

УТВЕРЖДАЮ:
Вр.и.о. директора ИКФИА СО РАН
д.ф.-м.н.

С.А. Стародубцев

“14” июля 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию **Карпикова Ивана Сергеевича** «Моделирование и анализ данных мюонного детектора эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ-МГУ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

В диссертации И.С. Карпикова проводится новый анализ экспериментальных данных, полученных ранее на установке ШАЛ-МГУ, с использованием современных методов и моделей развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) от частиц космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий (СВЭ). Им была построена полная модель установки с использованием метода Монте-Карло, в которой разыгрывался отклик каждого детектора. С использованием этой модели И.С. Карпиков получил уточненные оценки массового состава космических лучей в области энергий $3 \cdot 10^{16}$ - $6 \cdot 10^{17}$ эВ, а также ограничения сверху на потоки диффузионного гамма-излучения выше 10^{16} эВ.

Актуальность работы обусловлена тем, что проблема происхождения КЛ СВЭ является одной из наиболее важных и сложных задач современной астрофизики космических лучей. Согласно современным представлениям в области 10^{16} – 10^{18} эВ происходит переход от галактической компоненты КЛ к внегалактической, при этом меняется массовый состав КЛ. В области энергий, которая исследуется в работе И.С. Карпикова, мало экспериментальных данных, так как на малых установках ШАЛ небольшая статистика, а большие установки имеют порог выше 10^{17} эВ. Разработка новых методов анализа ранее полученных данных позволяет значительно уточнить старые результаты и извлечь дополнительные оценки о свойствах КЛ без проведения новых экспериментов.

Оценки потока или его верхнего предела гамма-квантов сверхвысоких энергий могут помочь в выборе теорий, объясняющих происхождение космических лучей. Такие фотоны должны рождаться в фотоядерных реакциях протонов на реликтовом излучении. Кроме того, они могут образовываться от распада гипотетических частиц темной материи или в

других процессах различных теорий с «новой физикой». Сравнения предсказаний таких теорий с экспериментальной оценкой потока гамма-квантов позволяет отсеять те, которые не согласуются с экспериментом.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, одного приложения и библиографии.

Во введении дается краткое описание методов исследования космических лучей сверхвысоких энергий, а также формулируется цель работы, обосновывается актуальность темы, кратко изложены основные результаты, новизна, практическая и научная ценность диссертации.

В первой главе приводится описание установки ШАЛ-МГУ, процедуры отбора и обработки событий. В разделе 1.3 описана процедура полного моделирования эксперимента методом Монте-Карло. Далее проводится сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования. По искусственным ливням была получена связь между параметром N_E , который определяется, как и в эксперименте по процедуре реконструкции параметров ШАЛ, и энергией первичной частицы. Были определены такие соотношения отдельно для протонов и ядер железа, а также получена усредненная формула для наиболее вероятного массового состава, вытекающего из анализа экспериментальных данных ШАЛ-МГУ. Оценки массового состава в этой главе были получены из сравнения распределения возраста экспериментальных ливней с аналогичными данными по искусственным ливням.

Во второй главе проводится анализ данных мюонного детектора установки ШАЛ-МГУ, с целью исследования различных адронных моделей развития ШАЛ. Здесь автор описывает мюонный детектор ШАЛ-МГУ и подробно методику анализа его данных для сравнения доли мюонов в эксперименте с предсказаниями адронных моделей. Ранее в нескольких экспериментах (Якутск, РАО и др.) был обнаружен избыток мюонов в ШАЛ по сравнению с расчетными модельными данными. Из анализа мюонных данных ШАЛ-МГУ было получено, что экспериментальные данные мюонного детектора хорошо согласуются с предсказаниями модели QGSJET-II-04, а избыток мюонов не наблюдается для всех рассмотренных адронных моделей (EPOS, SIBYLL, QGSJET-01, QGSJET-II-04).

В третьей главе приводятся результаты оценки потока фотонов сверхвысоких энергий. Для этих целей используются события, в которых мюонный детектор не сработал («безмюонные ливни»). Были получены ограничения сверху на интегральный поток гамма-излучения для нескольких значений энергий в диапазоне от $2 \cdot 10^{16}$ эВ до $2 \cdot 10^{17}$ эВ.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

Содержание диссертации отражает научные результаты и положения, выносимые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в работу. В целом, диссертация И.С. Карпикова представляет собой законченное исследование актуальной задачи. Работа выполнена на высоком уровне, поставленные задачи успешно решены.

Научная новизна и практическая ценность. И.С. Карпиков впервые провел полное моделирование работы установки ШАЛ-МГУ с использованием метода Монте-Карло и современных адронных моделей развития ШАЛ в атмосфере. Это позволило получить новые оценки массового состава космических лучей в области энергий $3 \cdot 10^{16}$ - $6 \cdot 10^{17}$ эВ двумя независимыми методами – из распределения событий по возрасту ливней и по доле мюонов в ШАЛ. Разработанная методика полного моделирования работы установки ШАЛ может использоваться при анализе данных в других экспериментах.

