

## Поиск особенностей ШАЛ при регистрации запаздывающих частиц и мюонов на установке ШАЛ МГУ

Г. К. Гарипов<sup>1, а</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Поступила в редакцию 13.09.2021, после доработки 07.10.2021, принята к публикации 21.10.2021.

На установке ШАЛ МГУ [1, 2] изучались временные распределения частиц в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), в которых образуется более  $10^5$  частиц при взаимодействии космических лучей с энергией более  $10^{14}$  эВ с атмосферой.

В 3.5% ШАЛ с помощью незранированного детектора, расположенного на поверхности Земли, были зарегистрированы запаздывающие частицы. В 60% ШАЛ с помощью экранированного детектора, расположенного под слоем грунта, эквивалентным 20 м водного столба, были зарегистрированы мюоны. Сигналы детекторов регистрировались с помощью двухлучевого аналогового запоминающего осциллографа.

Получено, что вероятность регистрации увеличивается при наблюдении мюонов для ШАЛ, содержащих от  $10^5$  до  $10^6$  частиц, а при наблюдении запаздывающих частиц — для ШАЛ, содержащих от  $10^6$  до  $10^7$  частиц. Распределение по расстояниям до оси ШАЛ при наблюдении задержанных частиц более широкое, чем для мюонов, а распределения по возрасту в пределах ошибок не отличаются.

В работе рассматриваются особенности ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, и предположения о том, что высота возникновения запаздывающих частиц может находиться выше высоты, на которой образуются электроны и мюоны ШАЛ.

*Ключевые слова:* космические лучи, широкие атмосферные ливни, элементарные частицы.

УДК: 537.591.15. PACS: 13.85.Tr, 90.70.Sa.

### ВВЕДЕНИЕ

Частицы широких атмосферных ливней образуются при взаимодействии космических лучей с атмосферой и движутся компактной группой в виде диска частиц со скоростью, близкой к скорости света, ось которого совпадает с направлением движения первичной частицы. Толщина диска увеличивается с увеличением расстояния от оси, но на расстояниях менее 200 м не превышает нескольких метров. Временные интервалы между частицами диска, достигшими уровня наблюдения, составляют нескольких десятков наносекунд. Если в ШАЛ возникают запаздывающие частицы, то такие частицы отстают от диска ливня, сигналы которых могут быть обнаружены при изучении временных распределений частиц в ШАЛ.

Исследования запаздывающих частиц проводятся более 50 лет. Тем не менее однозначного мнения о природе этих частиц до сих пор не сформировано. Интерес к этим исследованиям возник в связи с задачами поиска новых тяжелых долгоживущих частиц. При исследовании ШАЛ были зарегистрированы запаздывающие частицы, но рассматривались две альтернативные точки зрения. По одной из которых источником запаздывающих частиц могли быть новые тяжелые долгоживущие частицы, которые отстают от частиц диска ШАЛ из-за большой массы. По другой точке зрения запаздывающие частицы — это либо нерелятивистские протоны и нейтроны, либо мюоны малых энергий, которые также отстают от диска ШАЛ, но из-за малых энергий.

Несмотря на то, что на ускорителях не обнаружено новых тяжелых долгоживущих частиц, которые могли бы объяснить запаздывающие частицы, вопрос не закрыт полностью, поскольку до сих пор не определен источник запаздывающих частиц.

На ускорителях взаимодействия определенных пар частиц изучались до энергий  $10^{13}$  эВ в системе центра масс с помощью аппаратуры, настроенной на поиск определенных типов взаимодействий одинаковых частиц. При изучении космических лучей взаимодействия частиц можно изучать до энергий  $10^{20}$  эВ в лабораторной системе координат. Это позволяет наблюдать взаимодействия разнообразных частиц в естественной среде больших размеров, такой как атмосфера Земли или космическое пространство. Ускорителей, разгоняющих частицы до таких предельных энергий, не существует, поэтому изучение взаимодействий частиц в космических лучах представляется более разнообразным и по-прежнему интересным.

В настоящей работе рассматриваются запаздывающие частицы, зарегистрированные в ШАЛ с энергиями  $10^{14}$ – $10^{17}$  эВ, исследования которых проводились в МГУ.

Сигналы от запаздывающих частиц по форме импульса в сцинтилляционном детекторе, которые в основном используются для изучения временных распределений частиц в ШАЛ, не отличаются от сигналов основных частиц ШАЛ. Признаком регистрации запаздывающей частицы является регистрация импульса, время запаздывания которого превосходит статистические флуктуации временного распределения основных частиц диска ШАЛ. Поэтому одна из задач при изучении причин возникновения запаздывающих импульсов — исследование ШАЛ, которые

<sup>а</sup> E-mail: [ggkmsu@yandex.ru](mailto:ggkmsu@yandex.ru)

являются источником запаздывающих частиц, с целью поиска их отличий от типичных ШАЛ.

В этой работе для поиска особенностей ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, проводится сравнение их с ШАЛ с зарегистрированными мюонами. В этом случае ШАЛ отбираются при равной кратности совпадений по числу частиц, поскольку к требованиям отбора ШАЛ аппаратурой установки при наблюдении запаздывающих частиц добавляется требование наблюдения запаздывающей частицы, а при наблюдении мюонов — мюона, что позволило выровнять порог отбора событий по числу частиц.

Исследования ШАЛ также представляются интересными, поскольку связаны не только с взаимодействием частиц сверхвысоких энергий, но и со свойствами первичного космического излучения. Поэтому изучение ШАЛ позволяет исследовать возможную связь запаздывающих частиц с космическими явлениями. В последующих разделах этой работы с целью поиска особенностей рассматриваются события, в которых наблюдались запаздывающие частицы и мюоны в зависимости от возраста, пространственного распределения и полного числа частиц в ШАЛ.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Установка ШАЛ МГУ позволяла регистрировать ШАЛ, в которых образовалось более  $10^5$  частиц при взаимодействии частиц космических лучей с энергиями более  $10^{14}$  эВ с атмосферой. Подробное описание технических характеристик, а также целей и задач, решаемых с помощью этой установки, приведено в [1]. Для изучения запаздывающих и опережающих частиц в центре этой установки была создана осциллографическая установка, состоящая из неэкранированного центрального сцинтилляционного детектора площадью  $4 \text{ м}^2$ , расположенного на поверхности земли, и экранированного детектора площадью  $5 \text{ м}^2$ , расположенного под слоем грунта, эквивалентного 20 м водного столба. Толщина пластика детекторов была 5 см, сигналы от одной релятивистской частицы соответствовали частице, которая теряла в пластике детектора около 10 МэВ энергии. Сигналы с детекторов регистрировались с помощью двухлучевого запоминающего аналогового осциллографа. Осциллограф запускался при совпадении сигналов в четырех равных частях неэкранированного центрального детектора, каждая площадью  $1 \text{ м}^2$ . Частота запуска осциллографа составляла примерно 4 раза в минуту. Длина развертки лучей осциллографа позволяла наблюдать временное распределение частиц в интервале 500 нс. Время задержки синхрои импульса относительно момента появления ШАЛ определялось временем совпадения сигналов в четырех частях центрального неэкранированного детектора, которое для ШАЛ, зарегистрированных на расстоянии менее 200 м от оси, не превышало 50 нс. Сигнал с этого детектора подавался на вход осциллографа с помощью кабеля со временем задержки 180 нс, так что импульс на экране появлялся с задержкой примерно равной 100 нс относительно начала развертки осциллографа, что позволяло наблюдать как

