

Т.Х. Садықов¹, К.М. Мукашев^{2*}, А.Х. Аргынова¹, О.А. Новолодская¹, Х. Махмет^{1,3}

¹Satbayev University, Физико-технический институт, г.Алматы, Казахстан

²Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ СТВОЛОВ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОГОРНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА

Аннотация

В работе представлены первые экспериментальные результаты исследований стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ) с помощью высокогорного ионизационного калориметра «Адрон-55» площадью 55 м² и толщиной около 6 (шесть) пробегов протонов до взаимодействия. Проведены расчеты по моделированию развития ШАЛ от протонов, ядер и гипотетических странглетов – частиц странной кварковой материи (СКМ), входящих, вероятно, в состав первичных космических излучений (ПКИ), используя пакет CORSIKA. Разыграны процессы прохождения стволов ШАЛ через калориметр «Адрон-55», используя пакет Geant-4. Проводимые исследования направлены на изучение адронной компоненты стволов ШАЛ для выяснения природы проникающих или слабовзаимодействующих частиц, зарегистрированных в калориметре «Адрон-55».

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, ионизационно-нейтронный калориметр, сцинтилляционный детектор, адронный каскад.

Т.Х. Садықов¹, К.М. Мұқашев², А.Х. Аргынова¹, О.А. Новолодская¹, Х. Махмет^{1,3}

¹Сәтбаев университеті, Физика-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан

²Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

³әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

БИІК ТАУЛЫ ИОНИЗАЦИЯЛАУШЫ КАЛОРИМЕТРМЕН КЕҢ АУҚЫМДЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ НӨСЕР ШОҒЫРЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Жұмыста биік таулы «Адрон-55» ионизациялаушы калориметрдің көмегімен кең ауқымды атмосфералық нөсер шоғырын зерттеудің алғашқы нәтижелері қарастырылады. Калориметрдің ауданы 55 м², ал қалыңдығы энергетикалық протондардың материалда әсерлесуге дейінгі еркін жүру жолының 6 (алты) ендігіне сәйкес келеді. Программалаушы CORSIKA пакетін пайдаланып, бастапқы ғарыш сәулелерінің құрамына кіруі ықтимал протондар мен ядролардың және гипотетикалық странглеттердің – кварк тектес ғажайып материялардың әсерлесуіне байланысты туындайтын кең ауқымды атмосфералық нөсерлердің даму дәрежесін моделдеу нәтижелері келтірілген. Сонымен қатар, Geant-4 пакетінің көмегімен кең ауқымды атмосфералық нөсер шоғырының ионизациялаушы «Адрон-55» калориметрі арқылы өту процесі де зерделенеді. Яғни, зерттеу жұмыстарының түпкі мақсаты - кең ауқымды атмосфералық нөсер шоғырының адрондық құраушыларына талдау жүргізу арқылы «Адрон-55» калориметрімен тіркелген, өтімділік қабылеті жоғары немесе әсерлесу мүмкіндігі төмен бөлшектердің табиғатын анықтау.

Түйін сөздер: ғарыш сәулелері, ионизациялаушы-нейтрондық калориметр, сцинтилляциялаушы детектор, адрондар каскады, кең ауқымды атмосфералық нөсерлер.

Т.КН. Sadykov¹, К.М. Mukashev², А. Kh. argynova¹, О.А. Novolodskaya¹, КН. Makhmet^{1,3}
¹Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan
²Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan
³al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

STUDIES OF EXTENSIVE ATMOSPHERIC SHOWERS USING A HIGH ALTITUDE IONIZATION CALORIMETER

Abstract

The paper presents the first experimental results of studying the trunks of extensive air showers (EAS) using the high-mountain ionization calorimeter "Hadron-55" with an area of 55 m² and a thickness of about 6 (six) proton paths before interaction. Calculations were carried out to simulate the development of EAS from protons, nuclei and hypothetical strangelets - particles of strange quark matter (SQM), probably included in the composition of primary cosmic radiation (PCR), using the CORSIKA package. The processes of passage of EAS trunks through the Hadron-55 calorimeter were played out using the Geant-4 package. The ongoing research is aimed at studying the hadronic component of EAS trunks to clarify the nature of penetrating or weakly interacting particles recorded in the Hadron-55 calorimeter.

Keywords: cosmic rays, ionization-neutron calorimeter, scintillation detector, hadron cascade, extensive air showers (EAS).

Основные положения

В высокогорных экспериментах по исследованиям центральных стволов ШАЛ при $E_0 \geq 10^{16} \text{ eV}$ ($\sqrt{s} \geq 5 \text{ TeV}$) с помощью рентген-эмульсионных камер и ионизационных калориметров наблюдались такие явления, как компланарность прихода наиболее энергичных частиц в центральной области суперсемейств γ -квантов и адронов и так называемый Тянь-Шаньский эффект (слишком медленное поглощение каскадов, инициированных адронами высоких энергий в калориметре). Эти эффекты не удалось воспроизвести в рамках теоретических моделей 80 -- 90-х годов. Компланарность объясняется процессом копланарной генерации наиболее энергичных вторичных частиц при взаимодействии адронов сверхвысоких энергий с ядрами атомов воздуха. Второе явление, возможно, объясняется высоким сечением генерации очарованных адронов в области фрагментации. Для исследования этих явлений разработан новый комплекс детекторов, включающий в себя самый высокогорный в мире ионизационный калориметр Адрон-55 для изучения стволов ШАЛ. Представлены первые экспериментальные результаты.

