

УДК 537.591

ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ ПРОНИКАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ В ШАЛ

Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, Н. Г. Вильданов,
А. В. Круглов, А. В. Степанов, Ж. С. Такибаев¹

Приводятся результаты длительной эксплуатации подземной сцинтилляционной установки МЮОН-Т на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции в период 1995-2006 гг. В 2000 году установка была дополнена хронотроном. С большой статистической достоверностью получено временное распределение запаздывающих проникающих частиц на глубине 20 м.в.э. относительно фронта ШАЛ. Подтверждается эффект влияния геомагнитного поля на запаздывание проникающих частиц ШАЛ, приводящий к асимметрии их регистрации относительно направления Север-Юг.

Исследование частиц, запаздывающих относительно ливневого фронта, было осуществлено в большом числе работ [1 – 7].

Присутствие запаздывающих частиц в ШАЛ указывает на наличие запаздывающего ливневого диска и может быть ассоциировано с долгоживущими адронами [1, 2].

Цикл исследований запаздывающих частиц был выполнен японскими физиками на нескольких сцинтилляционных установках, работавших в составе эксперимента “АКЕНО”, что позволило получить важную информацию о свойствах запаздывающих частиц [2, 3].

Авторы работ [2, 3] полагали, что регистрируемые ими частицы, запаздывающие на время больше 20 нс вплоть до ≈ 100 нс, являются тяжелыми адронами нового типа, пока не обнаруженными на ускорителях.

¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан.

Интересным результатом работы [3] является факт сильного возрастания числа запаздывающих частиц с ростом первичной энергии ШАЛ в интервале $10^{16} - 10^{17}$ эВ.

В ранее проведенной нашей работе на установке МЮОН-Т [8] было обнаружено присутствие в ШАЛ с энергией $> 10^{15}$ эВ проникающих частиц, запаздывающих на время > 60 нс. Однако недостаточная статистика не позволила получить временное распределение запаздывающих проникающих частиц.

Экспериментальная установка. На первом, предварительном этапе работы, установка состояла из 12-ти пластических сцинтилляторов, расположенных в виде однослойного “ковра” в подземной лаборатории Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС) на глубине 20 м.в.э. (метров водного эквивалента).

В качестве сцинтилляторов применялись сцинтилляционные пластины ЭПС-4 размером $300 \times 20 \times 1$ см³. Пластины ЭПС-4 были изготовлены в ИФВЭ (г. Протвино). Они имеют высокую прозрачность. Пробег для экспоненциального ослабления собственного излучения не менее 2 м [9].

В качестве фотоумножителей использовались временные ФЭУ: ФЭУ-65 с диаметром фотокатода 15 см. ФЭУ просматривали объем сцинтилляционных пластин с их торцов.

Площадь торцов сцинтилляторов составляла 20 см², а часть площадей фотокатодов, перекрывающих торцы сцинтилляторов, составляла 15 см². Таким образом 75% света сцинтилляционной вспышки, дошедшего до торцов сцинтилляционных пластин, попадала на фотокатоды ФЭУ. Сцинтилляционные пластины были обернуты в белую бумагу и помещались вместе с фотоумножителями в светонепроницаемых металлических коробках. Коробки располагались вплотную друг к другу, образуя “ковер” чувствительной площадью 7.2 м².

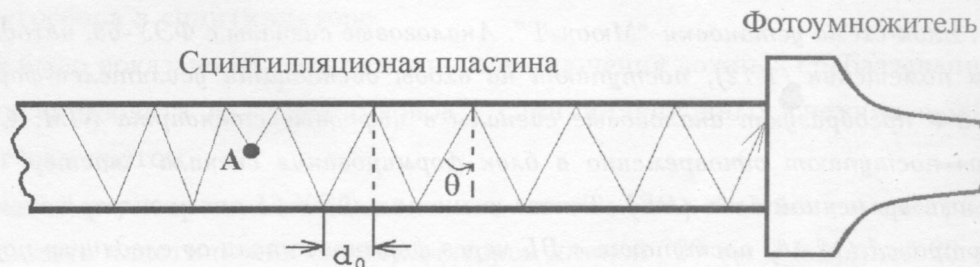


Рис. 1. Способ светосбора в сцинтилляционных счетчиках установки МЮОН-Т. А – произвольная точка на траектории ионизирующей частицы.