В работе проведено исследование мюонных данных, с использованием разных моделей, для выявления возможного избытка мюонов по сравнению с модельными предсказаниями. Такой избыток был обнаружен в других экспериментах. Это исследование может помочь уточнить модель адронных взаимодействий, предсказания которой будут лучше описывать экспериментальные данные для разных энергий ШАЛ и энергетических порогов для мюонов.

Оценки верхнего предела потока фотонов сверхвысоких энергий были получены в интервале энергий, в котором мало мировых данных, а для энергии $\sim 10^{17}$ эВ являются наиболее строгими в мире. Эти результаты имеют важное значение для решения проблемы происхождения космических лучей, а также дают определенные ограничения на гипотетические модели "новой физики".

Обоснованность и достоверность выводов и заключений. Достоверность основных выводов диссертации обеспечена использованием современных моделей развития ШАЛ, проведением полного моделирования методом Монте-Карло без использования процедуры "прореживания", ускоряющей расчеты. Отбор событий и восстановление параметров искусственных ливней проводились по той же методике, что и для реальных ШАЛ. В работе подробно рассмотрена и доказана обоснованность применения модели установки ШАЛ-МГУ.

Диссертация свободна от существенных недостатков, однако можно сделать следующие замечания:

- Не отмечено из каких соображений выбрано распределение по энергии E искусственных ливней при моделировании ни в главе 1 (стр. 23), ни в главе 3 (стр. 77). Действительно ли закон E^{-1} соответствует дифференциальному распределению, или это опечатка, а имеется в виду интегральное распределение?

- Нет пояснений из каких соображений событий от протонов в главе 1 (Таблица 1.1) разыграно в 4 раза больше, чем от ядер железа, хотя экспериментальные данные в самой же работе указывают на приблизительно равное соотношение. Непонятна процедура отбора искусственных ливней из рассчитанного набора при розыгрыше координат оси для моделирования работы установки, ведь в этой процедуре используется другой более крутой энергетический спектр событий.
- На рисунке 1.13 довольно много экспериментальных ливней с большим значением возраста, т.е. с высоким максимум развития ШАЛ. В целом по всей статистике их немного, но в области самых больших энергий их количество сравнимо с количеством искусственных ливней. В работе предполагается, что такие события возникают из-за плохой работы отдельных детекторов. Но это предположение можно было промоделировать и оценить требуемую степень «испорченности» экспериментальных данных, чтобы получить ливни с такими параметрами.
- Из рисунка 2.6 видно, что при больших энергиях много ливней с большим содержанием мюонов, а данных по искусственным ливням, особенно для ядер железа, недостаточно для более детального анализа. Можно было более подробно изучить область больших ливней с числом частиц больше 10^8 , проверив также корреляцию значения возраста ШАЛ (рис. 1.13) и доли мюонов. Данное замечание нужно рассматривать как пожелание для дальнейшей работы.
- Изложение работы достаточно ясное и последовательное, сама диссертация в целом хорошо оформлена и иллюстрирована, но погрешности и опечатки присутствуют. Например, раздел «Литература» не попал в оглавление. На странице 16 временное окно сцинтилляционного триггер указано равны 5 мс, вероятно имелось ввиду 5 мкс.
- На странице 26 дано объяснение, что накопление частиц в сцинтилляционном счетчике происходит в пределах 1 мкс за счет времени высвечивания сцинтиллятора. Но время высвечивания пластиковых сцинтилляторов на 2 порядка меньше, а такое накопление может происходить за счет интегрирующей цепочки на входе амплитудно-цифрового преобразователя.
- 3-я публикация в списке основных публикаций автора в автореферате является препринтом, который не входит список ВАК, поэтому было бы желательно указать в какой журнал была направлена данная работа.

Сделанные замечания существенно не влияют на научную и практическую ценность достигнутых автором результатов и не меняют общей высокой оценки работы.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в международных журналах, входящих в перечень ВАК, а также были доложены на нескольких всероссийских и международных конференциях.

Диссертация И.С. Карпикова «Моделирование и анализ данных мюонного детектора эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ-МГУ» полностью удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам Иван Сергеевич Карпиков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета ФГБУН «Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук» 07 июля 2017 года. протокол №_10_

Отзыв составил ведущий научный сотрудник ИКФИА СО РАН
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

М.И. Правдин

677980, г.Якутск, пр. Ленина, 31
Телефон: +7(4112) 390-456; e-mail: pravdin@ikfia.ysn.ru

Председатель Ученого совета ИКФИА СО РАН
д.ф.-м.н.

С.А. Стародубцев

Ученый Секретарь ИКФИА СО РАН
к.ф.-м.н.

