

## ПОДЗЕМНЫЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ИОНИЗАЦИОННО-НЕЙТРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР – ПАРМЕТР

Е. Н. Гудкова<sup>1</sup>, Р. М. Мартиросов<sup>2</sup>, Л. Н. Павлюченко<sup>1</sup>,  
В. П. Павлюченко<sup>1</sup>, А. П. Чубенко<sup>1</sup>, А. Л. Щепетов<sup>1</sup>

*Описана необходимость, перспективность и возможность создания подземного многоцелевого прибора для регистрации проникающих частиц (мюонов) высокой энергии. Использование свинца в качестве поглотителя и пластиковых сцинтилляторов с гадолинием позволяют использовать прибор одновременно в качестве ионизационно-нейтронного калориметра и парметра для регистрации ядерных и электромагнитных каскадов от проникающих частиц и отделения одних от других. Приведены результаты расчетов характеристик парметра по программе GEANT, показывающие возможность оценивать энергию мюонов в пределах от 100 ГэВ до 200 ТэВ с точностью 40% для варианта со 150 слоями (по 2 см свинца + 1 см пластика).*

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, ядерные процессы, проникающее излучение, нейтроны, мюоны, регистрация частиц, методы регистрации частиц.

Исследование мюонов (и других частиц, проникающих на большие глубины) высокой и сверхвысокой энергии вплоть до сотен ТэВ имеет принципиальное значение для астрофизики, физики высоких энергий и космических лучей. Возможно, они играют роль в объяснении природы “колена” ПКИ при энергии  $3 \times 10^{15}$  эВ, унося заметную энергию ШАЛ, что приводит к изменению коэффициента пересчета от энергии ШАЛ к первичной энергии и появлению излома в спектре ШАЛ [1]. В экспериментах МГУ в 60-е годы был обнаружен избыток ионизационных толчков на глубине 40 м [2], а в

<sup>1</sup> ФИАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: pavict@rambler.ru.

<sup>2</sup> Национальная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван.

последнее время на ТШВНС была обнаружена аномально высокая интенсивность нейтронных толчков в подземной лаборатории под слоем грунта толщиной 20 м водного эквивалента по сравнению с предполагаемой интенсивностью при их рождении от мюонов [3].

Для выяснения природы избыточной интенсивности ионизационных и нейтронных толчков, спектра мюонов в ШАЛ, оценки сечений фотоядерных процессов и других важных характеристик и предлагается использовать свинцовый многослойный ионизационно-нейтронный калориметр ИНКА, свойства которого позволяют использовать его в качестве парметра для измерения энергии мюонов вплоть до сотен ТэВ, идея которого была предложена в [4], и в дальнейшем развита в работах [5, 6].

ИНКА-ПАРМЕТР позволяет измерять энергию мюонов и адронов в индивидуальных событиях, число генерированных нейтронов в них и, тем самым, проводить выделение частиц электромагнитной и адронной природы. Принципиально важным является совмещение в одном приборе ионизационного и нейтронного калориметров и парметра. Наиболее удобным, но не обязательным, местом расположения является высокогорная станция Арагац, имеющая подземное помещение большой площади, материалы, работающую установку для регистрации ШАЛ и развитую инфраструктуру.

*Установка.* ИНКА-ПАРМЕТР представляет собой блок из двухсантиметровых сборных свинцовых пластин, прослоенных пластиковыми сцинтилляторами толщиной по 1 см. Число слоев 150, размеры блока  $3.5 \times 3 \times 4.5$  м<sup>3</sup>.

На рис. 1 (слева) приведена схема расположения ИНКА-ПАРМЕТРА в подземном помещении установки ГАММА на глубине 11 м грунта на высокогорной станции Арагац. Установка располагается на железном яреме ( $10 \times 7$  м<sup>2</sup>) электромагнита, предназначавшегося ранее для комплекса АНИ. Справа приведена схема созданного по проекту АНИ ярма с незаполненными сейчас полостями [7].

