

# **Гамма-астрономия сверхвысоких энергий: Российско-Германская обсерватория Tunka-HiSCORE**

## **Германия**

Гамбургский университет(Гамбург)

ДЭЗИ ( Берлин-Цойтен)

## **Россия**

МГУ НИИЯФ( Москва)

НИИПФ ИГУ (Иркутск)

ИЯИ РАН (Москва)

ИЗМИРАН (Троицк)

ОИЯИ НИИЯФ (Дубна)

НИЯУ МИФИ (Москва)

## Абстракт

Предлагается проект черенковской гамма-обсерватории, нацеленной на решение ряда фундаментальных задач гамма-астрономии высоких энергий, физики космических лучей высоких энергий, физики взаимодействий частиц и поиска частиц темной материи. Предварительное название обсерватории – Tunka-HiSCORE (HiSCORE – Hundred Square-km Cosmic Origin Explorer). Установка будет располагаться в Тункиской долине (50 км к Западу от озера Байкал), в районе расположения установки Тунка-133.

Обсерватория будет представлять сеть широкоугольных (0.6 стер.) оптических станций, расположенных с шагом 150 м -200 м. Установка будет создаваться в несколько этапов: от установки площадью 1 км<sup>2</sup> до 100 км<sup>2</sup> установки на последнем.

Исследование нового волнового диапазона в гамма-астрономии на высоком уровне чувствительности позволит открыть неизвестные ранее источники и, возможно, новые типы источников. В качестве основных результатов ожидается открытие источников галактических космических лучей с энергией выше 1000 ТэВ (ПэВатронов), поиск новых ускорителей гамма-квантов высоких энергий и установление новых механизмов ускорения, исследование процессов распространения гамма-квантов высокой энергии в межгалактической среде, поиск частиц темной материи.

Измерение энергетического спектра и массового состава космических лучей на ранее недостижимом уровне статистической обеспеченности в диапазоне  $10^{14} - 10^{18}$  эВ дополнит исследования гамма-источников и позволят глубже понять происхождение космических лучей.

## Содержание

<b>1. Введение: Цель и основные задачи.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Современное состояние исследований в области гамма-астрономии высоких энергии .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Вопросы теории, основные галактические и внегалактические классы источников .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1. Остатки сверхновых.....</b>	<b>10</b>
- Исследование ускорительного механизма КЛ	
- Измерение эффективности ускорения КЛ и магнитного поля.	
- Электрические поля и магнитное пересоединение в источниках КЛ	
- ТэВ-ное гамма излучение от молекулярных облаков.	
<b>2.1.2. Пульсарные туманности.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3. Темные ускорители.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.4. Массивные звездные кластеры.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.6. Внегалактические источники.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Статус экспериментальных исследований (установки и проекты).....</b>	<b>20</b>
<b>2.3. Потенциальные ТэВ-ные источники в северном полушарии. Возможности наблюдения в северном полушарии. Задачи.....</b>	<b>25</b>
<b>3 Исследование галактических космических лучей.....</b>	<b>29</b>
3.1. Состояние вопроса о происхождение КЛ в настоящее время.....	29
3.2. Неразрешенные вопросы КЛ, которые может решить Tunka- HiScore.....	31.
<b>4. Обсерватория Tunka-HiSCORE и физика частиц (поглощение гамма-квантов и поиск темной материи).....</b>	<b>34</b>
<b>5. Главные направления исследований и ожидаемые результаты.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Методика регистрации широких атмосферных ливней по черенковскому излучению на примере установки Тунка133.....</b>	<b>38</b>
<b>7. Обсерватория Tunka-HiSCORE.....</b>	<b>47</b>
7.1 Оптическая станция.....	48
7.2 Фотоумножитель.....	50.
7.3 Система сбора данных и синхронизации.....	55
7.4 Узкоугольные черенковские детекторы.....	..58
7.5 Сцинтилляционные детекторы заряженных частиц	64
7.6 Результаты моделирования: оценка чувствительности, области наблюдения.....	72
<b>8. Этапы развертывания обсерватории.....</b>	<b>75</b>
<b>9. Развитие инфраструктуры Тункинского астрофизического центра.....</b>	<b>77</b>
<b>10. Заключение.....</b>	<b>79</b>
<b>11. Список литературы.....</b>	<b>. 80</b>

## 1. Введение: цель и основные задачи

Гамма кванты высоких энергий  $> 100$  ГэВ (VHE) не могут образовываться как тепловое излучение даже самых горячих объектов в Галактике и Метагалактике, они могут возникать только в результате взаимодействия ультра - релятивистских заряженных частиц (космических лучей) с окружающим газом, фотонами и магнитными полями [1].

Энергетические спектры и потоки гамма квантов отражают спектры и потоки заряженных частиц их образовавших, как в источниках ускорения, так и в процессах распространения от источников до Земли. Это позволяет исследовать природу самых катастрофических по энерговыделению процессов в Галактике и Вселенной, поскольку механизмы ускорения до энергий десятки и сотни ТэВ, как правило, связаны с появлением и эволюцией гигантских ударных волн [13], возникающих при энерговыделениях типа  $10^{51}$  эрг и больше, характерных для взрывов и слияния звезд в Галактике, а также при аккреции вещества на черные дыры в ядрах активных галактик и на нейтронные звезды. Гамма-кванты летят по прямой в отличие от космических лучей, транспорт которых носит диффузионный характер, и дают возможность оценивать потоки космических лучей и спектры вдали от Солнечной системы и даже в других галактиках. Высокоэнергичные гамма-кванты могут быть результатом взаимодействий и распадов гипотетических частиц реликтовой темной материи, оставшихся от большого взрыва.

Гамма-астрономия высоких энергий достигла в настоящее время впечатляющих результатов. От примерно 100 локальных источников зарегистрировано гамма-излучение с энергией выше 1 ТэВ[2].

Уровень чувствительности существующих и планируемых в настоящее время гамма-телескопов оптимизирован для энергетического диапазона 100 ГэВ – 20 ТэВ и только от 10 источников зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 10 ТэВ и ни от одного источника не зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 100 ТэВ. Для диапазона энергий гамма-квантов выше 20 ТэВ ( гамма-астрономия сверхвысоких энергий) существуют ряд фундаментальных вопросов, ответов на которых сейчас нет и прежде всего, это вопрос об источниках галактических космических лучей в районе  $\sim 1$  ПэВ – области, непосредственно примыкающей к колену в спектре всех частиц, открытому более полувека назад [3] и до сих пор не получившему достаточно убедительного объяснения.

Проектируемые и создаваемые в настоящее время гамма-телескопы (СТА[4], НАWC[5], LHAASO[6]) улучшат наше знание диапазона гамма-квантов сверхвысоких энергий, но ограниченная площадь этих установок ( $0.1 - 1$  км<sup>2</sup>) затрудняет продвижение в область энергий выше 100 ТэВ.

Во всех перечисленных установках регистрируется не сам гамма-квант, а широкий атмосферный ливень (ШАЛ), образованный гамма-квантом в атмосфере. В одних случаях регистрируется черенковский свет от ШАЛ, в других заряженные частицы (электроны, мюоны) ШАЛ на уровне установки. Наиболее успешным типом установок в гамма-астрономии высоких энергий является черенковский узкоугольный телескоп ( угол обзора 3-5град), состоящий из зеркала диаметром 10-15 м и мозаики фотоприемников в фокусе зеркала. Зеркало собирает черенковский свет, а в мозаике создается изображение ШАЛ. Метод анализа формы изображения , предложенный А.М.Хилласом в конце 80-х годов, позволил с высокой надежностью отделять ШАЛ образованный гамма-квантом от ШАЛ

образованных космическими лучами. Такие телескопы принято называть IACT (*Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*) телескопами. В состав современных IACT –телескопов (HESS [7], MAGIC[8], VERITAS[9]) входят от 2 до 4 зеркал, в мозаике каждого зеркала около 1000 фотоумножителей. Для создания установки с эффективной площадью  $1 \text{ км}^2$  потребуется около 10 зеркал и около 10000 ФЭУ ( $\sim 10000$  каналов/ $\text{км}^2$ ), стоимость такой установки около 100 млн долларов. Дальнейшее увеличение площади, например в 10 раз, практически невозможно по финансовым соображениям.

Альтернативный подход к регистрации черенковского света от ШАЛ без создания изображения (*non-imaging*) был использован для исследований по гамма-астрономии (AIROBICC [10]) и с успехом используется для исследования космических лучей на установке Тунка-133[11]. Установка при этом представляет из себя сеть широкоугольных оптических станций (угол обзора около 1 стера), в которых регистрируется черенковский свет от ШАЛ. При этом на площади  $1 \text{ км}^2$  требуется около 100 станций (100 каналов/ $\text{км}^2$ ). Стоимость установки площадью  $1 \text{ км}^2$  при этом оказывается около 1 млн долларов и можно планировать создание установки площадью  $10 - 100 \text{ км}^2$

Целью данного проекта является создание широкоугольной non-imaging черенковской обсерватории Tunka-HiSCORE [12]. Обсерватория будет представлять собой сеть черенковских оптических станций, расположенных на площади  $100 \text{ км}^2$ , с шагом между станциями 150-200 м. В оптической станции расположены несколько ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см. Эффективная площадь каждого ФЭУ в станции увеличена в 4 раза с помощью конусов Винстона, как это было сделано на установке AIROBICC [10]. Сигналы с ФЭУ одной станции суммируются аналоговым образом, что приведет к дополнительному понижению энергетического порога в  $n^{1/2}$  раз, где  $n$  – число ФЭУ в одной станции.

#### **Главные направления исследований обсерватории следующие:**

1. Гамма-астрономия и поиск источников галактических космических лучей.
2. Распространение гамма-квантов высокой энергии в межгалактической среде
3. Поиск темной материи
4. Энергетический спектр и массовый состав космических лучей в диапазоне  $10^{14} - 10^{18}$  эВ

Развертывание новой установки будет проводиться в Тункинской долине, на Астрофизическом полигоне МГУ-ИГУ, в 50 км к западу от озера Байкал. На этом полигоне с 2009 года работает черенковская установка ШАЛ Тунка-133, с энергетическим порогом  $\sim 10^{15}$  эВ и площадью  $\sim 3 \text{ км}^2$ .

Установка Тунка-133 даст возможность экспериментально изучить чувствительность первых оптических станций гамма-обсерватории, использование инфраструктуры и системы сбора данных установки Тунка-133 существенно облегчит развертывание прототипа гамма-обсерватории и изучение его характеристик с использованием методики восстановления параметров ШАЛ (направления прихода, положение оси и энергия), развитой для установки Тунка-133.

Обсерватория Tunka-HiSCORE позволит проводить исследования известных источников гамма-квантов и осуществлять поиск новых источников на рекордном уровне чувствительности и дополнит исследования, запланированные на создаваемой европейской гамма-обсерватории СТА. С созданием установки Тунка-HiSCORE в России возобновятся исследования по гамма-астрономии высоких энергий на мировом уровне.

Кроме своей главной задачи (поиск и изучение локальных источников гамма-квантов), установка позволит исследовать поглощение гамма-квантов на фоновом излучении (инфракрасном и микроволновом), осуществлять поиск фотон-аксионных переходов и нарушений Лоренц-инвариантности. Поиск фотон-аксионных переходов является новым подходом к поиску темной материи во Вселенной.

...Обсерватория будет разворачиваться в 6 этапов. На каждом этапе (за исключением первого) будет создана установка, экспериментальные данные с которой, предоставляют самостоятельный интерес.

На первом этапе (тестовом) этапе осенью 2012 будут развернуты 5 оптических станций, по 4 фотоумножителя в каждой.

