

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Куджаева Александра Уружбековича «Методы исследования проникающей компоненты ШАЛ на установке “Ковёр-2” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
(специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики)

К проникающей компоненте космических лучей традиционно относятся частицы, регистрируемые детекторами, расположенными под толстым ( $>150-300$  г/см<sup>2</sup>) слоем вещества. В основном это мюоны и адроны высоких энергий. Эти частицы рождаются в атмосфере Земли в процессе развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) от первичных космических лучей очень высоких энергий. Важные результаты по исследованию мюонов с высокой пороговой энергией получены на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе ИЯИ РАН. В настоящее время в составе установки “Ковёр-2”, входящей в Баксанскую нейтринную обсерваторию ИЯИ РАН, при непосредственном участии диссертанта создан мюонный детектор (МД) большой площади (175 м<sup>2</sup>). Представленная в диссертации уникальная методика разделения событий от мюонов и событий от адронов в МД даёт возможность изучать мюонную и адронную компоненты вместе с электронной компонентой ШАЛ.

Диссертация А.А. Куджаева состоит из введения, 4-х глав и заключения.

Во введении кратко описаны существующие в настоящее время подходы к исследованию мюонной и адронной компонент ШАЛ, подробно представлены основные результаты, выносимые на защиту, показано, в чём заключается научная новизна и практическая значимость диссертации.

Первая глава посвящена обзору наиболее значимых результатов по исследованию мюонной и адронной компонент ШАЛ от первичных космических лучей (ПКЛ) с энергией в диапазоне, включающем в себя область излома энергетического спектра ПКЛ ( $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ). Обзор разделяется на две части - первая посвящена мюонной компоненте ШАЛ, вторая адронной компоненте. Обзор включает в себя как ранние результаты, начиная с 60-х годов 19 столетия, так и за  $\sim 10$  последних лет. Приводятся данные установок, расположенных на уровне моря и на высоте гор. Так для мюонной компоненты с пороговой энергией  $\sim 1$  ГэВ представлены результаты измерения функции пространственного распределения (ФПР) мюонов для уровня гор и уровня моря. Отмечено, что для уровня моря экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются между собой, в то время как для уровня гор наблюдается существенный разброс экспериментальных данных, особенно на малых (15-20 м) расстояниях. Автор диссертации связывает это расхождение с большим

влиянием ядерно-активной компоненты на больших высотах. Приводится сравнение экспериментальных данных по пространственному распределению мюонов с результатами теоретических расчётов в диапазоне энергий ПКЛ до и после излома в энергетическом спектре. Приводятся данные по зависимости числа мюонов от числа электронов в ШАЛ. Для адронной компоненты кратко описывается процесс адронных взаимодействий и приводятся экспериментальные результаты пространственного распределения адронов в ШАЛ и спектров по числу адронов для разных уровней наблюдения. Приводится сравнение с теоретическими расчётами.

Во второй главе представлено описание комплексной установки “Ковёр-2”. Кратко описан стандартный жидкостный сцинтилляционный детектор на основе Уайт-спирита со сцинтиллирующей добавкой. Из большого числа таких детекторов состоит центральная и периферийная части установки “Ковёр”. Далее описан пластический сцинтилляционный детектор площадью  $1 \text{ м}^2$  который предназначен для использования в мюонном детекторе. Автором приводится амплитудный спектр одиночных мюонов, который показывает хорошее разрешение детектора. При наиболее вероятном энерговыделении от одной релятивистской частицы –  $10 \text{ МэВ}$  и диапазоне  $6 - 2000 \text{ МэВ}$  максимальное регистрируемое число релятивистских частиц в одном детекторе составляет 200. Далее автором описывается проект мюонного детектора большой площади, в котором используется жидкостный сцинтиллятор большой ( $\sim 3 \times 200 \text{ м}^2$ ) площади, в разработке которого и реализации в виде прототипа автор принимал самое непосредственное участие. Этот проект привлекал сравнительной простотой реализации и значительным выигрышем в стоимости, по сравнению со стандартными подходами. Автором проведён огромный объём работы по наладке электроники, по эксплуатации и анализу работы прототипа большого мюонного детектора. Эта работа проводилась в течение двух лет, и были получены весьма обнадеживающие результаты. Вместе с тем было обнаружено, что в результате длительного (более двух лет) взаимодействия жидкого сцинтиллятора с пластиковой упаковкой возникли эффекты, не позволяющие проводить дальнейшую эксплуатацию, в частности, уменьшение прозрачности сцинтиллятора и появление течи в пластиковых пакетах. В результате вышесказанного было принято решение использовать для создания мюонного детектора пластические сцинтилляторы, упомянутые выше. На мой взгляд, излишне подробным является описание проекта и результатов работы прототипа нереализованного мюонного детектора очень большой площади на жидком сцинтилляторе. При самом непосредственном участии автора проводилась модернизация установки “Ковёр” и создании мюонного детектора (МД) большой площади ( $175 \text{ м}^2$ ) с использованием пластических сцинтилляторов. Завершается описание установки “Ковёр-2” функциональной схемой комплексной установки, в которую помимо “Ковра” вместе с периферийными пунктами входит мюонный детектор. В качестве

