

*Форма открытия (продления) Проекта /
Подпроекта КИП*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____
“ ____ “ _____ 202_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта
(далее КИП)**

1.1. Шифр темы / КИП (для продлеваемых проектов)– *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

02-2-1125-2011/2023

1.2. Форма открытия(продления) Проекта / подпроекта КИП (для продлеваемых проектов и подпроектов)

02-2-1125-2011/2023

1.2. Лаборатория

ЛЯП

1.3. Научное направление

Физика Частиц

1.4. Наименование проекта / подпроекта КИП

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

1.5. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП

Бородин А.Н.

1.6. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель проекта/ подпроекта КИП)

Ткачев Л.Г.

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) предназначен для исследования гамма-излучения заряженных космических лучей в диапазоне энергий 10^{13} – 10^{18} эВ методом регистрации черенковского излучения от широких атмосферных ливней (ШАЛ), расположен в Тункинской долине (51.49 С.Ш., 103.04 В.Д.), в 50 км от озера Байкал.

В состав комплекса входит уникальная система гибридных детекторов – 3 атмосферных черенковских телескопа (АЧТ) и две широкоугольные черенковские установки ШАЛ – Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE с эффективной площадью 3 км² и 1 км² соответственно и две установки для детектирования заряженных космических лучей – Тунка-Гранде и Тунка-Мюон

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Ключевая идея состоит в объединении в составе одного комплекса двух в корне различных методик регистрации черенковского излучения ШАЛ (imaging and non-imaging (timing)), а именно: АЧТ - телескопов, регистрирующих черенковское изображение широких атмосферных ливней (ШАЛ) и широкоугольных черенковских детекторов. Главным преимуществом работы АЧТ совместно с широкоугольными черенковскими установками является возможность выделения событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей по данным одного или нескольких АЧТ используя при этом информацию об энергии, положении и направлении оси ШАЛ, восстанавливаемые по данным широкоугольной установки.

К основным направлениям исследования комплекса относятся задачи гамма-астрономии и физики космических лучей:

1. Исследование энергетического спектра гамма-квантов от Галактических источников и поиск новых источников гамма-квантов. Планируется восстановить спектр гамма-квантов от галактических источников (Крабовидная туманность, Dragonfly, J2227+610 (G106.3+2.7), J2031 +415 (Cygnus Cocoon), сверхновая Тихо-Браге) важных для понимания происхождения космических лучей.

2. Мониторинг потока гамма-квантов от близких внегалактических источников. Исследование формы спектра гамма-квантов с энергией выше 8 ТэВ от внегалактических источников позволит получить ограничения на плотность внегалактического фонового излучения (EBL(Extragalactic Background Light)), осуществить поиск «аксионоподобных» частиц.

3. Поиск гамма-квантов ТэВного диапазона от гамма-всплесков и гамма-квантов скоррелированных с нейтрино высоких энергий.

4. Поиск космических ускорителей, в которых протоны ускоряются до энергий 100 – 3000 ТэВ. Для поиска таких ускорителей будет проведено исследование особенностей спектра заряженных космических лучей в интервале энергий 100–3000 ТэВ. Будет измерена доля протонов и гелия среди ядер заряженных космических лучей.

5. Исследование массового состава космических лучей в области перехода от галактических к внегалактическим лучам.

На данный момент TAIGA - самая северная гамма-обсерватория мирового уровня рис.1. В программу наблюдения обсерватории входят источники, время наблюдения которых достаточно большое для северного расположения обсерватории: Крабовидная туманность, Dragonfly, остатки сверхновых Тихо Браге, СТА-1, G106.3+2.7, источники в туманности SygnysCocoon, блазары Mrk501, Mrk421 и др. Совместная работа черенковских телескопов и широкоугольной установки, кроме исследований в области гамма-астрономии, позволит продвинуться в изучении характеристик массового состава космических лучей в энергетической области, недостаточно изученной в экспериментах на спутниках.

Риски проекта связаны с отсутствием финансирования при расширении конкурирующих проектов по гамма-астрономии по всему миру и с возможными задержками при замене недоступных компонентов на эквивалентные доступные при проектировании новых черенковских телескопов (как малых широкоугольных телескопов, так и с большой площадью главного зеркала).

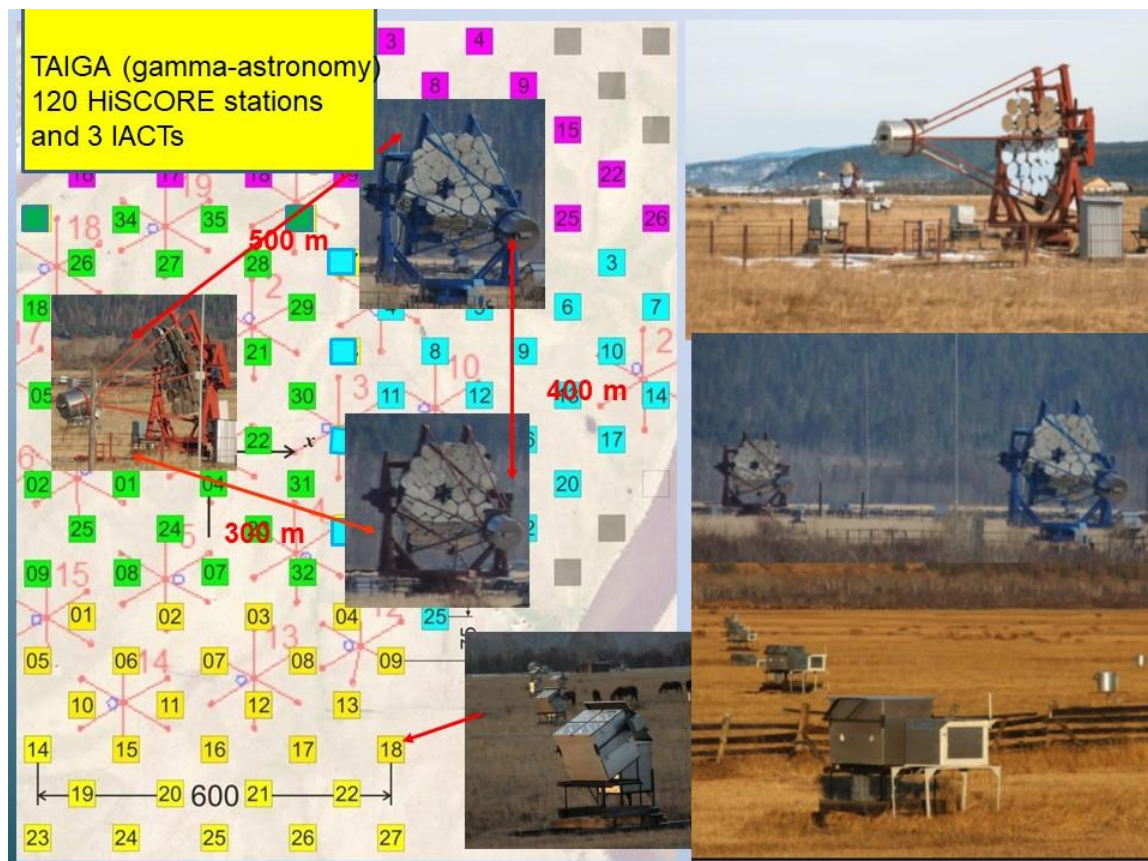


Рис.1 План расположения детекторов комплекса TAIGA

Программа развития астрофизического комплекса

Ближайшее развитие астрофизического комплекса TAIGA связано с созданием еще двух атмосферных черенковских телескопов и существенное увеличение площади мюонных детекторов (установка TAIGA-MUON).

Один из недостатков гибридного подхода в существующем варианте астрофизического комплекса является существенное различие между угловой апертурой черенковских телескопов и апертурой установки TAIGA-HiSCORE, приводящие к возможности наблюдения в данный момент времени только одного источника. Для исправления этой ситуации, планируется создать малые черенковские телескопы (SIT(Small Imaging Telescope)) с угловой апертурой 25-30 градусов и энергетическим порогом 80-100 ТэВ. Совместная работа таких телескопов и установки TAIGA-HiSCORE почти в 10 раз увеличит число гибридных событий, для которых возможно выделение гамма-квантов на фоне событий от космических лучей. Дальнейшее развитие астрофизического комплекса, скорее всего в другом месте, связано с расширением установки TAIGA-HiSCORE на площадь в 10 раз большую и дополненную малыми черенковскими телескопами.

2.3. Предполагаемый срок выполнения

5 лет

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛИТ

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	20	20	20	20	20
Tier 1 (ядро-час)	-				
Tier 2 (ядро-час)	-				
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	-				
Облака (CPU ядер)	200	200	200	200	200

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
ОИЯИ	Россия	Дубна	А. Н. Бородин В. М. Гребенюк А. В. Блинов А. А. Гринюк М. В. Лаврова А. Пан И. Сатышев Л. Г. Ткачёв А.Б.Садовский С.Ю.Пороховой Х.Караташ Е.Шолтан А.Шайковский	соглашение о создании консорциума ГАММА,
НИИЯФ МГУ им. Скобелевича	Россия	Москва	Л. А. Кузьмичев Л. Г. Свешникова +15 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА, соглашение о

				сотрудничестве
Институт прикладной физики ИГУ	Россия	Иркутск	Н. М. Буднев Р. Миргазов Д. П. Журов + 29 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA, соглашение о сотрудничестве
ИЯИ РАН	Россия	Москва	Б. К. Лубсандоржиев + 5 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA
ИЗМИРАН,	Россия	Московская область	В. С. Птускин	соглашение о создании консорциума GAMMA
НИЯУ МИФИ	Россия	Москва	А. А. Петрухин И. И. Яшин + 5 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA
НГУ	Россия	Новосибирск	Е. А. Кравченко + 5 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA
ИЯФ СО РАН	Россия	Новосибирск,	Е. А. Кравченко +4 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA
АГУ	Россия	Барнаул	А. А. Лагутин Р. И. Райкин Н. В. Волков	соглашение о создании консорциума GAMMA
Национальный Институт Ядерной Физики	Италия	Турин	А. Чиавасса	
Ulaanbaatar University	Монголия	Улан-Батор	Р. Того	

2.6. Организации-соисполнители

1. НИИЯФ МГУ им. Скобелевича, Москва, Россия
- обработка данных, физический анализ, создание камеры АЧТ, DAQ, Монте-Карло моделирование
2. Институт прикладной физики, ИГУ, Иркутск, Россия

- инфраструктура в Тунке, DAQ, электроника для АЧТ и HiSCORE, установка детекторов, Монте-Карло моделирование для HiSCORE и обработка данных

3. ИЯИ РАН, Москва, Россия

- Создание камеры АЧТ, создание мюонных детекторов

- Методические вопросы по конструкции телескопов АЧТ, анализ данных, приобретение ФЭУ для HiSCORE, Монте-Карло моделирование для HiSCORE и АЧТ

4. ИЗМИРАН, Московская область, Россия

- помощь в теоретических расчётах

5. НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

- обработка данных, сборка камеры АЧТ, Монте-Карло моделирование

6. ОИЯИ, Дубна, Россия

- полная ответственность за разработку, сборку и механические тесты АЧТ, участие в создании программного обеспечения и Монте-Карло моделировании, участие в сборе данных в Тунке и офф-лайн анализе данных. Разработка и создание "фасеточных" зеркал, создание актуаторов для зеркал АЧТ

7. НГУ, Новосибирск, Россия

- Разработка и создание мюонных детекторов

8. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

- разработка и создание мюонных детекторов, создание электронных компонентов для АЧТ

9. АГУ, Барнаул, Россия

10. СКБ Автоматика

- разработка и изготовление детекторов и электроники ОЛВЭ-HERO

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	3,6	
2.	инженеры	2,9	
3.	специалисты	2,4	
4.	служащие		
5.	рабочие		
	Итого:	8,9	

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Бородин А. Н.	ЛЯП	исследователь	0,9
		Ткачёв Л. Г.	ЛЯП	исследователь	0,8
		Гребенюк В. М.	ЛЯП	исследователь	0,7
		Лаврова М. В.	ЛЯП	исследователь	0,5
		Сатышев И.	ЛИТ	исследователь	0,5
2.	инженеры	Гринюк А. А.	ЛЯП	инженер	0,9
		Пан А.	ЛЯП	инженер	0,5
		Пороховой С. Ю.	ЛЯП	инженер	0,2
		Блинов А. В.	ЛЯП	инженер	1,0
		Скрыпник А.	ЛЯП	инженер	0,1
		Баландин С.	ЛЯП	инженер	0,1
		Соловьёв Н.	ЛЯП	инженер	0,1
3.	специалисты	Павлов Ю.	ЛЯП	техник	1
		Шайковский А.	ЛЯП	конструктор	0,4
		Шолтан Е.	ЛЯП	Старший лаборант	0,9
		Караташ Х.	ЛЯП	Старший Лаборант	0,1
4.	рабочие				
	Итого:				8,9

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	Итого:	0	0

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).
Детализация приводится в отдельной форме.

