

Черенковская гамма-астрономия в диапазоне ГэВ: проект **ALEGRO**

А.М. Быков, П.Н. Аруев, Д.А. Байко, Г.И. Васильев, В.В. Забродский, А.М. Красильщиков,
А.А. Кожберов, Ю.В. Тубольцев, Е.Е. Холупенко, Ю.В. Чичагов и др.
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

F. Aharonian (Dublin Institute for Advanced Studies), L. Bergstrom (Stockholm University),
H. Bloemen (Space Research Organization of the Netherlands), P. Coppi (Yale University),
P. Martirosian (Armenian Academy of Sciences), P. Meszaros (Pennsylvania State University),
F. Mirabel (Astronomical Institute of Argentina), G.G. Pavlov (Pennsylvania State University)

С.В. Троицкий, Г.И. Рубцов и др.
(ИЯИ РАН)

Какие фундаментальные задачи позволяет решать гамма-астрономия высоких энергий?

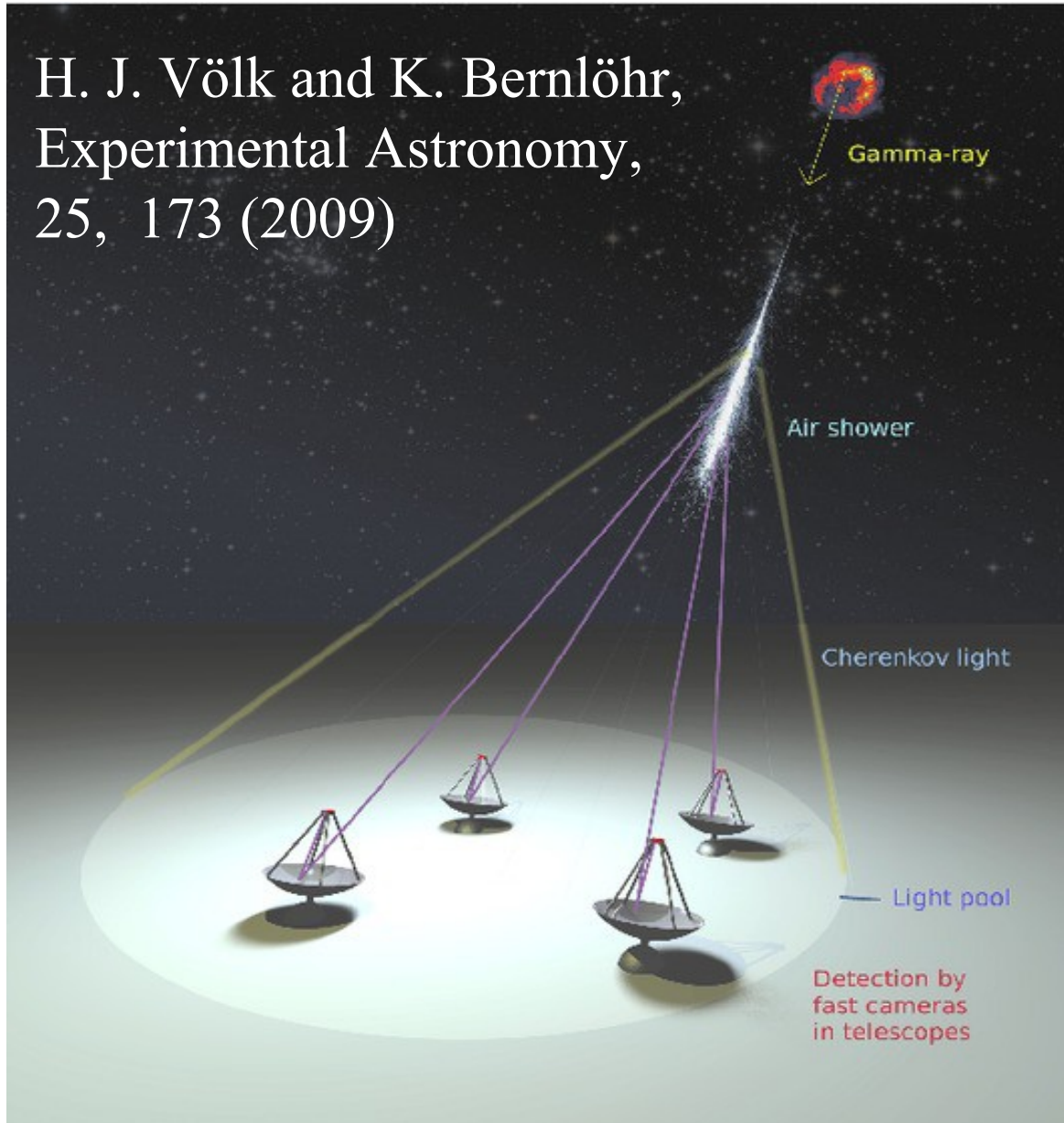
- выяснение природы темного вещества во Вселенной:
поиск линий излучения, сопутствующего распаду темной материи
- проверка фундаментальных физических теорий:
поиск зависимости скорости распространения фотонов
от их энергии (проверка моделей квантовой гравитации)
- определение физических механизмов преобразования энергии
в экстремальных космических объектах:
черных дырах в активных ядрах галактик и микроквазарах,
остатках сверхновых звёзд,
источниках гамма-всплесков в коллапсирующих сверхновых

Орбитальные и наземные гамма-телескопы

Параметр	Орбитальные гамма-телескопы	Наземные (черенковские) гамма-телескопы
Энергетический диапазон	0,3 МэВ – 300 ГэВ	50 ГэВ – 50 ТэВ
Поле зрения	1/5 небесной сферы	2 – 5 градусов дуги
Угловое разрешение	10' – 3°	15' – 2°
Энергетическое разрешение	10 %	10 – 20 %
Чувствительность, эрг / (см ² с)	10 ⁻⁹ в диапазоне 1 – 100 ГэВ	10 ⁻¹³ – 10 ⁻¹² в диапазоне выше 300 ГэВ
Эффективная площадь, м ²	0,2 – 1,0	1000 – 10000
Стоимость, млн. долл.	200 – 1000	40 – 50

Технология наблюдений на черенковском гамма-телескопе

Н. J. Völk and K. Bernlöhr,
Experimental Astronomy,
25, 173 (2009)



Регистрация излучения широкого атмосферного ливня, вызванного попаданием в атмосферу Земли космического гамма-кванта, при помощи массива наземных черенковских гамма-телескопов.

- отделение фотонных событий от адронных:
форма пятна
выделенное направление прихода
- выделение черенковских фотонов из оптического фона:
синхронность событий: $\Delta t \sim 10$ нс

Высота яркой части лавины: 10 км
Размер пятна засветки: 100-200 м
Длительность вспышки: 5-20 нс
Квант 1 ТэВ даёт 100 фот/м² ,
5 ГэВ даёт 0,5 фот/м²

Черенковские телескопы I поколения были созданы уже в 1960-х годах

Крымская установка ФИАН, Чудаков и др. (1960)



А.Е.Р.Е., Харвелл,
Джелли и Портер (1963)

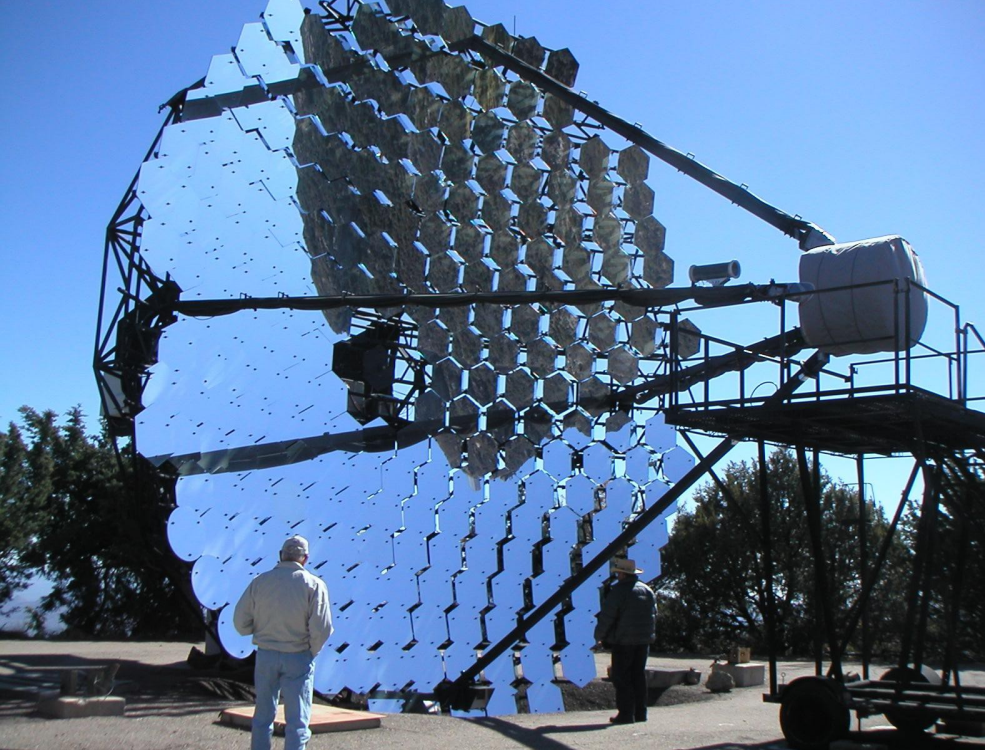
РЧВ-1, КрАО (1969)



Фомин и др. (2007)

К 1975 г. было обнаружено
7 потенциальных
гамма-источников ($>3\sigma$)

Рис.1. Гамма телескоп первого поколения в КрАО (РЧВ-1)



Черенковские телескопы

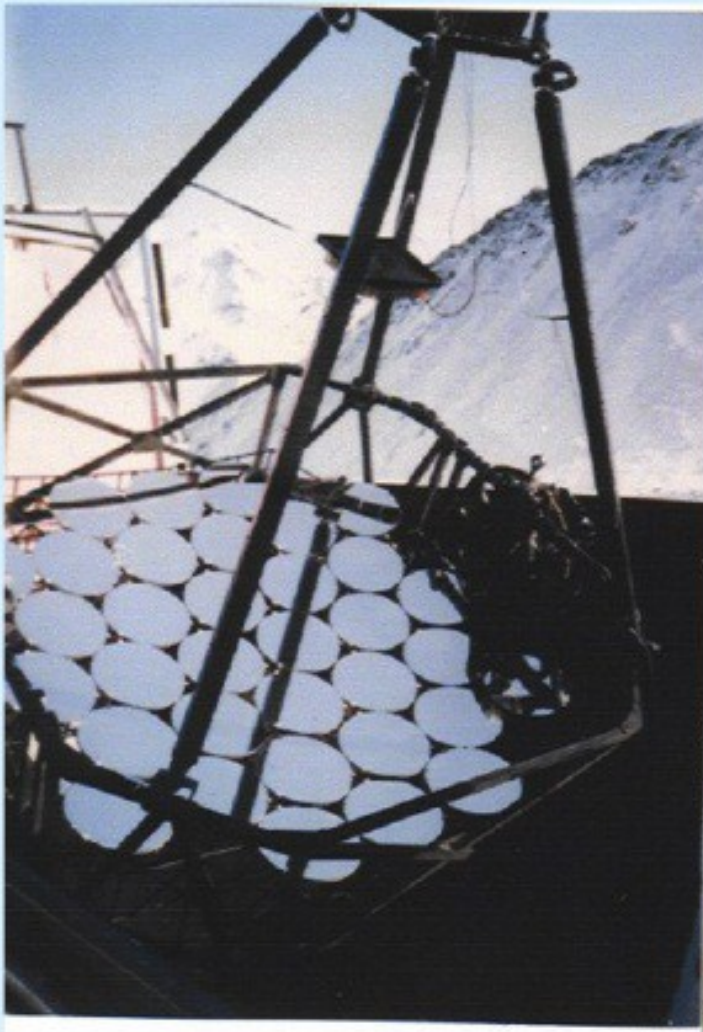
II поколения

- 78 м² Whipple,
Mt. Hopkins, США (1989)
- 8.5 м² HEGRA,
La Palma, Испания (1995)
- 18 м² ГТ48,
Крым, СССР (1989)



ВЫСОКОГОРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ШАЛОН АЛАТОО

Зеркальный гамма-телескоп ШАЛОН является единственным действующим гамма-телескопом Российской Федерации и одной из четырёх телескопических установок в северном полушарии ведущих исследования в ТэВ-ной области энергий.



- Площадь сферического зеркала 11.2 м²
- Радиус кривизны зеркала 8.5 м
- Углы поворота зеркала:
 - азимутальный 0°-360°
 - зенитный 0°-110°
- Точность наведения главной оси ≤0.1°
- Число фотоумножителей 144 (12x12)
- Угол обзора > 8°
- Вес 6 тонн
- Альт-азимутальная монтировка

По переданной в Индию технической документации телескопа ШАЛОН в Атомном исследовательском центре им. Баба изготовлено несколько подобных телескопов для вновь открытой обсерватории, на одном меридиане с перевалом Джусалы-Кизень.

Черенковские телескопы III поколения (начало XXI века)