Введение

Хотя в экспериментах с космическими лучами одновременно используется несколько моделей взаимодействия адронов высоких энергий с ядрами атомов воздуха и последующего развития широкого атмосферного ливня (ШАЛ) в атмосфере, ни одна из них не может точно воспроизвести всю совокупность экспериментально наблюдаемых характеристик ШАЛ. Кроме того, до сих пор не объяснены некоторые результаты, накопленные в высокогорных и баллонных рентгеноэмульсионных камерах (РЭК). Около пятидесяти лет назад при исследовании ШАЛ на Тянь-Шанской высокогорной научной станции (3340 м н.у.м.) было обнаружено уменьшение скорости поглощения адронных каскадов высокой энергии ($\geq 10 \text{ ТэВ}$) в т.н. Большом ионизационном калориметре (БИК), который имел свинцовый поглотитель толщиной 850 г/см², (около пяти длин среднего свободного пробега до взаимодействия протонов в свинце). Было обнаружено, что длина поглощения $L(E_h)$ адронной компоненты в стволах ШАЛ растет с увеличением энергии адронов E_h в калориметре. После открытия очарованных частиц было показано, что описанный выше эффект можно объяснить, предполагая, что в адронных взаимодействиях сечение рождения таких частиц, уносящих значительную долю энергии взаимодействующих адронов, достигает $\sim 30\%$ неупругого сечения протон-ядро [1,2]. Ионизационный калориметр с толщиной порядка шести (или более)

длин свободного пробега взаимодействия адронов может помочь в изучении этих очень интересных эффектов.

В высокогорных экспериментах с РЭК Памира (4300 м н.у.м.) [3] и Mt.Kanbala [4] коллабораций была обнаружена тенденция к компланарному приходу наиболее высокоэнергетичных частиц или узких электромагнитных подкаскадов с энергиями $E \gtrsim 10$ ТэВ в т.н. гамма-адронных суперсемействах с энергиями $\sum E_\gamma > 700$ ТэВ вблизи осей относительно «молодых» ШАЛ, не достигнувших максимума своего развития к моменту регистрации на наблюдательном уровне. Эти ливни в основном инициируются протонами и ядрами гелия первичного космического излучения (ПКИ).

Общую картину дополняют два суперсемейства со сверхвысокими энергиям ($\sum E_\gamma > 1$ ПэВ) и очень высокой компланарностью наиболее энергичных частиц, обнаруженные с помощью эмульсионной методики на больших высотах в стратосфере (где характеристики ливней гораздо более чувствительны к параметрам первых взаимодействий частиц первичного космического излучения в атмосфере) на борту воздушного шара («Страна» [5]) и реактивного самолета «Concorde» (JF2af2 [6]). Вероятность получить всю совокупность этих экспериментальных результатов слишком мала ($\lesssim 10^{-10}$) [6, 7], чтобы объяснить этот результат каскадными флуктуациями.

В целом можно сделать вывод, что: 1) это явление связано с наиболее энергичными частицами, генерируемыми во взаимодействиях на ранней стадии развития ШАЛ; 2) этот процесс не воспроизводится моделированием в рамках моделей на основе КХД и КГС, применяемых в физике космических лучей высоких энергий; 3) сечение компланарной генерации частиц (КГЧ) относительно велико.

Теоретические представления связывают генерацию компланарных частиц с 1) угловым моментом кварк-глюонной струны, вращаемой взаимодействующими адронами [8]; 2) полужесткая двойная неупругая дифракция и некоторая напряженность КГС внутри дифракционного кластера между полужестко рассеянным кварком и кварками-спектаторами взаимодействующего адрона [8]; 3) лидирующие системы с очень высоким спином [8]; 4) временный переход трехмерного пространства в двухмерное [9].

Первые четыре гипотезы включают большие поперечные импульсы как почти обязательный элемент, определяющий компланарную плоскость. При этом поперечные импульсы, направленные перпендикулярно этой плоскости, по-прежнему имеют стандартные значения традиционных моделей адронных взаимодействий. Гипотеза [10] предполагает уменьшение размерности пространства с трех до двух измерений при достаточно высоких энергиях. При этом поперечные импульсы локализованы в некоторой плоскости без существенного изменения их средних значений.

Вышеупомянутые экспериментальные данные показывают, что мы еще не понимаем всех особенностей адронных взаимодействий. К сожалению, эти явления не могут быть изучены в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК). Специфика конструкции коллайдера и используемых детекторов позволяет детально изучать, в основном, только частицы в центральной кинематической области ($|\eta, y| \lesssim 4 - 5$). Однако можно продолжить исследования этих явлений в высокогорных экспериментах с космическими лучами.

Масштаб компланарных событий, наблюдаемых с помощью XREC, которые характеризуются очень высоким пространственным разрешением (~ 100 мкм), очень мал, в основном около 1 см и менее, что соответствует отбору событий, вызванных взаимодействиями адронов на высотах 1 – 2 км над детектором. Ионизационный калориметр на высоте Тянь-Шаньской станции имеет гораздо более грубое пространственное разрешение порядка ширины его ионизационных камер (ИК) (~ 12 см). В этом случае поиск ливней с несколькими наиболее энергичными подстволами в центральной области приведет к отбору событий, созданных адронно-ядерными взаимодействиями на гораздо больших высотах (~ 10 км) над калориметром, где рождённые высокоэнергичные адроны инициируют подкаскады, приходящие на верхнюю поверхность калориметра.

Ионизационный калориметр позволит изучать рассмотренные выше экспериментальные результаты, а именно слишком медленное ионизационное поглощение в толстом адронном калориметре и компланарность прихода наиболее энергичных подстволов в области центральных стволов ШАЛ, связанных с адронами с высокими x_F из области фрагментации адронных взаимодействий.