320 тыс. \$

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.
250 тыс. \$

Руководитель проекта /подпроекта КИП _____/_____/

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта / подпроекта КИП _____

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту _____

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта / Подпроекта КИП**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.)потреб ности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)						
	Материалы	50	10	10	10	10	10
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	250	50	50	50	50	50
	Пуско-наладочные работы	15	3	3	3	3	3
	Услуги научно- исследовательских организаций						
	Приобретение программного обеспечения						
	Проектирование/строительство	5	1	1	1	1	1
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы					
		– сумма FTE,	44,5	8,9	8,9	8,9	8,9
		– ускорителя/установки,					
		– реактора,.....					
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (<i>статьи бюджета</i>)	320	64	64	64	64
	Внебюджет (доп.смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	250	50	50	50	50

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____ / _____ /

Экономист Лаборатории _____ / _____ /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /
ПОДПРОЕКТА КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

1. Общие сведения по проекту / подпроекту КИП

1.1. Научное направление

Физика частиц

1.2. Наименование проекта / подпроекта КИП

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

1.3. Шифр проекта / подпроекта КИП

Пример (04-4-1140-1-2024/2027)

02-2-1125-2011/2020

1.4. Шифр темы / КИП

Пример (тема 04-4-1140-2024, КИП 02-0-1065-2007)

02-2-1125-2011/2020

1.5. Фактический срок реализации проекта/ подпроекта КИП

2011/2023

1.6. Руководитель(ли) проекта/ подпроекта КИП

Ткачев Л.Г., Бородин А.Н.

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Мультиинформационная астрономия — новое направление в современной астрофизике, важной частью которого является гамма-астрономия высоких энергий. Гамма-лучи представляют собой самую высокоэнергетическую часть электромагнитного спектра и являются уникальным инструментом для исследования самых энергичных и самых экстремальных процессов во Вселенной. Имеется ряд фундаментальных вопросов для гамма-астрономии сверхвысоких энергий (СВЭ), на которые в настоящее время нет ответов, и прежде всего вопрос об источниках галактических КЛ с энергиями ~ПэВ.

До сих пор большая часть данных гамма-астрономии в диапазоне энергий ТэВ и субТэВ была получена с помощью изображающих атмосферных черенковских телескопов (АЧТ), в частности, со стереосистемами из нескольких таких телескопов. Прототип гамма-обсерватории TAIGA (Тункинский передовой прибор для космических и гамма-астрономии), который строится в Тункинской долине, нацелен на диапазон энергий выше 30 ТэВ. Обсерватория сочетает в себе несколько АЧТ с набором относительно дешевых широкоугольных детекторов HiSCORE без изображения (High Sensitivity Cosmic Origin Explorer). Это позволяет увеличить площадь прибора до нескольких квадратных километров и значительно подавить фон от заряженных КЛ. Сочетание двух взаимодополняющих методов гамма-исследования позволяет построить прибор большой площади при относительно низкой цене. TAIGA — первый детектор такого рода.

Полный масштаб обсерватории TAIGA по плану должен охватывать площадь 10 км² и включать в себя сеть из ~1000 широкоугольных (0,6 ср) синхронизированных детекторов черенковского света HiSCORE, до 16 АЧТ с анализом изображения ливня (FOV 10×10 градусов) и мюонные детекторы с общей чувствительной площадью 2000 м², распределенные на площади 1 км². Прототип обсерватории размещен в Тункинской долине - 50 км от озера Байкал. ОИЯИ несет полную ответственность за изготовление механики черенковских телескопов и составных «фасеточных» зеркал. Кроме того, команда ОИЯИ участвует в сменах при сборе данных в Тункинском районе, моделировании МК и физическом анализе данных.

За предыдущие года площадь TAIGA-HiSCORE увеличилась до 1 км², развернуто еще три АЧТ и 200 м² новых мюонных детекторов. С таким прототипом можно выполнять научную программу:

1. Изучение высокоэнергетического края спектра ярчайших галактических и внегалактических источников гамма-излучения.
2. Поиск галактических ПеВатронов.

3. Применить новый гибридный подход для изучения массового состава КЛ в диапазоне 10^{14} - 10^{17} эВ.
4. Изучение анизотропии КЛ в области энергий 100 – 3000 ТэВ.

2.2. Развернутый научный отчет

Введение

Прогресс в понимании природы высокоэнергетических источников КЛ в нашей Галактике и в Метагалактике идет по пути регистрации в экспериментах 3 типов астрочастиц: заряженных КЛ, гамма-квантов и нейтрино. Для диапазона энергий гамма-квантов выше 30 ТэВ существует ряд принципиальных вопросов, на которые в настоящее время нет ответов. Прежде всего, речь идет об источниках Галактических космических лучей с энергиями около 1 ПэВ, области энергий, примерно примыкающей к классическому излому во всечастичном энергетическом спектре. Изучение вторичных гамма-квантов, генерируемых КЛ в окрестности источника, где происходит ускорение частиц, позволяет прояснить механизм ускорения галактических КЛ. В экспериментах H.E.S.S. [1. F.Aharonian (HESS Collaboration)//Astroparticle Physics 34(2011) 738-747], VERITAS [2. V.Acciari (VERITAS Collaboration) Ap.J Letters 730 (2011) L20], MAGIC [3. Albert et al (MAGIC)// Astrophys.J.639:761-765,2006], MILAGRO [4. Abdo A.A. et al.(Milagro) 2007, ApJ 664, L91], HAWC [5. A.Abdo et al. (Milagro)//arXiv: 1403.0161] были обнаружены источники со спектрами гамма-излучения, простирающимися до нескольких десятков ТэВ. Кроме того, несколько измерений нейтрино высоких энергий с помощью детектора IceCube указывают на источники гамма-излучения СВЭ, доступные для экспериментальных исследований.

Гамма-излучение высокой энергии, попадая в атмосферу, запускает электромагнитный каскад вторичных e^- , e^+ и фотонов, который называется широким атмосферным ливнем (EAS, ШАЛ). Два различных косвенных метода позволяют изучать ШАЛ. Первый из них заключается в работе поверхностного массива детекторов, который измеряет вторичные частицы, достигающих поверхности Земли. Преимущества этого метода заключается в его рабочем цикле, близком к 100%, а также большом поле зрения (FoV). Однако такие параметры, как энергетический порог и разрешающая способность детекторов в массиве довольно низки. Напротив, во втором методе используются АЧТ, которые измеряют черенковский свет, создаваемый вторичными заряженными частицами в ШАЛ. Наблюдения на АЧТ в основном ограничиваются хорошей погодой и темными ночами, что приводит к низкому рабочему циклу $\sim 10\%$. Кроме того, поле зрения АЧТ обычно составляет всего несколько градусов в поперечнике. Однако их рабочие параметры, такие как энергетическое и угловое разрешение, энергетический порог позволяют проводить углубленные исследования отдельных источников.

До сих пор большинство данных гамма-астрономии в ТэВ и суб-ТэВ области были получены с использованием АЧТ, в частности, со стереосистемами нескольких таких телескопов. Прототип обсерватории TAIGA [6, N. Budnev et al. (TAIGA Collaboration), Jour.Phys: Conf. Series 718 052006 (2016), 7. Budnev N. et al., (TAIGA Collaboration), NIMA 845, 384 (2017)], строящейся в Тункинской долине, нацелен на диапазон энергий гамма-квантов выше 8 ТэВ. Обсерватория объединяет несколько черенковских телескопов с сетью сравнительно дешевых широкоугольных ($\sim 0,6$ ср) неизображающих оптических детекторов TAIGA-HiSCORE [8 Gluczykont, D. Hampf, D. Horns, L.Kuzmichev et al. Astropart. Phys., 56:42, 2014]. Это позволяет увеличить площадь установки до нескольких квадратных километров и значительно подавить фон от заряженных КЛ за счет хорошего гамма-адронного разделения IAST (~ 100 при энергиях выше 100 ТэВ). Сочетание двух взаимодополняющих методов гамма-разделения позволяет построить устройство большой площади при относительно низкой цене. TAIGA — первый детектор такого рода.

Полный масштаб обсерватории TAIGA по предварительному плану будет охватывать площадь 10 км^2 и включать ~ 1000 детекторов TAIGA-HiSCORE, до 16 черенковских телескопов с анализом изображений ШАЛ (FOV ~ 10 градусов) и мюонных детекторов общей чувствительной площадью 2000 м^2 , распределенных на площади 1 км^2 . Преимуществом

телескопов АЧТ в сочетании с массивом HiSCORE является возможность использования информации изображения о характеристиках ШАЛ (положение оси, направление, энергия) для лучшего разделения гамма-адронных событий. Это позволяет даже при расстоянии между телескопами до 600 м поддерживать уровень подавления $\sim 0,01$ адронных ливней при энергии 100 ТэВ. Чувствительность обнаружения локальных источников обсерватории площадью 10 км² в диапазоне энергий 30 – 200 ТэВ ожидается на уровне 10–13 эрг см⁻² с⁻¹ на 500 часов наблюдения или 10 регистрируемых событий, что сравнимо с планируемой чувствительностью проектов гамма-астрономии (LHAASO [9. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv:1602.07600], CTA [10. B.S.Acharya et al. (CTA collaboration) Astroparticle Physics 43 (2013) 3-18;]) в этом диапазоне энергий.

В 2019 году время прототип обсерватории TAIGA состоял из 85 станций HiSCORE на площади 0,7 км² и двух АЧТ. В течение 2020 г. добавлено еще 30 станций HiSCORE и черенковский телескоп с камерой SST-1M на основе SiPM-детекторов, разработанных в рамках проекта CTA [11 Schioppa E.J. et al. [CTA SST-1M Project Collaboration] // arXiv:1508.06453]. Эта работа не была реализована (доставка камеры не состоялась). Еще один АЧТ произведен и установлен в 2021 году.

TAIGA первая установкой, в которой телескопы расположены на расстоянии 300 м и более друг от друга и при этом сохраняются преимущества наблюдения высокоэнергетических гамма-квантов в стереорежиме.

С таким прототипом TAIGA можно не только продемонстрировать преимущества гибридного и стереоподхода для выделения гамма-адронных ШАЛ в ТэВном диапазоне энергий, но и получить новые результаты при изучении высокоэнергетического края спектра галактические и внегалактические источники.

Участие группы ОИЯИ в проекте TAIGA, поддержано грантом Российского научного фонда (РНФ) № 19-72-20173 «Малогабаритные телескопы в составе экспериментального комплекса гамма-лучевой обсерватории TAIGA» на 2019-2022 гг. .

Коротко о проведенных работах:

2021. Моделирование совместной работы АЧТ с камерным телескопом SST-1M и HiSCORE.

Разработка программного обеспечения для анализа данных АЧТ+HiSCORE. Исследование гамма-излучения Крабовидной туманности. Наблюдение ярчайших галактических и внегалактических источников гамма-излучения. Ввод в эксплуатацию третьего АЧТ (АЧТ) с камерой SST-1M на базе Si-PM детекторов (проведены подготовительные работы с камерой в германии, но доставка камеры на полигон не состоялась). Изготовление четвертого АЧТ, включая зеркальные элементы (зеркала приобретены в Армении на средства гранта НИИПФ ИГУ). Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных.

2022. Исследование потока гамма-квантов от блазаров Мкр-421 и МПК-501 в стереорежиме. Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных. Принятие в эксплуатацию четвертого АЧТ.

2023. Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных. Мониторинг источников галактического гамма-излучения. Установить верхний предел констант фотонно-аксионной конверсии на основе изучения энергетических спектров блазаров Мкр 421 и Мрк 501. Планируется подготовить и установить 5 черенковский телескоп с модернизированной механической частью

Подготовить детальный проект расширения прототипа TAIGA до полноценной гамма-обсерватории TAIGA.

Предмет исследования, ответственность ОИЯИ, планы и ожидаемые результаты.

Создается гибридная обсерватория TAIGA для изучения космических и гамма-лучей с энергиями 10^{13} - 10^{18} эВ. Его основной особенностью является дополнительный гибридный подход к различению событий КЛ от событий гамма-излучения. Он будет включать в себя широкоугольные черенковские детекторы ШАЛ (TAIGA-HiSCORE) и ряд TAIGA-АЧТ. Первый

этап TAIGA будет включать ~100 TAIGA-HiSCORE, распределенных на площади ~1 км² и 3-4 TAIGA-АЧТ на расстоянии 300-500 м друг от друга. Комбинированный метод HiSCORE-АЧТ будет использоваться для выбора событий гамма-излучения. Направления прихода ШАЛ, положение оси и энергия восстанавливаются по данным станций HiSCORE. Порог регистрации гамма-квантов ШАЛ составляет ~30 ТэВ. Для определения типа частицы, вызвавшей ШАЛ, в основном будет использоваться информация АЧТ. Исключительное значение имеет расстояние между АЧТ, которое может быть увеличено до 600 м, что значительно больше, чем у детекторов эксперимента СТА.

При таком подходе будет построен гибридный детектор с большой площадью, но с относительно небольшим количеством АЧТ. Таким образом, на единицу площади количество АЧТ в гамма-обсерватории TAIGA будет примерно в 10 раз меньше, чем в СТА, и стоимость оборудованного квадратного километра также во много раз меньше. Сравнение чувствительности существующих и проектируемых установок показывает, что чувствительность обсерватории TAIGA по регистрации гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ находится на уровне других новых установок.