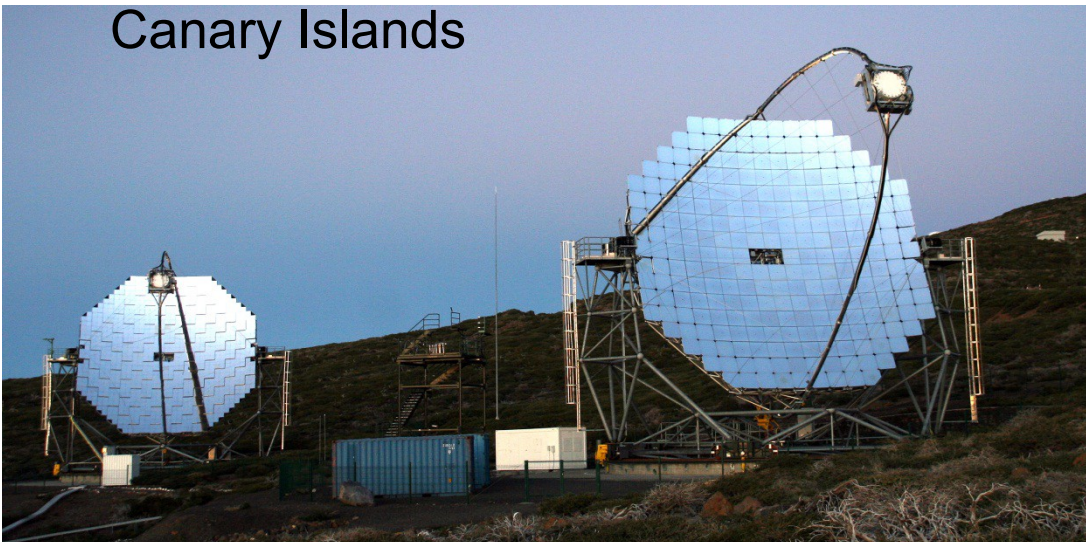
CANGAROO III, Woomera,
Australia



VERITAS, Whipple Observatory,
Arizona



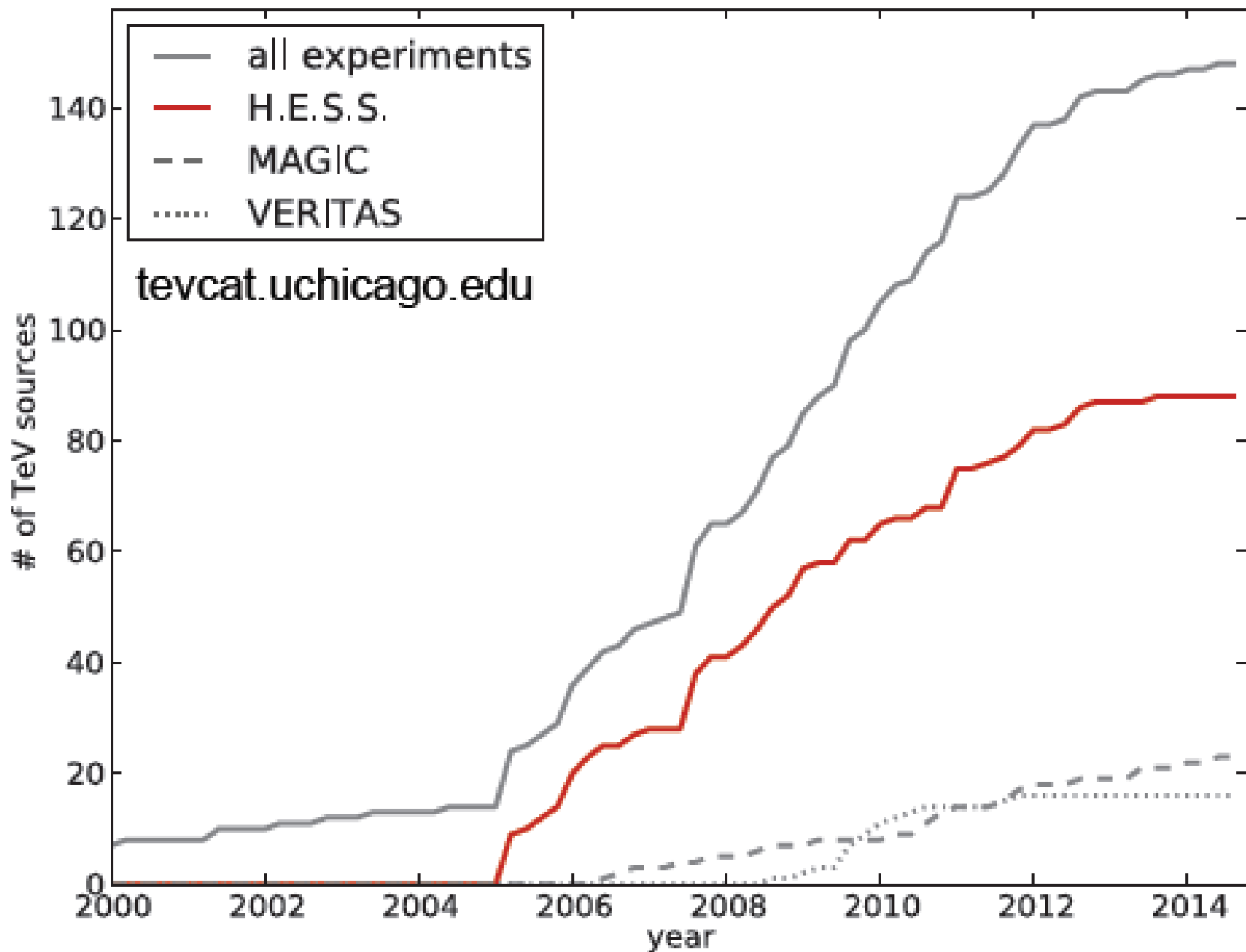
MAGIC II, La Palma,
Canary Islands



H.E.S.S. II, Khomas Highland,
Namibia



Динамика открытия гамма-источников в диапазоне ТэВ



Stegmann (2014)

Строящиеся черенковские гамма-телескопы

Тунка-TAIGA, 30 -- 1000 TeV



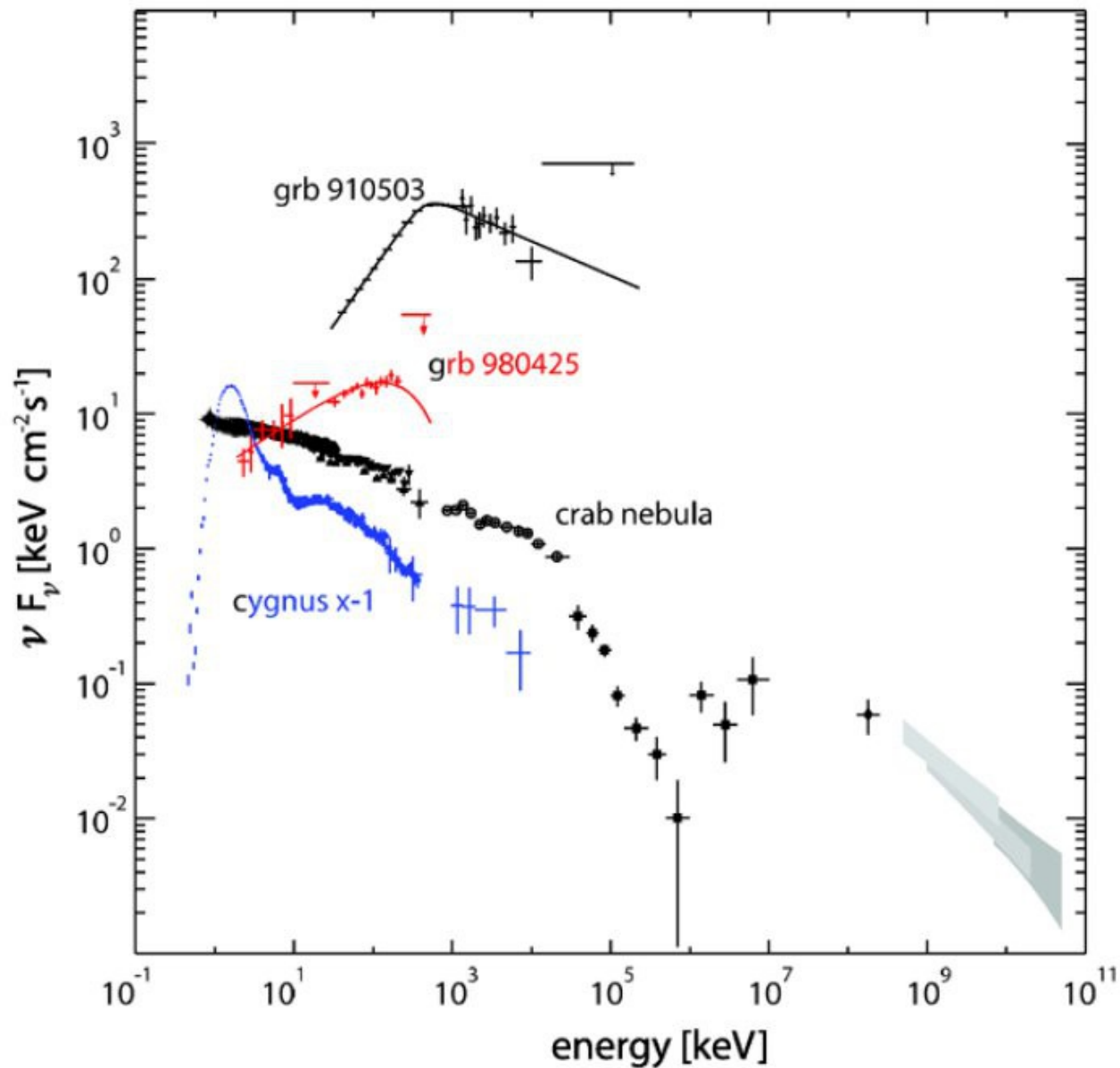
MACE - Major Atmospheric Cherenkov Experiment, Ladakh, India, 4200 m a.s.l, mirror 21 m

СТА – Cherenkov Telescope Array

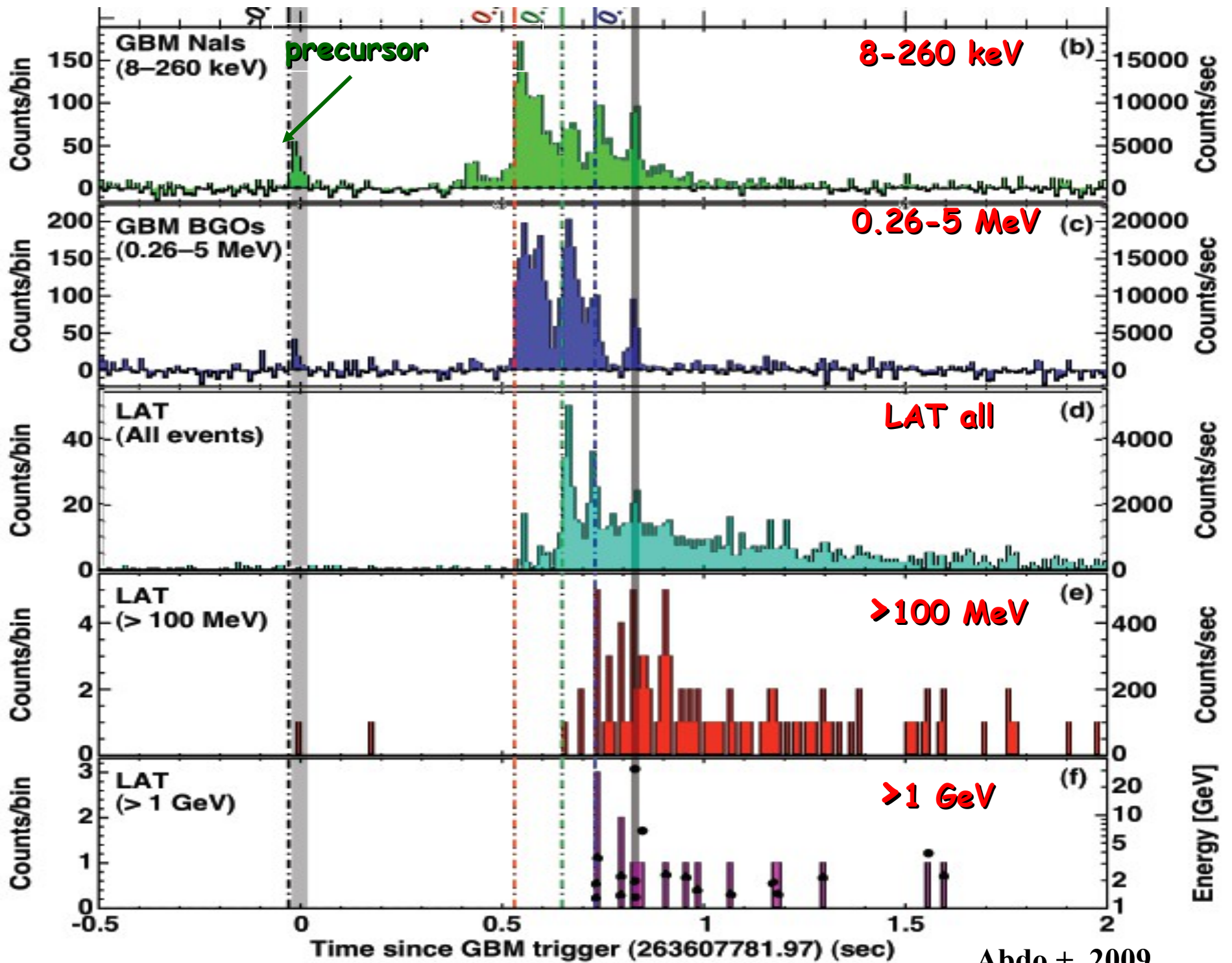
предполагает развертывание двух гамма-обсерваторий: южной (около 100 инструментов, зеркала 4, 12, 23 м, в пустыне Атакама, Чили) и северной (около 20 инструментов, зеркала 12, 23 м на о. Ла-Пальма, Канарские о-ва, ЕС)



Проблема низкой чувствительности в диапазоне ГэВ



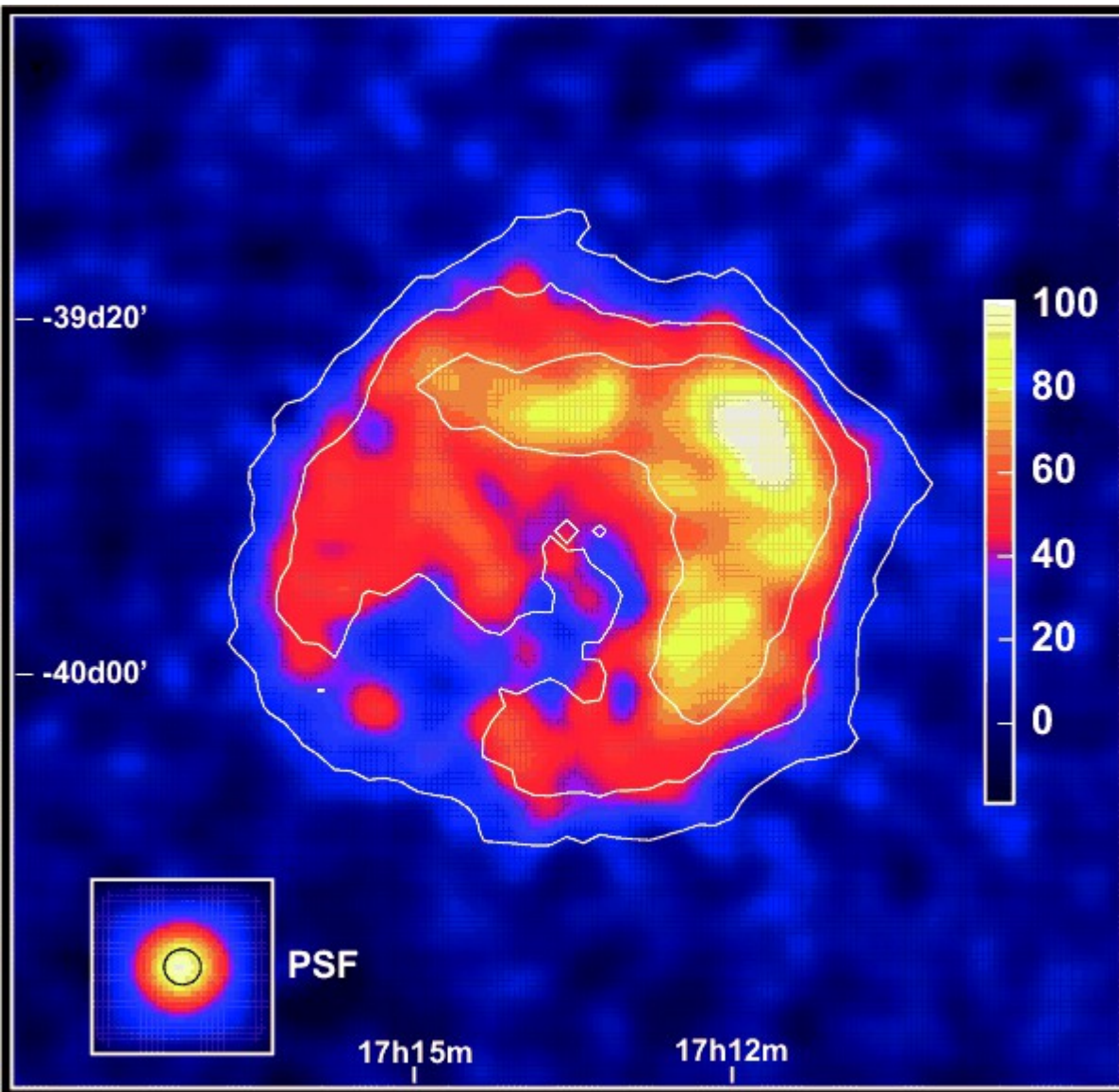
Выков & Gehrels (2012)



Abdo +, 2009

GRB 090510 @ $z = 0.9$

Остаток сверхновой звезды RX J1713-3946



Структура жесткого излучения остатка сверхновой RX J1713-3946 в диапазоне 100 ГэВ – 30 ТэВ, изучена с помощью черенковского гамма-телескопа H.E.S.S.

F. Aharonian et al.,
Astronomy and Astrophysics,
449, 223, 2006.

Возраст: около 1600 лет
(китайская «гостья» 393 года?)

Расстояние: около 1 кпк

Согласно Страсбургской
базе данных Simbad, про
этот объект опубликовано
более 400 работ

Детектирование излучения остатков сверхновых звёзд в диапазоне сотен ГэВ означает, что в этих объектах частицы ускоряются до энергий выше 10^{15} эВ.