запаздывающие частицы, так и опережающие частицы относительно начала ШАЛ. Для экранированного детектора, находящегося в подземном помещении, возникала еще дополнительная задержка длительностью около 70 нс, вызванная полетным временем мюонов к детектору относительно поверхности земли и временем задержки сигнала в кабеле передачи сигнала детектора на вход осциллографа. Поэтому сигнал на нижней развертке появлялся с задержкой приблизительно равной 250 нс относительно начала развертки осциллографа. После запуска осциллографа осциллограмма сигнала запоминалась примерно на одну секунду и фотографировалась при совпадении импульса запуска осциллографа длительностью 100 нс и импульса запуска установки ШАЛ МГУ длительностью 300 нс. Частота совпадений импульсов запуска осциллографа и установки ШАЛ МГУ составляла около 25 раз в час. Вместе с осциллограммой фотографировалось цифровое табло с информацией о времени, дате и номере события.

Осциллографическая установка эксплуатировалась с 1986 по 1990 гг. сеансами по несколько сотен часов в год в основном в ночное время. Суммарная экспозиция установки составила около 1000 часов. За время наблюдений было сфотографировано около  $35 \times 10^3$  осциллограмм временных распределений частиц в ШАЛ, расстояние до оси которых было менее 200 м. При этом в  $1.2 \times 10^3$  случаях наблюдались запаздывающие частицы с помощью неэкранированного центрального детектора и примерно в  $21 \times 10^3$  случаях наблюдались мюоны с помощью экранированного детектора. Также с помощью осциллографической установки проводились дополнительные эксперименты с целью изучения особенностей запаздывающих частиц. Основные свойства сигналов в сцинтилляционном детекторе от запаздывающих частиц представлены в работах [3–5]. Примеры исследований свойств запаздывающих частиц, выполненных с помощью других установок, приведены в работах [6, 7]. Ссылки на обзор работ, посвященных изучению временных распределений частиц в ШАЛ, можно найти в работе [6]. К числу первых работ, где с помощью осциллографической установки изучались запаздывающие частицы на расстояниях до оси ШАЛ более 1 км, можно отнести работу [8]. Сокращенный вариант настоящей работы приведен в работе [9].

## 2. ПРИМЕРЫ ОСЦИЛЛОГРАММ СИГНАЛОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ И МЮОНОВ

На рис. 1, *а, б, в, г*, приведены фотографии осциллограмм сигналов сцинтилляционных детекторов при регистрации ШАЛ с помощью осциллографической установки.

Сигнал с неэкранированного центрального детектора отрицательной полярности подавался на верхний луч развертки осциллографа. Первый импульс на этой развертке — сигнал от частиц образующих диск ливня, второй импульс, если он наблюдался, — сигнал от запаздывающей частицы. Сигнал с экранированного детектора подавался на