Полный масштаб обсерватории TAIGA [6,7] будет включать сеть из ~500 широкоугольных (FOV ~0,6 ср) синхронизирующих детекторов TAIGA-HiSCORE, до 16 TAIGA-АЧТ с анализом изображения ливня (FOV ~10 град.), охватывающих площадь 10 км², и детекторы мюонов с общей чувствительной площадью 2000 м², распределенные на площади 1 км². Это позволяет даже при расстоянии между АЧТ до 600 м поддерживать уровень подавления ~0,01 для адронных ливней, индуцированных КЛ при энергии 100 ТэВ. Чувствительность обсерватории TAIGA по локальным источникам в диапазоне энергий 30 – 200 ТэВ ожидается на уровне 10-13 эрг см⁻² с⁻¹ на 500 часов наблюдения или 10 зарегистрированных событий. Сравнение чувствительности существующих и планируемых установок показывает, что чувствительность обсерватории TAIGA по регистрации гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ сравнима с самыми амбициозными проектами LHAASO и СТА.

Основные научные темы обсерватории TAIGA:

- Гамма-астрономия - одним из наиболее интригующих вопросов физики астрочастиц высоких энергий является поиск галактических объектов для ускорения частиц до ПэВ-энергий (т.н. Певатронов); Спектры СВЭ известных источников: где они заканчиваются; поглощение инфракрасного излучения (ИК) и космического микроволнового фона (СМВ); диффузное излучение от галактической плоскости и местного сверхскопления.

- Физика КЛ – измерения энергетического спектра, массового состава и сечений от 10¹⁴ до 10¹⁸ эВ.

- Физика элементарных частиц - преобразование аксионов/фотонов; скрытые фотон/фотонные колебания; нарушение Лоренц-инвариантности; измерение сечения ядер р-воздуха; поиск явлений кварк-глюонной плазмы.

TAIGA-АЧТ. Механическая конструкция первого АЧТ была изготовлена в основном в ОИЯИ на основе конструкции телескопа HEGRA [21]. АЧТ - телескоп выполненный в дизайне Дэвиса-Коттона с азимутальной монтировкой, общей площадью зеркала 9,6 м² (34 зеркальных грани диаметром 0,60 м каждая), угловая точность привода до 0,02°. Камера фотодетектора массой ~ 200 кг и диаметром чувствительной зоны ~ 0,8 м [22] выполнен на основе матрицы ФЭУ с электроникой Front End и DAQ и закреплен на фокусном расстоянии 4,75 м перед зеркалом. Черенковский свет ШАЛ фокусируется на камеру 34 гранями зеркала с радиусом кривизны 9,5 м. Зеркала для первого АЧТ были получены от «Галактика» (Армения), зеркала для второго АЧТ от «Медиа Ларио Индастриз» (Италия).

Камера телескопа состоит из 560 ФЭУ фирмы Phillips модели XR1911 диаметром 19 мм. Поле зрения одного пикселя составляет 0,36. Поле зрения камеры составляет 9,6° (каждый пиксель имеет апертуру 0,36°) [23], PSF = 0,07°. ПЗС-камера Prosilica GC1380 установлена на расстоянии 1 м от оптической оси телескопа на зеркале. ПЗС-камера используется для проверки направления наведения телескопа. Он имеет разрешение 1360×1024 пикселей и поле зрения

31,4×23,6°. Каждая ось телескопа оснащена гибридным шаговым двигателем Phytron, 17-битным энкодером.

Все ФЭУ в камере распределены в кластеры, по 28 ФЭУ в каждом. Основу электроники кластера составляет 64-канальная ASIC MAROC-3. Каждый канал микросхемы MAROC-3 включает в себя предусилитель с регулируемым коэффициентом усиления, зарядочувствительный усилитель и компаратор с регулируемым порогом. Чип имеет мультиплексированный аналоговый выходной сигнал, пропорциональный входному заряду. Аналоговый выход подключен к 12-разрядному внешнему АЦП. Сигнал от каждого ФЭУ разделяется и подается на 2 канала MAROC-3 с разницей коэффициентов усиления 30. В результате получается полный динамический диапазон 3000 фотоэлектронов. Условием формирования локального триггера кластера является превышение амплитуды в 2 или 3 пикселях кластера на 10 п.э. через 15 нс.

Чипу MAROC для оцифровки событий требуется сигнал с именем HOLD, который фиксирует амплитуду сигнала на аналоговом выходе в течение всего периода оцифровки сигнала АЦП. Распределение сигнала HOLD на все кластеры осуществляется платой The Fast_Hold. Задача этой платы — принимать локальные триггеры от кластера и распределять их по всем кластерам камер.



Рис. 2. Оба АЧК-TAIGA

В декабре 2016 года введен в эксплуатацию первый TAIGA-АЧТ. Второй был введен в собран в 2019 г. и введен в эксплуатацию в январе 2020 г. Оба TAIGA-АЧТ представлены на рис. 2, а пример события ШАЛ, измеренного обоими TAIGA-АЧТ, представлен на рис. 3.

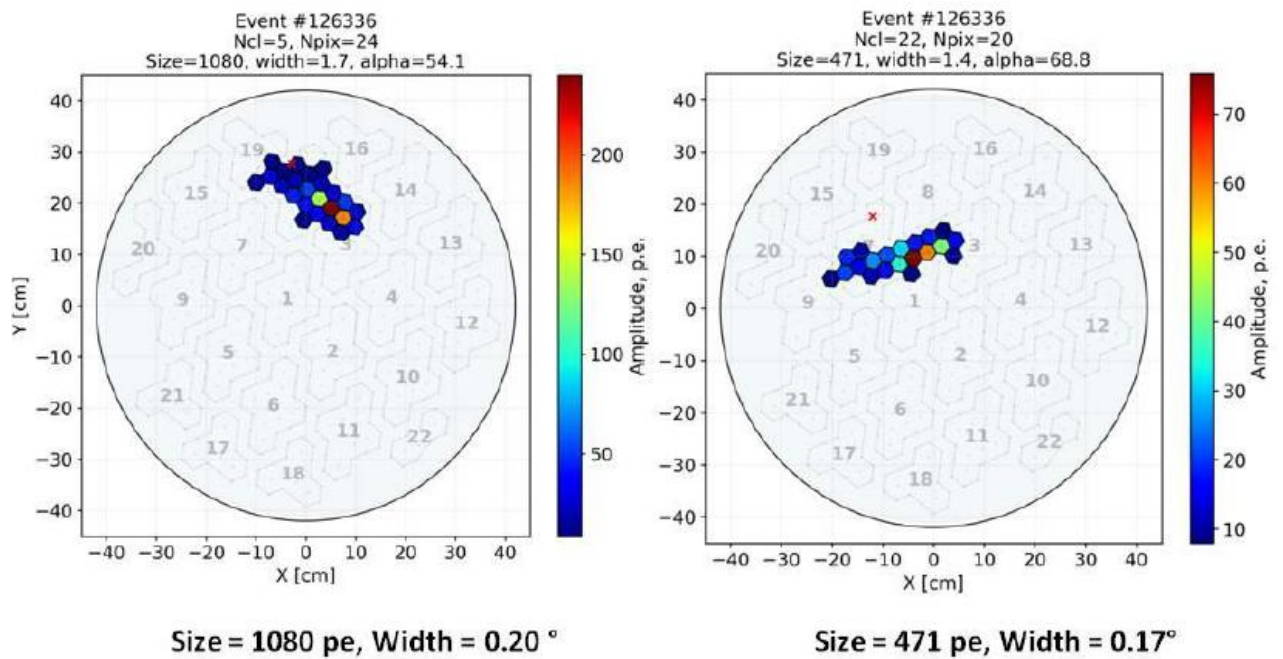


Рис. 3. Пример события ШАЛ, измеренного обоими приборами TAIGA-АСТ.

Состояние деятельности ОИЯИ по производству и испытаниям АЧТ.

ОИЯИ несет полную ответственность за производство механики АЧТ, включая силовую электронику АЧТ и электронику управления движением. Зеркальные элементы для АЧТ-3 были куплены в специализированной компании «Media Lario Industries» (Италия). В 2019 г. в ОИЯИ был завершен комплект конструкторских чертежей и изготовлена установка АЧТ-3 для использования с камерой ССТ-1М в составе обсерватории TAIGA. На рис. 4 представлена установка АЧТ-3, доставленная в апреле 2020 года в Тункинский район.



Рис.4. Монтаж АЧТ-3 в сборе в мастерской ОИЯИ

За проектирование, испытания и производство камеры и электроники АЧТ отвечают члены коллаборации TAIGA НИИЯФ МГУ, МИФИ. Группа ОИЯИ участвует в испытаниях камерных ФЭУ АЧТ. Параллельно в ОИЯИ было освоено собственное производство зеркальных элементов АЧТ. Изготовлено и испытано несколько зеркальных элементов для завершения АЧТ-1 в Тунке, где 5 зеркальных элементов отсутствуют. Сравнение оптических параметров фасок зеркал, изготовленных в компании Медиа Ларио и ОИЯИ, представлено на рис.5. Размеры пятен обоих зеркал имеют сравнимые значения и хорошо соответствуют размеру пикселя камеры АЧТ. Основное отличие заключается в стоимости изготовления зеркала, которая для зеркал из ОИЯИ будет значительно дешевле.

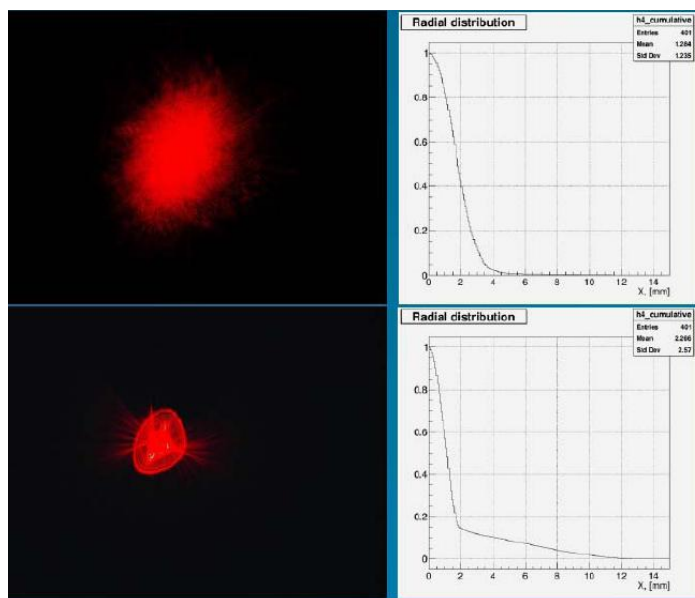


Рис.5. Сравнение оптических параметров зеркал производства компании Media Lario (вверху) и ОИЯИ (внизу).

TAIGA-HISCORE. В настоящее время массив TAIGA-HiSCORE состоит из 85 оптических станций, распределенных по регулярной сетке на площади 0,7 км² с расстоянием между станциями 106 м. Каждая оптическая станция содержит четыре больших ФЭУ диаметром 20 или 25 см, а именно EMI ET9352KB или Hamamatsu R5912 и R7081. Каждый ФЭУ имеет конус Уинстона диаметром 0,4 м и поле зрения 0,6 ср. Анодные сигналы всех 4-х ФЭУ станции суммируются. Это приводит к дополнительному снижению энергетического порога в 2 раза. Каждая станция соединена с центром сбора данных оптоволоконным кабелем для передачи данных и синхронизации. Стабильность синхронизации оптических станций достигает порядка 0,2 нс. Точная калибровка достигается за счет внешних источников света. Восстановление параметров ливней выполняется с использованием алгоритмов, разработанных для установки Тунка-133 [29]. Направления прихода ливней определяются относительной задержкой черенковского света на каждой станции. Это восстановленное направление используется при реконструкции ядра ШАЛ. Амплитуда импульса соответствует параметризации функции амплитуды-расстояния (ADF) [29]. Окончательное направление прихода ШАЛ, реконструированное для найденного положения ядра в предположении искривленного фронта ливня.

Угловое разрешение установки TAIGA-HiSCORE *достигает ~0,1° для высокоэнергетических событий с числом сработавших станций более 10 и ~0,4-0,5° для событий с более чем 4 сработавшими станциями.* Предварительный энергетический спектр КЛ, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE, в сравнении с другими экспериментами показан на рис. 6 [30]. Энергетический порог почти 100% эффективности регистрации составляет около 250 ТэВ. В настоящее время, экстраполяция нашего спектра на более низкие энергии не противоречит результатам прямых экспериментов в пределах их статистических погрешностей.