Перспективный черенковский телескоп **ALEGRO** (**A**tomospheric **L**ow **E**nergy **G**amma-**R**ay **O**bservatory)

- уникально низкий порог детектирования около 5 ГэВ
- чувствительность около 10^{-12} эрг / ($\text{см}^2 \text{с}$) в диапазоне 5 – 50 ГэВ
[3σ за 100 часов]
- время наведения на объект меньше 1 минуты

Эти параметры могут быть достигнуты за счет:

- размещения на высоте 4 – 5 км над уровнем моря
- использования больших сегментированных зеркал (до 30 м)
- использования стереоскопии (3 или 4 телескопа)
- применения лавинных фотодиодов и быстрой электроники
- применения современных роботизированных монтаровок

Стоимость массива ALEGRO составляет около 2,0 млрд. руб.
(около 30 MUSD) в ценах 2015 года

Площадки для размещения телескопа **ALEGRO**

– В Северном полушарии:

в составе высокогорной обсерватории ЭГО в Приэльбрусье
(высота 3,7 км, совместно с ИЯИ РАН)

– В Южном полушарии:

в составе высокогорной обсерватории LLAMA на плато Alto
Chorrillo в Аргентинских Андах (высота 4,7 км, совместно с
Аргентинским институтом радиоастрономии)

Варианты размещения телескопа **ALEGRO**

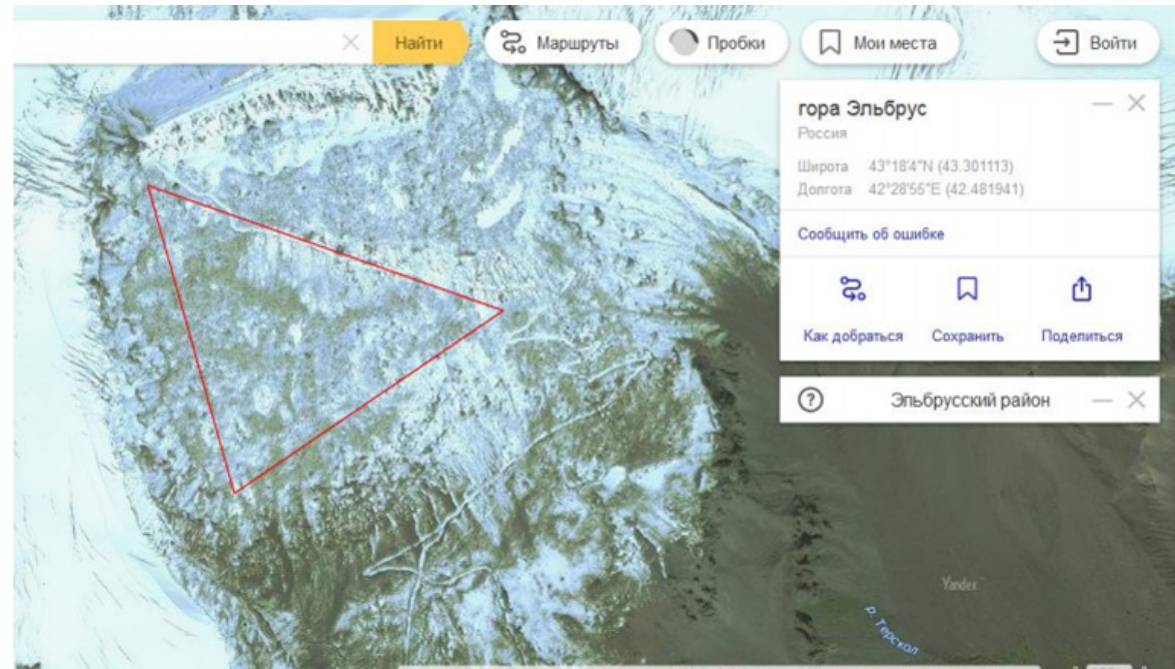
- плато Alto Chorillo (высота 4,7 км, Аргентина) – совместно с Аргентинским институтом радиоастрономии
- моренная площадка на склоне г. Эльбрус (высота 3,7 км, Россия) – совместно с ИЯИ РАН (проект ЭГО – Эльбрусская гамма-обсерватория)

-- Имеются предварительности договоренности ФТИ с партнерами из Армении (об изготовлении зеркал) и Аргентины (о предоставлении инфраструктуры)

-- При размещении на плато Alto Chorillo будет использована инфраструктура, создаваемая для радиотелескопа LLAMA

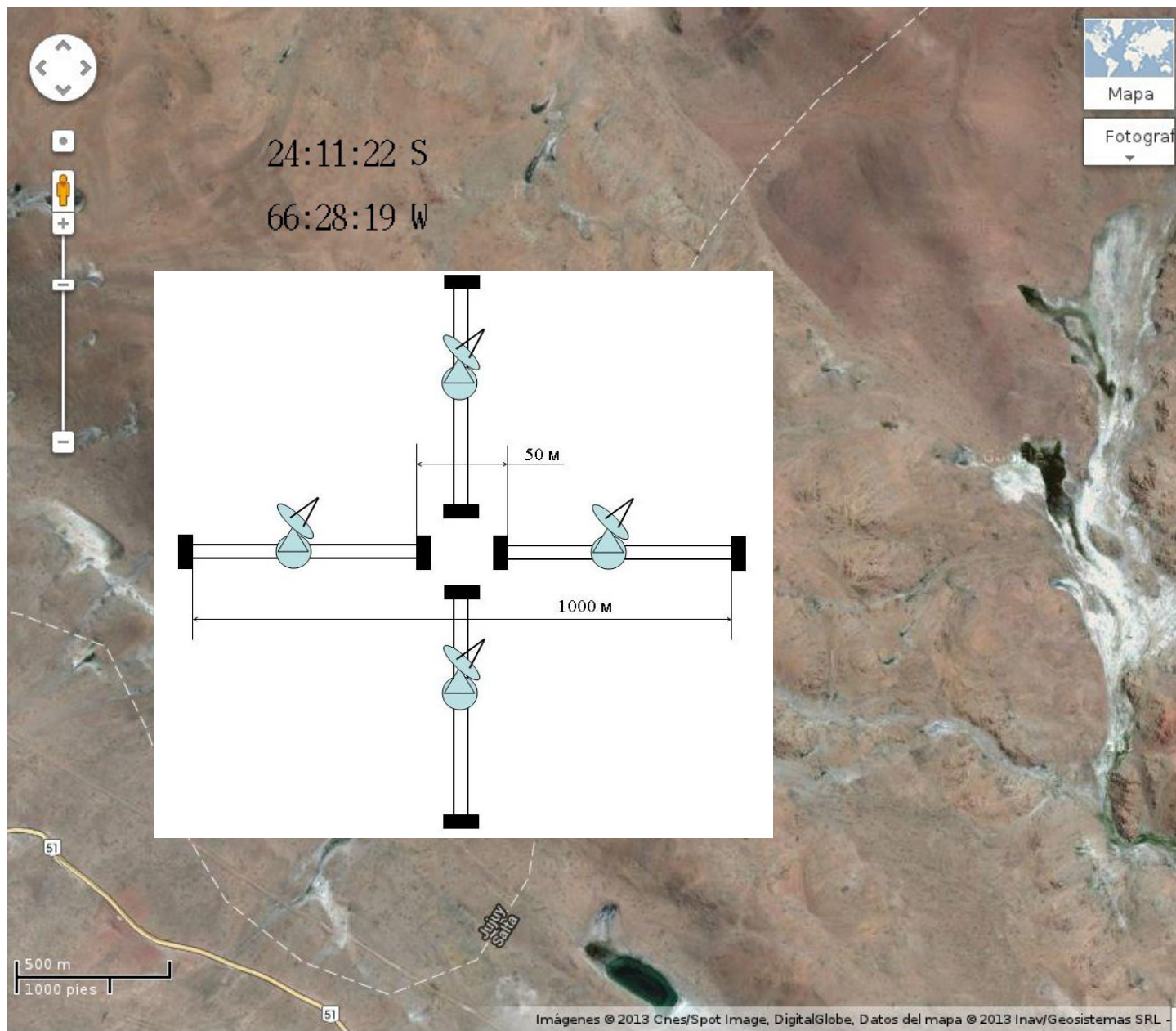


Сторона квадрата – 4000 м



Сторона треугольника – 500 м

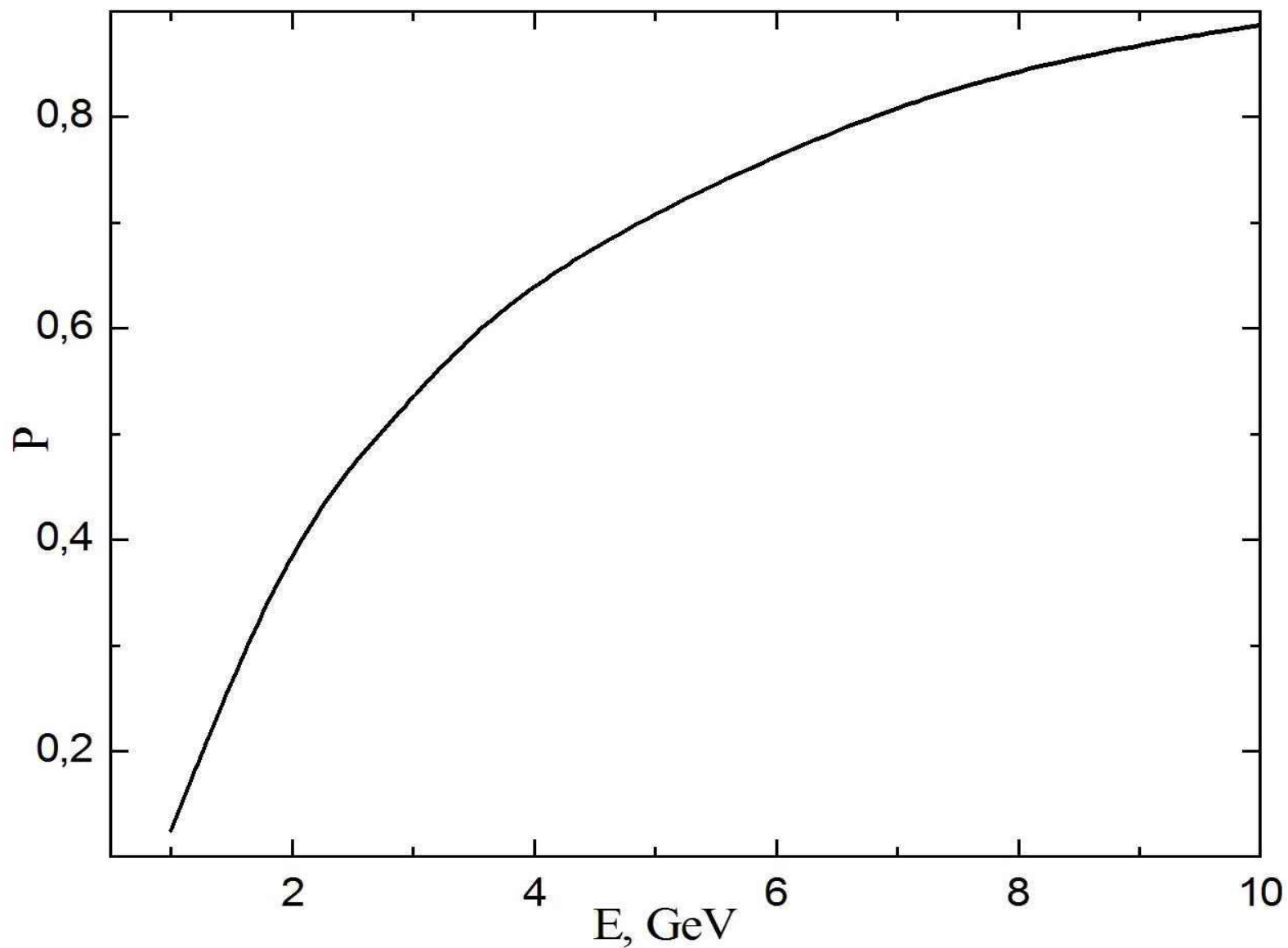
Вариант расположения телескопов ALEGRO на местности



Что уже сделано для реализации проекта **ALEGRO**

- Проведено массивное количественное моделирование широких атмосферных ливней от космических гамма-квантов с энергией 1 – 100 ГэВ и оптического фона ночного неба
- Проведено моделирование оптического сигнала в системе телескопов ALEGRO и разработка алгоритмов идентификации фотонных событий
- Созданы прототипы специализированных лавинных фотодиодов для детекторных блоков черенковского гамма-телескопа
- Создан прототип быстрой системы считывания и обработки данных (readout) для черенковского гамма-телескопа
- Имеются предварительные договоренности с партнерами из Армении (об изготовлении зеркал) и Аргентины (о предоставлении инфраструктуры)

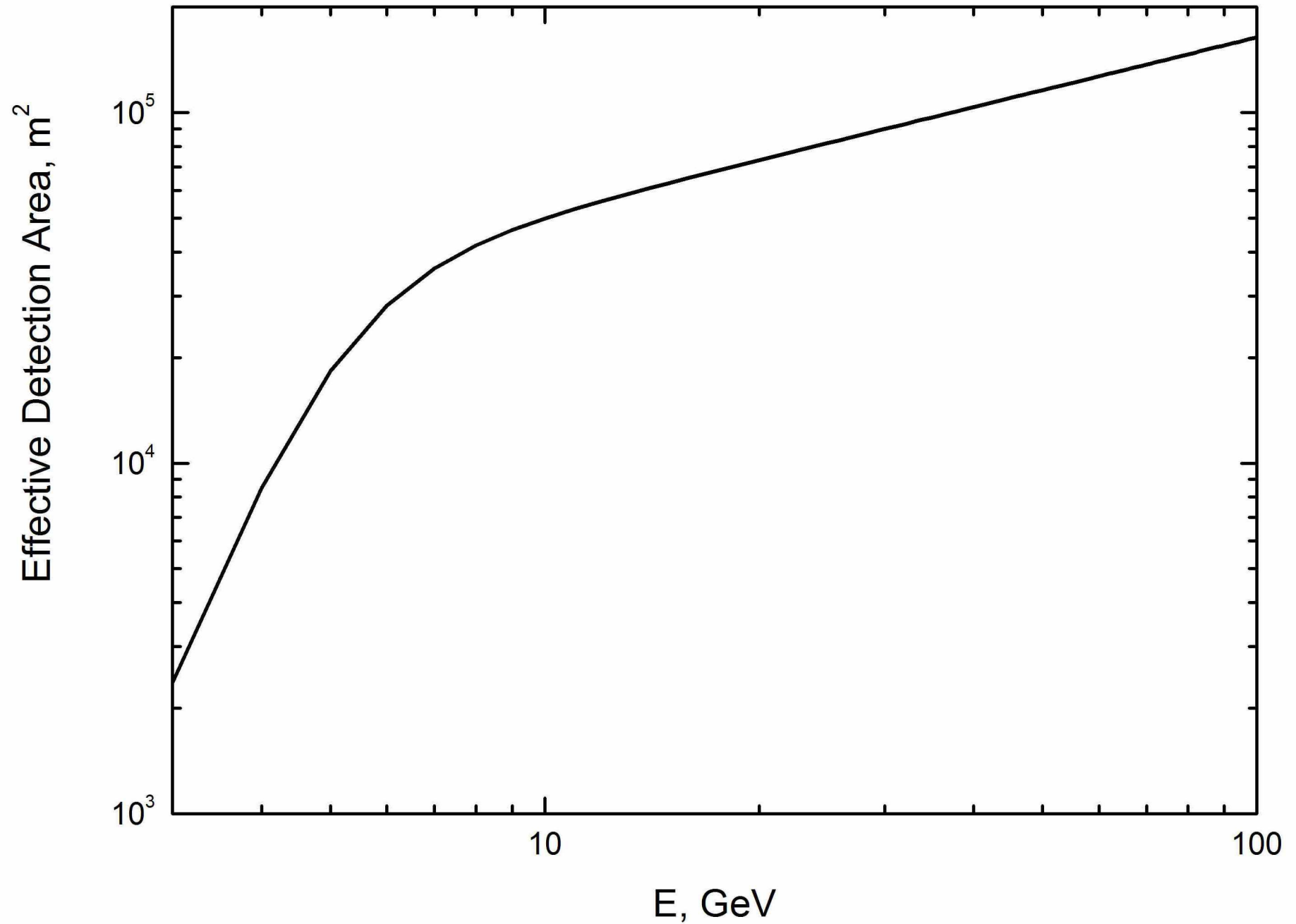
Вероятность регистрации черенковской вспышки на высоте 5 км
(по результатам 2,5 млн. реализаций гамма-событий и фона неба)