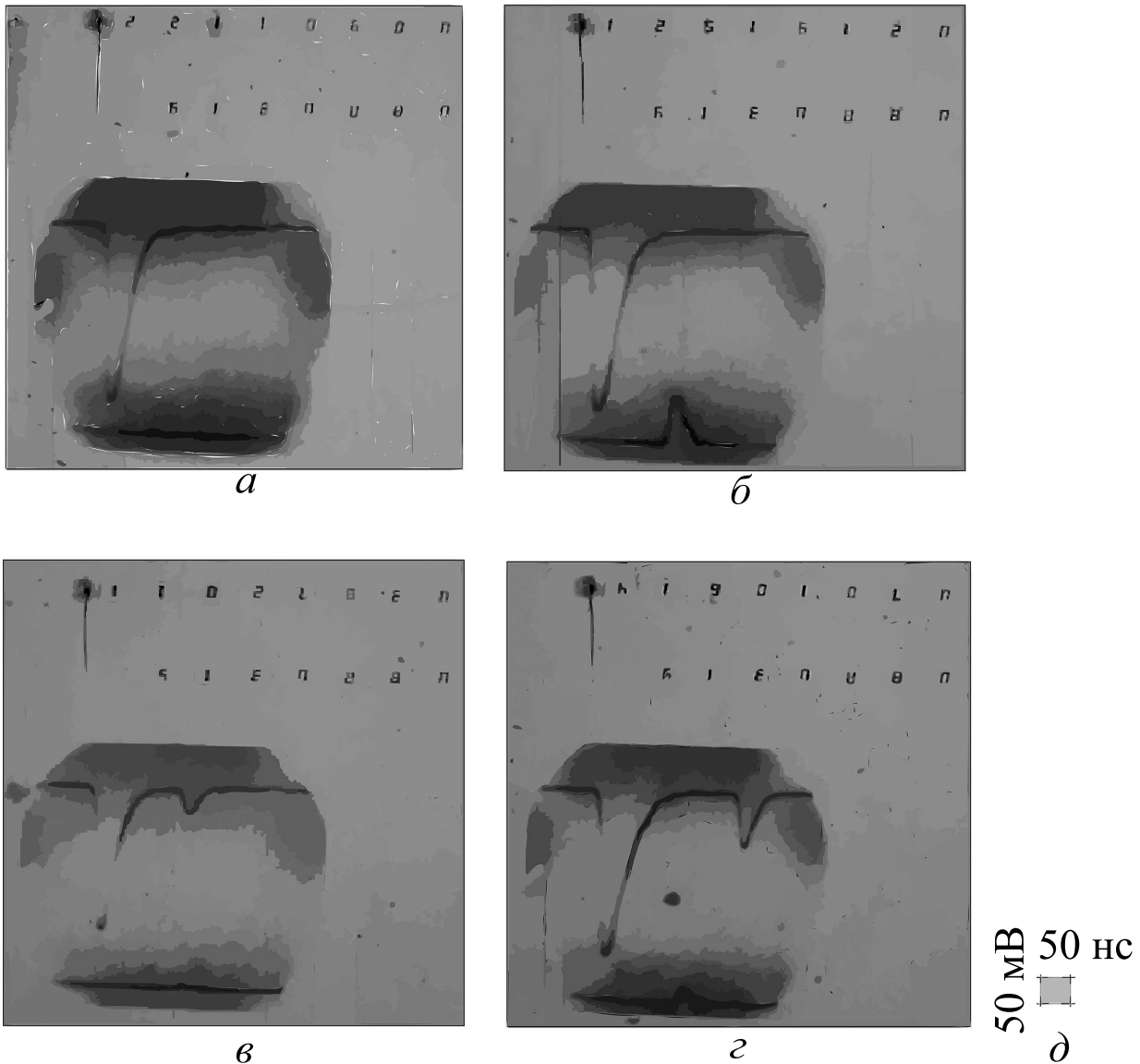


Рис. 1. Примеры осциллограмм временных распределений частиц, образующих диск ШАЛ. Верхний луч — сигнал с неэкранированного детектора, нижний луч — сигнал с экранированного детектора. *а* — Пример осциллограммы сигналов типичного ШАЛ, зарегистрированного в событии 0090 (19.03.1988, 11:22 моск. вр.). Число частиц в ШАЛ  $N_e \approx 1.2 \times 10^5$ , расстояние до оси  $R \approx 15$  м, число частиц, соответствующих сигналу сцинтилляционного детектора  $n \approx 40$ . В случае, когда не зарегистрирован мюон, импульс на нижней развертке отсутствует. *б* — Пример осциллограммы сигналов типичного ШАЛ, зарегистрированного в событии 0219 (19.03.1988, 15:21 моск. вр.).  $N_e \approx 2.1 \times 10^5$ , расстояние до оси  $R \approx 35$  м, число частиц в ШАЛ, соответствующих сигналу сцинтилляционного детектора,  $n \approx 39$ . В случае, когда мюоны зарегистрированы, наблюдается импульс на нижней развертке. *в* — Пример осциллограммы ШАЛ, зарегистрированного в событии 0307 (19.03.1988, 20:11 моск. вр.), в котором зарегистрирована запаздывающая частица в случае, когда мюон не зарегистрирован. Первый импульс на верхней развертке — сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс — сигнал, от запаздывающей частицы, следующей за диском ШАЛ. Амплитуда первого импульса соответствует  $n \approx 37$  частицам ШАЛ, амплитуда запаздывающей частицы соответствует 6 релятивистским частицам. Время задержки относительно фронта частиц ШАЛ около 150 нс. Параметры ШАЛ:  $N_e = 0.7 \times 10^5$ ,  $R = 13$  м. *г* — Пример осциллограммы сигнала ШАЛ, зарегистрированного в событии 0701 (20.03.1988, 06:14 моск. вр.), в котором зарегистрирована запаздывающая частица и мюон. Первый импульс на верхней развертке — сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс — сигнал от запаздывающей частицы, следующей за диском ШАЛ. Амплитуда первого импульса соответствует  $n \approx 34$  частицам ШАЛ, амплитуда запаздывающей частицы соответствует 14 релятивистским частицам, время запаздывания 230 нс. Параметры ШАЛ:  $N_e = 1.1 \times 10^5$ ,  $R = 61$  м. На нижней развертке импульс от мюона, амплитуда сигнала соответствует одной релятивистской частице. *д* — Масштаб шкалы осциллографа

нижнюю развертку и, в случае регистрации мюона, на развертке наблюдался импульс положительной полярности. Отметим, что регистрация мюонов и запаздывающих частиц является случайностью, поэтому их сигналы наблюдаются не на всех осциллограммах. Объясняется это тем, что сигналы

с неэкранированного центрального детектора, которые использовались для запуска осциллографа, использовались также в схеме совпадений для выработки импульса запуска установки ШАЛ, а сигналы от мюонов и запаздывающих частиц не использовались. На этих осциллограммах амплитуда сигнала,

соответствующая одной релятивистской частице, для центрального неэкранированного детектора соответствовала  $6 \pm 1.5$  мВ, которая определялась как отношение амплитуды импульса сигнала от частиц, образующих диск ШАЛ, измеренная с помощью осциллографа, к числу частиц, измеренных с помощью счетчиков Гейгера–Мюллера. Величина ошибок определяется статистическими флуктуациями числа частиц. Амплитуда сигнала, соответствующая одной релятивистской частице, для экранированного детектора составляла  $30 \pm 15$  мВ, которая определялась как средняя амплитуда сигнала с экранированного детектора, поскольку в эксперименте в основном регистрировались одиночные мюоны. В этом случае величина ошибки определяется разбросом амплитуд сигналов.

На фотографиях одно деление осциллографа по горизонтали 50 нс, по вертикали — 50 мВ, масштаб величин указан в правом нижнем углу рисунка. Как видно в приведенных примерах, амплитуда сигнала от запаздывающей частицы в несколько раз превышает сигнал от одной релятивистской частицы, что является свойством повышенной ионизационной способности запаздывающих частиц [3], которая в среднем в 1.7 раза превышает сигнал от одной релятивистской частицы. При этом также видно, что форма импульса сигналов от запаздывающих частиц в пределах временного разрешения осциллографа не искажается и совпадает с формой импульса от мюона с энергией более 5 ГэВ.

### 3. ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ И ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ОСИ ШАЛ

На рис. 2, а, б показан спад временного распределения запаздывающих частиц относительно фронта частиц ШАЛ и зависимость среднего времени запаздывания от расстояния до оси ШАЛ. События отбирались, когда запаздывающие сигналы визуально выделялись на осциллограмме, а время запаздывания превышало статистические флуктуации временного распределения частиц диска ШАЛ. В этой работе сигналом от запаздывающей частицы считался импульс, время запаздывания которого превышало более, чем на 75 нс, время прихода фронта частиц ШАЛ.

Из рисунка видно, что время запаздывания спадает по экспоненте с показателем около  $110 \pm 10$  нс, среднее время запаздывания при отборе запаздывающих частиц с временем задержки около 100 нс на расстояниях менее 200 м до оси ШАЛ практически не изменяется и составляет около  $160 \pm 8$  нс. В случае частиц диска ШАЛ спад временного распределения зависит от расстояния до оси, по данным этого эксперимента на расстояниях 0–50 м распределение спадает в 2.7 раза примерно за 35 нс, 100–200 м — за 50 нс, 200–300 метров — за 70 нс, 300–400 м — за 110 нс. Таким образом, видно, что временные распределения частиц диска ШАЛ и запаздывающих частиц существенно отличаются по крайней мере на спаде распределения.

Можно отметить, что если расстояние до оси не определяется, то временные распределения запаздывающих частиц искажаются из-за вклада событий от ливней, частицы которых на больших расстояниях имитируют запаздывающие частицы. На установке ШАЛ МГУ частота срабатывания была 0.01 в с. При такой частоте срабатываний вероятность регистрации осциллографической установкой второго ШАЛ, имитирующего запаздывающие частицы, составляет  $0.01 \times 500 \times 10^{-9} \approx 5 \times 10^{-9}$ , что маловероятно. Доля событий, зарегистрированных осциллографической установкой на расстояниях более 300 м от оси ШАЛ, составляет  $3 \times 10^{-3}$ , сигналы от таких ШАЛ могут имитировать запаздывающие частицы, поскольку на таких расстояниях наблюдалась тонкая структура временного распределения ШАЛ, состоящая из нескольких импульсов, которые могли имитировать запаздывающие частицы и поэтому отбраковывались.