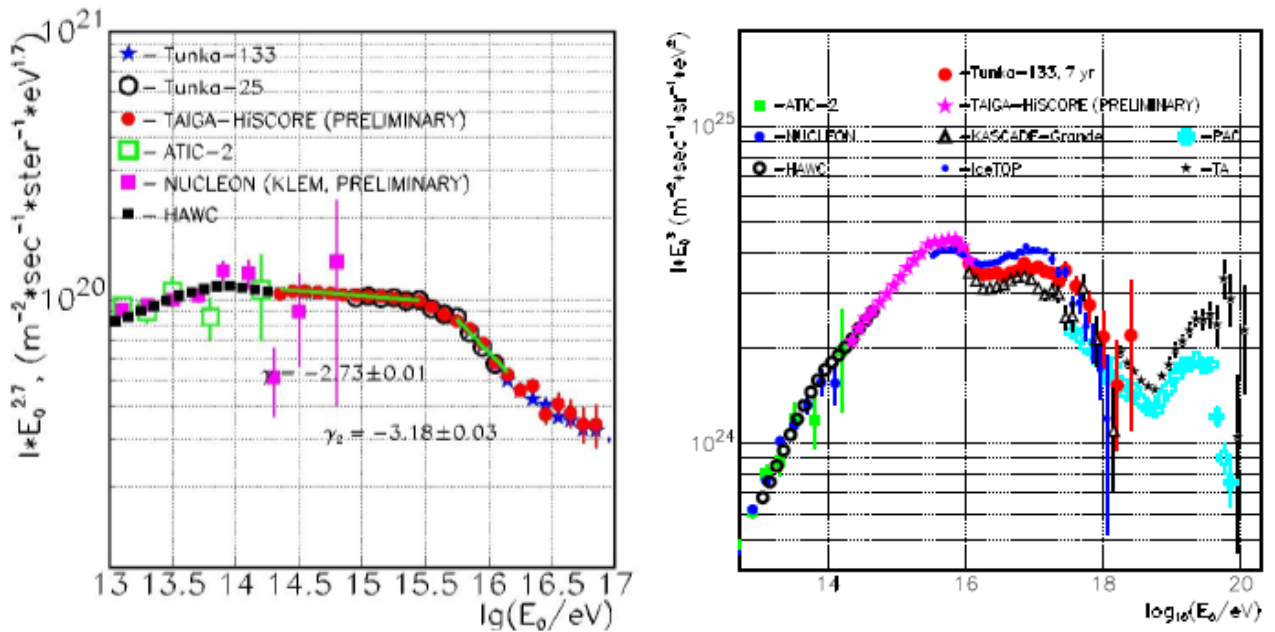


Рис. 6. Энергетический спектр первичных КЛ, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE, в сравнении с другими экспериментами

Первые результаты АЧТ. В сезоне 2019-2020 гг. наблюдения проводились в режиме «wobbling» (Фомин В.П. и др., 1994, *Астрофизика частиц*, 2, 137), при котором наведение телескопа смещено от положения источника на некоторое угловое расстояние. Этот метод позволяет одновременно собирать данные и оценивать фон. Было использовано расстояние смещения $1,2^\circ$, направление смещения менялось между каждым 20-минутным гуп-ом. Точность наведения телескопа составила $\sim 0,0^\circ$ для скорректированных наблюдений. Для анализа изображения использовался стандартный набор параметров Хилласа (Ширина, Длина, Расстояние...) (рис. 7).

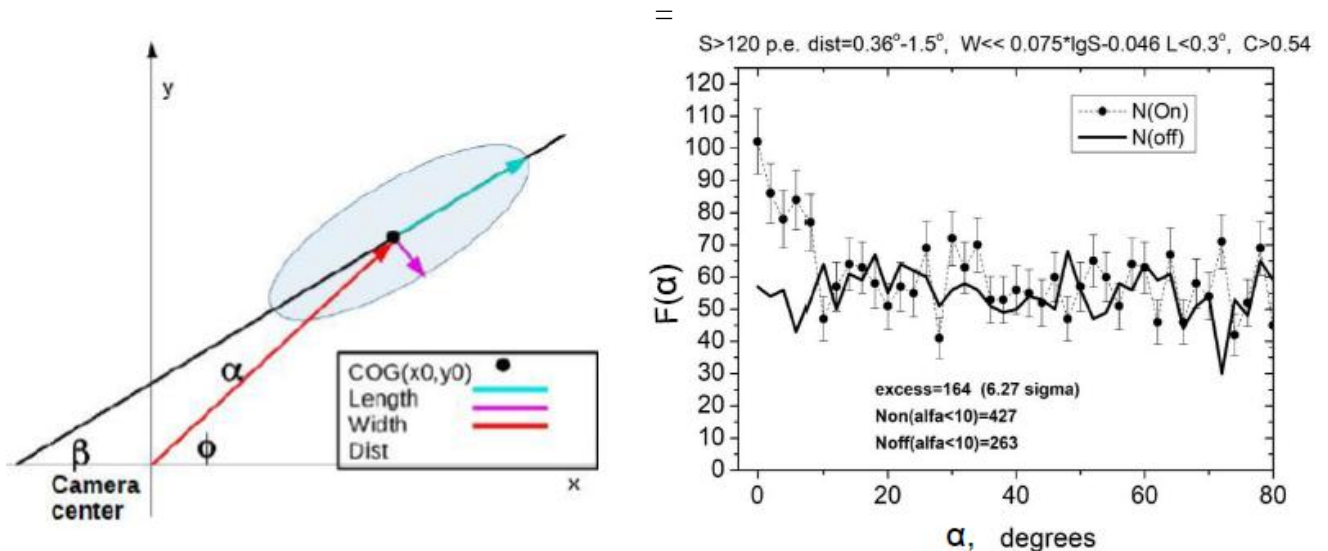


Рис.7. Слева: параметры изображений Хилласа. Справа: α -распределение Крабовидной туманности (включено, пунктирная линия) и фон (выключено, черный) данные 46-часового наблюдения.

Крабовидная туманность с пульсаром в центре является наиболее известным и наиболее изученным источником гамма-астрономии в ТэВ области. Поэтому его используют в качестве эталонной свечи для калибровки гамма-телескопов. После обнаружения сигнала от Краба на

телескопе с более чем 5-ю стандартными отклонениями уровня значимости (σ) можно считать, что телескоп готов к работе с другими источниками.

Максимальное время полного наблюдения источника для описанного массива HiSCORE+АЧТs составляет около 230 часов в год. Предполагалось, что при хороших погодных условиях в течение одного года можно достичь 100 часов времени наблюдений.

В сезоне 2019-2020 было произведено наблюдение «Краба» более 90 часов. Данные за первый период этого сезона (46 часов) уже обработаны и предварительный результат отбора событий показан на рис.6. Набор отборочных разрезов следующий: Dist: $0,4^\circ - 1,5^\circ$, Размер > 120 PE, Ширина $< -0,046^\circ + 0,076^\circ \times \text{Log}(\text{Размер}/1 \text{ pe})$, Длина $< 0,31^\circ$, Con2 $> 0,52$, $\alpha < 10^\circ$. 8-распределение событий после отбора в течение 46 часов наблюдения Краба показано на рис. 7 как для события On, так и для Off. Избыток событий для $\alpha < 10^\circ$ в районе 160, что составляет около $6,2 \sigma$ по формулам Li&Ma [36].

Такой избыток согласуется с избыточной формой МК, основанной на энергетическом спектре гамма-лучей Краба, измеренном экспериментом HEGRA ~ 145 событий за 46 часов. В соответствии с МК пороговая энергия составляет ~ 3 ТэВ. Столь высокий энергетический порог по сравнению с телескопом HEGRA почти такого же размера объясняется следующими причинами:

1. TAIGA-АЧТ на высоте 615 м над уровнем моря, HEGRA- 2200 м.
2. TAIGA-АЧТ – самый северный черенковский телескоп, зенитный угол событий от Краба может быть только больше 29° .
3. Эффективная площадь зеркал $6,0 \text{ м}^2$ (5 зеркал еще не были установлены на момент наблюдения, 30% света теряется на срезах конусов Винстона). Планируется увеличить эффективную площадь зеркала до $9,0 \text{ м}^2$. В этом случае энергетический порог снизится до 2 ТэВ.

Первые гибридные результаты TAIGA-АЧТ и TAIGA-HiSCORE. Поиск совместных событий, зарегистрированных телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE, проводился при слежении за Крабовидной туманностью [37]. На рис. 8 показан пример совместного адроноподобного события, зарегистрированного телескопом и TAIGA-HiSCORE.

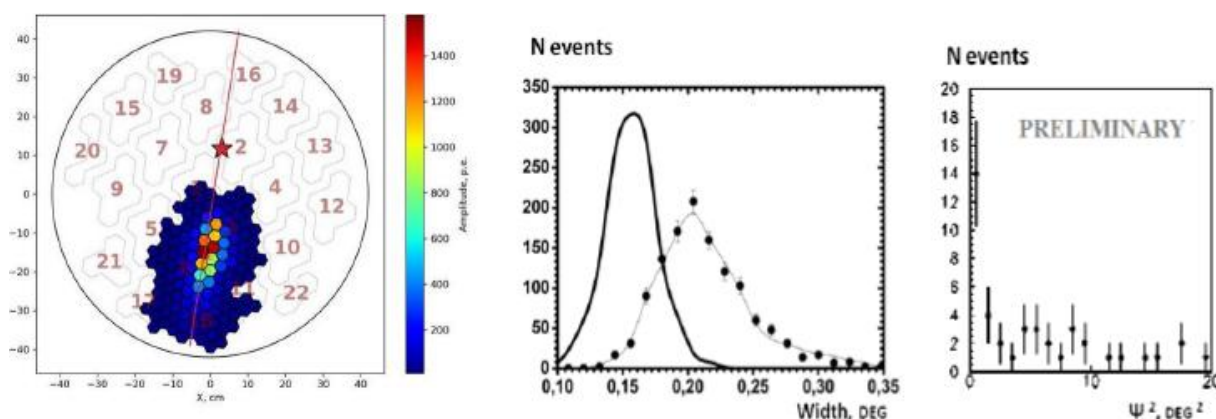


Рис. 8. Слева: пример адроноподобного совместного события. Параметры изображения: Размер=18500 п.э., Ширина= $0,4^\circ$, $\alpha=11^\circ$. Посередине: распределение ширины изображения для совместных событий. Сплошные круги — эксперимент. Тонкая сплошная линия - МК (космические лучи), толстая сплошная линия - МК (гамма-кванты). Справа: распределение Ψ^2 для гибридных событий после срезов (предварительные результаты).

Звездочкой отмечена проекция положения ядра ШАЛ на плоскость камеры телескопа с введением масштабного коэффициента R_p (см) / R_c (см) = 1500, где R_p — расстояние от телескопа до положения ядра ШАЛ, а R_c расстояние между центром камеры и звездочкой. Линия на картинке направлена к ядру ШАЛ. Для событий, исходящих от источника, на

который ориентирован телескоп, линия, соединяющая проекцию оси ШАЛ и центр тяжести изображения, должна пересекать центр камеры. Это же событие было зарегистрировано 15 станциями установки TAIGA-HiSCORE: $E = 840$ ТэВ, $\theta = 30.1^\circ$, $\varphi = 33.6^\circ$, $R_p = 134$ м, угол между направлением ливня, восстановленным по временной установке, и направлению наведения телескопа $0,47^\circ$.

17 000 совместных событий с размером изображения ≥ 60 ф.э. были выбраны. Эти события были зарегистрированы первыми 30 станциями установки TAIGA-HiSCORE площадью $0,25$ км². На рис. 8 показаны распределения ширины для совместных событий размером от 1000 до 3000 ф.э. Тонкой сплошной линией показаны модели МК для аналогичной выборки событий, полученные из эксперимента. Сплошная толстая линия на этом рисунке — распределение ширины гамма-квантов для указанного образца. Выбрав 60% гамма-событий ($Width < 0,17^\circ$, $\alpha < 15^\circ$), мы подавили адронный фон в 100 раз. После применения $Width (< 0,17^\circ)$, $\alpha (< 15^\circ)$ и $Dist. (< 2,5^\circ)$ разрезы, осталось 42 события с $\Psi < 4.5^\circ$, Ψ - угол между направлением ливней, реконструированным TAIGA-HiSCORE, и направлением на Крабовидную туманность. Распределение Ψ 2 этих гибридных событий после разрезов представлено на рис. 9. Следует отметить, что для таких энергий кратность попаданий станций HiSCORE составляет всего 4-5, а угловое разрешение равно $0,4^\circ - 0,5^\circ$. Для 14 из этих событий с энергиями от 45 до 60 ТэВ. Эти события можно рассматривать как предварительных кандидатов на первые гамма-подобные события, отобранные гибридным подходом.

МС моделирование совместной работы TAIGA-HiSCORE и АЧТs [32,33]. Моделирование данных телескопа проводилось в два последовательных этапа: во-первых, моделирование ШАЛ с помощью пакета программ CORSIKA [34], во-вторых, вычисление количества результирующих черенковских фотонов, которые отражаются зеркалом телескопа АЧТ и регистрируются камерой из 560 ФЭУ в его фокальной плоскости. Входными данными от неизображающего устройства являются параметры, которые были получены из относительных времен прихода фотонов, зарегистрированных разными детекторными станциями: первичная энергия, направление и положение ШАЛ. Направление первичного гамма-излучения фиксировалось в соответствии с положением исследуемого точечного источника, а угол моделируемых фоновых протонных ливней варьировался в пределах $0,4^\circ$ вокруг этого направления, что значительно превышало фактическое угловое разрешение прибора. Для каждого ШАЛ в банке данных были рассчитаны разные параметры изображения в АЧТ, и для каждой конфигурации этих параметров был рассчитан коэффициент подавления фона:

$$Q = \varepsilon_\gamma / \sqrt{\varepsilon_{proton}}$$

где ε_γ и ε_{proton} — доля событий, классифицированных как гамма-события из выборок истинных гамма-событий и протонных ливней соответственно. Для исследования изображений АЧТ используются стандартные параметры Хилласа [35].