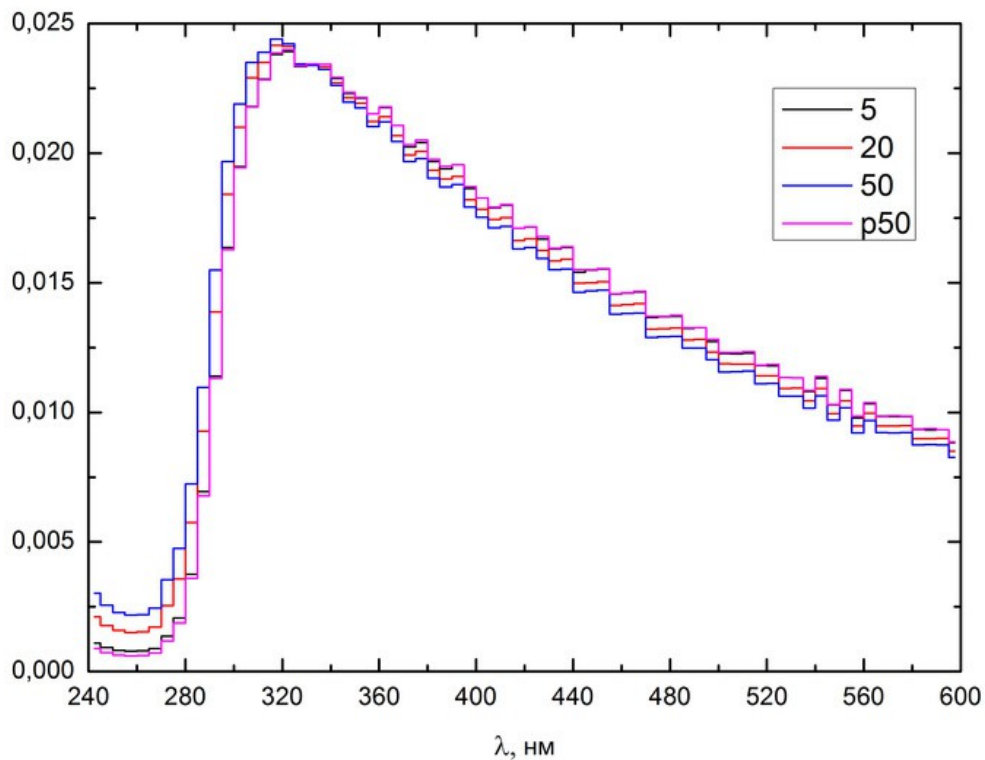
Предел наземной регистрации находится на энергии 3 – 5 ГэВ

Эффективная площадь массива из 4 телескопов ALEGRO

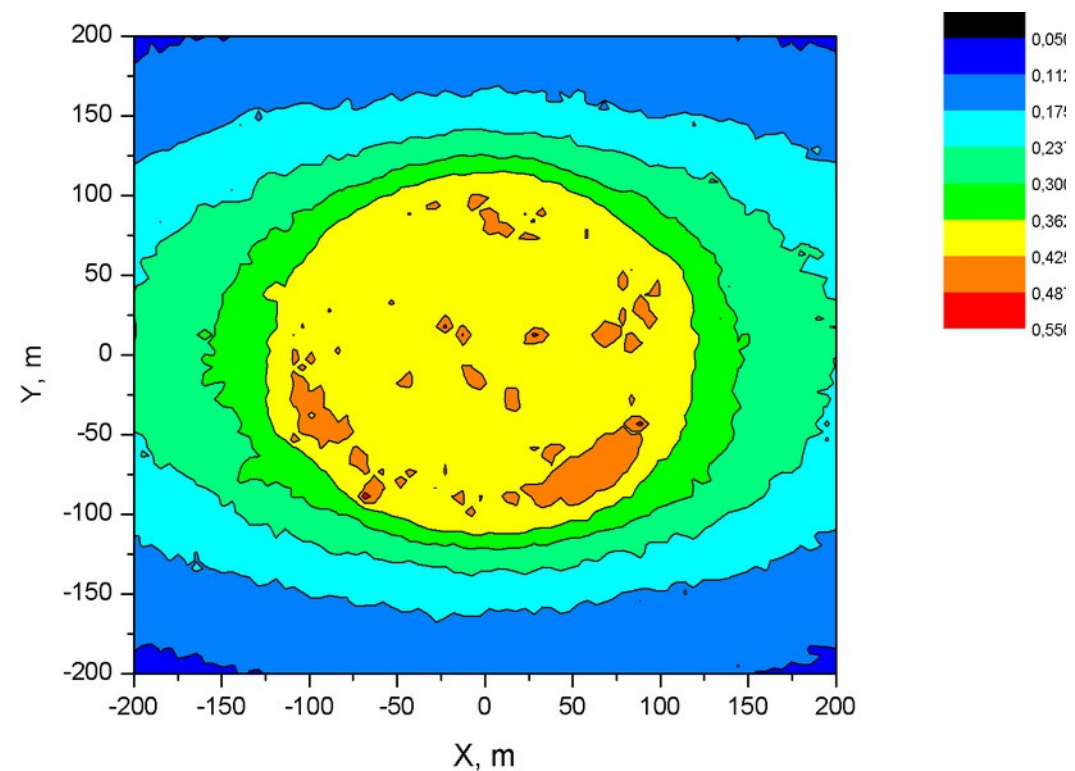
(в квадрате 100 x 100 м²)



Моделирование сигнала от гамма-событий в атмосфере



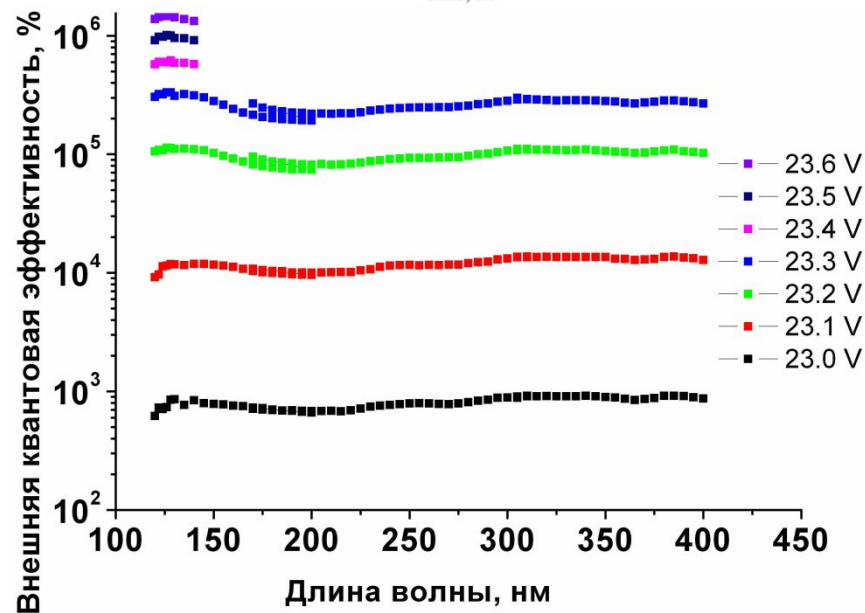
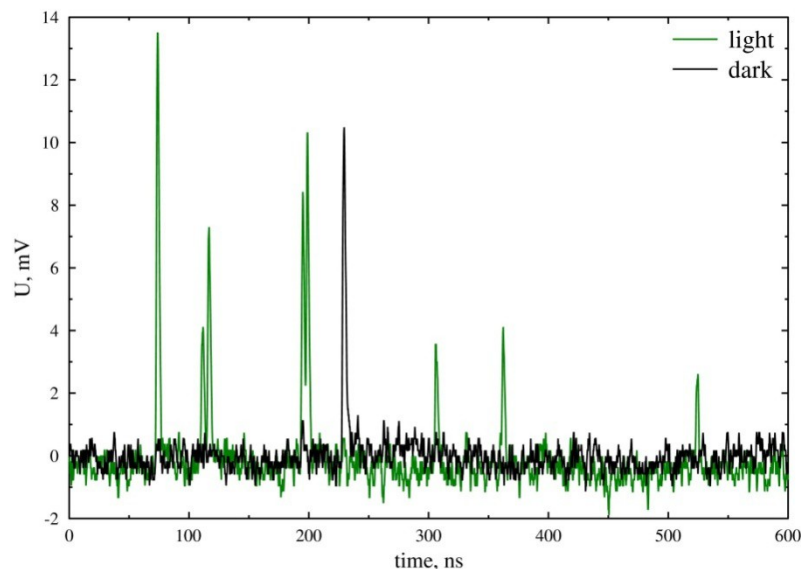
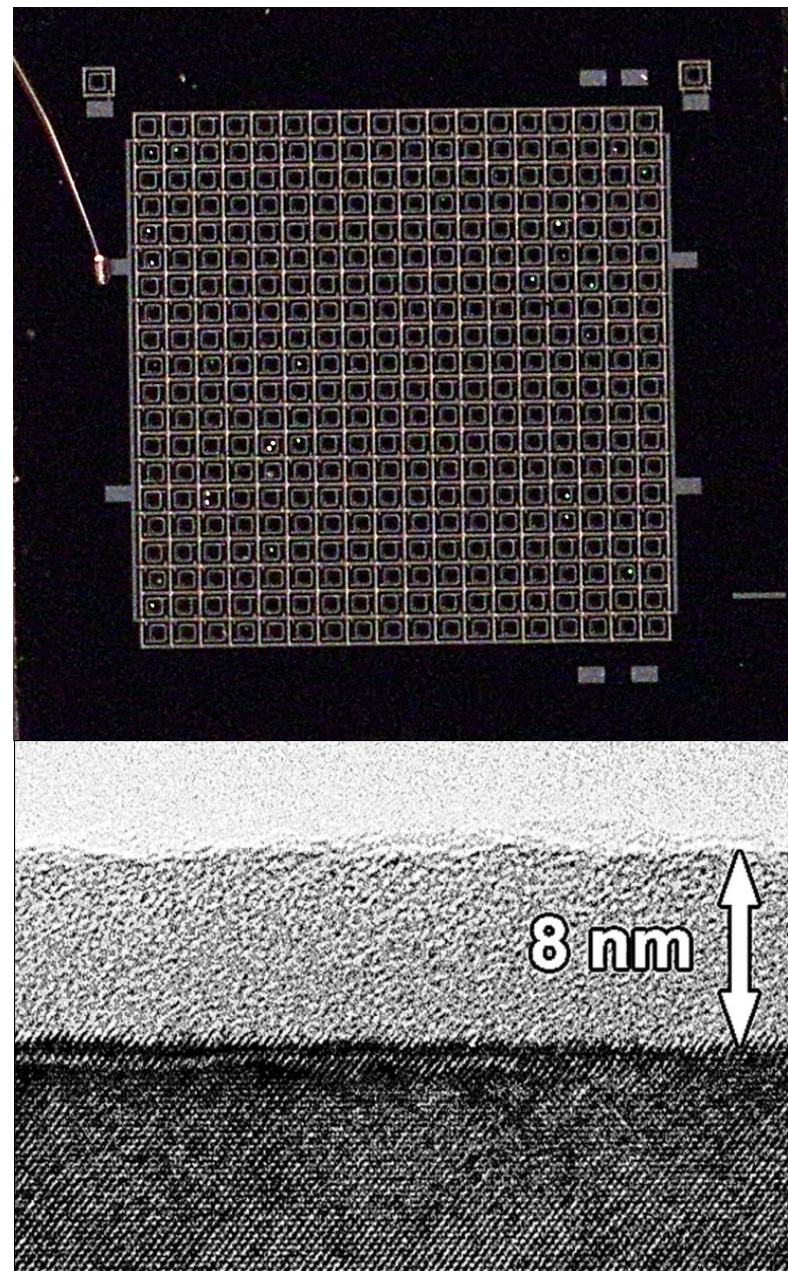
Нормированный спектр черенковского излучения на высоте 5 км, рожденного квантами с энергией 5, 20 и 50 ГэВ над плато Alto Chorillo (по 1000 событий)



Плотность черенковских фотонов (фот / м²) в диапазоне 300 – 600 нм на высоте 5 км, рожденного квантом с энергией 5 ГэВ над плато Alto Chorillo (одно событие)

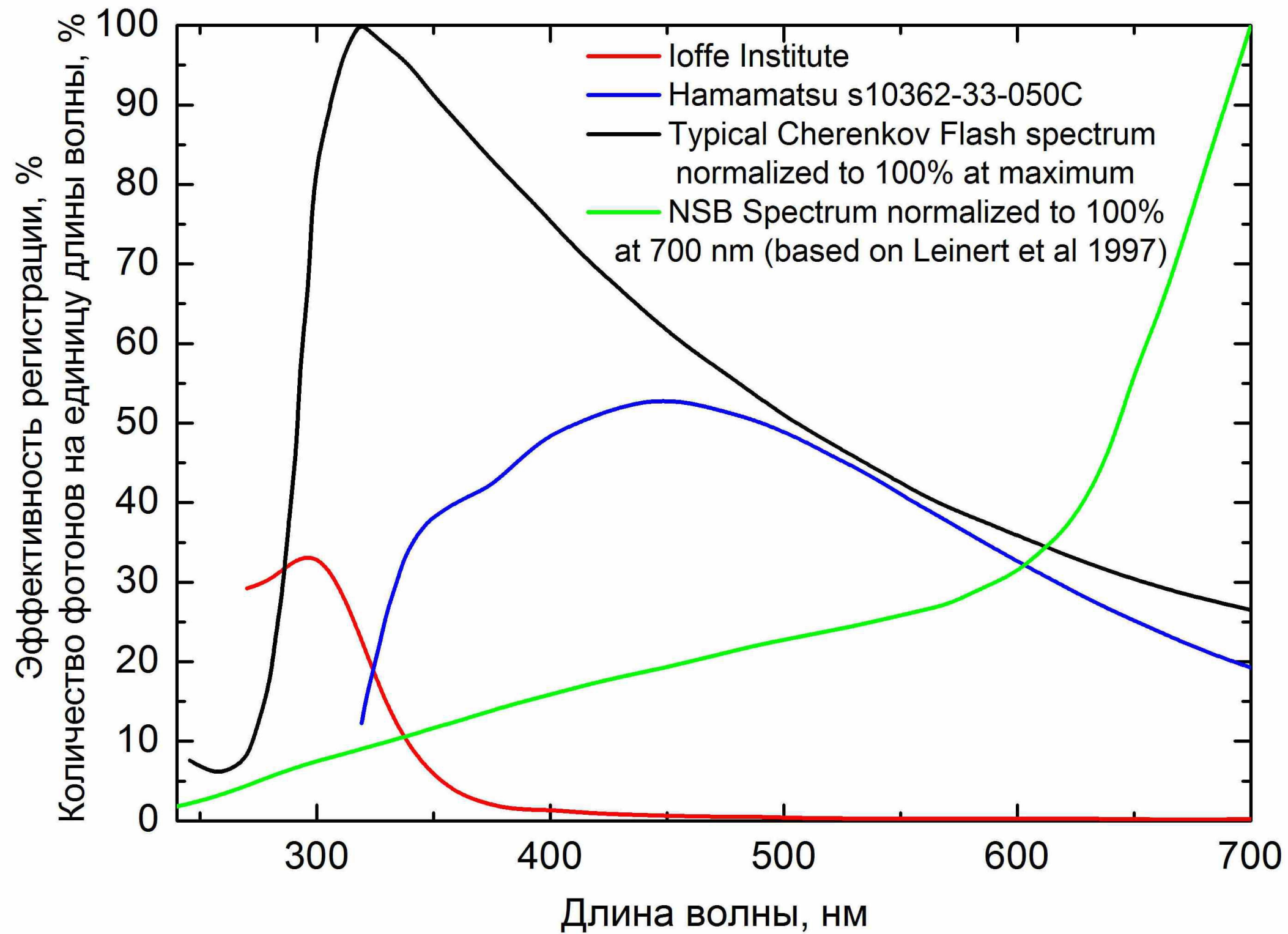
Моделирование широких атмосферных ливней производится с помощью оригинального кода, созданного Г.И. Васильевым (ФТИ) на основе базы данных GEANT4. На энергиях выше 30 ГэВ результаты расчетов согласуются с общепризнанными расчетами с помощью кода CORSIKA.

