

ОТЗЫВ

официального оппонента Кузьмичева Леонида Александровича на диссертацию
Романенко Виктора Сергеевича на тему
«ПОИСК ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА–ИЗЛУЧЕНИЯ
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА УСТАНОВКЕ КОВЕР–3»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико- математических наук по специальности
01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

За последнее десятилетие были достигнуты впечатляющие успехи в исследованиях высокоэнергетического гамма-излучения с использованием атмосферных черенковских телескопов (H.E.S.S., MAGIC и VERITAS). Эти телескопы предназначены для исследования диапазона энергий от 50 ГэВ до 50 ТэВ. Исследование области более высоких энергий на этих телескопах затруднено как из-за ограниченного времени наблюдения гамма-источников, так и из-за сравнительно небольшой площади этих телескопных комплексов.

За последние три года прорыв в диапазон энергий гамма-излучения выше 100 ТэВ был совершен высокогорными установками Tibet AS γ , HAWC и LHAASO. Главная причина успеха этих установок – возможность одновременного наблюдения большого числа гамма-источников в течении длительного времени (более 1000 часов в год) и высокой эффективности подавления фоновых событий от космических лучей. К такому классу установок в результате существенной модернизации приближается установка Ковер в составе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Исследование диапазона гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ позволит продвинуться в понимании происхождения галактических космических лучей. Представляет интерес исследование высокоэнергетического спектра гамма-квантов от внегалактических источников и также для поиска новой физики (аксионы, нарушение Лоренц инвариантности).

Диссертация В.С. Романенко посвящена как расширению установки (создание новой системы сбора, разработки программного обеспечения и проведение пуско-наладочных работ), так и обработке и анализу полученных результатов. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы.

Введение начинается с обсуждения актуальности диссертации, которая с моей точки зрения, является бесспорной, учитывая сказанное выше о высокогорных установках. Далее во введении формулируется научная и практическая значимость.

Первая глава посвящена историческому обзору по гамма–астрономии сверхвысоких энергий. Первый параграф посвящен истории открытию комических

лучей – от Кулона, который первым обратил внимание на самопроизвольный разряд электроскопа, до опытов Гесса. Параграф очень информативен и интересен. Следующие параграфы главы посвящены открытию широких атмосферных ливней и характеристикам ШАЛ и, в частности, тем характеристикам, которые позволяют отличить ШАЛ от гамма-квантов от ШАЛ от заряженных космических лучей. Далее в главе (параграф 1.2) проводится обзор ранних экспериментов и результатов в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий. К сожалению, в этих экспериментах были получены только верхние пределы на потоки гамма-квантов от источников. Особняком стоит вспышка в Крабовидной туманности, которая наблюдалась 3 установками (Ковер, EAS-TOP и KGF) в феврале 1989 года. Этот результат о вспышке в области сверхвысоких энергий в Крабе не запрещен теоретическими моделями, но, к сожалению, и нет предсказания, как часто такие вспышки могли бы случаться. Новое наблюдение такой вспышки дало бы много важной информации о процессах генерации гамма-квантов в таких объектах как Крабовидная туманность. Главу завершает обзор современного состояния гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Вся глава написана достаточно хорошо, но мне кажется, следовало бы включить в главу раздел про атмосферные черенковские телескопы, с помощью которых до сих пор получены основные результаты в области гамма-астрономии. В качестве методики выделения ШАЛ от гамма-квантов автор приводит методику, основанную на числе мюонов, и не упоминает методику, основанную на пространственном распределении электронов, используемую в эксперименте HAWC.

Вторая глава диссертации посвящена описанию установки Ковер-2. Описание выполнено на хорошем профессиональном уровне и дает полное представление об установке. Мне кажется, только логичнее перенести описание основных характеристик установки (эффективность регистрации, угловое разрешение и т.д) и методов восстановления параметров ШАЛ из 3 главы в эту.