Определим время максимального запаздывания импульсов ФЭУ, вызванного длительностью распространения света в сцинтилляторе. Максимальное время запаздывания будет, если регистрируемая частица проходит через сцинтиллятор на расстоянии 3 м от фотокатода ФЭУ. В этом случае свет будет попадать на фотокатод за счет полного внутреннего отражения света на границе поверхность сцинтилляционных пластин – воздух. Роль света, попадающего на фотокатод непосредственно, минуя отражения, будет мала из-за малости телесного угла, в пределах которого свет может попадать на фотокатод с расстояния 3 м . Искомое запаздывание τ будет: $\tau = \frac{D}{c} \cdot n$, где D – путь света сцинтилляционной вспышки, возникшей на расстоянии 3 м от фотокатода ФЭУ. Очевидно, что $D = \frac{m \cdot d_0}{\sin \theta_m}$, $m \cdot d_0 = 3 \text{ м}$ (см. рис. 1), здесь m – число полных внутренних отражений; θ_m – угол полного внутреннего отражения. $\sin \theta_m = \frac{n_a}{n_c} = \frac{1}{1.6}$, $n_a = 1$ – показатель преломления воздуха; n_c – показатель преломления сцинтиллятора; $n_c = 1.6$, $D = 3 \text{ м} \cdot 1.6$, $\tau = \frac{3 \cdot 1.6}{c} \cdot 1.6 = 10 \text{ нс} \cdot 1.6^2 = 10 \cdot 2.56 \cong 25.6 \text{ нс}$.

Для измерений времени прихода мюонов ШАЛ (или других проникающих частиц) относительно момента появления мюона, пришедшего первым, применялась кольцевая временная система, позволяющая измерять задержки в интервале $0 - 640 \text{ нс}$.

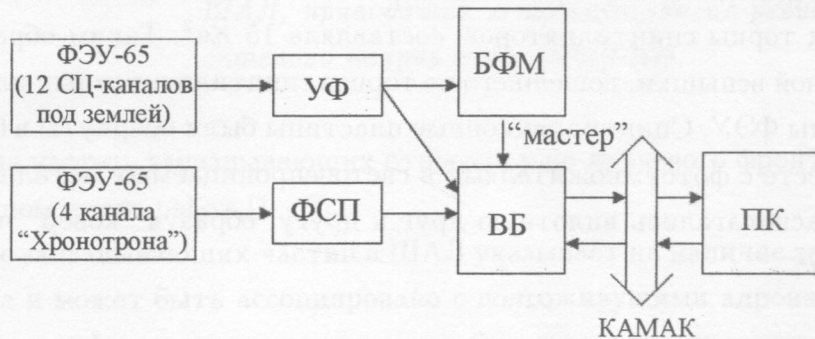


Рис. 2. Блок-схема установки "Мюон-Т". Аналоговые сигналы с ФЭУ-65, находящиеся в подземном помещении (1-12), поступают на входы двенадцати усилителей-формирователей (УФ). УФ преобразуют аналоговые сигналы в цифровые стандарта NIM. С выходов УФ сигналы поступают одновременно в блок формирования сигнала "мастер" (БФМ) и 16-канальный временной блок (ВБ). Также сигналы с ФЭУ-65 от четырех наземных пунктов "Хронотрона" (13-16) поступают в ВБ через формирователи со следящим порогом (ФСП). По заданному числу совпадений БФМ вырабатывает сигнал "мастер" для запуска анализа данных в ВБ. Управление временным блоком и запись информации осуществляется персональным компьютером (ПК) через шину КАМАК.

Блок-схема регистрации данных (рис. 2) содержит 16 идентичных каналов регистрации², состоящих из усилителей-формирователей, преобразователей время-код (ПВК) и их памяти. В основе схемы ПВК лежит блок быстрой памяти с организацией 64×16 (64 последовательно заполняемые ячейки памяти в каждом из 16 каналов). Задержки мюона, проходящего через один скintиллятор в интервале от 1 до 10 нс, вызывают заполнение одной ячейки памяти. Задержки мюона в этом же скintилляторе на время от 10 до 20 нс вызывают заполнение последующей ячейки в этом же канале и т.д. Таким образом, электронная погрешность измерения запаздывания времени прихода мюона была 10 нс.