Оптимальные параметры неизображающих детекторов должны сочетаться с параметрами АЧТ, это три исследуемых параметра: первоначальная энергия частицы, положение оси ливня и направление ШАЛ. Оптимальный способ совмещения этих двух групп детекторов — изображающих и неизображающих — заключается в включении в процедуру гамма-разделения.

Как следует из зависимости расстояния от телескопа до ядра, эффективная селекция гамма-ливней возможна до ~ 450 м в гибридной установке при использовании только одного телескопа. Эта ситуация разительно отличается от автономного АЧТ, когда расстояние эффективного выделения гамма-ливней является $\sim 100-150$ м. Поэтому расстояние между двумя и более АЧТ (при их наличии) как частями гибридной установки может быть значительно больше, чем в стереоскопической системе АЧТ. В частности, предполагаемое местонахождение второго АЧТ в ТАЙГЕ предполагается на расстоянии ~ 300 м от первого.

Согласно планам на 2021-2023 годы было запланировано развернуть дополнительно около 40 оптических станций HiSCORE (100 станций на площади 1 км²) и установить четыре монтажки АЧТ. В настоящее время в ОИЯИ идет изготовление пятого АЧТ с целью его

установки в Тункинском районе после общих комплексных механических испытаний в цехе ОИЯИ. Планируется установить этот телескоп в июле-августе 2023года в Тунке.

2021.

1. Моделирование МК совместной работы телескопа АЧТ и широкоугольной установки Tunka-HiSCORE и оптимизированный подход к подавлению фона в событиях селекции из гамма-излучения.

2. Провести мониторинг наиболее ярких источников гамма-излучения прототипом обсерватории TAIGA в гибридном режиме (совместное наблюдение HiSCORE и АЧТ). Модернизация программного обеспечения для анализа данных АЧТ.

3. Исследование гамма-излучения Крабовидной туманности в диапазоне энергий 2 – 10 ТэВ (при автономной работе телескопа) и подтверждение тем самым корректности методик телескопа и обработки данных. Наблюдение ярчайших внегалактических источников гамма-излучения МРК-421, МРК-501.

4. Ввод в эксплуатацию третьего АЧТ.

5. Изготовление зеркал для четвертого АЧТ (приобретены в Армении).

6. Проектирование, изготовление и испытания четвертой механики АЧТ в цехе ОИЯИ.

2022.

1. Сопоставительный анализ данных прототипа TAIGA и моделирования МК. Выбор оптимальное расстояние между АЧТ.

2. Поиск гамма-квантов с энергией более 30 ТэВ от источников Mrk-421 и Mrk-501 в гибридном режиме наблюдения.

3. Участие в сборе данных в Тунке и анализе данных.

4. Ввод в эксплуатацию четвертого АЧТ.

2023.

1. Участие в сборе данных в Тунке и анализе данных.

2. Мониторинг галактических источников гамма-излучения.

3. Поиск внегалактических EBL и аксионоподобных частиц на основе наблюдений высокоэнергетического края гамма-спектра от Mrk-421.

4. Подготовить детальный проект расширения прототипа до полноценной гамма-обсерватории TAIGA.

Сложности:

1. Согласно плану, бюджет проекта TAIGA составил 60 тыс. \$ на 2020 год для четвертого производства АЧТ. В марте 2020 г. было доступно ~ 30%. С таким бюджетом, как сейчас, выполнить наши планы будет невозможно без дополнительного финансирования.

2. В настоящее время доступно ~300 ФЭУ для четвертого АЧТ. Этого недостаточно и в настоящее время неизвестно, где будут получены дополнительные 300 ФЭУ.

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Полученные за последние три года результаты

За период с 2019 по 2022 гг, в период развертывания установки, проведено наблюдение и поиск высокоэнергичных гамма-квантов от 6 источников: 2-ух внегалактических: Маркарян 501 (Mrk501), Mrk421, 2-х пульсарных туманностей: Крабовидная туманность, DragonFly Nebula и остатка сверхновой Бумеранг G106.3+2.7, которая также содержит пульсарную туманность, как предполагается, образовавшуюся при том же взрыве сверхновой, как и остаток G106.3+2.7. Во всех этих источниках ожидалось обнаружить высокоэнергичное излучение в районе 100 ТэВ (кроме Mrk421). К настоящему времени удалось исследовать гибридным методом (АЧТ+HiSCORE) только источник Крабовидная Туманность, поскольку конуса станций HiSCORE направлены именно на этот источник.

Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого Атмосферного черенковского телескопа (АЧТ)

Гамма-источник в Крабовидной туманности наблюдался первым атмосферным черенковским телескопом в течении 150 часов в течение двух сезонов (2019-2020 и 2020-2021)

выделены 618 событий от гамма-квантов в энергетическом диапазоне 5-100 ТэВ. Уровень значимости такого числа событий на фоне заряженных космических лучей составляет 12 сигма (рис.1). Разработана методика восстановления энергии гамма-квантов по данным только одного атмосферного телескопа.

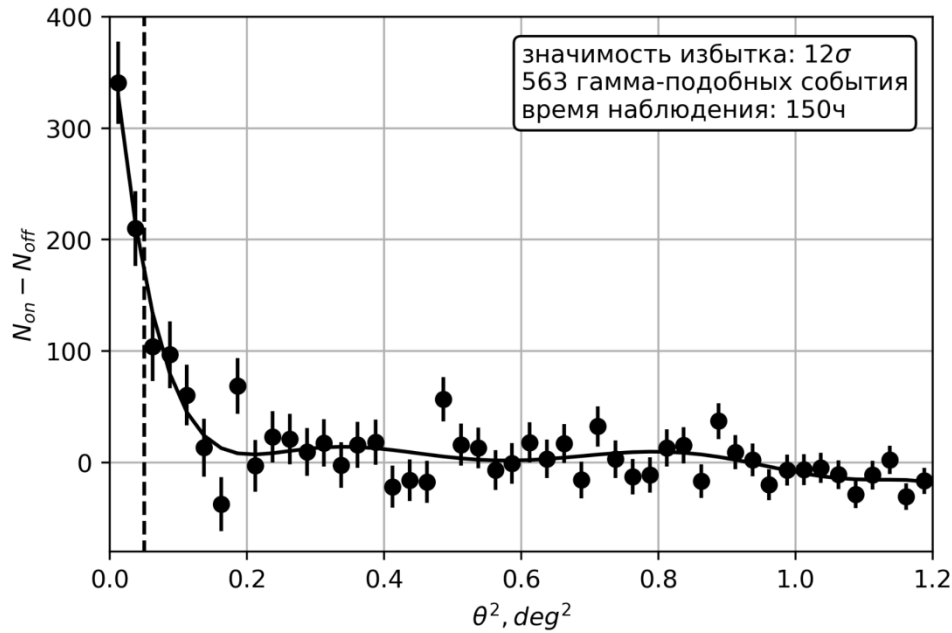


Рис.1 Распределение по параметру Θ^2 (Θ - угол между направлением на источник и направлением прихода данного события)

При восстановлении энергии частиц использовалась процедура, настроенная по МК расчетам, приводящая к **точности определения энергии около 30%**, и позволяющая восстановить энергетический спектр событий (рис.2). Полученный спектр частиц достаточно хорошо совпадает с мировыми данными в области от 5 до 100 ТэВ

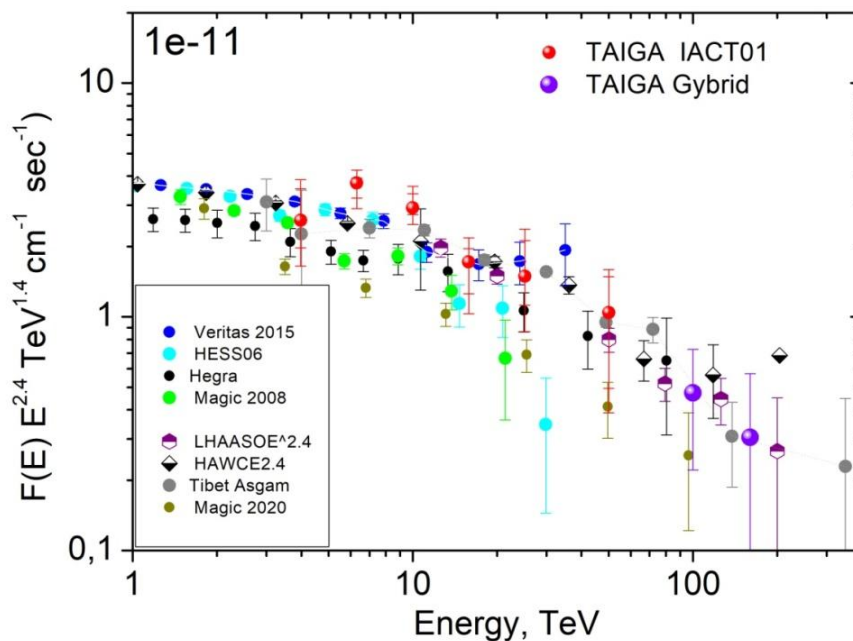


Рис.2. Восстановленный спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого телескопа эксперимента TAIGA в сравнении с результатами измерений других

обсерваторий за 150 часов наблюдения. Две последние точки получены по гибридным событиям (АЧТ01+HiSCORE).

Гибридные события при наблюдения Крабовидной туманности.

Общая статистика выбранных гибридных событий за два сезона наблюдения за «Крабом» составляет ~150 000 (АЧТ01 + HiSCORE) за время ~ 150 часов. Для каждого события определялся параметры Хилласа, рассчитанный как два набора параметров "On" и "Off" слежения за источником и слежение за фоном, а избыток находится после подавления фона адронов как разница этих двух выборок, также и спектры гамма-подобных ливней строятся как разница спектров "On" и "Off".

При анализе гибридных событий дополнительно включаются такие параметры как расстояние до оси ливня (Rtel), угол между восстановленным направлением ШАЛ и направлением на источник и восстановленные по данным установки TAIGA-HiSCORE энергии. Критерии подавления фона в гибридных событиях позволяют собирать события с очень больших расстояний – до 400 м. Поэтому в гибридных событиях эффективная площадь оказывается больше, чем при работе 1 телескопа, но пороговая энергия для гамма-квантов оказывается очень высокой – около 60-80 ТэВ из-за высокого энергетического порога регистрации станций TAIGA-HiSCORE. В анализе использовались данные только четверти установки, площадью 0.25 км². За 150 часов было выделено 6 событий гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ (рис.2). Таким образом, по данным всей установки TAIGA-HiSCORE и 3 телескопов, можно ожидать 20-30 событий с энергией выше 100 ТэВ от Крабовидной туманности за 150 часов наблюдения.

Спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности в стерео режиме

Наблюдения Крабовидной туманности в стерео-режиме проводились первыми двумя телескопами установки TAIGA-АЧТ с октября по февраль сезона 2020-21. Анализ подразумевает стандартный расчет параметров Хилласа для каждого события (относительно 7 положений фона и одного источника), а также расчет дополнительных параметров, необходимых для проведения стереоскопической реконструкции геометрии ШАЛ. За 36 часов наблюдения был получен сигнал со значимостью на уровне 5σ и восстановлен энергетический спектр (рис 3), находящийся в хорошем согласии с данным высококорных установок HAWC и LHAASO

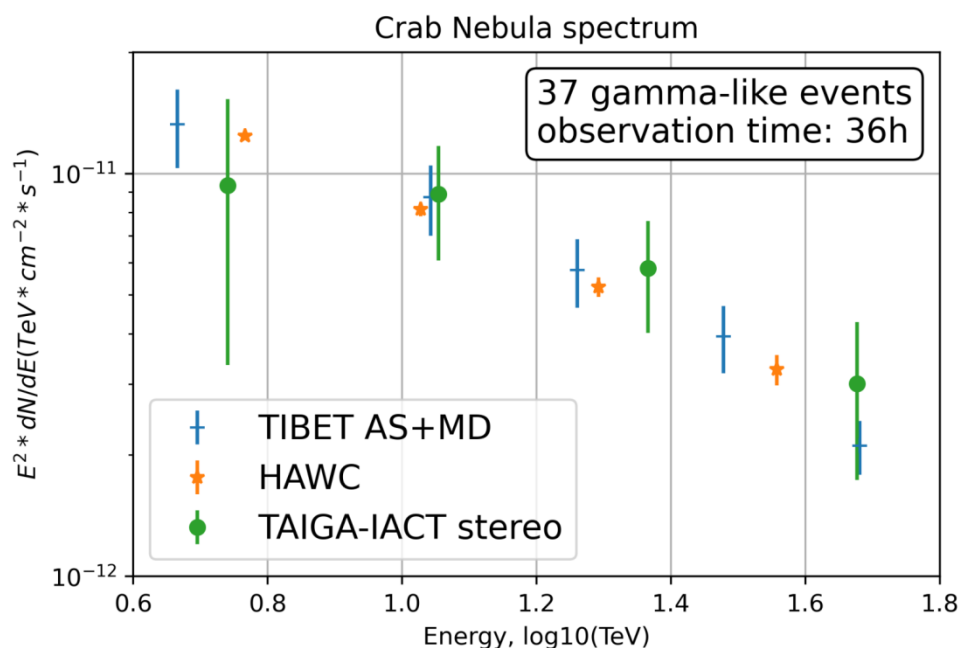


Рис.3 Энергетический спектр гамма-квантов, восстановленный стерео-методом.