Отметим, что в некоторых работах (см. [10]) авторы связывают нестандартные явления, наблюдавшиеся в исследованиях на ТШВНС, с ШАЛ, инициированными странглетами частицами странной кварковой материи, возможно входящими в состав ПКИ [10].

Методология исследования

Комплексная установка «Адрон-М»

Комплексная установка "Адрон-М", расположенная на высоте 3340 метров над уровнем моря, включает в свой состав ионизационно-нейтронный калориметр (ИНК) Адрон-55 площадью 55 м², толщиной поглотителя 1244 г/см², девятью рядами ИК и одним рядом нейтронных детекторов, а также две ливневые системы сцинтилляционных детекторов. Эффективная площадь установки "Адрон-М" составляет около 45000 м². ИНК «Адрон-55» расположен в лабораторном здании площадью 324 м². Внутренняя ливневая система расположена внутри здания над первым уровнем калориметра и вокруг него. Внешняя ливневая система расположена снаружи здания по концентрическим окружностям радиусами 25, 40, и 100 метров, с четырьмя сцинтилляционными детекторами (SD) в каждой круглой зон [11].

Конструкция ионизационно-нейтронного калориметра Адрон-55

Двух уровневый калориметр, состоит из верхней части (гамма-блок) и нижней части (адронный- блок) [24]. Гамма-блок и адронный блок разнесены по вертикали на 2.2 м для экспериментов, связанных с поиском чармированных частиц. Гамма-блок состоит из двух рядов ИК – 100 камер в первом ряду и 138 камер во втором, разделенными свинцом общей толщиной 26 см или 310 г/см². Адронный-блок состоит из железного поглотителя с полостями, в которые установлены ионизационные камеры. Этот блок служит для измерения энергии компонент (электронной, мюонной и нейтронной) космического излучения, определения траектории частиц, что позволяет более детально исследовать характеристики взаимодействий частиц космического излучения. Адронный блок содержит 7 рядов ИК, по 144 камеры в каждом ряду, расположенные взаимно-перпендикулярно с поглотителем из железа между рядами.

Регистрация и анализ экспериментальных данных "Адрона-М"

Система баз данных комплексной установки "Адрон-М" работает под управлением серверной программы PostgreSQL, доступ к которой через локальную сеть могут получить удаленные клиентские программы с конкретными запросами на обработку данных. База данных доступна по адресу www.tien-shan.org.

Банк экспериментальных данных установки "Адрон-М" имеет двухуровневую структуру. Исходный банк данных Bank-0 содержит зарегистрированные коды ионизации (амплитуды импульсов) каждого детектора, которые суммируются и преобразуются в двоичный код АЦП. Вторичный банк данных Bank-1 содержит откалиброванные данные из Bank-0 с преобразованием кодов АЦП в ионизацию; значения данных преобразуются в милливольты, которые пропорциональны энергии E_0 первичной частицы [11].

Мощность ливня (число заряженных частиц, N_e) определялось как сумма частиц во всех камерах восьми рядов ИНК. Число частиц N_{ij} в каждой i -й камере j -го ряда равно сигналу на выходе усилителя камеры U_k , делённому на сигнал от прохождения одиночной частицы U_{oe} , т.е. $N_{ij} = U_k / U_{oe}$.

Для определения амплитуды сигнала от одиночной частицы U_{oe} был собран стенд, в состав которого входили ионизационная камера, усилитель + АЦП (аналогово-цифровой

преобразователь), компьютер, и был получен спектр амплитуд одиночных импульсов фона космических лучей. Пиковое значение спектра принималось за амплитуду сигнала от одного электрона. Измерения показали, что $U_{oe} = 0.39$ мВ/частица.

Для учета разброса давлений газа аргона в ИК (10%) и коэффициентов усиления каналов (20%), на установке регулярно проводится калибровка каналов регистрации, которая запоминается в памяти компьютера для каждого канала N_{ij} и учитывается при создании базы данных.

Энергия E_{cal} , выделенная в калориметре, определяется по калориметрической формуле

$$E_{cal} = b * k * \sum_{i=1}^9 a_i * \sum_{j=1}^{n_i} N_{ij},$$

где a_i – толщина поглотителя (свинца или железа) над i -м рядом ионизационных камер;

b - критическая энергия в свинце/железе;

k - переходной коэффициент «свинец-ИК»;

X_i - толщина свинца или железа ($г/см^2$) над i -м рядом калориметра;

N_{ij} - номер камеры j в i -м ряду калориметра.

Ошибка в определении энергии E_{cal} , выделенной в ионизационном калориметре толщиной 1100 $г/см^2$ и шестью уровнями наблюдения, составляет менее 10%.

Экспериментальные данные ИНК "Адрон-55"

На рис. 1 показаны зависимости заряженных частиц зарегистрированных в калориметре «Адрон-55» по сотне ливней, основные стволы которых пришли на поверхность калориметра. На рис. 1,а показана зависимость плотности заряженных частиц в ионизационных камерах калориметра «Адрон-55», $\rho_{e cal}$, $м^{-2}$, от количества вещества поглотителя, усреднённая по всем регистрируемым ливням, независимо от места падения основного ствола ШАЛ. На рис. 1,б показана зависимость мощности ливня (числа зарегистрированных заряженных частиц в ИК) калориметра «Адрон-55», $N_{e cal}$, от количества вещества поглотителя, усреднённая по сотне ливней, основные стволы которых пришли на поверхность калориметра. Среднеквадратичные ошибки, показанные на рис. 1,б, характеризуют только флуктуационные отклонения характеристик индивидуальных ливней от средних значений.