Специализированные детекторы на основе лавинных фотодиодов, создаваемые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

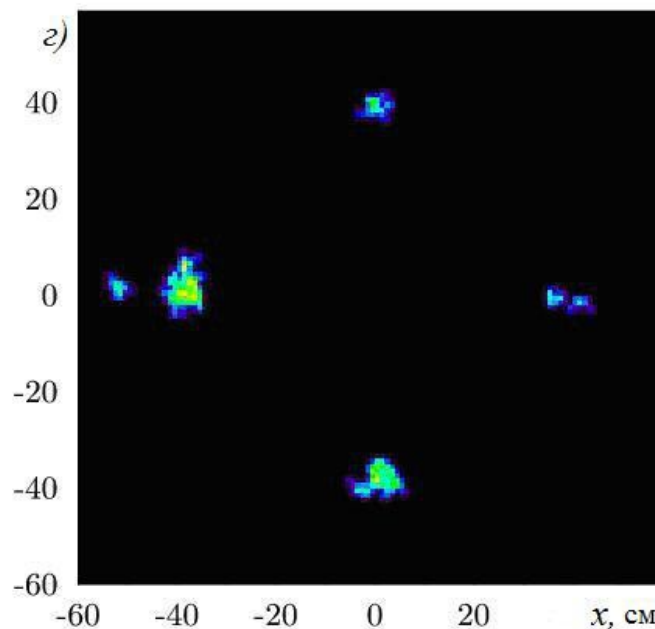
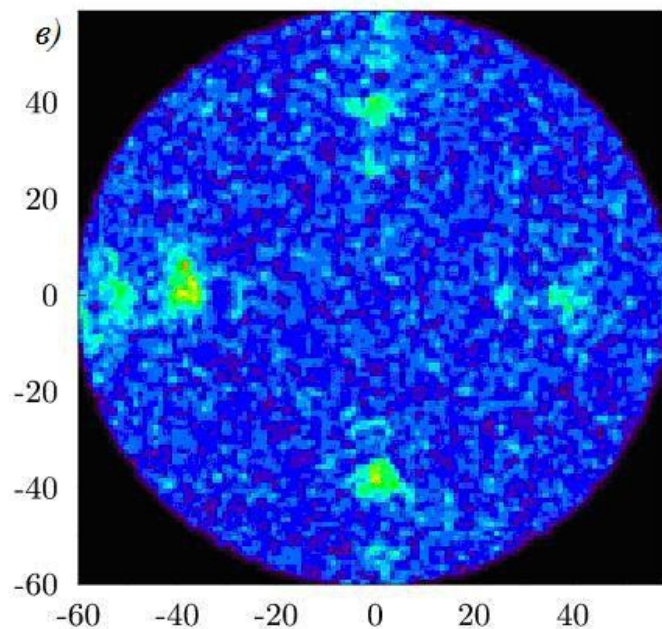
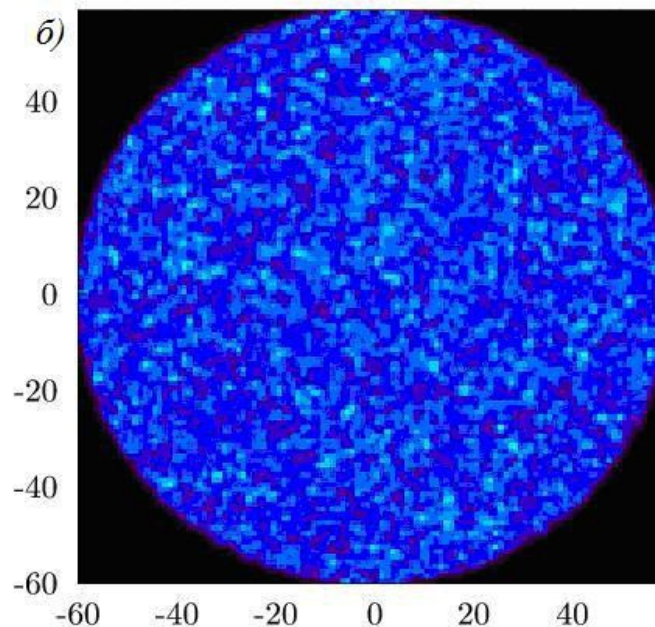
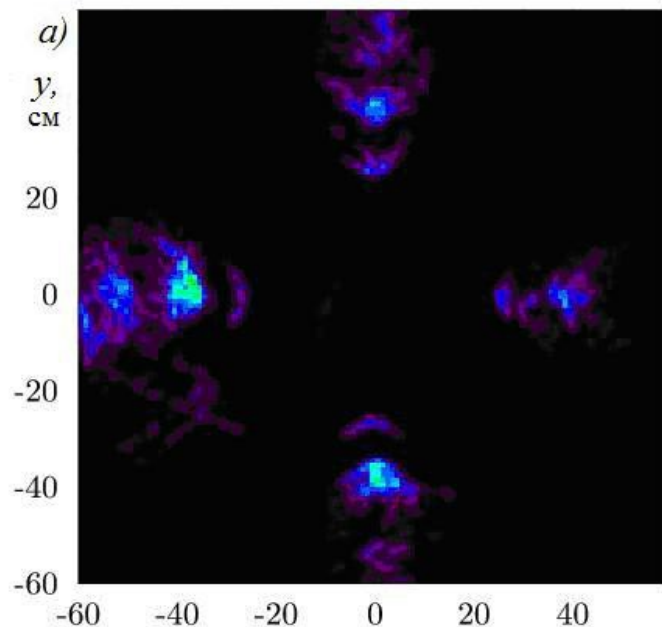


Спектральные измерения проведены в метрологической лаборатории Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

В.В. Забродский, П.Н. Аруев и др.
(ЖТФ 2013, NIM A 2015)



Моделирование сигнала и оптического фона



Модельные изображения в фокальных плоскостях черенковских телескопов ALEGRO (для удобства восприятия фокальные плоскости всех телескопов приведены на одном рисунке):

a – черенковская вспышка, сформировавшаяся при взаимодействии гамма-кванта (с энергией 5 ГэВ) с атмосферой;

б – оптический фон ночного неба;

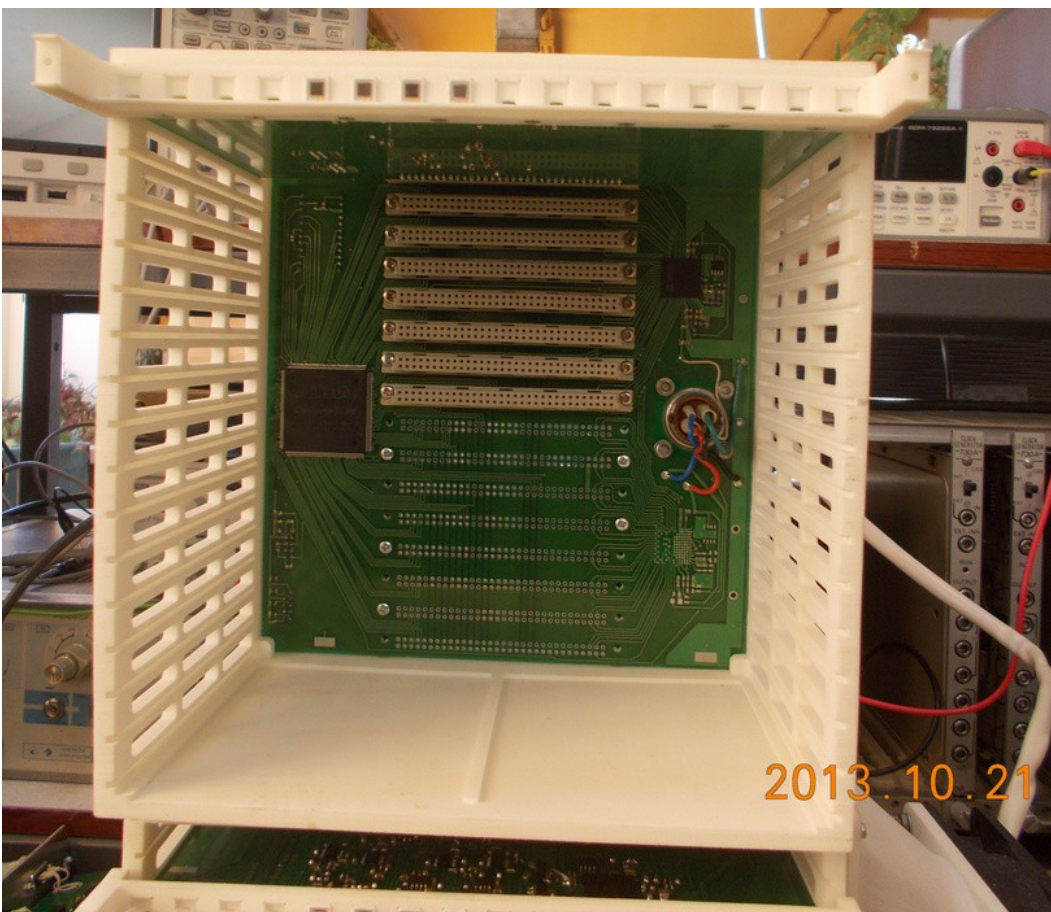
в – совместное изображение *a* и *б*;

г – изображение *в* после обработки фильтром

(Г.И. Васильев,
Е.Е. Холупенко,
Д.А. Байко и др. 2012)

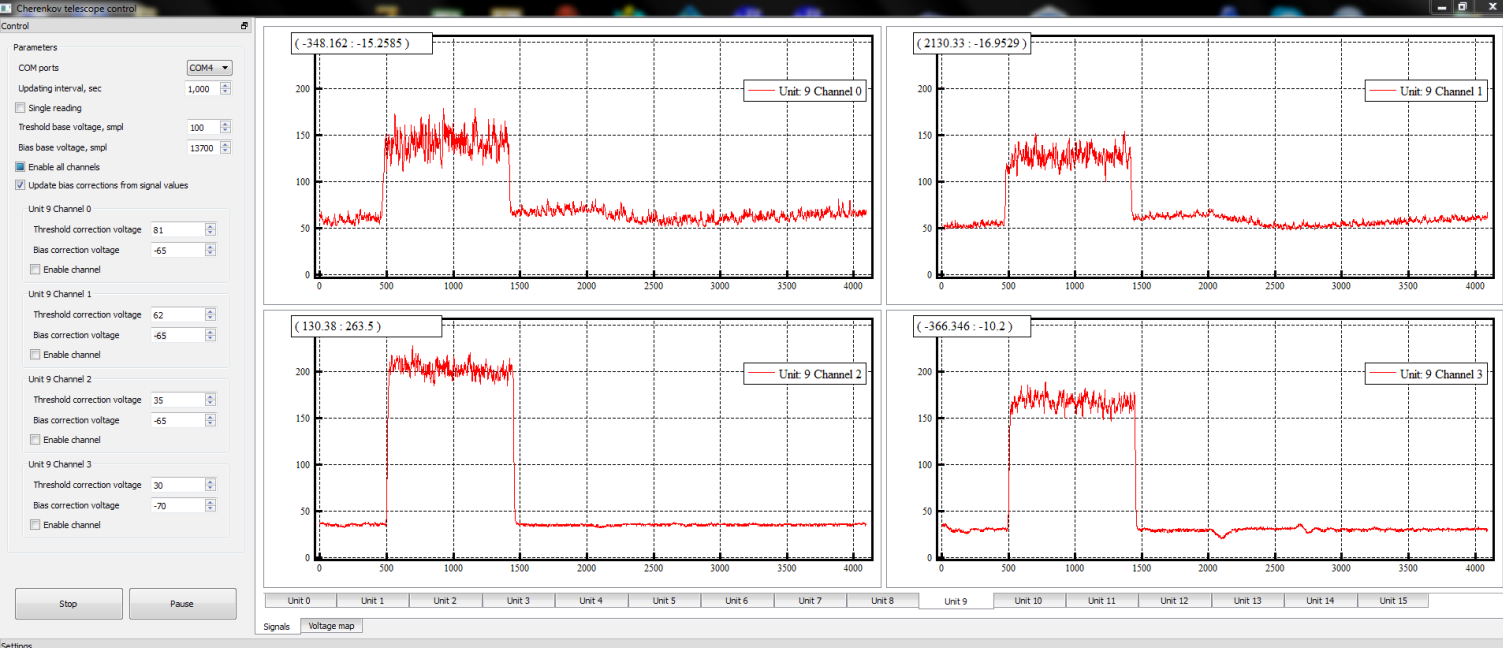
Прототип оптического приемника черенковского телескопа с быстрой системой считывания данных, изготовленный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Каждый модуль состоит из 16 детекторов Hamamatsu S10362-33, снабженных индивидуальными электронными системами регистрации сигналов и предварительной обработки данных (readout).

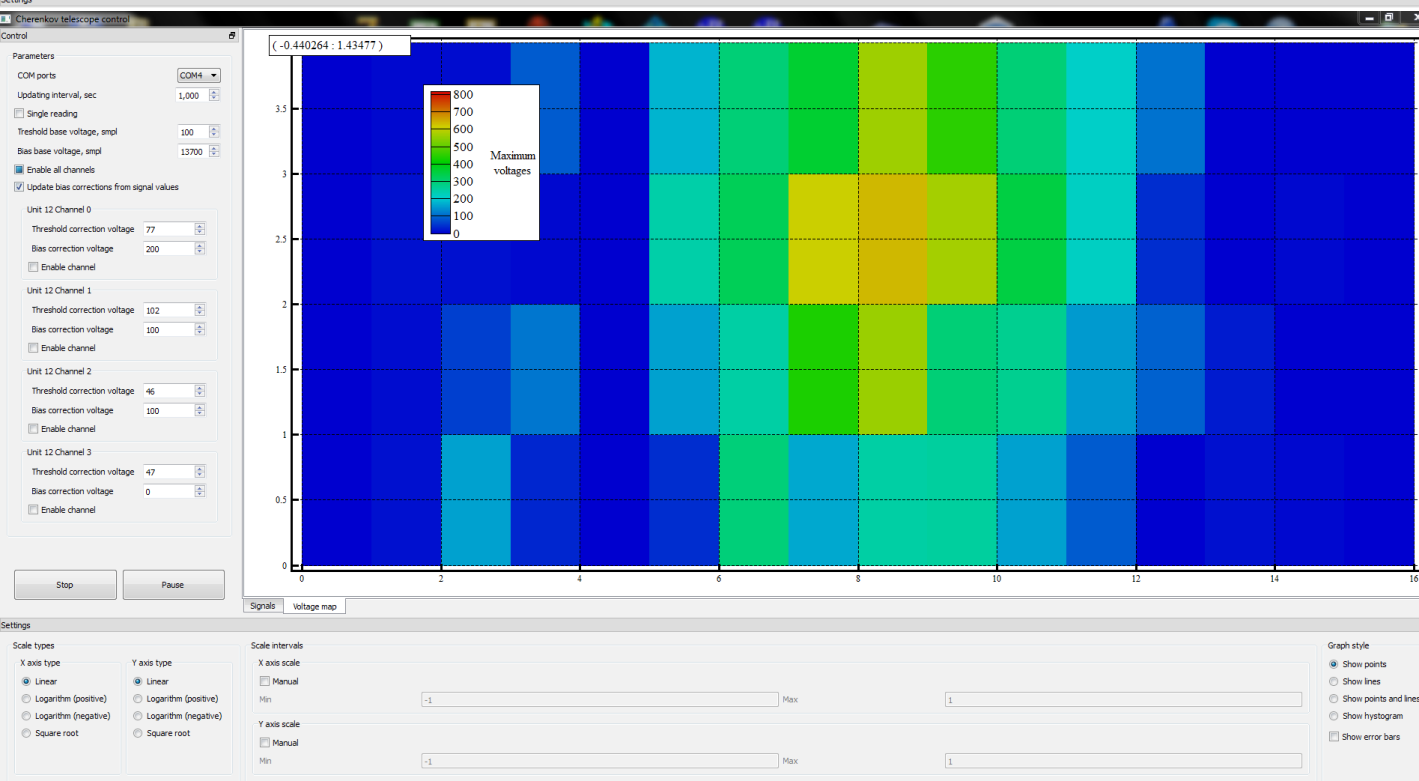


Блок представляет собой кейс, содержащий 16 модулей и кросс-плату с контроллером и интерфейсом связи по шине USB.