Анализ ячеек памяти ПВК осуществлялся при наличии импульса “мастер”, который формируется при условии срабатывания m или более скintилляционных счетчиков (заданной кратности совпадений) за время 80 нс. Минимальное число срабатываний m задавалось заранее и было равно 6. Цифровая информация о содержании ячеек памяти ПВК с помощью крейта КАМАК регистрируется и обрабатывается на персональном компьютере, который позволяет видеть на дисплее картину распределения времени прихода каждого мюона в отдельном ШАЛ, что позволяло контролировать работу установки.

Перед запуском установки МЮОН-Т в постоянную эксплуатацию в каждом из каналов с помощью амплитудного анализатора регистрировались амплитудные спектры фотоумножителей, что позволило выставить пороги на усилителях-формирователях в начале области амплитуд одиночных мюонов для отсеечения шумовых импульсов (точка А на рис. 3).

На рис. 4 показано распределение запаздываний относительно момента появления мюона, пришедшего на установку первым, в каждом зарегистрированном ливне для числа сработавших скintилляторов $m \geq 6$. Это распределение связано как с запаздыванием мюонов относительно мюона, пришедшего на установку первым, так и со временем светосбора в скintилляторе.

Как нами было показано [8], для надежного исключения ложных срабатываний ФЭУ необходимо использовать два ряда (“ковра”) скintилляционных счетчиков, расположенных друг над другом.

Для надежной регистрации запаздывающих частиц была изменена геометрия установки. Двенадцать пластических скintилляторов длиной 300 см и шириной 20 см рас-

²Первоначально использовалось 12 каналов, затем 16 (см. выше).

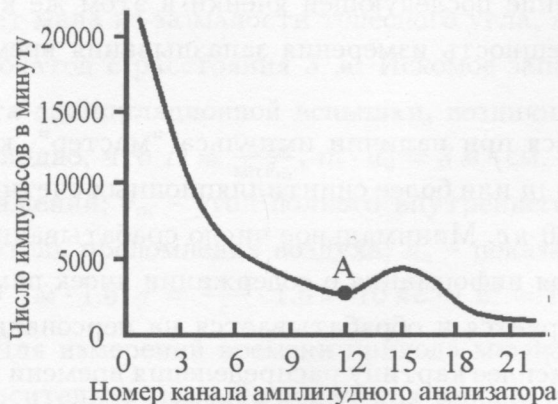


Рис. 3. Амплитудный спектр одиночных мюонов и шумовых импульсов ФЭУ для одного из каналов установки.

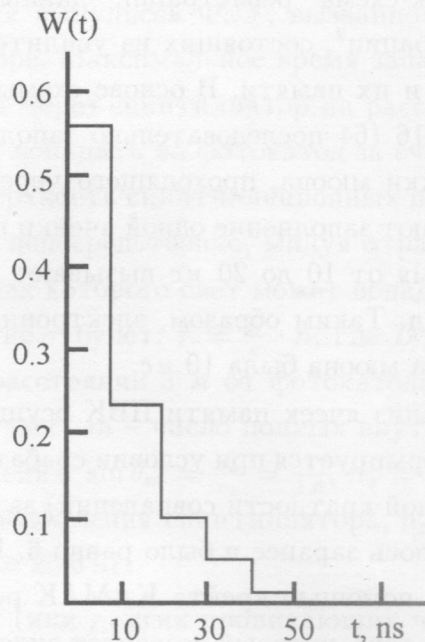


Рис. 4. Распределение запаздываний, меньших 50 нс.

полагались в двух слоях друг над другом так, что образовался двухрядный “ковёр” чувствительной площади 3.6 м^2 . Расстояние между слоями 20 см. На рис. 5 показана конфигурация размещения сцинтилляционных детекторов.

Мюоны при прохождении через установку вызовут срабатывание двух сопряженных детекторов, расположенных друг над другом или в непосредственном соседстве. На рис. 5 внизу показаны все возможные сопряженные пары. Их число равно 16. Детекторы, образующие сопряженные пары, соединены между собой линиями.

