

УДК 537.591.15

СТРУКТУРА ОТКЛИКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ В ЛИВНЯХ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 10^{19} эВ

Ю.А. Егоров, С.П. Кнуренко, З.Е. Петров

STRUCTURE OF SCINTILLATION DETECTOR RESPONSE AT YAKUTSK EAS ARRAY IN SHOWERS WITH ENERGY ABOVE 10^{19} eV

Yu.A. Egorov, S.P. Knurenko, Z.Ee. Petrov

Синхронные измерения заряженных частиц большим количеством сцинтилляционных детекторов на уровне моря дают интегральную картину развития ливня в плоскости установки, т. е. полное число электронов, полное число мюонов. Регистрация импульсов от сцинтилляционных детекторов по времени прихода отдельных групп частиц дает нам возможность восстановить пространственно-временную картину развития ливня в атмосфере и лучше понять схему ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Simultaneous measurements of charged particles by large amount of scintillation detectors at the sea level give a broader picture of shower development in the array plane, i.e. total number of electrons and total number of muons. Registration of pulses from scintillation detectors with discrimination by arrival times of separate particle groups allows us to reconstruct spatial-temporal picture of shower development in the atmosphere and to gain greater insight into the mechanism of nuclear interactions at ultra-high energies.

Экспериментальная установка

На Якутской установке имеется два пункта измерений формы импульса, удаленных на 500 м друг от друга. В каждом пункте для определения временных характеристик ШАЛ (широких атмосферных ливней), в том числе и координат оси ливня, направления прихода первичной, используются сигналы десяти фотоэлектронных умножителей, регистрирующих черенковский свет, и семи сцинтилляционных детекторов, регистрирующих поток электронов и мюонов ШАЛ. Сцинтилляционные детекторы отличаются как по временному разрешению (быстрые и медленные), так и по энергетическому порогу регистрации частиц (2 и 10,5 МэВ) [1]. Отбор событий производится по сцинтилляционному и черенковскому «мастерам» (рис. 1).

Для цифровой регистрации формы импульса от детекторов используется промышленный составной компьютер класса Пентиум-4 повышенной надежности и объединительной платой с девятнадцатью PCI-слотами. В PCI-слоты вставлены платы Лан10м8 PCI с двумя быстрыми 8-разрядными АЦП с частотой дискретизации 100 МГц и буферной памятью 2 Мб. Компьютер рассчитан на 20 АЦП.

При наличии «мастерного» сигнала от основной установки ШАЛ программа регистрации записывает данные о временной развертке отклика в черенковских и сцинтилляционном детекторах в файл в виде кадровой последовательности. В сутки регистрируется

до 800 ШАЛ с энергией от 10^{15} до 10^{19} эВ. В каждом кадре записывается информация с 18 каналов и технические характеристики электроники. Суточная информация записывается и хранится на жестком диске компьютера.

Предварительные результаты

По временной развертке сигнала в сцинтилляционном детекторе можно отождествлять быстрые частицы, приходящие впереди фронта, и медленные частицы, приходящие с большими задержками относительно самой быстрой частицы, – задний фронт. По развертке сигнала в больших временных масштабах (порядка 15–25 мкс) можно судить о толщине и кривизне диска на больших расстояниях от оси ШАЛ, изучать необычные формы сигнала.

За время работы установки с 2006 по 2009 гг. зарегистрированы $\sim 1.2 \cdot 10^5$ событий ШАЛ с энергией выше 10^{15} эВ с разной формой сигнала. Наблюдались и ливни, у которых форма импульса отличалась от сигналов, присущих общей массе ливней. На развертке сигнала в одном канале имелось два импульса, разнесенных на время Δt более 100 нс относительно друг друга, и это можно было интерпретировать как наличие двух фронтов, образованных двумя одновременно пришедшими на детектор ШАЛ (рис. 2). Первый импульс отражает обычное развитие ливня, а второй образован как бы другой первичной частицей или частицей, порожденной в ходе взаимодействия тяжелой частицы с экраном детектора [2].

