивными кварками на концах

Николаенко Р. (НИЯУ МИФИ)

Одной из наиболее актуальных проблем физики адронных взаимодействий сверхвысоких энергий на протяжении пяти десятилетий остаётся описание процесса объединения партонов в стабильные адроны. Существует множество моделей адронизации: модели независимой фрагментации, кластерные и струнные модели.

Однако данные ряда экспериментов указывают на трудности в описании рождения адронов даже самыми современными из них. Наиболее правдоподобным объяснением этого феномена является предположение о необходимости учёта новых эффектов при рождении частиц в адронных взаимодействиях.

Основным препятствием введения в модели новых физических эффектов является сильная ограниченность математического аппарата фрагментации кварк-глюонных струн. Для решения этой проблемы и для исследования влияния новых гипотетических механизмов на рождение адронов разрабатывается новая модель адронизации. В ней используется теория релятивистских струн Намбу-Гото с массивными кварками на концах для описания динамики струны, а фрагментация струн описывается законом площади Артру-Меннесье.

Уникальной особенностью модели является возможность введения закона сохранения полного углового момента. Показывается, что учет начальной протяженности струны может приводить к возникновению запрещенных состояний при фрагментации из-за сохранения углового момента. В работе представлены возможные способы задания начальных условий для кварк-глюонной струны с произвольным количеством глюонов на струне и с массивными кварками на концах.

Модель реализована в программном коде в виде Монте-Карло генератора ATROPOS, использующего в качестве входных данных набор партонных состояний. Программа моделирует фрагментацию кварк-глюонных струн и рождение адронов. В докладе представлены первые результаты моделирования адронизации в электрон-позитронных и протон-протонных столкновениях, обсуждается сравнение расчетов с другими моделями и экспериментальными данными. В заключении обсуждается возможное приложение новой модели для решения проблемы избытка мюонов в широких атмосферных ливнях сверхвысоких энергий.

Реконструкция направлений широких атмосферных ливней по данным установки НЕВОД-ШАЛ

Нугаева К.Р., Амельчаков М.Б., Богданов А.Г.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,
KRNugaeva@mephi.ru

Установка НЕВОД-ШАЛ, входящая в состав Экспериментального комплекса НЕВОД, представляет собой систему распределённых детекторов, но, в отличие от большинства установок для регистрации ШАЛ, они располагаются на разных уровнях: на крышах зданий и на поверхности Земли. Установка предназначена для регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ с энергией 1 – 100 ПэВ и включает в себя 9 независимых кластеров, расположенных на площади около 10^4 м². Каждый кластер состоит из четырёх детектирующих станций (ДС), расположенных в вершинах прямоугольников. В свою очередь, каждая детектирующая станция объединяет 4 сцинтилляционных детектора общей площадью 2.56 м². Каждый кластер является автономным сегментом установки, который регистрирует ШАЛ, обеспечивает отбор событий в соответствии с условиями запуска, оцифровку и передачу данных на центральный пункт системы сбора данных.

Учитывая конструктивные особенности установки НЕВОД-ШАЛ, было предложено два способа восстановления направления прилёта ШАЛ. В одном случае, направление восстанавливается по данным отдельных кластеров. Направление прилёта ШАЛ определяется как среднее взвешенное кластерных направлений, весами являются амплитуды отклика в кластерах. Во втором случае при восстановлении направления участвуют все сработавшие ДС установки. Небольшие размеры установки дают возможность использовать приближение плоского фронта. Оба способа восстановления используют в своих алгоритмах метод наименьших квадратов.

Оценка точности двух способов восстановления направления ШАЛ проводилась с использованием как моделированных данных, так и совместных событий с координатно-трековым детектором ДЕКОР. Моделирование событий проводилось с помощью программного пакета CORSIKA. Полученные оценки точности имеют близкие значения для двух способов восстановления. Поэтому при обработке данных можно использовать оба способа.

Возможности оценки массы первичного ядра по угловому распределению прямого черенковского света ШАЛ компактным телескопом

Овчаренко Н.О.¹, Черкесова О.В., Галкин В.И., Азра К.Ж., Бонвеч Е.А., Зива М.Д., Иванов В.А., Колодкин Т.А., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Чернов Д.В., Энтина Е.Л.²

¹*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва, ovcharenko.no19@physics.msu.ru*

²*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва*

Исследуется возможность определения массы первичного ядра по угловому распределению черенковского света ШАЛ на высоте около 1 км над уровнем моря.

Рассмотрен также простейший вариант детектора углового распределения прямого черенковского света для проектируемой установки СФЕРА-3. В качестве характеристики, чувствительной к первичной массе, в обоих случаях используется длина углового распределения или его образа. Чувствительности к массе сравниваются с чувствительностью нижнего телескопа, регистрирующего отраженный от снега черенковский свет.

Поиск избытка гамма-квантов от источника Boomerang в гибридном режим наблюдений в эксперименте TAIGA

Окунова Э. (НИИЯФ МГУ) для коллаборации TAIGA

Астрофизический комплекс TAIGA [1, 2] расположен в Тункинской долине на расстоянии 50 км от озера Байкал и в настоящее время занимает площадь 1.1 км². Эта уникальная комплексная система наземных детекторов предназначена для регистрации ШАЛ, генерируемых гамма-квантами высоких энергий и частицами космических лучей. Комплекс TAIGA включает в себя 120 широкоугольных черенковских детекторов установки TAIGA-HiSCORE, несколько атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) установки TAIGA-IACT и другие установки [3-6].

Уникальность астрофизического комплекса TAIGA состоит в использовании гибридного режима – когда ШАЛ регистрируется совместно детекторами HiSCORE и АЧТ. Гибридный режим нацелен на регистрацию КЛ и гамма-квантов с энергиями от 40 ТэВ. Зная информацию о направлении прихода ШАЛ и энергию первичной частицы, полученную с помощью анализа данных установки TAIGA-HiSCORE, для определения типа первичной частицы достаточно зарегистрировать ливень в моно-режиме, то есть одним из АЧТ. Данный подход позволяет получить сравнительно высокую эффективную площадь в энергетической области выше 100 ТэВ, при этом обеспечивая достаточную режекцию адронного фона, необходимую для выделения сигнала от гамма-квантов.

В докладе представлен анализ Монте-Карло моделирования высокоэнергичных гамма-квантов и протонов и сравнение его с экспериментальными данными наблюдения протяженного источника Boomerang в гибридном режиме. Также приводятся результаты обработки вышеуказанных экспериментальных данных за период 2022-2023 г.

Детектирование сигнала от блазаров Mrk421 и Mrk501 с помощью телескопов установки TAIGA-IACT в моно-режиме наблюдения

Окунова Э. (НИИЯФ МГУ), Волчугов П. (НИИЯФ МГУ) для коллаборации TAIGA

Астрофизический комплекс TAIGA [1] расположен в Тункинской долине в республике Бурятия, и предназначен для регистрации ШАЛ с энергиями выше 3-4 ТэВ. В настоящее время TAIGA включает в свой состав установки: TAIGA-IACT – массив из 5 (в настоящее время запущенно в работу 3) атмосферных черенковских телескопов (АЧТ), и TAIGA-HiSCORE – массив из 120 широкоугольных черенковских детекторов на площади 1.1 км² [2-5].

Каждый телескоп установки TAIGA-IACT имеет альт-азимутальное крепление, отражатель диаметром 4.3 м и регистрирующую камеру в фокусе с полем зрения 10x10 градусов, что позволяет регистрировать ливни на расстоянии до 600м. При детектировании ШАЛ одним телескопом TAIGA-IACT (моно-режим), энергетический порог составляет 3 - 4 ТэВ. Такой подход, в частности, позволяет детектировать весьма удаленные источники, такие как блазары Mrk421 и Mrk501.

В данной работе приводятся результаты обработки наблюдений блазаров Mrk421 и Mrk501 в моноскопическом режиме. Представлена процедура гамма-адронного разделения посредством методов классического машинного обучения. Получены избытки гамма-квантов от блазаров и их энергетические спектры. Рассчитана статистическая значимость наблюдаемого сигнала.

Три сезона поисков наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения с использованием черенковской установки TAIGA-HiSCORE в 2019-2022 гг.

Панов А. для коллаборации TAIGA

Наземная черенковская установка TAIGA-HiSCORE, предназначенная для исследований в области физики космических лучей и гамма-астрономии сверхвысоких энергий с помощью широких атмосферных ливней, может быть адаптирована также для поиска наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения. Первый сезон поисков оптических транзиентов с установкой HiSCORE имел место с осени 2018 г. по весну 2019 г. Данные первого сезона обработаны и опубликованы. В настоящей работе все методики, имеющие отношение к поиску оптических транзиентов, были существенно переработаны и улучшены, что позволило свести фоны ШАЛ при поиске оптических транзиентов практически к нулю и позволило также получить новые важные методические результаты. Так, в прямых измерениях сигнала спутника CALIPSO было показано, что точность измерения направления на источник составляет сотые доли градуса. Кандидаты в оптические транзиенты не обнаружены, установлены новые верхние пределы на поток соответствующих событий.

Численное моделирование механизма смены транспорта галактических космических лучей

Перягинская А., Кудряшов И. (НИИЯФ МГУ)

В современных работах существует две основных гипотезы о возникновении анизотропии космических лучей. В первой гипотезе анизотропия объясняется влиянием близких источников, таких как пульсары или остатки сверхновых. Вторая гипотеза - это влияние местного магнитного межзвездного поля, которое может отклонять частицы так, что диффузия космических лучей становится анизотропной. Анализ распространения частиц, используемый в работах, является усреднением транспорта по пространству, то есть описанием его глобальных свойств. Однако при таком макроскопическом подходе не учитываются локальные особенности поля в точке наблюдения.

Для того, чтобы учесть влияние особенностей магнитного поля в данной работе используется микроскопический подход. Он заключается в определении зоны перехода одномерной диффузии вдоль магнитной линии в классическую анизотропную диффузию. В этой части пространства рассматривается взаимный транспорт магнитных линий и частиц с энергиями, при которых происходит смена фаз анизотропии.

На изучаемых масштабах наблюдаются области корреляции магнитных линий, называемые магнитными трубками. В магнитных трубках применимо приближение ведущего центра траектории частицы. Для определения размеров области, где можно использовать такое приближение, в данной работе определяются геометрические размеры магнитных трубок.

Для определения минимальных масштабов, в котором режим движения частиц диффузионный, уточняются численные характеристики транспорта магнитных линий поля. Эти характеристики являются асимптотикой для диффузионного коэффициента частиц низких энергий. Метод расчета основан на численном моделировании линий турбулентного магнитного поля и расчету числовых характеристик его транспорта.

Реконструкция массового состава космических лучей по архивным данным эксперимента KASCADE с использованием машинного обучения

Петров Н. А.^{1,2}

¹*Институт Ядерных Исследований РАН, Россия, Москва*

²*Институт Ядерной Физики им. Будкера СО РАН, Россия, Новосибирск,
N.A.Petrov@inp.nsk.su*

Мы представляем результаты нового анализа архивных данных эксперимента KASCADE (предоставленных проектом KCDC), который регистрировал широкие атмосферные ливни с 1996 по 2013 гг. Наш анализ основан на специально разработанном методе машинного обучения, который позволяет провести реконструкцию энергетических спектров 5 отдельных массовых компонент потока космических лучей (протоны, гелий, углерод, кремний и железо), а также среднего логарифма массового числа в диапазоне энергий от 1.4 до 100 ПэВ. Проведён анализ систематических погрешностей, которые оказываются существенно ниже чем в последнем оригинальном исследовании KASCADE, а также ниже чем соответствующие погрешности экспериментов IceTop и TALE почти во всём изучаемом диапазоне энергий. Дополнительно учтён вклад “теоретических” неопределённостей, соответствующих использованию различных моделей высокоэнергичных адронных взаимодействий, а именно post-LHC моделей: QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c.

Обнаружено заметное превышение потока протонной компоненты и нехватка в потоках остальных индивидуальных компонент, в сравнении с последними оригинальными результатами KASCADE. Также продемонстрировано присутствие колена в спектрах протонной и гелиевой компонент на энергиях ~ 4.4 ПэВ и ~ 11 ПэВ со статистической значимостью 5.2σ и 3.9σ соответственно, а также указание (2.4σ) на ужесточение в спектре железной компоненты на ~ 4.5 ПэВ, которое можно интерпретировать как аналог ужесточения в протонном спектре, недавно открытого экспериментом GRAPES-3 на энергии 166 ТэВ.

В то же время, наши результаты совместны с результатами экспериментов IceTop, TALE и LHAASO, с учётом “теоретических” неопределённостей. Разработанная нами методика в будущем может применяться для обработки данных похожих экспериментов, например, эксперимента “Ковер-3”.

Спектр и состав космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE

Просин В. (НИИЯФ МГУ)

В сезон набора данных 2022-2023 гг установка HiSCORE в составе комплекса ТАЙГА была существенно расширена до площади в 1 км^2 , на которой были установлены 120 станций, объединенных в 4 кластера. Все станции были направлены в зенит, что позволило уточнить среднюю зенитно-угловую чувствительность станции. Энергия определялась по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси широкого атмосферного ливня (ШАЛ) для энергий выше 1 ПэВ и по плотности потока на расстоянии 100 м от оси ШАЛ для меньших энергий. Глубина максимума ШАЛ определялась по крутизне функции пространственного распределения света, в качестве которой служило отношение потоков света на расстояниях 80 и 200 м от оси. Увеличение площади установки позволило увеличить статистику в зависимости $\ln A$ от энергии при энергии 1017 эВ. Приведены результаты, полученные за 280 часов набора данных с октября 2022 по октябрь 2023 г.

Результаты стерео-наблюдений источников HAWC J2019+368 и LHAASO J0341+5258 с помощью установок TAIGA-IACT

Разумов А. (Физический факультет МГУ)

В настоящей работе представлены результаты обработки 100 ч наблюдения источника гамма-излучения сверхвысокой энергии HAWC J2019+368 в туманности Dragonfly и 70 ч наблюдения за неопознанным источником LHAASO J0341+5258. Наблюдения проводились на трёх атмосферных черенковских телескопах TAIGA-IACT в составе астрофизического комплекса TAIGA в течение осенних сезонов 2020 – 2023 гг. Данные источники изучаются методом наземных черенковских телескопов впервые и оба являются кандидатами в т.н. пэватроны – источники галактических космических энергий, способные разгонять заряженные частицы до энергий около 10^{15} эВ.

Разработка нового метода реконструкции ШАЛ на установке «Ковер-2» БНО ИЯИ РАН

Романенко В. (ИЯИ РАН), Джаппуев Д. (ИЯИ РАН), Петков В. (ИЯИ РАН)

Установка «Ковер-2» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН расположена в Баксанском ущелье (43.2730 С.Ш., 42.6845 В.Д.) на высоте 1700 м.н.у.м. и предназначена для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергией более 300 ТэВ, однако, конструкция установки позволяет выполнять реконструкцию ШАЛ меньших энергий. Поэтому с целью увеличения эффективности установки разрабатывается новый метод восстановления параметров ШАЛ с энергией более 50 ТэВ. В данной работе описана процедура реконструкции на основе данных, полученных на установке «Ковер-2» за период с апреля 2018 по июнь 2024 года.

Перспективы поиска гамма-квантов суб-пэвного диапазона при совместном анализе данных черенковской и сцинтилляционной установок комплекса TAIGA

Самолига В.С.¹ от коллаборации TAIGA

¹НИИПФ ИГУ, Россия, Иркутск, vladimir.samoliga@yandex.ru

В настоящей работе проводится анализ экспериментальных данных двух установок астрофизического комплекса TAIGA: сети широкоугольных оптических детекторов TAIGA-HiSCORE, размещенных на площади $\sim 1 \text{ км}^2$, и массива сцинтилляционных счетчиков Tunka-Grande, объединенных в 19 станций на площади 0.5 км^2 . Установки предназначены для исследования первичного космического излучения (ПКИ) методом регистрации черенковского излучения, а также электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ) соответственно. Энергетический порог регистрации ПКИ составляет 100 ТэВ для установки TAIGA-HiSCORE и 10 ПэВ для установки Tunka-Grande при использовании стандартного триггера, когда ШАЛ регистрируется тремя и более сцинтилляционными станциями установки. В докладе показано, что при регистрации ШАЛ одной или двумя станциями установки Tunka-Grande совместно с установкой TAIGA-HiSCORE энергетический порог установки Tunka-Grande может быть понижен до $\sim 200 \text{ ТэВ}$ и $\sim 800 \text{ ТэВ}$ соответственно. Это существенно расширяет потенциальные возможности для гибридного поиска космических гамма-квантов с помощью установок TAIGA-HiSCORE и Tunka-Grande.

Оценка углового разрешения и эффективной площади установки TAIGA-HiSCORE при использовании периферийных станций

Самолига В.С.¹ от коллаборации TAIGA

¹НИИПФ ИГУ, Россия, Иркутск, vladimir.samoliga@yandex.ru

Установка TAIGA-HiSCORE входит в состав астрофизического комплекса TAIGA. Она состоит из 120 широкоугольных оптических станций (ОС), регистрирующих атмосферное черенковское излучение широких атмосферных ливней (ШАЛ). ОС расположены на площади ~ 1 км² с расстоянием ~ 106 м между ними. Направление прихода первичных частиц ШАЛ с энергиями выше 100 ТэВ восстанавливается с угловым разрешением порядка 0.1° для событий с положением оси ШАЛ внутри периметра установки. Для краевых и внешних событий угловое разрешение ухудшается до 0.5° – 0.8° . С целью увеличения эффективной площади установки и углового разрешения для внешних событий предлагается разместить группу дополнительных периферийных ОС с шагом порядка 250 м по периметру установки TAIGA-HiSCORE. В настоящей работе представлены результаты моделирования установки с дополнительными ОС, предложено оптимальное размещение первой очереди развертывания ОС с учётом особенностей рельефа на территории астрофизического комплекса TAIGA-1 в Тункинской долине.

Оценка спектра легкой компоненты космических лучей в области энергий 200 -10000 ТэВ гибридным методом в эксперименте TAIGA

Окунова Э. (МГУ), Свешникова Л. (НИИЯФ МГУ) от эксперимента TAIGA

В эксперименте TAIGA, проводимом в Тункинской долине в районе озера БАЙКАЛ, развивается гибридный метод регистрации гамма-квантов и адронов с помощью широкоугольной (~0.6 стр) системы станций, регистрирующей Черенковский свет ШАЛ на площади около 1 км² (установка HiSCORE) и 3-ех АЧТ (атмосферных Черенковских телескопов, с углом обзора около 6 градусов). В работе предлагается метод выделения легкой компоненты космических лучей (протоны + гелий) в области энергий более 200 ТэВ, опираясь на метод, широко используемый в гамма –астрономии с использованием АЧТ при выделении гамма-квантов над фоном адронов. В гамма-астрономии выделение гамма-квантов происходит по форме имиджа ШАЛ, регистрируемого матрицей фотоумножителей в АЧТ. Разделение происходит в основном по параметрам Хилласа: ширине и длине имиджа и т.д. М-К моделирование указывает на заметное различие ШАЛ по этим параметрам также для легкой и более тяжелой компоненты. Энергия и остальные параметры ШАЛ определяются установкой HiSCORE. В статье приводится первая оценка спектра легкой компоненты космических лучей в области 200-10000 ТэВ.

О форме каскадных кривых широких атмосферных ливней при различных параметрах первичных космических частиц

Терновой М.Ю.¹, Просин В.В.²

¹ *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, markakarat@yandex.ru*

² *НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия, v-prosin@yandex.ru*

В докладе рассматривается вопрос о подобии формы каскадных кривых широких атмосферных ливней (ШАЛ) при различных энергиях и типах первичных космических частиц. Исследование основано на результатах моделирования, выполненного с использованием программы CORSIKA при разных моделях адронных взаимодействий высоких энергий. Показано, что каскадные кривые ШАЛ демонстрируют определённые закономерности и сходства при изменении начальных условий. Это подобие может быть использовано для оценки метода реконструкции массы первичных космических частиц по данным черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE, входящей в состав гамма-обсерватории TAIGA. Результаты исследования позволяют проверить основную идею, что глубина максимума ливня является ключевым параметром, по которому можно определить первичный массовый состав.