В третьей главе «Поиск гамма—излучения сверхвысоких энергий» приводятся основные результаты по поиску гамма-квантов сверхвысоких энергий, полученные по данным установки Ковер-2, подробно описанной в прошлой главе. Режимы работы установки разбиваются на 2 этапа – до 2018 года и после. На первом этапе мюонный детектор и ливневая установка работали практически независимо и информация о числе мюонов в мюонном детекторе фиксировалась, как только по крайней мере один мюон пересекал детектор. В этом режиме вероятность регистрации ливней от гамма-квантов даже при энергии 1 ПэВ меньше 20%. После 2018 года информация о числе мюонов фиксировалась по внешнему сигналу МАСТЕР от ливневой установки и стало известным, в каких ШАЛ не было мюонов. Такой режим сильно понизил энергетический порог для регистрации событий от гамма-квантов - вероятность регистрации выше 0.3 для энергии выше 300 ТэВ (рис.3.2). В главе обсуждаются критерии отбора фотоноподобных событий (параграф 3.1.2), при этом для выделения

событий требуется, чтобы ось ШАЛ была внутри центрального детектора. Не совсем понятно, почему введено это ограничение, т.к это ограничивает площадь установки до 200 м². Для выделения фотоноподобных событий устанавливается граница на отношение числа мюонов в событии (увеличенная на 0.1, чтобы избавиться от нуля) к числу электронов (рис.3.3). При выбранном условии вероятности отобрать событие от фотона равна 50%. Мне кажется, было бы полезно указать, какая доля в отобранных по этому критерию событий будет от обычных ШАЛ, учитывая, что число ШАЛ от космических лучей в 10⁴-10⁵ больше, чем число ШАЛ от гамма-квантов. В частности, какая доля событий на рис. 3.3, попадающая в голубую область (область фотоноподобных событий), является событиями от космических лучей? Остановимся на угловом разрешении установки. По результатам М-К моделирования угловое разрешение установки равно 3° (90% событий) для фотонов с энергией выше 1 ПэВ (стр. 80). Такое угловое разрешение было использовано для поиска совпадений по углам с нейтринными событиями IceCube по данным до 2011 года. По данным 2010-2018 при поиске корреляций с событиями IceCube и гамма-квантами высоких энергий, зарегистрированных установкой HAWC, использовалось угловое разрешение 6.15 градусов (для 90% событий) (стр.87). Почему было изменено угловое разрешение не объясняется. Наконец, при наблюдении событий из области Кокона угловое разрешение было принято равным 4.7 градусов (для 86% событий). Это угловое разрешение получено при совместной работе установки Ковер -2 и атмосферного черенковского телескопа (стр. 90). К сожалению, как получено это значение углового разрешения и какой атмосферный черенковский телескоп использовался в диссертации не описано.

Перейдем к анализу полученных результатов.

В параграфе 3.2 приведены результаты поиска совпадений фотонов сверхвысоких энергий с оповещениями от нейтринного телескопа IceCube и высокогорной установки HAWC. Астрофизических источников, ассоциированных с большинством нейтринных событий IceCube, не найдено и в силу этого весьма важно проведение поиска гамма-квантов высокой энергии, скоррелированных по времени и по углу с этими событиями. За период до 2011 года было выделено 34 события IceCube, попадающие в поле зрения установки Ковер, восстановленные с точностью лучшей 3 градусов. В угле 3 градуса вокруг направления нейтринного события осуществлялся поиск фотоноподобных событий. Было выделено 10 кандидатов при ожидаемом числе случайных совпадений 13,6. На основе этих результатов был поставлен верхний предел на поток гамма-квантов с энергией выше 1 ПэВ, сопровождающих нейтринные события. На мой взгляд следовало бы объяснить, как из экспериментальных чисел появляется верхний предел.

Подобный поиск пространственно-временных корреляцией между гамма-излучением сверхвысоких энергий и нейтрино высоких энергий производился впервые.

