

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
 ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 67, ВЫПУСК 6
 25 МАРТА, 1998

Письма в ЖЭТФ, том 67, вып.6, стр.361 - 366

© 1998г. 25 марта

ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ДИСКА МЮОНОВ НА ВОЛЬШИХ
РАССТОЯНИЯХ ОТ ОСИ ШАЛ С $E_0 \geq 6 \cdot 10^{16}$ эВ

А.В.Глушков, В.В.Косарев, И.Т.Макаров, И.Е.Слепцов, С.А.Филиппов

Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра СО РАН
 677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 19 февраля 1998 г.

Приведены предварительные результаты исследования временной структуры мюонного диска на Якутской установке в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с первичной энергией $E_0 \geq 6 \cdot 10^{16}$ эВ на расстояниях от оси 100 – 1500 м, полученные на большом мюонном детекторе с планируемой площадью 184 м² и порогом регистрации $E_\mu \approx 0.5 \cdot \sec \theta$ ГэВ, начавшего работать с ноября 1995 г. При $E_0 > 10^8$ эВ обнаружена тенденция к уменьшению толщины мюонного диска, которая требует существенных изменений представления о развитии ШАЛ.

PACS: 96.40.-z

Исследование мюонов с пороговой энергией $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec \theta$ ГэВ ведется на Якутской установке непрерывно с 1974 г. За это время накоплен большой экспериментальный материал, который позволил детально исследовать функцию пространственного распределения (ФПР) мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с первичной энергией $E_0 \approx 10^{17} - 3 \cdot 10^{19}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 60^\circ$ в широком интервале расстояний R от оси ШАЛ. В работах [1, 2] показано, что при $E_0 \geq (3-5) \cdot 10^{18}$ эВ ФПР имеют другую форму, чем в области меньших энергий. В частности, на расстояниях $R > 400$ м она становится значительно круче.

Для выяснения причины такого различия ФПР и для дальнейших исследований на Якутской установке создан большой мюонный детектор (БМД) из 92 сцинтилляционных счетчиков по 2 м², размещенных шестью рядами на площади 26 × 12 м [3]. Он находится на расстоянии 180 м от центра установки. Земляной экран обеспечивает порог регистрации мюонов $0.5 \cdot \sec \theta$ ГэВ. Каждый счетчик работает независимо, снабжен отдельным амплитудно-временным каналом для измерения числа частиц и времени прихода первой из них с точностью ~ 6 нс. Пробные наблюдения на БМД ведутся с ноября 1995 г. Сейчас завершаются работы по выводу его на полную площадь регистрации.

Мы приводим результаты анализа данных, полученных до конца 1997 г. на 30 счетчиках с общей площадью 60 м^2 . К настоящему времени накоплен экспериментальный материал, который не только подтверждает с хорошей точностью результаты [3] в области энергий $10^{17} - 10^{18}$ эВ, но и позволяет представить предварительные данные по структуре мюонного диска при $E_0 > 10^8$ эВ.

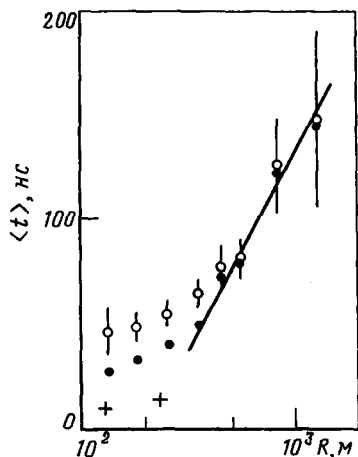


Рис.1. Средние задержки $\langle t \rangle$ прихода мюонов с энергией $E_\mu \approx 0.5 \text{ сек } \theta \text{ ГэВ}$ в ливнях с $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ и $\cos \theta \geq 0.95$ на разных расстояниях от оси относительно самых быстрых мюонов в каждом ливне: \circ - плотности мюонов $\rho_\mu \leq 1 \text{ м}^{-2}$, $+$ - $\rho_\mu \geq 4 \text{ м}^{-2}$, \bullet - все плотности

На рис.1 показана зависимость средней задержки $\langle t \rangle$ времени прихода мюонов в ШАЛ с $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ и $\cos \theta \geq 0.95$ на расстояниях $R = 100 - 1500$ м относительно самых первых мюонов в каждом ливне. Светлые кружки соответствуют ливням с плотностями мюонов $\rho_\mu \leq 1 \text{ м}^{-2}$, крестики - $\rho_\mu \geq 4 \text{ м}^{-2}$, а темные кружки - всем ливням. Видно, что когда на каждый детектор падают ≥ 8 мюонов, относительные задержки незначительны и сравнимы с нашей точностью временных измерений. События с $\rho_\mu \leq 1 \text{ м}^{-2}$ отражают более "рыхлую" заднюю часть фронта.