Подземные черенковские водные детекторы в гамма-обсерватории TAIGA: моделирование и перспективы

Терновой М.Ю.¹, от коллаборации TAIGA

¹ *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, markakarat@yandex.ru*

В докладе представлен концепт и результаты моделирования системы подземных водных черенковских детекторов, которую планируется добавить в состав астрофизического комплекса TAIGA для совместной работы с черенковской установкой TAIGA-HiSCORE. Рассмотрено несколько вариантов конфигурации детекторов на площади 1 км². Описаны процесс моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ) через программный пакет CORSIKA и метод выделения гамма-квантов из фона заряженных космических частиц. Показано, что эта система за счёт регистрации мюонной компоненты ШАЛ позволит измерять массовый состав космических лучей и эффективно регистрировать и исследовать космические гамма-кванты с энергией выше 0.5 ПэВ.

Разработка считывающей электроники с детекторов на основе кремниевых фотоумножителей

Тубольцев Ю. (ФТИ им. А.Ф.Иоффе), Богданов А. (ФТИ им. А.Ф.Иоффе), Чичагов Ю. (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

В настоящее время кремниевые фотоумножители (SiPM) нашли широкое применение в ряде задач по регистрации световых импульсов во многих областях науки и техники, в том числе и в космической физике. Они оказываются более эффективными при регистрации единичных фотонов в сравнении с вакуумными фотоумножителями [1]. В то же время SiPM, благодаря своему быстродействию, могут использоваться и для регистрации интенсивных потоков фотонов, что обусловило необходимость развития быстрой считывающей электроники для кремниевых фотоумножителей.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе в течение ряда лет разрабатывается проект уникальной высокогорной черенковской гамма-обсерватории ALEGRO [2, 3]. В настоящее время осуществляются исследования, направленные на создание новых детекторных кластеров на основе SiPM J-серии (MicroFJ-60035) и прототипа детекторной камеры на базе C-серии (MicroFC-60035) для регистрации черенковских вспышек с интенсивностью от единичных фотонов до нескольких тысяч фотонов. Испытания создаваемой аппаратуры осуществляются на действующем черенковском телескопе TAIGA-IACT.

В докладе предложены схемы оптимального считывания сигналов с кремниевых детекторов. Предложен способ увеличения детектирующей площади путём простейшего суммирования сигналов с нескольких детекторов и схема считывания с минимальным потреблением мощности. По разработанным схемам созданы детекторные пиксели на основе кремниевых фотоумножителей MicroFJ-60035 для двух детекторных кластеров, состоящих из 28 пикселей. Проведены испытания пикселя, показавшие возможность регистрации, как единичных фотонов, так и потоков фотонов с большой интенсивностью. Разработан и создан опытный модуль прототипа детекторной камеры на базе кремниевых фотоумножителей MicroFC-60035.

Список литературы

1. И. Иванов, Научно-технический журнал «Фотоника», 6, 70 (2015). https://photonics.su/files/article_pdf/4/article_4989_578.pdf
2. А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, А.М. Красильщиков и др., ЖТФ, 87 (6), 803 (2017). <http://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44501.2117>
3. Е.Е. Холупенко, А.М. Быков и др., ЖТФ, 88 (11), 1655 (2018). <http://doi.org/10.21883/JTF.2018.11.46626.176-18>

Ядра железа в космических лучах предельно высоких энергий у Земли

Урысон А. (ФИАН)

Обсуждается распространение ядер железа с энергией выше 10^{19} эВ от источников до Земли, в предположении внегалактического происхождения космических лучей предельно высоких энергий. В межгалактическом пространстве ядра взаимодействуют с фоновыми излучениями и неизбежно фрагментируют. Анализируется доля дошедших до Земли ядер железа и выявлена зависимость их энергии от расстояния до источника. Получено, что по величине энергии ядра можно найти ограничение на расстояние до его источника.

О возможности гамма-адронной сепарации посредством измерения доли УФ-излучения ШАЛ малоразмерным черенковским телескопом с камерой на SiPM

Холупенко Е. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Бадмаев Д. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Красильщиков А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Быков А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Богданов А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Репман Г. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Тубольцев Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Чичагов Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Выполнено многочастичное моделирование методом Монте-Карло работы черенковского телескопа TAIGA-IACT с камерой на SiPM OnSemi MicroFJ-60035, оснащенной фильтрами 290-590 нм и 220-320 нм. Показано, что измерение и анализ доли УФ-излучения в общем количестве черенковского излучения ШАЛ может быть вполне эффективным методом определения типа первичных частиц (далее "УФ гамма-адронная сепарация").

Впервые измерение доли УФ-излучения ШАЛ для осуществления гамма-адронной сепарации было предложено Степаняном и др. (Известия КрАО, 66, 234, 1983) и реализовано в КрАО на парном телескопе ГТ-48 с камерами на вакуумных ФЭУ. В ходе работы ГТ-48 была показана эффективность этой технологии (Kalekin et al., Astronomy Letters, 21, 163, 1995; Neshpor et al., Astronomy Reports, 45, 249, 2001), однако дальнейшего практического развития она, по-видимому, не получила. Впоследствии вопрос об возможностях УФ гамма-адронной сепарации рассматривался теоретически в некоторых общих терминах и для телескопов с параметрами и конструкцией, отличными от параметров и конструкции ГТ-48 (напр., Rahman et al., Experimental Astronomy, 11, 113, 2001; Kholupenko et al., Journal of Technical Physics, 63, 1603, 2018). Было показано, что ожидаемая эффективность УФ гамма-адронной сепарации может быть достаточно высока и для черенковских телескопов иных конструкций (в частности, с камерами на SiPM), но количественные оценки такой эффективности (фактор качества Q) получены не были.

В настоящей работе предложена следующая схема измерения доли УФ-излучения ШАЛ камерой на SiPM: пиксели камеры маскируются фильтрами двух типов (290-590 нм и 220-320 нм), размещенных в некотором однородном порядке в соотношении "50%-50%". В качестве конкретной реализации было выбрано заполнение камеры фильтрами в виде чередующихся полос (что приводит к некоторой зависимости величины регистрируемых сигналов от ориентации камеры). Такая схема позволяет одновременно регистрировать черенковское излучение ШАЛ как в видимом, так и в УФ диапазоне от каждого конкретного ШАЛ (то есть, определять долю УФ-излучения в общем черенковском излучении конкретного ШАЛ) с помощью одной камеры и, таким образом, выполнять УФ гамма-адронную сепарацию при осуществлении наблюдений на отдельном (одиночном) черенковском телескопе. Расчеты показали, что при наблюдениях гамма-источника в Крабовидной туманности телескопом TAIGA-IACT (то есть, исходя из расположения и параметров обсерватории TAIGA), соответствующий фактор качества составляет $1.05 \leq Q \leq 2.76$ при смещениях телескопа относительно оси ШАЛ на 120-150 м вдоль оси чередования типов фильтров в диапазоне энергий 10-100 ТэВ. При смещениях телескопа относительно оси ШАЛ в перпендикулярном направлении, вдоль полосы фильтров одного типа, оценка фактора качества составляет $1.75 \leq Q \leq 5.07$ на расстояниях 0-180 м в диапазоне энергий 31-100 ТэВ, и $1.06 \leq Q \leq 5.07$ на расстояниях 0-120 м в диапазоне энергий 10-100 ТэВ. Такое значение эффективности УФ гамма-адронной сепарации вполне сопоставимо с эффективностью гамма-адронной сепарации посредством анализа одного или пары параметров Хилласа (например, length и/или width).

Таким образом, в количественном расчете было показано, что гамма-адронная сепарация посредством анализа доли УФ-излучения в общем количестве черенковского излучения ШАЛ является перспективным методом повышения чувствительности будущих черенковских телескопов с камерами на SiPM.

NEVOD-НРС – высокопроизводительная аппаратно-программная система для обработки, анализа и хранения данных мультикомпонентных исследований широких атмосферных ливней

Хомчук Е.П.¹, Амельчаков М.Б.¹, Громушкин Д.М.¹, Жежера С.Ю.¹, Коновалова А.Ю.¹, Хохлов С.С.¹, Шульженко И.А.¹, Южакова Е.А.¹.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва, EPKhomchuk@mephi.ru

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений в области физики космических лучей являются мультикомпонентные исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ). В то же время применение к анализу экспериментальных данных мультикомпонентных исследований комплементарного подхода, при котором недостаточная с точки зрения независимого анализа информация об одной или нескольких компонентах ливня может быть дополнена данными по другим компонентам, позволит точнее определять параметры ШАЛ и, соответственно, характеристик инициировавшей его частицы. Такие исследования и такой подход могут быть реализованы в Экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД, объединяющем шесть установок (черенковский водный калориметр НЕВОД, координатно-трековый детектор ДЕКОР, установка СКТ и ливневые детекторы НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА и УРАН), которые позволяют исследовать одни и те же события сразу по трем компонентам: электронно-фотонной, мюонной и адронной.

В результате работы установок ЭК формируется объемный поток данных, содержащих топологическую, триггерную, координатную, амплитудную и временную информацию о зарегистрированных событиях. При этом для решения различных расчетных задач в целях верификации получаемых экспериментальных результатов и разработки новых методов необходим внушительный банк моделированных ШАЛ и откликов установок, получаемых с помощью CORSIKA и Geant4. Поэтому для хранения и эффективного анализа экспериментальных и моделированных событий установок с целью развития комплементарного подхода к анализу данных в ЭК НЕВОД создается высокопроизводительная аппаратно-программная система NEVOD-НРС.

Данная система предназначена для решения следующих задач: моделирование ШАЛ, процессов прохождения КЛ в гелиосфере и околоземном пространстве, откликов детекторов и установок; обработка и анализ экспериментальных и моделируемых данных; обучение нейронных сетей для реконструкции событий и развития новых методов и подходов к анализу данных; надежное хранение информации; организация и унификация хранения данных детекторов и установок ЭК НЕВОД.

В докладе представлены задачи и особенности создаваемой системы, ее состав и архитектура, а также схема хранения информации. Приводится описание структуры баз экспериментальных и моделированных данных, как отдельных установок, так и всего комплекса.

Возможности метода тени Луны для регистрации антипротонов космических лучей высоких энергий

Челидзе К. (НИЯУ МИФИ)

Антипротоны открыты в космических лучах в конце 1970-ых годов и с тех пор продолжают регулярные измерения потоков этих античастиц. Благодаря накопленной статистике и широкому энергетическому диапазону современных измерений удалось получить новые сведения о механизмах генерации и распространении космических лучей в Галактике. Последние прецизионные измерения потоков антипротонов в галактических космических лучах, проведённые спектрометрами PAMELA и AMS-02, расширяют энергетический диапазон до ~ 500 ГэВ [1]. Полученный энергетический спектр антипротонов и их доля в потоке протонов и антипротонов указывают на неучтённые источники этих античастиц, которыми могут быть, например, частицы тёмной материи. Однако измерения в области высоких энергий (свыше ~ 100 ГэВ) не позволяют точно судить о характере спектра и его отличия от фонового, образованного только вторичной компонентой антипротонов, из-за малой статистики и больших погрешностей. Чтобы продвинуться в область более высоких энергий прямых измерений недостаточно, а подходящие установки по регистрации ШАЛ не способны определить заряд первичной частицы. Для решения этой проблемы был предложен так называемый метод тени Луны в потоке космических лучей [2].

В работе исследуются возможности этого метода и различные факторы, влияющие на наблюдения тени: расположение детектора, зенитный угол, под которым наблюдается Луна, и влияние изменений магнитного поля Земли за время наблюдения. Для этого проводится численное моделирование траекторий частиц в магнитном поле Земли с использованием пакета программ GT [3]. Сформулированы рекомендации о наилучшем расположении детекторов и оптимальных зенитных углах наблюдения, основанные на информации об угловом расстоянии между тенями протонов и антипротонов. Также сделаны выводы о влиянии длительной вариации магнитного поля Земли на условия наблюдения.

1. Andrew Buffington и др. "Search for Antimatter in Primary Cosmic Rays" \ Nature 236.5346 (1972), с. 335-338.

2. M. Urban и др. "Can we detect antimatter from other galaxies by the use of the Earth's magnetic field and the Moon as an absorber?" в: Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 14.2 (1990), с. 223-236

3. Пакет программ GetTrajectory // <https://spacephysics.mephi.ru/beta/>

Оценка направления прихода ШАЛ по прямому черенковскому свету в верхнем телескопе СФЕРА-3

Черкесова О.В.¹, Овчаренко Н.О.², Подгрудков Д.А.², Энтина Е.Л.², Азра К.Ж.², Бонвеч Е.А.², Галкин В.И.², Зива М.Д.², Иванов В.А.², Колодкин Т.А.², Роганова Т.М.², Чернов Д.В.²

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва, olga.v.cherkesova@yandex.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, Москва.*

Рассмотрены два варианта детектора углового распределения прямого черенковского света для проектируемой установки СФЕРА-3 и их способность оценивать направление прихода ШАЛ. В первом случае используется отверстие в зеркале нижнего телескопа и чувствительная мозаика нижнего телескопа отраженного света, во втором – отдельный компактный детектор. Исследованы перспективы использования нейросетевых методов для уточнения направления прихода ШАЛ.

Разработка проекта СФЕРА для изучения состава ПКЛ в области 1-1000 ПэВ. Статус 2024 года

Чернов Д. (МГУ), Бонвеч Е. (МГУ), Галкин В. (МГУ), Подгрудков Д. (МГУ), Азра К. (МГУ), Зива М. (МГУ), Иванов В. (МГУ), Колодкин Т. (МГУ), Овчаренко Н. (МГУ), Роганова Т. (МГУ), Черкесова О. (МГУ), Энтина Е. (МГУ)

Представлен актуальный вариант модели конструкции детектора и расчёта оптической системы разрабатываемой установки СФЕРА-3 для регистрации отражённого от снежной поверхности черенковского света ШАЛ. Приведены предварительные результаты моделирования на основе банка событий полученных на суперкомпьютере Ломоносов-2 с помощью пакета CORSIKA, получены оценки точности восстановления энергии и типа первичной частицы.

Статус установки ENDA-LHAASO

Щеголев О. (ИЯИ РАН), Стенькин Ю. (ИЯИ РАН), Кулешов Д. (ИЯИ РАН), Степанов В. (ИЯИ РАН), Куринов К. (ИЯИ РАН)

Эксперимент ENDA (Electron-Neutron Detector Array) направлен на исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей в области 100 ТэВ-100 ПэВ. Установка состоит из 64 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов), разработанных в ИЯИ РАН. В основе оригинального подхода лежит идея одновременной регистрации электромагнитной и адронной компонент широкого атмосферного ливня (ШАЛ). Адронная компонента регистрируется посредством вторичных задержанных на миллисекунды тепловых нейтронов, образующихся при взаимодействии адронов ШАЛ с веществом грунта под установкой, количество которых пропорционально количеству адронов, попавших на площадь установки. Установка ENDA работает в составе международной обсерватории LHAASO в КНР на высоте 4400 м над уровнем моря с августа 2023 г. и окружена электронными и мюонными детекторами установки Km2A. В докладе будет представлен статус установки и первые экспериментальные данные.

Характеристики электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ, регистрируемых установками ЭК НЕВОД

Южакова Е. (НИЯУ МИФИ), Амельчаков М. (НИЯУ МИФИ), Богданов А. (НИЯУ МИФИ), Жежера С. (НИЯУ МИФИ), Коновалова А. (НИЯУ МИФИ), Нугаева К., Хомчук Е. (НИЯУ МИФИ), Хохлов С. (НИЯУ МИФИ), Шульженко И. (НИЯУ МИФИ), Громушкин Д (НИЯУ МИФИ)

Комплексный подход при изучении широких атмосферных ливней (ШАЛ) реализуется в Экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД (МИФИ, Москва). Регистрация электронно-фотонной компоненты ливней осуществляется установкой НЕВОД-ШАЛ, которая состоит из 144 сцинтилляционных пластиковых детекторов, объединенных в 9 кластеров. Адронная компонента ШАЛ регистрируется с помощью 72 нейтронных детекторов установки УРАН.

В докладе обсуждаются характеристики широких атмосферных ливней, зарегистрированных установками ЭК НЕВОД. Оценивается точность восстановления основных параметров ливней для установок НЕВОД-ШАЛ и УРАН. Получены пространственные распределения тепловых нейтронов и электронно-фотонной компоненты ШАЛ. Представлены спектры мощности ливней по данным двух установок и приведен восстановленный энергетический спектр первичных космических лучей.

**Секция МОД:
Модуляции галактических космических лучей**

Анализ событий 2024 года в солнечном ветре и космических лучах с использованием новых программных инструментов

Белов С.М., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белов А.В., Оленева В.А., Янке В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, izmiran.crdt@gmail.com

В максимуме 25 цикла солнечной активности мы наблюдаем всё больше вспышек и корональных выбросов массы, вызывающих всё более и более мощные геомагнитные бури и Форбуш-эффекты. Уже в 2023 году было зарегистрировано несколько значительных Форбуш-эффектов, однако в этом докладе речь пойдет о двух событиях, произошедших 23 марта и 10 мая 2024 года. Магнитная буря в марте не была рекордной ($K_p=8+$), но модуляция космических лучей $>11\%$ (для частиц с жесткостью 10 ГВ) наблюдалась впервые с 2005 года, это событие отличалось также значительной вариацией северо-южной составляющей анизотропии космических лучей. В мае же, вследствие нескольких корональных выбросов из активной области 13664 была зарегистрирована возможно самая сильная геомагнитная буря ($K_p=9$) за всю историю новейших наблюдений. Экстремальная магнитная буря продолжалась более суток. Такую реакцию магнитосферы можно связать с рекордными значениями индукции межпланетного магнитного поля (B до 70 нТл, B_z – до -40 нТл). Соответствующий Форбуш-эффект хоть и не был рекордным ($\sim 10\%$), отличался некоторыми интересными особенностями.

В докладе представлен анализ упомянутых событий с использованием инструментов обновленной базы данных FEID (tools.izmiran.ru/feid). Для исследования вариаций потока космических лучей используются Метод Глобальной Съёмки и Метод Кольца Станций, применяемые к данным мировой сети нейтронных мониторов. Также обсуждается наличие предвестников Форбуш-эффектов и влияние солнечных космических лучей, включая возможность регистрации очередного GLE в майском событии.

Мониторинг геоэффективных КВМ в мае 2024 года в потоке солнечного ветра и космических лучей на уровне Земли

Борог В.В., Мишутина Ю.Н., Шутенко В.В.

Национальный исследовательский ядерный университет (НИЯУ МИФИ), Россия, Москва, vvborog@mephi.ru

В работе приводятся результаты ретроспективного анализа временных рядов различных характеристик солнечного ветра и космических лучей для определения предикторов возмущения магнитного поля Земли:

- компонент плотности энергии СВ: $E_V \sim nV^2$; $E_B \sim B^2$; $E_T \sim nT^0$;
- вариаций потоков э/м излучения в линии Лаймана (E_{LY}) и радиоизлучения ($F10.7$);
- вариаций потока ПКЛ в сети нейтронных мониторов, расположенных в разных частях земного шара (в Европе, Азии, Америке);
- вариаций потока вторичных атмосферных мюонов ПКЛ в наземном мюонном годоскопе УРАГАН (НИЯУ МИФИ).

