

Астрофизический комплекс TAIGA – статус, результаты, планы

».

Л. Кузьмичев (НИИЯФ МГУ) от коллаборации TAIGA

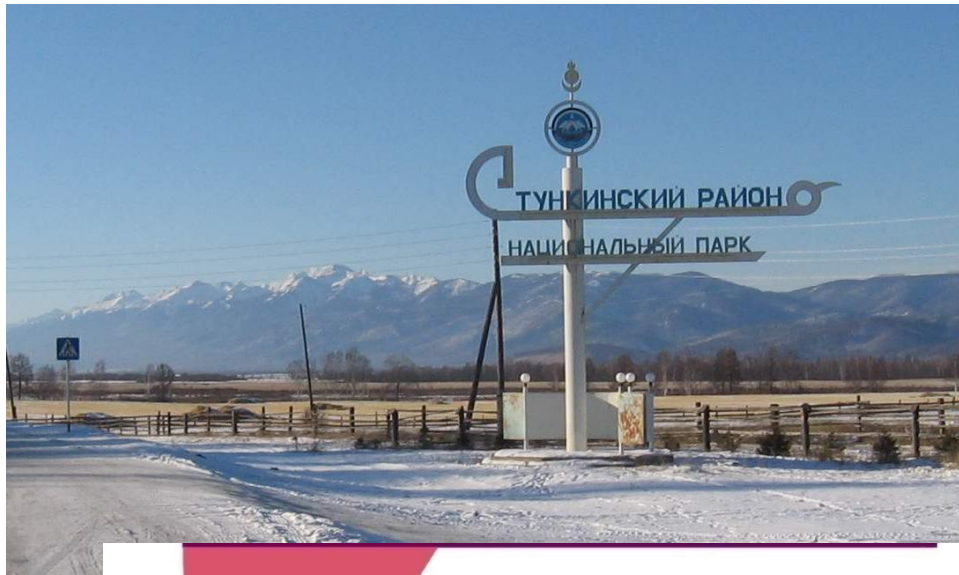
38 ВККЛ

05.07 2024

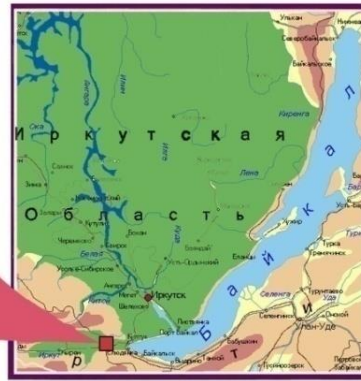
План доклада

1. Астрофизический комплекс TAIGA
2. TAIGA- Космические лучи
3. TAIGA- Гамма-астрономия
4. Проект TAIGA-100

1.Астрофизический комплекс TAIGA-1 (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma-ray Astronomy)



51° 48' 35" N
103° 04' 02" E
675 m a.s.l.



TAIGA-коллаборация

1. АлГУ (Барнаул)
2. ИГУ (Иркутск)
3. ИЗМИРАН
4. ИЯИ РАН
5. ИЯФ (Новосибирск)
6. НИИЯФ МГУ
7. НИЯУ МИФИ
8. ОИЯИ (Дубна)
9. Туринский университет (Италия)
10. Физтех им. А.Ф.Иоффе (С-Петербург)

Астрофизический комплекс TAIGA (50 км от озера Байкал)



Мюонные
детекторы



Tunka-133



Tunka-133

Tunka-Grande

TAIGA-MUON

TAIGA – HiSCORE

TAIGA -IACT

10^{18} eV

10^{15} eV

10^{12} eV

Космические
лучи

Гамма-астрономия



Астрофизический комплекс TAIGA площадь около 3 км²

Регистрация космических частиц высоких энергий по коротким световым вспышкам от этих частиц в атмосфере

Телескопы для регистрации изображения от световой вспышки

ФЭУ

Широкоугольные интегральные детекторы световых вспышек. Таких детекторов больше 200



Установки для гамма-астрономии

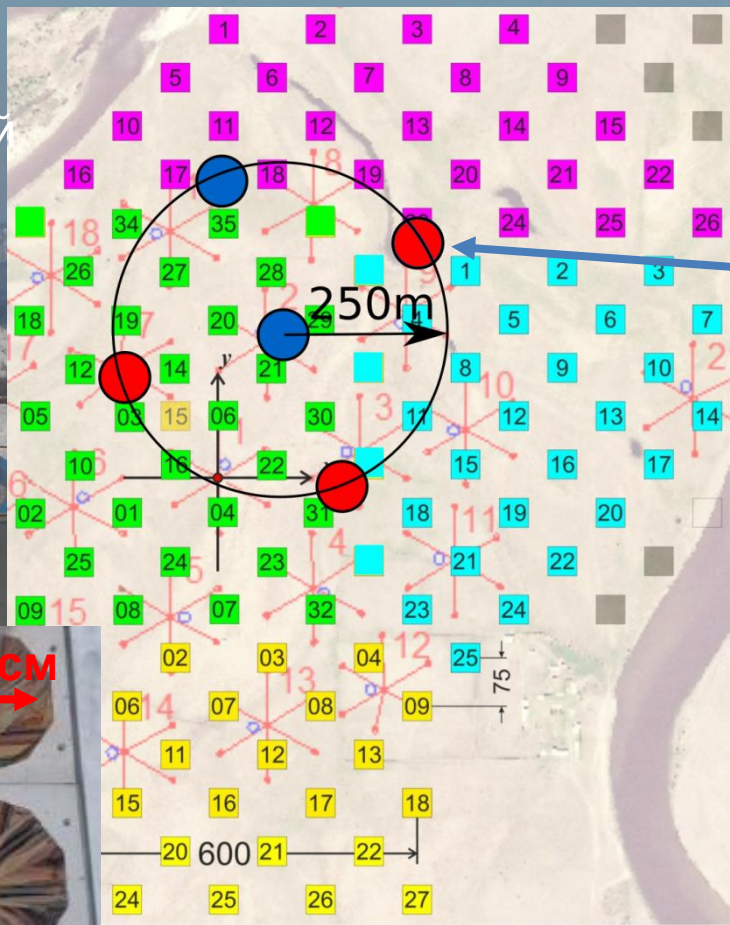
Эффективная площадь $\sim 1 \text{ км}^2$

TAIGA-HISCORE:

120 Черенковских станций

Угловое разрешение $\sim 0.2^\circ$

Порог 50-60 ТэВ



TAIGA-IACF

Зеркало – 10 м^2

Камера -600 ФЭУ

Порог 2-3 ТэВ

ФЭУ
 $\varnothing 20 \text{ см}$

FoV $\sim 0.6 \text{ стер}$

40 см

Атмосферный черенковский телескоп



Area of mirrors - 9.6 m² (34mirrors)

Focus length 4.75 m

FOV **9.6°**

pixel FoV 0.36°

600 pixels(pmt XP1911 Ø 19 мм)

PSF ~0.1°

CCD for checking telescope pointing direction.

Большое поле зрения телескопа

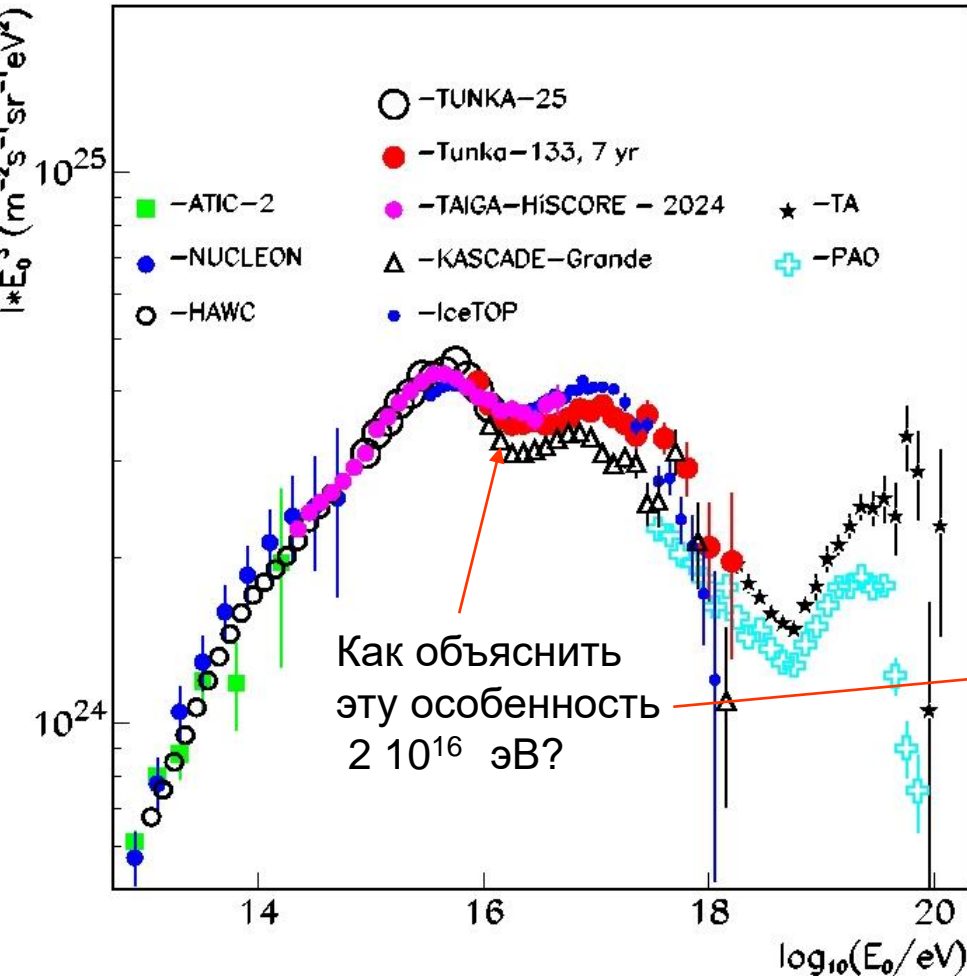
– регистрация ШАЛ с больших расстояний (до 500 м)