замечания я бы указал, что функциональная схема мюонного детектора приведённая на рисунке 29, несколько отличается от той, которая приведена на рисунке 33.

В третьей главе описана методика разделения событий от мюонов и событий от адронов в МД. Методика базируется на том, что адронные каскады, возникшие в поглотителе ( $500 \text{ г/см}^2$ ) не успевают поглотиться и дают дополнительное энерговыделение в отдельных мюонных детекторах. Автором приводится достаточно яркий пример зарегистрированного ШАЛ с адронным событием в МД. При описании этого события автором, на мой взгляд, допущена неточность, когда он говорит, что данные мюонных детекторов приведены в логарифмическом масштабе. Судя по формуле, которую автор использует для вычисления плотности в месте регистрации каскада от адрона, данные МД приведены в релятивистских частицах. Кроме того, хотелось бы отметить, что не очень правомерно само значения средней плотности на квадратный метр в месте регистрации каскада от адрона, поскольку размер этого каскада достаточно мал, и имеет смысл говорить о числе частиц, зарегистрированных отдельными детекторами. Далее приводится обоснование методики выделения адронных событий. Для этого при непосредственном участии автора проведены расчёты для разных зенитных углов и разных энергий адронов. По измерению барометрического коэффициента и пробега для поглощения для событий с разным энерговыделением, выраженном в числе зарегистрированных частиц, и сопоставлении с расчётными данными надёжно установлены 3 области энерговыделений в индивидуальном детекторе для вертикальных ливней: ( $< 1.3 \text{ р.ч.}$ ; ( $1.3-5 \text{ р.ч.}$ ;  $> 5 \text{ р.ч.}$ ). В первой области преобладают мюоны, во второй присутствуют и мюонные и адронные события и в третьей области – в основном, адронные события. Кроме того, автором с использованием экспериментальных данных проведена оценка средней глубины рождения ливневых мюонов.

В четвёртой главе представлены результаты исследования характеристик мюонной ( $E_\mu \geq 1 \text{ ГэВ}$ ) и адронной ( $E_n \geq 25 \text{ ГэВ}$ ) компонент, полученные на установке “Ковёр-2” с использованием методики разделения компонент, предложенной в диссертации. Представлены результаты по пространственному распределению мюонной и адронной компонент, сравнение с результатами проведённых расчётов (CORSIKA(QGSJET01+GHEISHA)) и с данными других установок. Получено хорошее согласие. В качестве небольшого замечания скажу, что неплохо было бы привести аналитический вид этих ФПР, тем более, что для вычисления полного числа мюонов и полного числа адронов в ШАЛ необходимо задавать априорные ФПР. Полученные зависимости полного числа мюонов и полного числа адронов в ШАЛ от полного числа электронов согласуются с данными расчётов и экспериментальными данными других установок. Автором получены дифференциальные распределения (спектры ШАЛ) по числу мюонов и числу электронов, которые по наклону согласуются с мировыми данными. Немного снижает значимость этих результатов тот факт, что распределения

приводятся в относительных единицах. На рисунке 52 автором представлено, на мой взгляд, уникальное событие с очень большим числом зарегистрированных в МД адронов. Было бы целесообразно попытаться объяснить приведённые на рисунке данные детекторов “Ковра”.