*Ионизационно-нейтронный калориметр ИНКА.* Плоские слои свинца и сцинтилляторов располагаются вертикально, формируя горизонтальный многослойный ионизационно-нейтронный калориметр ИНКА. Поперечное сечение составляет около 10 м<sup>2</sup>, а общий вес  $\sim 360$  т, из которых на свинец приходится 340 т, остальное – пластиковые сцинтилляторы и арматура. По горизонтали это 17 ядерных пробегов (535 радиационных единиц) со 150 точками регистрации. Но даже под углом  $10^\circ$  от вертикали траектория частицы захватит около 10 рядов с толщиной свинца  $\approx 300$  см. Из-за почти кубической формы получен уникальный спектрометр полного поглощения для адронных и электромагнитных каскадов. Возможна с хорошей точностью проверка на-

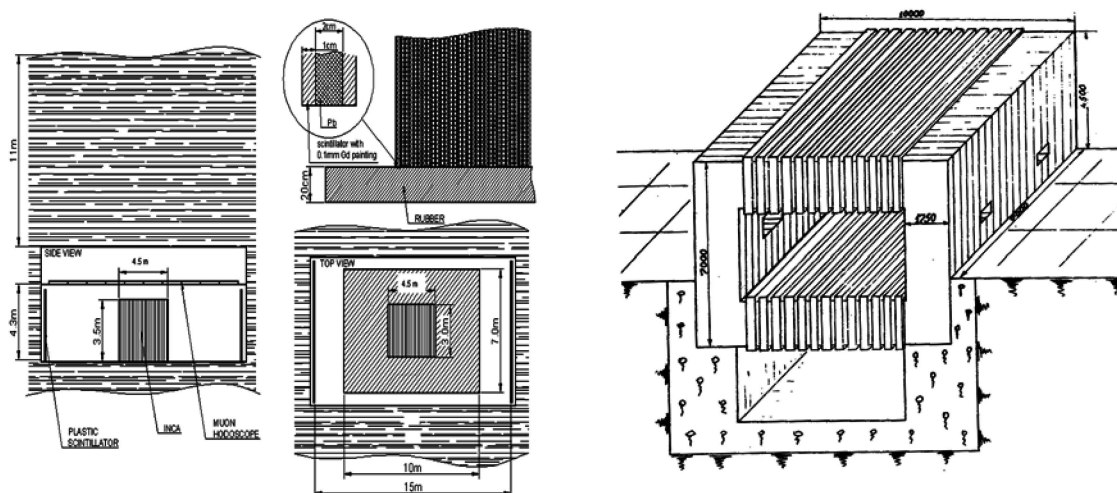


Рис. 1: Схема предлагаемого расположения ИНКА-ПАРМЕТРА (слева) на ярме электромагнита АНИ (ярмо изображено справа отдельно).

личия длиннопробежных частиц (Тянь-Шань [8], Памир [9]). Закладка в нижние пустые полости магнита (рис. 1 справа) детекторов создает дополнительные возможности для регистрации вертикальных событий. Информация со сцинтилляторов снимается с помощью оптических волокон (файберов) через ПИН-диоды с чувствительностью 20 релятивистских частиц в канале.

При развитии ядерного каскада в свинце в каждом ядерном взаимодействии рождаются испарительные нейтроны МэВных энергий, регистрация которых дает дополнительную независимую от ионизационных потерь информацию об энергии и природе первичной частицы [10, 11]. Таким образом, ИНКА оказывается более информативным и, следовательно, более универсальным измерительным прибором, чем обычный ионизационный калориметр. Нейтроны рождаются также и в фотоядерных реакциях, но там их множественность в десятки раз меньше [11].

Для повышения эффективности регистрации нейтронов производится их термализация с помощью водородосодержащего замедлителя, в нашем случае – полистирола пластических сцинтилляторов. Процесс термализации длится 10–20 мкс, поэтому нейтронный сигнал запаздывает по отношению к сигналу от каскада заряженных частиц, что позволяет измерять их отдельно одними и теми же детекторами.

Полистирол  $(C_8H_8)_n$  – углеводород с плотностью  $1.032 \text{ г/см}^3$  – эффективно замедляет нейтроны, поскольку содержит 14.3% водорода. Но прямая регистрация тепловых нейтронов этими же сцинтилляторами не оптимальна. Действительно, длина пробега

до взаимодействия в полистироле захватного (т.е. образованного при захвате теплового нейтрона) гамма-кванта с энергией 2.24 МэВ составляет 20 см, а время диффузии до захвата составляет около 100 мкс. Поэтому для эффективной регистрации нейтронов и максимального отсечения фоновых нейтронов в ИНКА необходимо, чтобы выполнялись условия минимизации времени и длины термализации и диффузии нейтрона. С этой целью в ИНКА предлагается использовать гадолиний, обладающий большим сечением захвата тепловых нейтронов (46.6 Килобарн). С точки зрения числа и суммарной энергии захватных гамма-квантов гадолиний также наиболее выгоден, в нем в среднем образуются 3–4 захватных гамма-кванта с суммарной энергией 8.5 МэВ [12].