эффективная площадь ~ 0.2 км² для 10 ТэВ

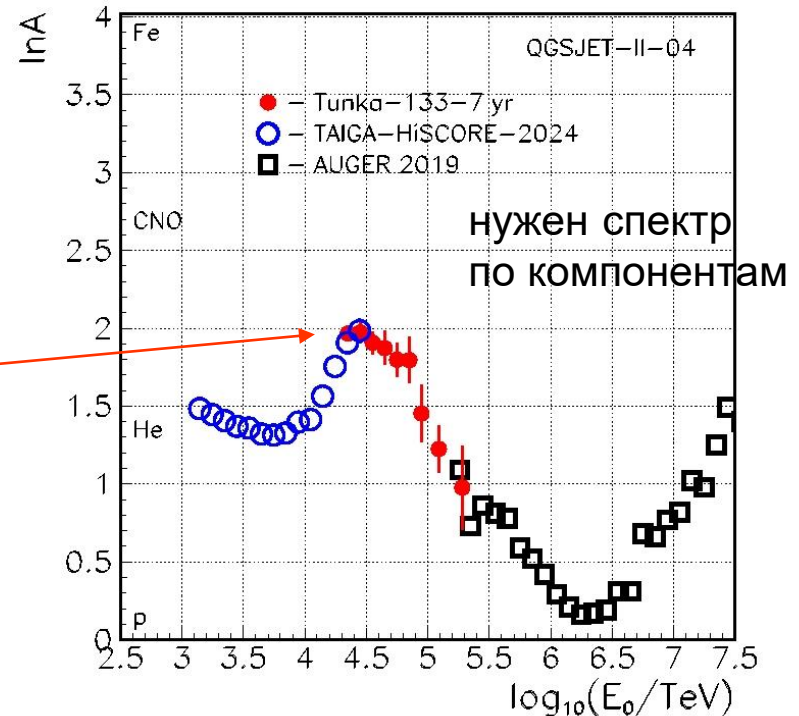
2. Космические лучи

TAIGA-Космические лучи-1

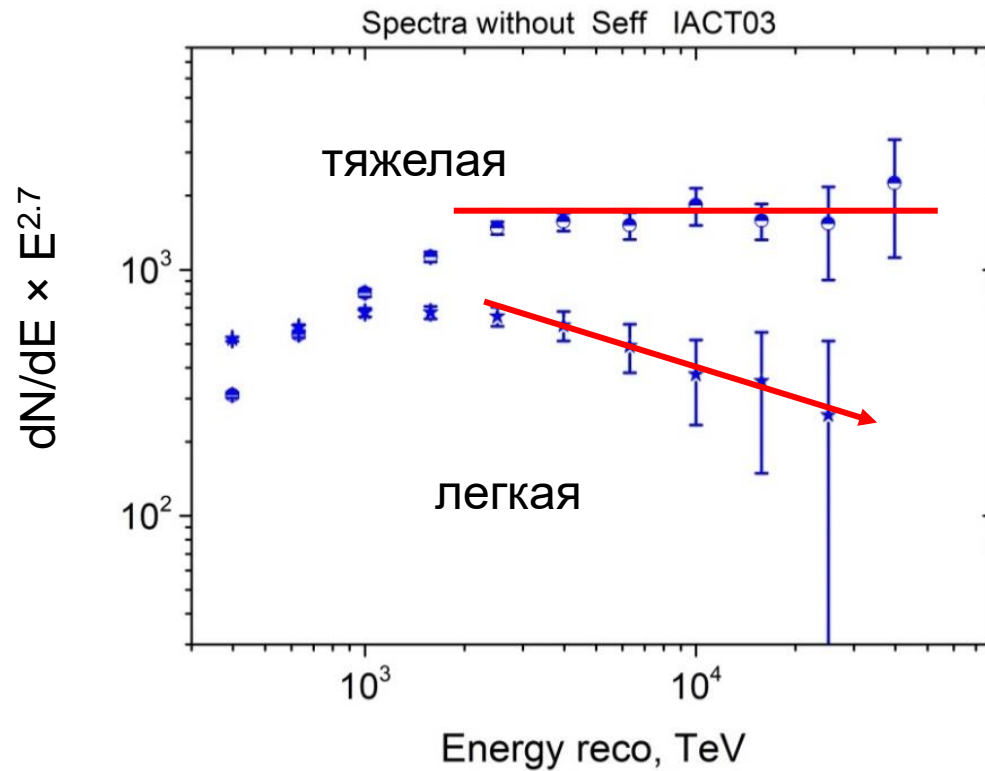
Энергетический спектр и массовый состав от 30 ТэВ до 10^{18} эВ по черенковскому свету



1. Оценка спектра легкой компоненты в области 0.2 – 10 Пэ в гибридном методе (Л.Свешниковой 01.07)
2. Спектр и состав космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE (В.Просина 01.07)



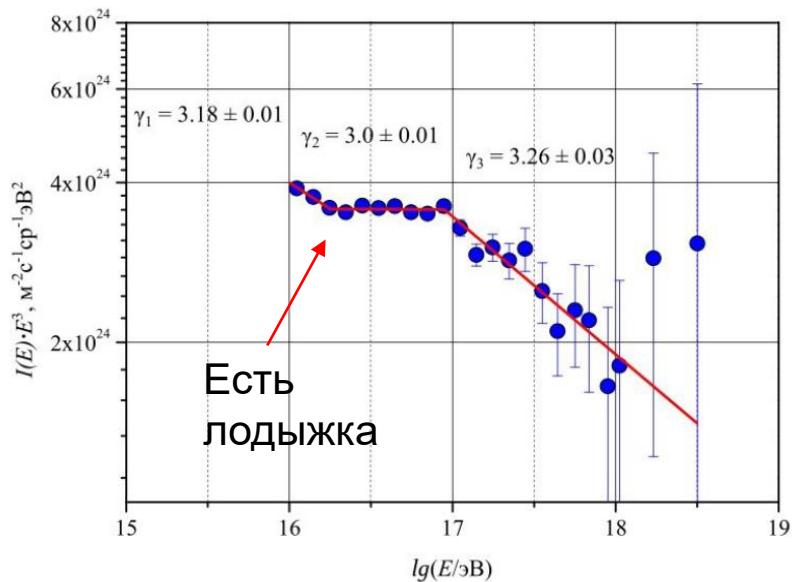
Разница в спектра легкой и тяжелой компоненты КЛ по параметрам Хилласа (без деления на $Seff$)



TAIGA-Космические лучи-2

Энергетический спектр и массовый состав от 10^{16} до 10^{18} эВ по частицам Tunka-Grande и TAIGA-Muon

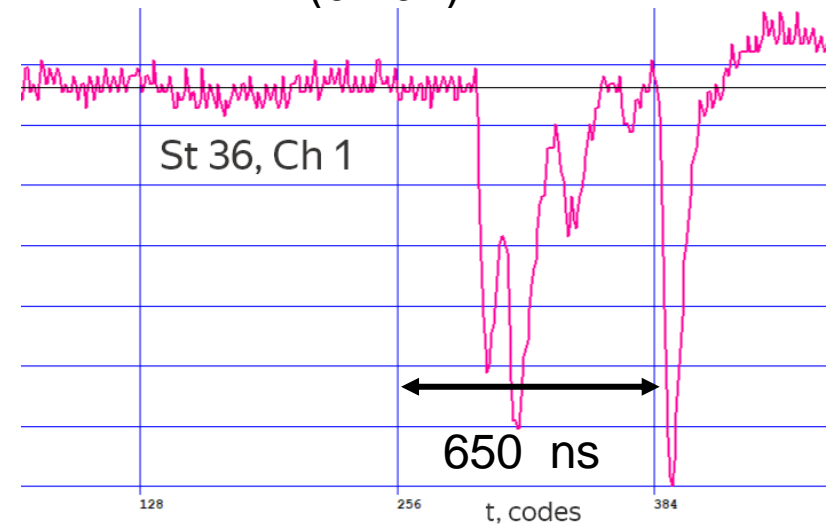
Определение энергии по $q200$.
Кросс-калибровка по данным Тунка-133



• Время наблюдения ~ 8900 часов.