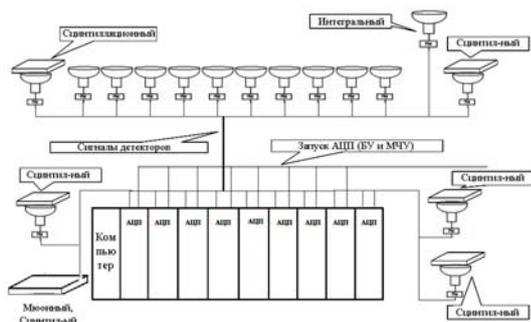


Рис. 1. Схема регистрации.

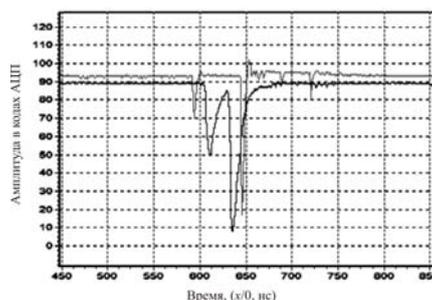


Рис. 2. Аномальная форма импульса, зарегистрированная одновременно на двух станциях на нескольких каналах.

По количеству вещества, пройденному в атмосфере, различают «молодые» и «старые» ливни.

Молодые ливни – это вертикальные ливни с $\Theta \leq 30^\circ$. Они имеют импульс с полушириной 200–250 нс и несколько вершин. На пути в 1050 г/см^2 адронная, электрофотонная и мюонная компоненты ШАЛ активно развиваются и в достаточном количестве присутствуют на уровне наблюдения [3]. Отклик детекторов в таких ливнях имеет однообразную форму.

Старые ливни – это ливни, приходящие под большим углом $\Theta \geq 60^\circ$, обычно эти ливни имеют высокий максимум развития. Развитие сильно наклонных ливней происходит на протяжении нескольких атмосфер и составляет, если считать расстояние между точкой первого взаимодействия и положением детектора на уровне установки, для углов 60° и 85° соответственно $1940\text{--}11600 \text{ г/см}^2$ для Якутска. На этом пути почти вся электромагнитная компонента ШАЛ поглощается, и до детектора доходят только энергичные мюоны (обычно 2–1000 ГэВ) и незначительное по количеству электромагнитное сопровождение (гало), образующееся в результате таких процессов, как распад мюона, тормозного излучения и рождения пар. В результате на уровне регистрации мы имеем почти плоский фронт (большую кривизну) и небольшую толщину диска [1].

Исходя из вышесказанного, можно провести классификацию ливней по форме их сигналов. Электронно-фотонный ливень имеет большую по сравнению с мюонным ливнем полуширину по полувисоте импульса. Структура импульса состоит из многих пилообразных вершин, распределенных в интервале от 0 до 1000 нс относительно первой, пришедшей на детектор частицы (рис. 3). В большей степени такие импульсы как бы отражают струйный характер генерации входящих в ШАЛ ядерно-активных частиц и формирования электронно-фотонной компоненты ливня. Обычно такая форма импульса присуща вертикальным ливням с низким максимумом развития в атмосфере.

Из большого массива данных можно выделить немногочисленную группу ливней, у которых ярко выраженная двугорбая форма (рис. 3). Такая форма прослеживается как в одном, так и в двух, трех детекторах. Время запаздывания второй группы частиц лежит в пределах 60–350 нс от первой. Число таких событий всего $\sim(1.5\text{--}2) \%$ от общего числа зарегистрированных событий ШАЛ.

Мюонные ливни имеют округлую вершину импульса и заметно $\approx 30 \%$ меньшую полуширину по сравнению с импульсом от электронно-фотонной компоненты ливня (рис. 4). Судя по импульсу, такие частицы приходят компактно, т. е. распределены в меньшем интервале по времени, от 0 до 550 нс. Такая форма импульса наблюдается в сильно наклонных ливнях и в ливнях с высоким максимумом развития.