### 4. ВЕРОЯТНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ЧАСТИЦ В ШАЛ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ И МЮОНОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТИПИЧНЫМ ШАЛ

На рис. 3 приведено распределение вероятности регистрации событий в зависимости от полного числа частиц в ШАЛ. Рассматриваются выборки при регистрации типичных ШАЛ, отобранных аппаратурой установки ШАЛ МГУ, из этих ШАЛ отбирались события, в которых наблюдались импульсы от запаздывающих частиц и события, в которых наблюдались мюоны. Данные представлены в трех диапазонах, отличающихся по полному числу частиц в ШАЛ в десять раз с линейной шкалой деления интервалов в каждом из диапазонов. Выбор шкалы делений по осям позволяет в каждом последующем диапазоне увеличивать ширину интервала измерений, ускорить набор статистики и улучшить статистическую обеспеченность результата наблюдений при уменьшении числа зарегистрированных событий с увеличением полного числа частиц в ШАЛ.

Из рисунка видно, что в диапазоне от  $10^4$  до  $10^5$  частиц вероятность регистрации типичных ШАЛ во всех интервалах больше, чем ШАЛ с задержанными частицами и мюонами. Это связано с тем, что к условиям отбора типичных ШАЛ, которые отбираются аппаратурой установки ШАЛ, добавляется требование регистрации запаздывающей частицы либо мюона. Причем доля событий, в которых наблюдались мюоны, в пределах статистических ошибок уменьшается примерно так же, как и доля событий, в которых наблюдались запаздывающие частицы. Вместе с тем из рисунка видно, что запаздывающие частицы более вероятно регистрируются в ШАЛ, содержащих от  $10^6$  до  $10^7$  частиц, а мюоны — в ШАЛ, содержащих от  $10^5$  до  $10^6$  частиц. В интервалах, отмеченных буквами  $\alpha$  и  $\beta$ , разница в числе отобранных событий более чем в 5 раз превышает среднеквадратичные статистические отклонения. С целью не усложнять рисунок статистические ошибки показаны в наиболее значимых интервалах. Ошибки в других интервалах пропорциональны корню квадратному из

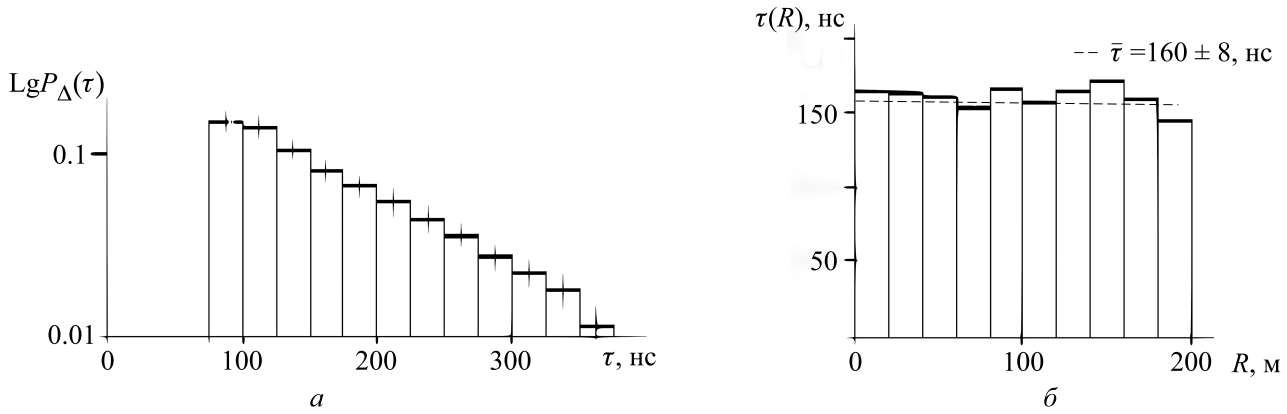


Рис. 2. а — Временное распределение запаздывающих частиц, б — зависимость среднего значения времени запаздывания значения от расстояния до оси ШАЛ в случае превышения времени запаздывания 100 нс

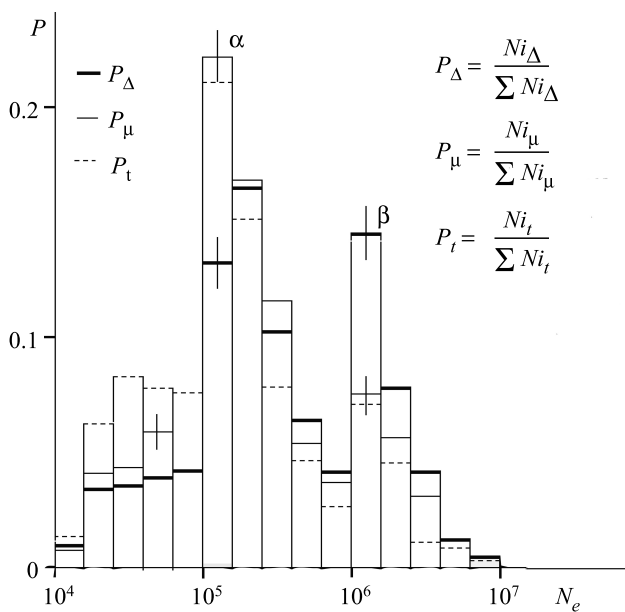


Рис. 3. Зависимость вероятности регистрации отобранных ШАЛ от числа частиц в ШАЛ.  $P_t, P_{\Delta}, P_{\mu}$  и  $Ni_t, Ni_{\Delta}, Ni_{\mu}$  — соответственно вероятность регистрации событий в выборках и число событий в интервале в типичных ШАЛ, ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы и ШАЛ при наблюдении мюонов в интервале с заданным числом частиц  $N_e$

отношения вероятностей регистрации событий, попавших в рассматриваемые интервалы, относительно интервала с указанной ошибкой.

**5. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОБЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА**

На рис. 4 приведены распределения событий в зависимости от возраста ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы, и ШАЛ при наблюдении мюонов. Видно, что в пределах статистических ошибок распределения совпадают. Параметр возраст, связан с высотой максимального числа частиц электронно-фотонной компоненты ливня. Совпадение распределений по этому параметру указывает на то, что электронно-фотонная компонента ШАЛ при наблюдении мюонов и запаздывающих частиц не отличается от типичных ШАЛ.

**6. ВЕРОЯТНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ШАЛ, В КОТОРЫХ ЗАРЕГИСТРИРОВАНЫ ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ И МЮОНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ОСИ ШАЛ ПРИ ФИКСИРОВАННОМ ЧИСЛЕ ЧАСТИЦ В ШАЛ**

Из рис. 3 видно, что запаздывающие частицы более вероятно наблюдаются в ШАЛ, содержащих от  $1 \times 10^6$  до  $4 \times 10^6$  частиц, а мюоны — в ШАЛ, содержащих от  $1 \times 10^5$  до  $4 \times 10^5$  частиц. Увеличение вероятности регистрации отобранных ШАЛ может быть по двум причинам. Либо запаздывающие частицы более вероятно образуются в ШАЛ с большим числом частиц, либо пространственное распределение запаздывающих частиц более широкое, чем у мюонов. Чтобы определить, вследствие какой из отмеченных причин возникло отличие, необходимо исключить влияние одной из них. В данном случае можно рассмотреть зависимость вероятности регистрации событий от расстояния до оси при фиксированном полном числе частиц в ШАЛ в случаях наблюдения запаздывающих частиц и ШАЛ при наблюдении мюонов. Из рис. 2 видно, что интересным представляется относительно узкий интервал от  $1 \times 10^6$  до  $4 \times 10^6$  частиц, поскольку в этом интервале вероятность появления ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, значительно больше, чем ШАЛ, в которых наблюдаются мюоны.