• ~ 240000 событий $\geq 10^{16}$ эВ, ~ 2000 событий $\geq 10^{17}$ эВ.

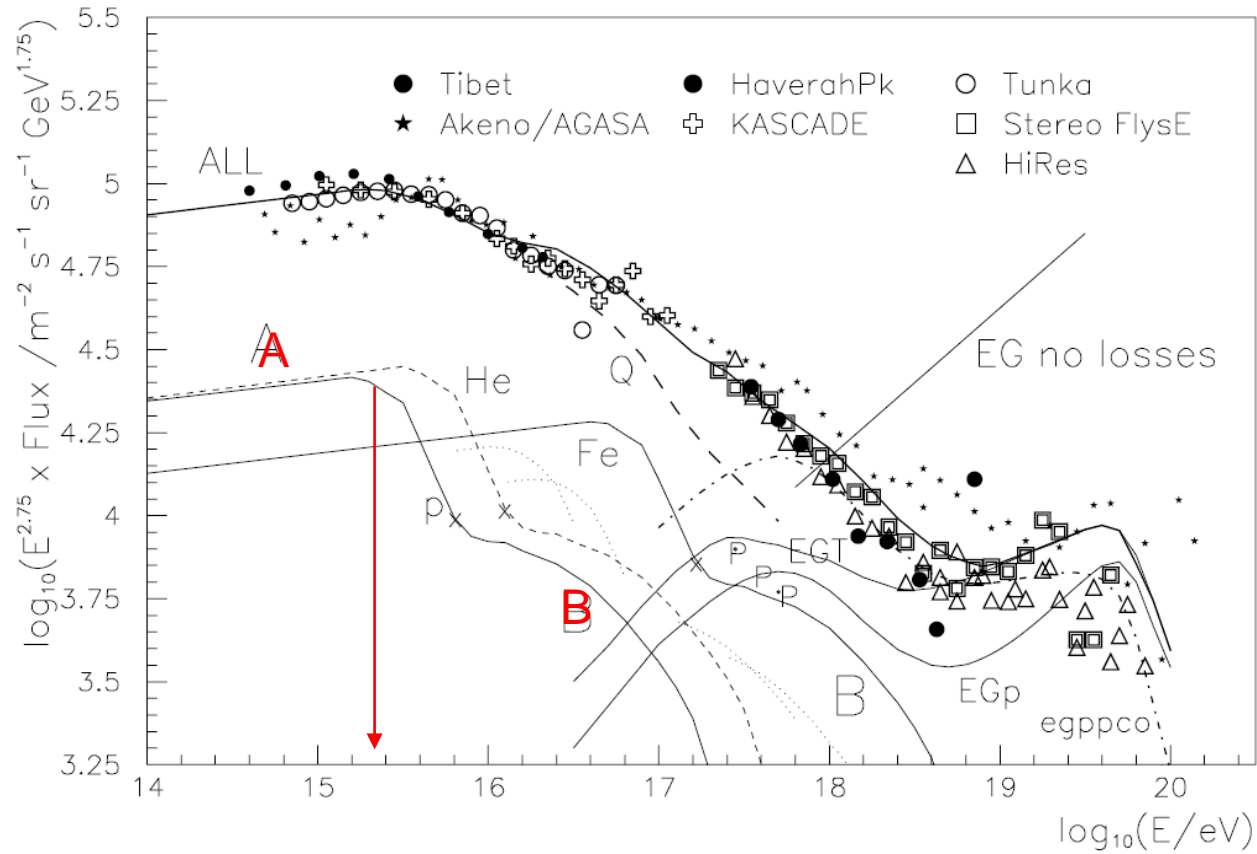
Двойные импульсы от ШАД
Иванова А. TAIGA- Космические лучи
и Монхоев Р. (01.07)



ПОСТЕРЫ

1. Влияние метеорологических параметров на поток ШАЛ
С.Малахов #21
2. Энергетическая калибровка
сцинтилляционных установок
М.Илюшин #73

В-компонента Хилласа



Гамма-астрономия

TAIGA - Гамма-астрономия

1 Восстановить спектр гамма-квантов от ряда 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:

1ES1959+650, Mrk501, Mrk421 и др.

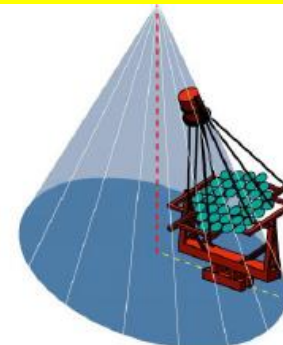
3. Поиск гамма-квантов Тэвного диапазона от гамма-всплесков

4. Поиск гамма-квантов ассоциированных с энергичными нейтрино.

5 Поиск наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения
(доклад А.Панова -0.3.07)

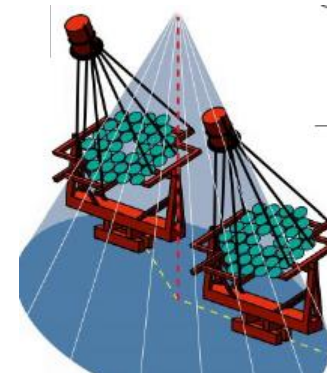
Три подхода к регистрации гамма-квантов в эксперименте TAIGA

1. Автономная работа одного телескопа
 $E > 2 \text{ ТэВ}$



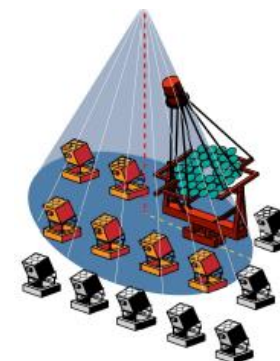
Mono mode
 $E > 2 \text{ ТэВ}$

2. Стереоскопический подход при больших расстояниях между телескопами
 $E \geq 8 \text{ ТэВ}$



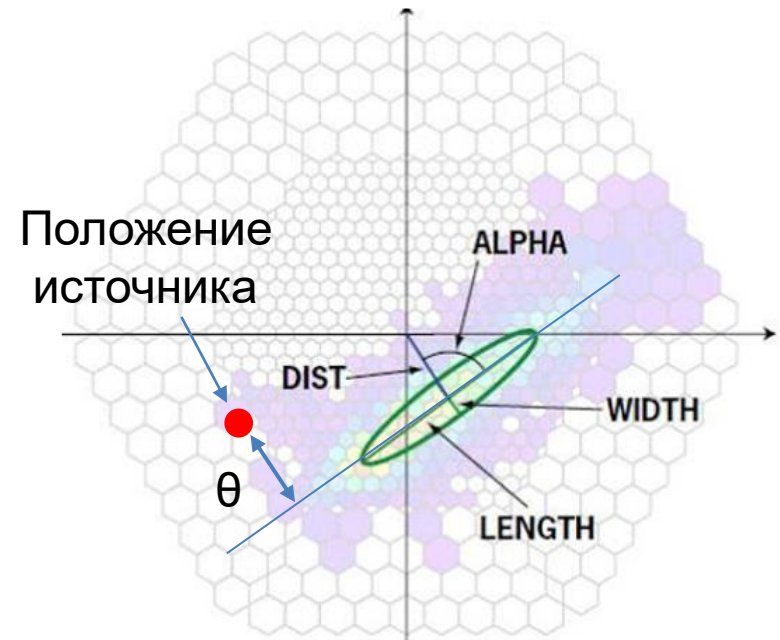
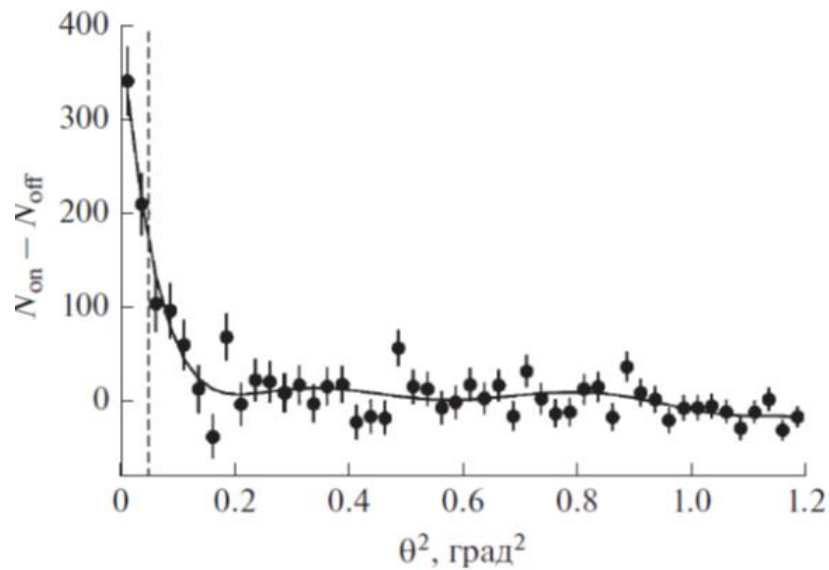
Stereo mode
 $E \geq 8 \text{ ТэВ}$