Обозначим: a – число сопряженных пар, b – число не сопряженных пар. При равномерном распределении фона по всем каналам, коэффициент пересчета от фона в несопряженных парах к фону в сопряженных парах будет $g = a/b$.

Если за время работы установки сработало N_t сопряженных пар, то в это число входят события, вызванные как прохождением частиц N_m , так и фоном ложных импульсов, вызванных спонтанными послеимпульсами ФЭУ. Число сработавших несопряженных пар детекторов N_b вызвано фоном, так как геометрия установки не позволя-

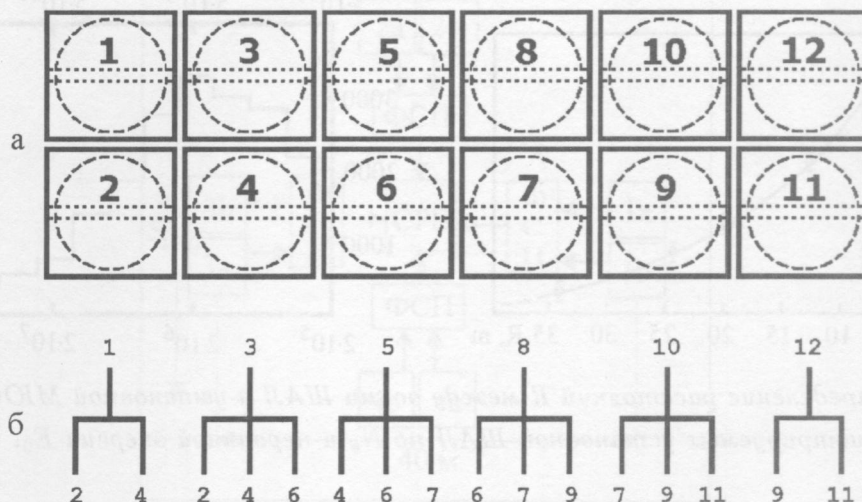


Рис. 5. а) Размещение сцинтилляционных счетчиков в двух рядах. Пунктиром показано положение сцинтилляторов и фотокатодов ФЭУ; б) Сопряженные пары детекторов.

ет мюону пройти через несопряженную пару детекторов. Так как $a = 16$, $b = 20$, то $g = 16/20 = 0.8$.

Фон в сопряженных детекторах будет gN_b .

Полное число срабатываний сопряженных сцинтилляционных детекторов N_t

$$N_t = N_m + gN_b,$$

где N_m – число событий, связанных с прохождением через установку мюонов

$$N_m = N_t - gN_b.$$

Время прихода частиц t отсчитывается с момента регистрации сигнала мюона, прошедшего первым через установку. Этот момент времени принимается за момент прохождения через установку переднего фронта ШАЛ. Мюон, пройдя через пару сопряженных детекторов, вызовет два импульса, и если первый импульс будет зарегистрирован в момент времени t , то второй придет не позже времени $t + t'$. Величина t' определяется бином системы регистрации 10 нс.

Результат, полученный на установке МЮОН-Т с временным разрешением 10 нс. За время работы установки 4487 часов было зарегистрировано 48464 события прохождения через установку трех и более мюонов ШАЛ: плотность потока мюонов