Наиболее удобно применять в качестве поглотителя тепловых нейтронов окись гадолиния  $Gd_2O_3$  – аморфный порошок белого цвета. Благодаря громадному сечению захвата тепловых нейтронов природным гадолинием достаточно нанести на пластину сцинтиллятора или соседнего свинца слой  $Gd_2O_3$  толщиной 10–50 мкм в виде его раствора в бесцветном лаке.

*Парметр.* В настоящем проекте в качестве парметра выступает ИНКА. Полученные характеристики анализируются на основе моделирования по программе GEANT.

Для оценки вклада разных механизмов ионизационных потерь сначала проводился расчет для сплошного слоя свинца толщиной 3 м. Разыгрывалось по 1000 мюонов с энергиями  $E_\mu$  от 1 до 10 ТэВ. Учитывались процессы рассеяния и ядерного взаимодействия с веществом детектора, а также эффекты образования пар, ионизационные и тормозные потери энергии.

На рис. 2 для иллюстрации показаны распределения по числу прямых пар от мюона при различных порогах передачи им энергии от 5 до 5000 МэВ для  $E_\mu = 10$  ТэВ, а на рис. 3 – распределения для первичных мюонов с энергиями 1, 5, 10 ТэВ при пороговой энергии передачи 5 МэВ.

Из расчета, как и ожидалось, видна энергетическая зависимость числа образующихся пар от  $E_\mu$  и  $E_{th}$ . Казалось бы, чем больше пар образуется при меньших порогах, тем лучше разделяются распределения, соответствующие различным энергиям мюона. Однако возникают проблемы пространственного разрешения отдельных пиков (каскадов) от пар в одном событии и выделения их среди пиков от прочих процессов. Кроме того, фиксированный аппаратный порог регистрации приводит к разному вкладу такого порога в события с разными энергиями  $E_\mu$ .

Моделирование реальной слоистой структуры показало, что при принятой конфигурации парметра для энергий  $E_\mu$  вплоть до 200 ТэВ возможно уверенное разделение

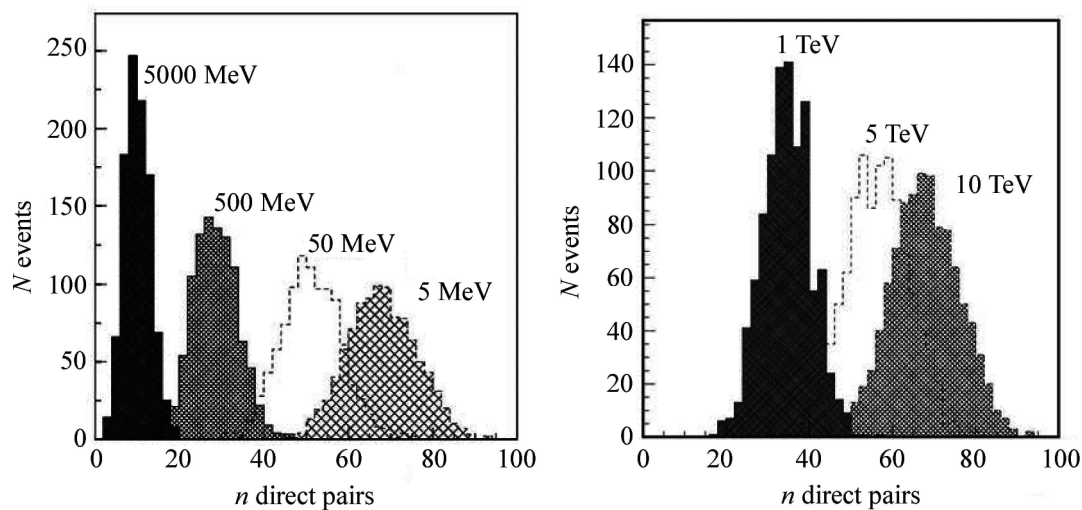


Рис. 2: Распределения по числу прямых  $e^+e^-$  пар, рожденных мюоном с энергией  $E_\mu = 10$  ТэВ при различных порогах передачи мюоном энергии паре ( $E_{th} = 5$  МэВ – 5000 МэВ).