### **Второй этап**

. На втором этапе ( 2013-14 годы) предполагается развернуть 60 оптических станций ( по 4 ФЭУ в станции) на площади 1.5 км. Чувствительность установки в диапазоне 20 -100 ТэВ составит  $(2-1) \cdot 10^{-12}$  эрг/ см<sup>2</sup> см<sup>2</sup> . Чувствительность рассчитывается из расчета 500 часов наблюдения при условии регистрации 50 событий от источника, либо превышения на 5 стандартных отклонений адронного фона (кривая 1 на рис. 1.1). Чувствительность установки на этом этапе позволит зарегистрировать сигнал от наиболее ярких гамма-источников, например Крабовилная туманность, позволит приступить к поиску ПэВатронов и исследовать спектр и массовый состав космических лучей в области энергий выше  $10^{14}$  эВ на недостижимом ранее уровне статистической обеспеченности. Так за сезон работы ( 400 часов) будет зарегистрировано свыше  $10^8$  событий с энергией выше  $10^{14}$  эВ. Созданная установка позволит апробировать подходы к реконструкции событий, точности восстановления зенитного угла и энергии ливней. Успех этого этапа позволит перейти к реализации третьего этапа. Стоимость создания этой установки около 30 млн. руб ( 0.8 млн. евро).

### **Третий этап**

На третьем этапе количество ФЭУ в каждой из установленных 60 станций будет увеличен с 4 до 16. Чувствительность установки в диапазоне 20-100 ТэВ будет улучшена до уровня  $2.5 \cdot 10^{-13}$  эрг/ см<sup>2</sup> см<sup>2</sup> (кривая 2). Новая конструкция фундамента станций позволит изменять угол наклона ФЭУ в течение сезона.

Вместо увеличения числа фотоумножителей в одной станции можно ввести в состав установки систему из 20 зеркал площадью 2- 3 м<sup>2</sup> и углом зрения  $\pm 7$  градус, осуществляющую слежение за источником. Добавление системы зеркал увеличит стоимость работ на 40 млн.

Новая установка позволит приступить к детальному исследованию характеристик локальных гамма-источников. Предполагается развернуть эту установку к осени 2016 года. Стоимость этого этапа 120 млн руб ( 3 млн. евро)

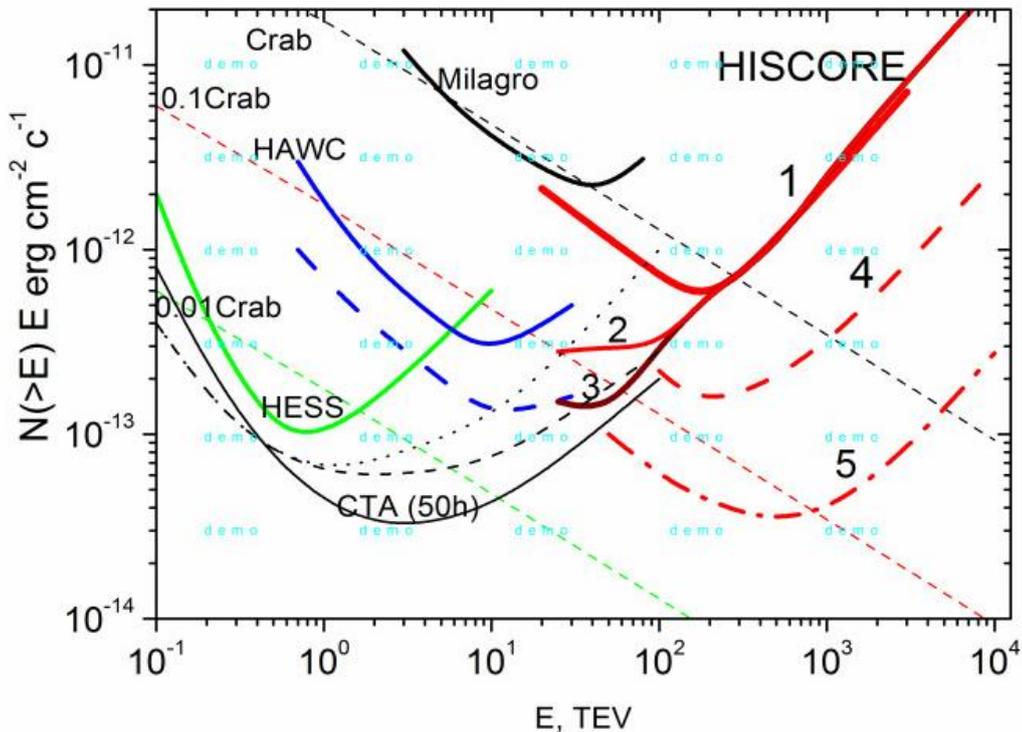


Рис.1.1. Ожижаемая чувствительность Чувствительность обсерватории Тунка-HiSCORE ( 500 часов наблюдения на за источником, 50 событий или 5 $\sigma$  превышение над адронным фоном).

1-  $S=1.5 \text{ км}^2$  (4 ФЭУ в станции), 2-  $S=1.5 \text{ км}^2$  (16 ФЭУ в станции),  
 3-  $S=1.5 \text{ км}^2$  (16 ФЭУ+мюонные детекторы), 4-  $S=10 \text{ км}^2$  (4 ФЭУ в станции),  
 5-  $S=100 \text{ км}^2$  (1 ФЭУ в станции)

СТА –(50 часов наблюдения за источником , В, Е, С конфигурации телескопов:  
 HESS, Veritas (50 часов) – зеленая кривая, Milagro (1 год) – черная кривая, HAWC (1 год) – синяя кривая, 5 лет – синий пунктир.

#### Четвертый этап

.На четвертом этапе установку будет расширена стациями по 4 ФЭУ в каждой и расположенными на расстоянии 200 м. Полная площадь установки будет доведена до 10 км. Всего дополнительно будет развернуто 200 оптических станций. Чувствительность установки при энергиях выше 200 ТэВ будет улучшена в 7 раз.(кривая 3).Стоимость работ по этому этапу около 150 млн.руб.

#### Пятый этап

Центральная часть установки будет дополнена сцинтилляционными детекторами общей площадью  $1.5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$  ( 1% площади центральной части ). Чувствительность установки в диапазоне 20-50 ТэВ при этом понизится до  $(5-7) \cdot 10^{-14} \text{ эрг/ см}^2 \text{ см}^2$  . Предполагается закончить развертывание этой установки к 2018-19 годам. Стоимость этого этапа – около 1 млрд. руб. ( 25 млн евро),.

#### Шестой этап

На последнем, пятом этапе, площадь установки будет расширена до площади в  $100 \text{ км}^2$ . Чувствительность установки в диапазоне 200 – 1000 ТэВ при этом составит  $(3-5) \cdot 10^{-14} \text{ эрг/ см}^2 \text{ см}^2$ . В этом случае станции будут располагаться на расстоянии 200 м и каждой станции будет располагаться один ФЭУ. Полное число ФЭУ примерно равно -2500. Общая

стоимость этого этапа около 450 млн руб ( 11 млн евро). Работы по созданию этой установки могут быть завершены к 2020-2022 году.

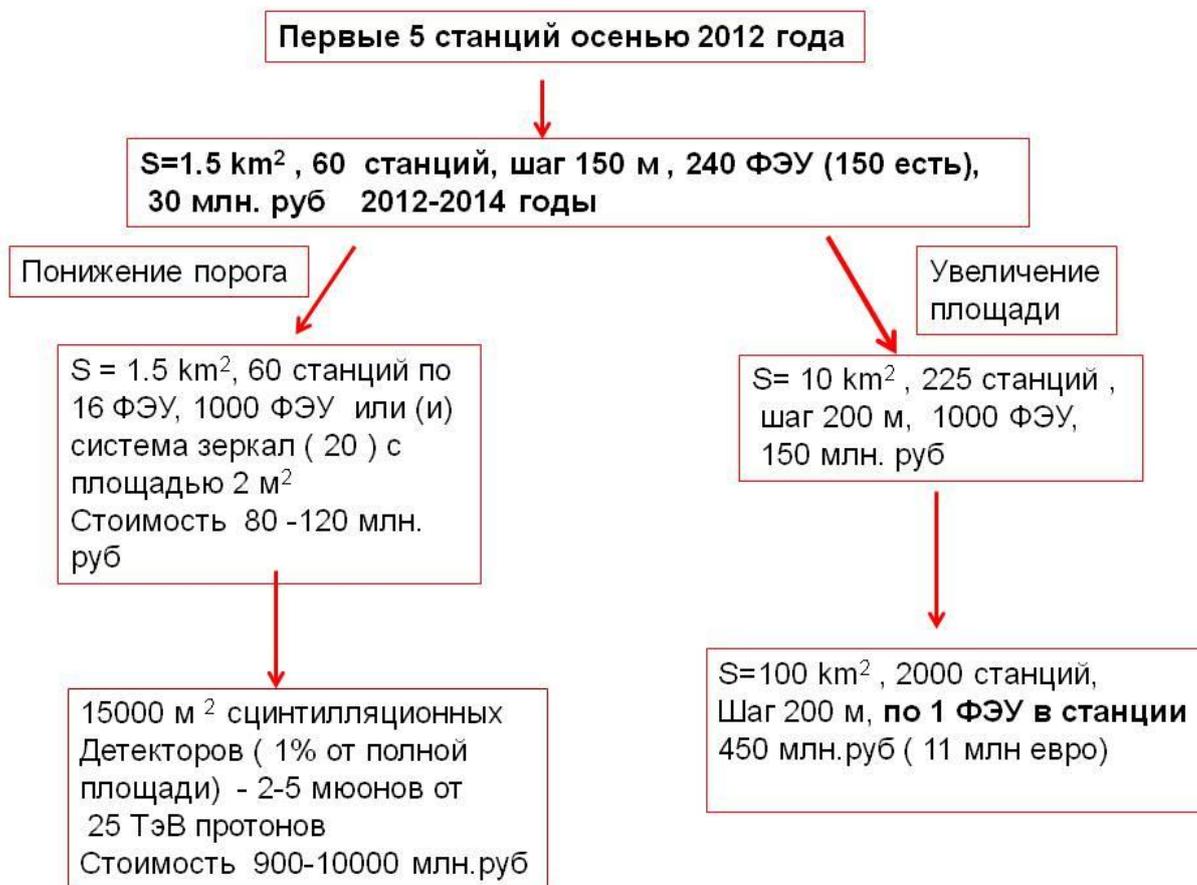


Рис.1.2 Возможные пути развития обсерватории.

Таким образом полная стоимость работ около 1.5 млрд. рублей ( 35-38 млн. евро). Полное создание обсерватории может быть завершено в 8-10 лет.

Очередность этапов, приведенная выше, не обязательно должна соблюдаться. Так после 2-го этапа, т.е после создания установки площадью 1.5 км<sup>2</sup>, можно перейти к понижению энергетического порога ( 3 этап), а можно сразу приступить к расширению площади установки ( 4этап)

## 2. Современное состояние исследований в области гамма-астрономии высоких энергий

### 2.1 Вопросы теории, основные галактические и внегалактические классы источников.

Гамма кванты высоких энергий (VHE), с энергией более 100 ГэВ не могут образовываться как тепловое излучение даже самых горячих объектов в Галактике и Метагалактике [0], [0], они могут возникать только в результате взаимодействия ультра - релятивистских заряженных частиц (космических лучей) с энергией в десятки раз большей с окружающим газом и фотонными полями и магнитными полями. Спектры и потоки таких гамма-квантов отражают спектры и потоки космических лучей их образовавших, как в источниках ускорения, так и в процессах распространения от источников до Земли, что позволяет измерять спектры КЛ вдали от Солнечной системы и даже в других Галактиках, исследовать механизмы ускорения частиц, структуру и временные изменения самих ускорителей. Гамма-астрономия высоких энергий исследует самые катастрофические по энерговыделению процессы во Вселенной и Галактике, поскольку основные механизмы ускорения до энергий десятки, сотни ТэВ и выше, как правило, связаны с появлением и эволюцией гигантских ударных волн [0], возникающих при огромных энерговыделениях. Энерговыделения типа  $10^{51}$  эрг характерны для ударных волн образуемых при взаимодействии сброшенных оболочек при взрывах сверхновых, имеющих скорость от нескольких до десятков тысяч км/сек [0,0]. Пульсарные туманности (PWN)- основные источники ТэВ-ного гамма- излучения в Галактике [0,0], связаны с релятивистским пульсарным ветром, аккумулирующим энергию вращения пульсаров  $L_{PWN}=10^{32} - 10^{37}$  эрг  $s^{-1}$ , при взаимодействии этого ветра с окружающей средой или внешней оболочкой образуется релятивистская ударная волна на границе, приводящая к ускорению частиц до энергий сотни ТэВ. И наконец, частицы самых высоких энергий ускоряются скорее всего в релятивистских струях ядер активных Галактик с характерным энерговыделением  $L_{jet}=10^{44} - 10^{46}$  эрг  $s^{-1}$ . [0, 0, 0]. На больших расстояниях от галактики при взаимодействии этой струи с межгалактическим газом или газом гало образуются релятивистские ударные волны, ускоряющие частицы до  $10^{20}$  эВ или выше. Высокоэнергичные гамма-кванты могут быть и результатом взаимодействий и распадов гипотетических частиц реликтовой темной материи оставшихся от большого взрыва [0].

