

Т. Х. САДЫКОВ, Н. С. ПОКРОВСКИЙ, Н. Н. ЗАСТРОЖНОВА, Е. М. ТАУТАЕВ, Т. К. ЖАМАУОВА

(ТОО «Физко-технический институт», Алматы, Казахстан)

ИЗУЧЕНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ С ПЛОТНОЙ МИШЕНЬЮ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

Аннотация. На Высокогорной научной станции космических лучей, расположенной в горах Тянь-Шаня на высоте 3340 метров над уровнем моря, проводилась регистрация частиц космического излучения. Экспериментальные данные были получены при энергиях больше 1013 эВ на комплексных установках «Адрон-9» площадью 9 м² и «Адрон-44» площадью 44 м². Основным объектом исследований являются взаимодействия космических лучей с атомными ядрами мишени. Проводится анализ азимутальных и квазибыстротных распределений вторичных частиц.

Ключевые слова: большой адронный коллайдер, ионизационный калориметр, гамма-квант.

Тірек сөздер: үлкен адрон коллайдер, серпімсіздік коэффициенті, ионизациялық калориметр, гамма-квант.

Keywords: large Hadron Collider, inelasticity coefficient, ionization calorimeter, gamma quantum.

В связи с опубликованием результатов, полученных в ЦЕРНе на ускорителе Большого адронного коллайдера (БАК), имеется возможность сравнить некоторые характеристики взаимодействий частиц космического излучения с ускорительными результатами.

Этот интерес объясняется тем, что в работах БАК [1, 2] на детекторе CMS (Compact Muon Solenoid – компактный мюонный соленоид) в протон-протонных столкновениях при исследовании угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций $\Delta\eta$ - $\Delta\phi$ появляются четко выраженные структуры для пар частиц, не предсказанные модельными расчетами. Наблюдаемые структуры в основном имеют парные распределения. Одна из пар имеет колоколообразную форму, вторая зачастую в виде протяженной структуры. Нечто похожее наблюдалось ранее, в ионных столкновениях на ускорителе RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider – релятивистский тяжело-ионный коллайдер) в Брукхевенской национальной лаборатории.

Следует отметить, что первые указания на корреляции частиц с малым отличием в азимутальных углах и большой протяженностью по полярным углам (псевдобыстроте) были получены еще раньше – более 25 лет тому назад – в космических лучах в сотрудничестве «Памир» [3, 4] (видимо, в соударениях протонов с ядрами воздуха), как раз при энергиях, соответствующих энергиям LHC. Тогда такие события получили название веерных событий (fan-shaped), а само явление – выстроенности (alignment) – из-за схожести на узкий горный хребет, протянувшийся через всю плоскость, перпендикулярную оси столкновений, и проходящий через точку ее пересечения с этой плоскостью. Доля зафиксированных событий с подобным построением является статистически значимой для событий со сверхвысокими энергиями.

Кроме этого, парные структуры наблюдали при экспозиции РЭК в горах Тянь-Шаня [5], несколько позже в 1979 году такие же структуры были обнаружены японо-бразильской коллаборацией на горе Чакалтайя [6] и в эксперименте «Памир».

Таким образом эксперименты в космических взаимодействиях являются как бы разведчиками при сверхвысоких энергиях взаимодействия.

В данной работе проводится исследование угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций для событий зарегистрированных в космических лучах установках «Адрон-9» и «Адрон-44» по методу применяемому в работах БАК [1, 2].

Описание установки, отбор событий генерированных в мишени. Установки состояли из плотной мишени, рентгеноэмульсионной камеры (РЭК) и ионизационного калориметра (ИК), что позволяло измерять энергию первичной частицы E_0 , координаты вторичных частиц X , Y и Z и энергии выше порога регистрации и в РЭК и ИК. Мишень, площадью 60 м^2 толщиной $0,15$ пробега для взаимодействия была установлена на высоте 11 метров над установкой. Подробное описание установки дается в работе [7].

Для анализа отбирались семейства гамма-квантов, генерированные в мишени. Безусловно, выборка только мишенных взаимодействий существенно обедняет статистику, так как при малой толщине мишени по сравнению с толщиной атмосферы доля мишенных событий в статистическом материале мала. Тем не менее, отбор мишенных взаимодействий снимает массу неопределенностей, сопряженных с анализом атмосферных взаимодействий.