Регистрация
тестового импульса
от светодиода



Cherenkov Telescope v2.12 Mediana

Режим: Телескоп 2

Ручное управление модулем

Номер модуля: 2 Run

Номер слота: 15

autoReadAll: AutoLAMcheck:

Ручное управление LAM сигналами

Маска: 255 CheckLAM: LAM: Общий LAM:

Ручное управление DAC

Адрес: 0 DACVH:

Данные: 13680

Port:

Тестер: TEST(20) TEST(0)

Всёобщее управление

RunAll: SetAll: ReadAll: AutoLAMcheck: AutoRunAll:

Панель LAM сигналов

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

maskLineExit: maskAll: SetMASKs: CheckLAMs:

Threshold1: 220 HV1: 13680 Read1: Read2: HV2: 13780 Threshold2: 220 Save

Порог HE от медианы: Threshold3: 220 HV3: 13680 Read3: Read4: HV4: 13700 Threshold4: 220 Load

Система управления и обработки данных для оптического приемника

Заключение

В случае успешной реализации проекта, телескоп ALEGRO будет самым эффективным из существующих наземных и орбитальных инструментов для исследования космических источников гамма-излучения в диапазоне энергий 5 – 50 ГэВ.

Этот телескоп позволит решать ряд актуальных задач гамма-астрономии и астрофизики высоких энергий, в частности:

- строить кривые блеска гамма-транзиентов в диапазоне 5 – 50 ГэВ с высоким временным разрешением
- проводить поиск продуктов аннигиляции темной материи в центре Галактики и в массивных скоплениях галактик
- исследовать фундаментальные процессы ускорения частиц в космических объектах с экстремальным энерговыделением

Поддержка научного сообщества

- Проект ALEGRO получил положительные рекомендации Межведомственной рабочей группы экспертов по приоритетам развития наземных астрономических инфраструктурных проектов Российской Федерации на период 2016-2025 г. и рекомендован к реализации среди приоритетных проектов (меморандум МРГ от 15 декабря 2015 г.).
- Проект ALEGRO одобрен международным консорциумом Astroparticle Physics European Consortium (APPEC, 6 апреля 2016 г., Париж, докладчик – Ф. Агаронян).

Спасибо за внимание!

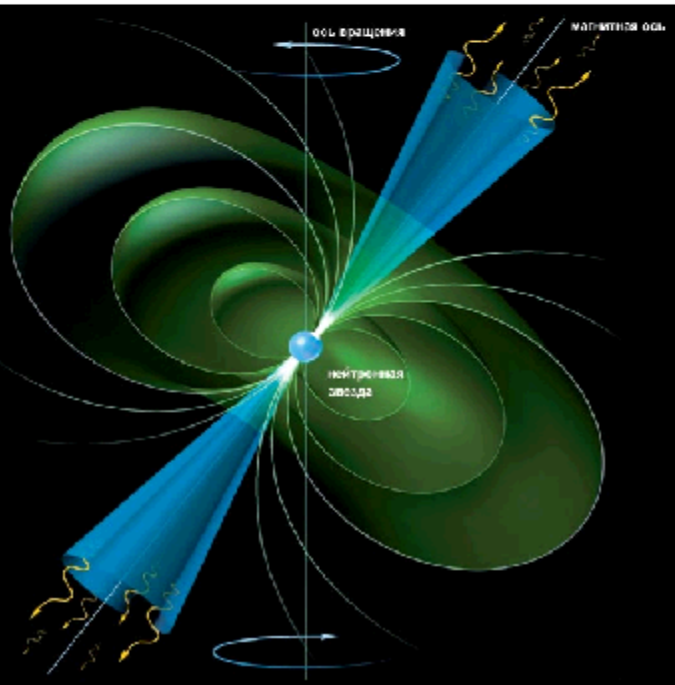
Статья расходов	Минимальный вариант 3 телескопа		Оптимальный Вариант 4 телескопа	
	Атакама	Эльбрус	Атакама	Эльбрус
Детекторный блок (фотодетектор телескопа на основе полупроводниковых фотоумножителей с использованием фотонных конденсеров и считывающей электроники наносекундного разрешения), в млн. руб.	3x160	3x160	4x160	4x160
Электронный блок обработки и хранения информации, млн. руб.	3x50	3x50	4x50	4x50
Комплект зеркал, млн. руб.	3x70	3x70	4x70	4x70
Несущая ферма телескопа с быстро ориентируемым механизмом поворота зеркала и защитной конструкцией, млн. руб.	3x170	3x170	4x170	4x170
Расходы по созданию инфраструктуры обсерватории, млн. руб.	400	400	500	500
Итого, млн. руб.	1.75 млрд. руб	1.75 млрд. руб	2.2 млрд. руб	2.2 млрд. руб
Средние годовые расходы на эксплуатацию обсерватории				
Стоимость регламентного обслуживания, млн. руб./год	12	12	16	16
Фонд заработной платы инженерно-технической службы с учетом налогов, млн. руб./год	5	3.5	5	3.5
Аренда местного офиса и обслуживание транспорта, млн. руб./год	1.5	0.75	1.5	0.75
Командировки, млн. руб./год	1.5	0.75	1.5	0.75
Затраты на электроэнергию, млн. руб./год	1.8	1.8	2	2
Итого, млн. руб./год	21.8	18.8	26	23

Научные задачи: Гамма-всплески и Пульсары

Гамма-всплески - это вспышки гамма-излучения, связанные с взрывами колоссальной мощности, происходящими в отдаленных галактиках. Гамма-всплески являются наиболее яркими явлениями во Вселенной. Длительность гамма-всплесков может варьироваться от 10 мс до нескольких минут. За первоначальной вспышкой обычно следует более продолжительное свечение, наблюдающееся в более мягких диапазонах длин волн. Несмотря на значительный прогресс в наблюдениях гамма-всплесков в последние годы, природа этих источников остается неясной. Гамма-всплески и следующие за ними свечения наблюдаются во всех диапазонах длин волн от радио до гамма. Однако, наблюдения в самой жесткой части спектра (выше 1 ГэВ) довольно редки ввиду недостаточной апертуры телескопа Fermi-LAT. Черенковские телескопы (порог 50-100 ГэВ) вообще “не видят” гамма-всплески.



Пульсары - это быстро вращающиеся нейтронные звезды, магнитный момент которых направлен не по оси вращения. Электромагнитное излучение пульсаров генерируется в областях их магнитосферы, расположенных над магнитными полюсами. Поэтому каждый раз, когда магнитный полюс оказывается на луче зрения, регистрируется вспышка излучения. Такие пульсации наблюдаются во всех диапазонах электромагнитного спектра - от радиоволн до гамма-лучей. Наблюдения многих пульсаров указывают на наличие экспоненциального завала потока в диапазоне от 1 до 10 ГэВ. Однако, недавние наблюдения пульсара в Крабовидной туманности с помощью черенковских телескопов на энергиях около 70 ГэВ скорее свидетельствуют об отсутствии завала. На данный момент наиболее популярны две модели ускорения частиц и генерации гамма-излучения в магнитосферах пульсаров – модель полярных шапок и модель внешних зазоров. Получение характеристики “хвостов” пульсарных спектров очень важно для выбора правильной модели.



Крабовидная туманность: излучение стандартной свечи

Abdo et al., *Astrophysical Journal*, **708**, 1254 (2010)

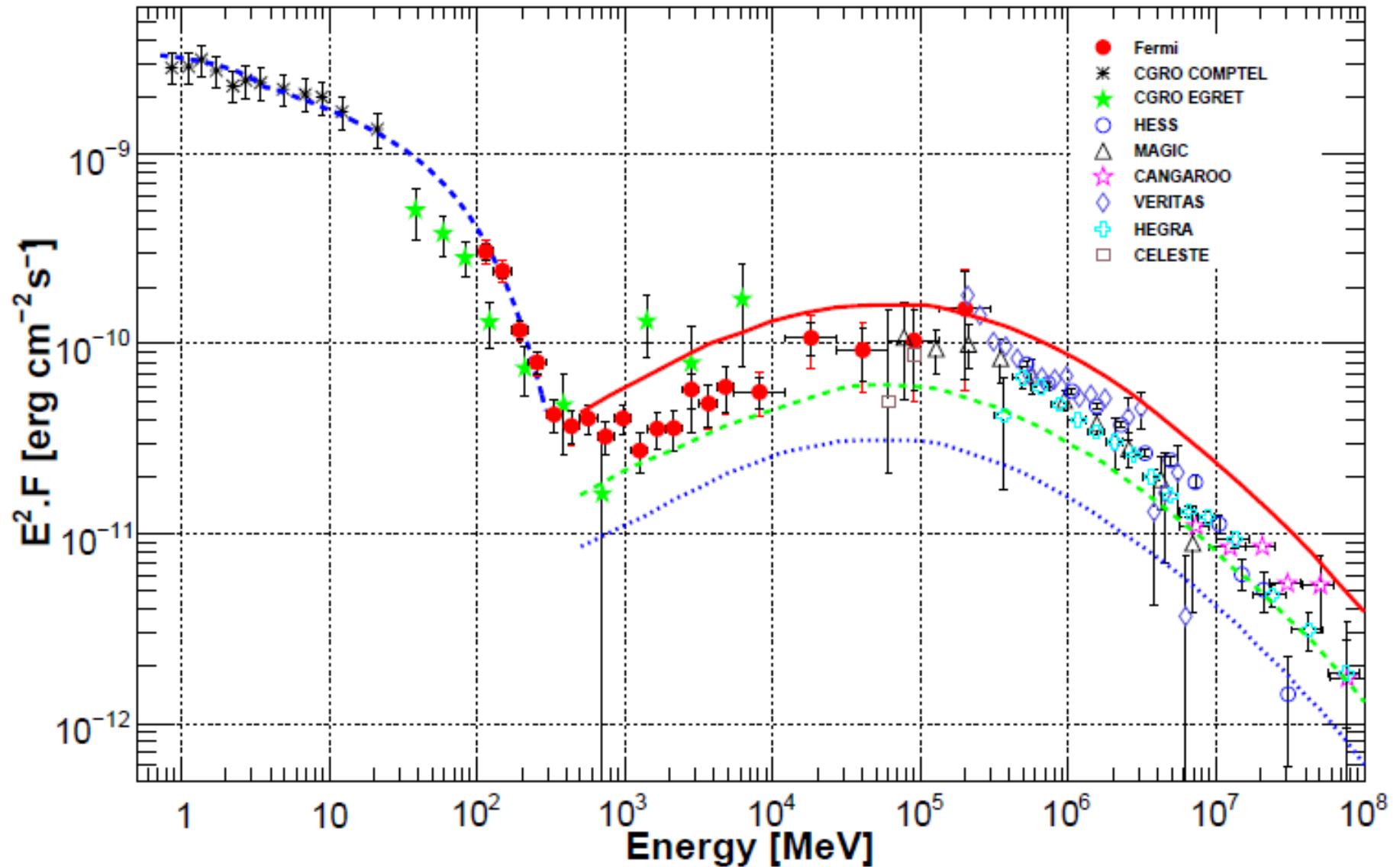
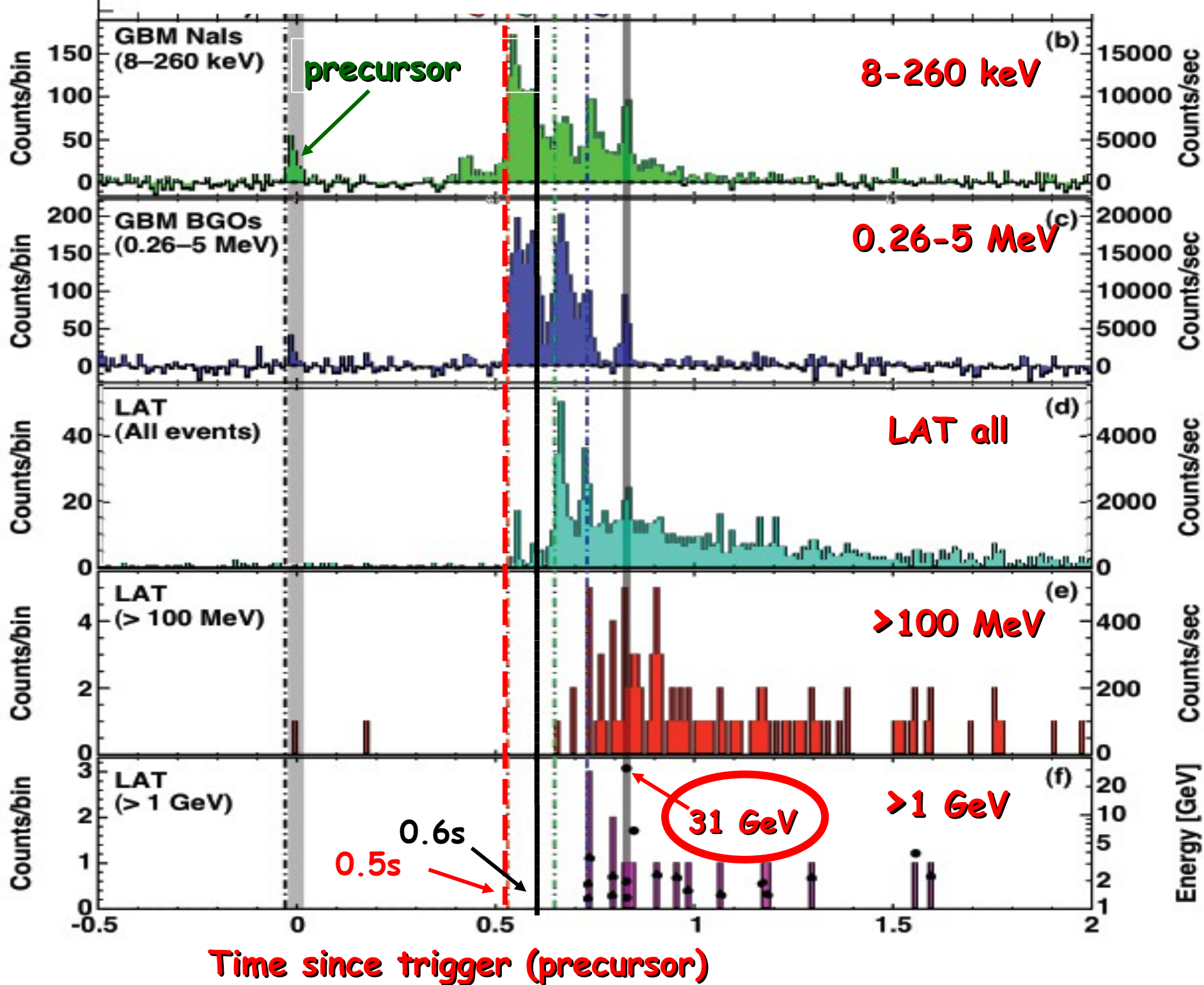