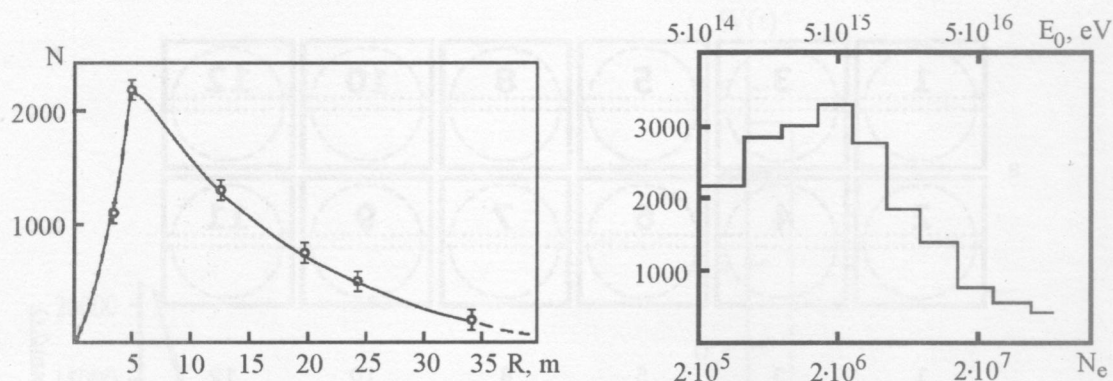


Рис. 6. а) Распределение расстояний R между осями ШАЛ и установкой МЮОН-Т; б) Распределение регистрируемых установкой ШАЛ по N_e и первичной энергии E_0 .

≥ 1 частиц/ m^2 (требование для запуска системы регистрации установки МЮОН-Т).

Проведенные методом Монте-Карло расчеты с учетом полученных ранее на ТШВНС данных о спектре ШАЛ по полному числу электронов (N_e), пространственному распределению мюонов и зависимости числа мюонов с энергией ≥ 5 ГэВ от N_e [10, 11] показали, что при указанном условии отбора ШАЛ регистрируются ливни, оси которых проходят от установки на расстоянии не более ≈ 40 м, а среднее число электронов в ШАЛ $N_e \approx 2 \cdot 10^6$, что соответствует первичной энергии ШАЛ $\approx 5 \cdot 10^{15}$ эВ (рис. 6а и 6б.)

Был произведен отбор событий прохождения через установку мюонов (срабатывания сопряженных пар детекторов) со следующими временными критериями: события должны содержать пары детекторов, срабатывающих с запаздыванием относительно основного фронта на время > 70 нс, а импульсы сцинтилляторов пары должны быть удаленными друг от друга на время не более 20 нс, что соответствует временным характеристикам установки. Таких событий (N_t) в диапазоне времен запаздывания 70 – ≥ 130 оказалось 82 при $N_b = 23$, что соответствует статистической обеспеченности (5.6σ) наличия в ШАЛ частиц, запаздывающих на время ≥ 45 нс, учитывая возможность запаздываний в самом сцинтилляторе (максимальное время светосбора ≈ 25 нс).

Недостаток числа зарегистрированных событий при запаздываниях > 70 нс не позволил получить временные распределения запаздывающих событий.

Запаздывающие проникающие частицы в ШАЛ и геомагнитное поле. Для выяснения возможного влияния геомагнитного поля на регистрацию запаздывающих частиц

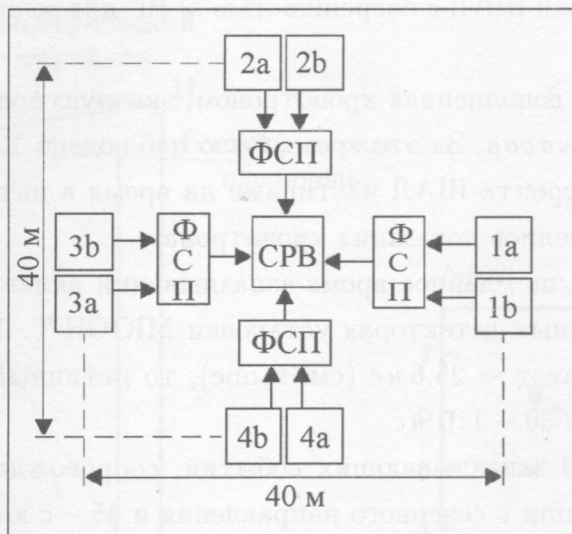


Рис. 7. Расположение сцинтилляционных счетчиков хронотрона. ФСП – формирователи следящего порога. СРВ – система регистрации времени прихода сигналов.

в 2000 году установка МЮОН-Т была дополнена хронотроном для определения направлений прихода ШАЛ.

Хронотронная установка состоит из четырех пунктов, показанных на рис. 7.