Рис. 3: Распределения по числу прямых  $e^+e^-$  пар, рожденных мюонами с энергиями  $E_\mu = 1, 5, 10$  ТэВ при фиксированном пороге  $E_{th} = 5$  МэВ.

не более 9–10 пиков во избежание наложений. Был разработан метод искусственного повышения  $E_{th}$  при обработке событий в параметре так, чтобы при любых энергиях число пиков оставалось одинаковым, тогда  $E_{th}$  одинаково искажает картину для разных  $E_\mu$ . Для уменьшения разброса в гистограмме полных ионизационных потерь в сцинтиляторе отбрасывался пик, соответствующий максимальному энерговыделению (в 30% случаев он оказывался соответствующим тормозному процессу), а затем вычислялось суммарное оставшееся энерговыделение DE. На рис. 4 приведены гистограммы, иллюстрирующие описанный алгоритм, а на рис. 5 – зависимость среднего энерговыделения DE от  $E_\mu$ .

*Физические задачи и ожидаемая статистика.* Основными задачами установки являются:

- исследование потоков одиночных проникающих частиц в глубине грунта под разными зенитными углами;
- исследование спектров проникающих частиц в составе ШАЛ для оценки уносимой ими энергии ШАЛ;
- определение природы проникающего излучения и его связь с аномалиями, обна-

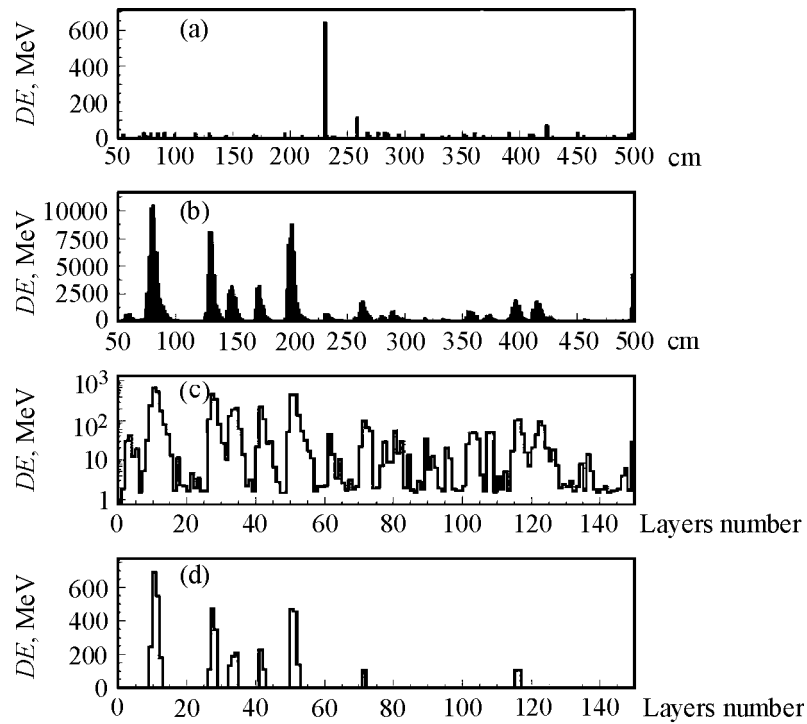


Рис. 4: Моделирование энерговыделения  $DE$  в слоистой структуре ИНКА-ПАРМЕТР для мюона энергии 10 ТэВ: (а) только от прямых  $e^+e^-$  пар без учета их каскадного размножения, (б) все процессы, (в) энерговыделение только в слоях сцинтиллятора, (г) то же распределение (в), но обработанное путем искусственного повышения порога регистрации, позволяющего оставить только заданное (здесь 7) число пиков в событии.

руженными ранее в подземных экспериментах с использованием горизонтального мюонного потока для калибровки;

- оценка сечения фотоядерных процессов в горизонтальных мюонных событиях;
- регистрация мюонов от нейтрино при использовании времяпролетной методики.