Прогноз выполнен с применением методики фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [1]. Для всех указанных выше временных рядов $N(t)$ вычислялись соответствующие ряды такой же продолжительности фактора нестационарности $S(t)$. Значения $S(t)$ меняются от малых величин, где $N(t)$ имеет случайный или гармонический характер, до больших величин в моменты проявления мощной солнечной активности или турбулентных изменений в потоке ПКЛ при пересечении областей ICME. Анализ временных рядов по фактору нестационарности $S(t)$ оказывается информативным для изучения динамических процессов на Солнце и в межпланетном пространстве. При этом для выявления предвестников не используются какие-либо специальные функции-анализаторы.

Получено, что во всех временных рядах разного типа наблюдаются предикторы в диапазоне от 2-3 суток до нескольких часов перед появлением мощных возмущений (индекс $|Dst| > 100$ нТ) магнитного поля Земли.

Литература

1. С.Ф. Тимашев. Фликкер-шумовая спектроскопия. Информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит. 2007. 248 с.

Анализ Форбуш-понижений 2024 года по экспериментальным данным незранированных нейтронных детекторов ЭК НЕВОД

Волков Е.П., Громушкин Д.М., Коновалова А.Ю., Кузьменкова П.С., Мишутина Ю.Н., Хомчук Е.П.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,
EPVolkov@mephi.ru*

В настоящее время в Экспериментальном комплексе НЕВОД НИЯУ МИФИ работают установки «НЕЙТРОН» и ПРИЗМА-36, состоящие из незранированных детекторов тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag)+6LiF$. Установка «НЕЙТРОН» состоит из четырех детекторов, расположенных на разных уровнях относительно грунта и под разной толщиной поглотителя, а ПРИЗМА-36 из 36 детекторов, расположенных на четвертом этаже здания Экспериментального комплекса. Регистрирующая система и конструкция детекторов этих установок позволяют измерять интенсивность потока космических лучей посредством тепловых нейтронов, образующихся в результате взаимодействия адронов с ядрами вещества вблизи детекторов. Резкие уменьшения интенсивности космических лучей (форбуш-эффекты) зачастую являются последствием возмущений межпланетного магнитного поля, вызванных солнечной активностью. В работе представлены результаты анализа вариаций нейтронного фона по данным установок «НЕЙТРОН» и ПРИЗМА-36, а также сравнение с данными установки УРАГАН и Московского нейтронного монитора.

Моделирование вариаций потоков галактических космических лучей в пакете программ GT

Галикян Н. (НИЯУ МИФИ), Голубков В. (НПП “Радар ммс”), Дягилев А. (НИЯУ МИФИ), Майоров А. (НИЯУ МИФИ), Юлбарисов Р. (НИЯУ МИФИ)

Солнечная модуляция (СМ) - эффект изменения интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) во времени вследствие вариации характеристик магнитного поля и плазмы в гелиосфере под влиянием солнечной активности [1]. Основным подходом к исследованию эффекта СМ является численное решение уравнений диффузии (переноса) частиц в межпланетном пространстве. К примеру, такого подхода придерживаются в пакете HelMod [2], где с помощью Монте-Карло моделирования решается уравнение переноса в зависимости от долготы и гелиоцентрического расстояния. Метод решения уравнений диффузии сопряжен с большими вычислительными трудностями при рассмотрении задачи модуляции в отсутствии некоторых упрощающих предположений, таких как статичность и сферическая симметрия гелиосферы. В свою очередь, эти предположения в некоторой степени допустимо использовать только при исследовании долговременных явлений, но для кратковременных вариаций потоков ГКЛ, к примеру 27- или 14-дневных, они неприменимы.

В настоящей работе предлагается численно решать уравнение движения отдельных частиц КЛ в магнитном поле гелиосферы с помощью программного пакета GT. Пакет GT позволяет считать траектории заряженных частиц в любых заданных динамичных магнитных полях и с учетом возможных упругих и неупругих взаимодействий со средой. Изначально GT создавалось для исследования физики космических лучей в околоземном пространстве, включая динамику внутренних радиационных поясов Земли. В нашей работе пакет GT развивается в среду для моделирования движения частиц в гелиосфере, где кроме регулярного магнитного поля Паркера с токовым слоем учитываются случайные возмущения в магнитном поле и динамичные явления в гелиосфере, такие как корональные области взаимодействия. Для задания возмущений рассчитываются моды векторного потенциала двух компонент [3]: Slab (с волновыми векторами вдоль регулярного поля) и 2D (с волновыми векторами поперек регулярному полю), а далее берется ротор суммы мод векторного потенциала.

В работе приведены проведённые расчёты и показана универсальность используемого подхода при исследовании как долговременных, так и кратковременных эффектов СМ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей» № FSWU2023-006

1. Potgieter, M.S. Solar Modulation of Cosmic Rays. Living Rev. Sol. Phys. 10, 3 (2013)
2. Boschini, M.J., et al. Propagation of Cosmic Rays in Heliosphere: the HelMod Model. Adv. Space Res. 62, 10 (2018)
3. Laitinen, T., et al. An Analytical Model of Turbulence in Parker Spiral Geometry and Associated Magnetic Field Line Lengths. The Astrophysical Journal 943, 108 (2023)

Характеристики эффекта Форбуша в потоках протонов и ядер гелия по данным АМС-02

Дорошева Д.Н., Борог В.В., Архангельская И.В.

НИЯУ «МИФИ», Россия, Москва, dorosheva200@list.ru

В работе представлены результаты анализа данных о потоках протонов и ядер гелия первичных космических лучей (ПКЛ) по результатам космического эксперимента АМС-02 в период с 2011 по 2019 гг. Исследовались характеристики проявлений эффекта Форбуша для событий, вызванных корональными выбросами массы (ICME). Наиболее детально рассматривались события типа «гало».

Проведен анализ зависимости амплитуд Форбуш-понижений (ФП) от жесткости частиц. Получено, что до жесткости 10 – 12 ГВ в потоках протонов можно использовать степенную аппроксимацию с показателем -0.68 ± 0.04 , однако при учете полного диапазона жесткости вплоть до ~ 20 ГВ, такая аппроксимация применима только на уровне значимости 90 %. Использование экспоненциальной функции с параметром $(-5.3 \pm 0.4)^{-1}$ даёт 99 % уровень значимости.

Поведение в зависимостях потоков ядер гелия аналогичное, т.е. разница между степенной и экспоненциальной аппроксимациями значительна после $R > 10$ ГВ. Показатель степенной функции: -0.39 ± 0.07 ; параметр экспоненциальной функции: $(-3.3 \pm 0.4)^{-1}$.

Времена восстановления потока ПКЛ после ФП для протонов и ядер гелия составляют несколько дней. Обсуждается зависимость этих времен от кинетической энергии ICME.

Об интенсивности ГКЛ по данным эксперимента РБМ и солнечных и гелиосферных характеристиках в минимумах и максимумах солнечного цикла

Калинин¹ М.С., Базилевская¹ Г.А., Квашнин¹ А.Н., Крайнев¹ М.Б., Махмутов¹ В.С., Михайлов² В.В., Свиржевская¹ А.К., Свиржевский¹ Н.С., Стожков¹ Ю.И.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China

В течение последних 3-х магнитных (или 22-летних) циклов солнечной активности, между максимумами СЦ 19 и 25 по данным эксперимента регулярного баллонного мониторинга (РБМ) космических лучей в атмосфере Земли сформирован временной ряд среднемесячных значений интегральных интенсивностей протонов ГКЛ в диапазонах энергии ($T > 0.1$ ГэВ) и ($0.1 < T < 1.5$ ГэВ), см. доклад Крайнева и др. на ВККЛ-2024. Этот период (1957 – 2024 гг.) включает 6 минимумов и 7 максимумов циклов пятенной активности Солнца. В периоды последних 5 минимумов и 5 максимумов СЦ, кроме ведущейся давно регистрации характеристик пятенной активности, проводилось также систематическое сканирование крупномасштабных магнитных полей фотосферы и регистрация гелиосферных характеристик в районе орбиты Земли.

В докладе с использованием упомянутых данных РБМ продолжается начатое несколько лет назад сопоставление для экстремальных моментов СЦ интенсивности ГКЛ и важных для их распространения гелиосферных характеристик с индексами двух соответствующих ветвей активности Солнца (полоидальной для минимумов и тороидальной для максимумов СЦ). Для ещё не закончившегося периода максимума и инверсии гелиосферного магнитного поля в СЦ 25 обсуждаются ожидаемые значения характеристик.

Кроме того, максимальные среднемесячные значения интегральных интенсивностей протонов ГКЛ в указанных выше диапазонах, полученные по данным РБМ, сопоставляются с их значениями по энергетическим спектрам, рассчитанным при моделировании интенсивности протонов ГКЛ для минимумов между СЦ 23 и 24 (мин 23/24) и мин 24/25, для которых существуют значительно более детальные данные по ГКЛ, чем в предыдущие минимумы СЦ.

Интенсивность ГКЛ по данным эксперимента Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей. I. Первое приближение

Крайнев¹ М.Б., Базилевская¹ Г.А., Калинин¹ М.С., Квашнин¹ А.Н., Махмутов¹ В.С., Михайлов² В.В., Свиржевская¹ А.К., Свиржевский¹ Н.С., Стожков¹ Ю.И.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China

В эксперименте регулярного баллонного мониторинга (РБМ) космических лучей в атмосфере Земли, проводимого ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, получен один из наиболее длинных рядов (с 1957 г. по настоящее время) однородных измерений характеристик, связанных с интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ). Однако, детекторы как РБМ, так и нейтронного мониторинга космических лучей регистрируют смесь первичных (т.е. пришедших в атмосферу из гелиосферы) космических лучей разного типа (в основном, протонов и ядер гелия) и энергии, а также вторичных (рождённых в атмосфере) космических лучей. Поэтому для использования результатов РБМ при исследовании модуляции ГКЛ в гелиосфере их надо откалибровать в терминах интенсивности первичных ГКЛ около Земли.

В докладе обсуждается решение этой задачи в первом приближении, а именно определяется связь между среднемесячной скоростью счёта всенаправленного детектора РБМ в максимуме зависимости этой скорости счёта от количества вещества над прибором для высокоширотных (Мурманск и Мирный), N_{max}^{MuMi} , и среднеширотных (Москва), N_{max}^{Mo} , пунктов измерения и интегральной интенсивностью протонов ГКЛ в определённых диапазонах энергии. Для этого N_{max}^{MuMi} и N_{max}^{Mo} сравниваются с результатами экспериментов РАМЕЛА (06.2006-01.2016 гг.) и AMS-2 (05.2011- по н./вр.) и некоторых других.

Обсуждаются пути уточнения полученных связей в следующих приближениях.

Вариации космических лучей во время экстремальных геомагнитных возмущений 9-15 мая 2024

Махмутов В. (ФИАН), Базилевская Г. (ФИАН), Стожков Ю. (ФИАН), Филиппов М. (ФИАН), Морзабаев А. (ЕНУ, Республика Казахстан), Тулеков Е. (ЕНУ, Республика Казахстан), Ерхов В. (ЕНУ, Республика Казахстан), Ролан Ж.-П. (CRAAM, Бразилия), Такза Ж. (CRAAM, Бразилия)

В данной работе представлены результаты анализа солнечной и геомагнитной активности и вариаций потоков космических лучей в широком диапазоне энергий в период 9-15 мая 2024 г. Используются данные наземных измерений космических лучей приборами КОБЕР (CARPET), нейтронными детекторами и гамма-спектрометрами. Эти измерения проводились на Долгопрудненской научной станции ФИАН (жесткость геомагнитного обрезания $R_c=2.3$ ГВ), в Евразийском национальном университете (г. Астана, Республика Казахстан; $R_c=2.7$ ГВ) и на Астрономическом комплексе CASLEO (Эль Леонсито, Аргентина; $R_c=9.1$ ГВ). Основное внимание в работе уделяется определению характеристик зарегистрированных Форбуш-понижений потоков космических лучей и анализу данных наземных измерений во время солнечного протонного события, наблюдавшегося на спутниках серии GOES в потоках солнечных протонов 9-15 мая 2024 г. В работе также используются доступные экспериментальные данные наблюдений солнечной и геомагнитной активности и данные наземных нейтронных мониторов.

Анализ частотных спектров вариаций космических лучей, параметров солнечной активности и межпланетной среды в 19 – 24 циклах солнечной активности

Охлопков В.П.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ovpetrovich@yandex.ru

Используя метод спектрального анализа исследованы периодичности по данным космических лучей (КЛ) в стратосфере, в нейтронной компоненте, в различных параметрах солнечной активности (СА) и межпланетной среды за период с 1954 по 2020 год отдельно по циклам солнечной активности.

Исследование квазипериодичностей за длительный промежуток времени, включающий 5 циклов СА, позволило выявить особенности частотных спектров в сочетаниях четный-нечетный циклы и сохранение этих особенностей в следующей паре циклов четный-нечетный. При этом выделены наиболее устойчивые квазипериодические компоненты в каждом цикле как в потоках КЛ, так и в параметрах солнечной активности и межпланетной среды.

Проявления квазидвухлетней периодичности в КЛ, четко присутствующей и в среднем магнитном поле Солнца как звезды (СМП) и синхронно изменяющей свой период в этих параметрах от цикла к циклу, свидетельствует о связи этой периодичности в КЛ с СМП. Квазидвухлетняя периодичность в четных и нечетных циклах различается по длительности примерно на 2 месяца. В отличие от квазидвухлетней вариации период годовой вариации и вариации с $T = 9.1 - 10$ в четных циклах меньше, чем в нечетных. Квазипериодичность с $T = 15 - 16$ месяцев проявляется в четных циклах. Остальные более высокочастотные вариации не проявляют выраженного эффект изменения периода в цикле четный-нечетный. Таким образом, мы видим проявление 22-летнего цикла в длительности периодичностей. Хорошо известен 22-летний цикл в СА, в котором особыми свойствами обладают 11-летние циклы СА в сочетании четный-нечетный циклы [1], в частности, это проявляется в относительных высотах циклов в парах четный-нечетный, в промежутках между максимумами 11-летних циклов, в формах кривых временного хода циклов. Все это не могло не сказаться на частотных спектрах.

1. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В., Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца, Москва, «Наука», 1986.

Гравитационное воздействие планет на солнечную активность и через нее на потоки космических лучей

Охлопков В.П.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ovpetrovich@yandex.ru

Проведен расчет линейных конфигураций планет Венеры, Земли и Юпитера. Для каждого момента времени (использовались гелиоцентрические долготы планет) рассчитывались средние разности долгот (СРД) для пар планет: Венера-Земля, Венера-Юпитер, Земля-Юпитер. Выбирались моменты времени, когда СРД были минимальны и планеты находились на одной линии с Солнцем. По минимальным отклонениям планет от линии, проходящей через них и Солнце при расположении планет по одну сторону от Солнца (планеты находятся в соединении), а также при расположении планет по разные стороны от Солнца и на одной линии с ним, разработан индекс (JEV, по первым буквам латинских названий планет), описывающий 11-летнюю периодичность. Линейные конфигурации планет Венеры, Земли и Юпитера имеют 11-летнюю периодичность. Аналогично были обработаны и другие планеты, оказывающие заметное гравитационное влияние на Солнце. Только для трех названных здесь планет выявляется 11-летняя периодичность.

Планетный индекс JEV рассчитан с 1000 года по настоящее время, и проведено его сопоставление с солнечной активностью. Для периода с 1000 по 1699 гг использован ряд солнечной активности Шове, а с 1700 года использованы числа Вольфа. Хотя данные по солнечной активности до 1700 года получены косвенным путем, наблюдается полное соответствие числа циклов как в индексе JEV, так и в солнечной активности. Основная по амплитуде периодичность в них совпадает и равна 11.07 лет.

Совпадение длительностей периодичностей в планетном индексе и в солнечной активности за 1000-летний интервал времени не является случайным и может свидетельствовать о связи этих процессов.

Проведено сопоставление с потоками космических лучей.

Литература

1. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2014. № 3. С. 50 (Okhlopkov V.P. // Moscow University Physics Bulletin. 2014. V. 69. No. 3. P. 257)
2. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета, Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 4. С. 92. (Okhlopkov V.P. // Moscow University Physics Bulletin. 2016. V. 71. No. 4. P. 440.)
3. Охлопков В.П. // Геомагнетизм и аэронавигация, издательство Наука (М.). 2020. том 60. № 3. С. 393-403 DOI: 10.31857/S0016794020030141 (Okhlopkov V.P. // Geomagnetism and Aeronomy, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation). 2020. V. 60. № 3. P. 381-390)

Электромагнитный механизм формирования анизотропии интенсивности галактических космических лучей

Петухов И.С., Петухова А.С., Петухов С.И.

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН

Предложен электромагнитный механизм формирования анизотропии интенсивности галактических космических лучей. Предполагается, что во внутренней гелиосфере (область с радиусом несколько астрономических единиц вокруг Солнца) распространение частиц определяет электромагнитное поле солнечного ветра без влияния рассеяний. На границе внутренней гелиосферы интенсивность космических лучей изотропная и однородная вследствие диффузионного распространения от внешней границы гелиосферы. Поскольку траектории космических лучей с разным направлением движения от источника до фиксированной точки в пространстве различаются, поэтому различаются потери энергии, что, в свою очередь, приводит к образованию неоднородного углового распределения интенсивности. Для однородного паркеровского солнечного ветра функция распределения частиц определена посредством решения бесстолкновительного уравнения Больцмана методом обратных траекторий. Для космических лучей с энергией 10 ГэВ получено: 1) векторная анизотропия величиной 0.4-0.6% направлена перпендикулярно линии Земля-Солнце с запада на восток; 2) тензорная анизотропия имеет вид двухосного эллипсоида, меньшая ось которого направлена вдоль межпланетного магнитного поля. Результаты расчета соответствуют измерениям.

Работа проводится при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012).

Возможность применения потенциала солнечной модуляции для описания 27-дневных вариаций ГКЛ

Сирук С.А., Юлбарисов Р.Ф., Майоров А.Г.

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия, Москва, sstepana001@mail.ru

Модель силового поля (МСП) часто применяется для описания солнечной модуляции космических лучей даже в тех случаях, когда не соблюдаются заложенные в нее предположения. В наиболее распространенной версии МСП интенсивность модуляции характеризуется единственным параметром — потенциалом солнечной модуляции (ПМ). В других вариантах сам ПМ может являться функцией энергии частиц [1].

Существуют работы, в которых МСП применяется для описания кратковременных возмущений потока ГКЛ — таких, как 27-дневные вариации [2]. Устанавливается связь между энергетической зависимостью амплитуды 27-дневных вариаций ГКЛ (A_{27}) и коэффициентом диффузии, из которой должна следовать и соответствующая энергетическая зависимость ПМ. Настоящая работа посвящена исследованию вопроса применимости МСП для описания энергетического спектра ГКЛ в периоды их 27-дневных вариаций.

На основе данных спектрометра AMS-02 о суточных потоках протонов в 2011–2018 гг. построена зависимость $A_{27}(R)$, которая в работе описывается степенным законом при больших энергиях. В результате анализа вариаций, наблюдаемых в разные моменты времени, восстановлен временной ряд показателя степени. В отличие от результатов более ранних исследований [3], спектр оказывается более жестким в минимумах солнечной активности и смягчается вблизи солнечного максимума.

Восстановлены временная и энергетическая зависимости ПМ для разных вариантов МСП. Восстановлены значения амплитуды 27-дневных вариаций ПМ при разных энергиях и показано, что ни одна из рассматриваемых версий МСП не позволяет правильно предсказать зависимость $A_{27}(R)$, опираясь на соответствующую зависимость для ПМ.

Построены временные ряды значений функции потерь, полученных в результате аппроксимации суточных спектров, и показано наличие в них значимых 27-дневных вариаций, т.е. изменения формы спектра не описываются в терминах силового поля.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”, № FSWU-2023-0068).

[1] Shen, Z., Yang, H., Zuo, P. et al. (2021). *The Astrophysical Journal*, 921(2), 109.