По данным 2018 -2020 к анализу корреляций с нейтринными событиями были добавлены события от высокогорной установки HAWC. Для этого анализа

энергетический порог для отбора кандидатов был снижен до 100 ТэВ. Было отобрано 9 событий, зарегистрированных установкой НАWC, и 22 - установкой IceCube. Были выбраны интервалы времени для поиска совпадений с фотоноподобными событиями, которые равнялись 24 часам и 30 суткам, с центром в момент регистрации события телескопом IceCube и установкой НАWC. Для каждого потенциального источника определялось наблюдаемое и ожидаемое количество фотоноподобных событий, попавших в выбранную область и указанный временной интервал. Превышения наблюдаемых событий над ожидаемыми не было обнаружено ни для одного из направлений IceCube и НАWC. На основе этого были установлены верхние ограничение на поток и флюенс фотонов с энергией более 100 и 300 ТэВ для двух временных экспозиций – 24 часа и 30 суток.

В параграфе 3.3 описаны результаты наблюдения вспышки гамма-квантов с энергии выше 300 ТэВ из туманности Кокон, в которой находятся по крайней мере два источника гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ (J2032+414, J2019+368). Толчком к анализу данных явилась регистрация телескопом Ice-Cube нейтрино с энергией 150 ТэВ, совпадающая в пределах угловой точности нейтринного телескопа с направлением на один из гамма-источник в Коконе - J2028.6+4110. За весь период наблюдения источника (829 суток) было зарегистрировано 5 фотоноподобных событий. Это число согласуется ожидаемым от обычных ШАЛ и позволило поставить предел на поток фотонов с энергией выше 300 ТэВ от источника.

За период 80 дней (центр этого интервала совпадает с нейтринным событие) было зарегистрировано 3 фотоноподобных события и число обычных ливней, отобранных в угловой области 4.7 град, оказалось около 50, что примерно на 20 больше, чем в другие 80 суток за весь период наблюдения. Автор оценивает значимость этого результата в 3.17 сигма. В предположении вспышки гамма-квантов в источнике из полученных результатов можно получить поток фотонов с энергией выше 300 ТэВ. Поток оказался очень большим - $5.6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, на 3 порядка выше ожидаемого при экстраполяции данных из области низких энергий. К сожалению, как получается такой поток из полученных данных, в диссертации не описано. В публикации, посвященной этому результату (Dzhappuev et al., The Astrophysical Journal Letters, 916:L22 (5pp), 2021 August 1) увеличение числа событий от источника до 50 за 80 суток объясняется вкладом событий от гамма-квантов, не прошедших условие отбора на фотоноподобных событий. При этом событий прошедших отбор всего 3. Если это так, то среднее число мюонов в этих 50 событиях должны быть ниже, чем для событий вне периода вспышки. Проверилось ли это? Также мне кажется важным сравнить это число с числом событий в той же угловой апертуре, в которую не попадает источник. Немного странно выглядят острые пики на рис.3.7 (Зависимости вероятности имитации от ширины временного окна). Для временного окна 82 суток вероятность имитации $3 \cdot 10^{-4}$, а для 78 суток уже $3 \cdot 10^{-3}$.

Несмотря на такой неожиданной высокий поток, появились серьезные теоретические модели, объясняющие такое повышение потока гамма-квантов только в области сверхвысоких энергий.

Четвертая глава посвящена описанию установки нового поколения – Ковер-3. В новой установке существенно увеличено число выносных пунктов регистрации – от 5 до 33 (на лето 2022 года), число мюонных детекторов увеличено на 235 и в настоящее время полная площадь мюонных детекторов равна 410 м². В новых выносных пунктах были использованы счетчики на основе пластических сцинтилляторов, с общей площадью 9 м² в каждом пункте. Во всех выносных пунктах была проведена настройка коэффициента усиления ФЭУ. Также проведена настройка коэффициента усиления для фотоумножителей во всех 235 мюонных детекторах. Система сбора данных как с наземной части установки, так и с мюонных детекторов была выполнена на основе ряда моделей фирмы CAEN в стандарте VME: крейт-контроллер, модули дискриминаторов со следящим порогом, модули АЦП и ВЦП. Для описанного выше оборудования была разработана онлайн программа, осуществляющая настройку, контроль работы и считывание данных из внутренней памяти ВЦП и АЦП. Разработка велась на языке Си, на основе стандартных библиотек, разработанных фирмой CAEN для своих устройств. Был запущен набор данных, дублирующий работу наземной части установки Ковер-2, необходимый для проверки и оценки качества работы новой системы сбора данных. Описание новой установки проведено на хорошем профессиональном уровне, с большим подробностями. Вместе с тем, на ряд вопросов ответа в диссертации не приведено – увеличится ли эффективная площадь установки или она по-прежнему будет равна 200 м², понизится ли энергетический порог регистрации событий от гамма-квантов, на сколько улучшится режекция фоновых событий от космических лучей?