Все распределения задержек имеют экспоненциальный вид $\exp(-t/\lambda)$. Параметры λ при $\rho_\mu \leq 1 \text{ м}^{-2}$ в пределах ошибок эксперимента совпадают с $\langle t \rangle$. Исходя из этого, нетрудно получить соотношение для оценки времени T , которое необходимо для регистрации доли η всех мюонов:

$$T \approx -\langle t \rangle \ln(1 - \eta) \text{ нс.} \quad (1)$$

Из рис.1 и (1) следует, что 95% всех мюонов в ШАЛ с $E_0 \leq 10^{18}$ эВ на расстояниях $R \leq 1000$ м приходят не позже 400 нс относительно самых первых из них.

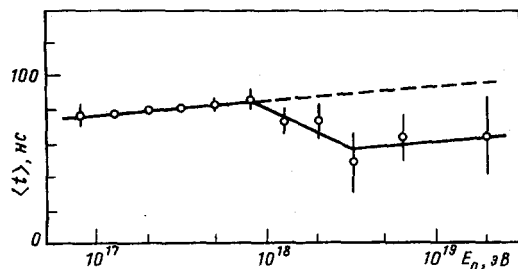


Рис.2. Зависимость $\langle t \rangle$ от E_0 в ливнях с $\cos \theta \geq 0.8$ при $R = 630$ м без отбора детекторов по плотности мюонов

На рис.2 показана зависимость $\langle t \rangle$ от E_0 в ливнях с $\cos \theta \geq 0.8$ при $R = 630$ м, а на рис.3 – изменения $\langle t \rangle$ на том же расстоянии от $\sec \theta$ в ШАЛ с $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ. Все значения получены без селекции детекторов по плотностям мюонов.

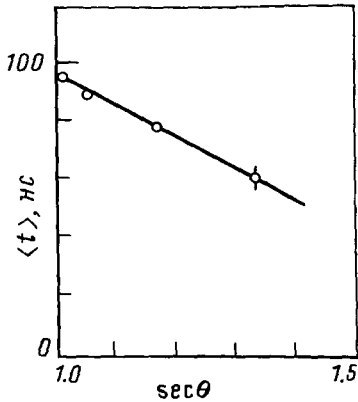


Рис.3. Зависимость $\langle t \rangle$ от $\sec \theta$ в ливнях с $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$ эВ при $R = 630$ м без отбора детекторов по плотности мюонов

Представленные на рис.1-3 данные удовлетворяют соотношению

$$\langle t \rangle = a_0 + a_1 \cdot \log(E_0/10^{18}) + a_2 \cdot (1 - \sec \theta) + a_3 \cdot \log(R/600), \quad (2)$$

где $a_0 = 95 \pm 2$ нс, $a_1 = 7 \pm 1$ нс, $a_2 = 110 \pm 4$ нс, $a_3 = 170 \pm 9$ нс. Оно применимо в ливнях с $E_0 \approx 6 \cdot 10^{16} - 10^{18}$ эВ и $\theta \leq 45^\circ$ на расстояниях $R \approx 400 - 1500$ м.

Анализ данных показал, что рост $\langle t \rangle$ с увеличением E_0 происходит с одинаковой скоростью $\partial \langle t \rangle / \partial \log(E_0) = a_1$ у событий с разными θ и R (в указанных выше пределах изменений этих параметров). Он обусловлен смещением глубины максимума развития ливня X_m к уровню наблюдения X (для Якутска $X = 1020 \cdot \sec \theta$), то есть уменьшением расстояния $X - X_m$ до максимума развития ливня. Это хорошо видно из поясняющего рис.4а, б, где относительные задержки $t_a < t_b$ из-за ухудшения геометрического фактора собирания мюонов. При фиксированной E_0 с ростом зенитного угла величина $X - X_m$ растёт, а это ведет к уменьшению разницы задержек мюонов.

Из (2) можно оценить скорость смещения максимума ливня $ER = \partial X_m / \partial \log(E_0)$ (ER – elongation rate):

$$ER \approx a_1 \cdot 1020 / a_2 \approx 65 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}. \quad (3)$$

Перейдем к рассмотрению данных при $E_0 > 10^{18}$ эВ. На рис.2 видно, что все измеренные $\langle t \rangle$ меньше ожидаемых (штриховая линия) при экстраполяции их из области $E_0 < 10^{18}$ эВ. В пределах ошибок измерений, на наш взгляд, можно выделить два участка: первый с $E_0 \approx (1 - 4) \cdot 10^{18}$ эВ – переходной; второй при $E_0 > 4 \cdot 10^{18}$ эВ удовлетворяет зависимости

$$\langle t \rangle \approx 62 + a_1 \cdot \log(E_0/10^{19}) \text{ нс}. \quad (4)$$

Понять этот результат с физической точки зрения на первый взгляд сложно. Если попытаться объяснить его быстрым удалением максимума ливня, то есть уменьшением X_m , то нужно ожидать такое же быстрое уменьшение полного числа электронов в этих ливнях, а оно, согласно [1, 2], не происходит.

