

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 524.1

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГОДОСКОП
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЮОННОЙ КОМПОНЕНТЫ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ
ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

А. Л. Щепетов¹, Л. И. Вильданова¹, Н. О. Ережеп^{2,3}, В. В. Жуков¹,
С. А. Мамина¹, Н. О. Садуев², И. М. Сопко³, Ш. Б. Утей³, В. А. Рябов¹

Для детального исследования аномальных эффектов, обнаруженных в космических лучах, на Тянь-Шаньской высокогорной станции создана гадоскопическая установка, предназначенная для непосредственного измерения плотности потока мюонов в области стволов широких атмосферных ливней с первичной энергией (1–100) ПэВ. Новый мюонный гадоскоп разработан на базе современных сцинтилляционных детекторов заряженных частиц с малым временем высыживания сцинтилляционной вспышки и высоким, не более нескольких наносекунд, временным разрешением регистрирующей электроники. Для анализа полученной информации разработано специальное программное обеспечение, основанное на современных алгоритмах машинного обучения. Помимо исследования характеристик мюонной компоненты ШАЛ, новая установка может найти применения для задач, связанных с анализом углового распределения направлений прихода частиц космических лучей на небесной сфере, и для селекции ливней с понижением содержанием адронной и мюонной компонент для целей гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, широкие атмосферные ливни, ствол ливня, сцинтилляционные детекторы частиц, мюонный гадоскоп.

Главная цель экспериментов по регистрации мюонного потока, которые проводятся на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН (ТШВНС), расположенной на высоте

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ryabov@lebedev.ru.

² Институт ядерной физики, 050032 Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова, 1.

³ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, 050040 Казахстан, Алматы, пр-т Аль-Фараби, 71.

3340 м над уровнем моря, заключается в исследовании свойств проникающей компоненты космических лучей в широком энергетическом диапазоне, начиная с (5–10) ГэВ и вплоть до нескольких сотен ТэВ. В результате этих исследований был обнаружен ряд аномалий, связанных с взаимодействиями мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ), свойства которых трудно согласовать с общепринятыми моделями развития ядерно-каскадного процесса в атмосфере [1].

С помощью размещенных на ТШВНС детекторов проникающих частиц космических лучей к настоящему времени было обнаружено явление ускоренного роста энергии, выделяемой частицами мюонной компоненты ШАЛ, при их взаимодействии с веществом. Особенность этого эффекта заключается в пространственной привязке к области, ограниченной расстоянием не более (10–20) м вокруг ствола ШАЛ, а также наличием характерного порога по энергии: среднее энерговыделение мюонной компоненты начинает быстро возрастать в центральной области ливней с первичной энергией порядка (2–3) ПэВ, то есть в энергетическом диапазоне “колена” в первичном спектре космических лучей [2]. Данный эффект был обнаружен с помощью подземного детектора испарительных нейтронов, которые образуются при взаимодействиях мюонов высокой энергии внутри входящей в состав детектора тяжелой мишени-поглотителя, а затем регистрируются газоразрядными нейтронными счетчиками. С другой стороны, как обсуждается в [1], подобный же эффект, связанный с увеличением среднего содержания мюонов в стволах ШАЛ с зарегистрированными признаками генерации адронов сверхвысокой энергии (“гамма-семейства” в рентген-эмulsionационных камерах), ранее наблюдался в энергетическом диапазоне “колена” в 1980–1990х годах, при проведении на ТШВНС эксперимента АДРОН [3]. Более того, в настоящее время обнаруженная аномалия оказывается в общем тренде с активно обсуждаемой в последние годы проблемой “muon puzzle” [4], которая заключается в систематическом превышении множественностю мюонов, регистрируемых в экспериментах с космическими лучами в энергетическом диапазоне выше 10 ПэВ, значений, полученных в результате расчетов на основе современных моделей адронного взаимодействия [5].

Находящийся в подземном помещении ТШВНС детектор испарительных нейтронов от мюонных взаимодействий имеет ряд уникальных преимуществ для исследования мюонной компоненты космических лучей: высокий, порядка 1 ТэВ и выше, энергетический порог регистрируемых мюонов, отсутствие принципиальных ограничений сверху на их энергию, а также возможность количественной оценки энерговыделения мюонной компоненты в каждом зарегистрированном событии ШАЛ [2]. Поскольку мюоны

высокой энергии, регистрируемые в этом детекторе, представляют собой непосредственные продукты распада пионов, образующихся на ранних стадиях каскадного процесса, любую аномалию, обнаруженную в их поведении, следует рассматривать как некоторую особенность во взаимодействиях первичных протонов и ядер космических лучей, неожиданно проявляющуюся при энергиях “колена”. Это обстоятельство обуславливает несомненный интерес к дальнейшим исследованиям данного эффекта.