В каждом из четырех пунктов находились четыре пластических сцинтиллятора размером $0.5 \times 0.5 \times 0.05 \text{ м}^3$, помещенные в светосборники, ранее использовавшиеся в работах на ТШВНС. Один фотоумножитель ФЭУ-65 просматривал площадь сцинтилляторов в 1 м^2 , составленную из четырех указанных сцинтилляторов. В процессе измерений общая площадь сцинтилляционных счетчиков в каждом из четырех пунктов была увеличена до 2 м^2 . Для регистрации сигналов хронотрона были задействованы 4 ранее не использованные канала временной системы из 16-ти. Относительные запаздывания импульсов сцинтилляционных счетчиков хронотрона в двух взаимно-перпендикулярных направлениях позволяли определить направление оси ШАЛ в пространстве (зенитный и азимутальный углы). В связи с тем, что сигналы фотоумножителей хронотрона поступали на временной блок с задержкой на высокочастотных кабелях 820 нс , для возможности одновременной регистрации запаздываний мюонов на подземных сцинтилляционных счетчиках и времен появления импульсов хронотрона шаг (бин) регистрации времени на 64-х ячейках памяти системы регистрации времени (СРВ) был увеличен с 10 до 20 нс . Полный диапазон СРВ стал $64 \times 20 = 1280 \text{ нс}$. Разрешение 20 нс позволяет

определить направление оси ШАЛ с погрешностью $\approx 10^\circ$ для зенитных и азимутальных углов.

Установка МЮОН-Т, дополненная хронотроном, эксплуатировалась в период 2000-2006 гг. в течение 17347 часов. За это время было наблюдеено 139 событий с запаздывающими относительно фронта ШАЛ частицами на время в интервале $60 - \geq 140$ нс. Для этих 139 событий имелись показания хронотрона.

Как было отмечено выше, данное время запаздываний включает в себя время светосбора в сцинтилляционных детекторах установки МЮОН-Т. Так как максимальное время светосбора составляет ≈ 25.6 нс (см. выше), то истинный временной интервал запаздываний составит $\approx 30 - 110$ нс.

Оказалось, что из 139 запаздывающих событий, сопровождающихся показаниями хронотрона, 94 события шли с северного направления и 45 – с южного. Таким образом наблюдается эффект асимметрии регистрации запаздывающих проникающих частиц относительно направлений Север-Юг; преимущественная регистрация запаздывающих частиц с направления на Север. Статистическая достоверность эффекта составляет $(94 - 45)/\sqrt{139} = 4.15\sigma$.

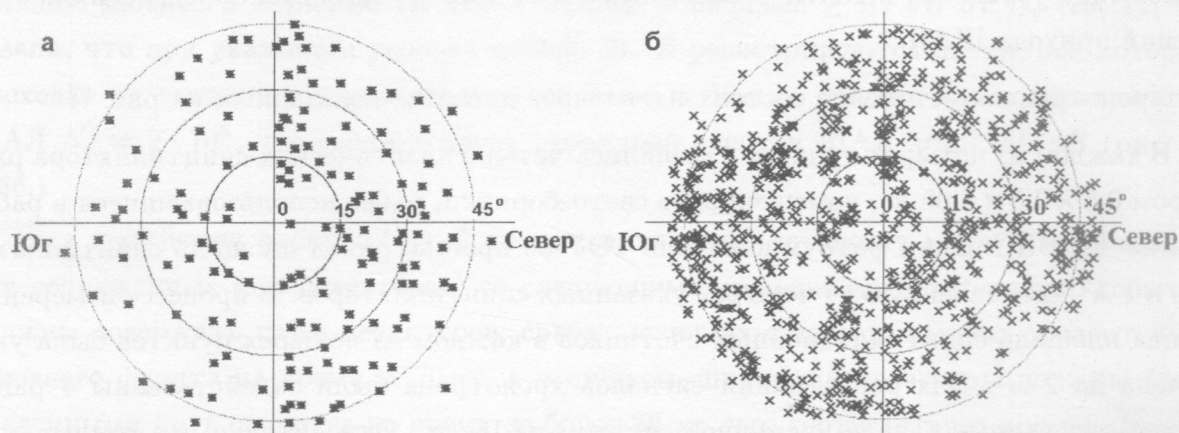


Рис. 8. Распределение по зенитным и азимутальным углам для событий с запаздывающими частицами (а) и без них (б).