На рис. 5 для этих выборок приведена зависимость вероятности регистрации событий от расстояния до оси для ШАЛ, в которых образовалось от  $1 \times 10^6$  до  $4 \times 10^6$  частиц.

Из этого рисунка видно, что при фиксированном числе частиц пространственное распределение вероятности регистрации событий более широкое для ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, чем при регистрации мюонов. Из-за узкого пространственного распределения в выборку с мюонами не входят ШАЛ с большим числом частиц, которые в основном регистрировались на больших расстояниях от центра установки, а с запаздывающими частицами входят. Этим в основном можно объяснить, что относительно типичных ШАЛ запаздывающие частицы более вероятно наблюдаются в ШАЛ, содержащих от  $10^6$  до

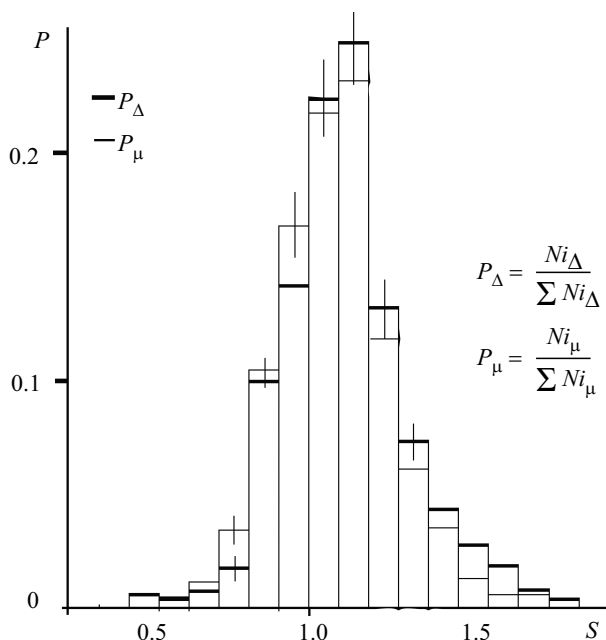


Рис. 4. Вероятности регистрации в различных выборках ШАЛ в зависимости от их возраста  $S$ .  $P_i, P_\Delta, P_\mu$  — вероятность регистрации событий в выборках типичных ШАЛ, ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы и ШАЛ при наблюдении мюонов.  $Ni_\Delta, Ni_\mu$  — число ШАЛ в интервале в выборках ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы, и ШАЛ при наблюдении мюонов

$10^7$  частиц, а мюоны — в ШАЛ, содержащих от  $10^5$  до  $10^6$  частиц.

Более широкое распределение позволяет предположить, что высота возникновения запаздывающих частиц находится выше, чем мюонов, поскольку пространственное распределение частиц зависит от высоты источника. Вместе с тем пространственное распределение зависит от рассеивания запаздывающих частиц, которое не измерялось в эксперименте, что является причиной неопределенности, допускающей иные предположения. Но в случае если продольный импульс и масса запаздывающих частиц больше, чем у мюонов, высота возникновения запаздывающих частиц будет выше, чем мюонов, что можно проверить в эксперименте, например с помощью калориметра.

Высоту источника можно оценить также по кривизне потока запаздывающих частиц. Действительно, в этом эксперименте не обнаружено зависимости времени прихода запаздывающих частиц в ШАЛ от расстояния, до оси которых менее 200 м. При точности измерений 10 нс это соответствует потоку запаздывающих частиц, источник которых может находиться на высотах выше 2–3 км. Для более точной оценки высоты источника по кривизне потока частиц необходимо улучшить точность временных измерений и увеличить статистику. В настоящее время на комплексных установках для изучения ШАЛ достигается точность измерений времени лучше 1 нс, что позволяет этим методом определять высоту источника находящегося на высотах до 20–30 км или определить, что источник находится выше этих высот. Можно отметить, что при фиксированных расстояниях до оси распределения по полному

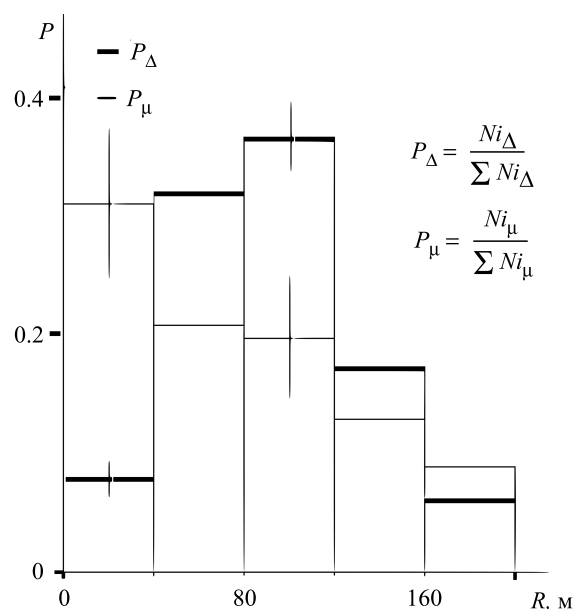


Рис. 5. Зависимость вероятности регистрации от расстояния до оси ШАЛ, в которых образовалось от  $1 \times 10^6$  до  $4 \times 10^6$  частиц.  $P_\Delta, P_\mu$  — вероятность регистрации в интервалах в ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы, и ШАЛ при наблюдении мюонов.  $Ni_\Delta, Ni_\mu$  — число событий в интервале

числу частиц ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы, и типичные ШАЛ в пределах статистических ошибок не отличаются.

### 7. ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ, ЧТО ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ ЯВЛЯЮТСЯ НУКЛОНАМИ И МЮОНАМИ, И ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ О СУЩЕСТВОВАНИИ ШАЛ С ДИСКом ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ

В этом разделе рассмотрим попытку объяснить запаздывающие частицы нуклонами и мюонами малых энергий исходя из существующих представлений. Для этого приведем данные, полученные во вспомогательном эксперименте. В этом эксперименте временные распределения изучались с помощью описанного выше центрального неэкранированного детектора и дополнительного детектора площадью  $4 \text{ м}^2$ , установленного на поверхности земли на расстоянии 22.5 м от центра установки ШАЛ МГУ.