3. Гибридный подход – совместная работа HiSCORE и телескопов
 $E \geq 40 \text{ ТэВ}$



Hybrid mode
 $E \geq 40 \text{ ТэВ}$

Моно-режим- Краб -150 часов



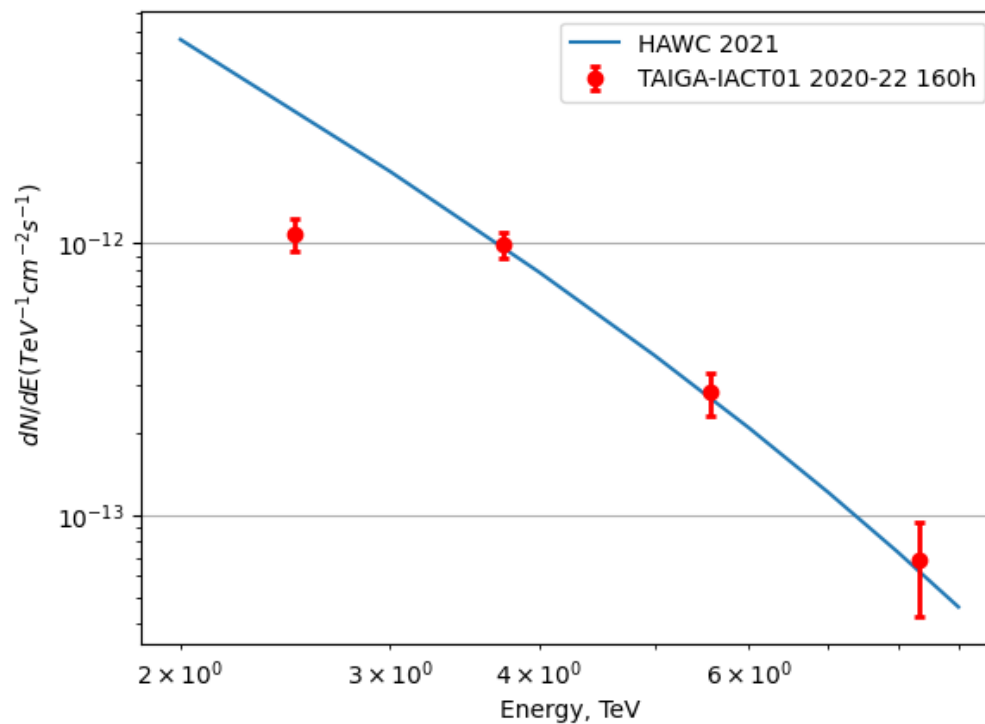
Избыток 560 событий, уровень значимости 12 σ

Л.Г. Свешникова и др. (коллаборация TAIGA),
Известия РАН. серия физ., 2023, 87, 966

Энергетический спектр блазара Mrk-421

Окунева Постер # 128

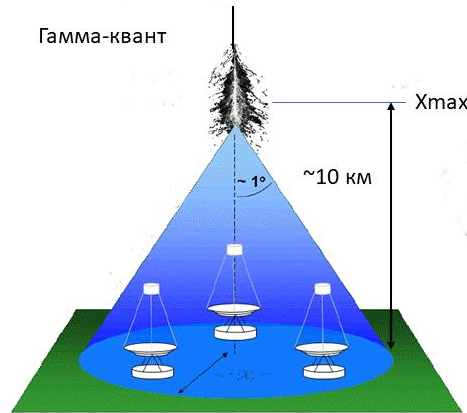
200 событий за
160 часов.
5 сигма



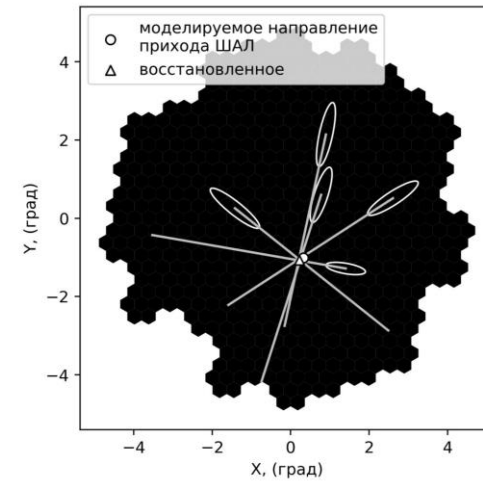
Стерео-режим (2 телескопа)

П.Волчугов – 03.07

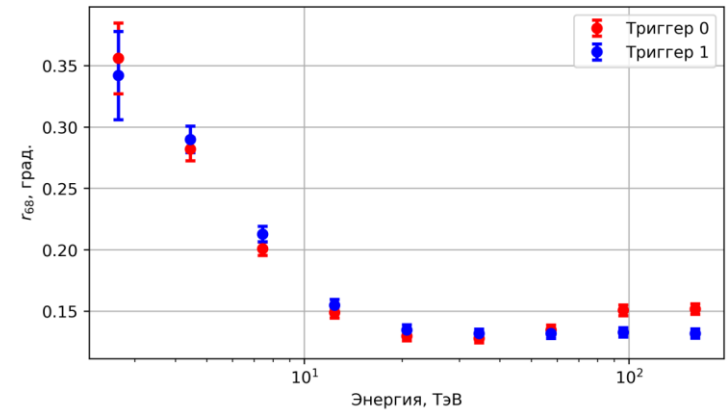
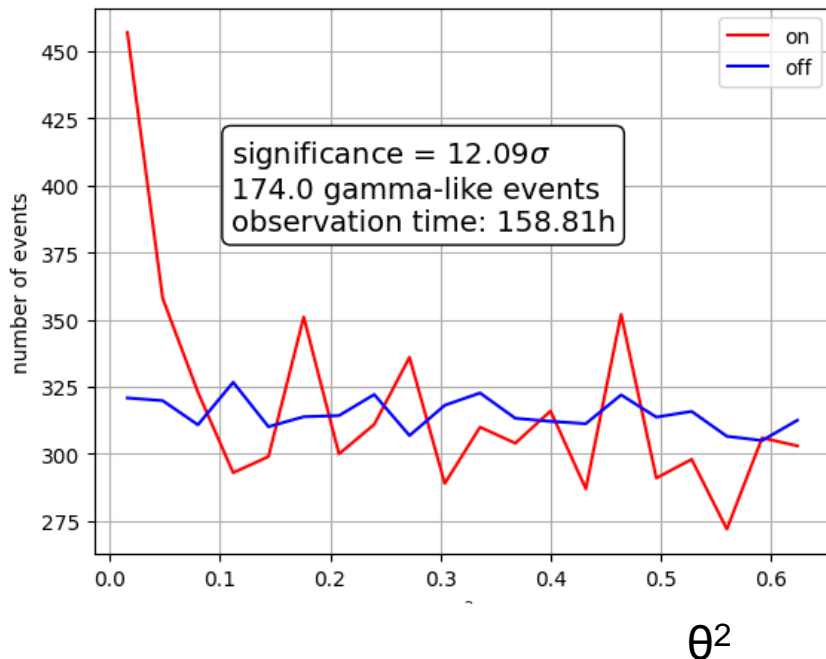
Волчугов # 71
Определение
чувствительности
TAIGA-IACT