Гамма -кванты от блазаров Mrk421 и Mrk501

Первый внегалактический источник от которого был зарегистрирован сигнал в эксперименте TAIGA - это блазар, расположенный недалеко от Земли ($Z \sim 0.03$) с переменной интенсивностью, хорошо измеренный в ТэВ-ном диапазоне энергий, но от него не ожидалось высокоэнергичных событий более 20 ТэВ. Экспозиция Mrk421 в Тункинской долине в сезоне 2019-2020 составила с ноября по конец февраля 62 часа с хорошей погодой. На Рис. 4 представлено распределение по α для 'On' событий и для 'Off' событий с шагом 4° , отобранных по оптимальным критериям

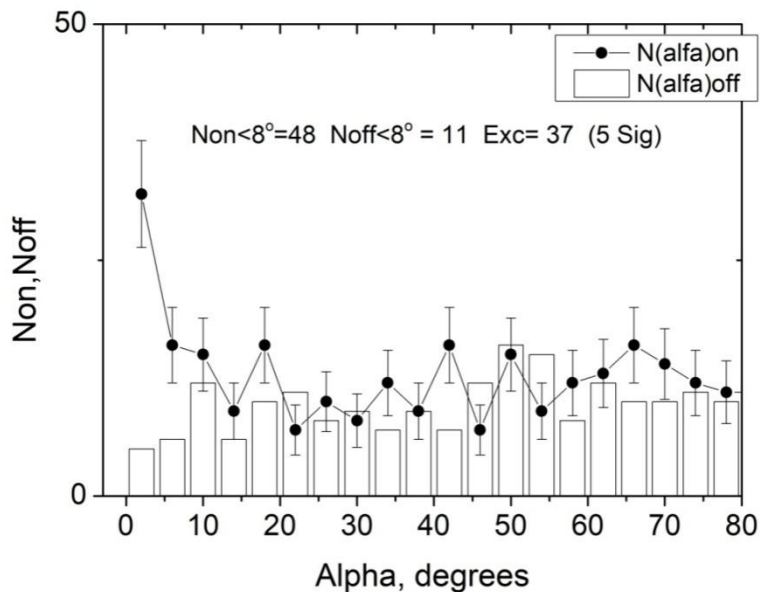


Рис. 4. Распределение по параметру α для 'On' и для 'Off' событий от блазара Mrk421, отобранных по следующим критериям : Size>172 ф.э.; dist= $0.5^\circ - 1.25^\circ$, $0.024^\circ < \text{Width} < 0.068^\circ \times \lg \text{Size} - 0.045^\circ$, Length<math>0.31^\circ, Con2>0.44.

В области $\alpha < 10^\circ$ зарегистрировано 37 ливней со значимостью 5.77σ , а в области $\alpha < 6^\circ$ Exc=141 событие со значимостью около 5σ , при пороговой энергии около 3 ТэВ. Наблюдение проводилось по данным работы АЧТ01.

Блазар Mrk 501, находится на расстоянии от Земли $z=0.034$. К настоящему моменту обработаны и проанализированы данные 2019-2020 с марта по май. Полное время наблюдений в этот период составляло ~ 27 часов. Для выделения гамма-подобных ливней применялся подход, протестированный на регистрации излучения от Крабовидной туманности. Избыток составляет около 30 событий, но значимость не высокая - около 2.5 сигма.

Пульсарная туманность Dragonfly

Это пульсарная туманность в области известного созвездия Лебедя, в котором идет процесс звездообразования. Туманность создана и подпитывается энергией вращения пульсара PSR J2021+3651. Она характеризуется высокоэнергичным ТэВ-ным излучением, обнаруженным ранее VERITAS и HAWC: в области 10 ТэВ интенсивность излучения сравнима с излучением Краба, но экспоненциально убывает при энергии более 37 ТэВ, хотя наблюдаются и события в области 100 ТэВ. Поэтому этот источник рассматривается как один из наиболее перспективных. Обработка данных этого источника проводилась в стерео-режиме. Полное часов наблюдения 40. Суммарно по двум выборкам с разными углами зарегистрировано 144 ON-события и 100 OFF-событий, избыток составил 44 события, а с учетом выбора 5 фоновых точек, это соответствует значимости $3,37$ сигма.

Поиск гамма-квантов высокой энергии от источника Boomerang

За 3 сезона наблюдения 2019- 2022 годов набрано около 140 часов наблюдения источника для АЧТ01 и около 100 часов АЧТ02. Предполагается, что пульсарная туманность, связанная с пульсаром J2229+6114, и остаток сверхновой (SNR) G106.3+2.7 являются результатом одного и того же взрыва сверхновой, поскольку вся структура расположена на краю пузыря с расширенными областями молекулярного газа внутри и размером около 800 парсек, а взрыв сверхновой произошел в области активного звездообразования. В экспериментальном плане интересен ее спектр, измеренный в экспериментах Милагро и НАВС, интенсивность этого источника в области 100 ТэВ сопоставима с интенсивностью от Крабовидной туманности. Однако, в области около 5-10 ТэВ она на порядок ниже. По сделанным оценкам должно было наблюдаться порядка десятка частиц в высокоэнергичной области.

Монте-Карло расчеты отклика телескопа и их экспериментальная калибровка

В эксперименте TAIGA моделирование ШАЛ выполняется с помощью пакета CORSIKA версии 7.35 с моделью QGSJET-II-04 для высокоэнергетических взаимодействий и GHEISHA-2002d для низкоэнергетических взаимодействий. Подробности можно найти в [16]. С помощью CORSIKA определялся набор параметров изображений, позволяющий наиболее эффективно подавить фон и зарегистрировать гамма-кванты. Один из наиболее важных для восстановления энергии ШАЛ параметр - коэффициент перехода от числа фотоэлектронов в изображении size к потоку фотонов I (фот/м²), падающих на зеркала телескопа, $R = \text{size}/I$. В расчетах Монте-Карло оценки этого коэффициента (R_{M-K}) связаны с рядом неопределенностей (отражение света от зеркал, учет прохождения света через входное окно камеры, отражение света от конусов Винстона, квантовая чувствительность фотоумножителей и т.д), поэтому необходима независимая оценка этой величины. В эксперименте TAIGA величина отношения size к потоку фотонов ($R_{\text{эксп}}$) получена по гибридным событиям, зарегистрированным телескопом и станциями HiSCORE. Для таких событий известна энергия E , восстановленная по плотности фотонов на расстоянии 200 м от оси ШАЛ, и функция пространственного распределения фотонов (ФПР), восстановленная по данным станций HiSCORE, с точностью около 10% [17]. По ФПР можно получить число фотонов в точке положения телескопа, сравнить с числом фотоэлектронов в изображении, регистрируемом телескопом, и получить величину отношения $R_{\text{эксп}} = \text{size}/I$. Коэффициент, полученный по банку событий оказался равным $R_{\text{эксп}} = 0.56 \pm 0.03 + 0.07 \text{ сист.}$ В Монте-Карло расчетах $R_{M-K} = 0.63 \text{ р.е.} \pm 0.03$, что в пределах ошибки согласуется с экспериментальным значением и подтверждает правильность выполненного моделирования. Пример гибридного события приведен на рис. 5 А. Черные точки – экспериментально измеренные ФПР по станциям HiSCORE, сплошная линия – аппроксимация этой ФПР, квадрат – поток света в точке расположения телескопа. Распределение по коэффициенту $R_{\text{эксп}}$ приведено на рис. 5 Б.

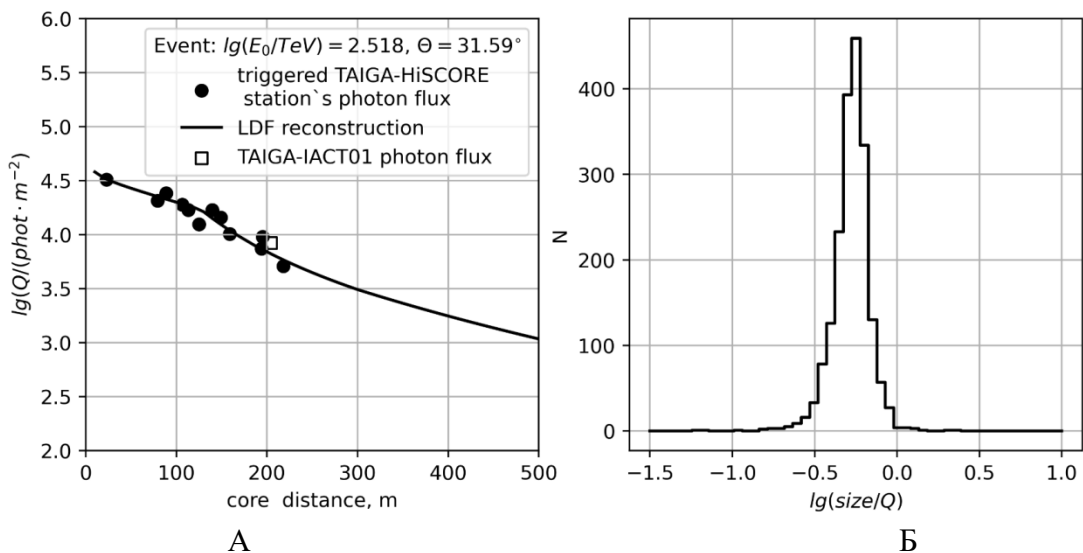


Рис.5

А: Пример гибридного события. Черные круги – экспериментальные точки ФПР по станциям HiSCORE, сплошная кривая – аппроксимация этой ФПР, черный квадрат – поток света в точке расположения телескопа, пересчитанный из события зарегистрированного телескопом с коэффициентом $R_{m-k}=0.63$

Б Распределение по коэффициенту $R_{\text{экс}}$

3.Программа развития астрофизического комплекса

Ближайшее развитие астрофизического комплекса TAIGA связано с созданием еще двух атмосферных черенковских телескопов и существенное увеличение площади мюонных детекторов (установка TAIGA-MUON).

Один из недостатков гибридного подхода в существующем варианте астрофизического комплекса является существенное различие между угловой апертурой черенковских телескопов и апертурой установки TAIGA-HiSCORE, приводящие к возможности наблюдения в данный момент времени только один источник. Для исправление этой ситуации, планируется создать малые черенковские телескопы (SIT) с угловой апертурой 25-30 градусов и энергетическим порогом 80-100 ТэВ. Совместная работа таких телескопов и установки TAIGA-HiSCORE почти в 10 увеличит число гибридных событий, для которых возможно выделение гамма-квантов на фоне событий от космических лучей. Дальнейшее развитие астрофизического комплекса, скорее всего в другом месте, связано с расширением установки TAIGA-HiSCORE на площадь в 10 раз большую и дополненную малыми изображающими черенковскими телескопами.

Черенковские телескопы

В ОИЯИ изготовлена механическая часть четвертого черенковского телескопа, отправлена и смонтирована на полигоне. Три телескопа работают в плановом режиме. Выполняются плановые работы по изготовлению модернизированного пятого телескопа.



Рис 6. Первый, четвертый и третий телескопы на полигоне в Тунгинской долине.



Рис 7. Второй телескоп на полигоне.

Изготовлены и отправлены недостающие зеркала. Общие характеристики зеркала представлены в таблице.

Таблица. Общие характеристики зеркала

Название параметра	Значение по ТЗ	Измеренное значение
Радиус кривизны, [мм]	9500	9494±5
Диаметр зеркала, [мм]	600	600±1
Фокусное расстояние [мм]	4750±50	4747±5
Толщина зеркала, [мм]	15	14,7 ^{+0,1} _{-0,2}
Диаметр светового пятна на половине значения интенсивности, [мм]	4,75	1,0
Материал отражающего покрытия	алюминий с защитным слоем	алюминий с защитным слоем
Коэффициент отражения в диапазоне 300-600 нм, [%]	не менее 80	не измерялся

Для всех зеркал были проведены измерения фокусного расстояния и распределение энергии в пятна для центра кривизны. В качестве источника света был использован полупроводниковый лазер с длиной волны излучения -640 нм. Ниже приведены данные измерения для зеркала с номером 11.