Светосила прибора составляет  $100 \text{ м}^2$  стер, что позволяет получить в течение года хорошо статистически обеспеченные результаты для мюонов с энергиями в десятки ТэВ. Предварительно оцениваемое число мюонов с  $E_\mu \geq 1 \text{ ТэВ}$  составляет около 200 в час, с энергиями  $\geq 10 \text{ ТэВ}$  – 4500 в год, а выше 100 ТэВ – около 10 в год. Число радиационных толчков от мюонов в 350 тоннах свинца на заданной глубине составит около двух в час.

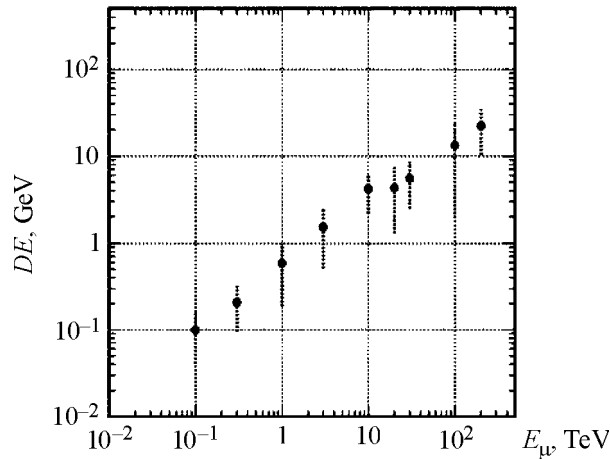


Рис. 5: Зависимость среднего энергосвечения  $DE$  в парметре от энергии мюона  $E_\mu$ .

*Заключение.* Предлагаемый проект ИНКА-ПАРМЕТР обладает большой светосилой и высокой информативностью по сравнению с вариантом раздельного использования ионизационного и нейтронного калориметров и парметра. Теория и практика применения калориметров и парметра хорошо известны и достаточно проработаны. Основной особенностью проекта является их совмещение в одном устройстве, большая толщина поглотителя и большое число регистрирующих слоев.

Подземное расположение предполагает использование ИНКА-ПАРМЕТРА, в основном, для исследования проникающего в глубину грунта излучения, его природы и характеристик. Но он может быть расположен и на поверхности. При этом все его возможности сохраняются, кроме исследования вертикального проникающего излучения, но появляется дополнительная возможность исследовать стволы ШАЛ с помощью спектрометра полного поглощения. Сочетание его с установкой ШАЛ позволяет привязывать события к первичной энергии ПКИ, что, несомненно, увеличивает информативность эксперимента.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. A. Petrukhin, Cosmic ray spectrum above  $10^{15}$  eV (a new approach). *29<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Pune, 2005* (Pune University, 2005), **3**, 137.
- [2] С. Н Вернов, В. А Дмитриев, Г. Б. Христиансен и др., *ЖЭТФ* **44**, 405 (1963).

- [3] А. П. Чубенко, Ф. Л. Щепетов, Л. И. Вильданова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **34**(4), 21 (2007).
- [4] И. С. Алексеев, Г. Т. Зацепин,  $\mu$ -Мезоны высокой энергии. *Труды международной конференции по космическим лучам*, Москва, 1960 (М., Наука, 1960), **1**, с. 326.
- [5] Р. П. Кокоулин, А. А. Петрухин, ЭЧАЯ **21**(3), 774 (1990).
- [6] Р. П. Кокоулин, Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук (М., МИФИ, 2000).
- [7] Т. Л. Асатиани, В. А. Иванов, Э. Ф. Мнацаканян, Вопросы атомной науки и техники, № 2(8), 77 (1981).
- [8] V. I. Yakovlev, *Proc. of Int. Sem. on Cosmic Ray Cascades. Sofia, Oct.* (БАН, София, 1980), p. 111.
- [9] PAMIR Collaboration. Bull. Soc. Scien. Lett. Lodz. **13**, 133 (1992).
- [10] L. V. Bezrukov, V. I. Beresnev, G. T. Zatsepin, et al., Sov. J. Nucl. Phys. **17**, 98 (1973).
- [11] K. V. Alexandrov, M. Ambrosio, V. V. Ammosov, et al., Nucl. Instr. Meth. A **459**, 135 (2001).
- [12] К. В. Александров, Г. Т. Зацепин, Е. П. Кузнецов и др., ДАН **363**(5), 610 (1998).

Поступила в редакцию 22 апреля 2011 г.