[2] Modzelewska, R., Bazilevskaya, G. A., Boezio, M. et al. (2020). *The Astrophysical Journal*, 904(1), 3.

[3] Gil, A., & Alania, M. V. (2016). *Solar Physics*, 291(6), 1877–1886.

Дипольное магнитное поле Солнца и модуляция галактических космических лучей

Струминский А.Б.¹, Белов А.В.², Гущина Р.Т.², Янке В.Г.², Григорьева И.Ю.³

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, *astrum@cosmos.ru*

²ИЗМИРАН, Троицк, г. Москва, Россия, *yanke@izmiran.ru*

³ГАО РАН, Пулково, г. Санкт-Петербург, Россия, *irina2014irina@mail.ru*

Различие форм максимумов потоков галактических космических лучей (ГКЛ) при положительной ($A > 0$, минимумы нечетных-четных циклов) и отрицательной ($A < 0$, минимумы четных-нечетных циклов) полярности дипольного магнитного поля Солнца хорошо известно. При $A > 0$ наблюдается плоский максимум ГКЛ, а при $A < 0$ - острый. Это различие связывают с влиянием дрейфового механизма распространения ГКЛ в глобальном магнитном поле гелиосферы, *proху* которого можно считать полярное (дипольное) магнитное поле Солнца (V_{pole}).

Однородный ряд данных по ГКЛ доступен с 1957 года, а наблюдения V_{pole} проводятся только с 1976 года. В докладе на примере нечетных (21-го, 23-го и 25-го) и четных (22-го и 24-го) циклов, для которых есть наблюдения V_{pole} и ГКЛ, исследуется гипотеза о том, что изменения величины и знака V_{pole} определяют основные тенденции развития всего цикла модуляции. Началом цикла модуляции (ноль на шкале времени) мы выбираем максимум потока ГКЛ и сравниваем методом наложения эпох изменения V_{pole} , интенсивности ГКЛ и числа солнечных пятен (R_z). Традиционно с началом 11-летнего цикла в долговременной модуляции ГКЛ связывают минимум R_z .

При таком выборе ноля наглядно видно:

1) V_{pole} — в четных циклах период переполюсовки короче, быстрее достигаются и дольше сохраняются близкие к максимальным по модулю величины поля;

2) потоки ГКЛ - а) падают при уменьшении V_{pole} (преобладает конвективный перенос, нет явного разделения на четные и нечетные циклы), б) растут при увеличении V_{pole} , четко различаются временные профили ГКЛ в четных и нечетных циклах (преобладает дрейф, который увеличивает потоки ГКЛ при $A > 0$ и уменьшает при $A < 0$), в) остаются почти постоянными при $V_{pole} \sim const$.

3) R_z — пятенная активность (магнитные поля активных областей) несимметрична относительно периода переполюсовки V_{pole} она ранняя в четных циклах и поздняя в нечетных.

Обнаруженные тенденции позволяют качественно предсказать коридор возможных изменений V_{pole} и потоков ГКЛ на фазе спада 25-го цикла и в минимуме 25-26, а также попытаться восстановить по наблюдениям модуляции ГКЛ возможные значения V_{pole} в 1957-76 годах (конец 19-го и весь 20-ый цикл).

Исследование жесткостных спектров Форбуш-эффектов в 25-м цикле солнечной активности

Сухова П.А., Астапов И.И., Барбашина Н.С., Кузьменкова П.С., Мишутина Ю.Н.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,
PASukhova@mephi.ru*

В работе проведен анализ вариаций, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН (НИЯУ МИФИ). Конструкция годоскопа позволяет разделить скорость счета на независимые диапазоны зенитных углов с различными характерными жесткостями, что дает возможность использовать всего один детектор для исследования вариаций частиц с различной жесткостью. Разработан алгоритм для определения амплитуд форбуш-эффектов, регистрируемых в соответствующих диапазонах зенитных углов. Представлены результаты расчетов характерных жесткостей мюонного годоскопа, в том числе эффективных, средних и медианных жесткостей методом функций связи для различных диапазонов зенитных углов. Получены жесткостные спектры форбуш-понижений методом медианных жесткостей на фазе роста солнечной активности 25-го солнечного цикла. Реализованный метод основан на предположении, что зависимость внеземных вариаций от характерных жесткостей детектора является степенной. В работе изучены изменения показателя жесткостного спектра форбуш-понижений в зависимости от фазы эффекта.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект № FSWU-2023-0086).

**Секция ГЕО:
Геофизические эффекты КЛ и их влияние на климат**

Источники фоновых событий в детекторе LVD

Агафонова Н. (ИЯИ РАН), Юдин А. (НИЦ КИ, ИТЭФ), Мануковский К., Добрынина Е. (ИЯИ РАН) для LVD коллаборации

В работе проводится моделирование фоновых событий в Детекторе большого объема - LVD (Лаборатория Гран Сассо, Италия) от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции детектора. Показаны вклады в общий фон событий детектора от различных источников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

Измерения спектра фонового гамма-излучения во время возрастания при осадках

Балабин Ю. (ПГИ), Германенко А. (ПГИ), Гвоздевский Б. (ПГИ)

В лаборатории Космических лучей ПГИ разработан и создан спектрометр электромагнитного излучения на диапазон 0.1 – 4 МэВ. Использован спектрометрический кристалл NaI(Tl) размером 075x75 мм, тип получаемого спектра – дифференциальный, время накопления одного спектра 30 мин. Ежеминутно записывается вспомогательная информация: атмосферное давление и температура кристалла, с помощью GPS-приемника производится коррекция времени и определяются точные координаты точки наблюдения. Спектрометр калиброван по линиям цезия-137, калия-40, натрия-22, кобальта-60. В том числе было исследовано неполное рассеяние квантов при нефронтальном расположении источника излучения. Разрешение по линии 660 кэВ (цезий-137) составило 5 %. В Апатитах один экземпляр спектрометра работает в режиме непрерывного мониторинга. Второй экземпляр используется во время поездок для измерения в различных местностях.

С помощью спектрометра зафиксированы сотни событий возрастания гамма-излучения при осадках как в Апатитах, так и в средних широтах. Спектральные измерения показали, что изменения спектра при возрастаниях потока гамма-излучения носят континуальный характер и не обусловлены линиями радионуклидов. Хотя слабые линии некоторых радионуклидов семейства урана в осадках присутствуют, они не могут обеспечить эффект возрастания во всем диапазоне измерений. Подсчет квантов в линиях радионуклидов показывает, что их число на порядок меньше, чем общее количество квантов в измеряемом диапазоне, поступивших во время возрастания. Таким образом, измерения дифференциального спектра гамма-излучения при осадках однозначно показывают, что эффект возрастания потока гамма-излучения при осадках не обусловлен радионуклидами, присутствующими в осадках.

Летом 2023 г. на протяжении двух с половиной месяцев проводился мониторинг спектра фонового гамма-излучения в средних широтах (ст. Тацинская, Ростовская область). Зарегистрировано более десятка событий возрастания гамма-излучения при осадках, аналогичных возрастаниям, наблюдаемым в Апатитах. Представляла особый интерес возможность измерения спектров во время гроз, которые в южных регионах России не редкость. Анализ спектров, измеренных в Апатитах и в Тацинской, показал, что спектры при возрастаниях весьма близки, хотя пункты наблюдений отличаются геофизическими и климатическими условиями. Во время возрастаний гамма-излучения изменения в спектрах носят континуальный характер, влияние линий радионуклидов незначительное. Особенностью климата Ростовской области являются «сухие» грозы: высокая грозовая активность при отсутствии каких-либо осадков. Обнаружено, что «сухие» грозы не вызывают возрастания гамма-излучения и никак не проявляются в спектрах. В то же время даже небольшие осадки без какой-либо грозовой активности вызвали возрастание и соответствующие изменения в спектре. Следовательно, можно сделать уверенный вывод: сильные электрические поля между облаками, как и сама грозовая активность, не оказывают эффекта на поток гамма-излучения, возникающего в атмосфере от космических лучей.

Возможная связь бидекадных колебаний траекторий циклонов в северной атлантике с магнитным циклом Хейла и вариациями космических лучей

Веретененко С.В., Дмитриев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, Санкт-Петербург, s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Исследованы долговременные изменения широтного положения шторм-треков (направлений преимущественного перемещения) внетропических циклонов в Северной Атлантике. Обнаружено, что во всех исследуемых областях Северной Атлантики широта шторм-треков в холодное полугодие (октябрь-март) характеризуется ярко выраженными ~22-летними колебаниями, близкими к колебаниям полярности магнитных полей на Солнце (циклу Хейла). Показано, что обнаруженные бидекадные колебания обусловлены заметным сдвигом траекторий циклонов к северу на фазе спада и в минимумах четных (согласно Цюрихской нумерации) солнечных циклов, тогда как в нечетных циклах траектории незначительно смещаются к югу. Бидекадные колебания широты шторм-треков имеют наибольшую амплитуду и статистическую значимость в области Исландского минимума (области наибольшей повторяемости циклонов), где смещение траекторий к северу достигает $\sim 1-2^\circ$ относительно векового хода на 2-6-й гг. после максимума солнечного цикла. Показано, что смещение траекторий циклонов к северу на фазе спада четных циклов имеет место при более высоких значениях потоков галактических космических лучей (ГКЛ) по сравнению с нечетными циклами. Предположено, что возможной причиной бидекадных колебаний траекторий циклонов является интенсификация стратосферного полярного вихря, обусловленная изменениями химического состава (разрушением озона) и температурного режима средней полярной атмосферы при увеличении скорости ионизации в связи с вариациями ГКЛ.

Сравнительный анализ влияния техногенных и сейсмических факторов на скорость счета фоновых гамма-квантов в подземных экспериментах LSD и LVD

Агафонова Н. (ИЯИ РАН), Добрынина Е. (ИЯИ РАН), Якушев В. (ИЯИ РАН) от имени LSD и LVD Сотрудничества

В работе представлен анализ данных подземных сцинтилляционных детекторов, сконструированных одинаково, предназначенных для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер. Детектор LSD располагался в транспортном туннеле под горой Монблан на глубине 5200 м в.э. и собирал данные с 1982 по 1999 г. Детектор LVD находится в транспортном туннеле под Гран Сассо на глубине 3600 м в.э., работает с 1992 по н.в.

Низкоэнергетичным фоном экспериментов является естественная радиоактивность грунта и материалов детекторов. Являясь одинаковыми по методу регистрации, установки отличаются фоновыми условиями и количеством модулей – счетчиков, из которых они состоят: LSD содержит 72 счетчика, LVD – 280 (на 1997 год).

В результате данные представляются в виде темпа счета фоновых импульсов в 1 сек., нормированного на один счетчик, при энергетическом пороге < 1 МэВ. Обработаны данные установок LVD и LSD за 1997 год. На базе годичной статистики проанализированы источники, способные имитировать радоновые события. Среди возможных источников фоновых событий основным является техногенный, связанный с электроснабжением и работами по обеспечению деятельности подземной лаборатории. Проведен временной анализ темпа счета установок LVD и LSD опирающийся на регулярный (суточный и еженедельный) характер изменения активности техногенного источника, который показал, что фоновые радоновые события (не связанные с сейсмической активностью) возникают вследствие нарушения режима вентиляции подземных камер: отключения и последующего включения вентиляции, открывания больших дверей камеры LVD для ввоза-вывоза оборудования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

Изучение поведения концентраций ионов при увеличении активности радона в закрытом помещении

Ингерман С. (ИЯИ РАН) от имени Сотрудничества He-model

Для изучения вариаций космических лучей, темной материи и поиска безнейтринного бета распада под землей необходимо знать фон от радиоактивности грунта. В цепочках распада урана и тория рождается радон и торон, вариации которого связывают с различными гео и атмосферными эффектами. Радон испаряется из пор в стенах помещения и выносится в него пузырьками газа носителя. В докладе представлен анализ данных концентраций положительных и отрицательных ионов в подземном помещении на глубине 10 м. В помещении в обычных условиях наблюдается положительный избыток ионов (“+”/”-” =1.3). Это объясняется тем, что при испарении поровой воды положительный заряд уходит из жидкой фазы эффективнее отрицательных ионов. При внесении дополнительного радона (посредством искусственного источника или выброса газов) в не вентилируемое, не проветриваемое помещение наблюдается разное поведение положительно и отрицательно заряженных ионов. Концентрация положительно заряженных ионов растет до величины около $10\text{-}12 \times 10^3$ в см³, т.е. наблюдается эффект насыщения. Концентрация же отрицательно заряженных ионов остаётся пропорциональна активности радона в воздухе и может увеличиваться в сотни раз. Наблюдается переполюсовка (“-”/”+” >1).

Оценка магнитосферных и атмосферных параметров в период геомагнитной бури в марте 2023 г. по эффектам в космических лучах

Ковалев И., Кравцова М., Олемской С., Сдобнов В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН

По данным мировой сети станций нейтронных мониторов, Якутского комплекса мюонных телескопов и мюонного годоскопа УРАГАН в Москве проведен анализ магнитосферных и атмосферных вариаций космических лучей (КЛ) в марте 2023 г. Получены изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания, а также временной ход среднемассовой температуры атмосферы над пунктами регистрации мюонной компоненты вторичных КЛ. На основе полученных данных об изменении планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания в рамках осесимметричной модели магнитосферы оценены параметры основных магнитосферных токовых систем во время геомагнитной бури 23–25 марта 2023 г.

Расчет жесткости геомагнитного обрезания с помощью трейсинга на основе метода Бунемана-Бориса

Кручинин П. (НИЯУ МИФИ, kruchinin_01@inbox.ru), Малахов В. (НИЯУ МИФИ)

В докладе будет представлен метод определения жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО), который основан на трассировке заряженных частиц в магнитном поле Земли путём решения уравнения движения методом частица-в-ячейке по схеме Бунемана-Бориса. Применяемый алгоритм, в отличие от широко используемого метода Рунге-Кутты, позволяет решать уравнения движения в магнитном поле с сохранением кинетической энергии, благодаря чему, метод оказывается более точным и часто используется при решении задач в области физики плазмы.

С использованием разработанного метода построены карты ЖГО и их вариации для положительных частиц с разными магнитными жёсткостями. Тестирование разработанного метода расчёта ЖГО и оценка его точности основаны на сравнении с аналитическими значениями, с результатами предыдущих численных расчётов, а также воспроизведении известных эффектов. Так, расчёт геомагнитного обрезания проводился в поле идеального диполя, где известны аналитические решения, а также была восстановлена картина полутени в моделях главного и внешнего магнитного поля Земли.

В модели дипольного поля построены угловые распределения относительных ошибок ЖГО и показано, что ошибка метода, т.е. отклонение расчётных и аналитических значений, для низких широт составляет не более 1%. В модели поля IGRF построены картины полутени геомагнитного обрезания, выделены основные особенности, по которым проводилась проверка метода. Получено совпадение с результатами работы Смарта и Ши с точностью 0.1 – 0.2 ГВ. Исследована стабильность полутени и показано, что основные особенности изменяются плавно, либо остаются постоянными. Изучено влияние внешнего поля на структуру полутени в условиях спокойной магнитосферы и определено, что полутень занимает больший диапазон жесткостей, чем полутень в модели главного поля.

Результаты вычисления жесткости геомагнитного обрезания могут быть использованы: для разработки моделей радиационной обстановки; для улучшения отбора частиц галактических космических лучей в прецизионных экспериментах, таких как PAMELA и AMS-02; для проверки и улучшения моделей магнитного поля Земли.

Аномальные события в данных орбитального детектора ТУС

Лаврова М.В.

Объединённый институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, 141980, РФ

Главной целью эксперимента ТУС был поиск и исследование космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) с энергией $E > 70$ ЕэВ. Эксперимент ТУС стал первым детектором, зарегистрировавшим КЛПВЭ с космической орбиты с помощью измерения флуоресцентное и черенковское излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли. Вместе с тем он зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно. Уникальные и не похожие на ШАЛ аномальные события и являются предметом исследования, представленного в данной работе. В качестве их возможных источников рассматриваются события типа космологических гамма-всплесков (GRB), внеапертурные восходящие ШАЛ, сопровождаемые вспышками молний, а также атмосферные гамма-всплески (TGF).

Изучение корреляции электромагнитной солнечной активности и параметров распадов изотопов Fe-55 и Co-60

Майбуров С. (ФИАН)

Темпоральные вариации параметров распада радиоактивных ядер широко изучаются в последние годы, их наблюдение может быть сигналом о новых физических эффектах космического происхождения, в частности, вызванных влиянием Солнца. В ряде экспериментов зафиксированы годовые и суточные осцилляции скорости α - и β -распадов нестабильных ядер на уровне 0,05 % [1-2]. Также сообщалось о корреляции скорости обратного β -распада Mn-54 с солнечной активностью, в частности, с вспышками рентгеновского и γ -излучения [1]. Коллаборация БГТУ – ФИАН – ИНФ -ИТЭФ – ОИЯИ изучает корреляции скорости β -распада Co-60 и обратного β -распада Fe-55 с солнечной активностью [3]. В этих экспериментах гамма-кванты с энергией 1,1 и 1,3 МэВ от β -распада Co-60, регистрируются германиевым полупроводниковым детектором. Рентгеновские кванты с энергией 5,9 и 6,5 КэВ от распада Fe-55, регистрируются полупроводниковым Si-Pin детектором.

Возможное влияние солнечной активности на скорости распада данных ядер изучалось в течение 2015–2021 г.. Было обнаружено десять значительных отклонений скорости распада от ожидаемой скорости распада порядка $\sim 0,5$ % с длительностью от 50 до 188 часов [3]. Показано, что такие отклонения скорости в сторону уменьшения происходят за 48 – 80 часов до солнечных вспышек наивысшей интенсивности - класса M и X с достоверностью на уровне 95% [3]. Три аналогичных отклонения скорости распада Fe-55 и Co-60, аналогичным образом коррелирующие с солнечными вспышками класса X, были одновременно зарегистрированы в 2023 – 2024 гг. на установках установленных в ФИАН и ИТЭФ на расстоянии 3 км.

Рентгеновское и γ -излучение, образующееся во время солнечных вспышек, может представлять прямую опасность радиационного поражения для космонавтов и аппаратуры космических аппаратов, поэтому разработка системы предупреждения о солнечных вспышках может повысить радиационную безопасность космических полетов [4,5]. Проект SOLARIS планирует проведение одновременных измерений скорости распада ядер Fe-55, Co-60 на Международной космической станции и в наземных условиях и изучение их корреляций с солнечной активностью.

1. E. Fischbach et al. , Rev. Space Sci. 145, 285 (2009); *ibid.*, Astrop. Phys. 59,47 (2008)
2. E. Alekseev et al. , Phys. Part. Nucl. 47, 1803 (2016); *ibid.*, 49, 557 (2018)
3. S. Bogachev et al. J. Phys.: Conf. Series 1690, 012028-012035 (2020)

Метод расчёта анизотропных потоков высокоэнергичных заряженных частиц, захваченных во внутреннем радиационном поясе Земли, в приближении ведущего центра

Малахов В. (НИЯУ МИФИ), Леонов А. (ФИАН, НИЯУ МИФИ), Майоров А. (НИЯУ МИФИ), Михайлов В. (Shandong Institute of Advanced Technology, Jinan, China)

В докладе будет представлен метод восстановления анизотропного потока частиц высоких энергий ($E > 100$ МэВ) во внутреннем радиационном поясе Земли (ВРПЗ). Он может применяться к экспериментальным данным приборов, работающих в режиме event-by-event и способных восстанавливать направление прилёта зарегистрированных частиц и работающих. Метод предполагает расчет потоков на основе геомагнитных параметров, рассчитанных в точке ведущего центра.