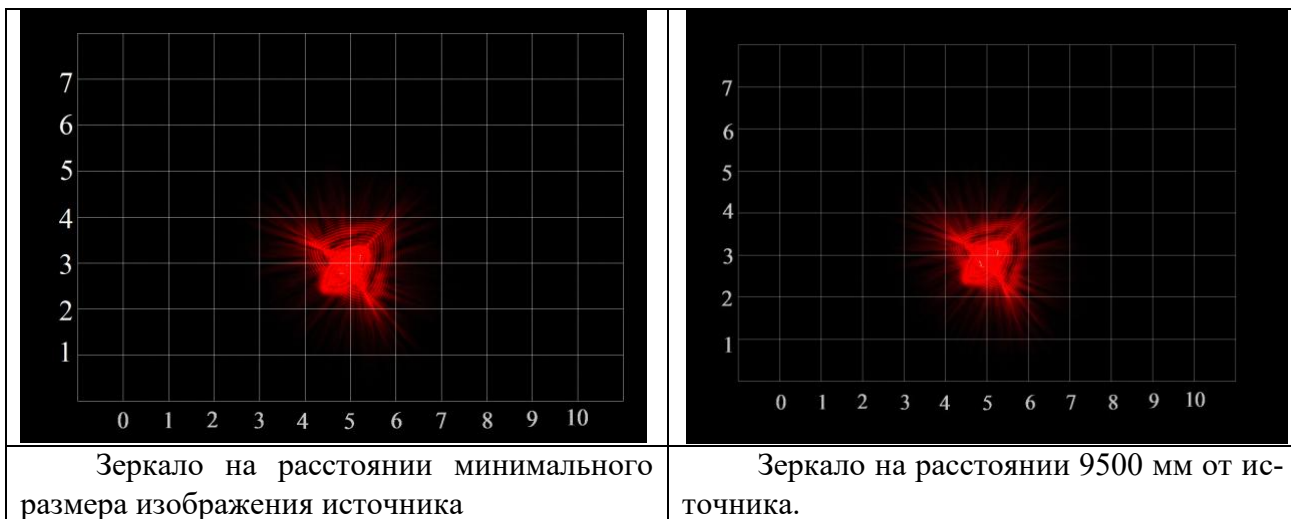


Рис 8. Распределение интенсивности светового пятна на изображении точечного источника в центре кривизны зеркала.

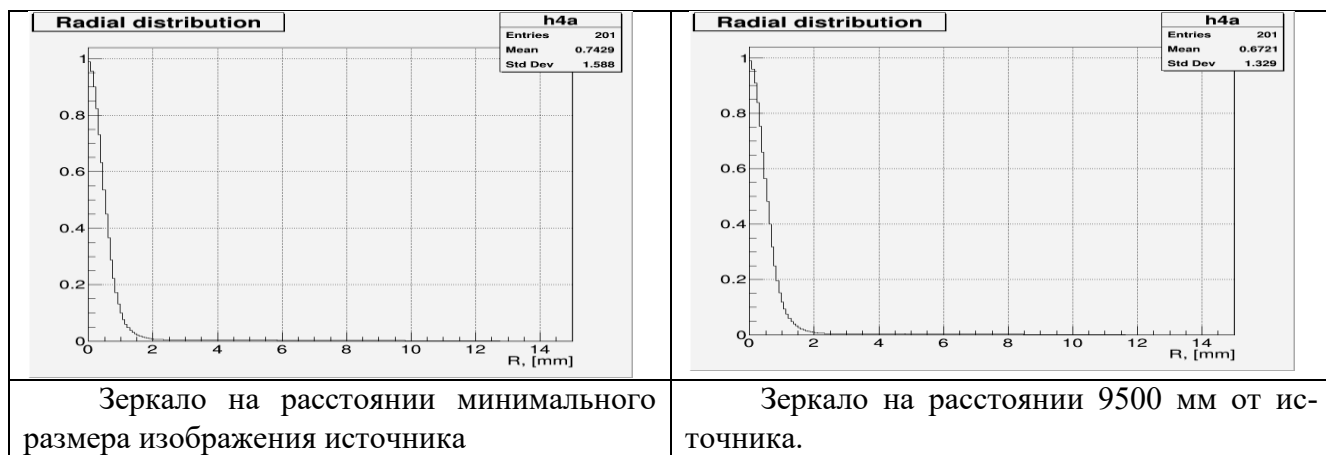


Рис 9. График распределения энергии в изображении источника в центре кривизны зеркала.

Широкоугольный телескоп

В рамках работы по перспективным направлениям по расширению проекта TAIGA ОИЯИ участвовал в работе по обсуждению моделированию и изготовлению прототипа широкоугольного черенковского телескопа. Использование таких телескопов совместно с распределенными детекторами позволит иметь большую статистику совместных событий в области высоких энергий за счет большого поля зрения телескопа. Параметры прототипа телескопа представлены в таблице 1.

Таблица 1.

	значение
Линза	
Диаметр линзы, мм	820
Фокусное расстояние, мм	3666±100
Размер поля зрения максимальный, градусы	±7,5
Размер поля зрения максимальный, мм	940
Размер поля зрения используемый, мм	600
Положения телескопа, ° от вертикали (телескоп ориентирован на Юг)	0, 35, 90
Камера	
Поле зрения одного пикселя	~ 0.4 °
Количество пикселей	1000 - 1200

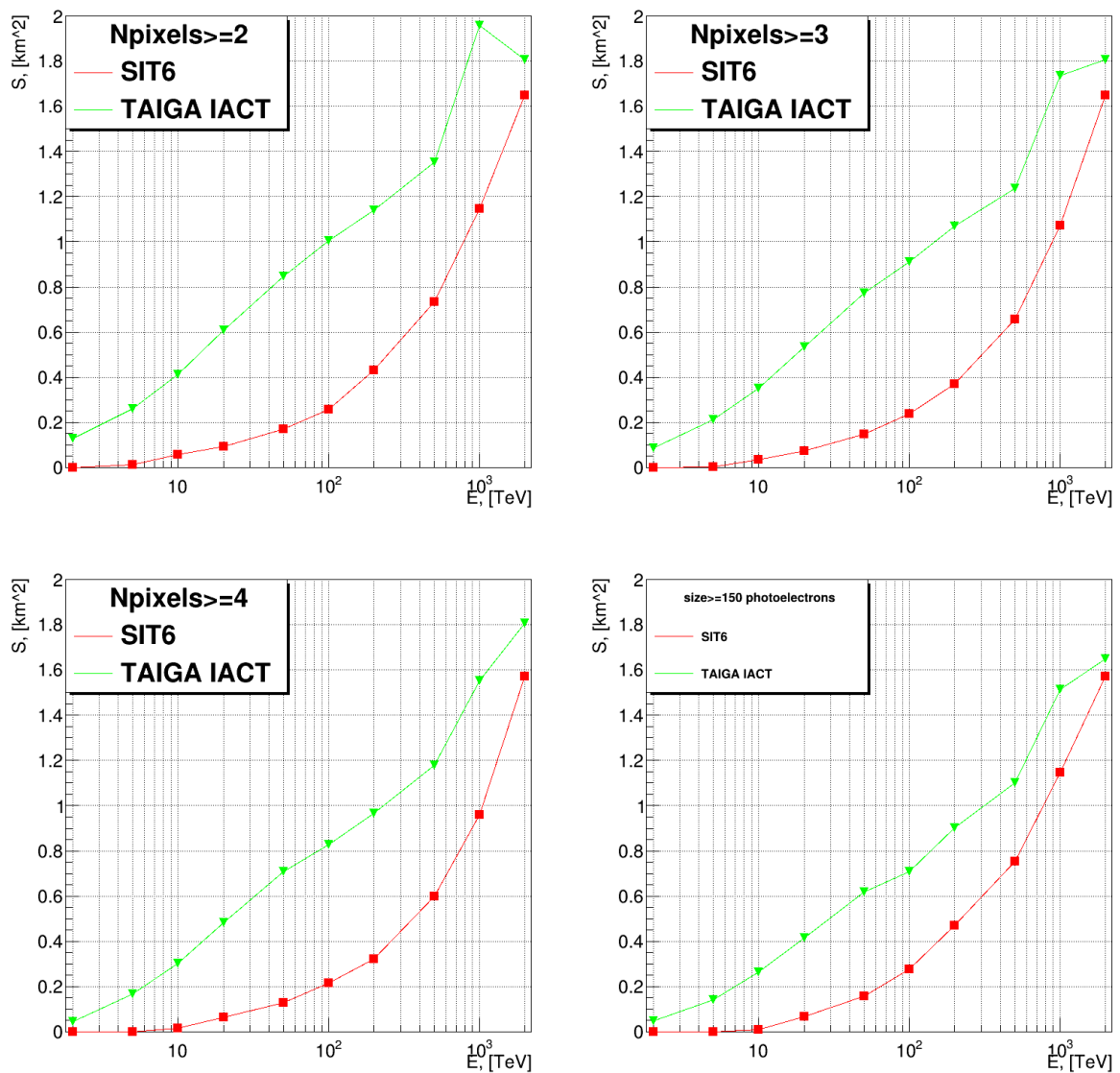


Рис 10. приведены графики сравнения эффективной площади регистрации гамма-квантов для одного телескопа ТАЙГИ и для линзового телескопа с кремниевыми фотоумножителями (SIT6) для полной матрицы фотоумножителей (2791 штук). $N_{\text{pix}2}$ - примерно по уровню триггера (2 пикселя выше 10 фотоэлектронов). $N_{\text{pix}4}$ и $\text{size}150$ - 4 пикселя и 150 фотоэлектронов суммарно в событиях, которые уже вполне можно обрабатывать.

Можно отметить, что работать такой телескоп будет совместно со станциями HiSCORE, энергетический порог которых около 70 ТэВ. Таким образом видно, что в области энергий совместной работы эффективная площадь перекрывает десятки станций и может помочь анализу ШАЛ наличием пространственной картины в нескольких пикселях.

Линза для широкоугольного телескопа изготовлена в ОИЯИ. Распределение энергии в пятне в центре поля зрения и на краю показано на рисунках ниже.

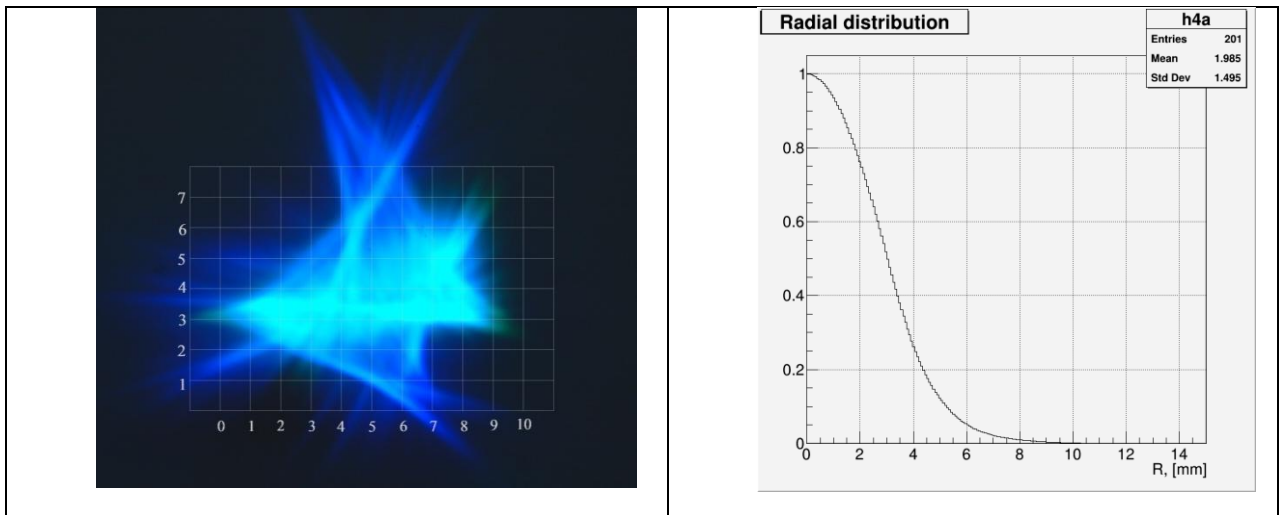


Рис. 11. Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №1 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

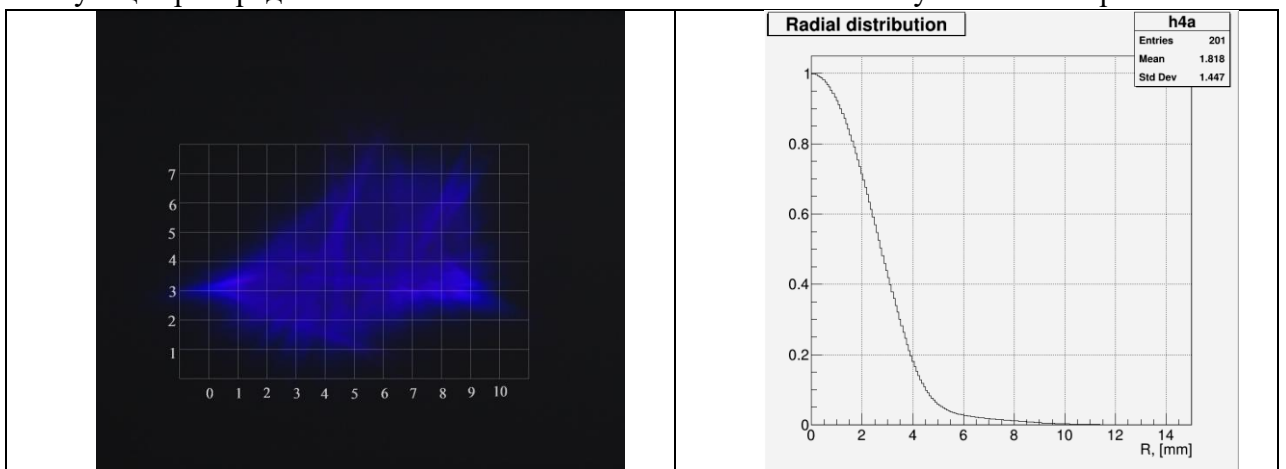


Рис. 12. Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №2 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