Определение угла прихода ШАЛ

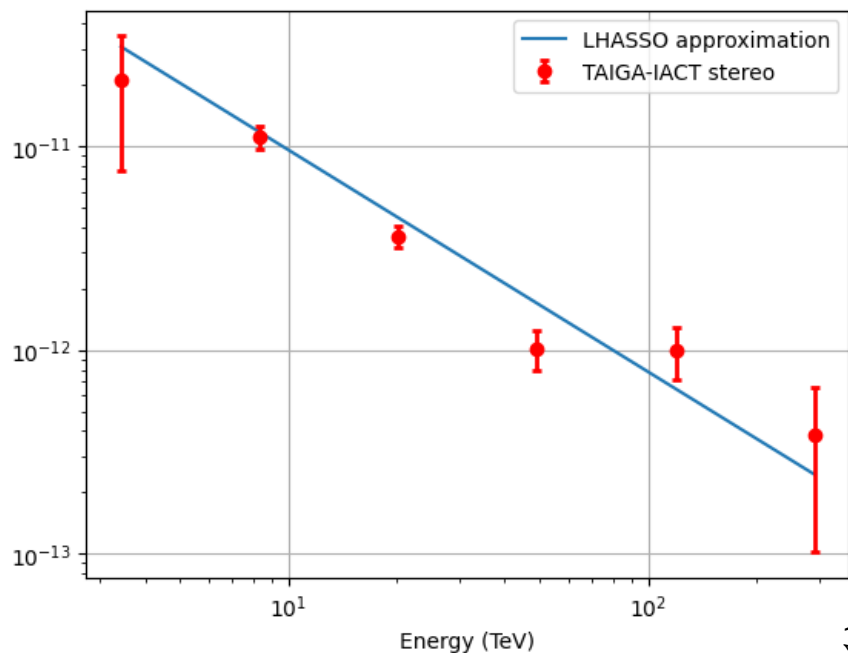


2020-2022



Спектр гамма-квантов от Крабовидной

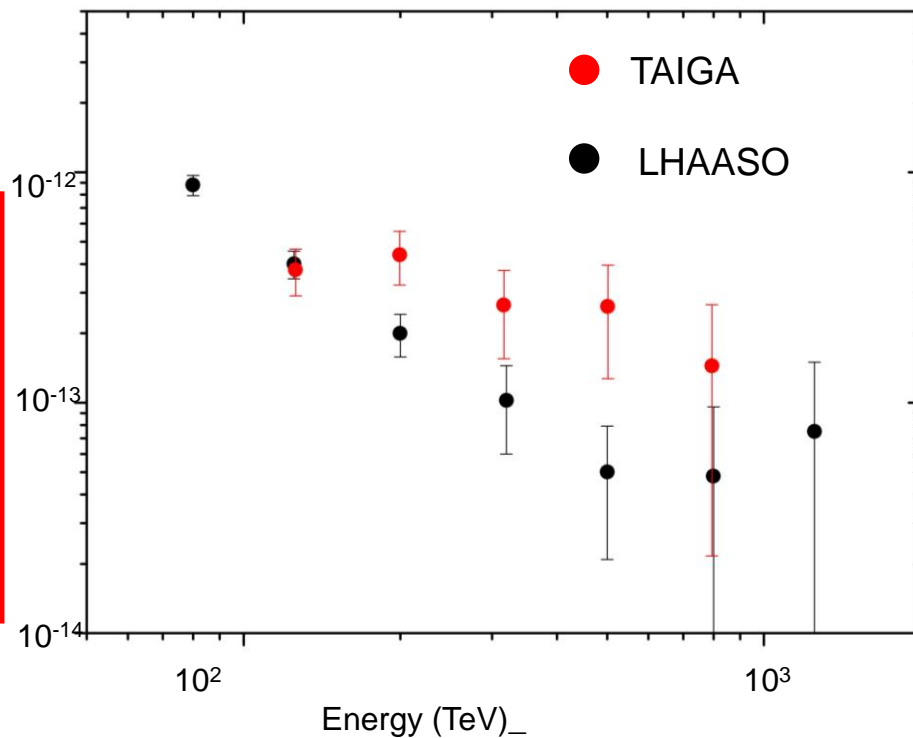
ТУМАННОСТИ



Спектр построен по данным 2 телескопов (стерео метод), за 158 часов наблюдения. Уровень значимости 12 сигма, 12 событий с энергией выше 100 ТэВ. Показатель наклона аппроксимации LHAASO $-3.2 : E^{-3.2}$

При работе 5 телескопов за 300 часов наблюдения ожидается 50 событий с Энергий выше 100 ТэВ «Ожидаемый» спектр при условии, спектр в источнике имеет показатель наклона -2.9

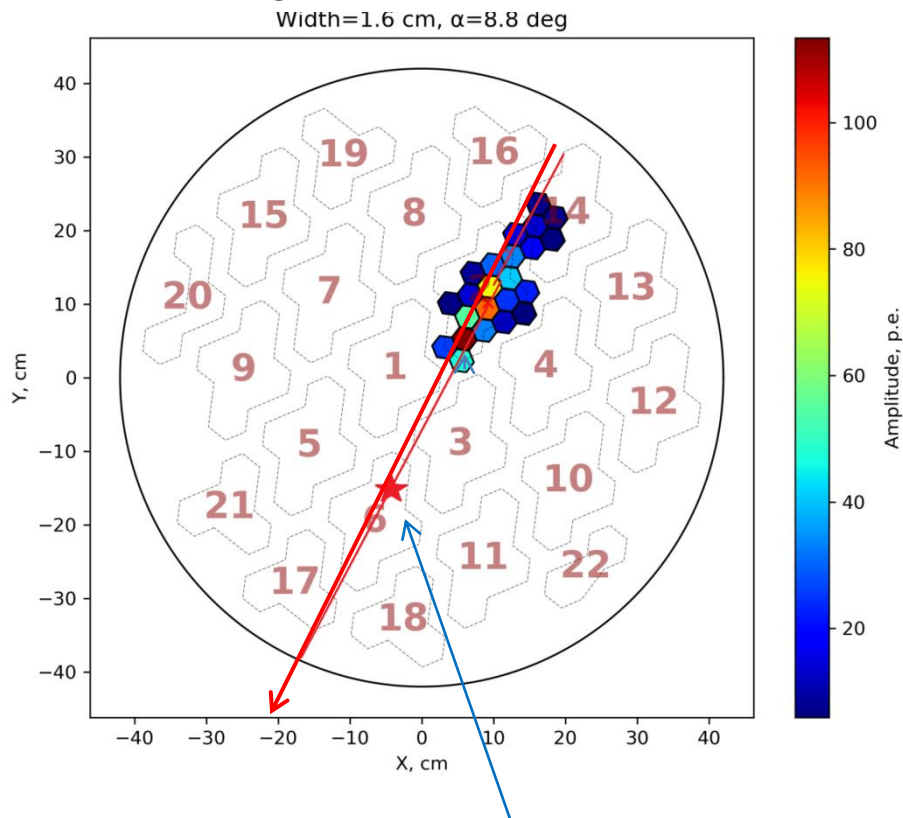
$E^2 \frac{dN}{dE} (\text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$



Пример гибридного гамма-like события

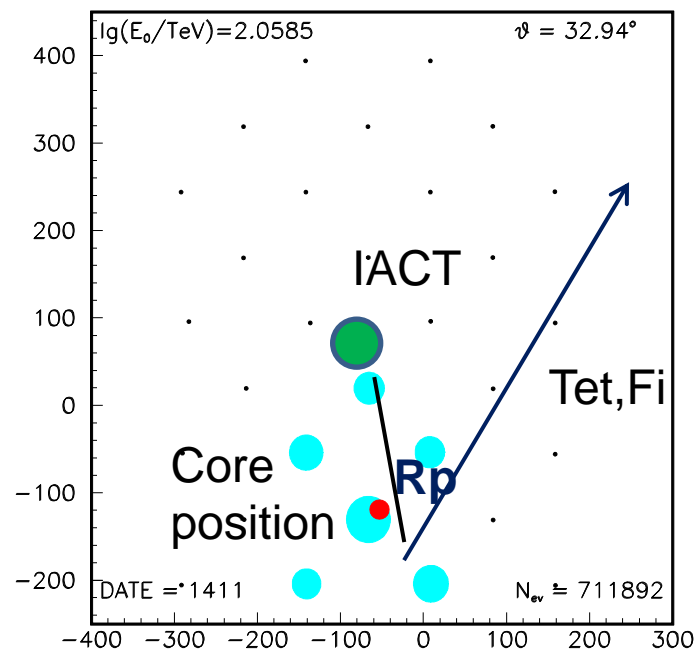
Width=0.13°, length=0.69°, alpha=8.9°, size=709p.e.