Потоки заряженных частиц в ВРПЗ параметризуются набором геомагнитных единиц, тем или иным образом связанных с тремя компонентами движения заряженных частиц в дипольном магнитном поле. Типичный их набор включает параметр Мак'Илвайна L , экваториальный питч-угол α_{eq} , оба определяемые в ведущем центре, а также энергию E (которую тоже можно рассматривать как геомагнитный параметр, поскольку она влияет на траекторию частиц). Для частиц высоких энергий положение ведущего центра может быть удалено от точки регистрации настолько, чтобы геомагнитные параметры там значительно отличались от локальных. На практике это означает необходимость перехода от локальных непосредственно измеряемых параметров к параметрам в ведущем центре.

Основная идея предлагаемого подхода предполагает разделение угла раствора прибора на области, внутри которых поток можно считать изотропным. Это позволяет использовать более простой для расчёта геометрический фактор прибора G в качестве коэффициента пропорциональности между темпом счета прибора и потоком. В локальном случае форма каждой области зависит только от соответствующего экваториального интервала питч-углов и положения прибора. При переходе же к ведущему центру добавляется необходимость определять его положение и соответствующие геомагнитные параметры (L_{gc} , $\alpha_{eq,gc}$), доступный диапазон которых зависит от доступного диапазона локальных питч- и гируглов, а также доступного диапазона энергий (α_{loc}, β, E).

Для проверки метод был применен к экспериментальным данным PAMELA для восстановления спектров протонов, их питч-углового и радиального распределений на внутренней границе ВРПЗ. Оно показало хорошее согласие с ранее опубликованными результатами в соответствующих геомагнитных областях, полученными стандартной методикой.

Изменения химического состава мезосферы вызванные солнечными протонными событиями

Миронова И.А. , Доронин Г.Г., Розанов Е.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург,
i.a.mironova@srbu.ru*

Солнечные протонные события (СПС) воздействуют на атмосферу, вызывая дополнительные источники ионизации высокоширотной мезосферы и стратосферы. Максимальные скорости ионизации от таких солнечных протонных событий находятся на высотах стратосферы, но образование нечетных оксидов азота (NO_x) и водорода (HO_x), разрушающих озон, начинается на мезосферных высотах. Большинство исследований влияния СПС на характеристики средней атмосферы были основаны либо на моделировании, либо на наборах данных реанализа, а в некоторых исследованиях используются спутниковые наблюдения для проверки модельных исследований. Здесь мы изучаем влияние СПС на химические свойства стратосферы и мезосферы как в северном, так и в южном полушариях, используя измерения химического состава атмосферы спутником MLS Aura во время СПС, зарегистрированных в течение всего периода наблюдений MLS, начиная с 2004 до 2024 гг. Мы показываем, насколько сильно СПС могут разрушать полярные озоновые слои атмосферы Земли и изменять химический состав от мезосферы до стратосферы в зависимости от интенсивности солнечных протонных событий и эффектах в различных полушариях.

Эффекты в атмосфере связанные с СПС выполнены при поддержке СПбГУ, шифр проекта 116234986.

Эффекты в атмосфере связанные с высыпанием электронов сопровождающие СПС выполнены при поддержке проекта РФФ № 22-62-00048 в рамках задачи «Атмосферные эффекты высыпаний энергичных электронов из внешнего радиационного пояса: Часть III».

Метод восстановления границ и толщин облачного покрова в ночное время в районе расположения гамма-обсерватории TAIGA по данным спутниковых наблюдений

Ревякин А. (АлГУ), Мордвин Е. (АлГУ), Лагутин А. (АлГУ), Волков Н. (АлГУ), Раикин Р. (АлГУ), Бижанов Р. (АлГУ)

Сегодня экспериментальные установки уникальной гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), расположенной в Тункинской долине в ~50 км к западу от Байкала, выполняют регистрацию черенковского излучения (ЧИ) от широких атмосферных ливней (ШАЛ). Информация о наличии облачного покрова и его характеристиках в период наблюдений черенковских фотонов от ШАЛ важна на этапе восстановления параметров приходящего космического излучения. Также оперативные данные необходимы при планировании готовящихся сеансов измерений. В настоящее время характеристики облачности могут быть получены с использованием наземных приборов, например лазерных облакомеров. Другой подход получения данных об облачности, особенно актуальный в случае отсутствия наземных наблюдений, основан на измерениях инструментов, базирующихся на околоземных спутниковых платформах.

В работе предлагается метод для определения характеристик облачного покрова в ночное время по данным совместных измерений гиперспектрального ИК-зондировщика AIRS и радиометра MODIS, установленных на спутнике Aqua. Разработанный в ходе исследования оригинальный программный комплекс позволяет восстанавливать границы облачных слоев с использованием обозначенных дистанционных наблюдений.

Установлено, что наиболее вероятная высота нижней границы облачности ночью в районе расположения обсерватории TAIGA во время регистрации ЧИ для периода 2002 – 2016 гг. ~2.5 км над уровнем моря. Толщина большинства облачных слоев располагается в диапазоне от 0.5 до 4 км, причем в этом распределении наблюдается 2 максимума – на высоте 1 и 2.5 км. Полученные таким образом оценки высот и толщин облачного покрова согласуются с совместными измерениями радарной системы CPR спутника CloudSat и лидара CALIOP спутника CALIPSO, которые были выполнены в 2006 – 2011 гг.

Разработанный программный комплекс также может использоваться для восстановления характеристик облачности ночью по данным других спутниковых приборов, аналогичных связке AIRS и MODIS.

Антипротоны, захваченные во внутреннем радиационном поясе Земли, по данным эксперимента PAMELA

Роденко С. (НИЯУ МИФИ), Майоров А. (НИЯУ МИФИ), Алексеев В. (ЯрГУ)

С 2006 по 2016 годы на спутнике Ресурс-ДК1 проводился эксперимент PAMELA, посвященный изучению потоков заряженных частиц и античастиц в космическом излучении [1]. Хотя главной целью данного эксперимента было изучение галактических космических лучей, прибор мог регистрировать вторичные заряженные частицы в широком энергетическом диапазоне, включая антипротоны, захваченные во внутреннем радиационном поясе Земли.

В 2011 году по результатам измерений в эксперименте PAMELA впервые в околоземном космическом пространстве были обнаружены захваченные антипротоны вторичного происхождения, измерен их энергетический спектр в диапазоне энергий от 60 до 750 МэВ [2].

Таким образом, механизмы образования потоков вторичных частиц распространяются на рождение и захват античастиц магнитным полем Земли. В частности, механизм CRANbarD, применимый для антинейтронов и антипротонов, аналогичен механизму CRAND для нейтронов и протонов. Не исключается также процесс генерации антипротонов за счет прямого образования пар протон-антипротон в атмосфере [3, 4].

Детекторы эксперимента PAMELA позволяют регистрировать антипротоны низких энергий ($E < 1$ ГэВ) двумя независимыми методами: по данным магнитной трековой системы либо позиционно-чувствительного калориметра. В работе представлен метод идентификации антипротонов, основанный на использовании данных калориметра и поиске треков первичной частицы до взаимодействия в веществе детектора, а также вторичных частиц, рожденных в процессе аннигиляции. Для этого используется взвешенное преобразование Хафа [5, 6] – один из методов цифровой обработки изображений, – позволяющий искать на изображениях прямые линии, которыми в данном случае являются треки частиц. Такой метод показал более высокую эффективность по сравнению с предложенным ранее [7] и позволил получить более обеспеченные результаты измерения потока антипротонов во внутреннем радиационном поясе Земли по данным эксперимента PAMELA за весь период его работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

1. Picozza P. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. №. 4. P. 296.
2. Adriani O. et al. // *ApJL* 2011. 737: L 29 P. 5
3. Fuki M., *Int. J. Mod. Phys.* 2005. A, 20, P. 6739
4. Selesnick R.S. et al. *Geophys. Res. Lett.* 2007. 34, P. 20
5. Gonzalez C.R., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 2nd. 2002. P. 587.
6. Gonzalez C.R, Woods R.E. *Eddings Digital Image Processing Using Matlab*. 2009. P. 549.
7. Роденко С. А. и др. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2018. Т. 9. №. 5. С. 466.

Мониторинг солнечной активности с помощью сетевой системы

Скоркин В.М.

ИЯИ РАН, Россия, Москва, e-mail skorkin@inr.ru

Проведены круглосуточные измерения уровней гамма-, бета-, альфа- и нейтронного фона в приземном слое воздуха с помощью сетевой системы радиационного мониторинга. Регистрация импульсных излучений осуществлялась с помощью детекторов радиометра МКС-01Р в режиме реального времени с разрешением ≤ 1 мкс. Накопление, обработка и передача данных выполнялись микрокомпьютерным модулем через локальную сеть на сервер и в интернет. Накопление, обработка и передача данных выполнялось микрокомпьютерным модулем Raspberry Pi через локальную сеть на сервер и в интернет. Экспериментально установлено суточное изменение интенсивности измеряемых излучений. Наблюдается корреляция величин фоновых излучений и ультрафиолетового излучения, определяемого с помощью УФ-индекса Всемирной организации здравоохранения

Долговременные наблюдения вариаций природного потока тепловых нейтронов и продуктов распада радона в атмосфере Приэльбрусья

Стенькин Ю. (ИЯИ РАН), Джаппуев Д. (БНО ИЯИ РАН), Куджаев А. (БНО ИЯИ РАН), Кулешов Д. (ИЯИ РАН), Куринов К. (ИЯИ РАН), Михайлова О. (БНО ИЯИ РАН), Степанов В. (ИЯИ РАН), Щеголев О. (ИЯИ РАН)

Приведены результаты многолетних наблюдений природного потока тепловых нейтронов и продуктов распада радона в атмосфере в Приэльбрусье. Обнаружен значительный экспоненциальный рост продуктов распада радона в воздухе за последние 7 лет. При этом наблюдается также незначительный рост потока тепловых нейтронов и среднегодовой температуры в месте наблюдений – БНО ИЯИ РАН.

Исследование атмосферных процессов методом азимутального сканирования

Тимаков С.С., Петрухин А.А.

НИЯУ МИФИ, Россия, г. Москва, SStimakov@mephi.ru

Рассматривается новый метод наблюдения за слоем атмосферы между поверхностью Земли и уровнем генерации мюонов (около 15-17 км), заключающийся в анализе данных трех независимых супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН. Полученные в результате применения метода отклики сопоставляются с атмосферными явлениями путем их наложения на спутниковые изображения, а также с данными сети доплеровских метеорологических радаров. Предоставляемые ими изображения обладают бóльшим разрешением в интересующей нас области, включающей в себя Москву и её окрестности в окружности радиусом до 50 км с центром в НИЯУ МИФИ, благодаря чему можно анализировать отклики на менее масштабные события, чем атмосферные фронты.

Рассматриваются отклики на различные атмосферные явления в период весны 2024 года совместно с данными сети метеорологических радаров. Приводятся два возможных физических механизма появления откликов, открывающих перспективу применения метода для анализа как всего слоя атмосферы до высот генерации мюонов, так и для отдельного анализа нижней стратосферы.

Суточная волна приземного электрического поля «хорошей погоды» в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов

Хаердинов Н.

Институт ядерных исследований РАН, Россия, Москва, khaerdinovns@yandex.ru

В период 29.07-06.09 2019 г. (40 дней) включающего две магнитные бури, на установке «Ковёр» БНО ИЯИ РАН, наблюдалась смена знака суточной волны регистрации интенсивности мюонов с энергией более 100 МэВ. При этом средняя по периоду амплитуда стала незначительной, практически исчезнув. Но, проявились дополнительные вариации, ранее не замеченные. Так, например, отмечены возмущения коррелирующие с приземным полем. Во время последней магнитной бури (проявление на Земле с 27.08 по 5.09), по вариациям мюонов было измерено атмосферное поле грозового характера в хорошую погоду. На установке, при этом, регистрировался значительный ток по земле, прекратившийся с появлением свечения в ночном небе. Факт регистрации этого события ранее опубликован. Кроме того, замечено, что на протяжении всего исследуемого периода днём регулярно наблюдалось возмущение приземного поля, величиной порядка 1 кВ/м. Амплитуда этих возмущений, в последующие дни после регистрации случая сильного тока по земле заметно упала. Его появление одновременно с появлением значительной величины электрического поля в атмосфере, в хорошую погоду, можно объяснить генерацией разноимённых зарядов в горных условиях, под землёй в процессе тектонической активности. В этом случае вертикальная составляющая поля должна иметь протяжённость порядка высоты окружающих гор (3 км). По измерениям напряжённости приземного поля, и предполагаемой высоты его распространения, можно оценить влияние на интенсивность мюонов.

В работе, на основании экспериментальных данных, полученных в хорошую погоду, приводится суточная волна регистрируемого поля и вариаций интенсивности мюонов. Опираясь на ранее опубликованную модель формирования возмущений интенсивности мюонов под действием поля в атмосфере, для ряда предполагаемых высот его вертикальной составляющей, оценён вклад в суточную волну мюонов. Так, при средней амплитуде измеренного в хорошую погоду суточного возмущения приземного поля (-1.5 кВ/м) и высоте его вертикальной составляющей 2.5 км, ожидаемый вклад порядка -0.1 %, что сравнимо с характерным значением суточной волны частиц низкой энергии, регистрируемой на земле.

Проведённый анализ показывает возможность регулярного влияния электрических полей тектонического происхождения на регистрацию космических лучей, в условиях гор.

Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей

Юшков Б.Ю.

НИИЯФ МГУ, Россия, clef@srd.sinp.msu.ru

Одним из факторов, определяющих радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются галактические и солнечные космические лучи. Их потоки внутри магнитосферы во многом определяются эффектом геомагнитного обрезания. Этот эффект обычно количественно описывается величиной эффективной вертикальной жесткости обрезания. Данная величина непосредственно вычисляется численным интегрированием уравнений движения, что даже при современном быстродействии ЭВМ требует значительных затрат машинного времени и использования специальных программ. Поэтому в практических целях используются различные методы интерполяции или аппроксимации. Один из таких методов [1,2] обеспечивает вычисление эффективной вертикальной жесткости в околоземном космическом пространстве в зависимости от двух параметров – локального времени и Кр-индекса, характеризующего геомагнитную возмущенность. Метод использует базовые таблицы жесткости, рассчитанные в модели IGRF для высоты 450 км, формулу пересчета к произвольной высоте и поправочные коэффициенты, рассчитанные с использованием модели Цыганенко-89. Сравнение рассчитанных жесткостей с другими работами подтверждает корректность базовых таблиц. Показано, что для практических задач можно пренебречь вековым ходом поля IGRF, а также влиянием показателя спектра протонов на величину жесткости обрезания. Сравнение доз радиации, рассчитанных с помощью данного метода, с данными измерений на МКС подтверждает правильность расчетов жесткости обрезания.

1. Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. Метод расчета вертикальной жесткости обрезания в геомагнитном поле. Космические исследования. Т.47, №3, с.211-218 (2009)
2. R.A. Nymmik, B.Yu. Yushkov, M.I. Panasyuk, V.V. Petrukhin, A method for operative calculation of charged particle penetration into the LEO. Adv. Space Res. V.46, P.303-309 (2010)

Частотно-временной анализ, измеряемых гамма-квантов в детекторе LVD

Агафонова Н. (ИЯИ РАН), Якушев В. (ИЯИ РАН), Ашихмин В.В. (ИЯИ РАН), Добрынина Е.А. (ИЯИ РАН), Шакирьянова И.Р. (ИЯИ РАН), Еникеев Р.И. (ИЯИ РАН) от имени коллаборации LVD

Представлен частотно-временной анализ временных рядов скорости счета гамма-квантов, измеренных детектором LVD в Лаборатории LNGS, Италия. Детектор LVD предназначен для поиска нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике. Фоном детектора являются атмосферные мюоны и естественная радиоактивность грунта подземного зала и материалов детектора. Регистрируемое гамма-излучение от цепочек распада уранового и ториевого рядов, в основном, от распада ядер висмута, имеет энергии до 3 МэВ. На вариации гамма-квантов влияют гравитационные эффекты вращения Солнца и Земли, а также подвижки грунта от Сейсмических явлений в Итальянском регионе. С помощью дискретного Фурье-анализа были найдены солнечные и лунные суточные и полусуточные периоды, недельные, лунно-месячные и годовой периоды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

**Секция МН:
Мюоны и нейтрино**

Восстановление трековых событий по данным отдельной гирлянды черенковского водного детектора

Павел Безъязыков (НИИПФ ИГУ)

При гирляндной компоновке черенковского водного детектора представляют интерес низкоэнергетичные события, в значительном количестве регистрирующиеся на отдельных гирляндах установки. В данной работе представлена процедура восстановления зенитного угла таких событий с использованием рекуррентных нейросетей. Проведено восстановление для выборки модельных событий на гирлянде установки Baikal-GVD. Приведены оценки эффективности и точности методики.

Интенсивность групп мюонов, зарегистрированных в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР

Богданов А. (НИЯУ МИФИ), Барбашина Н. (НИЯУ МИФИ), Воробьев В. (НИЯУ МИФИ), Задеба Е. (НИЯУ МИФИ), Киндин В. (НИЯУ МИФИ), Кокоулин Р. (НИЯУ МИФИ), Компаниец К. (НИЯУ МИФИ), Коновалова А. (НИЯУ МИФИ), Маннокки Дж. (Астрофизическая обсерватория Турина, Италия), Петрухин А. (НИЯУ МИФИ), Тринкери Дж. (Астрофизическая обсерватория Турина, Италия), Хохлов С. (НИЯУ МИФИ), Шутенко В. (НИЯУ МИФИ), Юрина Е. (НИЯУ МИФИ), Яшин И. (НИЯУ МИФИ)

На установке НЕВОД-ДЕКОР (НИЯУ МИФИ) длительное время проводятся систематические исследования групп мюонов космических лучей в широком диапазоне зенитных углов. Уникальность эксперимента обусловлена наличием прецизионного трекового детектора, который позволяет измерять число и направление мюонов в группах.

В настоящей работе использован материал, накопленный за период с мая 2012 г. по июль 2023 г., из которого было отобрано более 100 тыс. групп мюонов с зенитными углами $\theta \geq 55^\circ$ и множественностью мюонов $m \geq 5$. Дополнительно из части материала были отобраны события в интервале зенитных углов $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$ с множественностью мюонов $m \geq 4$.

Разработанный ранее новый метод исследования ШАЛ по спектрам локальной плотности мюонов (СЛПМ) позволяет непосредственно сопоставлять экспериментальные данные и результаты расчетов мюонной компоненты ШАЛ. Ожидаемые СЛПМ вычисляются посредством свертки модели энергетического спектра первичных космических лучей (ПКЛ) с функциями пространственного распределения мюонов, полученными с помощью программы CORSIKA для четырех моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях: EPOS-LHC, QGSJET01D, QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3c и двух крайних предположений о массовом составе ПКЛ – протоны, ядра железа.

Анализ показал, что наблюдаемая интенсивность групп мюонов при энергиях первичных космических лучей ~ 1 ЭэВ и выше сравнима с ожидаемой только в предположении об экстремально тяжелом массовом составе ПКЛ. Этот вывод согласуется с данными нескольких (но не всех) экспериментов по изучению мюонной компоненты ШАЛ, но противоречит существующим измерениям глубины максимума развития ШАЛ в атмосфере X_{\max} флуоресцентным методом, которые свидетельствуют в пользу легкого состава.

Такое противоречие, вероятно, указывает на необходимость изменения баланса между мюонной и электронно-фотонной компонентами ШАЛ в существующих моделях адронных взаимодействий при высоких энергиях. Альтернативным объяснением полученных на установке НЕВОД-ДЕКОР результатов может быть предположение о более пологом энергетическом спектре ПКЛ в области сверхвысоких энергий, чем измеренный в экспериментах: Auger, Fly's Eye, HiRes, Telescope Array, на данные которых опирается модель спектра в наших расчетах. Появление новых физических особенностей, которые не учитываются современными моделями адронных взаимодействий, может быть обнаружено путем исследования энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ, например, измерения энерговыделений групп на установке НЕВОД-ДЕКОР.