Принципиальный недостаток метода регистрации мюонов, который в настоящее время используется на подземном детекторе ТШВНС, заключается в том, что он не позволяет однозначно определить причину наблюдаемой в области “колена” аномалии в поведении непосредственно измеряемого сигнала – средней множественности испарительных нейтронов, образующихся при взаимодействии частиц проникающей компоненты ШАЛ (главным образом, в результате фотоядерных реакций, вызываемых тормозными гамма-квантами, которые, в свою очередь, рождаются при столкновениях энергичных мюонов с ядрами тяжелой мишени). Действительно, множественность возникающих нейтронов может возрастать как при росте средней энергии частиц мюонной компоненты ШАЛ, так и при увеличении суммарного количества таких частиц, то есть среднего числа мюонов в ливне. Чтобы понять различие между этими двумя возможностями, требуется дополнить эксперимент еще одной установкой, выходной сигнал которой зависит только от интенсивности потока мюонов, единовременно пересекающих ее чувствительный объем, но не от их энергии. Такому условию удовлетворяет гаммоскоп для регистрации заряженных частиц, который построен на базе сцинтиляционных детекторов большой площади, к настоящему времени смонтированных в подземном помещении ТШВНС.

Сцинтиляционные детекторы заряженных частиц большой площади со встроенным источником высоковольтного питания разрабатывались специально для использования в экспериментах, связанных с исследованиями космических лучей методом регистрации ШАЛ [6]. Чувствительный элемент детектора образует плоский блок состоящего из полистирола сцинтилятора с размерами $(1 \times 1 \times 0.01) \text{ м}^3$. Вывод света сцинтиляционной вспышки на фотокатод ФЭУ обеспечивается посредством смещающих длину волны волокон–световодов. Конструкция детектора обеспечивает $\sim 99\%$ эффективность регистрации однозарядных релятивистских частиц, пересекающих объем сцинтилятора, не превышающую $\sim 8\%$ неоднородность световогохода со всей площади детектора, и характерное время высвечивания сцинтиляционной вспышки не более 10 нс. Внутреннее устройство детектора показано на рис. 1.

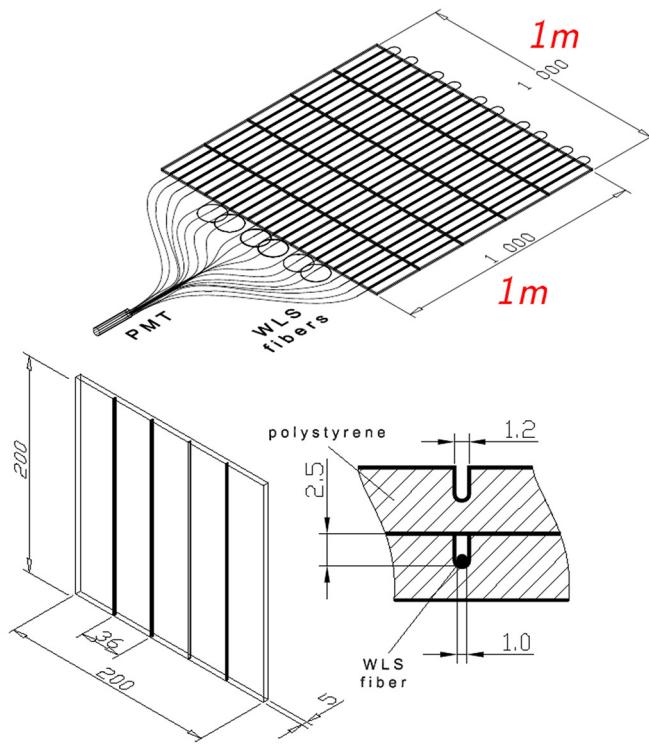


Рис. 1: Сцинтилляционный детектор большой площади для регистрации заряженных частиц ШАЛ.

Расположение детекторов мюонного годоскопа в подземном помещении ТШВНС площадью $(11 \times 9) \text{ м}^2$ показано на рис. 2. Как следует из представленной схемы, из 22-х введенных к настоящему времени в эксплуатацию детекторов, 18 находятся на верхнем ярусе установки, еще 4 размещаются в нижнем ярусе, образуя телескоп совпадений для определения направления приходящих частиц. Также планируется установка дополнительных 5-8 детекторов, что позволит увеличить суммарную чувствительную площадьgodоскопа до $\sim 30 \text{ м}^2$.