На рис. 6, а, б приведены два примера регистрации запаздывающих частиц в ШАЛ двумя детекторами. Наблюдения продолжались около 450 ч. За это время было зарегистрировано  $n = 1.5 \times 10^4$  ШАЛ. В центральном детекторе наблюдалось 382 события с запаздывающими частицами, вероятность регистрации  $P_{\Delta 1} = 382 / 1.5 \times 10^4 \approx 2.5 \times 10^{-2}$ . В дополнительном детекторе было найдено 450 событий с запаздывающими частицами, вероятность регистрации  $P_{\Delta 2} = 450 / 1.5 \times 10^4 \approx 3 \times 10^{-2}$ . В 97 случаях запаздывающие частицы наблюдались в двух детекторах, вероятность регистрации  $P_{\Delta 12} = 97 / 1.5 \times 10^4 \approx 0.6 \times 10^{-2}$ .

Из этих данных следует, что при случайном совпадении запаздывающие частицы на двух развертках осциллографа в  $n = 1.5 \times 10^4$  ШАЛ можно наблюдать

в  $P_{\Delta 1} \times P_{\Delta 2} \times n = 2.5 \times 10^{-2} \times 3 \times 10^{-2} \times 1.5 \times 10^4 = 11 \pm 3.5$  случаях. Количество наблюдаемых событий значительно превосходит число ожидаемых случайных совпадений и не объясняется флуктуациями. Из этого следует, что если предположить, что запаздывающие частицы это нуклоны, то наблюдаемое число совпадений нельзя объяснить и флуктуациями полного числа нуклонов, в том числе флуктуациями каких-то других запаздывающих частиц, образующихся в ШАЛ. Из этого также следует, что запаздывающие частицы, по-видимому, образуют запаздывающий диск ШАЛ, в котором можно найти полное число запаздывающих частиц [3, 6]. Например, при регистрации одной запаздывающей частицы на расстоянии 100 м от оси ШАЛ с помощью детектора, имеющего площадь 4 м<sup>2</sup>, плотность частиц в некоторых случаях может составить  $\rho = 0.25 \text{ м}^{-2}$ . На расстояниях менее 100 м до оси ШАЛ можно ожидать  $N_{\Delta} = \pi R^2 \rho \approx 3.14 \times 10^2 \times 0.25 = 0.8 \times 10^4$  запаздывающих частиц. В ШАЛ с числом частиц  $N_e = 5 \times 10^5$  при условии, что  $N_n/N_e \approx (1-5) \times 10^{-4}$ , полное число нуклонов может составить  $N_n \approx 5 \times 10^5 \times (1-5) \times 10^{-4} \approx (0.5-2.5) \times 10^2$  частиц, что примерно в 100 раз меньше, чем число запаздывающих частиц. Поэтому основная часть запаздывающих частиц не может быть нуклонами. Также можно отметить, что в этом эксперименте не зарегистрировано запаздывающих микроливней (Гарипов, и др., 2020), что можно было бы ожидать в случае регистрации запаздывающих частицах, способных вызвать микроливни. Действительно, в дополнительном эксперименте запаздывающие частицы изучались с помощью двух детекторов, разделенных узкой щелью шириной менее 5 см. Было получено, что запаздывающие частицы с амплитудой сигнала в несколько релятивистских частиц регистрировались в одном детекторе, а запаздывающих микроливней обнаружено не было.

Можно предположить, что запаздывающие сигналы вызваны мюонами. Действительно, в этом случае  $N_{\Delta}/N_e = 0.8 \times 10^4 / 5 \times 10^5 = 0.016$ , что не противоречит полному числу мюонов в ШАЛ. Но в работе [3] было показано, что амплитуда сигнала от одиночных запаздывающих частиц превышает сигнал от одной релятивистской частицы. Поэтому вклад можно ожидать не от всех мюонов, а только от тех, энергия которых значительно меньше 105 МэВ. Но в дополнительном эксперименте, выполненном в этой работе, запаздывающие частицы изучались с помощью детектора, экранированного слоем свинца толщиной 2.5 см, частота регистрации которых не изменилась. При этом ожидалось, что частицы больших энергий будут терять около  $2.5 \times 11.34 \times (1.2) = 34$  МэВ своей энергии, где 11.34 — плотность свинца, 1.2 — ионизационные потери частиц высокой энергии. А мюоны с энергией менее 105 МэВ в процессе непрерывного замедления поглотятся в свинце и кровле помещения. Поскольку частота регистрации не изменилась, представляется маловероятным, что запаздывающие частицы — это мюоны с энергией менее 105 МэВ. Случаи с распадом мюонов также не соответствуют данным

эксперимента, поскольку характерное время распада мюона микросекунды, что противоречит временному распределению сигналов от запаздывающих частиц, характерное время которых 110 нс. Таким образом, предположение, что запаздывающие частицы — это нерелятивистские мюоны не подтверждается экспериментальными данными.

Также можно отметить, что запаздывающие частицы не являются частицами, пришедшими на уровень наблюдения по ломаной траектории, отклонившись от оси ШАЛ, поскольку время запаздывания не зависит от расстояния до оси. Вместе с тем для частиц диска ШАЛ время прихода частиц быстро увеличивается от оси диска к периферии.

Из приведенных рассуждений видно, что объяснение запаздывающих сигналов нуклонами и мюонами малых энергий не соответствуют данным этого эксперимента.

С помощью двух детекторов можно оценить вероятность регистрации ШАЛ, в которых возникают запаздывающие частицы. Действительно, пусть вероятность регистрации ШАЛ, в которых возникают запаздывающие частицы,  $P_{EAS}$ ,  $P'_{\Delta 1}$  и  $P'_{\Delta 2}$  — вероятности срабатывания центрального и дополнительного детекторов при регистрации ШАЛ, в которых возникли запаздывающие частицы. Тогда вероятность регистрации запаздывающих частиц первого детектора будет  $P_{EAS} \times P'_{\Delta 1} = 2.5 \times 10^{-2}$ , второго —  $P_{EAS} \times P'_{\Delta 2} = 3 \times 10^{-2}$ , вероятность регистрации в ШАЛ первым и вторым детектором одновременно —  $P_{EAS} \times P'_{\Delta 2} \times P'_{\Delta 2} = 0.6 \times 10^{-2}$ . Из этих равенств можно найти  $P_{EAS} = (P_{EAS} \times P'_{\Delta 1}) \times (P_{EAS} \times P'_{\Delta 2}) / (P_{EAS} \times P'_{\Delta 1} \times P'_{\Delta 2}) = 2.5 \times 10^{-2} \times 3 \times 10^{-2} / 0.6 \times 10^{-2} = 12 \times 10^{-2}$ ,  $P'_{\Delta 1} = 2.5 \times 10^{-2} / 12 \times 10^{-2} = 0.2$ ,  $P'_{\Delta 2} = 3 \times 10^{-2} / 12 \times 10^{-2} = 0.25$ .

Таким образом, можно ожидать, что в этой выборке запаздывающие частицы возникают примерно в 12% ШАЛ, средняя плотность которых на расстояниях до оси менее 200 м составила около 0.07 м<sup>-2</sup>.