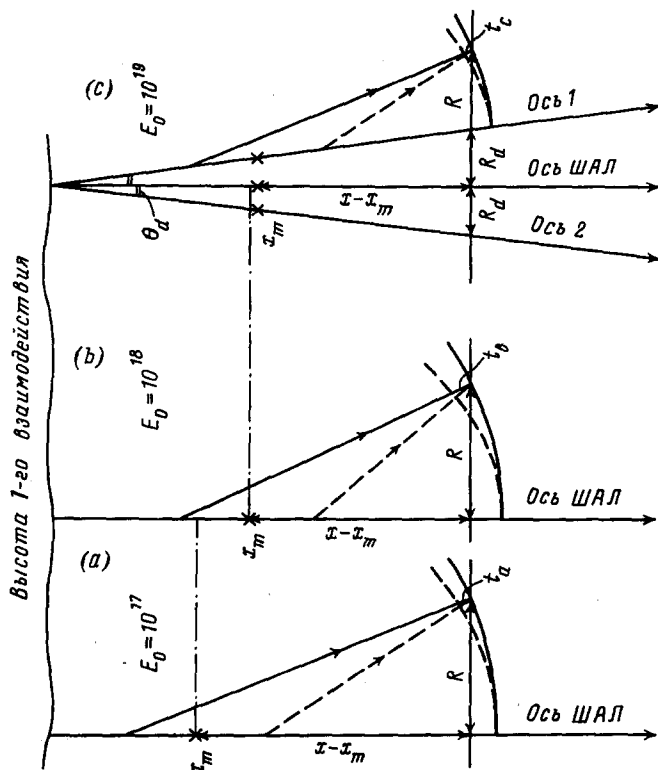


Рис.4. Формирование относительных задержек в разных схемах развития ШАЛ

Заметим, что аномалию при $E_0 > 10^{18}$ эВ имеют многие параметры ШАЛ [1, 2, 4, 5]. Мы считаем, что причина их появления общая. Она не вызвана методикой проведения эксперимента на Якутской установке, а связана с какими-то новыми процессами развития ШАЛ.

Анализ рассмотренных выше данных подтверждает, как одну из возможных, предложенную нами ранее [1] следующую картину развития ШАЛ. При $E_0 > 10^{18}$ эВ появляются отдельные многостольные ливни, доля которых постепенно увеличивается и при $E_0 > (5 - 6) \cdot 10^{18}$ эВ достигает 100%. Несмотря на то, что общий баланс частиц и динамика продольного развития ливней при $E_0 > (5 - 6) \cdot 10^{18}$ эВ, скорее всего, не претерпевают заметных изменений, происходит существенная перестройка их поперечной структуры. Схематический рис.4с показывает, как в этом случае изменится толщина диска. За счет того, что одна из осей ШАЛ оказывается ближе к детектору на величину ее отклонения R_d и дает основной вклад в его показания, относительные задержки t_c будут меньше t_a и t_b , хотя максимум ливня по-прежнему приближается к уровню наблюдения.

Оценим величину R_d . Согласно (2) и (4), имеет место постоянный сдвиг на ~ 30 нс до и после предполагаемой нами перестройки поперечной структуры ШАЛ. Если воспользоваться рис.1, то можно увидеть, что $\langle t \rangle \approx 62$ нс соответствуют $R \approx \approx 430$ м. Отсюда легко найти $R_d \approx 630 - 430 = 200$ м.

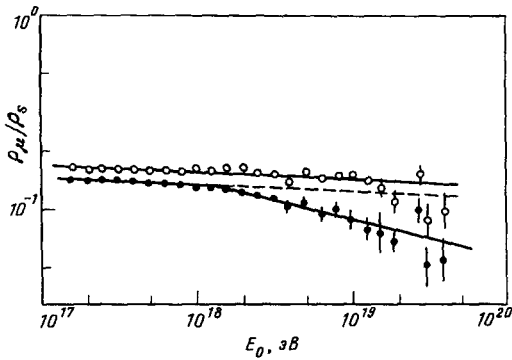


Рис.5. Доля мюонов ($E_\mu \approx 1.0 \text{ sec } \theta \text{ ГэВ}$) от общего числа заряженных частиц на расстояниях $R = 300 \text{ м}$ (●) и $R = 600 \text{ м}$ (○) в ливнях с $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$ в зависимости от первичной энергии