Наиболее неопределенным вопросом остается вопрос, от каких частиц ТэВ-ные гамма-кванты образуются? В целом, нет прямого доказательства, что КЛ ускоряются эффективно в ОСН, и нет прямого доказательства, что КЛ ускоряются до колена [0]. При интерпретации наблюдаемого излучения, конкурируют два основных процесса в этой области энергий: – от адронов через распад нейтральных пионов или в процессах обратного комптоновского рассеяния при рассеянии высокоэнергичных электронов на фотонах среды, значительный вклад может давать и тормозное излучение высокоэнергичных электронов. По сути только исследование излучения источника в разных энергетических диапазонах может позволить отличить эти процессы. Особенную роль здесь играет рентгеновское излучение, поскольку тепловое рентгеновское излучение важно для определения локальной плотности плазмы, которая определяет вклады тормозного и излучения от распада  $\pi^0$  мезонов. Синхротронное излучение используется для определения магнитного поля, комбинация

магнитного поля, радио и рентгеновского излучения позволяет восстановить вклад обратного комптоновского излучения в наблюдаемые процессы [0].

Можно считать, что именно в последнее десятилетие в результате работы третьей генерации черенковских атмосферных телескопов (H.E.S.S.[0], VERITAS[0], MAGIC[0]) удалось существенно продвинуться в исследовании высокоэнергичного гамма-излучения Вселенной. В настоящее время каталог ТэВ-ных источников составляет 100 источников [0]. Рассмотрим основные потенциальные типы источников высокоэнергичного гамма-излучения ( $>20$  ТэВ), в основном опираясь на данные обзора [0].

### 2.1. 1. Остатки сверхновых.

Основными кандидатами на источники излучения гамма-квантов с энергией более 20 ТэВ являются остатки сверхновых (SNR), поскольку расширяющаяся ударная волна в SNR способна ускорять космические протоны до  $4 \times 10^{15}$  эВ, а в некоторых условиях до  $10^{17}$  эВ [0], механизмом диффузного ускорения на фронте ударной волны (DSA). Более того 10 %, а по последним оценкам до 70% энергии ударной волны переходит в космические лучи, обеспечивая суммарную плотность КЛ в Галактике. Такие источники принято называть ПЭВАтронами. Однако, таких классических ускорителей с четко выраженными оболочками зарегистрировано не так много: в HESS всего 4, все достаточно далекие: RX J1713.7-3946, RX J0852.04622 –также известная как s Vela Junior, SN 1006, HESS J1731-347 (см. обзоры [0,0]). В остатках Cas A и Tycho (от Tycho только в 2011 г. было зарегистрировано давно ожидаемое ТэВ-ное излучение [0]), зарегистрированных в северном полушарии, прослеживается четкая корреляция между рентгеновским и ТэВ-ным излучением, что и должно быть в процессе ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. В этих объектах наблюдается усиление магнитного поля, предсказываемого теорией, что косвенно свидетельствует об ускорении адронов в остатках [0], но по исследованию рентгеновского излучения видно, что сильное турбулентное магнитное поле быстро затухает [0,0]. Это, скорее всего, свидетельствует об очень коротком времени излучения частиц ПэВ-ных энергий, и тогда только в очень коротком промежутке времени  $\sim 100$ -500 лет после взрыва сверхновой возможна регистрация гамма-квантов с энергией сотни ТэВ. Даже при верхней оценке  $dT_{\text{набл}}=1000$  лет при частоте  $1/50$  лет, можно ожидать в радиусе 5 кпс всего 1-3 сверхновых. Короткое время излучения возможно одна из основных причин, почему во всех этих источниках энергия гамма-квантов не превышает 50 ТэВ, можно предположить, что частицы больших энергий уже покинули остаток. Кроме того, моделирование гамма излучения в остатках не дает как правило однозначного доказательства адронной природы гамма-излучения. Ответ на вопрос, являются ли эти гамма-кванты образованными от протонов через распад нейтральных пионов, или это результат обратного комптоновского рассеяния электронов на реликтовых фотонах - в настоящее время отсутствует [0, 0]. Только регистрация гамма излучения с энергией более 100 ТэВ могло бы быть прямым доказательством адронного происхождения VHE излучения, так как такое излучение не может быть получено в процессах обратного комптоновского рассеяния из-за подавления сечений при высоких энергиях. Рассмотрим некоторые очень важные детали процесса ускорения, которые можно получить из комплексного анализа ТэВ-ного излучения молодых остатков.

**Исследование ускорительного механизма КЛ** напрямую возможно в остатке SN 1006 так как он находится выше Галактической плоскости на 500 пс в очень разреженной

среде и не перекрывается Галактической плоскостью. Это Ia сверхновая имеет ярко выраженную биполярную морфологию, хорошо коррелирующую в ТэВ-ном и рентгеновском излучении, и в ней четко идентифицируются филаменты, свидетельствующие о сильной ударной волне. Биполярная морфология ТэВ-ного излучения подтверждает основной результат теории диффузного ускорения на фронте ударной волны, согласно которому эффективная инжекция надтепловых ионов за ударной волной возможна только при достаточно маленьком угле между нормалью к фронту ударной волны и магнитным полем среды. Предполагая достаточно однородное магнитное поле среды в [0] еще в 90-х Эллисон и др. предсказывали концентрация частиц вокруг полюсов. Однозначная интерпретация спектров к настоящему моменту не сделана, обычно рассматривается три модели (см. Рис. 2.1 из [0]). В лептонной модели (где ТэВ-ная гамма излучение образуется обратным комптоновским рассеянием ТэВных электронов) магнитное поле должно быть больше 30 мкГ и максимальная энергия должна быть равна наблюдаемой 10ТэВ.

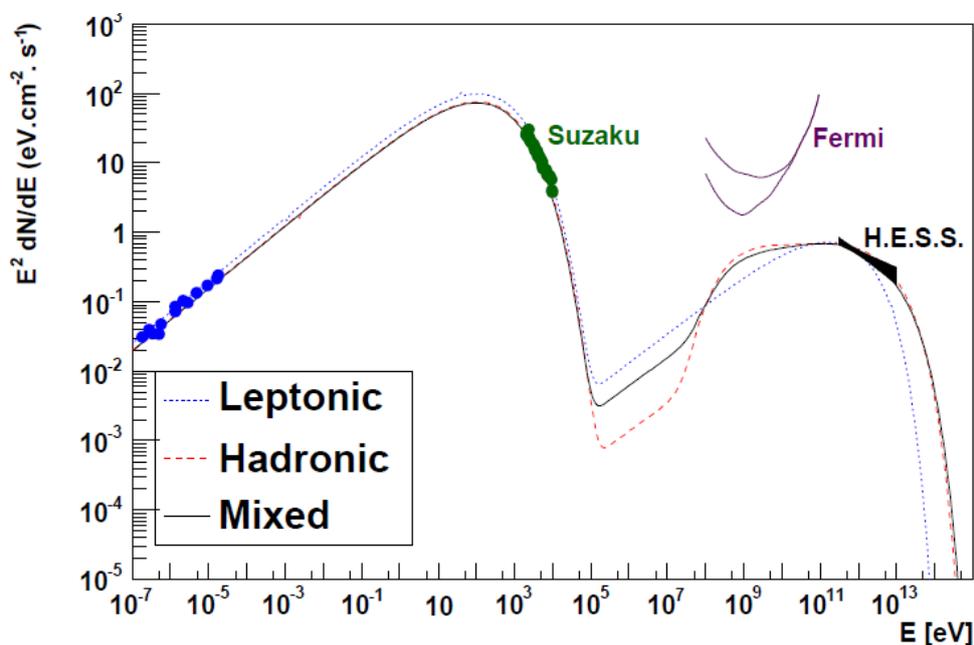


Рис. 2.1. 3 модели (лептонная, адронная и смешанная), описывающие спектры в SN 1006.

В адронной модели доминируют гамма - кванты образованные в процессах распада нейтральных пионов, образованных во взаимодействия протонов со средой, в то время как рентгеновское излучение образуется в лептонных взаимодействиях, результирующее магнитное поле в этом случае очень высокое, выше 120 мкГ, что в принципе согласуется с усиленным магнитным полем в ударной волне, которое идентифицируется по тонким филаментам в рентгеновском излучении, в этом случае максимальная энергия может быть значительно более 10 ТэВ и очень большая доля энергии сверхновой передается в космические лучи – более 20% [0]. Промежуточная модель, в которой и адроны и лептоны дают равный вклад в образование ТэВ-ной эмиссии также описывает результат. Разница в моделях может быть проверена и по максимальной энергии ускорения и по МэВ-ной эмиссии, как видно из рисунка.

## **Измерение эффективности ускорения КЛ и магнитного поля.**

Эффективность ускорения частиц в одном остатке является существенным элементом для понимания вопроса, являются ли эти источники основными для обеспечения энергетики КЛ в Галактике. Развита нелинейная, времени-зависимая модель ускорения КЛ в остатках [0,0,0,0], предсказывает существенное влияние ускоренных КЛ на структуру фронта ударной волны и турбулентное магнитное поле. К настоящему моменту установлено по узким филаментам вокруг фронта ударных волн молодых остатков [0], что турбулентное магнитное поле типично составляет 100–600 mG, значительно больше, чем ожидалось в случае компрессии межзвездного магнитного поля ( $B_{ISM} \approx 5$  мкГс). Подтверждением этому является и вариативность областей синхротронного рентеновского излучения на временной шкале порядка месяцы-год, свидетельствующая о времени охлаждения электронов. Возникающие и распадающиеся горячие пятна в рентгеновском излучении в оболочке SNR RXJ1713.7-3946 на шкале в один год [0] указывают на усиление магнитного поля в 100 раз. Измерение тонких филаментов в SN 1006 с помощью рентгеновского телескопа Чандра свидетельствует о быстром охлаждении электронов в усиленном магнитном поле  $\sim 100$  мкГ.

Еще одним свидетельством эффективного ускорения КЛ в остатках является низкая температура электронов за фронтом ударной волны, что означает большую передачу энергии в космические лучи. Недавнее измерение Доплеровского термального уширения  $H\alpha$  линии остатка RCW 86 [0] указывает на то, что пост-шок температура значительно ниже ( $2.3 \pm 0.3$  keV), чем предсказывается (42–70 keV) из измеренной скорости ударной волны, что относят к очень большой эффективности ускорения, приводящей к усилению давления (по сравнению с тепловым), вызванного космическими лучами, за фронтом ударной волны.

Однако, есть тенденция [0], что остатки эволюционирующие в разреженной среде и имеющие как следствие большой радиус, имеют и меньшее магнитное поле, чем в плотной среде, в таких остатках наблюдается более широкая область рентгеновского нимба около фронта УВ [0,0].