HiSCORE data



$E = 55$ TeV

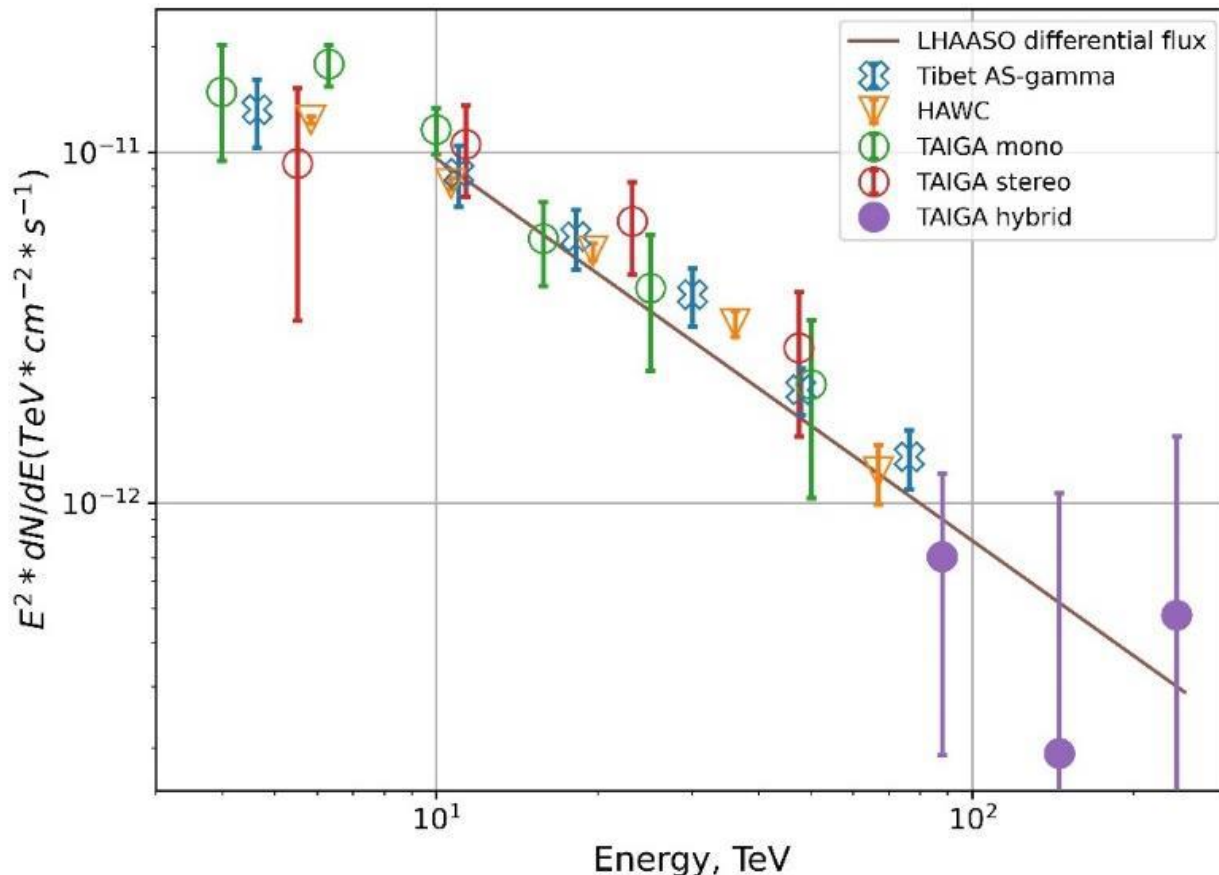
Tet = 32.9, Fi = 33.58



IACT data

Спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по гибридным событиям

TAIGA- hybrid 2 sigma , 250 hours
(1 IACT & 50 HiSCORE stations
0.45 km²)



Поиск фотонов ТэВных энергий от гамма-всплесков

.Разработана и внедрена система автоматизации измерений и автоматического наведения телескопов установки TAIGA-IACT на гамма-всплески по сигналам, полученным от General Coordinate Network (GCN) (Д.Журов)

Всего ~10 наблюдений по алертам. Время наблюдения около 1 часа

GRB 221226A (Fermi GBM)

GRB 230116E (Fermi-GBM)

GRB 230816A (Swift-BAT)

GRB-231115A (INTEGRAL)

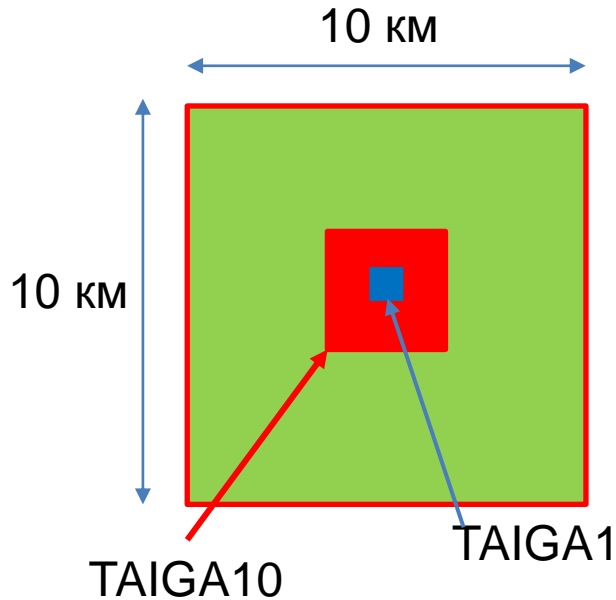
Вспышка от двойного пульсара Be/X-ray LS V +44 17 (Swift-BAT)

Наведение по совпадению IceCube и HAWC NuEm-240118A.

От GRB 221009 – (900 sec) 600 гамма-квантов(по 3 телескопам) - 14 сигма
В 10 раз боле слабая вспышка – 60 событий, около 5 сигма

4.Проект TAIGA-100

TAIGA100 – возможность изучать область энергий выше 1 ПэВ



~ 3000 широкоугольных черенковских детекторов:
1 ФЭУ, FoV ~ 1 стер.

~3000 мюонных водных мюонных детекторов,
площадью 40 м.

6-7 IACTs, диаметр зеркал 4 м (от установки
TAIGA-1)

1-2 IACTs, диаметр зеркала 10 м (мини
ALEGRO)

1-2 малых флюоресцентных телескопов
(Зотов М, 01.06)

Для TAIGA1 – расстояние между СС- 100 м
Порог ~100 ТэВ,

Для TAIGA10 – расстояние между СС- 150 м
Порог ~200 ТэВ

Для TAIGA100 – расстояние между СС- 200 м
Порог ~400 ТэВ

Одна супер станция (СС):
черенковский детектор
мюонный детектор
сцинтилляционный
детектор (1-2 м²)
радио антенна

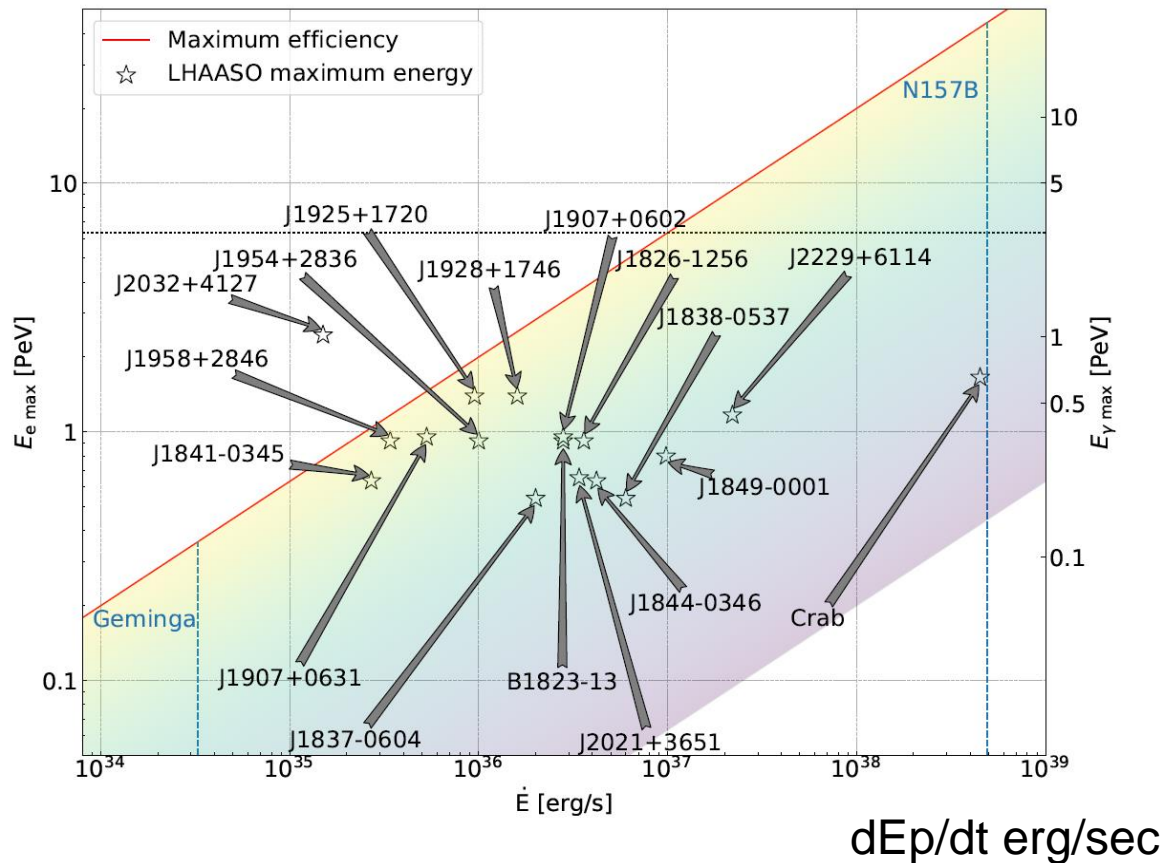
Научная программа

1. Гамма астрономия ультравысоких энергий.
2. Космические лучи в диапазоне
 $10^{14} - 10^{19}$ эВ
3. Поиск фотонов в диапазоне $10^{17} - 10^{18}$ эВ
4. Транзиентные явления и гамма-всплески
5. Горизонтальные нейтрино (?)
6. Экзотика (темная материя, странглеты и т.д)
7. Геофизика

Какие астрофизические источники могут ускорять космических лучи до ПэВных энергий?