Можно отметить, что порог срабатывания осциллографической установки составляет 4 частицы, иными словами, вблизи порога осциллограф может запускаться от ливней, состоящих более чем из 4 частиц, которые могут возникнуть от нуклонов с энергией более нескольких ГэВ. Частота появления таких ШАЛ не превышает частоту запуска осциллографа, что соответствует регистрации одного события за 15 с, или 0.06 в секунду. Вероятность случайного появления сигнала от таких ШАЛ на развертке осциллографа длительностью 500 нс составит  $0.06 \times 500 \times 10^{-9} \approx 3 \times 10^{-8}$ , вероятность появления случайного импульса от фона космических лучей, которая превышает число микроливней попавших в детектор, при скорости счета детектора 800 Гц составит  $800 \times 500 \times 10^{-9} \approx 4 \times 10^{-4}$ , что на два порядка меньше, вероятности наблюдения запаздывающей частицы. Это максимальная оценка, реальное число ШАЛ меньше, поскольку число вторичных частиц больше числа ШАЛ.

Вместе с тем, чтобы зарегистрировать частицу с помощью детектора площадью 4 м<sup>2</sup>, расстояние до

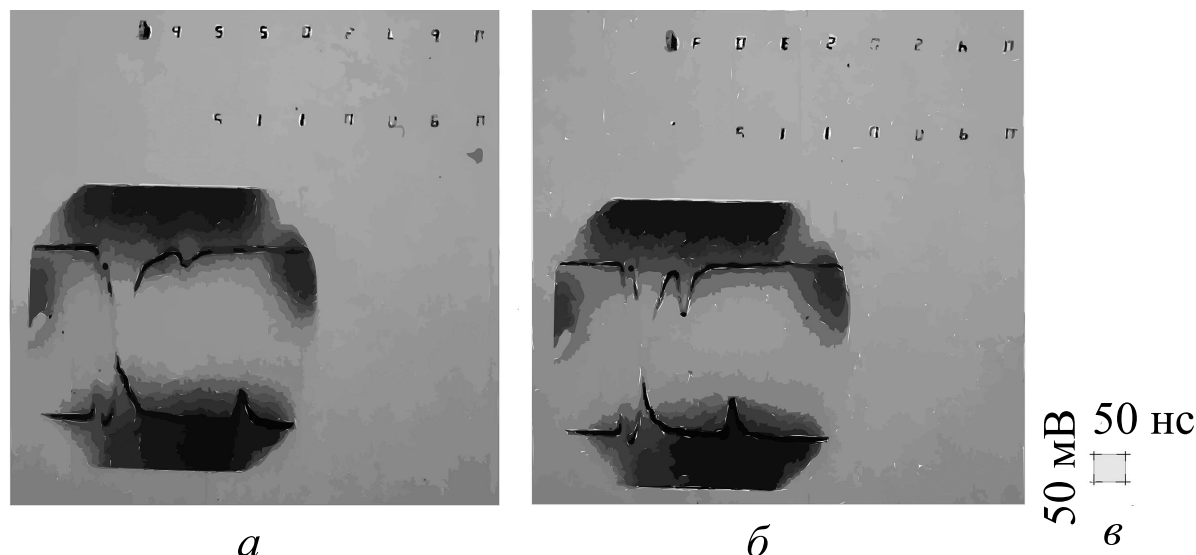


Рис. 6. а, б — Примеры осциллограмм временных распределений частиц ШАЛ, зарегистрированных в событиях 0672, (16. 01.1990, 05:56 моск. вр.) и 0420 (15.01.1990, 23:03 моск. вр) при регистрации запаздывающих частиц с помощью двух сцинтилляционных детекторов. Верхний луч — сигнал с неэкранированного центрального детектора, импульс отрицательной полярности, нижний луч — сигнал с неэкранированного дополнительного детектора, импульс положительной полярности. в — Масштаб шкалы осциллографа

оси большей части таких ШАЛ не превышает 10–15 м, что объясняется резким уменьшением плотности частиц при увеличении расстояния до оси ШАЛ. На таких расстояниях толщина диска минимальная, временной интервал между частицами не превышает нескольких наносекунд. При случайном попадании таких ШАЛ на развертке осциллографа в эксперименте с двумя детекторами должны наблюдаться практически совпадающие по времени импульсы от частиц диска ШАЛ относительно начала развертки. Но из приведенных примеров на рис. 6 видно, что временные интервалы между запаздывающими частицами существенно больше нескольких наносекунд, поэтому источником таких сигналов не могут быть ШАЛ, случайно попавшие в интервал наблюдений после запуска развертки осциллографа. Также можно отметить, что в случае случайных источников запаздывающих сигналов, например ливней малых энергий, их распределение на развертке осциллографа будет равномерным, что также не соответствует временному распределению запаздывающих частиц.

Таким образом, предположение, что источником запаздывающих сигналов могут быть ливни малых энергий, случайно попавшие в интервал наблюдения, противоречит экспериментальным данным. Из эксперимента с двумя неэкранированными детекторами также следует низкая вероятность возникновения тяжелых долгоживущих частиц при взаимодействии космических лучей с атмосферой, поскольку в  $1.5 \times 10^4$  событий не зарегистрировано запаздывающих ШАЛ от таких частиц.

Также можно отметить, что запаздывающие частицы не могут быть одиночными электронами, поскольку сигнал соответствует потере частицей 10 МэВ энергии, электроны таких энергий не могут вызвать повышенную ионизацию в пластике детектора, характерную для запаздывающих частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исходя из данных эксперимента, ШАЛ при наблюдении запаздывающих частиц можно представить как ШАЛ, за диском частиц которого движется диск запаздывающих частиц.

Вероятность регистрации таких ШАЛ примерно (10–20) %, а число запаздывающих частиц на два порядка меньше полного числа частиц в ШАЛ, что следует из эксперимента по изучению запаздывающих частиц с помощью центрального неэкранированного детектора и дополнительного детектора, расположенного на расстоянии 22.5 м от центра установки. Спад временного распределения запаздывающих частиц не зависит от расстояния до оси ШАЛ, среднее значение для частиц, время запаздывания которых более 100 нс, составляет около 160 нс, но на расстояниях более 300 м ширина диска основных частиц ШАЛ превышает ширину диска запаздывающих частиц. Спад временного распределения диска основных частиц удлиняется с увеличением расстояния до оси, на расстоянии менее 50 м спад временного распределения уменьшается в 2.7 раза за время менее 35 нс, а на расстояниях 300–400 м — за 110 нс. Максимальное число событий с запаздывающими частицами зарегистрировано на расстояниях 40–120 м от оси ШАЛ, а с мюонами — 0–40 м. Откуда следует, что запаздывающие частицы распределены в пространстве шире, чем мюоны, зарегистрированные под слоем грунта, эквивалентного 20 м водного столба. Запаздывающие частицы не образуют микроливней, а энергию теряют в основном на ионизацию (Гарипов, и др., 2020) и слабо взаимодействуют с атмосферой, поскольку в эксперименте с детекторами, разделенными узкой щелью, запаздывающие частицы с амплитудой сигнала в несколько релятивистских частиц регистрировались только одним детектором. Средняя амплитуда сигнала от запаздывающих частиц



превышает сигнал от одной релятивистской частицы примерно в 1.7 раза (Khristiansen, et al., 1990). Форма импульса сигнала от запаздывающих частиц совпадает с формой импульса от одиночного мюона, что видно из приведенных осциллограмм сигналов. При этом вероятность появления на развертке второго ШАЛ —  $5 \times 10^{-9}$ , вероятность появления второго микроливня —  $3 \times 10^{-8}$ , вероятность появления ложного импульса от фона космических лучей, имитирующего запаздывающую частицу, —  $4 \times 10^{-4}$ , что в сумме значительно меньше вероятности регистрации запаздывающих частиц  $3 \times 10^{-2}$ . Также в эксперименте с двумя неэкранированными детекторами получено, что вероятность возникновения тяжелых долгоживущих частиц в ШАЛ заведомо меньше  $6 \times 10^{-5}$ .