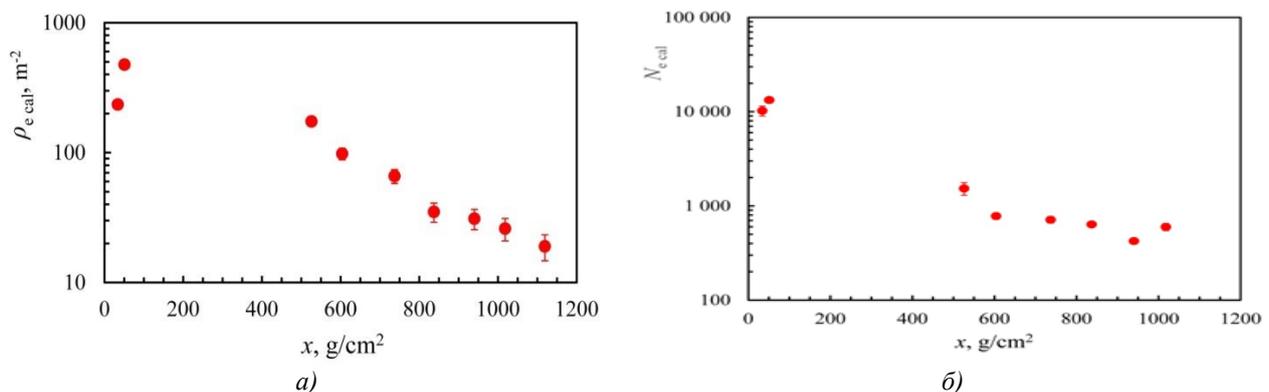


Рисунок 1. Зависимости заряженных частиц зарегистрированных ИК «Адрон-55»
а) от плотности заряженных частиц $\rho_{e cal}$, $м^{-2}$, б) от числа заряженных частиц $N_{e cal}$, $м^{-2}$

Напомним, что две крайние левые точки на рис. 1.а и 1.б относятся к гамма-блоку, т.е. они характеризуют, в основном, низкоэнергичную электрон-позитронную и мюонную компоненты. Остальные точки на графике определяются адронной компонентой ШАЛ, которая взаимодействует непосредственно в веществе поглотителя, рождая частицы, в частности нейтральные π^0 -мезоны, практически сразу распадающиеся на γ -кванты, которые инициируют электронно-фотонные каскады в плотном веществе поглотителя. Хотя спектры, естественно, качественно похожи друг на друга, можно заметить, что имеются и некоторые отличия. В частности, крайняя правая точка на рис. 1,б, соответствующая толщине поглотителя 1018

г/см², находится заметно выше предыдущей точки, которая соответствует глубине 940 г/см². Для установления механизма этого экспериментального результата необходимы дальнейшие исследования, который может иметь как физические (например, быть аналогом эффекта [1]), так и методические причины (например, краевые эффекты). В частности, абсолютно необходимо обширное моделирование как процессов развития ШАЛ в атмосфере, так и процессов регистрации частиц ШАЛ в калориметре «Адрон-55».

Моделирование развития ШАЛ в атмосфере.

Моделирование развития ШАЛ от ядер ПККИ.

Были начаты расчеты развития ШАЛ, инициированных протонами и ядрами ПККИ сверхвысоких энергий и состоящих из громадного числа адронов, электронов, позитронов, γ -квантов и мюонов, а также вычисление наблюдаемых характеристик ШАЛ с использованием стандартного пакета программ моделирования CORSIKA.

При использовании пакета CORSIKA возможен выбор из несколько моделей взаимодействия адронов с ядрами кислорода и азота в атмосфере. В данном случае для расчетов была использована модель QGSJET II-04, основанная на идеологиях кварк-глюонных струн (КГС) и квантовой хромодинамики (КХД), описывающей генерацию жестких струй адронов с большими поперечными импульсами.

Моделировалось развитие вертикальных ШАЛ от границы атмосферы до уровня расположения ТШВНС (3340 м над у.м.) от различных ядер (от протонов до ядер железа, Fe) с энергиями 1, 10, 30, 100 ПэВ. При моделировании использовались следующие энергетические пороги: 30 МэВ для электронов и гамма-квантов, 1 ГэВ для адронов и мюонов. Были получены пространственные и энергетические характеристики адронов, электронов, и мюонов при различных пороговых значениях E_{thr} .

Моделирование развития ШАЛ от странглетов

Были также начаты расчеты развития ШАЛ, инициированных т.н. странглетами – частицами странной кварковой материи (СКМ), возможно входящими в состав ПККИ [12]. Основное отличие странглетов от традиционных ядер – гораздо больший вклад странных кварков. СКМ можно разделить на три класса, отличающихся разными значениями барионного числа A_s [12]:

- *блоковая СКМ*: $A_s > 10^7$. В большом объеме СКМ выполняется равенство числа кварков $n_v = n_f = n_s$, её электрический заряд $Z=0$;
- *стабильные частицы СКМ* (странглеты): $10^2 < A_s < 10^7$). Модельная оценка стабильности таких странглетов: $A_s > 300 - 1000$. По сути, подобные странглеты представляют собой квазиядра, которые обладают меньшей плотностью (по сравнению с обычными ядрами) с положительным электрическим зарядом $Z = +(0.03 - 0.1) \cdot A_s$;
- *нестабильные частицы СКМ*: $A_s < 100$.

Теоретические неопределённости не позволяют однозначно выбрать класс СКМ для моделирования ШАЛ. Поэтому разумно было начать со стабильных странглетов, принять, что $A_s = 2000$ и считать странглет очень большим квазиядром, для которого сечение взаимодействия в воздухе $\sigma_{s-air} \approx \sigma_{pp} (A_s^{2/3} + A_{air}^{2/3})$.