Существуют интересные гипотезы, что наблюдаемое магнитное поле не усиливается, а создается [0], так как большинство филаментов ассоциируется скорее с обратной ударной волной [0], чем с передней, но магнитное поле в них столь же высокое порядка 100–500 мкГ, хотя первоначально в выбросе всегда очень низкое фоновое магнитное поле. Возможно, это поле создается самими космическими лучами, рассеивающимися вокруг фронта передней ударной волны, через механизм потоковой неустойчивости. Вообще роль обратной ударной волны в ускорении КЛ в последнее время получила ряд подтверждений: и в остатке RCW 86 [0] RX J1713.7-3946 [0].

## **Электрические поля и магнитное пересоединение в источниках КЛ**

Исследования последних лет убедительно свидетельствуют о том, что магнитное пересоединение является одним из наиболее универсальных механизмов генерации индукционных и потенциальных электрических полей в космической и лабораторной плазме. Относительная роль вихревых и потенциальных полей определяется безразмерным числом Фарадея, которое для интересующих нас объектов неизвестно и может быть впервые определено лишь косвенным методом, поскольку электрические поля в дальних астрофизических объектах непосредственно не измеряются [0]. Однако

применительно к ускорению частиц в источниках космических лучей, в частности, в ПэВной области энергий эти представления слабо развиты ввиду отсутствия достаточного наблюдательного материала.

Недавно (AGILE, FERMI) была открыта быстрая переменность гамма-излучения в ПэВной области энергий от остатка сверхновой, вспыхнувшей в 1054 г.в Крабовидной туманности. Быстрый и сильный рост гамма излучения на масштабе времени порядка суток и такой же спад при неизменности потока рентгеновского излучения оказался полностью неожиданным и не может быть объяснен в рамках традиционных моделей диффузионного ускорения на ударных волнах с последующим синхротронным излучением электронов или более эффективным обратным Комптон-эффектом. Рождение электрон-позитронных пар на реликтовом излучении приводит к затуханию гамма-излучения [0]. Затруднение, возможно, снимается в рамках принципиально иного механизма, связанного с ускорением в квазистационарных электрических полях вдоль магнитного поля [0]. Рассматриваются также другие альтернативные механизмы, выход будет найден вне всяких сомнений (см. раздел 2.1.4.). Однако остается нерешенным более глубокий и принципиальный вопрос, связанный с использованием данного объекта в качестве «стандартной свечи» для космологических исследований.. Мы предполагаем провести соответствующее всесторонне исследование на основе новых экспериментальных данных, которые будут получены в данном проекте для этого и других объектов.

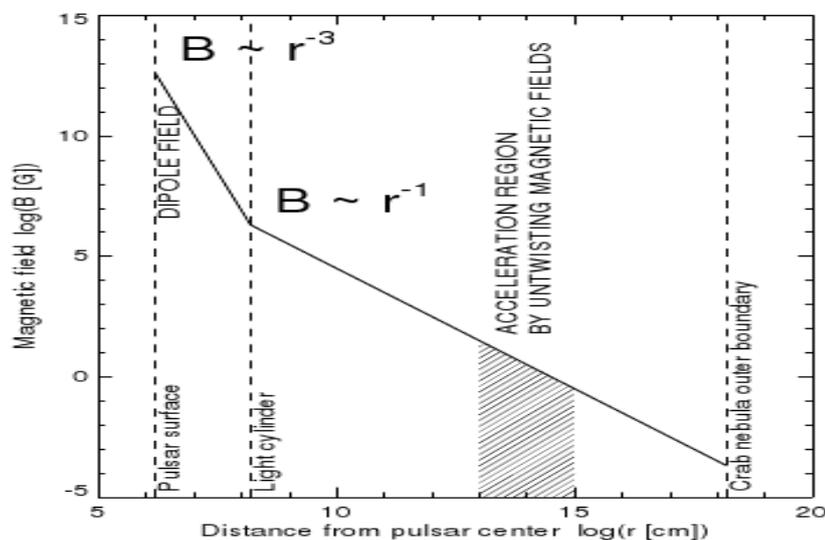


Рис. 2.2. Область ускорения в модели Крабовидной туманности с топологическим изменением тороидального магнитного поля [0].

### ТэВ-ное гамма излучение от молекулярных облаков.

Наиболее интересным доказательством ускорения в остатках сверхновых приходит из исследования ТэВ-ного излучения довольно старых сверхновых ( $T > 20$  тыс. лет) в окрестностях довольно плотной межзвездной среды [0], т.е. после того как космические лучи покинули остаток сверхновой. Молекулярные облака являются барометром, от которого поток гамма-квантов пропорционален интенсивности космических лучей,

покинувших остаток, и массе облака. Самое главное, что излучение из облака зависит от времени распространения КЛ и может продолжаться значительно дольше, чем излучение из остатка, делая детектирование излучения из облака более вероятным. При этом предсказывается специфическая вогнутая форма спектра [0], которая, правда, до сих пор не наблюдалась. По крайней мере 4 старых SNRs в окрестностях молекулярных облаков были зарегистрированы в южном небе H.E.S.S.: W 28, ( $T \sim 35 - 150$  тыс. лет) остаток смешанной морфологии, HESS J1745-303, HESS J1714-385, HESS J1923+141 [0]. В остатке W 28, H.E.S.S. регистрируется излучение из 4 пятен, согласующихся с НП областями и плотными молекулярными облаками. Интенсивность космических лучей, восстановленная из плотности облаков согласуется с ожидаемой. Подобные заключения сделаны для J1745-303, HESS J1714-385 и HESS J1923+141, подтверждая, что оболочечные сверхновые эффективно ускоряют КЛ. На Рис. 2.3 приведена компиляция 8 подобных источников и оценка вклада гамма-квантов от лептонной и адронной моды. Как видно, нет указаний на резкий обрыв спектра, поэтому такого типа источники – явные кандидаты на источники более 20 ТэВ.

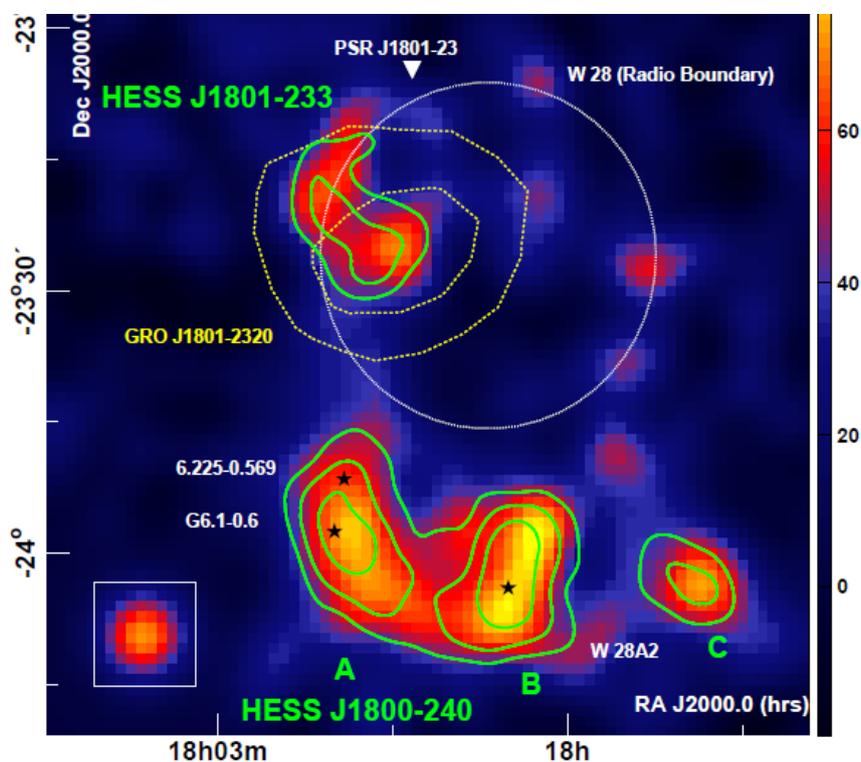


Рис. 2.2. Изображение ( $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ) VHE избытка гамма квантов в районе 4 молекулярных облаков, подсвеченных сверхновой W28 из обзора HESS [0].

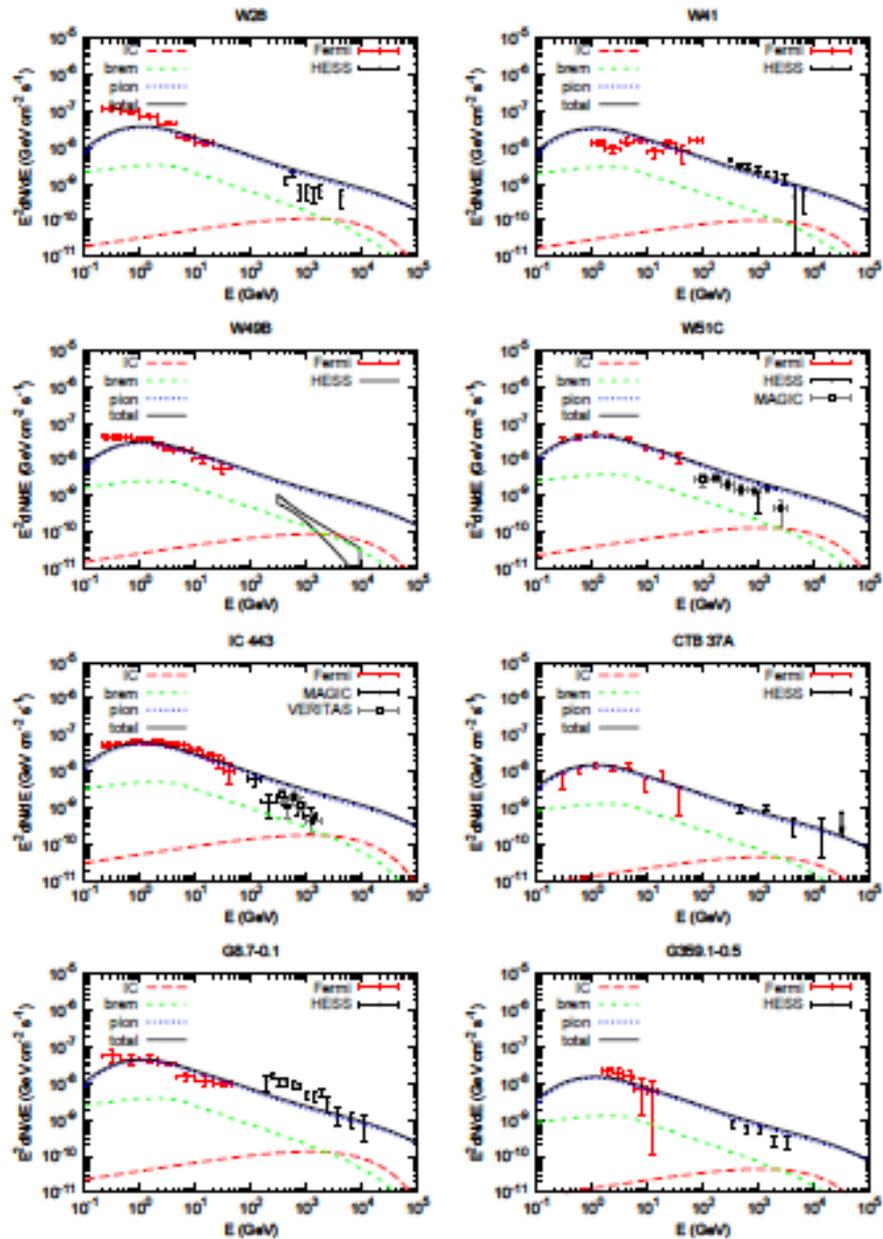


Рис. 2.3. Зарегистрированное излучение от молекулярных облаков, подсвеченных космическими лучами из сверхновых (компиляция из раб [0]). Синими линиями обозначены предсказания для адронной моды генерации VHE гамма-квантов.