При изучении особенностей ШАЛ получено, что в случае наблюдения мюонов возрастает вероятность регистрации ШАЛ, содержащих от  $10^5$  до  $10^6$  частиц, а в случае запаздывающих частиц — ШАЛ, содержащих от  $10^6$  до  $10^7$  частиц по сравнению с типичными ШАЛ. Что в основном объясняется распределением вероятности регистрации в зависимости от расстояния до оси ШАЛ, которое у запаздывающих частиц более широкое, чем для мюонов. Распределения по возрасту ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы и мюоны, в пределах статистических ошибок совпадают. Более широкое пространственное распределение позволяет предположить, что высота возникновения запаздывающих частиц может находиться выше высот, характерных для возникновения мюонов. Этому предположению не противоречит распределение по возрасту рассматриваемых ШАЛ, поскольку запаздывающие частицы не образуют ливни и поэтому несущественно влияют на развитие электронно-фотонной компоненты ШАЛ.

То, что запаздывающие частицы могут быть нуклонами либо мюонами малых энергий, способными вызвать в пластике детектора сигнал, превышающий сигнал от одной релятивистской частицы, противоречит данным эксперимента, поскольку ожидаемое число запаздывающих частиц в ШАЛ превышает полное число нуклонов на два порядка. Запаздывающие частицы не могут быть и мюонами с энергией менее 105 МэВ, поскольку в дополнительном эксперименте не обнаружено ослабления потока запаздывающих частиц в детекторе, экранированном слоем свинца толщиной 2.5 см. Также не могут быть и продуктами их распада в атмосфере или пластике детектора, поскольку характерное время распада отличается от временного распределения запаздывающих частиц более чем на два порядка. В этом случае предположение, что источник запаздывающих частиц находится в начале развития ШАЛ, также представляется предпочтительным, поскольку

исключаются запаздывающие частицы, состоящие из мюонов и нуклонов малых энергий с источником на малых высотах. Вместе с тем в работах [5, 7] сообщается о наблюдениях аналогичных по форме импульсов сигналов от запаздывающих частиц с энергиями более 5 ГэВ. Оценки показывают, что источник таких сигналов, в случае если это мюоны, может находиться на высотах в сотни километров от поверхности земли. Это также согласуется с предположением, что высота возникновения по крайней мере некоторых запаздывающих частиц может находиться выше высот, на которых образуются основная часть электронов и мюонов ШАЛ.

В будущих экспериментах для исключения неопределенности из-за рассеивания запаздывающих частиц при определении высоты источника по функции пространственного распределения необходимо измерять энергию запаздывающих частиц.

Для более точной оценки минимальной высоты источника по кривизне потока запаздывающих частиц требуется улучшить точность временных измерений. Также требует проверки вытекающее из этого эксперимента предположение о существовании ШАЛ, в которых возникают запаздывающие частицы.

Автор выражает благодарность своим коллегам за помощь в создании и эксплуатации осциллографической установки, обработке экспериментальных данных и обсуждении полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vernov S.N., Khristiansen G.B., Atrashkevich V.B. et al. // Proc. 16th ICRC. Kyoto. 1979. **6**. P. 129.
2. Atrashkevich V.B., Chernykh R.I., Fomin Yu.A. et al. // Proc. 20th ICRC. Moscow. 1987. **6**. P. 63.
3. Khristiansen G.B., Atrashkevich V.B., Chernykh R.I. et al. // Proc. 21th ICRC. Adelaide 1990. **9**. P. 150.
4. Atrashkevich V.B., Garipov G.K., Kalmykov N.N. et al. // Proc. 22th ICRC. Dublin. 1991. **4**. P. 319.
5. Гарипов Г.К., Силаев А.А. // Ядерная физика. 2020. **83**, №3. С. 235. (Garipov G.K., Silaev A.A. // *Physics of Atomic Nuclei*. 2020, **83**, N 3. P. 442.
6. Яковлев В.И., Вильданова М.И., Вильданов Н.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2007. **85**, №2. С. 11. (Yakovlev V.I., Vil'danova M.I., Vil'danov N.G. // JETP Lett. 2007. **85**. P. 101)
7. Бейсембаев Р.У., Вавилов Ю.Н., Вильданов Н.Г. и др. // Ядерная физика. 2009. **72**, №11. С. 191. (Beisembayev R.U., Vavilov Yu.N., Vildanov N.G., Kruglov A.V. et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. 2009. **72**. P. 1852).
8. Linsley J. // Proc. 19th ICRC. LaJolla. 1985. **7**, P. 355.
9. Гарипов Г.К. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2021. **85**, №8. С. 1173.

## Searching for EAS Features in the Detection of Delayed Particles and Muons at the MSU EAS Array

**G. K. Garipov**

*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia*

*E-mail: [ggkmsu@yandex.ru](mailto:ggkmsu@yandex.ru)*

The time distributions of particles in extensive air showers (EASs) have been studied using the EAS array at Moscow State University [1, 2]. More than  $10^5$  particles are produced in an EAS during the interaction of cosmic rays with energies above  $10^{14}$  eV with the atmosphere. Delayed particles are detected in 3.5% of EASs with an unshielded detector located at the Earth's surface. Muons are detected in 60% of EASs using a shielded detector located under a soil ground layer equivalent to a 20 m of water column.

The detector signals are recorded using a two-beam analog storage oscilloscope. It has been found that the detection probability increases when observing muons for EASs containing from  $10^5$  to  $10^6$  particles, and when observing delayed particles for EASs containing from  $10^6$  to  $10^7$  particles. The distribution over distances to the EAS axis when observing delayed particles is wider than for muons and the age distributions do not differ within errors. The features of EASs with delayed particles and the hypothesis that the height of the appearance of delayed particles can be higher than the height at which EAS electrons and muons are produced are considered.

*Keywords:* cosmic rays, extensive air showers, elementary particles.

PACS: 13.85Tp, 98.70.Sa.

*Received 13 September 2021.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, Suppl. 1. Pp. S118–S127.

### Сведения об авторе

Гарипов Гали Карымович — ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-44-96, e-mail: [ggkmsu@yandex.ru](mailto:ggkmsu@yandex.ru).