Пусть после входа в атмосферу средний пробег до первого взаимодействия странглета равен $\lambda_s^1 = 1$ г/см². В этом взаимодействии часть барионов взаимодействует и выбывает из состава странглета, как индивидуально, так и в составе обычных ядер. При каждом взаимодействии образуются свободные обычные ядра с массой A_i . При этом, чем тяжелее ядро, тем меньше вероятность его рождения. В расчетах принято, что первичные ядра принадлежат к одной из основных групп. Поэтому в каждом из взаимодействий странглета рождается одно или несколько ядер с массами 1 (протоны), 4 (He), 12 (C), 32 (S), 56 (Fe).

Реально в каждом взаимодействии по Пуассону разыгрывается число откалывающихся нуклонов N_{nucl} со средним числом откалывающихся нуклонов $\langle N_{nucl} \rangle = 12$, которые далее формируют ядро или ядра из приведенного набора. Сечение взаимодействия остатка

странглета при каждом следующем $k+1$ -м взаимодействии будет определяться барионным числом A_s^k . Естественно, для каждого k -го остатка странглета средние значения пробегов $\lambda_s^k > \dots > \lambda_s^2 > \lambda_s^1$.

В ходе развития ШАЛ имеет место более сотни взаимодействий странглета до его полного расщепления на отдельные протоны, нейтроны и ядра различных атомных весов, инициирующие независимые подстволы в составе центрального ствола ШАЛ. Все образующиеся подкаскады прослеживаются до уровня наблюдения (3340 м н.у.м.) с порогами 30 МэВ по электронам/позитронам и гамма-квантам и 1 ГэВ по мюонам и адронам.

Для моделирования каскадов от протонов и ядер, рождающихся при развале странглетов, и наблюдаемых характеристик ШАЛ использовался стандартный пакет CORSIKA и модель QGSJET II-04.

Результаты исследования

Результаты моделирования развития ШАЛ

Проведены расчеты развития широких атмосферных ливней – ядерно-электромагнитных каскадов в атмосфере, инициированных т.н. странглетами – частицами странной кварковой материи (СКМ), возможно входящими в состав первичного космического излучения (ПКИ).

Для вычисления наблюдаемых характеристик ШАЛ использовался стандартный пакет CORSIKA, предназначенный для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в атмосфере, инициируемых частицами ПКИ.

Для моделирования каскадов от протонов и ядер, родившихся при постепенном развале странглетов, использовалась модель QGSJETII-04 взаимодействия адронов с ядрами атомов в атмосфере, основанная на концепции кварк-глюонных струн (КГС), а также на теории квантовой хромодинамики (КХД), постулирующей генерацию т.н. жестких струй с большими поперечными импульсами. В настоящее время QGSJETII-04 пользуется наибольшей популярностью в экспериментах по изучению ШАЛ.

Было проведено моделирование ШАЛ от протонов, ядер железа и странглетов с энергией $E_0 = 100$ ПэВ. На рис. 2 показаны основные характеристики адронных потоков в ШАЛ.

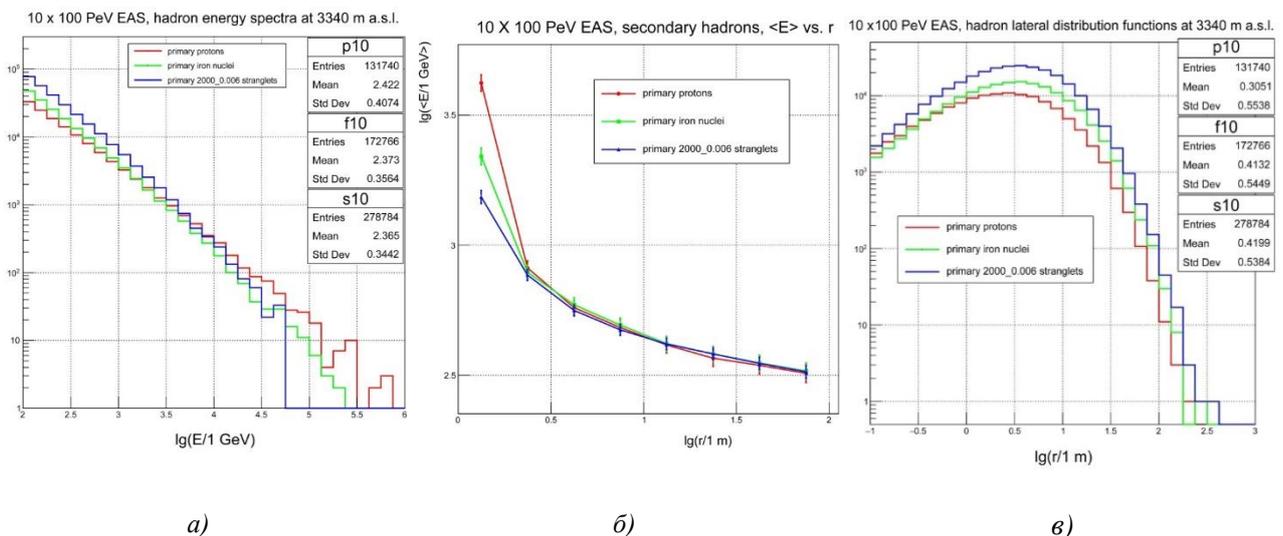


Рисунок 2. Основные характеристики адронных потоков в ШАЛ.