Подземное помещение с установленными в нем детекторами мюонной компоненты находится непосредственно под центральной частью системы ливневых детекторов ТШВНС [7], предназначеннной для вырабатывания управляющего сигнала-триггера в момент прохождения ШАЛ с первичной энергией (1–100) ПэВ и регистрации пространственного распределения плотности потока заряженных частиц в ливне. Такое расположение мюонных детекторов позволяет эффективно их использовать для исследования следующих в составе ШАЛ мюонов высокой энергии, большинство которых концентрируется в пространственной области вокруг ствола ливня. Находящийся над подзем-

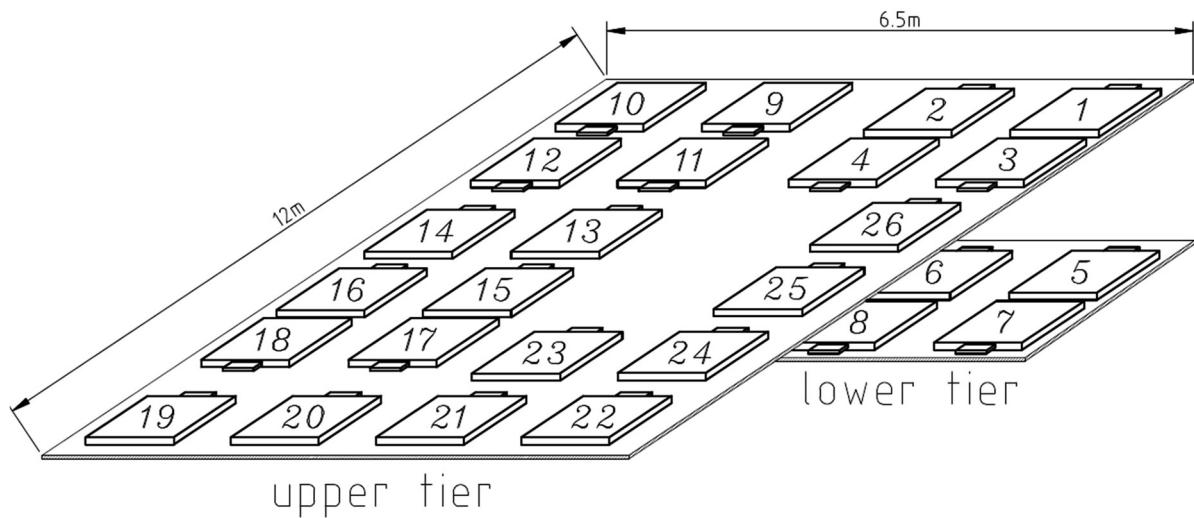


Рис. 2: Схема расположения детекторов гаммоскопической установки для регистрации мюонов в подземном помещении Тянь-Шаньской станции.

ным помещением слой образованного скальным грунтом поглотителя имеет толщину ~ 2000 г/см², что обеспечивает минимальную энергию порядка (5–8) ГэВ для регистрируемых детекторами гаммоскопической установки мюонов, в зависимости от их зенитного угла. Таким образом, обе находящиеся в подземном помещении установки, мюонный гаммоскоп и детектор испарительных нейтронов-продуктов мюонных взаимодействий, характерный энергетический порог которого имеет порядок нескольких десятков ТэВ, представляют собой установки со взаимодополняющими характеристиками.

Предполагается, что гаммоскопическая установка в подземном помещении позволит определять пространственное распределение плотности потока мюонов в центральной области ШАЛ путем измерения количества заряженных частиц-мюонов, одновременно прошедших через каждый детектор гаммоскопа. В свою очередь, количество частиц должно определяться по максимальной амплитуде в осциллограммах сигналов, синхронизированных с триггерным сигналом ШАЛ от находящейся на поверхности ливневой установки, и регистрируемых индивидуально для каждого сцинтилляционного детектора в гаммоскопе. Регистрация таких осциллограмм с точностью 14 двоичных бит и временным разрешением 2 нс обеспечивается многоканальной системой АЦП, построенной на базе крейта VME с установленными в нем модулями скоростных АЦП фирмы CAEN. Для управления процессом измерений разработан специальный комплекс программ, базирующийся на поставляемой фирмой библиотеке CAENDigitizer. При-

мер записи сигналов от сцинтилляционных детекторов гадоскопа показан на рис. 3. Интенсивный импульс отрицательной полярности, одновременно наблюдающийся в осциллограммах всех детекторов, представляет собой сигнал мюонной компоненты ШАЛ, прошедшего через систему детекторов ТШВНС.