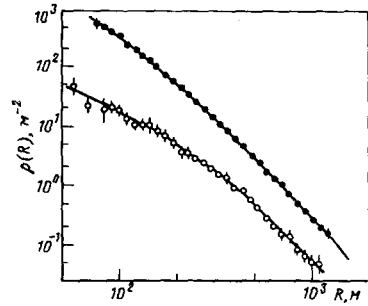


Рис.6. Функции пространственного распределения заряженных частиц (●) и мюонов (○) в ливнях с $\langle E_0 \rangle = 10^{18} \text{ эВ}$ и $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$

Приведем дополнительно экспериментальный результат, который не связан с данными БМД, но подтверждает высказанную выше гипотезу. На рис.5 темными кружками показана доля ρ_μ/ρ_s мюонов с порогом $E_\mu \approx 1.0 \cdot \text{sec } \theta \text{ ГэВ}$ в общем числе заряженных частиц в зависимости от E_0 в ШАЛ с $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$ на расстоянии от оси $R = 300 \text{ м}$. Светлые кружки – те же данные при $R = 600 \text{ м}$. Мы использовали выборку ливней, вошедшую в [1, 2]. Видно, что величина $\rho_\mu(600)/\rho_s(600)$ слегка уменьшается с ростом первичной энергии без каких-либо заметных отклонений от линейного закона во всей области изменений E_0 . Но доля $\rho_\mu(300)/\rho_s(300)$ ведет себя по-другому: при $E_0 > (1 - 2) \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ убывает гораздо быстрее, чем она менялась до этого.

Причину легко понять с помощью рис.6, где показаны ФПР заряженных частиц (темные кружки) и мюонов (светлые кружки) в ШАЛ с $E_0 = 10^{18} \text{ эВ}$ и $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$. При $E_0 > 10^{18} \text{ эВ}$ на основании сказанного выше следует ожидать постепенного смещения всех плотностей к одной из ближайших осей многоствольного ливня (грубо на $\sim 200 \text{ м}$). Такое смещение останется почти не заметным для периферии ливня и будет велико при $R < 300 \text{ м}$, где доля мюонов быстро убывает.

На наш взгляд, многоствольность ШАЛ с гигантскими поперечными импульсами возникает, скорее всего, в первом акте ядерных взаимодействий. В результате этого взаимодействия из одной точки под углом θ_d к направлению движения первичной частицы вылетают $m = 2, 3, 4, \dots$ нуклонов с энергиями $\sim E_0/m$, которые образуют далее обычные ШАЛ с осями по кругу с радиусом $\sim R_d$.

Можно оценить величину θ_d . Если принять глубину первого ядерного взаимодействия $\sim 50 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ и воспользоваться соотношением

$$P = 1020 \cdot \text{sec } \theta \cdot \exp(-H \cdot \cos \theta / 6.85) \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \quad (5)$$

для Якутска между расстоянием от уровня наблюдения H (км) и давлением в этой точке P (с $\cos \theta = 0.91$ для рассматриваемых ливней), то находим $H \approx 22 \text{ км}$. Этой высоте соответствует угол $\theta_d = \arctg(R_d/H) \approx 0.6^\circ$.

Дальнейшие наблюдения позволят нам уточнить структуру мюонного диска при $E_0 > 10^{18} \text{ эВ}$ и сообщить об этом в последующих публикациях. Мы планируем также

осуществить прямой поиск многостольных ливней на базе имеющихся у нас данных, но сделать это на Якутской установке с раздвижением детекторов 500 – 1000 м будет нелегко. Однако уже сейчас имеется целый ряд экспериментальных фактов, которые нельзя объяснить в рамках традиционных представлений о развитии ШАЛ в области предельно высоких энергий. Мы предлагаем вниманию других исследователей как одну из возможных гипотезу 2-осевых ШАЛ и призываем их к участию в решении этого вопроса с точки зрения новых взглядов на первичный элементарный акт ядерных взаимодействий.

Большой мюонный детектор создавался как прототип для установки ШАЛ-1000, проектируемой в рамках государственной научно-технической программы по физике высоких энергий. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России Якутской установки ШАЛ (рег. № 01-30), включенной в "Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости".

-
1. А.В.Глушков, И.Т.Макаров, Е.С.Никифорова и др., ЯФ **58**, 1265 (1995).
 2. A.V.Glushkov, I.T.Makarov, E.S.Nikiforova et al., *Astroparticle Physics* **4**, 1274 (1995).
 3. B.N.Afanasiev, S.A.Filipov, A.V.Glushkov et al., *Proc. 25th ICRC* **7**, 261 (1997).
 4. А.В.Глушков, М.И.Правдин, И.Е.Слепцов, Изв. АН РАН, сер. физ. **61**, 516 (1997).
 5. A.V.Glushkov, M.I.Pravdin, and I.Ye.Sleptsov, *Proc. 25th ICRC* **6**, 233 (1997).