- а) Энергетические спектры адронов с энергией $E_h > 100$ ГэВ в ШАЛ от протонов ядер железа и странглетов с энергией 100 ПэВ; б) Зависимость средней энергии адронов (при $E_h > 100$ ГэВ) от расстояния до оси ШАЛ в ливнях от протонов, ядер железа и странглетов ПКИ с энергией $E_0 = 100$ ПэВ; в) Пространственное распределение адронов (при $E_h > 100$ ГэВ) в ливнях от протонов, ядер железа и странглетов ПКИ с энергией $E_0 = 100$ ПэВ

Моделирование показало, что спектр адронов в протонных ШАЛ – самый пологий, и в них даже присутствуют адроны с энергией $E_h > 300$ ТэВ. Соответственно, спектр адронов в ШАЛ, инициированных странглетами – самый мягкий. Это не удивительно, поскольку изначально в странглетах с $A_s = 2000$ энергия на нуклон равна всего лишь $E_{\text{nuc1}} = 50$ ТэВ. Собственно, адроны с максимальной энергией – это нуклоны первичного странглета, проскочившие без взаимодействия до уровня наблюдения.

Видно, что средняя энергия адронов в протонных ливнях – заметно выше, чем в ливнях от ядер железа, тем более, в ливнях от странглетов, что и следовало ожидать на основании спектров, показанных на рис. 2а. На рис. 2в видно, что распределение на больших расстояниях от оси в протонных ШАЛ примерно в пять раз ниже, чем распределение в ШАЛ от странглетов. Аналогичные распределения были получены для электронов/позитронов и мюонов.

Моделирование отклика Адрон-55 на прохождение частиц ШАЛ.

Для моделирования прохождения частиц ШАЛ через калориметр Адрон-55 была разработана программа Nadr55 на основе пакета Geant4 (версии 4.11.0 и 4.11.1.1) [13]. Работа с Geant4 сводится к написанию программ на языке C++, связывающих его компоненты между собой определенным образом, моделирующим некоторую реальную систему. При этом в Geant4 была занесена трехмерная модель калориметра Адрон-55 и характеристики материалов, из которых он состоит. Электромагнитные взаимодействия разыгрывались согласно физлисту *G4EmStandardPhysics_opt3*. Адронные взаимодействия разыгрывались по модели FTFP_BERT, используемой в Geant4 по умолчанию и предполагающей розыгрыш элементарных взаимодействий по партонной модели Fritiof и использование модели Bertini внутриядерного каскада.

Геометрия математической модели Адрон-55. Геометрия калориметра была построена на основании его общего вида, приведённого на рис. 1 и 2, и конкретных данных об ионизационных камерах и слоях поглотителей. Плотности свинца и железа были 12.5 и 7.8 г/см³ соответственно.

Структура ИК воспроизведена в соответствии с описанием: материал корпуса – медь плотностью 8.92 г/см³, внешние размеры – 400 см × 11.5 см × 6 см для 1-го ряда и 300 см × 11.5 см × 6 см для последующих рядов; толщина стенок ИК – 2 мм. В качестве примера на рис. 3 показаны треки от одного протона с энергией 5 ГэВ. Нарисовать полную картину всех треков события ШАЛ в калориметре не представляется возможным из-за слишком большого числа треков.

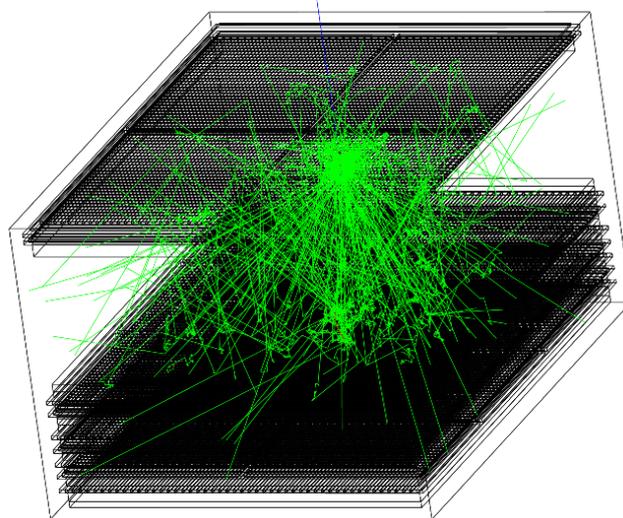


Рисунок 3. Картина треков от одного протона с энергией 5 ГэВ

Сохраняемая информация. В Geant4 событием считается вся совокупность явлений, возникающих после входа в детектор одной частицы (адрона, γ -кванта, мюона и т.д.). В нашем случае событием считается прохождение через калориметр какой-то части частиц ШАЛ, и интерес представляют суммарные энерговыделения этих частиц в каждой из ионизационных камер. Итоговый образ ливня в энерговыделениях сохраняется в текстовом файле `ioni_nch_*`, где * означает спецификацию события (тип и энергия частицы). В том же файле записана информация о числе заряженных частиц, вошедших в каждую ионизационную камеру. Сохраняемая информация может быть изменена и/или дополнена.

Дискуссия

Ресурсы, необходимые для моделирования событий в калориметре

Моделирование прохождения ШАЛ через калориметр проходит в два этапа. На первом этапе, где должен быть рассчитан каскад частиц в воздухе, и записаны частицы, достигшие уровня наблюдения, используется CORSIKA. На втором этапе часть этих частиц, упавшая на калориметр, прослеживается через конструкции калориметра с помощью Hadr55.

Моделирование каскада частиц в атмосфере от частиц ПКИ сверхвысоких энергий предъявляет серьезные требования к используемым компьютерам: время моделирования одного события варьируется от ~3 минут при энергии $E_0 = 1$ ПэВ до 3 – 4 часов при $E_0 = 100$ ПэВ. Объем выводных двоичных файлов может достигать нескольких гигабайт на событие (зависит от задаваемых порогов).