Дело в том, что при исследовании атмосферных гамма-семейств, зарегистрированных в РЭК невозможно корректно определить высоту точки взаимодействия. Тем самым вся информация, касающаяся поперечных импульсов гамма-квантов, примеси вторичных ядерных взаимодействий в атмосфере, вклада чистых электронно-фотонных каскадов получается с большой долей неопределенности. Кроме того, при анализе атмосферных адрон-ядерных взаимодействий неопределенной остается и природа ядра мишени, то есть столкновение произошло с ядром атома H , N , O . При выборе критериев отбора проводилось моделирование по программе «КОРСИКА» [7]. Мишенные взаимодействия в нашем эксперименте отбирались по следующим критериям:

1. Число гамма-квантов в семействе $n_\gamma \geq 4$.
2. Траектория движения гамма-квантов проходит через мишень.
3. Гамма-кванты, образующие семейство, должны располагаться в пределах круга радиусом $R \leq 30$ мм. Данное требование вытекает из сравнительно небольшой высоты расположения мишени и ограниченности поперечного импульса вторичных частиц.

4. Азимутальные и зенитные углы гамма-квантов должны совпадать в пределах ошибок измерений.

5. Суммарная энергия гамма-квантов, то есть энергия гамма- семейства $\Sigma E_\gamma \geq 4$ Тэв.

6. В пределах окружности радиуса 50 см нет гамма-квантов с углами вылета, совпадающими с углами гамма-квантов семейства. Это требование исключало вклад от семейств, образованных в атмосфере, до высоты 5 км над установкой.

7. Семейства гамма-квантов, сопоставленные с короткими лавинами в ионизационном калориметре, в дальнейший анализ не включались. Данные ионизационного калориметра позволяют достоверно отделить чистый электронно-фотонный каскад из атмосферы от семейства гамма-квантов из ядерного взаимодействия. В случае ядерного взаимодействия гамма-кванты следуют в сопровождении адронов, дающих в калориметре длинную лавину. Чистый ЭФК из атмосферы образует короткую лавину, почти вся энергия выделяется в первых трех рядах ионизационных камер, прослоенных свинцом. Поэтому семейства гамма – квантов, сопоставленные с короткими лавинами, в дальнейший анализ не включались.

На рисунке 1 приведено распределение среднего отношения высот, определенных двумя способами к геометрической высоте мишени. Здесь $\eta = (H_1 + H_2) / 2H$ отношение суммы высот, определенных вышеуказанным способом, H -истинная высота расположения мишени.

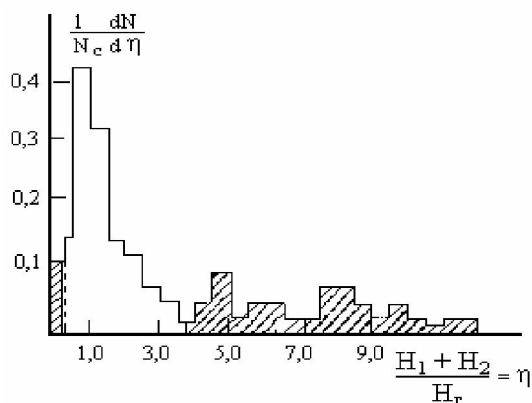


Рисунок 1 – Распределения среднего отношения высот, определенных двумя способами к геометрической высоте мишени. $\eta = (H_1 + H_2) / 2H$ – отношение суммы высот, определенных различными способом, H – истинная высота расположения мишени

Из рассмотрения представленного распределения видно, что оно делится на три группы семейств, разделенных друг от друга. Левая часть, соответствующая малым высотам-ЭФК, центральная часть, группирующаяся вокруг мишенных событий и правая часть с семействами из атмосферных взаимодействий. Таким образом, использование сведений с ионизационного калориметра и применение вышеописанных критериев позволило из 2239 зарегистрированных событий отобрать 464 семейства гамма-квантов, генерированные в мишени.

Обработка экспериментальных данных. Возможный вклад струйных эффектов в процессах генерации вторичных частиц побудил нас к изучению этого аспекта с помощью исследования квазибыстрых распределений. Корреляции были измерены на протяжении нескольких единиц квазибыстроты и полного азимутального угла.

Распределение направлений вылета вторичных частиц космического излучения по азимутальному углу показано на рисунке 2.