Следует отметить, что даже старые остатки сверхновых могут наблюдаться при энергиях выше 20 ТэВ. Примерами являются остатки IC443 и W51C, которые наблюдается и в ГэВ-ном и в ТэВ-ном гамма-диапазоне. Измеренные на установке Milagro интенсивности при 35 ТэВ примерно соответствуют интенсивностям и показателям спектра при 1 ТэВ (см. таблицу). Так как наблюдаемые спектры довольно крутые ( $\Gamma=2.5-3$ ), то вероятно частицы с энергиями больше 1 ТэВ были ускорены ранее в этих остатках и сейчас диффузионно покидают их. Если эта интерпретация правильная, спектры гамма-излучения IC443 и W51C должны без особенностей продолжаться до энергий 100-300 ТэВ.

## 2.1.2 Пульсарные туманности.

Почти половина объектов, зарегистрированных в ТэВ-ном излучении – это туманности, образуемые ветром пульсаров - PWN [0], включая первый зарегистрированный источник и являющийся ныне стандартной свечой – Крабовидная туманность [0]. Эти источники представляют собой сильный ультра - релятивистский ветер частиц, который приводит к образованию синхротронной туманности при взаимодействии этого ветра с окружающей средой или внешней оболочкой. Сильная ударная волна на границе приводит к ускорению частиц до энергий сотни ТэВ. Из рентгеновских наблюдений известно, что в Крабовидной туманности ускоряются электроны до ПэВ-ных энергий. Эти же электроны должны производить и гамма-излучение с энергиями больше 100 ТэВ. Основные молодые PWN : Crab Nebula, SNR G 0.9+0.1, SNR G 21.5-0.9, Kes 75, MSH 15-52, HESS J1813-178, пространственно не разрешимые в ТэВ-ном излучении. В этих системах гамма-излучение в основном относится к обратному комптоновскому рассеянию электронов с энергией 1–1000 TeV [0]. Статистически показано, что основная часть, а может быть и все молодые энергичные пульсары производят на начальной стадии ТэВ-ное излучение [0]. Одним из очень важных достижений при исследовании PWN является укрупнение спектров гамма излучения при удалении от пульсара, обнаруженное в источнике HESS J1825-137. На Рис. 2.4 изображено изменение наклона спектра и уменьшение поверхностной интенсивности с удалением от центра пульсара.

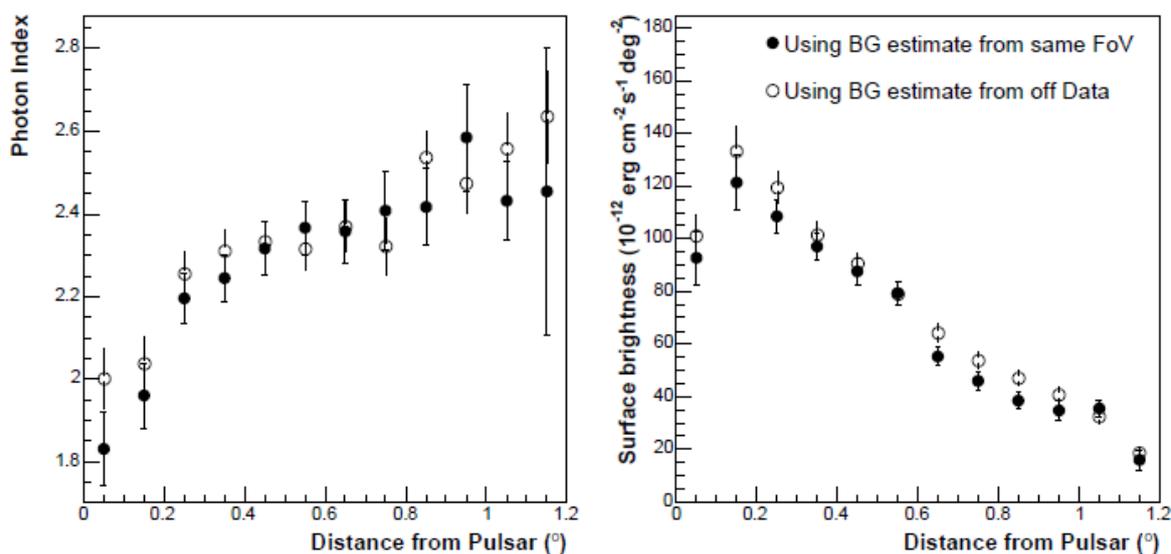


Рис. 2.4. Энергетические спектры гамма-квантов на разных расстояниях от центра пульсара, зарегистрированных HESS J1825–137 из [0].

Такое поведение характеристик свидетельствует о существенном радиационном охлаждении электронов при удалении от пульсара, электроны, образующие VHE излучение, обычно менее энергичны, чем электроны, испускающие рентгеновское излучение, они не подвержены сильным радиационным потерям и могут сохраняться на более поздних стадиях эволюции PWN. Высокая светимость HESS J1825-137 в ТэВ-ном излучении по сравнению со светимостью в рентгене объясняется значительным вкладом реликтовых электронов выпущенных на ранней эволюции пульсара, когда вращательная энергия и светимость

пульсара была значительно выше. Изменение индекса объясняется как охлаждением, вызванным IC взаимодействиями, так и синхротронными потерями. Наблюдения при энергиях более 20 ТэВ позволяют проверить теоретические модели ускорения частиц релятивистскими ударными волнами. Дальнейшее подтверждение этого механизма требует рассмотрения старых PWN, таких как, HESS J1303-631 [0]. Не исключено присутствие адронной компоненты в составе пульсарного ветра. Однако, пока никаких указаний на это не получено. Если такая компонента присутствует, то она должна проявляться при больших энергиях [0].

### **2.1.3. Темные ускорители**

Около половины Галактических ТэВ-ных источников не имеют ассоциированных объектов, идентифицированных в других волновых диапазонах [0], это доля сравнима с EGRET [0], и приблизительно столько же зарегистрировано в Fermi LAT спутниковом эксперименте [0]. Большинство этих объектов очень растянутые, значительно превышающие угол наблюдения HESS. Понимание механизма излучения этими объектами ТэВ-ного излучения – вызов мульти-волновой гамма-астрономии. Недавно была выдвинута гипотеза, что все эти объекты – старые пульсарные туманности [0]. Магнитные поля в PWN затухают со временем как  $t^{-1/3}$ , приводя к затуханию синхротронного излучения, и напротив, обратное комптоновское рассеяние имеет тенденцию увеличиваться со временем, до тех пор, пока вращательная энергия пульсара не будет передана в пульсарную туманность. Альтернативная модель включает иллюминацию молекулярных облаков близлежащими сверхновыми, как уже говорилось ранее.

### **2.1.4. Массивные звездные кластеры.**

Так как массивные звездные кластеры содержат сверхновые и пульсарные туманности, они, конечно являются очевидными кандидатами на роль VHE источников. Но существуют и альтернативные сценарии образования VHE излучения такими кластерами.

Многие звездные кластеры содержат звездные системы тесно связанных звезд, с сильным и быстрым звездным ветром, который формирует область, где частицы могут ускоряться до очень высоких энергий. Модели ускорения включают как ускорение электронов и последующий IC-процесс образования гамма-квантов, так и ускорение протонов и последующее их взаимодействие с плотным звездным ветром, образование VHE через распад нейтральных пионов. В дополнении ветры разных звезд взаимодействуют с друг другом, приводя к образованию пузырей с горячей разреженной плазмой, в которой может иметь место DSA ускорение [0],[0]. HESS зарегистрировал по крайней мере два звездных массивных кластера [0]: Westerlund 1 - наиболее массивный кластер в нашей Галактике, и and Westerlund 2. Более того, два неидентифицированных источника H.E.S.S.: HESS J1614-581 и HESS J1848-018, похоже, тоже связаны со звездными кластерами.

### **2.1.6. Внегалактические источники.**

С точки зрения энергетики джеты галактик с активными ядрами являются основными кандидатами на источники наблюдаемых космических лучей с энергией более  $10^{18}$  эВ в Метагалактике [0]. Для поддержания в межгалактической среде интенсивности космических лучей, наблюдаемой при энергиях выше  $10^{19}$  эВ, требуется мощность источников порядка 3

$10^{36}$  эрг  $\text{с}^{-1}$   $\text{Мпк}^{-3}$ . В то же время, джеты галактик с активными ядрами выделяют кинетическую энергию на уровне около  $10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$   $\text{Мпк}^{-3}$  и примерно 2% этой энергии заключено в джетах с мощностью  $L_{\text{jet}} = 10^{44} - 10^{45}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , типичной для радиогалактик и квазаров с большой светимостью в радиодиапазоне. Как считается, источником энергии этих объектов является аккреция галактического вещества на центральную сверхмассивную черную дыру, при этом образуется узко-коллимированное течение плазмы вдоль оси вращения черной дыры – релятивистская струя – джет. На больших расстояниях от галактики при взаимодействии этой струи с межгалактическим газом или газом гало образуются релятивистские ударные волны, ускоряющие частицы [0] и наблюдаемые со стороны как яркие радио-пятна (например M87). Если струя направлена на нас, она наблюдается как блазар. Ускорение частиц также возможно во вращающейся магнитосфере центральной черной дыры [0]. Считается, что энергия частиц, ускоренных в этих объектах может достигать  $10^{20}$  эВ, что достаточно для объяснения наблюдаемых КЛ сверхвысоких энергий. Исследования экстрагалактических источников в гамма-астрономии по сути подтверждает предположение об основной роли ядер активных галактик в образовании метагалактических КЛ. Проведенные до сих пор наблюдения показывают, что из 48 экстрагалактических источников 46 являются ядрами активных галактик. Однако отсутствуют наблюдательные свидетельства ускорения даже до Пэв-ных энергий.

**Гамма-горизонт.** По современным представлениям исследование экстрагалактических объектов в гамма-квантах очень высоких энергий (более 20 ТэВ) возможно только от очень близких объектов, поскольку горизонт наблюдаемой Вселенной резко сужается с увеличением энергии наблюдаемых гамма-квантов, из-за рассеяния гамма-квантов на фоновых фотонах межгалактического фона, приводящих к рождению пар. В области исследований черенковских атмосферных телескопов, максимальное поглощение происходит при взаимодействии с оптическим, ультрафиолетовым, инфракрасным фоновым излучением, производимым галактиками за полное время эволюции, и называемым EBL (Extragalactic Background light). При этом модели EBL чрезвычайно неопределенны, и при энергиях  $< 1$  ТэВ зависят от космологических параметров, моделей эволюции звездообразования и т.д. По разным оценкам пробег гамма-квантов или гамма-горизонт составляет при энергии 100 ГэВ около 4.2 Гпс, и степенным образом уменьшается с ростом энергии, сужаясь до 1 Мпс, при энергии 100 ТэВ. Это означает как ожидаемое резкое уменьшение источников с увеличением красного смещения при увеличении энергии, так и экспоненциальное укрупнение спектров внегалактических источников с энергией.

На Рис. 2.5. приведены максимальные энергии, предсказываемые в [0] в зависимости от красного смещения источников для нескольких моделей EBL в сравнении с некоторыми экспериментальными оценками, сделанными в этой работе. Как видно, энергии типа 20 -30 ТэВ являются предельными для наблюдений экстрагалактических источников, даже таких близких как MCr 501 и MCr 421. В приведенной в Табл. 1 из работы [0] измеренные экспериментально интервалы энергий от экстрагалактических источников (в 4 колонке) не указывают на присутствие такого обрезания, поэтому детектирование их в VHE излучении в области более 20 ТэВ не исключается с увеличением чувствительности следующих поколений телескопов, таких как HiScore.