На рис. 8 показано распределение по зенитным и азимутальным углам для событий с запаздывающими частицами (а) и без них (б). Эффект асимметрии регистрации запаздывающих частиц был обнаружен нами ранее, менее статистически обеспеченный (3.7σ). К сожалению, в публикации [12] была допущена ошибка: избыток числа запаздывающих частиц был отнесен к Югу, а не к Северу.

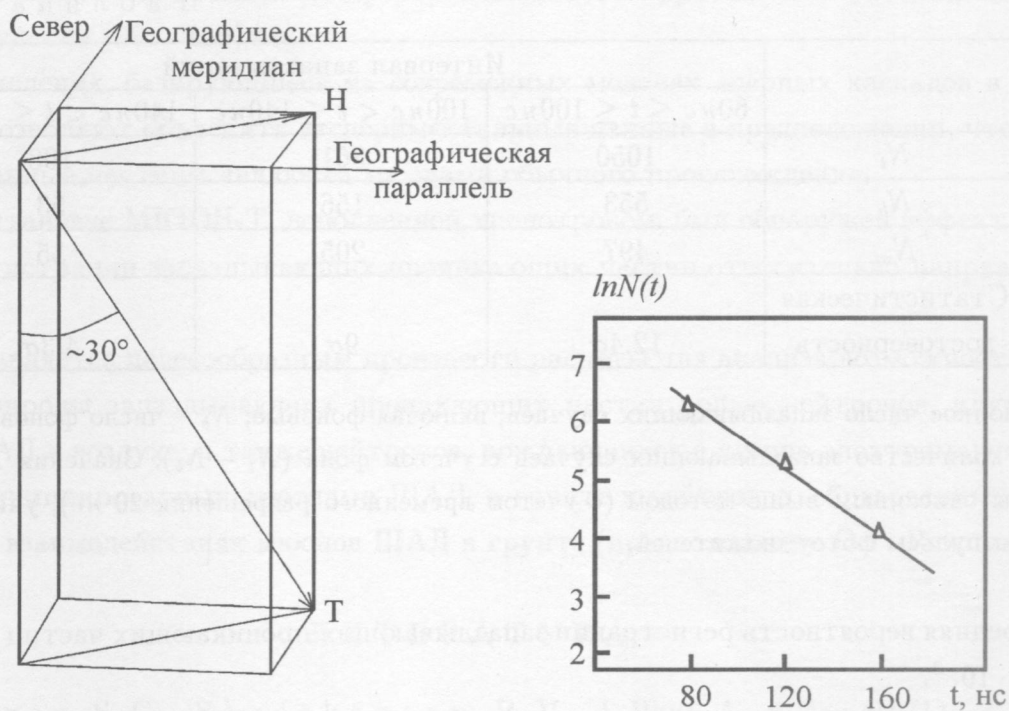


Рис. 9. Расположение вектора геомагнитного поля Земли в Алма-Ате. Н – горизонтальная составляющая геомагнитного поля.

Рис. 10. Зависимость числа запаздывающих частиц от времени запаздывания.

Направление вектора напряженности магнитного поля в Алма-Ате показано на рис. 9.

Как видно (рис. 8 и 9) запаздывающие проникающие частицы приходят преимущественно с тех направлений, где сила Лоренца действует сильнее.

Временное распределение запаздывающих проникающих частиц. Экспериментальные данные о временном распределении проникающих частиц, полученные за период 2001-2005 годов на установке МЮОН-Т (10043 часов работы установки, 223014 зарегистрированных ливней) и статистическая достоверность эффекта представлены в табл. 1.

На рис. 10 показана зависимость числа запаздывающих событий от времени. Эта зависимость может быть представленной экспоненциальным законом $N_m \sim e^{-t/t_0}$, где $t_0 \cong 30$ нс.

Т а б л и ц а 1

	Интервал запаздываний		
	$60\text{нс} \leq t \leq 100\text{нс}$	$100\text{нс} < t \leq 140\text{нс}$	$140\text{нс} < t \leq 180\text{нс}$
N_t	1050	361	108
N_b	553	156	53
N_m	497	205	55
Статистическая достоверность	12.4σ	9σ	4.3σ

N_t – полное число запаздывающих случаев, включая фоновые; N_b – число фоновых случаев; N_m – количество запаздывающих случаев с учетом фона ($N_t - N_b$). Значения N_t и N_b получены описанным выше методом (с учетом временного разрешения 20 нс), учитывающим послеимпульсы фотоумножителей.