Распределение по азимутальному углу были построены с шириной интервала 0,2618 радиан соответствующей углу 15° . Исследование азимутального углового распределения вторичных частиц рожденных в ядерных взаимодействиях являются важнейшим источником информации о механизме этих взаимодействий. Азимутальный угол φ ($0 \leq \varphi < 2\pi$) вторичной частицы определяется как угол между начальной плоскостью, содержащей продольные импульсы вторичных и импульсы первичной частиц с плоскостью перпендикулярной направлению движения первичной частицы. Распределение частиц по азимутальному углу не согласуются с изотропным распределением (по критерию χ^2).

Рентгеноэмульсионная камера с мишенью на фиксированной высоте позволяет с большой точностью измерять угловые характеристики взаимодействий, произошедших в мишени. Однако,

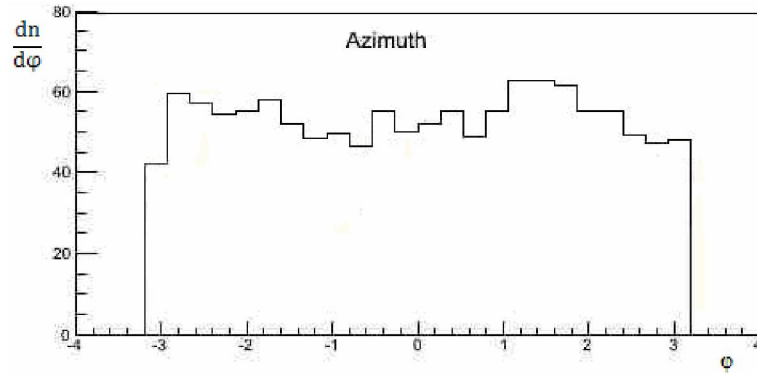


Рисунок 2 – Распределение направлений вылета вторичных частиц космического излучения по азимутальному углу

наличие сравнительно большого энергетического порога регистрации ($\sim 0,5$ ТэВ) фотонов в ядерной эмульсии приводит к выборке наиболее энергичных, фрагментационных частиц. Действительно, как показывают результаты эксперимента, подавляющая часть гамма-квантов, входящих в состав семейств фиксируется в телесном угле с раствором $\theta \leq 10^{-4}$ рад, что свидетельствует о потере частиц с большими углами вылета. На рисунке 3 показано распределение вторичных частиц по квазибыстроте, которое доходит до 14.

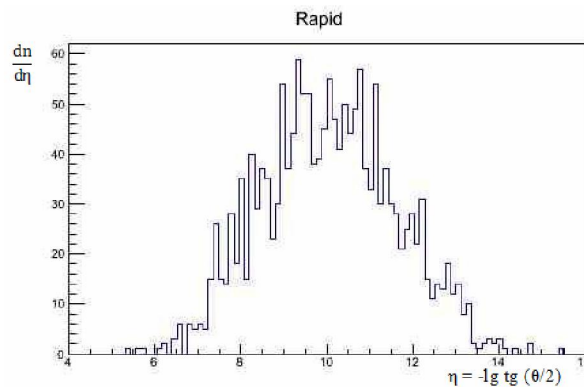


Рисунок 3 – Распределение вторичных частиц космического излучения по квазибыстроте

Для определения азимутальной анизотропии во взаимодействиях космических частиц с мишенью использовались двухчастичные корреляции, которые являются мощным инструментом для изучения механизма образования частиц в высокоэнергетических столкновениях адронов и ядер. Такие исследования содержат важную информацию, характеризующую квантовую хромодинамику (КХД) в данном энергетическом режиме, в особенности механизм адронизации и возможные коллективные эффекты вследствие большой плотности частиц, которой удается достичь при таких столкновениях. Было проведено два связанных между собой исследования угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций $\Delta\eta - \Delta\phi$. Здесь $\Delta\eta$ – разность псевдобыстрот $\eta (= -\ln(\tan(\theta/2)))$, где θ – полярный угол, измеряющий отклонение от оси пучка), а $\Delta\phi$ – разность азимутальных углов ϕ (в радианах) двух частиц.

На рисунке 4 показано распределение угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций.