Последующее использование результатов CORSIKA для моделирования процессов в калориметре требует еще больших временных затрат: при выбранных порогах (30 МэВ по электронам и γ -квантам) и 1 ГэВ по мюонам и адронам) число прослеживаемых вторичных частиц для первичных энергий 100 ПэВ может достигать десятков миллионов. Прослеживание 10000 вторичных частиц занимает от 1 до 40 минут при среднем времени в несколько минут, а прослеживание десятков миллионов частиц занимает в тысячу раз больше времени, т.е. несколько дней. Столь большой разброс обусловлен широким энергетическим спектром падающих частиц: низкоэнергичные частицы быстро поглощаются, а более энергичные частицы каскадируют, что требует значительного времени моделирования. В итоге прослеживание одного ШАЛ, инициированного частицей ПКИ с энергией 100 ПэВ, занимает 2 – 3 суток на одном ядре.

Заключение

На высоте 3340 м н.у.м. получены первые экспериментальные результаты исследований стволов ШАЛ с помощью высокогорного ионизационного калориметра Адрон55 площадью 55 м^2 и толщиной около 6 пробегов протонов до взаимодействия.

В ШАЛ, стволы которых приходят на верхнюю плоскость ИНК Адрон55, средняя интенсивность адронов на больших глубинах выше, чем по совокупности всех ШАЛ. При этом наблюдается тенденция к замедлению поглощения адронов.

Начато моделирование ШАЛ от протонов, ядер и гипотетических странглетов ПКИ и моделирование процессов прохождения стволов ШАЛ через ИНК Адрон55.

Экспериментальные и расчетные результаты являются предварительными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, ИРН AP019679396.

Выражаем глубокую благодарность научным консультантам, коллегам, которые не являются авторами статьи, но при их содействии проводилось исследование: Р.М. Мухамедшину, В.И. Галкину, В.В. Жукову, В.В. Пискалю, В.И. Осенмуку, Т.К. Идрисовой, К.А. Аргыновой, Ж.Т. Садыкову.

Список использованных источников

- [1] Нам Р. А., Никольская Н. М., Никольский С. И., Соколовский В. И., Тукиш Е. И., Яковлев В. И. Энергетический спектр адронной компоненты космического излучения на высоте 3333 м над уровнем моря // Труды ФИАН 1970, 10, с34-38. ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=1970-#number=10&word=%CD%E8%EA%EE%EB%FC%F1%EA%E0%FF
- [2] Dremine, I.M.; Madigozhin, D.T.; Yakovlev, V.I. Monte Carlo simulations of long-flying cascades in cosmic rays and leading charm at SSC // AIP Conf. Proc. 1993, 276, 534. <https://doi.org/10.1063/1.43849>
- [3] Байбурина С.Г.; Борисов А.С.; Чердынцева К.В.; Гусева З.М.; Денисова В.Г.; Дунаевский А.М.; Каневская Е.А.; Максименко В.М.; Пашков С.В.; Шаулов С.Б.; и другие. Исследование ядерных взаимодействий в области энергий $10^{14} - 10^{17}$ эВ методом рентгеноэмульсионных камер в космических лучах (эксперимент «Памир») // Труды ФИАН 1984, 154, 3–141. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/63009482/>
- [4] Capdevielle J. Analysis of one cosmic-ray collision near 10^7 GeV // Journal of Physics G: Nuclear Physics 1988, 14, 503. DOI:10.1088/0305-4616/14/4/012 Corpus ID: 120056841
- [5] Osedlo, V.I.; Rakobolskaya, I.V.; Galkin, V.I.; Managadze, A.K.; Sveshnikova, L.G.; Goncharova, L.A.; Kotelnikov, K.A.; Martynov, A.G.; Polukhina, N.G. A superfamily with $SE > 1015$ eV observed in stratosphere. In Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 8–15 August 2001; V. 4, pp. 1426–1429. URL: <http://particle.astro.ru.nl/pub27ICRC2-792.pdf>
- [6] Mukhamedshin, R.A. Simulation of coplanar particle generation in hadron interactions at superhigh energies by the new FANSY code. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2009, 196, 98-101. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.016>
- [7] Mukhamedshin, R.A. FANSY 1.0: A phenomenological model for simulation of coplanar particle generation in superhigh-energy hadron interactions. Eur. Phys. J. C (2009), 60: 345–358. DOI 10.1140/epjc/s10052-009-0945-y
- [8] A.S. Borisov, V.G. Denisova, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, S.A. Karpova, V.M. Maximenko, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.A. Slavatskiy The characteristics of gamma-hadron families induced by primary cosmic rays with an energy more than 10 PeV // Nuclear-physics-B.- 1999, P. 159-161. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(99\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(99)00229-7)
- [9] Mukhamedshin, R.A. On a mechanism of coplanar generation of particles at superhigh energies. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 1999, 75, 141–144.
- [10] Anchordoqui, L.A.; Dai, D.C.; Goldberg, H.; Landsberg, G.; Shaughnessy, G.; Stojkovic, D.; Weiler, T.J. Searching for the Layered Structure of Space at the LHC. Phys. Rev. D 2011, 83, 114046 DOI:10.1103/PhysRevD.83.114046
- [11] Садыков Т.Х., Аргынова А.Х., Жуков В.В., Новолодская О.А., Пискаль В.В. Модернизация периферийных детекторов Тянь-шанского ионизационно-нейтронного калориметра «АДРОН-55». // Известия НАН РК. Серия физико-математических наук. 2021. - Т. 4. - № 338. – С. 121-128. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.75>.
- [12] Shaulov, S.B.; Beyl, P.F.; Beysembaev, R.U.; Beysembaeva, E.A.; Bezshapov, S.P.; Borisov, A.S.; Cherdynceva, K.V.; Chernyavsky, M.M.; Chubenko, A.P.; Dalkarov, O.D.; et al. Investigation of EAS cores. EPJ Web Conf. 2017, 145, 17001. DOI: 10.1051/epjconf/201714517001
- [13] Geant4 Guide For Physics Lists, Release 11.0, Geant4 Collaboration, Rev6.0 - December 10th, 2021.