FIG. 9.— The spectral energy distribution of the Crab Nebula from soft to very high energy γ -rays. The fit of the synchrotron component, using COMPTEL and LAT data (blue dashed line), is overlaid. The predicted inverse Compton spectra from Atoyan and Aharonian (1996) are overlaid for three different values of the mean magnetic field: 100 μ G (solid red line), 200 μ G (dashed green line) and the canonical equipartition field of the Crab Nebula 300 μ G (dotted blue line). References: CGRO COMPTEL and EGRET: Kuiper et al. (2001); MAGIC: Albert et al. (2008); HESS: Aharonian et al. (2006); CANGAROO: Tanimori et al. (1997); VERITAS: Celik (2007); HEGRA: Aharonian et al. (2004); CELESTE: Smith et al. (2006)



GRB 090510 @ $z = 0.9$ Abdo et al 2009

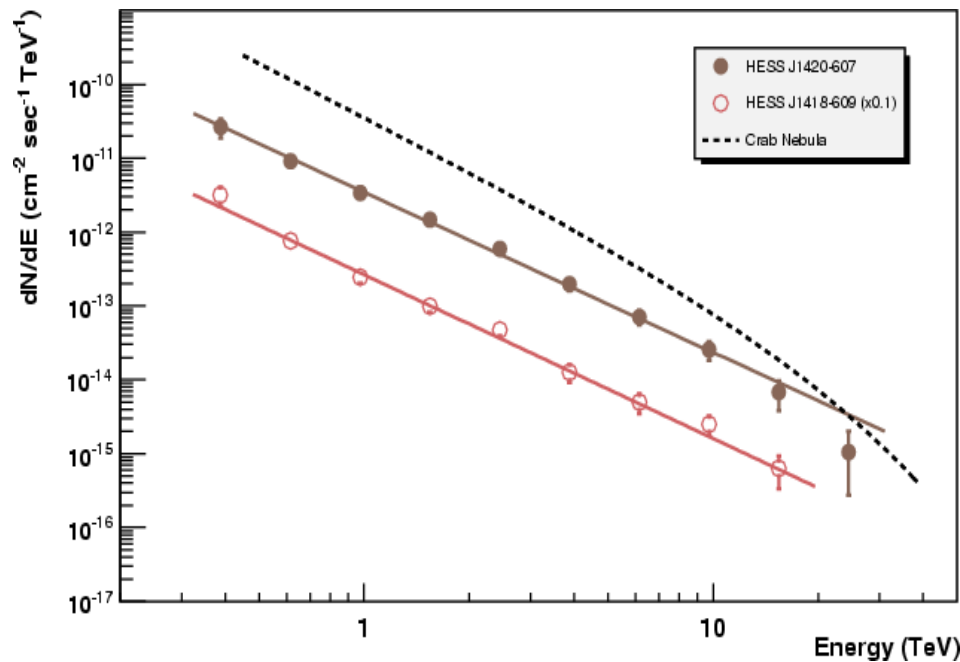
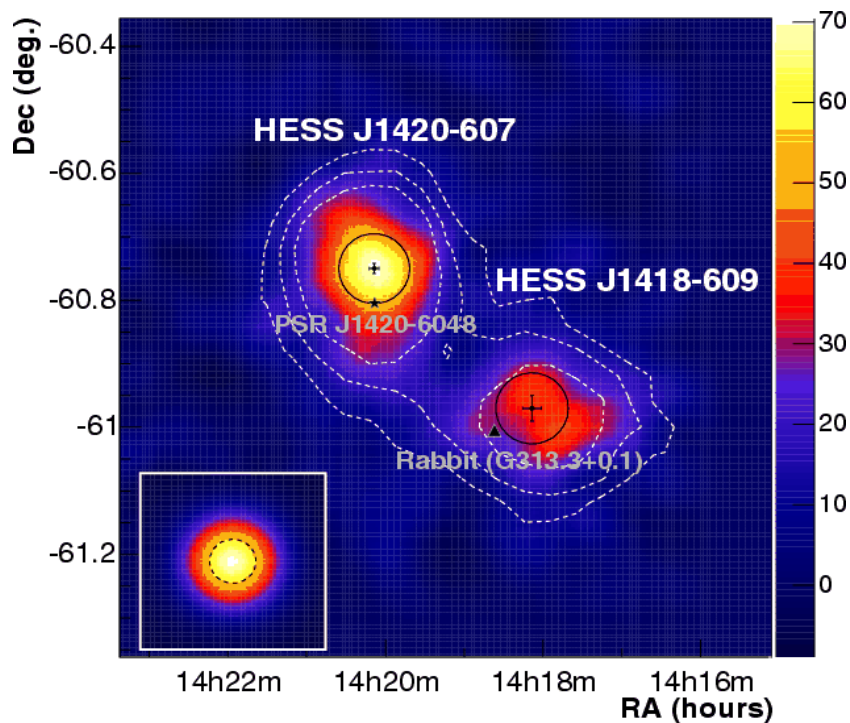
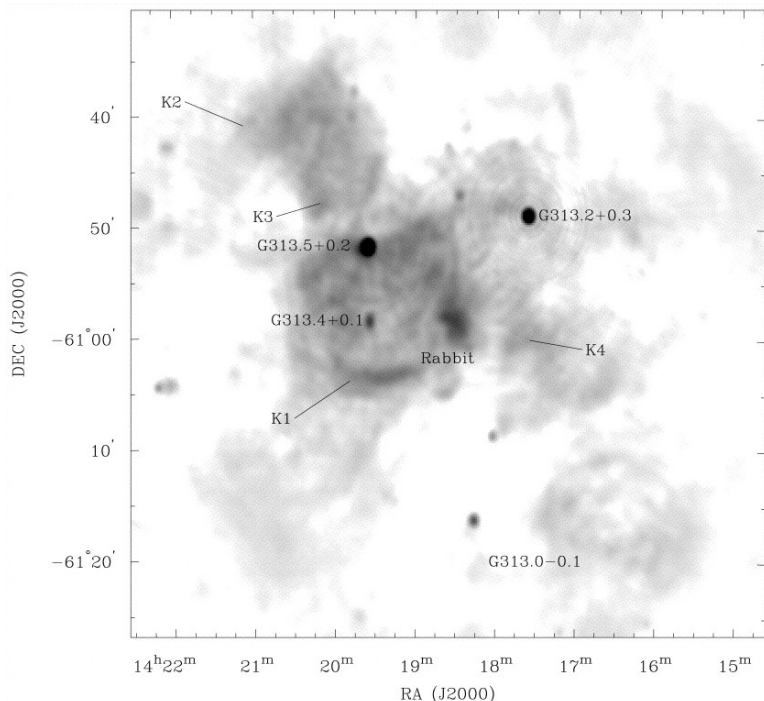
Загадочный гамма-источник Kookaburra

Изображение окрестности
гамма-источника GeV J1417-6100
в диапазоне 20 см
(R. Roberts et al. 1999)

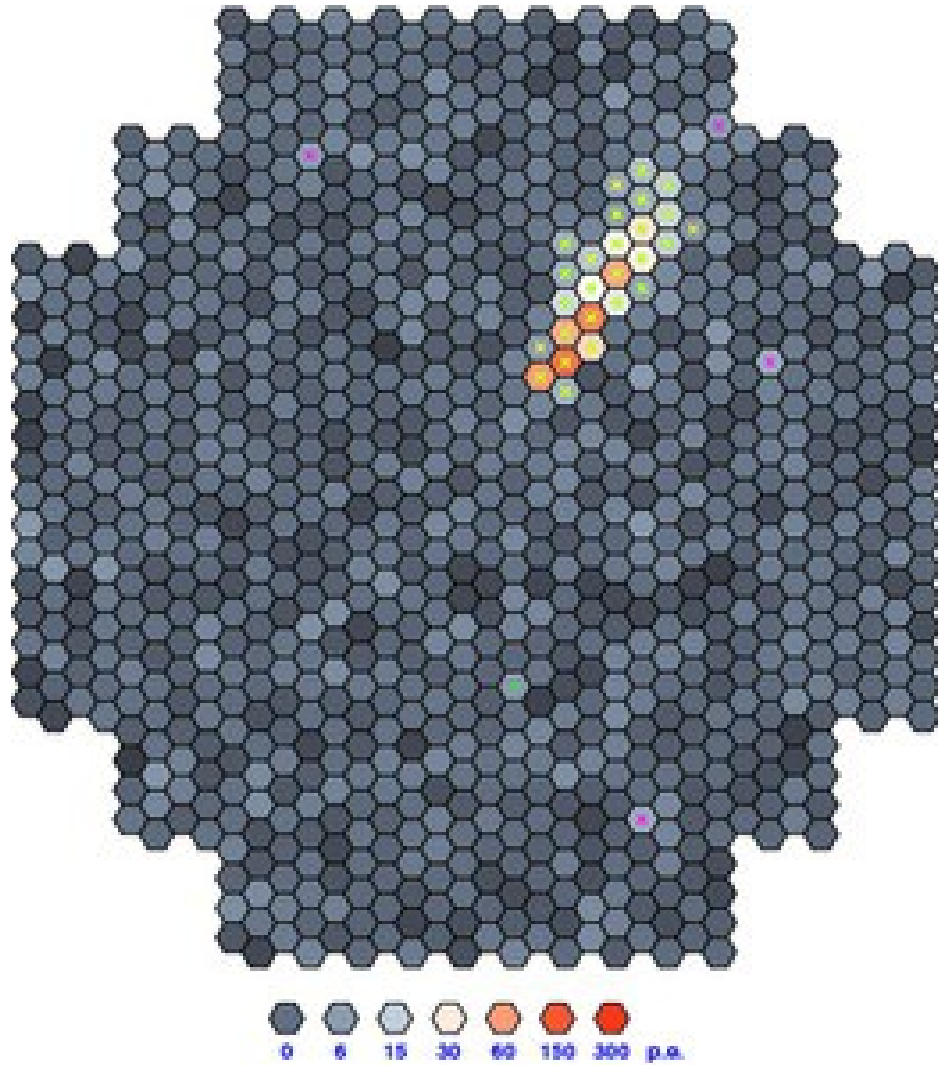


Mark Thompson
(2006)

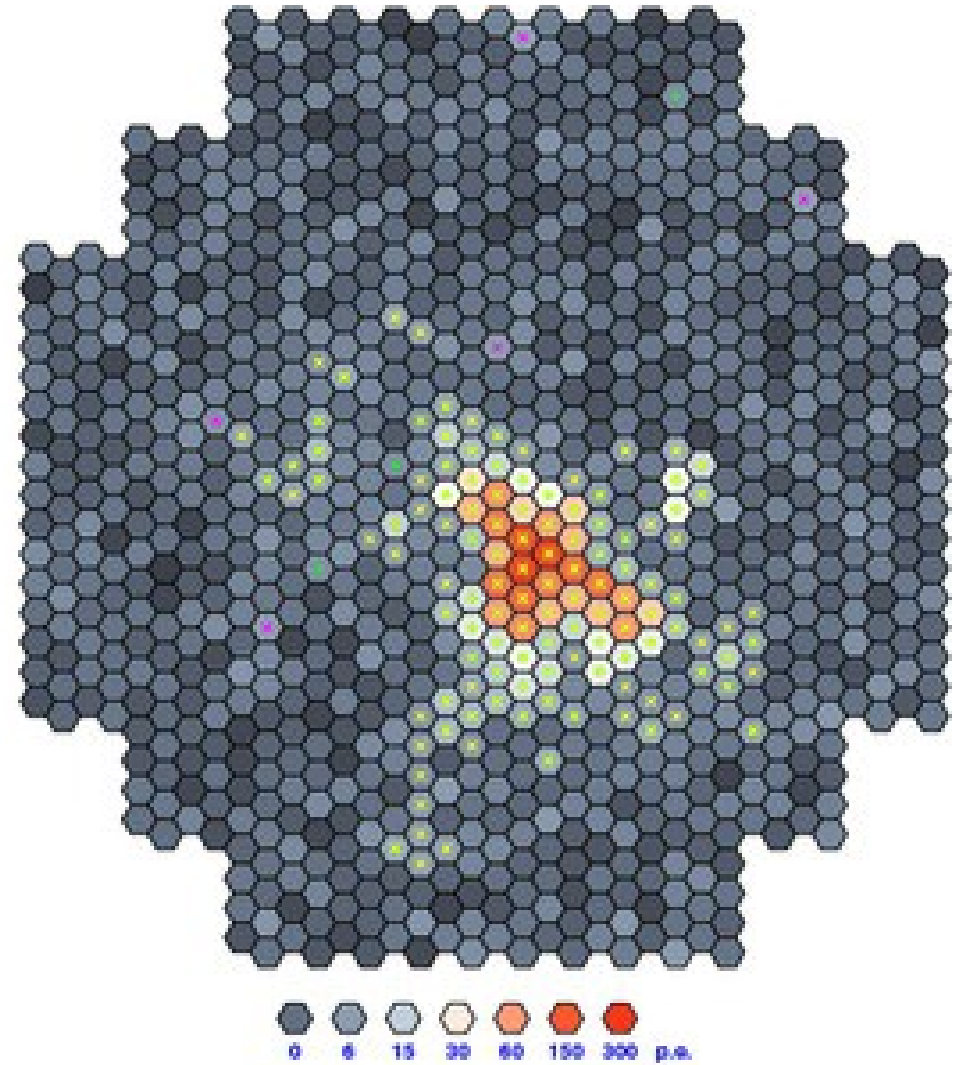
С помощью черенковского телескопа H.E.S.S.
исследована структура источника Kookaburra
и показано, что он представляет собой две
пульсарные туманности (F. Aharonian et al.,
Astronomy and Astrophysics, 456, 245, 2006.)