Как видно из рисунка 4, наблюдаются два четко выраженных пика с размерами по азимуту от $-0,5$ до $+2$ и по квазибыстроте – первый пик от $4,5$ до $2,0$, второй от $1,0$ до $-1,5$. Это первый опыт наблюдения такой структуры в двухчастичной корреляционной функции при взаимодействии частиц космического излучения с веществом. В дальнейшем эти структуры будут описаны с помощью простой модели «независимых кластеров» с целью количественного определения их силы (размер кластера) и их распространенности по η (ширина распада кластера). Это первый опыт наблюдения такой структуры в двухчастичной корреляционной функции при взаимодействии частиц космического излучения с веществом.

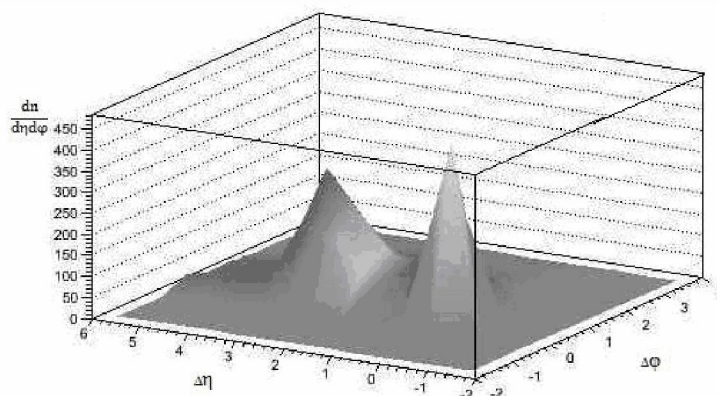


Рисунок 4 Распределение угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций $\Delta\eta - \Delta\phi$

Для сравнения с ускорительными данными мы представляем рисунок 5 из работы [2], где представлена двухчастичная корреляционная функция полученная в эксперименте «АЛИСА» при протон-протонных взаимодействиях с первичной энергией в системе центра масс 7 ТэВ. На этом рисунке наблюдаются два распределения – один четкий пик и второй с некоторым возрастанием. Качественно рисунки 4 и 5 похожи.

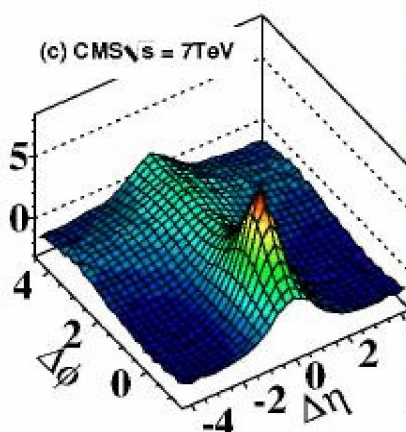


Рисунок 5 –
Двухчастичная корреляционная $\Delta\eta - \Delta\phi$
в PP столкновениях при энергиях
в системе центра масс 7,0 ТэВ

Заключение. На комплексных установках «Адрон-9» и «Адрон-44», включающих ионизационные калориметры, рентгеноэмульсионные камеры и тонкую мишень и расположенные на высоте 3340 метров над уровнем моря получены следующие результаты:

1. Распределения вторичных частиц по азимутальному углу не согласуются с изотропным распределением (по критерию χ^2).

2. Наличие сравнительно большого энергетического порога регистрации ($\sim 0,5$ ТэВ) фотонов в ядерной эмульсии приводит к выборке наиболее энергичных, фрагментационных частиц. Действительно, как показывают результаты эксперимента, подавляющая часть гамма-квантов, входящих в состав семейств фиксируется в телесном угле с раствором $\theta \leq 10^{-4}$ рад, что свидетельствует о потере частиц с большими углами вылета.

3. При исследовании угловых корреляций с использованием двумерных корреляционных функций $\Delta\eta - \Delta\phi$ обнаружилось два четко выраженных пика с размерами по азимуту от $-0,5$ до $+2$ и по квазибыстроте- первый пик от $4,5$ до $2,0$, второй от $1,0$ до $-1,5$.

4. При сравнении с ускорительными данными наблюдается качественно схожие картины.