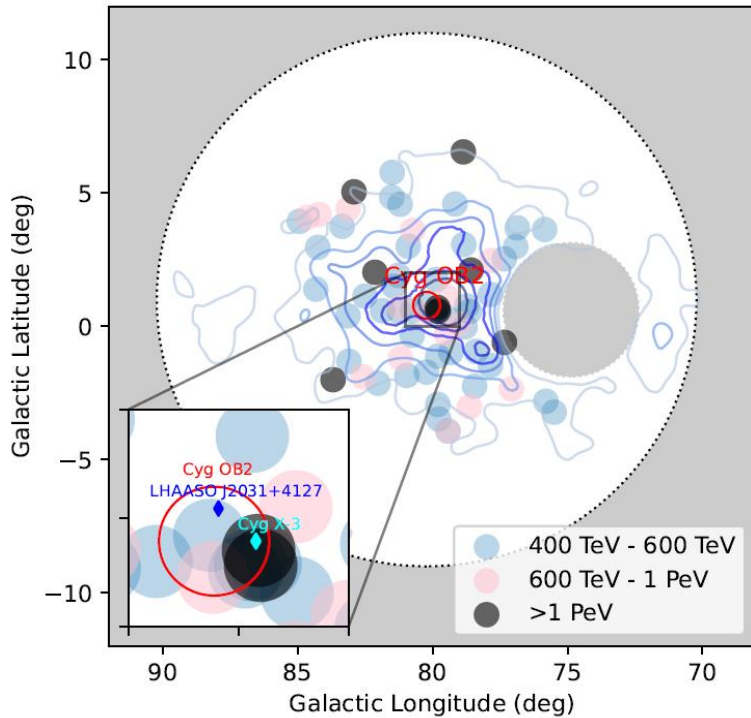
1. Остатки сверхновые звезды (SNR)
2. Пульсарные туманности (PWN)
3. Пульсары в двойных системах
4. Области активного звездообразования
5. Черная дыра в центре Галактики
6. Гамма-всплески

Максимальная энергия в пульсарных туманностях (PWN)

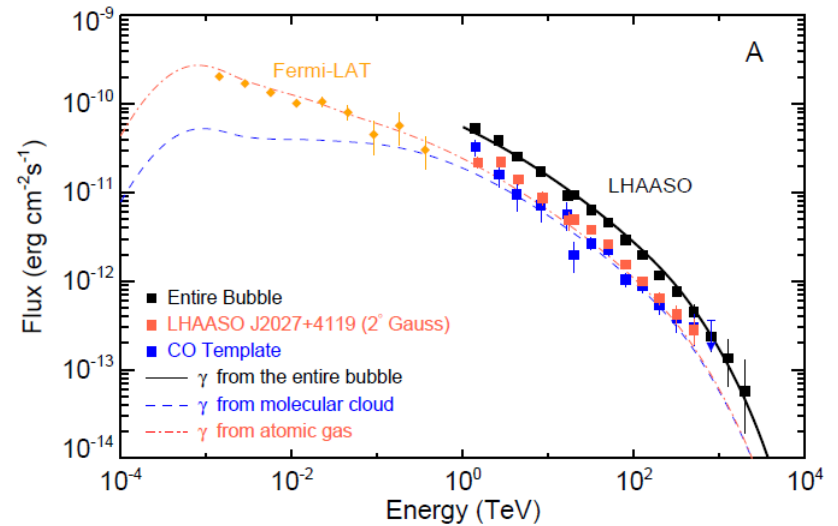


$$E_{\text{max}} = 2 \text{ ПэВ} \times Z \times \eta \times \left(\frac{dE_p}{dt} / 10^{36} \text{ эрг/сек} \right)^{1/2}$$

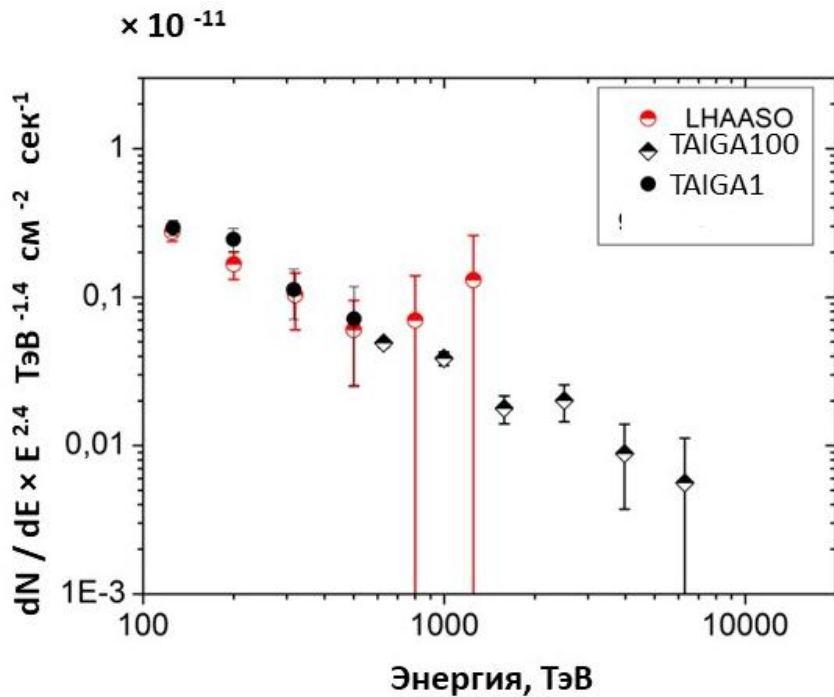
Источники в области активного звездообразования (OB-2 ассоциация в созвездии Лебедя)



Ультра-ПэВатрон



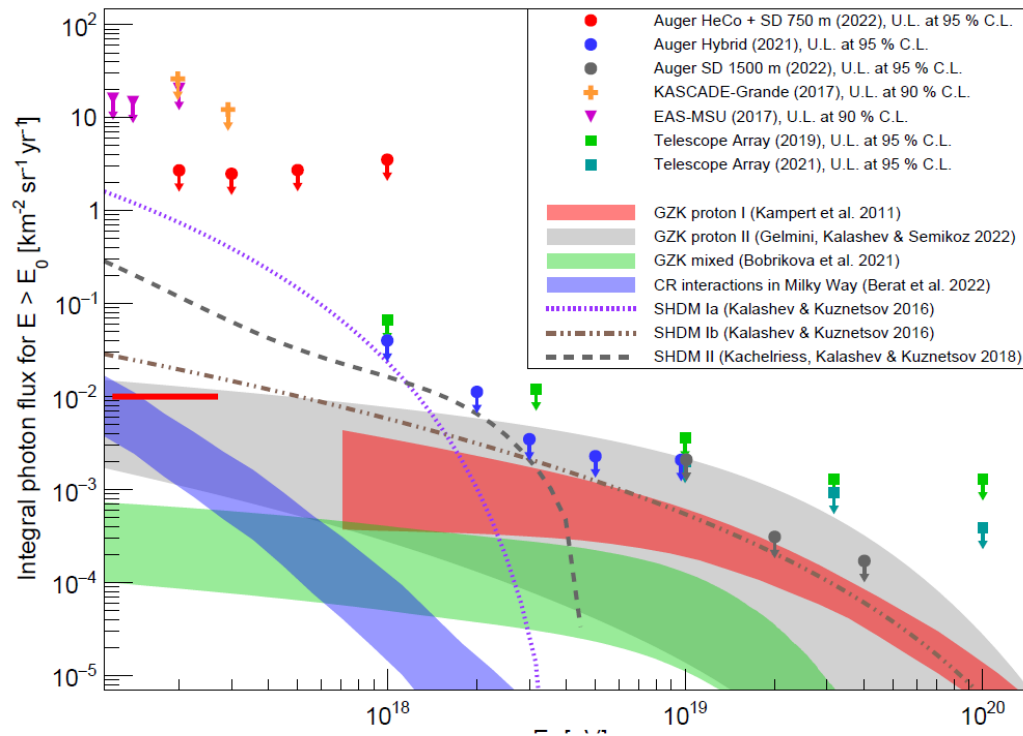
Ожидаемый спектр от Крабовидной туманности



«Ожидаемый» энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности за 500 часов наблюдения (3 сезона) 350 событий с энергией) выше 500 ТэВ. Уровень значимости 10 сигма. Подавление в 10 раз адронов мюонными детекторами.