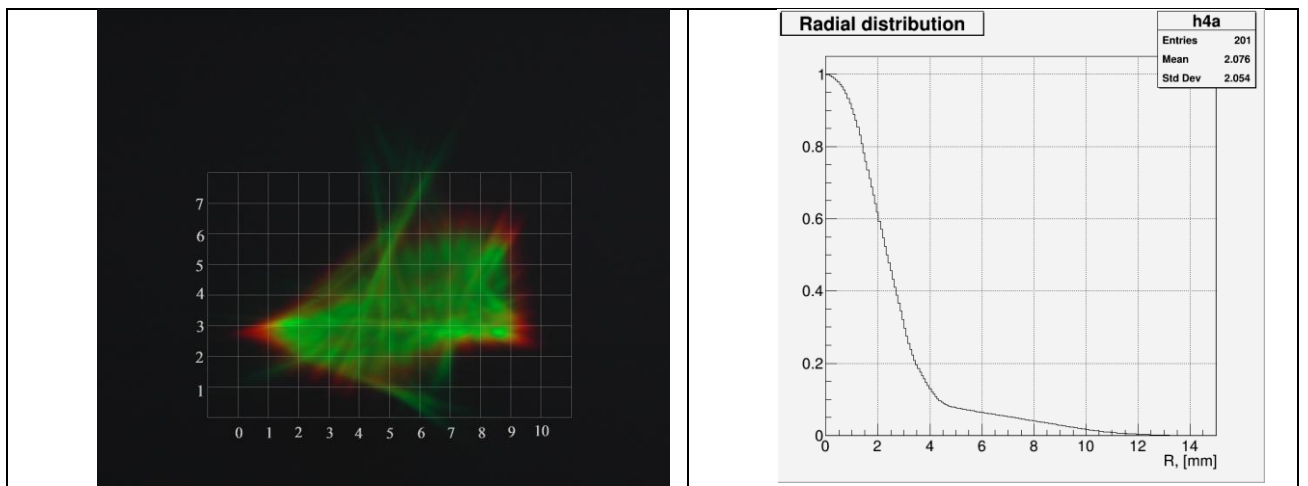


Рис. 13. Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №1 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

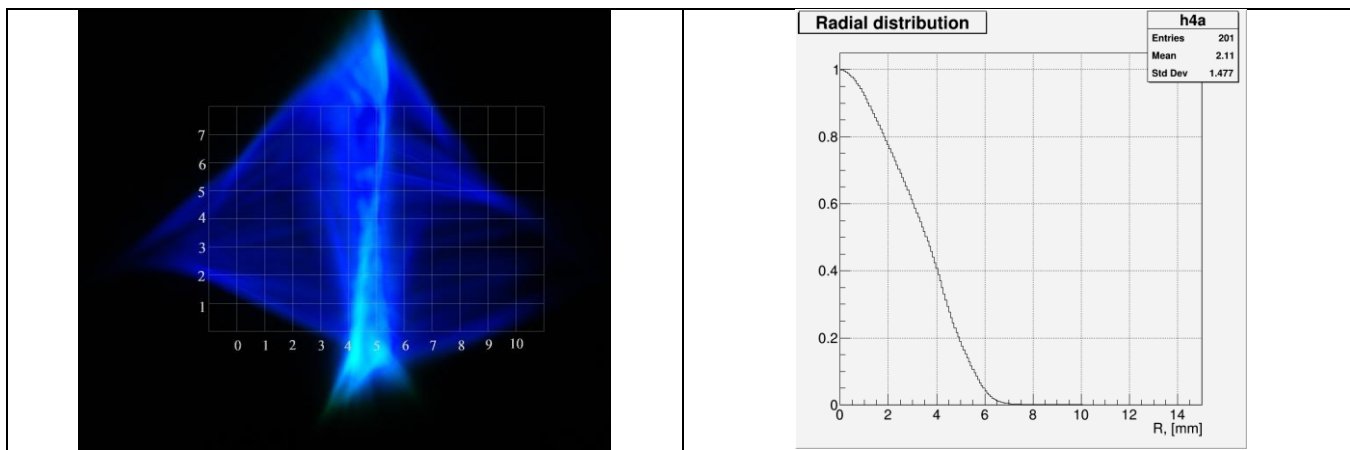


Рис 14. Линза под углом $7,5^\circ$ на расстоянии минимального размера изображения источника №1 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

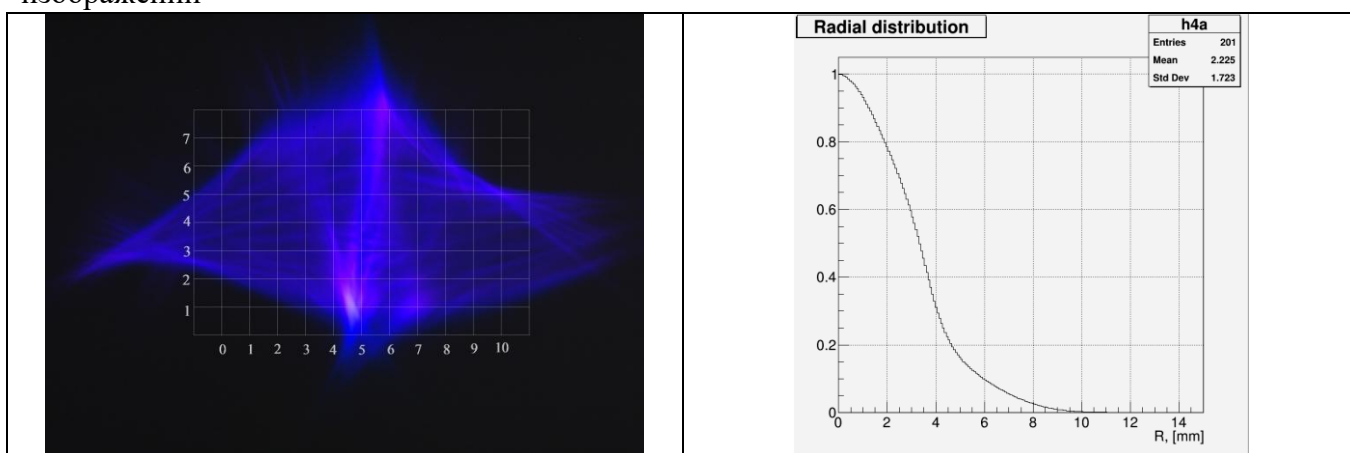


Рис 15. Линза под углом $7,5^\circ$ на расстоянии минимального размера изображения источника №2 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

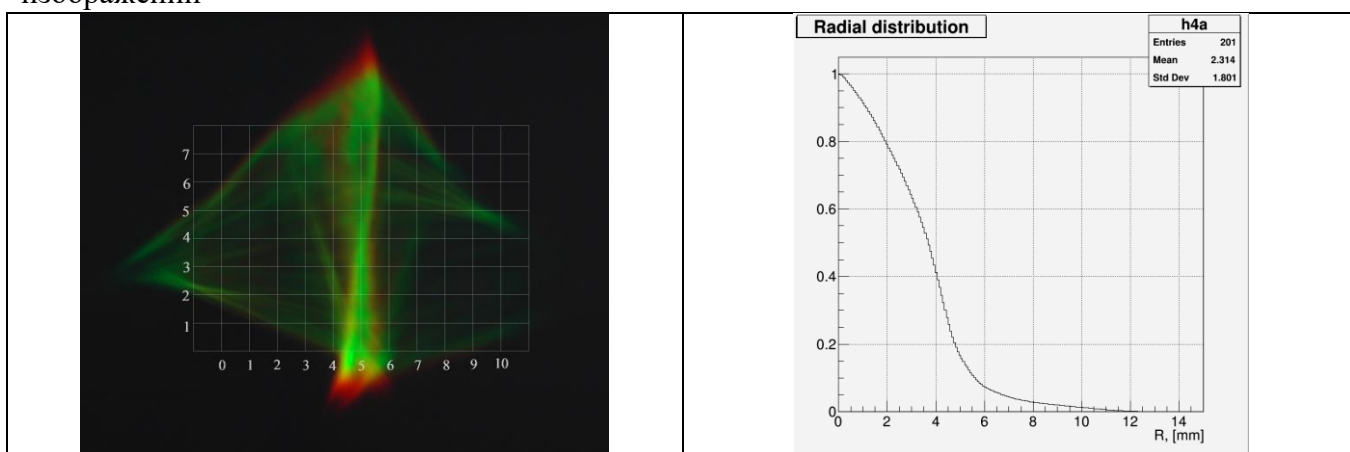


Рис 16. Линза под углом $7,5^\circ$ на расстоянии минимального размера изображения источника №3 и соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

Для оперативного изготовления был разработан проект телескопа с возможностью изготовления на полигоне на месте проведения наблюдений. Прототип широкоугольного линзового черенковского телескопа успешно изготовлен и установлен на полигоне.

В настоящее время ожидается изготовление камеры и телескоп может приступить к работе.



Рис. 17. Металлический каркас механической части телескопа



Рис. 18. Ферма для камеры и оптических элементов .

Изготовлены и отправлены недостающие зеркала для Телескопов. Для каждого зеркала были проведены измерения оптических параметров и изготовлены паспорта.

Библиография

1. F.Aharonian (HESS Collaboration)//Astroparticle Physics 34(2011) 738-747
2. V.Acciari (VERITAS Collaboaration) Ap.J Letters 730 (2011) L20
3. Albert et al (MAGIC)// Astrophys.J.639:761-765,2006
4. Abdo A.A. et al.,(Milagro) 2007, ApJ 664, L91
5. A.Abdo et al. (Milagro)//arxiv: 1403.0161
6. N. Budnev et al. (TAIGA Collaboration), Jour.Phys: Conf. Series 718 052006 (2016)
7. Budnev N. et al., (TAIGA Collaboration), NIMA 845, 384 (2017)
8. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, L.Kuzmichev et al. Astropart. Phys., 56:42, 2014.

9. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv: 1602.07600
10. B.S.Acharya et al. (CTA collaboration) Astroparticle Physics 43 (2013) 3-18;
11. Schioppa E.J. et al. [CTA SST-1M Project Collaboration] // arXiv:1508.06453.
12. G.Sinnis. Nucl.Instrum.Meth.A623:410-412,2010
13. Home pager of HAWC: www.hawc-observatory.org
14. HAWC collaboration. Astroparticle Physics 50-52(2013) 26-32
15. Tibet AS γ (the Tibet air-shower array) [15]
16. M. Peresano, R. Mirzoyan, I. Vovk, P. Temnikov et al. for the MAGIC Collaboration, PoS(ICRC2019)759
17. K. Malone for the HAWC Collaboration PoS(ICRC2019)734
18. K. Kawata for Tibet AS gamma Collaboration, PoS(ICRC2019)712
19. Q.An et al et// Nucl.Instrum.Meth.A644:11-17,2011
20. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv: 1602.07600
21. R. Mirzoyan et al., Nuclear Instr. And methods A351 (1994) 513-526. DOI: 10.1016/0168-9002(94)91381-1.
22. I.I. Yashin et al. (TAIGA Coll.), Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 032037.
23. I.I. Yashin et al. (TAIGA Coll.), PoS(ICRC2015)986.
24. H. Anderhub et al., JINST 8 (2013) P06008 [arXiv:1304.1710].
25. A. Nepomuk Otte, D. Garcia, T. Nguyen and D. Purushotham, Nucl. Instrum. Meth. A846 (2017) 106 [arXiv:1606.05186].
26. M. Heller et al., PoS(ICRC2019)694 (2019) .
27. J. A. Aguilar et al., Nucl. Instrum. Meth. A830 (2016) 219.
28. P. Rajda et al., PoS(ICRC2015)931 (2015) [arXiv:1508.06082].
29. V.Prostin et al. (Tunka Collaboration) NIM A 756, 94 (2014)
30. N.Lubsandorzhev et al., PoS(ICRC2019)729.
31. Y. Sagan et al., PoS(ICRC2019)776
32. E.B. Postnikov et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, Vol. 81, No. 4, pp. 428-430
33. E.B. Postnikov, A.A,Grinyuk et al. Proceedings of ISVHECRI-2016
34. Heck D., Knapp J., et al. // Report FZKA 6019. Forschungszent. Karlsruhe. 1998.
35. Hillas A.M. // Proc. 19nd ICRC. La Jolla. NASA Conf. Publ., 1985. V. 3. P. 445.
36. Li, T.-P., & Ma, Y.-Q. 1983, ApJ, 272, L317.
37. L.Kuzmichev et al., NIM A 952 (2020) 161830.
38. M.Heller, A.N.Borodin et al. PEPAN Letters (2020 г.)

Руководитель темы / КИП

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 202_г.

Руководитель проекта 02-2-1125-2011/2023 (шифр проекта) / подпроекта КИП

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 202_г.

Экономист Лаборатории

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 202_г.