Средняя вероятность регистрации запаздывающих проникающих частиц составляет $p \sim 3 \cdot 10^{-3}$.

В работе [7] было показано, что регистрируемые нами запаздывающие проникающие частицы (возможно мюоны) могли возникать из-за распада тяжелых долгоживущих частиц, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Предполагалось, что массивные частицы создаются в первом взаимодействии первичного протона или ядра с энергией $\geq 10^{15}$ эВ с ядрами атомов воздуха.

Недавно расчеты запаздываний мюонов в ШАЛ, инициированных первичными протонами и ядрами железа с энергией $10^{15} - 10^{16}$ эВ, были произведены в работе [13]. Вычисления базировались на обычных предположениях о генерации мюонов: распад пионов и каонов.

Расчеты [13] показали, что отклонение мюонов в геомагнитном поле не может привести к большим запаздываниям мюонов, наблюдаемых на подземной установке ТШВНС. Рассчитанные в работе [13] запаздывания мюонов с пороговой энергией 5 ГэВ не превышали 10 наносекунд.

В настоящее время также трудно объяснить асимметрию Север-Юг в регистрации запаздывающих частиц.

Заключение.

1. На подземной установке ТШВНС (МЮОН-Т) зарегистрированы с высокой статистической достоверностью запаздывающие относительно фронта ШАЛ проникающие частицы в интервале запаздываний (60 – 180) нс. Истинный диапазон запаздываний с

учетом максимального времени распространения света в протяженных сцинтилляторах (25.6 нс) будет $\approx (30 - 150)$ нс.

2. Вычисления, базирующиеся на современных моделях ядерных каскадов в атмосфере, не позволяют объяснить экспериментальные данные в предположении, что зарегистрированные частицы являются мюонами обычного происхождения.

3. На установке МЮОН-Т, дополненной хронотроном, был обнаружен эффект асимметрии регистрации запаздывающих проникающих частиц относительно направлений Север-Юг.

Представляется целесообразным произвести расчеты для анализа возможности объяснения природы запаздывающих проникающих частиц ролью нейтронов, идущих в составе ШАЛ в воздухе, а также нейтронов, рождающихся в ядерно-электромагнитных каскадах, инициированных адронами ШАЛ, в грунте и нейтронов, образованных в фотоядерных взаимодействиях мюонов ШАЛ в грунте (предположение О.Г. Ряжской).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Топвар S. C., Shreekantan B. V. J. Phys. A., **4**, 486 (1971).
- [2] Sakuяama H. et al. Nuovo Chimento, **С6**, 371 (1983).
- [3] Sakuяama H. et al. 20-th ICRC, Moscow, **9**, 181 (1987).
- [4] Inoe N. et al. J. Phys. G, **11**, 657 (1989).
- [5] Атрашкевич В. Б. и др. Известия РАН (Серия физич.), **58**, 98 (1994).
- [6] Beisembaev R. U., Vavilov Yu. N., et al. 24-th ICRC, Roma, **1**, 454 (1995).
- [7] Beisembaev R. U., Vavilov Yu. N., et al. 29-th ICRC, Pune, **9**, 247 (2005).
- [8] Бейсембаев Р. У. и др. Известия РАН (Серия физич.), **61**, 540 (1997).
- [9] Алимova Т. В. и др. Препринт N 86-35 ИФВЭ (Институт физики высоких энергий, Моск. обл., Протвино, 1986).
- [10] Стаменов И. Н. и др. Труды ФИАН, **109**, 132 (1979).
- [11] Kirou J. N. et al. Proc. 17-th ICRC, Paris, **2**, 109 (1981).
- [12] Бейсембаев Р. У. и др. Известия РАН (Серия физич.), **69**, 382 (2005).
- [13] Вавилов Ю. Н., Деденко Л. Г. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 25 (2006).

Поступила в редакцию 3 ноября 2006 г.