В заключении сформулированы основные физические и методические результаты диссертации.

Автор лично представлял результаты работы на семи международных и российских конференциях, что подчеркивает личный вклад автора в представленный в диссертации материал. Основные результаты диссертации представлены в 9 статьях, рекомендованных ВАК. В числе которых 4 статьи в российских рецензируемых журналах, одна статья в международном рецензируемом журнале, а также 4 статьи в материалах международных научных конференций.

Диссертация написана ясным языком и легко читается. Отмечу, что очень облегчает чтение диссертации список сокращений, приведенный в конце работы.

К замечаниям, отмеченным выше, добавлю еще два. На странице 76 зенитный угол почему-то назван горизонтальным углом. Вместо термина «дискриминатор с плавающим порогом» (стр. 101 и далее в 4 главе) желательно использовать термин, принятый в отечественной литературе – «дискриминатор со следящим порогом». Замечания, сделанные выше, не умаляют очень высокого уровня диссертации и важности полученных результатов. В процессе работы над диссертацией автор за

сравнительно короткий срок приобрел уровень квалификации, позволивший ему активно и продуктивно работать в команде крупного эксперимента и получить ряд важных результатов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Романенко Виктор Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент:

30.08.2022

доктор физико- математических наук,
заведующий лабораторией наземной
гамма-астрономии НИИЯФ МГУ

Кузьмичев Л.А.

Специальность 01.04.23– физика высоких энергий.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ), отдел космических наук, лаборатория наземной гамма-астрономии.

+7 495 939 10 72; e-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Подпись Кузьмичева Л.А. удостоверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева

Кузьмичев Леонид Александрович

Доктор физико–математических наук по специальности 01.04.23 – «Физика высоких энергий»;

заведующий лабораторией космического излучения высоких энергий НИИЯФ МГУ

Адрес организации: 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Контакты: +7 495 939 10 72; e-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru.

Список основных публикаций по теме оппонируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Кузьмичев Л.А. Изучение космических лучей на Астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы// *ЖЭТФ* 2022 том 161, № 4, с. 548-559
2. Кузьмичев Л.А. Cherenkov EAS arrays in the Tunka astrophysical center: From Tunka-133 to the TAIGA gamma and cosmic ray hybrid detector// *NIM* 2020 Volume 952, 1 February, 161830
3. Кузьмичев Л.А Search for Astrophysical Nanosecond Optical Transients with TAIGA-HiSCORE Array *Physics of Atomic Nuclei* 2021 том 84, № 6, с. 1037-1044
4. Кузьмичев Л.А Development of a novel wide-angle gamma-ray imaging air Cherenkov telescope with SiPM-based camera for the TAIGA hybrid installation// *Journal of Instrumentation* 2020 том 15, № 09, с. 1-12
5. Кузьмичев Л.А The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // *Astroparticle Physics*, 2020 том 117, с. 102406
6. Кузьмичев Л.А Detecting Gamma Rays with Energies Greater than 3–4 TeV from the Crab Nebula and Blazar Markarian 421 by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes in the TAIGA Experiment // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021 том 85, № 4, с. 398-401
7. Кузьмичев Л.А Scintillation detectors for the TAIGA experiment // *NIM* 2019 том 936, с. 254-256