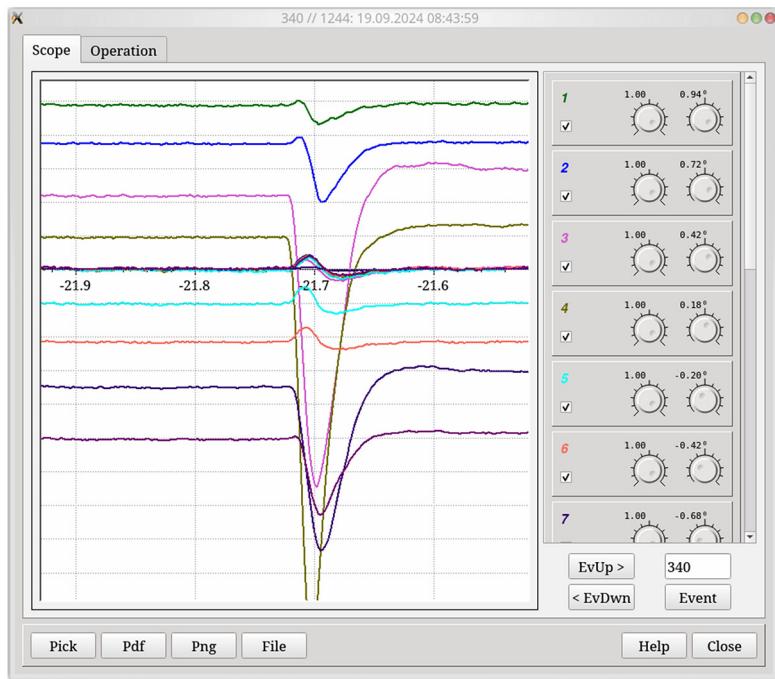


Рис. 3: Типичные осциллограммы формы сигналов в детекторах подземного гадоскопа при регистрации мюонного сигнала в стволе ШАЛ. Числа вдоль горизонтальной оси представляют собой время в микросекундах перед поступлением триггерного сигнала от ливневой установки. Масштаб вертикальной оси в произвольных единицах.

Осциллографические записи формы сигналов, зарегистрированные во всех детекторах гадоскопической установки на протяжении нескольких десятков микросекунд до и после фиксируемого по ливневому триггеру момента прохождения ШАЛ, загружаются в общую базу данных ТШВНС для их последующего анализа в режиме off-line. Предполагается, что такой анализ должен включать в себя как индивидуальную калибровку каждого детектора по характерному для него амплитудному спектру фоновых сцинтилляций, так и определение, на основе калибровочных данных, количества мюонов, прошедших через чувствительный объем детектора в зарегистрированных событиях ШАЛ. Необходимая для решения этих задач процедура автоматизированного поиска на фоне шумов в осциллограммах характерных коротких импульсов, соответствующих

прохождению заряженных частиц через детектор, разработана на основе современных алгоритмических средств машинного обучения. Результат тестирования этой процедуры, при котором она должна была определить, присутствует или нет сцинтиляционный импульс на каждой из ~ 30000 реальных, и заранее размеченных осциллограмм, иллюстрируется на рис. 4. Согласно этим результатам, разработанная к настоящему времени программа обеспечивает $\sim 99\%$ вероятность верного отождествления коротких импульсных сигналов, соответствующих сцинтиляциям от прохождения заряженных частиц, с примесью ложноположительных срабатываний, не превышающей 1%.