В заключении, на мой взгляд, излишне подробно, сформулированы основные результаты диссертации. Указывается, что эти результаты согласуются с проделанными с непосредственным участием автора теоретическими расчётами и с экспериментальными данными других установок. Это открывает возможность применения разработанной методики при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий на установках, которые измеряют мюонную компоненту ШАЛ.

Личный вклад автора не вызывает сомнений.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Приведенные выше замечания не снижают общего впечатления о работе в целом, как хорошо сделанной, законченной работе, в которой автор продемонстрировал свою высокую квалификацию современного физика-экспериментатора и получил ряд интересных результатов.

Работа прошла достаточную апробацию. Результаты работы докладывались на представительных научных конференциях и симпозиумах, опубликованы в целом ряде цитируемых научных изданий. Использование результатов и дальнейшие исследования целесообразно проводить в МИФИ, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ИТЭФ и др. Полученные результаты представляют интерес для широко известных зарубежных установок CASA, AKENO, JANZOS, KFG, EAS-TOP, Ooty.

Работа соответствует требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Куджаев Александр Уружбекович заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент Сулаков Владимир Петрович, тел. 8-495-939-44-96, [sulakov2007@rambler.ru](mailto:sulakov2007@rambler.ru). Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2,

старший научный сотрудник,  
кандидат физ.-мат. наук  
08 сентября 2014г., г.Москва

В.П. Сулаков

Подпись В.П. Сулакова удостоверяю.  
Директор НИИЯФ МГУ,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

М.И. Панасюк

Сулаков Владимир Петрович

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Отдел частиц  
сверхвысоких энергий, старший научный сотрудник. Кандидат физико-математических  
наук ( Физика высоких энергий, 01.04.23, 1999 г.)

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных  
изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Estimate of the fraction of primary photons in the cosmic ray flux at energies about  $10^{17}$  ev from the eas-msu experiment data / Y. A. Fomin, N. Kalmykov, G. Kulikov et al. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2013. — Vol. 144, no. 6. — P. 1–12. [ DOI 10.7868/s0044451013120043 ]
2. Estimating the fraction of gamma quanta in the primary cosmic ray flux with energies of  $\sim 10^{17}$  ev from the msueas array data / N. Kalmykov, G. Kulikov, V. Sulakov, Y. A. Fomin // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics (ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ)*. — 2013. — Vol. 77, no. 5. — P. 629–631. [ DOI 10.3103/S1062873813050250 ]
3. Evaluation of the gamma-quanta fraction in the primary cosmic ray flux with energy about  $10^{17}$  ev according to the easmsu array data / Y. Fomin, N. Kalmykov, G. Kulikov, V. Sulakov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2013. — Vol. 409, no. 1. — P. 012077. [ DOI 10.1088/1742-6596/409/1/012077 ]
4. Оценка доли фотонов в потоке первичных космических лучей при энергиях около  $10^{17}$  эВ по данным установки ШАЛ МГУ / Н. Калмыков, Г. Куликов, В. Сулаков, Ю. Фомин // *Известия РАН. Серия физическая*. — 2013. — Т. 77, № 5. — С. 695–697. [ DOI 10.7868/S0367676513050256 ]
5. The extensive air shower muon number spectrum beyond the knee in the cosmic-ray energy spectrum / N. Kalmykov, G. Kulikov, V. Sulakov, Y. A. Fomin // *MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN*. — 2011. — Vol. 66, no. 1. — P. 92–95. [ DOI 10.3103./S0027134911010127 ]
6. Спектр широких атмосферных ливней по числу мюонов в области за изломом в энергетическом спектре космических лучей / Н. Калмыков, Г. Куликов, В. Сулаков, Ю. Фомин // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия*. — 2011. — № 1. — С. 84–87.
7. Spectrum and composition of cosmic rays at energies of 10(15)-10(18) ev / Kalmykov N.N., Kuzmichev L.A., Kulikov G.V., Prosin V.V., Sulakov V.P., Fomin Yu A. // *MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN*. — 2010. — Vol. 65, no. 4. — P. 275–282.
8. Спектр и состав космических лучей при энергиях  $10^{15}$  –  $10^{18}$  эВ / Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Куликов Г.В., Просин В.В., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия*. — 2010. — № 4. — С. 40–46.