ЛИТЕРАТУРА

1 ALICE Collaboration, B. Abelev et al., «Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,» arXiv:1212.2001v2 [nucl-ex]

- 2 ALICE Collaboration, B. Abelev et al., «Observation of Long-Range, Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC» arXiv:1009.4122v1 [hep-ex].
- 3 L. T. Baradzei et al. [Pamir Collaboration], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 50N11, 46 (1986)
- 4 Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 50, 2125 (1986); MGU-89-67-144 (1989); Bull. Russ. Acad.
- 5 Ж.С.Такибаев, Т.Х.Садков, «Парное образование пионных кластеров в области энергий 25 ТэВ» Известия АН Каз ССР, 1977? сер. Физ.-мат. №4, стр.15-19.
- 6 Hasegava S., Fujimoto Y., Tamada M., et al. Interactions. Multiple Meson Production in the $\sum E_\gamma > 2 \cdot 10^{13}$ eV Region. // Proc. of Bartol Conference, 1979, vol.1, p.245.
- 7 К.М.Мукашев, Т.Х.Садков Физика, астрофизика космических лучей и аномальные эффекты в адронных взаимодействиях. Алматы, 2011

REFERENCES

- 1 ALICE Collaboration, B. Abelev et al., «Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV» arXiv:1212.2001v2 [nucl-ex]
- 2 ALICE Collaboration, B. Abelev et al., «Observation of Long-Range, Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC» arXiv:1009.4122v1 [hep-ex].
- 3 L. T. Baradzei et al. [Pamir Collaboration], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 50N11, 46 (1986)
- 4 Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 50, 2125 (1986); MGU-89-67-144 (1989); Bull. Russ. Acad.
- 5 Zh.S.Nakibayev, T.Kh.Sadykov, «Pair formation of pion clusters in the energy range 25 TeV» Известия АС Каз УССР, 1977? сер. Phys-math. №4, p.15-19.
- 6 Hasegava S., Fujimoto Y., Tamada M., et al. Interactions. Multiple Meson Production in the $\sum E_\gamma > 2 \cdot 10^{13}$ eV Region. // Proc. of Bartol Conference, 1979, vol.1, p.245.
- 7 К.М.Мукасhev, Т.Х.Садков " Physics, astrophysics, cosmic rays and the anomalous effects in hadron interactions " Almaty, 2011

Резюме

Т. Х. Садыков, Н. С. Покровский, Н. Н. Застрожная, Е. М. Таутаев, Т. К. Жаманова

(«Физика-техникалық институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан)

ҒАРЫШ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ТЫҒЫЗ НЫСАНАМЕН ӘРЕКЕТТЕСУІНІҢ
БҰРЫШТАМА ТАРАТУШЫЛЫҚТАРЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҮЛКЕН АДРОНДЫҚ КОЛЛАЙДЕРДІҢ
МӘЛІМЕТТЕРІМЕН САЛЫСТЫРУ

Теңіз деңгейінен 3340 метр биіктікте орналасқан биік таулы ғылыми ғарыш сәулелер станциясында ғарыш сәулелердің тіркелуі өткізілді. Осы жұмыста энергиясы 10^{13} эВ жоғары әр тіркелген әрекеттестіктің РЭК және ионизациялық калориметр деректерін қолданып, серпімсіздік коэффициенті анықталады. Сонымен қатар K_γ мағынасының $\sum E_\gamma$ және E_0 мағыналарынан алдын ала есептеліп болжанған байланысы анықталды. Алынған K_γ мағыналары есептелген нәтижелермен жақсы сәйкеседі.

Тірек сөздер: үлкен адрон коллайдер, серпімсіздік коэффициенті, ионизациялық калориметр, гамма-квант.

Summary

T. Kh. Sadykov, N. S. Pokrovsky, N. N. Zastrozhnova, Y. M. Tautayev, N. K. Zhamanova

(Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan)

STUDY OF ANGULAR DISTRIBUTIONS
IN THE INTERACTIONS OF COSMIC PARTICLES WITH DENSE TARGET AND COMPARISON
WITH THE DATA OF THE LARGE HADRON COLLIDER.

At high research cosmic rays station located in the Tien Shan mountains in altitude 3340 meters above sea level were recorded cosmic ray particles. Experimental data were obtained at energies above 10^{13} eV on complex installations "Hadron-9" which area of 9 m² and "Hadron 44" area of 44 m². The main object of study is the interaction of cosmic rays with atomic nuclei of the target. The main object of study is the interaction of cosmic rays with atomic nuclei of the target.

Keywords: large Hadron Collider, inelasticity coefficient, ionization calorimeter, gamma quantum.