Е.Д. Бондарь

Почтовый адрес:
677980, г. Якутск, пр. Ленина, д.31, ИКФИА СО РАН
Телефон: +7(4112)390-400
Факс 7 (4112) 390-450
e-mail: ikfia@ysn.ru

- 1. Radio signals from extensive air showers with the energies $E_0 \geq 10^{19}$ eV according to data from the Yakutsk extensive air shower array**
S. P. Knurenko and I. S. Petrov.
JETP Lett. 104, no. 5, 297 (2016), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 104, no. 5, 306 (2016)].
DOI:10.1134/S0021364016170100
- 2. Temporal signatures of the Cherenkov light induced by extensive air showers of cosmic rays detected with the Yakutsk array**
A. A. Ivanov and L. V. Timofeev.
arXiv:1604.05088 [astro-ph.IM] Int. J. Mod. Phys. D 25, no. 10, 1650090 (2016)
DOI:10.1142/S0218271816500905
- 3. Testing for uniformity of Ultra-High Energy Cosmic Ray arrival directions**
A. A. Ivanov.
arXiv:1602.08814 [astro-ph.HE] Int. J. Mod. Phys. D 25, no. 06, 1650065 (2016)
DOI:10.1142/S0218271816500656
- 4. A minimal width of the arrival direction distribution of ultra-high-energy cosmic rays detected with the Yakutsk array**
A. A. Ivanov.
arXiv:1502.07496 [astro-ph.HE] Astrophys. J. 804, no. 2, 122 (2015) DOI:10.1088/0004-637X/804/2/122
- 5. Composition of cosmic rays at ultra high energies**
E. G. Berezhko, S. P. Knurenko and L. T. Ksenofontov.
Astropart. Phys. 36, 31 (2012). DOI:10.1016/j.astropartphys.2012.04.014
- 6. Determination of the cascade-curve maximum depth from the muon component on the Yakutsk EAS array**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
J. Exp. Theor. Phys. 119, no. 5, 848 (2014). DOI:10.1134/S1063776114110065
- 7. Mass composition of cosmic rays with energies $E_0 \geq 10^{17}$ eV according to the data from the ground-based detectors of the Yakutsk EAS array**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
arXiv:1411.5088 [astro-ph.HE] JETP Lett. 100, no. 11, 695 (2015), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 100, no. 11, 793 (2014)] DOI:10.1134/S0021364014230052
- 8. Revision of the energy calibration of the Yakutsk extensive air shower array**
A. V. Glushkov, M. I. Pravdin and A. Saburov. arXiv:1408.6302 [astro-ph.HE]
Phys. Rev. D 90, no. 1, 012005 (2014) DOI:10.1103/PhysRevD.90.012005

- 9. Large-scale distribution of cosmic rays in right ascension as observed by the Yakutsk array at energies above 10¹⁸ eV**
A. A. Ivanov, A. D. Krasilnikov, M. I. Pravdin and A. V. Sabourov.
arXiv:1407.1583 [astro-ph.HE] Astropart. Phys. 62, 1 (2015)
DOI:10.1016/j.astropartphys.2014.07.002
- 10. Reestimation of the energy of extensive air showers at the Yakutsk EAS array with the CORSIKA package**
A. V. Glushkov, M. I. Pravdin and A. V. Saburov.
JETP Lett. 99, 431 (2014).DOI:10.1134/S0021364014080086
- 11. Wide field of view Cherenkov telescope to detect cosmic rays in coincidence with surface detectors of the extensive air shower array**
A. A. Ivanov et al.
arXiv:1404.6595 [astro-ph.IM] Nucl. Instrum. Meth. A 772, 34 (2015)
DOI:10.1016/j.nima.2014.10.029
- 12. Mass content of ultrahigh-energy cosmic rays within different time periods**
A. V. Glushkov.
Phys. Atom. Nucl. 77, 330 (2014), [Yad. Fiz. 77, 354 (2014)].
DOI:10.1134/S1063778814020069
- 13. Variable composition of cosmic rays with $E \geq 10^{17}$ eV according to the data from the muon detectors of the Yakutsk EAS array**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
JETP Lett. 98, 589 (2014), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 98, 661 (2013)].
DOI:10.1134/S0021364013230057
- 14. Estimate of the mass composition of cosmic rays with $E \leq 10^{18}$ eV according to the data from a new muon detector at the Yakutsk EAS array**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
JETP Lett. 97, 444 (2013), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 97, 514 (2013)].
DOI:10.1134/S0021364013080080
- 15. A method to search for correlations of ultra-high energy cosmic ray masses with the large scale structures in the local galaxy density field**
A. A. Ivanov.
arXiv:1212.0600 [astro-ph.IM] Astrophys. J. 763, 112 (2013), [EPJ Web Conf. 53, 04010 (2013)]
DOI:10.1051/epjconf/20135304010, 10.1088/0004-637X/763/2/112