Генерация нейтрино высоких энергий в струях от сверхмассивных черных дыр

Докучаев В. И., Прокопьев К. Э.

ИЯИ РАН, Российская Федерация, Москва, dokuchaev@inr.ac.ru, prokopenv@inr.ac.ru

Знаменитый процесс или механизм Блэндфорда-Знайека (Blandford R.D., Znajek R.L. Mon. Not. R. Astr. Soc. **179** 433 (1977)) объясняет возникновение релятивистских струй от аккрецирующей вращающейся черной дыры при протекании через горизонт событий черной дыры электрического тока. Работоспособность процесса Блэндфорда-Знайека в настоящее время подтверждена многочисленными численными симуляциями на самых мощных в мире суперкомпьютерах магнитогидродинамической аккреции в метрике вращающейся черной дыры Керра. В этом процессе ускорение протонов и других ядер вблизи горизонта событий черной дыры невозможно из-за энергетических потерь в мощном поле излучения аккреционного диска.

С физической точкой зрения удобным местом для ускорения протонов и других ядер оказываются истекающие из черной дыры релятивистские струи, ударяющие в плотные облака космической плазмы на пути распространения струй. Это должно происходить вдали от горизонта событий черной дыры, где мощность электромагнитного излучения аккреционного диска значительно ослабевает (на расстоянии ~ 1 парсека и больше). Здесь же происходит генерация нейтрино высоких энергий в качестве вторичных частиц.

Максимальная энергия этих нейтрино, оцениваемая по методу (критерию) А.М. Хилласа (Hillas A.M. Annu. Rev. Astron. Astrophys. **22** 425 (1984)), может достигать 10^{15} эВ. Такие нейтрино доступны для наблюдений большими нейтринными телескопами, такими, как на IceCube на Южном Полюсе и Байкальский нейтринный телескоп (Baikal Gigaton Volume Detector, Baikal-GVD).



Наблюдение оптическим телескопом Хаббл релятивистской струи от сверхмассивной черной дыры M87* в центре гигантской эллиптической галактики M87.

Регистрирующая система детектора на дрейфовых камерах для изучения околоразрывных групп мюонов

Задеба Е. (НИЯУ МИФИ), Трошин И. (НИЯУ МИФИ), Хомчук Е. (НИЯУ МИФИ), Компаниец К. (НИЯУ МИФИ), Воробьев В. (НИЯУ МИФИ), Шульженко И. (НИЯУ МИФИ), Газизова Д. (НИЯУ МИФИ), Николаенко Р. (НИЯУ МИФИ)

В экспериментальном комплексе НЕВОД создан крупномасштабный координатный детектор ТРЕК для исследования околоразрывного потока мюонов, генерируемых первичными частицами сверхвысоких энергий. Детектор основан на применении 264 многопроволочных дрейфовых камер, формирующих две координатные плоскости площадью 250 м² каждая. Регистрирующая система детектора основана на применении распределенной по кластерам дрейфовых камер сети время-цифровых преобразователей (ВЦП), разработанных в НИЯУ МИФИ и объединённых в единую локальную сеть. Система объединена с единой триггерной системой экспериментального комплекса НЕВОД. Данные мониторинга и эксперимента сервер детектора размещает в базе данных, также входящей в общий контур хранения данных комплекса. Испытана регистрирующая система и проведена тестовая серия измерений на внутренней плоскости детектора ТРЕК. В докладе приводится устройство регистрирующей системы и первые экспериментальные результаты, измеренные на внутренней плоскости детектора ТРЕК.

Модернизированный черенковский водный калориметр НЕВОД-96

**Каретникова Т.А., Амельчаков М.Б., Дмитриева А.Н., Киндин В.В., Кокоулин Р.П.,
Компаниец К.Г., Моргунов Е.С., Пасюк Н.А., Хохлов С.С., Шутенко В.В., Яшин И.И.**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,
TAKaretnikova@mephi.ru*

Основу экспериментального комплекса НЕВОД составляет черенковский водный калориметр (ЧВК), регистрирующий основные компоненты космических лучей. Для высокоточной регистрации групп мюонов в настоящее время на комплексе завершается создание координатного детектора ТРЕК площадью 250 м². Для улучшения калориметрических характеристик при совместной работе с детектором ТРЕК проводится модернизация ЧВК НЕВОД, в рамках которой планируется увеличить в 1.5 раза эффективный объем пространственной решетки черенковского детектора, а также расширить систему калибровочных телескопов.

К задачам исследования энерговыделения групп мюонов и стволов ШАЛ после модернизации калориметра планируется добавить исследование угловой зависимости потока мюонов во всем диапазоне зенитных углов. Для этого особое внимание уделяется вопросу разработки нового триггера для регистрации мюонов из нижней полусферы.

В докладе обсуждается новая конфигурация черенковского водного калориметра и эффективность нового триггерного условия.

Зенитно-угловая зависимость спектров локальной плотности мюонов ШАЛ вблизи горизонта

Кокоулин Р.П.¹, Барбашина Н.С.¹, Богданов А.Г.¹, Воробьев В.С.¹, Задеба Е.А.¹, Киндин В.В.¹, Компаниец К.Г.¹, Коновалова А.Ю.¹, Маннанова К.И.¹, Маннокки Дж.², Петрухин А.А.¹, Тринкери Дж.², Трошин И.Ю.¹, Хохлов С.С.¹, Шутенко В.В.¹, Юрина Е.А.¹, Яшин И.И.¹

¹ НИЯУ МИФИ, Россия, Москва, email: rpkokoulin@terphi.ru

² Туринская астрофизическая обсерватория, Италия, Турин

Интегральные спектры локальной плотности мюонов (СЛПМ) ШАЛ при больших зенитных углах восстановлены на основе экспериментальных данных ДЕКОР по группам мюонов, зарегистрированных в длительных сериях измерений в период с 03.05.2012 по 04.07.2023. Получены результаты для двух пороговых значений плотности мюонов 0.015 и 0.068 частиц/м², соответствующих регистрации в детекторе групп с множественностью не менее 3 и не менее 5 частиц. При зенитных углах меньше 80° зенитно-угловая зависимость СЛПМ хорошо описывается степенной функцией косинуса зенитного угла с показателем $\alpha \approx 4.5 - 4.8$. Однако при дальнейшем увеличении зенитного угла эта зависимость существенно изменяется и при углах 87 – 88° измеренные значения превышают указанную простую экстраполяцию примерно на порядок. Аналогичное изменение поведения зенитно-угловой зависимости СЛПМ выявлено и в результатах расчетов на основе моделирования мюонной компоненты ШАЛ с помощью программы CORSIKA. Очевидно, этот эффект связан с влиянием кривизны земной атмосферы на развитие ШАЛ вблизи горизонта.

Зарядовый состав мюонов по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа

**Дзапарова И.М.^{1,2}, Костюк М.Г.¹, Кочкаров М.М.¹, Куреня А.Н.¹, Петков В.Б.^{1,2},
Стриганов П.С.¹, Унатлоков И.Б.¹, Янин А.Ф.¹**

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия, inr@inr.ru*

²*Федеральное государственное бюджетное учреждение наук Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, admin@inasan.ru*

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп с момента своего запуска 07.11.1977 работает в непрерывном режиме. За время работы детектора накопился большой объем данных о работе отдельных счётчиков. Темп счёта счётчиков внешних плоскостей БПСТ отражает как геометрические особенности самого детектора так и особенности геологического строения горы Андырчи. При наглядном изучении темпа счёта счётчиков, можно заметить очевидное превышение количества срабатываний у баков расположенных непосредственно на железных перекрытиях второго и третьего этажей подземной камеры БПСТ.

В работе проводится оценка зарядового состава мюонов космических лучей в подземной камере детектора БПСТ. Методика обработки данных основана на разнице сечений каналов взаимодействия с железом для мю₊ и мю₋.

Фон одиночных мюонов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе

Дзапарова И.М.^{1,2}, Костюк М.Г.¹, Кочкаров М.М.¹, Куреня А.Н.¹, Петков В.Б.^{1,2},
Стриганов П.С.¹, Унатлоков И.Б.¹, Янин А.Ф.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия, inr@inr.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение наук Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, admin@inasan.ru

На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) с 1980 года ведется непрерывный поиск нейтринного сигнала от коллапса звезд в нашей Галактике и её окрестностях. Для стандартной модели коллапса пробеги позитронов будут укладываться в пределах одного счётчика, и ожидаемый сигнал на БПСТ будет выглядеть как серия одиночных срабатываний детекторов в течение нейтринной вспышки. В то же время на детекторе присутствует фон одиночных срабатываний счётчиков. В работе представлен расчёт вклада одиночных мюонов (без учёта фотоядерных реакций) в фон, путём создания геометрической модели всего массива счётчиков детектора БПСТ. Проводится оценка мюонной защиты детектора при имеющихся порогах счётчиков на внешних плоскостях.

Функции сбора, отклика и связи мюонного годоскопа УРАГАН

Кузьменкова П.С., Сухова П.А., Лагойда И.А., Астапов И.И.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,
PSKuzmenkova@mephi.ru*

Мюонный годоскоп УРАГАН – это координатно-трековый детектор, регистрирующий космическое излучение в широком диапазоне зенитных углов с точностью до 1° . Для анализа модуляций первичного излучения и совместных исследований с нейтронными мониторами важно знать функции сбора, отклика и связи детектора. В работе представлен расчет функции сбора мюонного годоскопа для первичных протонов и ядер гелия. Функция сбора для ядер гелия масштабируется для учета тяжелых ядер. Расчеты выполнены в программном обеспечении CORSIKA 7.7500 с моделями адронного взаимодействия FLUKA 2021.2.9 и QGSJET-II-04. Методом Монте-Карло учтены особенности геометрии детектора и его эффективность. Кроме того, обсуждается влияние заряженных частиц, отличных от мюонов, окружающей среды и эффекта снежного покрова на скорость счета детектора. Функция сбора верифицирована по данным прямых измерений спектра первичного излучения для двух способов коррекции на атмосферные эффекты: метода барометрических и дифференциальных температурных коэффициентов, метода главных компонент. С помощью функции отклика показано, что вклад гелия в скорость счета мюонного годоскопа составляет 19%, а более тяжелых ядер – 10%.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект №20-72-10170).

Три механизма генерации мюонов с энергией выше 100 ГэВ в широких атмосферных ливнях в области энергий $10^5 \div 10^7$ ГэВ

Лукьяшин А. (НИЯУ МИФИ, МГУ), Роганова Т. (НИИЯФ МГУ), Деденко Л. (НИИЯФ МГУ)

В работе рассматриваются три механизма генерации атмосферных мюонов. Во-первых, используется стандартный программный пакет CORSIKA, позволяющий рассчитывать параметры широких атмосферных ливней, в том числе и энергетические спектры мюонов на уровне наблюдения, на основе моделей взаимодействия частиц. Во-вторых, рассматривается механизм, когда протон первичного космического излучения при взаимодействии с ядрами атомов воздуха возбуждается до резонансного состояния. Энергетические спектры мюонов вычисляются в предположении распада резонансных состояний нуклона на заряженные π и K мезоны и нуклоны и последующего распада мезонов на мюоны и нейтрино. Наконец, в качестве третьего механизма оценивается роль распада резонансных состояний нуклона на нейтральные π и K мезоны и нуклоны, последующий распад мезонов на гамма-кванты и генерация этими гамма-квантами пар мюонов.

Измерение низкоэнергетической части спектра космических мюонов в диапазоне энергий до 1400 МэВ

Ляпин Д. (ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ), Губер Ф. (ИЯИ РАН), Морозов С. (ИЯИ РАН), Ивашкин А.

Представлены первые экспериментальные результаты по измерению низкоэнергетической части спектра космических мюонов в диапазоне энергий от нескольких МэВ до 1.4 ГэВ. Для этого использовался модуль адронного калориметра, изготовленного в ИЯИ РАН для ряда экспериментов в области релятивистской ядерной физики. Модуль калориметра с поперечными размерами 200x200 мм² представляет собой сэндвич-набор из 60 слоев пластмассового сцинтиллятора и свинца толщиной 4 мм и 16 мм, соответственно. Сбор и транспотрировка света осуществляется переизлучающим оптоволоконном, вклеенным в канавку в сцинтилляционной пластины. Считывание света с каждых из 6 последовательно расположенных в модуле сцинтилляционных пластин осуществляется отдельным кремниевым фотоумножителем. Модуль располагается вертикально, а все его четыре боковые стороны закрыты сцинтилляционными пластинами, которые используются как вето детектор мюонов, входящих под большими углами.

Приводится детальное описание установки и системы сбора данных, использованной для измерений. Обсуждается возможность масштабирования установки, а также ее практического применения для прикладных задач.

Гибридный мюонный годоскоп для мюонографии крупномасштабных объектов

Пасюк Н.А.¹, Борисов А.А.², Кожин А.С.², Компаниец К.Г.¹, Петрухин А.А.¹, Фахрутдинов Р.М.², Целиненко М.Ю.¹, Шутенко В.В.¹, Яшин И.И.¹

¹*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия, Москва, NARasyuk@mephi.ru*

²*Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Россия, Протвино*

В докладе приводится описание конструкции нового гибридного мюонного годоскопа, методик анализа, обработки и реконструкции событий, а также обсуждаются первые результаты эксперимента по мюонографии энергоблока Калининской АЭС.

Метод мюонографии основан на регистрации проникающей компоненты космических лучей (мюонов) и позволяет получать изображения различных объектов. С целью реализации метода мюонографии для исследования крупномасштабных объектов был создан новый широкоапертурный прецизионный гибридный мюонный годоскоп. Годоскоп состоит из двух взаимодополняющих регистрирующих систем – сцинтилляционного стрипового детектора и детектора на дрейфовых трубках. Каждый детектор представляет собой сборку чередующиеся однокоординатных плоскостей площадью $3 \times 3 \text{ м}^2$ с ортогональной ориентацией детектирующих элементов (стрипов и трубок), закрепленных в общей несущей раме, размещенной на подвижной поворотной платформе.

Приводится описание программно-аппаратного комплекса годоскопа, триггерной системы, методик реконструкции в дрейфовом и стриповом детекторах. Подробно обсуждается методика формирования мюонограмм крупномасштабных объектов.

С использованием годоскопа была проведена мюонография действующего энергоблока АЭС. Результаты измерений позволили получить мюонограммы реакторного здания и выявить основные элементы его конструкции в условиях штатной работы и в период плано-предупредительных работ при замене топлива.

Поиск гео-антинейтрино от ^{40}K по данным детектора Борексино

Синев В. (ИЯИ РАН), Безруков Л. (ИЯИ РАН)

Анализ последних данных, полученных детектором Борексино, демонстрирует наличие потока антинейтрино из Земли. Этот поток может быть ассоциирован с гео-антинейтрино от ^{40}K . При этом потоки солнечных нейтрино ложатся в модель малой металличности. В анализ данных были добавлены спектры антинейтрино от ядерных реакторов, гео-антинейтрино ^{238}U и ^{232}Th и ^{40}K .

Регистрация атмосферных мюонов с помощью детектора LVD

Слущкая О. (НИЯУ МИФИ), Агафонова Н. (ИЯИ РАН) от имени коллаборации LVD

Детектор LVD, находящийся под горным массивом Гран Сассо, регистрирует атмосферные мюоны со средней энергией 300 ГэВ. Модульная структура установки и глубина ее расположения позволяет детектировать мюоны в диапазоне глубин от 2.8 км до 12 км и во всем угловом диапазоне. В работе представлен современный статус эксперимента по регистрации мюонов разной множественности и направления. Описана процедура реконструкции мюонов больших энергий.

О возможности использования детектора WCDA эксперимента LHAASO в качестве парметра для измерения энергетического спектра атмосферных мюонов

Стенькин Ю. (ИЯИ РАН), Буткевич А. (ИЯИ РАН), Карпиков И. (ИЯИ РАН), Кулешов Д. (ИЯИ РАН), Куринов К. (ИЯИ РАН), Щеголев О. (ИЯИ РАН)

Проведено моделирование взаимодействий высокоэнергичных мюонов в большом водно-черенковском детекторе, работающем в составе эксперимента LHAASO. Показано, что параметры ячеистого детектора WCDA, размером 300x260x4.5 м³, массой ~350 кТ, близки к оптимальным параметрам парметра для измерения энергетического спектра около горизонтального потока атмосферных мюонов с энергиями выше ~100 ТэВ.

Применение многопроволочных дрейфовых камер, экранированных слоями поглотителя, для исследования околортикальных мюонов высоких энергий

Трошин И.Ю., Воробьев В.С., Николаенко Р.В., Задеба Е.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, IYTroshin@mephi.ru

Описана структура детектора с использованием массива многопроволочных дрейфовых камер, экранированных слоями стального поглотителя. Эффективная площадь детектора составляет 13 м². Он предназначен для исследования одиночных и многомюонных событий в диапазоне зенитных углов от 0° до 60°. С использованием программного пакета Geant4 проведено моделирование, по результатам которого определены пороги регистрации заряженных частиц и показана возможность изучения групп мюонов с использованием метода спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ) для околортикального направления.

Поиск нейтринных событий на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе в совпадении с гамма-всплесками

Унатлоков И. (БНО ИЯИ РАН), Дзапарова И. (БНО ИЯИ РАН), Костюк М. (БНО ИЯИ РАН), Кочкаров М. (БНО ИЯИ РАН), Куреня А. (БНО ИЯИ РАН), Петков В. (БНО ИЯИ РАН), Стриганов П. (БНО ИЯИ РАН), Янин А. (БНО ИЯИ РАН)

В настоящее время на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) продолжается отбор нейтринных событий из нижней полусферы. Эти события представляют собой мюоны с зенитным углом $>100^\circ$. В пределах зенитных углов $>100^\circ$ отсутствует фон от мюонов, проникающих под землю из атмосферы, поэтому можно считать, что эти мюоны являются результатом взаимодействия мюонных нейтрино с веществом под установкой. Делается предположение что за исключением порога этой реакции мюону передается вся энергия нейтрино. Пороговая энергия регистрируемых на БПСТ мюонных нейтрино определяется энергетическими потерями пересекающих телескоп мюонов и составляет 1 ГэВ.

Осуществляется анализ данных БПСТ на наличие нейтринных событий, совпадающих по времени и координатам с событиями от действующих космических гамма-телескопов (Fermi GBM, LAT, Swift BAT, INTEGRAL). Поиск ведется во временном окне ± 500 секунд от момента гамма-вспышки. Для наиболее мощных вспышек проводится подробный анализ данных БПСТ с использованием более широкого временного интервала. В случае отсутствия нейтринного сигнала проводится оценка верхнего предела на поток мюонных нейтрино от данного источника. Сформирована процедура обработки данных при поиске совпадений.

Мобильный мюонный годоскоп для мюонографии различных объектов

Целиненко М.Ю., Гуделев М.П., Компаниец К.Г., Мирхеев С.И., Пасюк Н.А., Петрухин А.А., Хомчук Е.П., Шутенко В.В., Яшин И.И.

НИЯУ МИФИ, Россия, Москва, MYTselinenko@mephi.ru

В настоящее время широкое распространение получил метод мюонографии (по аналогии с рентгенографией) внутренней структуры различных природных и искусственных объектов с помощью естественного потока мюонов космических лучей. Для реализации метода в НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ разработан мобильный мюонный годоскоп (ММГ), конструкция которого представляет собой многоканальную детектирующую систему, состоящую из однопроекционных координатных плоскостей (ОКП) площадью около 1 м².

Каждая ОКП состоит из двух слоев сцинтилляционных стрипов (96 шт. в каждом) на основе полистирола с добавками р-терфенила и РОРОР. Светосбор осуществляется с помощью спектросмещающих волокон (файберов) на кремниевые фотоумножители (SiPM). Внутри каждой ОКП слои сдвинуты относительно друг друга на половину ширины стрипа. Сигналы с SiPM считываются с помощью плат на базе 32-канальной ASIC Petiroc2A (6 плат на одну плоскость). Шесть однопроекционных плоскостей сформированы в три пары с ортогональной ориентацией стрипов и закреплены на общей несущей раме.