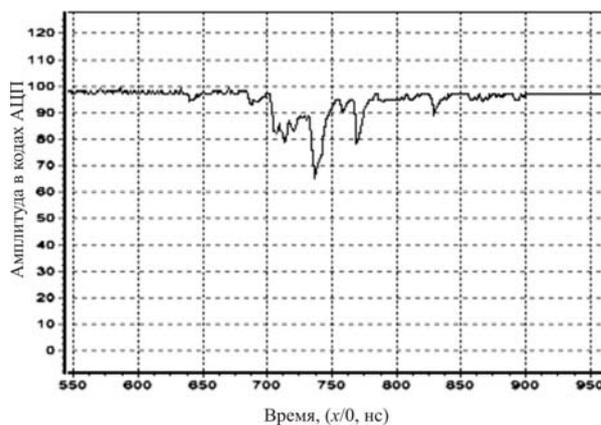


Рис. 3. Форма импульса, зарегистрированная на расстоянии $R = 1298 \text{ м}$ от оси ливня. Энергия ливня равна $E_0 = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$, зенитный и азимутальный углы соответственно равны 18° и 78° .

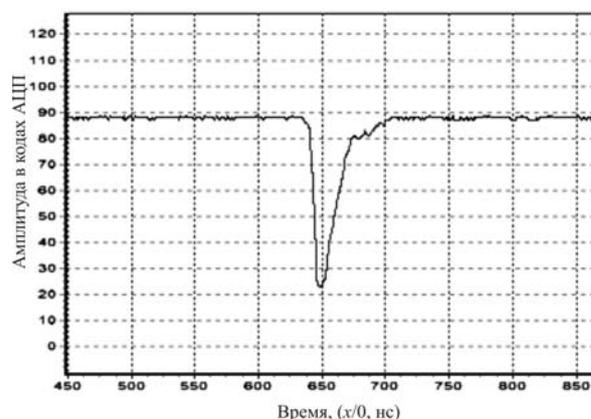


Рис. 4. Форма импульса, зарегистрированная на расстоянии $R = 1000 \text{ м}$ от оси ливня. Энергия ливня равна $E_0 = 19.29$, зенитный угол – 59.6° .

Заключение

Благодаря разнице во времени распада между нейтральными и заряженными пионами, в большинстве случаев ядерные взаимодействия заканчиваются электромагнитным каскадом, и более 70 % энергии первичной частицы, в конечном счете, уходит на образование электронов, которые растрчивают ее на ионизацию воздуха. В процессе развития ливня по мере продвижения в глубь атмосферы полное число частиц возрастает, а когда ионизационные потери становятся значительными, начинает уменьшаться.

Предварительный анализ полученных данных показал:

а) временная структура импульса зависит от параметра $\Delta X = X_0 \cdot \text{Sec}\theta - X_0$ (здесь $X_0 = 1020 \text{ г/см}^2$ для Якутска), т. е. от количества вещества, в котором развивается ливень;

б) форма импульса в вертикальных событиях ШАЛ отражает струйный характер продольного развития ливня и отражает, в большей степени, генерацию электронно-фотонной компоненты, в наклонных ливнях частицы приходят на уровень моря компактной группой, по-видимому, одни мюоны с малой долей электронов;

в) в развертке некоторых ливней имеются задержанные на время более 2 мкс импульсы небольшой амплитуды, которые являются медленными электронами мюонного гало или являются продуктами взаимодействия мюонов с экраном сцинтилляционных детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knurenko S.P., et al. "Spati-temporal distribution of cascade particles below the maximum of EAS development with $E_0 \geq 10^{17}$ eV", Proc. 21st ECRS, Kosice. 2008. P. 465–468.
2. Erlykin A.D. EAS and the physics of high-energy interactions. The talk at 20 ECRS, Lisbon, 2006.

3. Еленский Я.С. О поведении ШАЛ на поздних стадиях развития. 30-я Всероссийская конференция по космическим лучам. Санкт-Петербург, 2008 (частное сообщение). С. 3.

4. Дьяконов М.Н., Ефимов Н.Н., Егоров Т.А. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. Новосибирск: Наука, 1991. 254 с.

5. Артамонов В.П. и др. Регистрация формы импульса от заряженных частиц на Якутской установке ШАЛ. Труды Конференции по космическим лучам. Часть 1. Алма-Ата, 1989.

Институт космофизики и астрономии СО РАН им. Ю.Г. Шафера, Якутск