$E_{\max}(\text{протона}) = 60 \text{ ПэВ}$

Поиск фотонов в диапазоне 10^{17} - 10^{18} эВ

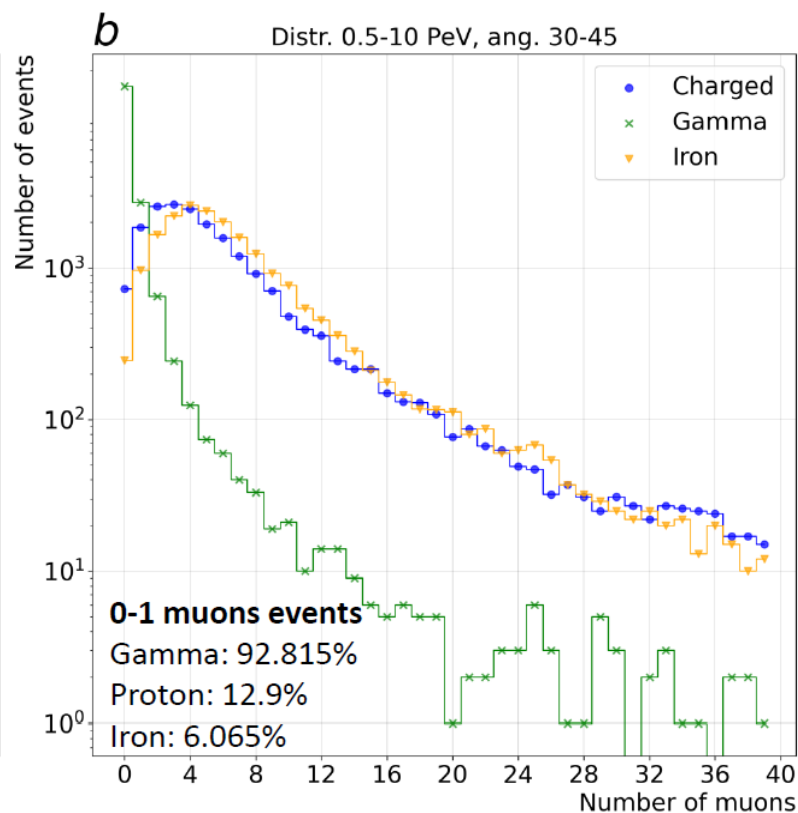
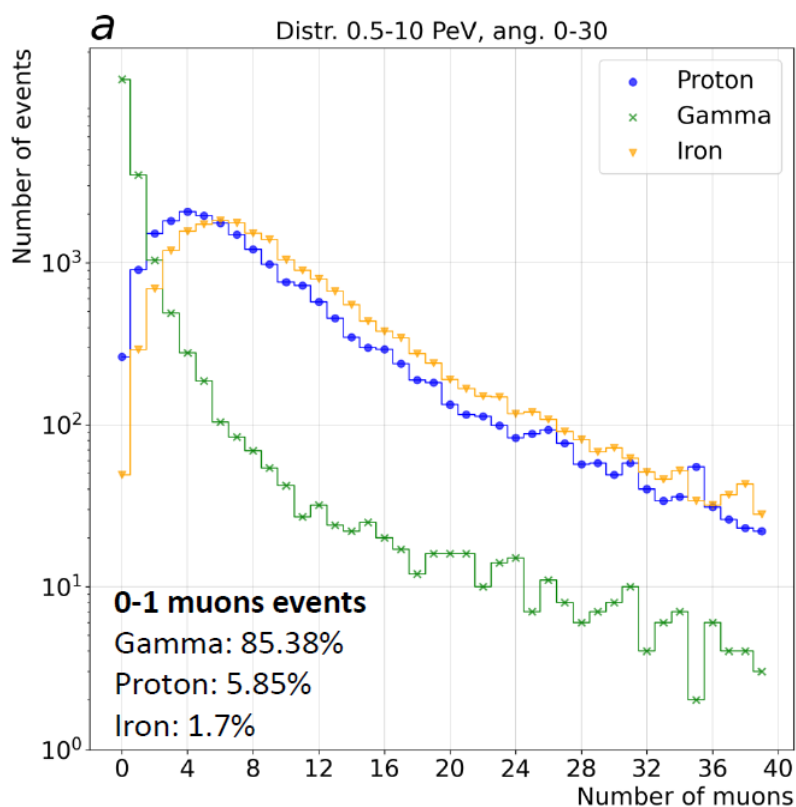


10 гамма-кватов за 10 лет

TAIGA -100 - Постеры

1. Терновой М. #69 Подземные черенковские водные детекторы в гамма-обсерватории TAIGA : моделирование и перспективы
- 2, Самолига В. #84 Перспективы поиска гамма-квантов суб-пэвного диапазона при совместном анализе данных черенковских и сцинтилляционных установок
3. Самолига В. #85. Оценка углового разрешения и эффективной площади TAIGA-HiSCORE при использовании периферийных станций.
4. Крюков А. #133. Определение параметров ШАЛ для TAIGA- HiSCORE с помощью нейронных сетей
5. Иванова А . #77 Выбор места для TAIGA100
6. Тубольцев, Богданов, Чичагов #68. Разработка считывающей электроники с детектором на основе кремниевых фотоумножителей
7. Холупенко Е и др. #116 О возможности гамма-адронной сепарации посредством измерения доли УФ-излучения ШАЛ малоразмерным черенковским телескопом на SiPM

Подавление адронов мюонными детекторами (Терновой.М #69)



Выбор места (А.Иванова #77)

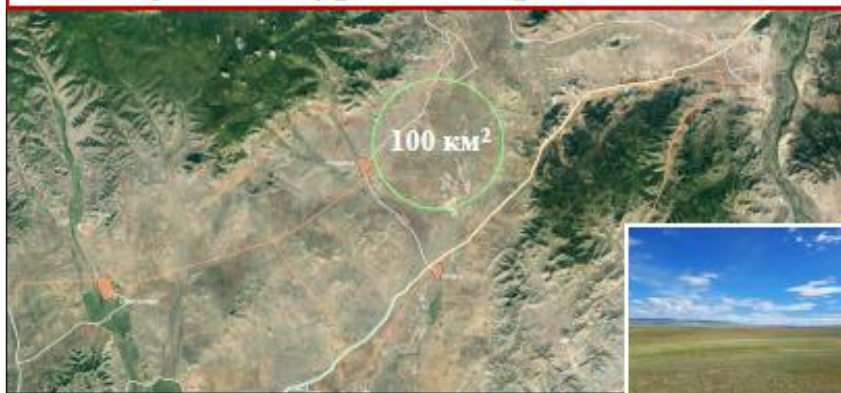
Перспективные территории:

Степи Южной Сибири в границах Байкальской и Алтае-Саянской горных физико-географических стран

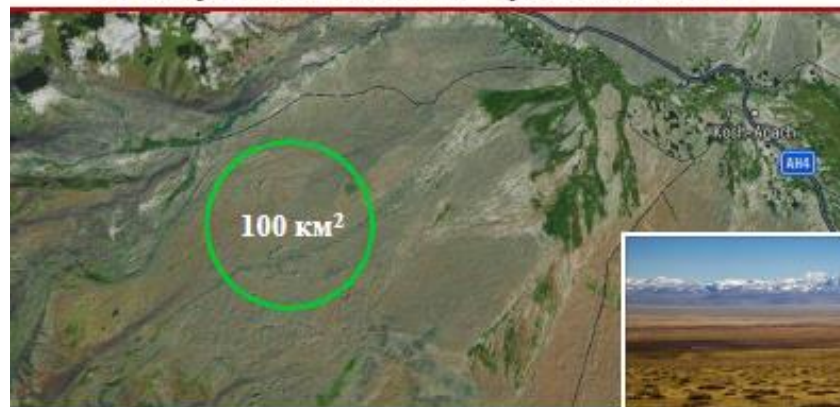
Иркутская область: окрестности с. Гаханы



Республика Бурятия: Боргойская степь



Республика Алтай: Чуйская степь



Заключение

1. Развертывание комплекса TAIGA-1 близко к завершению, осталось подготовить еще 2 регистрирующие камеры для атмосферных черенковских телескопов.
2. Обработка данных продвигается вполне успешно – получены новые результаты в области космических лучей и гамма-астрономии. Осваиваются новые методы анализа данных на основе машинного обучения.
3. Началась подготовка проекта астрофизического комплекса TAIGA100. Планируется протестировать основные детекторы TAIGA100 (мюонный и сцинтилляционный детектор, новый черенковский детектор и др) и систему сбора данных на полигоне TAIGA-1 до выбора места развертывания новой установки.

Спасибо за внимание