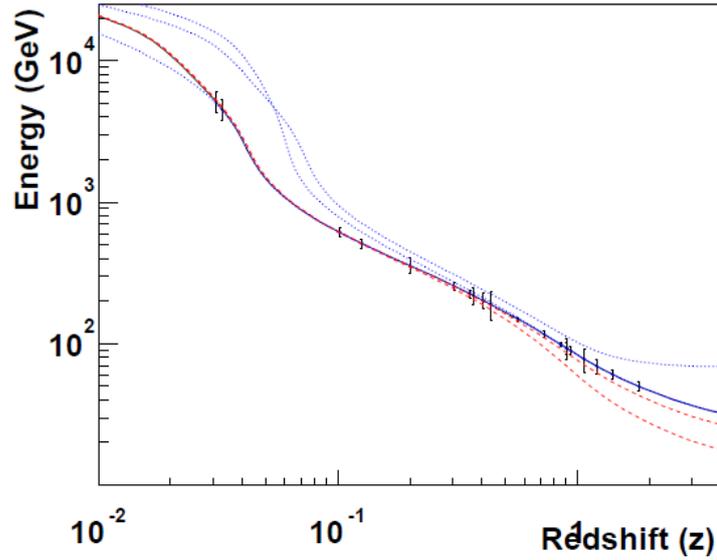


Рис. 2.5. Гамма –горизонт, предсказываемый в [0] в зависимости от красного смещения для нескольких моделей EBL в сравнении с некоторыми экспериментальными оценками, сделанными в этой работе.

Таблица 1. Измеренные значения максимальных энергий от разных внегалактических источников находящихся на разных расстояниях из компиляции [0].

Source	Redshift	Experiment	Energy Range (TeV)	VHE Slope		Fermi Slope		Variability Index
				$\Gamma \pm \sigma_{stat} \pm \sigma_{sys}$	$\Gamma \pm \sigma_{stat}$			
Mkn 421	0.031	HESS	1.75 – 23.1	$2.05 \pm 0.22$	$1.77 \pm 0.01$		112.8	
Mkn 501	0.034	MAGIC	0.17 – 4.43	$2.79 \pm 0.12$	$1.64 \pm 0.09$		72.33	
Mkn 501	0.034	HEGRA	0.56 – 21.45	$1.92 \pm 0.03 \pm 0.20$	$1.64 \pm 0.09$		72.33	
1ES 2344+514	0.044	MAGIC	0.19 – 4.00	$2.95 \pm 0.12 \pm 0.20$	$1.72 \pm 0.08$		28.13	
Mkn 180	0.045	MAGIC	0.18 – 1.31	$3.25 \pm 0.66$	$1.74 \pm 0.08$		19.67	
1ES 1959+650	0.048	HEGRA	1.52 – 10.94	$2.83 \pm 0.14 \pm 0.08$	$1.94 \pm 0.03$		52.30	
1ES 1959+650	0.048	MAGIC	0.19 – 2.40	$2.58 \pm 0.18$	$1.94 \pm 0.03$		52.30	
BL Lacertae	0.069	MAGIC	0.16 – 0.70	$3.6 \pm 0.5$	$2.11 \pm 0.04$		267.0	
PKS 2005-489	0.071	HESS	0.34 – 4.57	$3.20 \pm 0.16 \pm 0.10$	$1.90 \pm 0.06$		68.86	
RGB J0152+017	0.080	HESS	0.31 – 2.95	$2.95 \pm 0.36 \pm 0.20$	$1.79 \pm 0.14$		27.73	
PKS 2155-304	0.116	HESS	0.25 – 3.20	$3.34 \pm 0.05 \pm 0.1$	$1.81 \pm 0.11$		262.9	
RGB J0710+591	0.125	VERITAS	0.42 – 3.65	$2.69 \pm 0.26 \pm 0.20$	$1.53 \pm 0.12$		29.86	
H 1426+428	0.129	HEGRA	0.78 – 5.37	–	$1.32 \pm 0.12$		22.16	
1ES 0806+524	0.138	MAGIC	0.31 – 0.63	$3.6 \pm 1.0 \pm 0.3$	$1.94 \pm 0.06$		37.80	
H 2356-309	0.165	HESS	0.23 – 1.71	$3.06 \pm 0.15 \pm 0.10$	$1.89 \pm 0.17$		20.19	
1ES 1218+304	0.182	MAGIC	0.09 – 0.63	$3.0 \pm 0.4$	$1.71 \pm 0.07$		40.00	
1ES 1218+304	0.182	VERITAS	0.19 – 1.48	$3.08 \pm 0.34 \pm 0.2$	$1.71 \pm 0.07$		40.00	
1ES 1101-232	0.186	HESS	0.18 – 2.92	$2.88 \pm 0.17$	$1.80 \pm 0.21$		25.74	
1ES 1011+496	0.212	MAGIC	0.15 – 0.59	$4.0 \pm 0.5$	$1.72 \pm 0.04$		48.05	
1ES 0414+009	0.287	HESS	0.17 – 1.13	$3.44 \pm 0.27 \pm 0.2$	$1.98 \pm 0.16$		15.56	
PKS 1222+21 <sup>a</sup>	0.432	MAGIC	0.08 – 0.35	$3.75 \pm 0.27 \pm 0.2$	$1.95 \pm 0.21$		13030	
3C 279	0.536	MAGIC	0.08 – 0.48	$4.1 \pm 0.7 \pm 0.2$	$2.22 \pm 0.02$		2935	
1ES 0229+200 <sup>b</sup>	0.140	HESS	0.60 – 11.45	$2.5 \pm 0.19 \pm 0.10$	–		–	

Проведенные исследования спектров источников с большим красным смещением дают указание на недостаточно сильное поглощение фотонов высоких энергий по сравнению с предсказаниями, основанными на минимальном межгалактическом фоне [0], Вселенная оказывается более прозрачной, возможно благодаря неизвестным новым физическим процессам, которые будут обсуждаться в главе 4.

## 2.2 Статус экспериментальных исследований (установки и проекты)

Гамма-кванты высоких энергий более 100 ГэВ не могут доходить до поверхности Земли и быть зарегистрированы непосредственно, с другой стороны их интенсивность столь мала в этой области энергий, что исследования на спутниках и баллонах позволяют продвинуться в область энергий максимум до сотен ГэВ (наиболее успешным телескопом, сделавшим за несколько лет несколько десятков открытий является телескоп Fermi LAT), поэтому в области VHE энергий – более 100 ГэВ исследования проводятся наземными установками по регистрации вторичного ливня частиц, возникающего при взаимодействии первичного высокоэнергичного гамма-кванта с атомами атмосферы. Наиболее распространены черенковские телескопы, регистрирующие черенковскую вспышку света, возникающую от электромагнитного каскада частиц. Эта вспышка наблюдается на Земле в видимом и УФ диапазонах в малом угле ( $\sim 10^\circ$ ) по направлению к движению первичного кванта. Основные характеристики вспышек: · площадь, освещаемая такой вспышкой, - десятки тысяч квадратных метров; яркость вспышки сопоставима с фоном ночного неба, длительность вспышки составляет 10 нс

### 2.2.1 Черенковские гамма- телескопы.

Первый черенковский гамма-телескоп был создан под руководством А.Е.Чудакова в Крыму в начале 60-х годов. С тех пор черенковские телескопы прошли полувековой путь развития как метод детектирования гамма-квантов.

Черенковские телескопы можно разделить на 4 поколения:

*1-ое поколение:* Крымская обсерватория (ФИАН); Дублин, Уни-вер-т; Вудстокский колл; Смитсон. обс.; Бомбей, Институт физики; Сиднейский уни-т.

*2-ое поколение:* CAT, HEGRA, WHIPPLE, ГТ-48.ШАЛОН (ФИАН)

*3-ье поколение:* HESS, MAGIC, VERITAS.

*4-ое поколение(проекты):* CTA, AGIS

Настоящий прорыв в исследовании высокоэнергичного гамма- излучения был достигнут в последнее десятилетие благодаря черенковским телескопам третьего поколения HESS [0], MAGIC [0], CANGAROO, VERITAS [0]. Они представляют собой узкоугольные телескопы ( угол обзора  $3-5^\circ$ ), состоящие из зеркала диаметром 10-15 м и мозаики фотоприемников в фокусе зеркала. Зеркало собирает черенковский свет, а в мозаике создается изображение вспышки черенковского света. Метод анализа формы изображения , предложенный А.М.Хилласом в конце 80-х годов [0], позволил с высокой надежностью отделять ШАЛ образованных гамма-квантом от ШАЛ образованных космическими лучами. Такие телескопы принято называть IACT (*Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope*) телескопами. Альтернативный подход к регистрации черенковского света от ШАЛ без создания изображения (*non-imaging*) с успехом используется для исследования космических лучей на установке Тунка-133[0] и будет использован в обсерватории Тунка- HISCORE [0].

В состав современных IACT –телескопов (HESS [0], MAGIC[0], VERITAS[0]) входят от 2 до 4 зеркал, в мозаике каждого зеркала около 1000 фотоумножителей. Основные параметры телескопа – это чувствительность, которая выражается в единицах Крабовидной туманности, энергетический диапазон, энергетическое и угловое разрешение. По сравнению

с пионерским телескопом Whipple в 1989 [0], когда для детектирования наиболее яркого источника Крабовидная туманность требовалось 50 часов, чувствительность телескопов увеличилась в сто раз, что позволяет надежно детектировать ее за 25 секунд.

**HESS (High Energy Stereoscopic System)** [0]. 2003- 2012, расположен в южном полушарии в Намибии на нагорье Хомас на широте . Область исследования 100 ГэВ до 100 ТэВ, чувствительность 0.002 Крабовидной Туманности. Каталог ТэВ-ных источников составляет 100 источников. Стерескопическая система телескоп H.E.S.S. состоит из 4 идентичных телескопов с диаметром зеркала 10 м, расположенных на расстоянии 60 м. Угловое разрешение  $0.1^\circ$  при энергии 120 ГэВ до нескольких ТэВ, энергетическое разрешение около 15%. H.E.S.S. исследовал основную часть Галактического диска, видимого из южного полушария и открыл около 50 галактических источников, принадлежащих к классам остатков сверхновых, пульсарных туманностей, бинарных звездных систем, звездных кластеров, и в последнее время открытые молекулярные облака в окрестностях остатков сверхновых. Около 30 точечных объектов зарегистрировано вне галактической плоскости, в основном они ассоциируются с ядрами активных галактик (AGN), и большинство из них BL Лацертиды (BL LAC).

**VERITAS** [0] (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System), 2002-2007, установка состоящая из 4 идентичных телескопов, расположенная на в южной Аризоне в США на высоте 1.3 км на 31о северной широты. Каждый оптический отражатель с диаметром 12 м и эффективной площадью около 110 м<sup>2</sup>, с 499 канальным фотоумножителем в фокусе зеркала, допускающий угол обзора 3.5 о. Угловое разрешение  $0.1^\circ$ , энергетическое разрешение 15% при энергии в районе 1 ТэВ. Чувствительность телескопа в настоящее время позволяет видеть источники с интенсивностью в 100 раз меньше Крабовидной туманности за 25 часов. Полное время наблюдения обычно составляет 1000 часов в год. Установка зарегистрировала около 39 источников, включая PWN, SNR, бинарные системы, пульсары, галактики с активным звездообразованием, и также , а также неидентифицированные источники.

**MAGIC** [0]. Расположен на Канарских островах на высоте 2.2 км и широте  $28^\circ$ , и имеет самый низкий порог по регистрации – менее 50 ГэВ и до нескольких ТэВ. С 2004 по 2009 г. работал как моно телескоп с зеркалом 17 м диаметром, с 2009 вступил в строй второй телескоп и с 2009 г. MAGIC работает как стереосистема, что позволило значительно повысить чувствительность, сейчас она составляет 1% от Краба при 1 ТэВ и 10% при 10 ТэВ. Энергетическое разрешение 15% и угловое разрешение  $0.07^\circ$ . MAGIC зарегистрировал 9 Галактических объектов: Crab Nebula, the Galacti, Center, HESS J1813, HESS J1834, the SNRs Cassiopeia A and IC443, the X-ray binary LSI 61+303, the unidentified EGRET source TeV 2032 and the Crab pulsar. Благодаря низкому порогу в отличие от других телескопов может регистрировать Пульсирующее излучение от пульсаров. Оно обнаружено при энергии более 25 ГэВ от Краба, и это уже исключает модель, в которой пульсирующее излучение происходит вблизи пульсарной поверхности, так как сильные магнитные поля будут поглощать это излучение через процесс образования пар. Благодаря низкому порогу и большой северной широте, телескоп эффективно исследует внегалактические объекты, в том числе в число научных задач включено исследование верхнего предела на поток гамма

всплесков, ограничение на поток от аннигиляции темной материи в двойных сфероидальных галактиках и галактических кластерах.