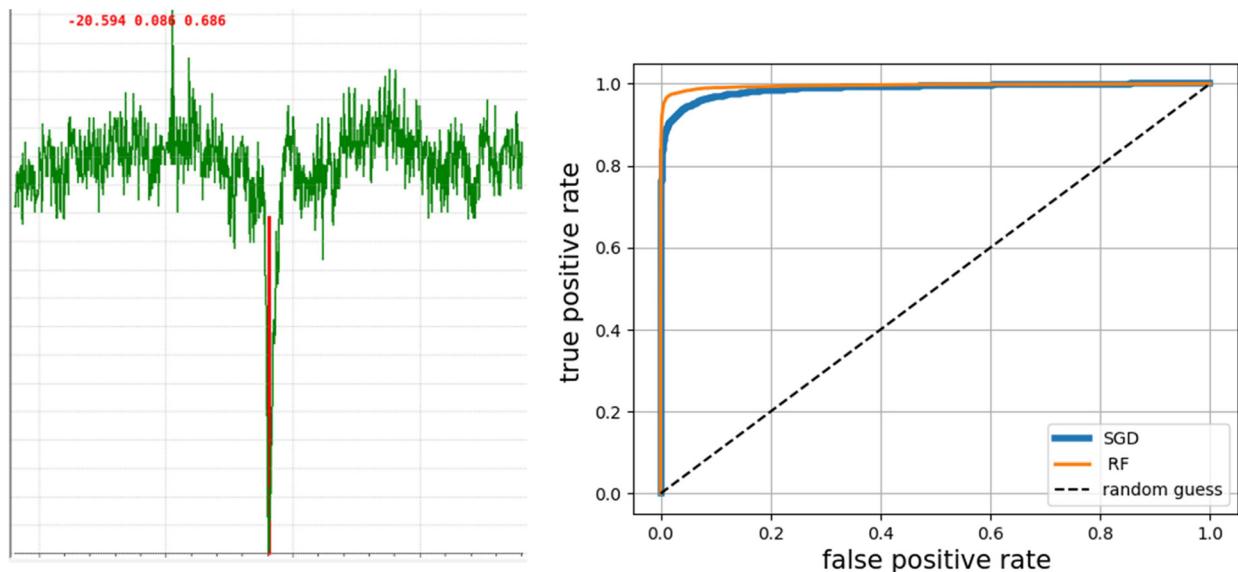


Рис. 4: Результат работы процедур для автоматизированного анализа информации, поступающей от мюонного гадоскопа. Слева: входная информация для алгоритмов машинного обучения – типичный импульс от прохождения заряженной частицы на осциллограмме выходного сигнала сцинтиляционного детектора после ее нормализации по амплитуде. Справа: оценочные функции (кривые ROC), полученные при тестировании программы поиска коротких импульсов, использующей различные алгоритмы: Stochastic Gradient Descend (SGD) и Random Forest (RF), в сравнении с аналогичной функцией для варианта со случайным выбором ответа “да/нет” (random guess).

Таким образом, на ТШВНС смонтирована и находится в состоянии отладки процедур регистрации и анализа данных новая гадоскопическая установка для исследования свойств мюонной компоненты космических лучей с суммарной чувствительной площадью ~ 25 м². Размещенная в центре ливневой установки и в основном предназначенная

для изучения аномального поведения мюонных потоков в ствалах ШАЛ, система сцинтилляционных детекторов в подземном помещении может быть также использована в качестве телескопа совпадений при исследованиях углового распределения направлений прихода космических лучей на небесной сфере [8], а также как средство эффективной селекции, образованных гамма-квантами ШАЛ с пониженным содержанием мюонов для целей гамма-астрономии сверхвысоких энергий [9].

Дальнейшее развитие многоканальной системы мюонных детекторов большой площади на ТШВНС предполагает создание в подземном помещении стенда и прототипа установки на современных газоразрядных “straw” детекторах, обладающей качественно лучшей позиционной чувствительностью порядка нескольких сантиметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. L. Shepetov, S. B. Shaulov, O. I. Likiy, et al., Astropart. Phys. **133**, 102642 (2021). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2021.102642.
- [2] А. Л. Щепетов, К. А. Аргынова, Л. И. Вильданова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(1), 28 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623010074.
- [3] S. B. Shaulov, L. I. Vil'danova, E. A. Kupriyanova, et al., Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics **48**, 125202 (2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac2e58>.
- [4] A. A. Petrukhin, Nucl. Instrum. Methods A **742**, 228 (2014). DOI: 10.1016/j.nima.2013.12.011.
- [5] H. P. Dembinski, J. C. Arteaga-Velázquez, L. Cazon, et al., EPJ Web Conf. **210**, 02004 (2019). <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201921002004>.
- [6] G. I. Britvich, S. K. Chernichenko, A. P. Chubenko, et al., Nucl. Instrum. Methods A **564**(1), 225 (2006). DOI: 10.1016/j.nima.2006.03.042.
- [7] A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **832**, 158 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.068.
- [8] А. Л. Щепетов, В. В. Жуков, В. А. Рябов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(5), 18 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600244.
- [9] В. А. Рябов, В. В. Жуков, В. В. Пискаль и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(10), 3 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624601250.

Поступила в редакцию 3 июня 2025 г.

После доработки 8 сентября 2025 г.

Принята к публикации 9 сентября 2025 г.