Изображения ливней, вызванных γ -квантом и протоном

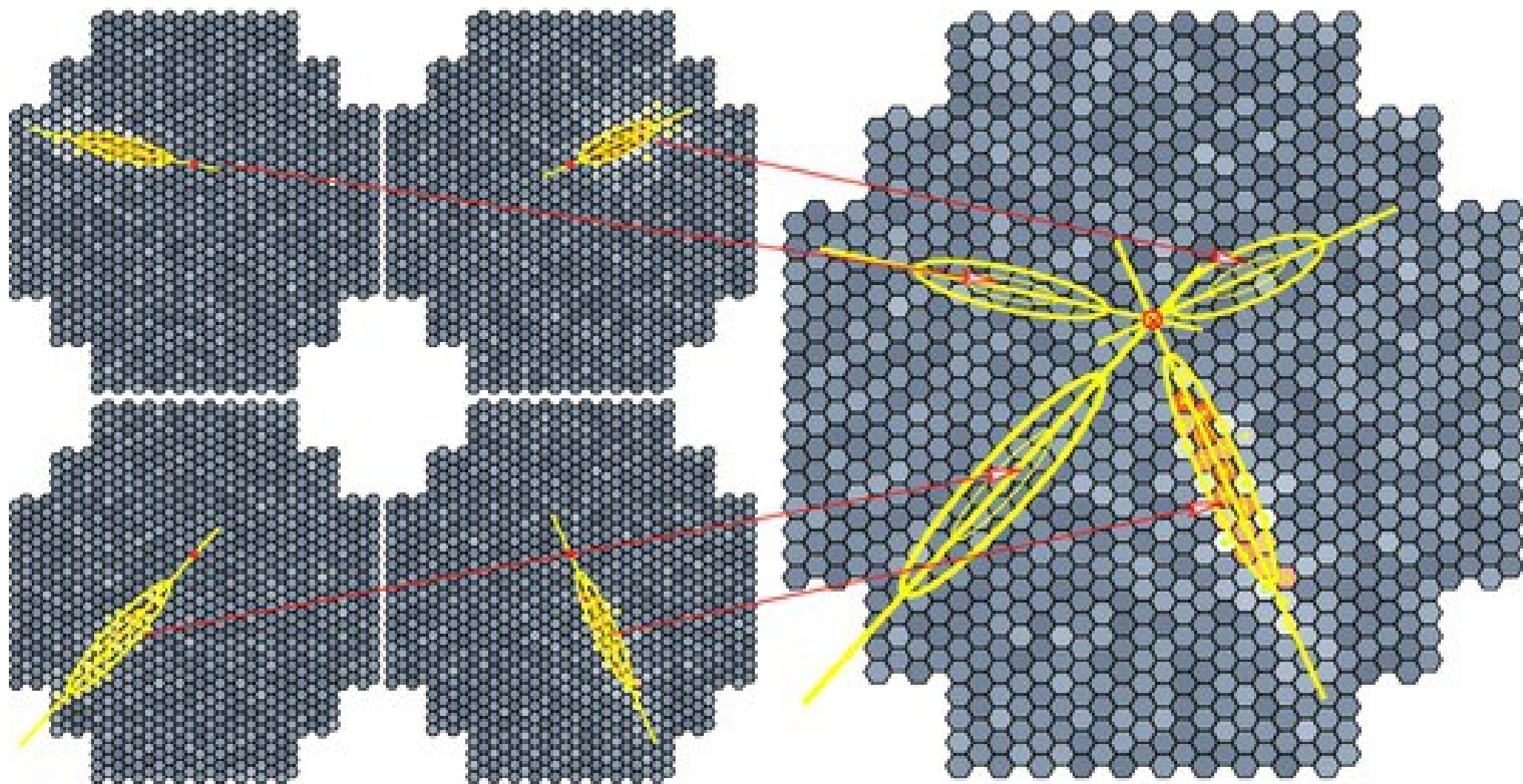


1.0 TeV gamma shower

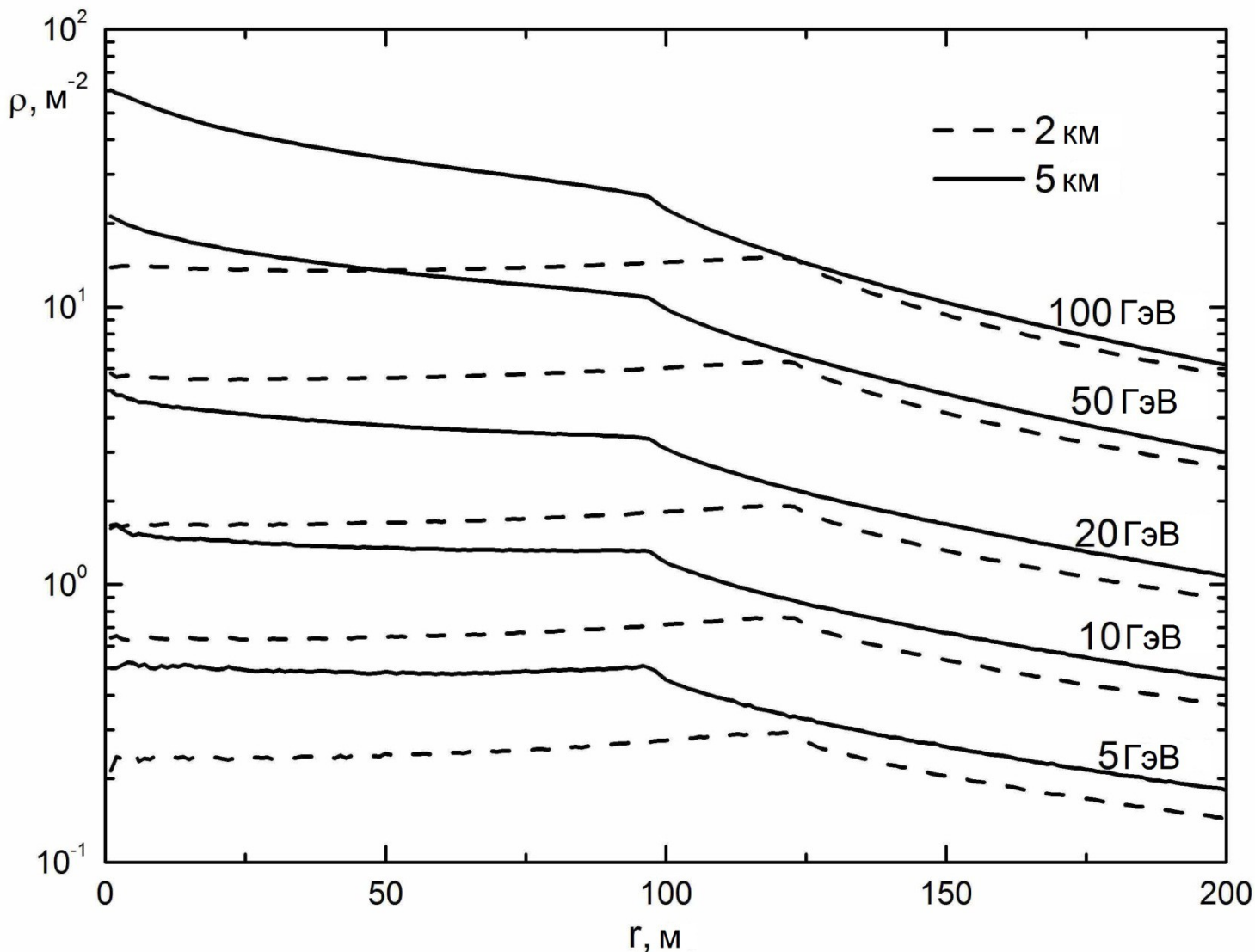


2.6 TeV proton shower

Стереоскопический подход в наблюдениях черенковских вспышек



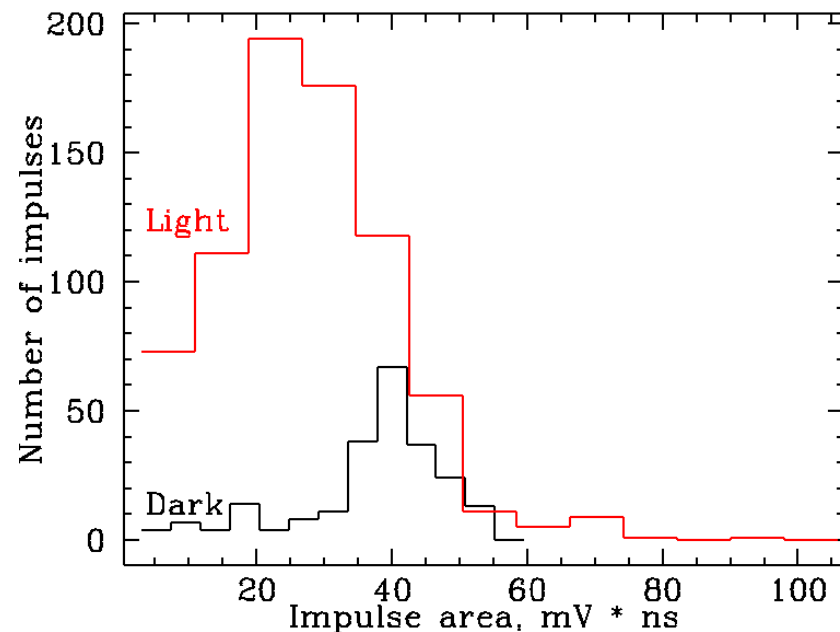
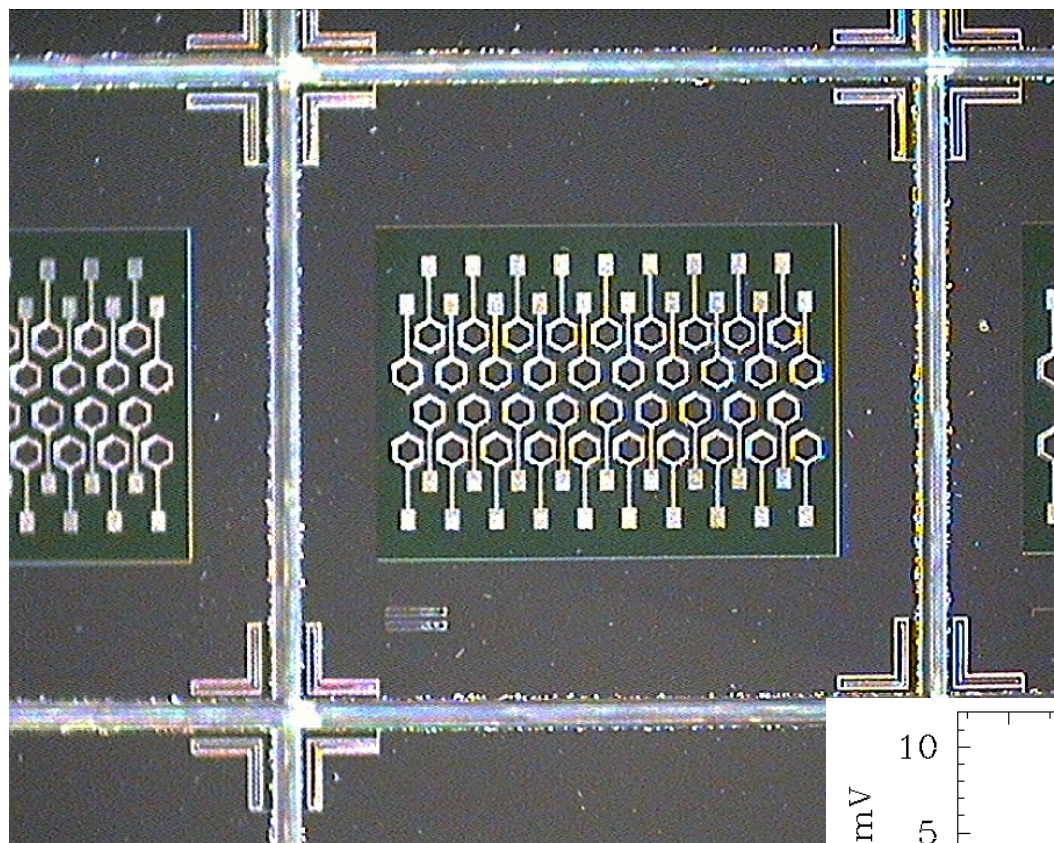
Преимущество размещения планируемой гамма-обсерватории на большой высоте



Эффективность наземной гамма-обсерватории напрямую зависит от количества черенковских фотонов, которое может быть собрано зеркалами телескопов. На высоте 5 км средняя поверхностная плотность черенковских фотонов (ППЧФ), соответствующая одной и той же энергии первичных частиц, может **более чем в два раза** превышать ППЧФ на высоте 2 км, на которой расположены гамма-обсерватории H.E.S.S. и MAGIC.

Зависимость среднего значения ППЧФ от расстояния до оси ливня для различных энергий первичного гамма-кванта (указаны рядом с кривыми) и высот наблюдения.

Специализированные детекторы на основе лавинных фотодиодов, создаваемые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе



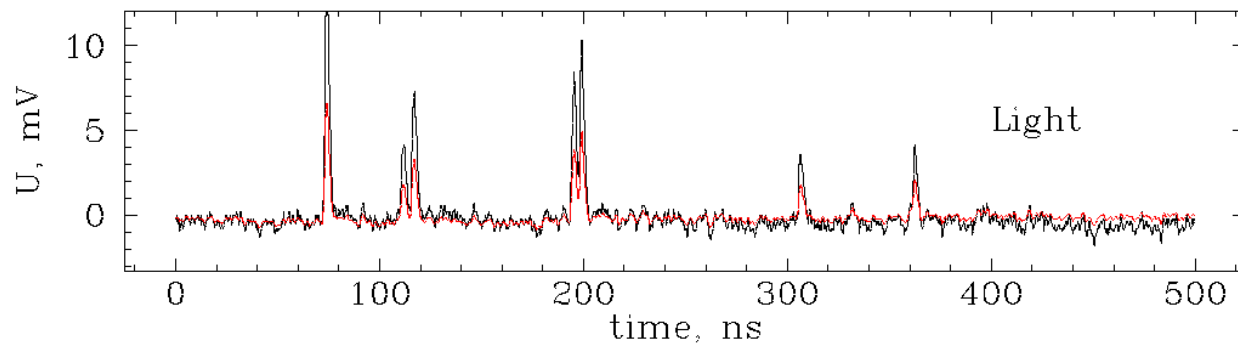
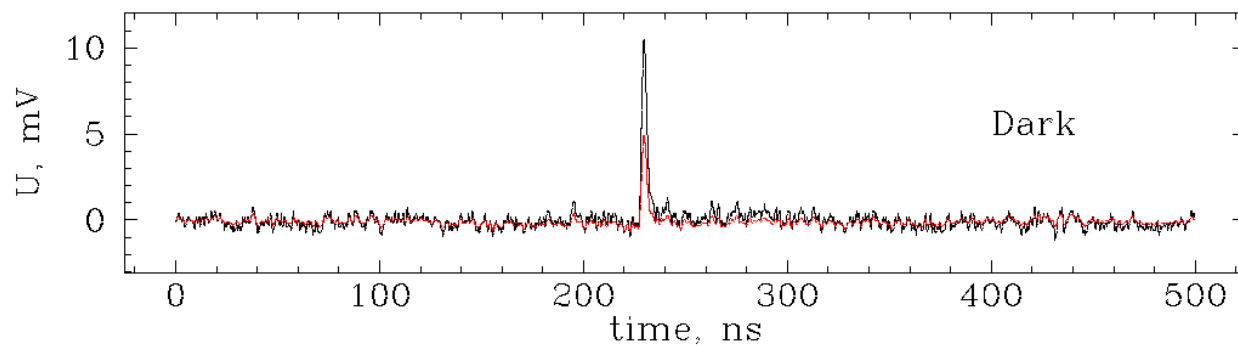
Выделение оптических сигналов из теплового фона

Размер фотодиода – 100 мкм.

Фактор заполнения – 50%.

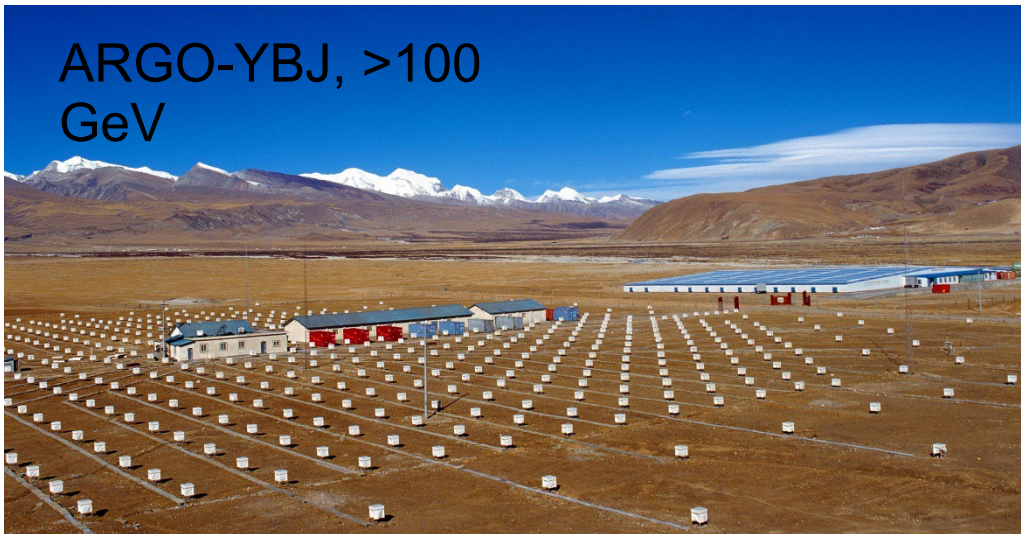
Рабочее напряжение
Гейгеровского режима – 25 В.

Гасящее сопротивление – 500 кОм



Наземные инструменты для наблюдения космических лучей и гамма-излучения

ARGO-YBJ, >100 GeV



HAWC, >TeV



Тунка, >10¹⁵ eV