**СТА [0](Cherenkov Telescope Array)**, проект (2016-2017 г) 4-ого поколения черенковских телескопов, аккумулирующий весь предыдущий опыт имидживых телескопов и состоящий из основной установки в южном полушарии, направленной на исследование Галактических объектов, и дополняющей установки в Северном полушарии, направленной на исследование Мета галактических объектов, в основном ядер активных Галактик. Установки будут состоять из десятка 10-15 – метровых телескопов (класса H.E.S.S., VERITAS), расположенных со спейсингом порядка 100 м, направленных на исследование области энергий 100 ГэВ- 10 ТэВ, и 20-30 метрового телескопа или двух телескопов (класса HESS II), предназначенного для исследования низкоэнергетической области < 100 ГэВ. Для исследования гамма излучения с энергией более 10 ТэВ требуется большая площадь установок – несколько км, поэтому либо это телескопы небольшой площади – несколько м<sup>2</sup> со спейсингом 100-200 м<sup>2</sup>, либо телескопы класса HESS с раздвижением ~ 500 м, возможна также конфигурация из суб-кластеров телескопов, расположенных с гораздо большим раздвижением.

Цели и преимущества СТА следующие. СТА увеличивает чувствительность на порядок: в области 100 ГэВ- несколько ТэВ она составит 10<sup>-3</sup> Краба; увеличивает площадь детектирования, и следовательно частоту, что важно для исследования транзитных явлений: увеличивает угловое разрешение (~arc-minut), для улучшения исследования морфологии неточечных объектов; улучшает энергетическое разрешение в очень широкой области энергий от десятков ГэВ до 100 ТэВ; СТА может работать в различной конфигурации, поскольку состоит из множества телескопов, и может обеспечивать как глубокое исследование единичных объектов, так и с другой стороны одновременный мониторинг десятков объектов; СТА будет работать как открытая обсерватория, обеспечивающая открытый доступ данным для астрофизикам и астрономам, ученым, занимающимся физикой частиц, космологией и т.д. Полное число зарегистрированных источников должно быть увеличено в 10 раз и достигнуть около 1000 объектов.

Таблица 2. Сводная таблица характеристик IACT 2-го т 3-го поколения из [0].

Instrument	Lat (°)	Long (°)	Alt (m)	Telescopes		Pixels	FoV FoV (°)	Thresh (TeV)	Sensi- tivity (% Crab)	
				#	Area (m <sup>2</sup> )					Total (m <sup>2</sup> )
H.E.S.S.	-23	16	1800	4	107	428	960	5	0.1	0.7
VERITAS	32	-111	1275	4	106	424	499	3.5	0.1	0.7
MAGIC I <sup>†</sup> +II	29	18	2225	2	234	468	576/1039	3.5	0.03	1.0
CANGAROO-III	-31	137	160	3	57.3	172	427	4	0.4	15
Whipple <sup>†</sup>	32	-111	2300	1	75	75	379	2.3	0.3	15
HEGRA	29	18	2200	5	8.5	43	271	4.3	0.5	5
CAT <sup>†</sup>	42	2	1650	1	17.8	17.8	600	4.8	0.25	15

## 2.2.2 Широкоугольные установки для регистрации высокоэнергичного гамма-излучения.

Основным конкурентом атмосферных черенковских телескопов в области детектирования гамма-квантов высоких энергий являются ливневые установки, в которых регистрируют ливень вторичных заряженных частиц, и по нему определяется энергия, а выделение ливней, произошедших от гамма-квантов над фоном адронных ливней, происходит по наличию проникающей компоненты и по пространственному распределению. Методы регистрации при этом могут отличаться. Основными преимуществами таких установок является широкий угол обзора (до  $45^\circ$ ), полное время наблюдения, тогда как для черенковских телескопов эффективное темное время не превышает 10%. При этом порог регистрации оказывается очень высоким - не менее 10 ТэВ.

**MILAGRO [0].** Пионерская гамма - обсерватория такого типа, MILAGRO, работающая с 2000 г. расположена около Лос Аламоса в горах на высоте 2500 м над уровнем моря . Она представляет собой водный черенковский детектор размером 60 м x 80 м x 8 м Черенковский свет собирается 723 фотоумножителями, размещенными в двух слоях, нижний слой регистрирует в основном свет от проникающей компоненты, позволяющей выделять ливни от гамма-квантов над адронным фоном. Рабочий диапазон 1-100 ТэВ, с максимумом эффективности в области 10-50 ТэВ. Милагро впервые получила оценку диффузного излучения Галактики при энергии 10 ТэВ. В этом эксперименте зарегистрирован десяток Галактических источников с энергией 20 ТэВ, 8 с высокой достоверностью. При этом из 34 галактических источников из BGL (каталог источников FERMI), входящих в поле зрения Милагро, ТэВ-ное излучение обнаружено с достоверностью  $3\sigma$  в 14 источниках. Благодаря непрерывному времени наблюдения такие телескопы способны регистрировать транзистентные явления, типа гамма всплесков.

**HAWC [0] (High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory).** Эта обсерватория является развитием телескопа Милагро, она также будет расположена высоко в горах (4100 м) Sierra Negra в седле между двумя потухшими вулканами в Национальном парке Pico de Orizaba) около Пуэбло, в Мексике. Она будет состоять приблизительно из 300 больших баков с водой (изолированных от света), 7.3 м диаметром, 4 м высотой, каждый будет снабжен 3 периферическими и 1 центральным фотоумножителем для сбора черенковского света, образуемого в воде заряженными частицами. Общая площадь установки  $\sim 150 \times 150 \text{ м}^2$ . Обсерватория нацелена на непрерывное исследование гамма-излучения в широком диапазоне энергий 100 ГэВ- 100 ТэВ при очень широком одновременном угле обзора, составляющим 15% от всего неба. Выделение ливней от гамма-квантов на в тысячу раз более высоком фоне адронов, будет происходить по пространственному распределению сработавших детекторов. Физическая программа чрезвычайно широкая: Галактические источники, диффузное излучение Галактики, экстремальные Галактические ускорители, Метагалактические источники, Гамма всплески и т.д.

**LHAASO [0].** На Тибете, на высоте 4300 м, где расположены известные установки Тибет и ARGO-YBJ, начаты работы по созданию гигантской комплексной установки LHAASO

(рис.14) Новая установка будет включать 5000 сцинтилляционных детекторов электронов и 1200 мюонных детекторов (MD) общей площадью 40000 м<sup>2</sup>. Сцинтилляционные детекторы электронов и мюонов будут размещены на площади 1 км<sup>2</sup>. Такая установка, кроме детального исследования спектра и массового состава космических лучей до 10<sup>18</sup> эВ, позволит проводить поиск локальных источников гамма-квантов с энергиями выше 30 ТэВ, на недоступном ранее уровне чувствительности. Для поиска источников гамма-квантов в более низкой области энергии (100 ГэВ), в состав установки будут включены закрытые водные черенковские детекторы общей площадью 90000 м<sup>2</sup>. В добавление к широкоугольным детекторам в составе установки предполагается иметь также 2 узкоугольных гамма-телескопа (IACT), регистрирующих изображение ливня в мозаике фотоумножителей (Imaging Atmospheric Telescope) с энергетическим порогом около 30 ГэВ.

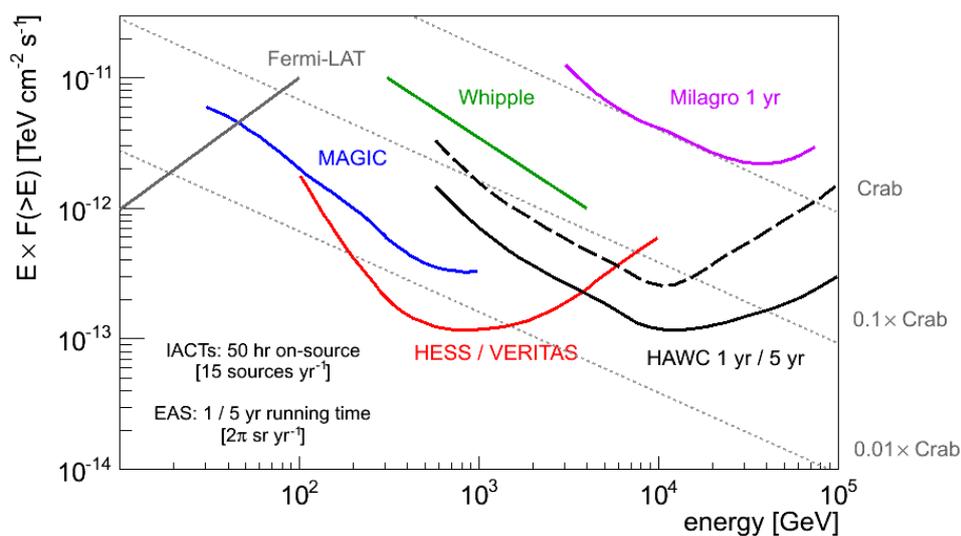


Рис. 2. 6. Чувствительности гамма-телескопов.

### 2.3. Потенциальные ТЭВ-ные источники в северном полушарии. Возможности наблюдения в северном полушарии. Задачи.

Планируемая обсерватория Tunka- Hiscore будет расположена на  $S=51.8^\circ$  северной широты и является самым северным телескопом, что накладывает свои преимущества при детектировании таких важных источников на больших широтах ( $S$ ), как сверхновая Тихо Браге ( $R=2.2$  кпс,  $T=0.4$  тыс. лет,  $S=64.13^\circ$ ), Бумеранг ( $R=0.8$  кпс,  $T=10$  тыс. лет,  $S=64.13^\circ$ ), Cas A ( $R=3.4$  кпс,  $T=0.4$  тыс. лет,  $S=58.81^\circ$ ), CTA 1 ( $R=1.4$  кпс,  $T=14$  тыс. лет,  $S=72.4^\circ$ ), от которых уже зарегистрировано ТЭВ-ное излучение, но и большое количество относительно молодых и близких сверхновых и PWN, расположенных в рукавах Ориона и Персея, от которых пока ТЭВ-ное излучение не наблюдается: HB21 ( $R\sim 0.8$  кпс,  $T\sim 19$  тыс. лет,  $S=50.7^\circ$ ), DA 530 ( $R=2.0$  кпс,  $T=5$  тыс. лет,  $S=55.4^\circ$ ), CTV104A (DA551), ( $R=1.5$  кпс,  $T\sim 90$  тыс. лет,  $S=50.8^\circ$ ), G114.3-0.3 ( $R=0.7$  кпс,  $T=7.7$  тыс. лет,  $S=61.9^\circ$ ), G116.5+1.1 ( $R\sim 1.6$  кпс,  $T\sim 15$  тыс. лет,  $S=63.2^\circ$ ), CTV 1 ( $R=2.2$  кпс,  $T=15$  тыс. лет,  $S=62.5^\circ$ ), R5 ( $R\sim 1.2$  кпс,  $T\sim 30$  тыс. лет,  $S=63.1^\circ$ ), 3C58 ( $R=2.6$  кпс,  $T=5.4$  тыс. лет,  $S=64.8^\circ$ ), HB3 ( $R=2.2$  кпс,  $T=30$  тыс. лет,  $S=62.5^\circ$ ), HB9 ( $R=0.8$  кпс,  $T=6.6$  тыс. лет,  $S=46.2^\circ$ ), S147 ( $R=0.8$  кпс,  $T=40.6$  тыс. лет), Gamma pulsar Fer- J0248+6021 ( $R\sim 2.0$  кпс,  $T\sim 60$  тыс. лет,  $S=60^\circ$ ).