Для проверки работоспособности и эффективности регистрирующей системы ММГ был разработан и собран прототип, состоящий из 32 стрипов и SiPM, закрепленных в едином корпусе со стандартной платой считывания на 32 канала регистрации. Прототип тестировался на супермодуле мюонного годоскопа УРАГАН в потоке мюонов с известными треками.

В докладе рассматриваются конструкция ММГ, система регистрации и характеристики регистрирующих элементов детектора, полученные в результате предварительного тестирования на стендах НОЦ НЕВОД, а также результаты тестирования прототипа регистрирующей системы на детекторе УРАГАН.

**Секция СКЛ:
Солнечные космические лучи**

Жесткое гамма-излучение солнечных вспышек по данным экспериментов ГАММА-1, АВС-Ф/КОРОНАС-Ф, НАТАЛЬЯ-2М/ФОТОН и LAT/Fermi

Архангельская И.В., Архангельский А.И., Коротков М.Г., Юркин Ю.Т.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Россия, Москва, IVArkhangelskaya@mephi.ru

Во время солнечных вспышек может возникать несколько видов жесткого гамма-излучения различной длительности по отношению к продолжительности низкоэнергетического рентгеновского излучения. В 1 случае фотоны высоких энергий могут генерироваться во время быстрой фазы короткой вспышки, и длительность излучения будет совпадать в пределах погрешностей различных диапазонов (prompt emission). Во 2 ситуации высокоэнергетическое γ -излучение может быть задержанным на временной промежуток от нескольких до нескольких десятков минут относительно окончания быстрой фазы низкоэнергетического рентгеновского излучения (delayed emission). В 3 случае (prompt delayed) начало жесткого γ - и низкоэнергетического рентгеновского излучения совпадает, но его продолжительность существенно больше, чем длительность быстрой фазы. Вспышки этих трех типов регистрировались еще в 80х гг прошлого столетия в эксперименте GRS/SMM (γ -кванты в области 100 МэВ $E < 140$ МэВ впервые регистрировались от вспышек 21.06.1980 (GOES класс X2) и 3.06.1982. (GOES класс X8). Далее жесткое γ -излучение от вспышек типов 1-3 наблюдалось в экспериментах COMPTEL/CGRO и ГАММА-1. Впервые жесткие γ -кванты в диапазоне $E > 2$ ГэВ были зарегистрированы γ -телескопом ГАММА-1 в 1991 г от вспышек 26.03 (GOES класс X4.7) и 15.06 (GOES класс X4.2). Прибором COMPTEL/CGRO было зарегистрировано несколько подобных событий с энергией $E > 1$ ГэВ в период 5.04.1991–4.06.2000. Далее несколько десятков солнечных вспышек типов 1-3 в диапазоне до 10 - 250 МэВ наблюдались аппаратурой АВС-Ф (ИСЗ КОРОНАС-Ф, период действия 31.07.2001- 6.12.2005). Эксперимент FERMI/LAT, начавшийся с 11.06.2008, функционирует в настоящее время. В нем было зарегистрировано более 50 вспышек этих типов в диапазоне высоких энергий $E > 100$ МэВ. Четвертый тип жесткого γ -излучения (faint flares HE) в диапазоне до ~40 МэВ впервые был обнаружен аппаратурой АВС-Ф/КОРОНАС-Ф во время некоторых вспышек классов В и С. Несколько таких событий наблюдались прибором НАТАЛЬЯ-2М (ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН, период функционирования 20.02.2009-30.11.2009). Вспышки этого типа регистрировались и по данным LAT/Fermi.

В представленной работе обсуждаются свойства временных профилей и энергетических спектров солнечных вспышек всех четырех типов по данным экспериментов ГАММА-1, АВС-Ф/КОРОНАС-Ф, НАТАЛЬЯ-2М/ФОТОН и LAT/Fermi. Максимальная энергия гамма-излучения для вспышек первых этих трех составляет несколько ГэВ, четвертого – несколько десятков МэВ. Не обнаружено корреляции между характеристиками вспышек в низкоэнергетическом рентгеновском диапазоне (классом вспышки и ее длительностью по GOES) и наблюдавшейся во время вспышки максимальной энергией, поведением временных профилей в различных диапазонах, соответствием временных профилей эффекту Ньюперта и присутствием СМЕ после вспышки (например, наблюдался СМЕ, ассоциированный со вспышкой 7.01. 05 (GOES класс B2.3).

Что регистрирует нейтронный монитор во время ШАЛ?

Балабин Ю. (ПГИ), Германенко А. (ПГИ), Петков В. (ИЯИ РАН), Джаппуев Д. (ИЯИ РАН), Гвоздевский Б. (ПГИ), Куджаев А. (ИЯИ РАН), Михайлова О. (ИЯИ РАН), Хаджиев М. (Высокогорный геофизический институт), Романенко В. (ИЯИ РАН)

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (п.Нейтрино, КБР) в непосредственной близости от установки «Ковер-2» находится нейтронный монитор. Нейтронный монитор (НМ) является детектором нуклонной компоненты вторичных космических лучей, возникающих в атмосфере. Нижний энергетический порог для первичных частиц у НМ составляет ~500 МэВ. «Ковер-2» предназначен для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Энергетический порог для «Ковра» ~50 ТэВ. Система сбора данных НМ обеспечивает запись времени появления каждого импульса в детекторе с точностью 1 мкс. Точность измерения времени появления ШАЛ на «Ковре» равна 1 мс. Указанные приборы создавались в разное время, имеют значительно различающиеся системы измерения и записи времени, поэтому их синхронизация представляла серьезную проблему.

В лаборатории Космических лучей ПГИ был разработан алгоритм синхронизации данных, включающий создание дополнительного канала в системе сбора НМ. Это позволило с точностью 1 мс привязать данные этих двух приборов. Синхронизация дает возможность находить и анализировать эффект адронной компоненты ШАЛ на нейтронном мониторе. На аппаратном уровне электрические импульсы от «Ковра» (ТРИГГЕР), вырабатываемые его системой регистрации при наличии ШАЛ, поступают в систему сбора нейтронного монитора как дополнительный канал. При последующей программной обработке эти импульсы от «Ковра» служат указателями, запускающими модуль поиска и выделения событий множественности на нейтронном мониторе. Обработаны результаты наблюдений более четырехсот дней за период 2020-2022 г, получены массивы событий множественности различной длительности, которые сопровождалась регистрацией широкого атмосферного ливня на «Ковре». Выполнен анализ этих событий множественности, проведено сравнение подобных событий множественности вне действия ШАЛ.

Синхронные события множественности на двух нейтронных мониторах

Балабин Ю. (ПГИ), Германенко А. (ПГИ), Гвоздевский Б. (ПГИ)

На станции космических лучей в Апатитах мониторинг космических лучей выполняют стандартный нейтронный монитор (18-НМ-64) и бессвинцовая секция (4-НМ-64). Различия двух приборов состоят в энергетических диапазонах, в которых они эффективно регистрируют нейтроны. Стандартный нейтронный монитор (НМ) эффективен для частиц с энергиями от 50 МэВ до ГэВ и более. Бессвинцовая секция (БСНМ) представляет собой ряд счетчиков, окруженных полиэтиленом толщиной 2.5 см, она чувствительна к нейтронам с энергиями от тепловых до сотен кэВ. Размещаются оба прибора в одной комнате, не более 2 м между ними. Оба прибора включены в единую систему регистрации данных. Высокоскоростная система регистрации, разработанная в лаборатории Космических лучей, фиксирует появление каждого импульса с точностью до 1 мкс.

Событие множественности на НМ – это регистрация M нейтронов за время порядка 1-2 мс, тогда как средний интервал между регистрациями нейтронов составляет ~ 9 мс для НМ и 100 мс для БСНМ. Вероятность такого события в результате случайного совпадения весьма мала и быстро убывает с ростом числа регистрируемых нейтронов, так что при $M > 5$ случайными совпадениями можно пренебречь: расчет показывает, что их доля не менее чем на 2 порядка меньше. Считается, множественные нейтроны возникают как в свинцовой оболочке НМ от одиночной высокоэнергичной частицы, так и образуются в атмосфере, в том числе при ШАЛ. Во втором случае их называют адронными ливнями. Отметим, что внешняя полиэтиленовая защита НМ препятствует выходу наружу нейтронов, образовавшихся в свинце, что обеспечивает события множественности до $M = 200$. События множественности на НМ детально были изучены ранее на четырех НМ: Апатиты, Баренцбург, Баксан, Москва. На этих НМ установлены одинаковые системы сбора данных. На всех НМ события множественности имеют одинаковые временные профили, близкие спектры. Для БСНМ события множественности довольно редки, потребовалось накопить данных за несколько лет, чтобы с приемлемой точностью получить характеристики таких событий: длительность, временной профиль, спектр. Проведенная обработка данных НМ и БСНМ за ряд лет (2017-2023) показала существенные различия в событиях множественности на этих приборах. Предложено объяснение этим различиям.

Прогноз протонных возрастаний на основе данных о солнечных вспышках и выбросах

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Белов С.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, nshlyk@izmiran.ru

Связь солнечных вспышек, корональных выбросов массы и зарегистрированных у Земли возрастаний потока протонов на данный момент является хорошо доказанной и описанной. Разными авторами составлены подробные каталоги солнечных протонных событий за длительный период времени, а также найдены статистические связи между величинами потока протонных возрастаний и характеристиками их солнечных источников, включая балл рентгеновской вспышки, ее положение на диске, начальную скорость выброса и т.д. [см., например, 1-3 и ссылки в них]. На основе постоянно пополняемой базы данных рентгеновских вспышек и протонных событий, созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН, были проанализированы протонные события разной величины и их солнечные источники за период с 1996 по 2023 гг. Получены корреляционные связи между их характеристиками, рассчитаны соответствующие регрессионные коэффициенты.

На основе полученных данных была построена эмпирическая модель, позволяющая оценить вероятность регистрации протонного возрастания у Земли и максимальную величину потока частиц разных энергий, используя данные о величине, длительности и координатах солнечной вспышки, а также скорость соответствующего коронального выброса массы. Данная модель применяется в ежедневной работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН.

Литература

1. Kurt V., Belov A., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Statistical analysis of solar proton events // *Annales Geophysicae*, 2004, V. 22, p. 2255–2271.
2. Belov A. Properties of solar X-ray flares and proton event forecasting // *Advances in Space Research*, 2009, V. 43, p. 467–473.
3. Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // *Геомагнетизм и Аэронаука*, 2017, т. 57, № 6, с. 783–793.

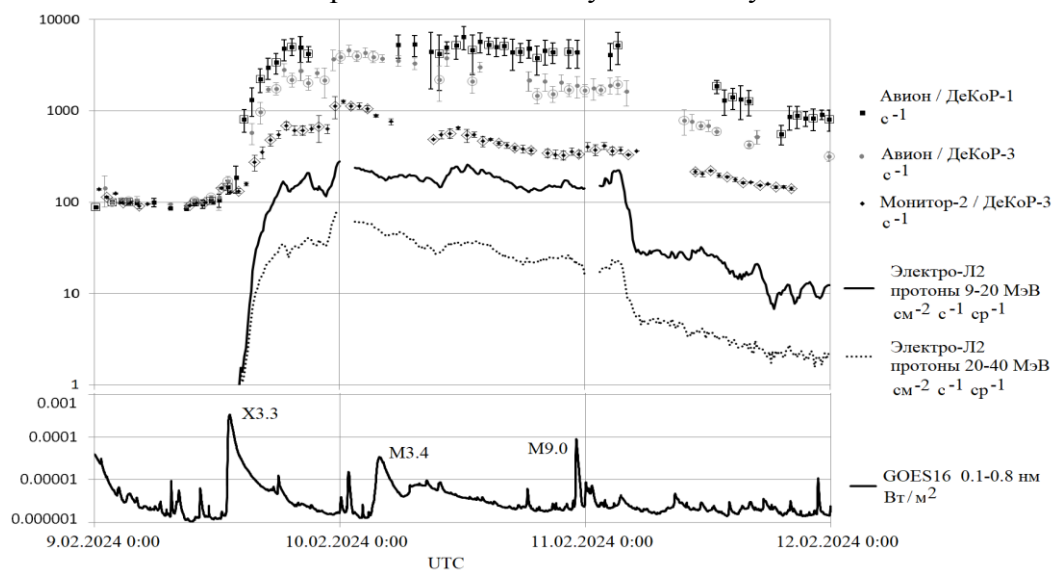
Солнечные космические лучи и жесткое рентгеновское излучение солнечных вспышек в первой половине 2024 г. по данным экспериментов на спутниках Московского университета формата кубсат

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Июдин А.Ф., Еремеев В.Е., Зайко Ю.К., Калегаев В.В., Мягкова И.Н., Оседло В.И., Перетягко О.Ю., Свертилов С.И., Яшин И.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва, aabboogg@srd.sinp.msu.ru

Солнечные космические лучи (СКЛ) представляют интерес как с фундаментально-научной, так и с прикладной точек зрения, как один из факторов космической погоды. В настоящем докладе рассматриваются результаты наблюдений СКЛ с помощью спутников типа кубсат с регистрирующей аппаратурой Московского университета, выведенных 27 июня 2023 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой ~ 550 км и наклоном 98° . Это спутник Авион формата 6U, а также несколько кубсатов проекта Монитор формата 3U. В качестве полезной нагрузки на каждом из них установлены сцинтилляционные детекторы для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения и заряженных частиц. Они позволяют, в том числе, проводить мониторинг потоков СКЛ по заполнению областей полярных шапок солнечными частицами, а также наблюдать в жестком рентгеновском излучении солнечные вспышки, с которыми связаны эти потоки СКЛ.

Основные результаты работы получены для событий СКЛ февраля и мая 2024 г. В качестве примера на рисунке показаны данные наблюдения СКЛ 9-12 февраля 2024 г. на кубсатах Авион и Монитор-2. Отложены усредненные скорости счета за каждое прохождение полярной шапки. Обведенные точки соответствуют южным шапкам. Приведены также данные российского геостационарного спутника Электро-Л2. Нижняя панель рисунка (данные GOES16) отображает произошедшие в это период солнечные вспышки, самая мощная из которых (класс X3.3, максимум 9.02.2024 г. 13:14 UT) наблюдалась также в жестком рентгеновском излучении на кубсате Авион.



Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-42-10005, <https://rscf.ru/project/23-42-10005/>

Вариации характеристик средней атмосферы северного полушария в ходе солнечных протонных событий января 2005 года

Веретененко С.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, Санкт-Петербург, s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Исследованы изменения характеристик средней атмосферы северного полушария во время серии солнечных протонных событий (СПС) 15-20 января 2005 года по данным архива MERRA-2 [1]. Обнаружено, что после начала серии произошло значительное увеличение максимальных и зонально осредненных значений скорости зонального ветра в широтной области 50-70°N на высотах ~15-36 км (изобарические уровни 100-5 гПа), свидетельствующее об интенсификации стратосферного полярного вихря. Наибольшее возрастание скорости ветра (на ~20 м/с) наблюдалось 19 января на высотах 10-7 гПа (~31-33 км). Увеличение скорости ветра сопровождалось понижением температуры в области выше 60°N. После усиления зонального ветра во время серии СПС (15-20 января), в последней декаде января произошло его резкое ослабление, сопровождавшееся быстрым повышением температуры на ~15-20° на высотах 30-40 км, что указывает на начало внезапного стратосферного потепления минорного типа. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии резких возрастаний скорости ионизации, обусловленных мощными солнечными протонными событиями, на состояние зимней полярной стратосферы.

1. Gelaro R. et al. // J. Clim. 2017. V.30. P. 5419.

Некоторые особенности солнечного протонного события 27.08.2022

Власова Н.А.¹, Базилевская Г.А.², Гинзбург Е.А.³, Дайбог Е.И.¹, Капорцева К.Б.^{1,4}, Логачев Ю.И.¹, Мягкова И.Н.¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелевича Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва, nav19iv@gmail.com

² Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии наук, Россия, г. Москва, bazilevskayaga@lebedev.ru

³ Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Россия, г. Москва, e_ginzburg@mail.ru

⁴ Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва, kb.kaportceva@physics.msu.ru

Представлены результаты исследования солнечного протонного события 27.08.2022, имеющего ряд особенностей: первые частицы пришли в околоземное пространство примерно через 1,5 часа после солнечной вспышки рентгеновского класса M4.8, произошедшей в активной области с гелиокоординатами S17W79 и сопровождавшейся широким (угол раствора – 360°) и быстрым (скорость – 1261 км/с) корональным выбросом массы; дисперсия прихода протонов различных энергий не наблюдалась; на ветви роста потока солнечных протонов наблюдался ряд локальных максимумов; временные профили потоков солнечных протонов с энергией >10 МэВ и >30 МэВ на околоземной орбите были подобными профилям, измеренным в точке Лагранжа L1, но с временным запаздыванием, необходимым для преодоления солнечным ветром расстояния между точкой L1 и Землей. Работа сделана по экспериментальным данным, полученным с космических аппаратов, расположенных в межпланетном пространстве (ACE, DSCOVR), на околоземной полярной орбите на высоте 850 км (Метеор-M2) и на геостационарной орбите (GOES-16). Проведен сравнительный анализ пространственно-временной динамики потоков солнечных электронов и энергичных протонов и вариаций плотности и скорости солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля 27.08.2022. Показано, что все особенности временных профилей потоков частиц определяются приходом солнечных частиц внутри сложной гелиосферной структуры, состоящей из нескольких последовательных коротирующих областей взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

GLE73 (28 октября 2021 г.) – первое событие в 25-м цикле солнечной активности: спектры и анизотропия

Ковалев И. (ИСЗФ СО РАН), Кравцова М. (ИСЗФ СО РАН), Сдобнов В. (ИСЗФ СО РАН), Олемской С. (ИСЗФ СО РАН)

По данным наблюдений космических лучей (КЛ) на мировой сети нейтронных мониторов методом спектрографической глобальной съемки проведено исследование наземного возрастания интенсивности КЛ 28 октября 2021 г. (GLE73). Представлены дифференциальные жесткостные спектры ускоренных протонов и пространственное распределение частиц с жесткостью 2 ГВ в течение GLE73. Оценена предельная жесткость ускоренных частиц, которая составила $\sim 3\text{--}5$ ГВ.

О возможности краткосрочного прогноза солнечных протонных событий по величине флюенса рентгеновского излучения во время солнечной вспышки

Коновалихин А.М.¹, Власова Н.А.², Калегаев В.В.³

¹Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, konovalikhin.a21@physics.msu.ru

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, nay19iv@gmail.com

³Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, klg@dec1.sinp.msu.ru

Солнечное протонное событие (СПС) – одно из наиболее важных проявлений солнечной активности. Потоки энергичных солнечных заряженных частиц не только сами создают радиационную угрозу экипажам и технике космических миссий, но и являются возможным предвестником геомагнитных бурь, инициируемых совокупным действием на магнитосферу Земли солнечного ветра и магнитного поля коронального выброса массы. СПС – очень сложные, разнообразные и плохо предсказуемые явления. Поэтому актуальным является краткосрочный прогноз солнечных протонных событий, основанный на экспериментальных данных по рентгеновскому излучению Солнца во время вспышек, которое регистрируется на геостационарных спутниках серии GOES через ~8 минут после вспышки. Представлены результаты исследования по поиску связи между флюенсом рентгеновского излучения Солнца во время солнечной вспышки в диапазоне длин волн 0,1–0,8 нм и солнечным протонным событием 24 цикла солнечной активности (СА).