Reference

- [1] Nam R.A., Nikolskaya N.M., Nikolsky S.I., Sokolovsky V.I., Turkish E.I., Yakovlev V.I. (1970) Jenergeticheskij spektr adronnoj komponenty kosmicheskogo izlucheniya na vysote 3333 m nad urovнем morja [Energy spectrum of the hadron component of cosmic radiation at an altitude of 3333 m above sea level] Trudy FIAN 1970, 10, s34-38. (In Russian) ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=1970-#number=10&word=%CD%E8%EA%EE%EB%FC%F1%EA%E0%FF
- [2] Dremine, I.M.; Madigozhin, D.T.; Yakovlev, V.I. Monte Carlo simulations of long-flying cascades in cosmic rays and leading charm at SSC // AIP Conf. Proc. 1993, 276, 534. <https://doi.org/10.1063/1.43849>
- [3] Bajburina S.G.; Borisov A.S.; Cherdynceva K.V.; Guseva Z.M.; Denisova V.G.; Dunaevskij A.M.; Kanevskaja E.A.; Maksimenko V.M.; Pashkov S.V.; Shaulov S.B.; i drugie (1984) Issledovanie jadernyh vzaimodejstvij v oblasti jenergij $10^{14} - 10^{17}$ jeV metodom rentgenojemul'sionnyh kamer v kosmicheskikh luchah (jeksperiment «Pamir») [Investigation of nuclear interactions in the field of energies $10^{14} - 10^{17}$ eV

by X-ray emulsion chambers in cosmic rays (Pamir experiment)] (In Russian) *Trudy FIAN* 1984, 154, 3–141. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/63009482/>

[4] Capdevielle J. Analysis of one cosmic-ray collision near 10^7 GeV // *Journal of Physics G: Nuclear Physics* 1988, 14, 503. DOI:10.1088/0305-4616/14/4/012 Corpus ID: 120056841

[5] Osedlo, V.I.; Rakobolskaya, I.V.; Galkin, V.I.; Managadze, A.K.; Sveshnikova, L.G.; Goncharova, L.A.; Kotelnikov, K.A.; Martynov, A.G.; Polukhina, N.G. A superfamily with $SE > 1015$ eV observed in stratosphere. In *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 8–15 August 2001*; V. 4, pp. 1426–1429. URL: <http://particle.astro.ru.nl/pub27ICRC2-792.pdf>

[6] Mukhamedshin, R.A. Simulation of coplanar particle generation in hadron interactions at superhigh energies by the new FANSY code. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 2009, 196, 98-101. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.016>

[7] Mukhamedshin, R.A. FANSY 1.0: A phenomenological model for simulation of coplanar particle generation in superhigh-energy hadron interactions. *Eur. Phys. J. C* (2009), 60: 345–358. DOI 10.1140/epjc/s10052-009-0945-y

[8] A.S. Borisov, V.G. Denisova, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, S.A. Karpova, V.M. Maximenko, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.A. Slavatinsky The characteristics of gamma-hadron families induced by primary cosmic rays with an energy more than 10 PeV // *Nuclear-physics-B.-* 1999, P. 159-161. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(99\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(99)00229-7)

[9] Mukhamedshin, R.A. On a mechanism of coplanar generation of particles at superhigh energies. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 1999, 75, 141–144.

[10] Anchordoqui, L.A.; Dai, D.C.; Goldberg, H.; Landsberg, G.; Shaughnessy, G.; Stojkovic, D.; Weiler, T.J. Searching for the Layered Structure of Space at the LHC. *Phys. Rev. D* 2011, 83, 114046 DOI:10.1103/PhysRevD.83.114046

[11] Sadykov T.H., Argynova A.H., Zhukov V.V., Novolodskaja O.A., Piskal' V.V. Modernizacija periferijnyh detektorov Tjan'-shanskogo ionizacionno-nejtronnogo kalorimetra «ADRON-55». [Modernization of peripheral detectors of the Tien Shan ionization-neutron calorimeter "HADRON-55"] (In Russian) *Izvestija NAN RK. Serija fiziko-matematicheskikh nauk.* 2021. - V. 4. - № 338. – P. 121-128. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.75>.

Sadykov T.H., Argynova A.H., Zhukov V.V., Novolodskaja O.A., Piskal' V.V. Modernizacija periferijnyh detektorov Tjan'-shanskogo ionizacionno-nejtronnogo kalorimetra «ADRON-55». [Modernization of peripheral detectors of the Tien Shan ionization-neutron calorimeter "HADRON-55"] (In Russian) *Izvestija NAN RK. Serija fiziko-matematicheskikh nauk.*

[12] Shaulov, S.B.; Beyl, P.F.; Beysembaev, R.U.; Beysembaeva, E.A.; Bezshapov, S.P.; Borisov, A.S.; Cherdynceva, K.V.; Chernyavsky, M.M.; Chubenko, A.P.; Dalkarov, O.D.; et al. Investigation of EAS cores. *EPJ Web Conf.* 2017, 145, 17001. DOI: 10.1051/epjconf/201714517001

[13] *Geant4 Guide For Physics Lists, Release 11.0, Geant4 Collaboration, Rev6.0 - December 10th, 2021.*