Получены следующие результаты:

- не найдено прямой зависимости между потоком протонов с энергией ≥ 10 МэВ и флюенсом рентгеновского излучения для всех СПС 24 цикла СА;

- для вспышек M и X классов, расположенных в диапазоне оптимальных гелиодолгот W35-W80, также не найдено прямой зависимости между потоком протонов и флюенсом рентгеновского излучения;

- результаты сравнительного анализа вспышек M и X классов, расположенных в диапазоне гелиодолгот W35-W80, ассоциированных и неассоциированных с СПС, показали, что в среднем ассоциированные с СПС вспышки имеют бóльшие класс, флюенс рентгеновского излучения и длительность, но по величине флюенса рентгеновского излучения во время солнечной вспышки нельзя точно предсказать СПС.

Показано, что существуют вспышки, имеющие большой рентгеновский класс и флюенс и расположенные в оптимальном диапазоне гелиодолгот, но не приводящие к СПС. В периоды 27.12.2013– 07.01.2014 и 17-29.02.2024 (максимумы 24 и 25 циклов СА) не было зарегистрировано потоков солнечных протонов, но наблюдались мощные солнечные вспышки, которые сопровождалась слабыми корональными выбросами массы.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

Моделирование взаимодействия протонов солнечных космических лучей с атмосферой Земли во время событий SEP

Маурчев Е.А., Шлык Н.С., Диденко К.А., Абунина М.А., Абунин А.А.

ИЗМИРАН, Россия, г. Москва, г. Троицк, maurchev@izmiran.ru

Работа посвящена исследованию взаимодействия протонов солнечных космических лучей с энергией $E > 10$ МэВ с средней атмосферой Земли в диапазоне высот от 10 до 100 км. Расчеты проводились при помощи модели RUSCOSMICS, основанной на пакете для разработки программ GEANT4 и позволяющей задавать параметры геометрии атмосферы, характеристики источника первичных частиц, а также определять детекторы частиц вторичных космических лучей. В качестве объектов исследования были выбраны несколько событий SEP со значениями интегральных потоков ($E > 10$ МэВ), превышающими порог 50 rfu ($P_{10} > 50$ rfu). Выбор таких пороговых энергии и потока обусловлен предположением, что уже при этих значениях может наблюдаться существенный вклад в оставленную частицами энергию в рассматриваемом диапазоне высот. Интегральные потоки протонов оценивались при помощи космического аппарата GOES, также были получены дифференциальные энергетические спектры при помощи аппроксимации данных из дифференциальных каналов спутника. Эти спектры использовались для параметризации энергетических характеристик источника первичных протонов в модели RUSCOSMICS. В качестве результатов получены высотные профили скорости ионизации. Показано влияние значения жесткости геомагнитного обрезания на значение оставленной частицами энергии в атмосфере и, соответственно, на форму профилей.

Солнечные супервспышки за последние 15 тысяч лет: миф или реальность?

Васильев Г.И.¹, Константинов А.Н.², Остряков В.М.², Павлов А.К.¹

¹ *Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, gennady.vasilyev@mail.ioffe.ru*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, Valery.Ostryakov@mail.ioffe.ru*

Рассмотрены 13 известных случаев быстрого (1 – 5 лет) значительного возрастания концентрации радиоуглерода в кольцах деревьев. Обсуждаются возможные причины таких событий: солнечная супервспышка, галактический гамма-всплеск, сжатие гелиосферы под воздействием неоднородностей межзвездной среды. Обсуждается надежность экспериментальных результатов, показано, что не все из них достоверны. Некоторые случаи могут быть объяснены 11-летним солнечным циклом. Особое внимание уделено критике гипотезы о том, что все события – результат солнечных супервспышек. Для этого рассмотрены данные по содержанию изотопов гелия в полярном льду, которые в некоторых случаях свидетельствуют в пользу гипотезы о «внешней» модуляции потока космических лучей за счет сжатия гелиосферы неоднородностями межзвездной среды. Результаты наблюдений космического телескопа «Кеплер» супервспышек на солнечно-подобных звездах также не поддерживают гипотезу солнечных супервспышек из-за их высокой частоты. Также используются и обсуждаются данные по глубинному профилю содержания ^{14}C в лунном реголите.

Сравнение результатов определения времени начала инъекции солнечных протонов в СПС со скейлингом с результатами их определения по начальным измерениям потоков протонов

Очелков Ю.П. (ИПГ), yur_och@mail.ru

Масштабное подобие (скейлинг) временного развития СПС означает, что временной ход потока протонов в событиях со скейлингом описывается функцией одинаковой для всех событий и энергетических каналов и зависящей только от двух параметров: времени достижения максимума и интенсивности в максимуме события. Характерной особенностью событий со скейлингом является совпадение времени начала инъекции протонов для разных дифференциальных каналов с точностью не хуже, чем 5 минут [1].

Для анализа использованы 13 событий с релятивистскими протонами GLE 56-61, GLE 63-67, GLE 69-70 для которых было определено время инъекции релятивистских протонов с помощью метода дисперсии скорости в [2] (для 8 из этих событий время инъекции было определено также в [3] по первому наблюдению на нейтронных мониторах и с учетом зависимости длины силовой линии Солнце-Земля от скорости солнечного ветра).

В данной работе проведено сравнение времен инъекции, определенных с использованием масштабного подобия СПС с результатами [2,3]. Было исследовано 13 событий для энергетических интервалов: 40-80 МэВ, 80-165 МэВ, 165-500 МэВ - с минутным усреднением по времени и для энергетических интервалов : 30-50 МэВ, 50-60МэВ, 60-100 МэВ, >100 МэВ - с пятиминутным усреднением по данным КА GOES, и построено 78 временных ходов, по которым момент начала инъекции может быть определен с точностью до 1 минуты.

Исследование показало, что все рассмотренные события – это события со скейлингом, по крайней мере, на фазе роста событий. Время инъекции протонов с энергией 10-ки МэВ и сотни МэВ совпадают с точностью до минуты. В ряде событий наблюдается длительная инъекция. Существуют события с двукратной инъекцией (как и обнаруженная ранее двукратная инъекция релятивистских протонов): одна компонента быстрая, другая медленная (время достижения максимума в ней значительно больше, чем в первой). Для индивидуальных событий время начала инъекции в данной работе и в [2-3], как правило, отличаются друг от друга (также как в [2] и [3]). Общей закономерностью является превышение времени инъекции времени протонов над временем наблюдения всплесков II типа. В [2] среднее значение ($t_{inj0}-t_{II}$) (где t_{II} – солнечное время начала наблюдения всплесков II типа) равно 13.8 ± 2.6 мин, в [3] оно равно 12.4 ± 1.5 мин. Для инъекции по скейлингу: 8.4 ± 2.4 мин, то есть меньше, чем в [2-3]. Среднее время для разницы между временем начала инъекции, определенном в данной работе, и временем в [2] равно -5.4 ± 3.7 мин ; между результатами данной работы и [3] - равно: -7.2 ± 4.0 мин. Таким образом, начало инъекции, определенное по временному ходу с учетом скейлинга в большинстве случаев происходит раньше чем найденное в [2-3].

1. The Scale Similarity of Solar Proton Time Profiles in the 23 rd Solar Cycle. Yu.P. Ochelkov. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, Vol.87, No 7, pp. 1066-1070 DOI:10.3103/S106287382370243X

2. Solar release times of energetic particles in ground-level events. D.V.Reames. The Astrophysical Journal, 2009, v693, pp.812-821. DOI:10.1088/0004-637X/693/1/812

3. On the early phase of relativistic solar particle events: Are there signatures of acceleration mechanism? G.A.Bazilevskaya. Advances in Space Research, 2009, 43, pp.530-536

МГД моделирование с целью изучения генерации СКЛ: протяженная поверхность, проходящая через цепочку максимумов плотности тока

Подгорный А.И.¹, Подгорный И.М.²

¹ФИАН, Россия, Москва, podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, Россия, Москва

Появление солнечной вспышки в короне на высотах 15 000 - 70 000 км объясняется быстрым освобождением энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя, который в процессе квазистационарной эволюции переходит в неустойчивое состояние. Солнечные космические лучи ускоряются электрическим полем в токовом слое. Для изучения генерации солнечных космических лучей необходимо моделировать движение протонов в электрическом и магнитном полях, полученных МГД моделированием над активной областью. Ввиду сложности конфигурации магнитного поля расположение токового слоя можно определить только при помощи специально разработанной системы графического поиска, основанной на нахождении максимумов плотности тока, которые могут появляться в середине токового слоя. Расположение большого количества максимумов в яркой области предвспышечного излучения подтверждают механизм токового слоя. Существование максимумов вне яркой области излучения и отсутствие максимумов в некоторых частях области яркого излучения может объясняться появлением протяженных (размером $\sim 50\,000$ км) поверхностей с повышенной плотностью тока, проходящих через цепочку максимумов плотности тока. В вершине петли вдали от максимумов цепочки, конфигурация магнитного поля обладает свойствами, лучше всего способствующими развитию вспышечной неустойчивости.

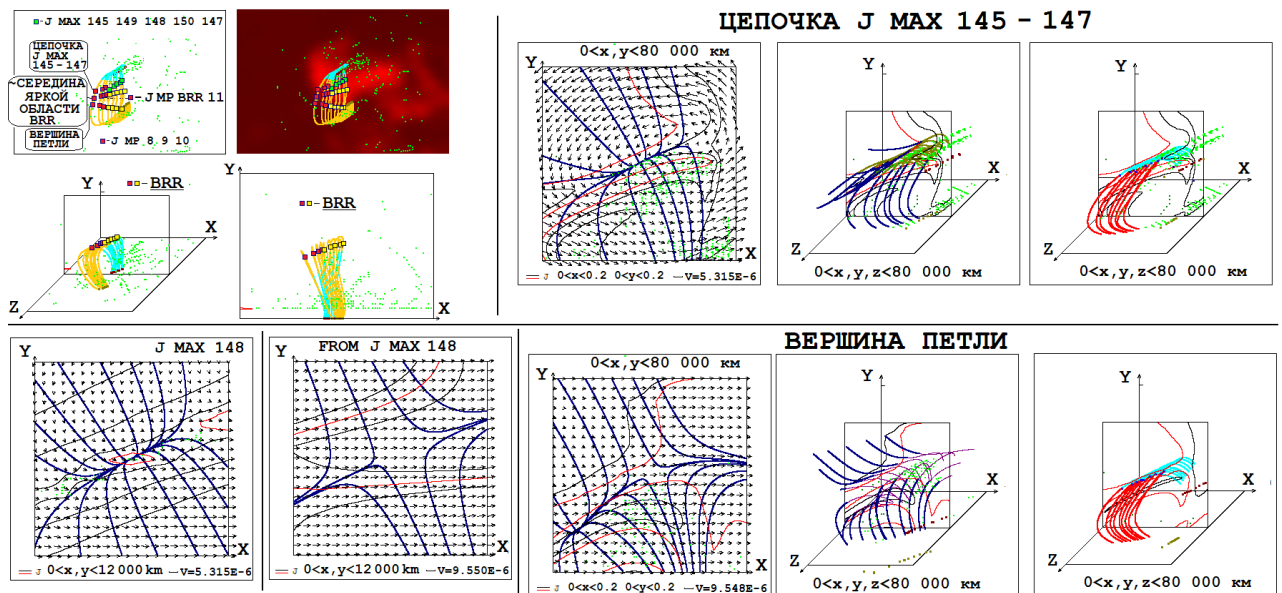


Рис. 1. Поверхности повышенной плотности тока в виде арок магнитных линий. Плоская конфигурация магнитного поля в вершине арки имеет вид особенности X-типа в отличие от конфигурации вблизи цепочки максимумов плотности тока.

Энергия первых пришедших протонов и их темп ускорения

Садовский А. (ИКИ РАН), Струминский А. (ИКИ РАН), Григорьева И. (ГАО РАН)

Метод анализа дисперсии по скоростям (VDA – velocity dispersion analysis) широко используется для определения момента выхода протонов в межпланетное пространство (МП) по времени регистрации первого прихода протонов различных энергий. При этом VDA предполагает, что выход всех протонов происходит одновременно, а их энергетический спектр к этому моменту уже сформировался. Однако длительность ускорения может превышать время распространения (дисперсии по скоростям), а выход в МП может быть не одновременным.

Для двух групп протонов — малых (10-30-50-100 МэВ) и средних (100-300-500-1000 МэВ) энергий — сделаны оценки минимального темпа их ускорения (МэВ/с), когда к наблюдателю протоны больших энергий приходят раньше. Показано, что в группе средних энергий такой темп ускорения соответствует темпу ускорения протонов, найденному по времени первой регистрации излучения электронов >100 кэВ (жесткий рентген или микроволны) и протонного возрастания темпа счета детектора ACS SPI в некоторых событиях 23-25 циклов активности. В этих событиях возникают жесткие ограничения на энергию первых пришедших протонов и, следовательно, возможности применения метода VDA. В группе малых энергий такого жесткого ограничения на темп ускорения протонов не возникает, и метод VDA работает.

Регистрация солнечных космических лучей детекторами мюонов в Якутске

Стародубцев С.А., Петухов И.С., Гололобов П.Ю., Танеев С.Н., Герасимова С.К.

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

Как правило, наземные возращения интенсивности солнечных космических лучей (СКЛ), известные как Ground Level Enhancement — GLE, наблюдаются нейтронными мониторами. Но иногда они могут быть зарегистрированы и мюонными детекторами - ионизационными камерами, мюонными телескопами и годоскопами. Из 73 известных в настоящее время событий GLE, всего несколько из них были зарегистрированы в Якутске мюонными детекторами. Эти события характеризуются более высокими энергиями СКЛ. В частности, для вертикального направления мюонного телескопа на уровне земли эффективная энергия регистрируемых частиц составляет ≈ 32.5 ГэВ, для установленных под землей приборов она увеличивается до ≈ 125.2 ГэВ. В тоже время для нейтронного монитора в Якутске она составляет величину ≈ 13 ГэВ.

Чтобы ответить на вопрос, почему мюоны регистрируются не всегда, нами были проведены модельные расчеты для различных событий GLE. Расчеты основаны на квазилинейной теории регулярного ускорения СКЛ на ударных волнах с реалистичными наборами параметров короны Солнца. Результаты расчетов сопоставлялись с данными измерений. Проведенный анализ показал, что для регистрации событий GLE мюонными детекторами необходимо, чтобы на Солнце произошла вспышка с большим энерговыделением, которая сопровождалась бы корональным выбросом массы, распространяющемся со сверхзвуковой скоростью. Тогда при высоком уровне фоновой альфвеновской турбулентности и большом значении альфвеновского числа Маха на фронте корональной ударной волны в области до 2-5 радиусов Солнца могут генерироваться СКЛ максимальных энергий. При этом полное количество произведенных частиц и величина их предельной энергии определяется величиной скорости корональной ударной волны.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (FWRS-2021-0012).

Обзор исследований субмиллиметрового излучения Солнца и астрофизических источников

Тульников Е.Д., Махмутов В.С., Филиппов М.В.

ФИАН, Россия, г. Москва, e.tulnikov@lebedev.ru

В данной работе представлен краткий обзор публикаций, посвящённых наблюдению за Солнцем и Вселенной в субмиллиметровом диапазоне электромагнитного излучения. Основной задачей является оценка ожидаемых потоков солнечных вспышек в терагерцевом диапазоне и определение классов небесных тел, которые могут быть потенциальными источниками терагерцевых волн. Эти данные необходимы при разработке научной аппаратуры для регистрации потоков терагерцевого излучения от различных источников.

Характерные потоки излучения от солнечных вспышек на частотах 212 ГГц и 405 ГГц находятся в диапазоне 800 — 10000 SFU и 1500 — 20000 SFU, соответственно [1]. Если предположить, что спектральный частотный индекс равен 2 [2], то на частотах ~ 1 — 10 ТГц можно ожидать потоки в диапазоне $\sim 10^5$ — 10^7 SFU.

Среди гипотетических астрофизических источников терагерцевого излучения, например, ярко выделяются блазары, спектральное распределение энергии которых помимо максимума в диапазоне от ультрафиолета до рентгена также имеет пик в диапазоне от субмиллиметрового до инфракрасного излучения [3-5].

1. C. G. G. De Castro, P. Kaufmann, and J. P. Raulin, “Recent results on solar activity at submillimeter wavelengths,” *Advances in Space Research*, vol. 35, no. 10, pp. 1769–1773, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.asr.2005.03.083.

2. R. Liseau *et al.*, “ALMA observations of α Centauri,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 573, p. L4, Dec. 2014, doi: 10.1051/0004-6361/201425189.

3. C. M. Urry, “Multiwavelength properties of blazars,” *Advances in Space Research*, vol. 21, no. 1–2, pp. 89–100, Jan. 1998, doi: 10.1016/s0273-1177(97)00619-4.

4. L. Maraschi, L. Chiappetti, G. Fossati, E. Pian, and F. Tavecchio, “Progress in understanding blazars from BeppoSAX observations,” *Advances in Space Research*, vol. 25, no. 3–4, pp. 713–722, Jan. 2000, doi: 10.1016/s0273-1177(99)00828-5.

5. A. E. Wehrle, “Multiwavelength observations of GeV blazars,” *Astroparticle Physics*, vol. 11, no. 1–2, pp. 169–176, Jun. 1999, doi: 10.1016/s0927-6505(99)00044-4.

Специальная сессия GLE

События GLE в потоке мюонов космических лучей

Петрухин А. (НИЯУ МИФИ)

Практически все события GLE были зарегистрированы по нейтронной компоненте космических лучей. С началом спутниковой эры события GLE начали регистрироваться и спутниковой аппаратурой. И всего лишь несколько событий были зарегистрированы в мюонной компоненте. После создания многонаправленных мюонных телескопов и особенно мюонных годоскопов появилась уникальная возможность не только регистрировать, но и проследивать развитие таких событий. В докладе рассматривается состояние и перспективы таких исследований.

Регистрация сетью детекторов СЕВАН солнечных событий 25 цикла

Чилингарян А. (Ереванский физический институт)

В докладе будут представлены редкое физическое явление, связанное с солнечной активностью и проявляющееся в аномалиях потоков нейтронов, электронов и гамма-квантов в атмосфере. Обычно возмущения магнитного поля Земли уменьшают интенсивность космических лучей, достигающих поверхности. Однако периодически возникает временный всплеск потока космических лучей, известный как магнитосферный эффект (МЭ). Наши наблюдения показывают, что этот эффект преимущественно вызывает увеличение скорости счета в детекторах частиц, расположенных в средних широтах на вершинах гор. 5 ноября 2023 года наблюдалось увеличение на 2-3% нейтронных мониторов на горных высотах и до 5% в тонких пластиковых сцинтилляторах, регистрирующих электроны и гамма-излучение. Эта эскалация потока совпала с ориентацией межпланетного магнитного поля на юг. Важно отметить, что мы впервые представляем энергетический спектр магнитосферного эффекта, наблюдаемого на двух горных вершинах: Арагац и Цугшпитце. Моделирование низкоэнергетических взаимодействий протонов в земной атмосфере подтверждает усиление низкоэнергетических космических лучей.

Нелинейное взаимодействие между возмущенными межпланетными магнитными и геомагнитными полями приводит к различным последствиям - от повреждения спутниковой электроники до захватывающих аврор. В этих условиях все более важным становится понимание влияния больших намагниченных облаков, выбрасываемых Солнцем, на околоземное окружение. Космические лучи являются прямыми посланниками, передающими важнейшую информацию об этих сложных процессах. Сети детекторов частиц, непрерывно следящих за потоком космических лучей на поверхности Земли, дают ценные сведения, дополняющие космические детекторы, используемые NOAA, NASA и ESA. В докладе описывается редкий магнитосферный эффект, наблюдаемый сетями детекторов частиц в средних широтах на вершинах гор. Кроме того, мы впервые представляем энергетический спектр частиц, вызывающих наблюдаемое увеличение скорости счета, проливая свет на солнечно-магнитосферное взаимодействие.