Черенковские телескопы могут работать только в безлунные ясные ночи и регистрировать гамма кванты от источников, находящихся в поле зрения телескопа, которое зависит от времени наблюдения  $T_{obs}$  на данной широте (для Hiscore  $S=51.8^\circ \pm \alpha_{obs}$ ), где  $\alpha_{obs}$  определяется эффективным азимутальным углом наблюдения (для Hiscore  $\alpha_{obs} \sim 25-30^\circ$ ) при вертикальном расположении детекторов. Предполагается предусмотреть возможность разворота телескопа к югу или к северу, чтобы захватить несколько важных источников, таких как “стандартная свеча” Крабовидная туманность, остаток сверхновой IC443, пульсар J0631.8+1034 и Geminga, SNR W51C J1923.0+1411, SNR G54.1+0.3 (от которых зарегистрировано излучение с энергией  $\sim 10-20$  ТЭВ в эксперименте MIPagro [0]). По многолетним данным установки Тунка 133 [11] полное время наблюдения составляет около 600 часов в период август-март, ежедневное время наблюдения в безлунные ночи колеблется от 2 часов до 11 часов в январе-феврале, а эффективное время наблюдения с прозрачной атмосферой составляет приблизительно 50-70% от этого времени и определяется погодными условиями. На Рис. 2.7 представлено время наблюдения по дням.

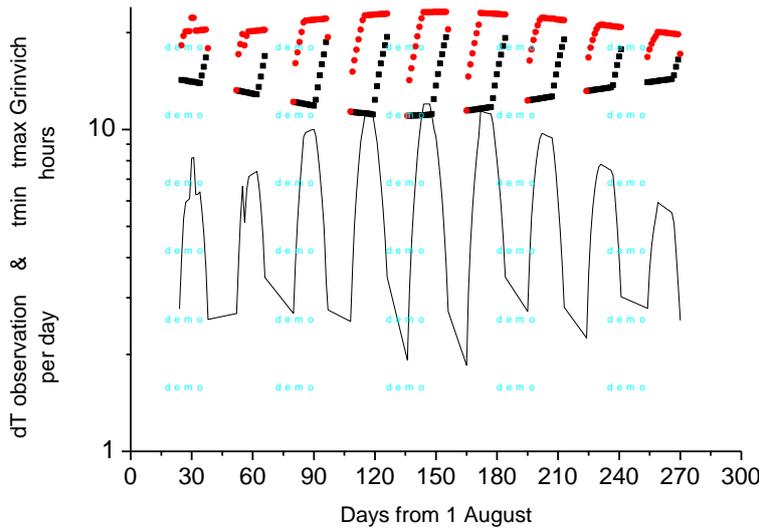


Рис. 2.7. Ожидаемая длительность периода наблюдения  $dT$  (час) в день в темные безлунные ночи в зависимости от номера дня года, вычисляемого от первого августа. Верхний рисунок – абсолютное время по Гринвичу  $T_{min} - T_{max}$  в день ( без учета погодных условий). Полное время составляет порядка 1000 часов в год.

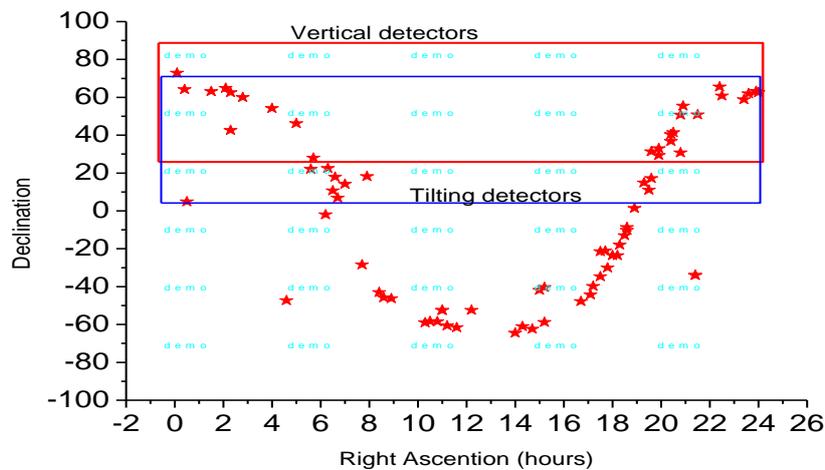


Рис. 2.8. Координаты 73 близких источников Галактического диска из различных каталогов. Квадратами обозначена область детектирования Hiscore с вертикально расположенными детекторами (красный прямоугольник) и детекторами, наклоненными к югу на 20 градусов (синий).

На Рис. 2.8 представлен плот – прямое восхождение – склонение для Галактических источников, красным квадратом обозначена область детектирования при вертикальном положении телескопа и синим – при детекторах, склоненных к югу на 25 градусов. Однако, эффективность наблюдения при прямом восхождении RA=14-21 час в несколько раз подавлена, из за отсутствий наблюдений в летнее и весеннее время.

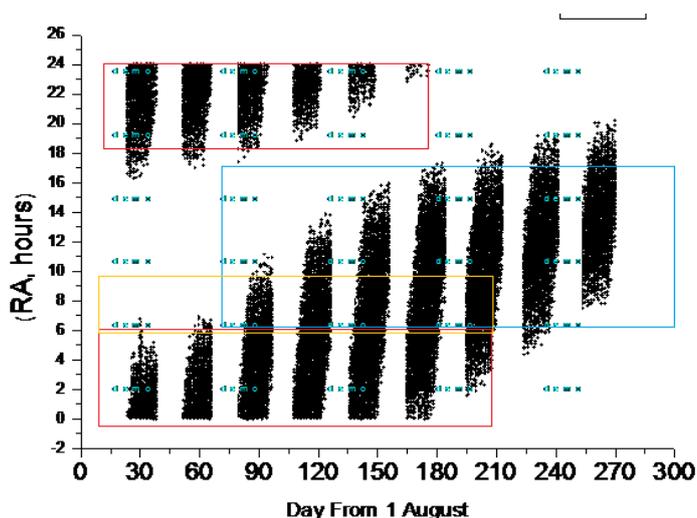


Рис. 2.9 Поле точек – прямое восхождение – день наблюдения. Красные прямоугольники - две области эффективного детектирования Галактических источников, желтый - область етектирования при детекторах, наклоненных к югу; синим прямоугольником обозначена область внегалактического наблюдения.

На Рис. 2.9 представлено поле точек – прямое восхождение (RA) – день наблюдения (отсчитываемый от 1 августа), которое показывает, как смещается область чувствительности от августа до марта телескопа Hiscore. Красными квадратами обозначены две области детектирования Галактических источников, желтым - область детектирования при детекторах, наклоненных к югу. телескопе, синим обозначена область внегалактического наблюдения, она приходится январь-март.

Для точного расчета ожидаемого времени наблюдения и оценки числа зарегистрированных гамма-квантов с энергией более 20 ТэВ, которые в принципе могли бы наблюдаться на обсерватории Гунка-Hiscore, создан сводный каталог источников, который приведен в Приложении 1 в таблице. Это остатки сверхновых, пульсарные туманности, активные галактические ядра и обычные галактики с активным звездообразованием. Наблюдаемая на гамма-установках HESS, MAGIC, VERITAS дифференциальная интенсивность при энергии 1 ТэВ и спектральный индекс приведены в 6 и 7 колонках таблицы. Некоторые из этих источников также зарегистрированы на установке Milagro при энергии несколько десятков ТэВ (35 ТэВ или 20 ТэВ). Соответствующая наблюдаемая интенсивность дается в 8-й колонке. В 11 колонке приводится  $\frac{1}{2}$  ожидаемого полного времени наблюдения данного источника (в предположении, что половина времени – атмосфера прозрачная) при вертикальном положении детекторов  $V=0$  (и для некоторых источников при детекторах склоненных к югу ( $V=-25$ , обозначено красным цветом) или к северу ( $V=+25$ , обозначено синим цветом.) Ожидаемое интегральное число гамма-квантов с энергией более 20 ТэВ приводится в 12 колонке, оно посчитано от реперной точки 1 ТэВ с показателем наклона из 7 колонки. В 13 колонке число событий с энергией более 20 ТэВ в год получено из значения интенсивности при 20 ТэВ (8 колонка) с показателем  $\Gamma=2.3$ , и в 14 колонке приводится число событий с энергией более 35 ТэВ в год получено из значения интенсивности при 35 ТэВ с показателем  $\Gamma=2.3$ .

Полное число источников, оказывается 25, из них 5 внегалактических источников: Маркарян 421, 501, M87, [1ES 2344+514](#) (активные галактические ядра). Считается, что энергия частиц, ускоренных в этих объектах может достигать  $10^{20}$  эВ, что достаточно для объяснения наблюдаемых КЛ сверхвысоких энергий. Наблюдения галактики M82

представляют интерес с точки зрения теории распространения КЛ. В этой галактике бурное звездообразование в ее центральной части приводит к возникновению мощного истечения газа со скоростью порядка нескольких тысяч километров в секунду. При небольших энергиях КЛ также переносятся этим потоком. По этой причине наблюдаемый спектр гамма—излучения довольно жесткий с показателем 2.5 и вероятно близок к спектру источников КЛ в этой галактике. Наблюдения при более высоких энергиях вероятно обнаружат укрупнение спектра, связанное с диффузионным выходом частиц КЛ высоких энергий. Это позволит экспериментально определить коэффициент диффузии КЛ в этой галактике. Однако оценка общего числа гамма-квантов с энергией более 20 ТэВ сделана интерполированием от 1 ТэВ с фиксированным показателем, без учета поглощения на экстрагалактическом фотонном поле. Даже для таких близких Галактик она может быть рассмотрена только как верхняя оценка. Отсутствие гамма-квантов высоких энергий от этих объектов позволит сделать заключение о моделях фотонного поля.

Остальные 20 источников - остатки сверхновых и пульсарные туманности, которые являются главными источниками высокоэнергичного излучения в Галактике, Наблюдения при больших энергиях гамма-лучей позволят установить ускоряют ли остатки сверхновых КЛ до более высоких энергий вплоть до энергии колена 3 ПэВ в наблюдаемом спектре КЛ (например молодые остатки Тихо и Кассиопея А). В нашей Галактике вероятно должно быть еще несколько неидентифицированных молодых остатков этого типа, возможно это HESS J1957+026 и HESS1958+20. Старые остатки сверхновых могут наблюдаться при энергиях выше 20 ТэВ, как остатки IC443 и W51C, которые наблюдаются и в ГэВ-ном и в ТэВ-ном гамма-диапазоне.

### 3. Исследование галактических космических лучей

#### 3.1. Состояние вопроса о происхождении КЛ в настоящее время.

Основные характеристики космического излучения за 100 лет установлены с довольно хорошей точностью [0]: космические лучи – это ядра практически всех химических элементов, составляющих таблицу Менделеева, приходящие равномерно со всех направлений (изотропно) из окружающего Землю пространства с почти степенным энергетическим распределением, простирающееся на много порядков - от  $10^6$  до  $10^{20}$  эВ. Интенсивность столь резко уменьшается при увеличении энергии частиц (как видно из рисунка 1 – на 25 порядков при изменении энергии от 100 ГэВ до  $10^{11}$  ГэВ), что методика измерения КЛ разительно отличается в разных энергетических интервалах и ни в одном эксперименте не удалось измерить спектр более чем на 3 порядках по энергии.

Основные идеи о происхождении космических лучей, были сформулированы во второй половине двадцатого века и остаются незыблемыми до сих пор: основная доля космических лучей имеет галактическое происхождение, они диффундируют в межзвездных магнитных полях и заполняют обширное гало, источниками космических лучей являются взрывы сверхновых, частицы самых высоких энергий (сейчас к ним относят космические лучи с энергиями выше  $10^{18}$  -  $10^{19}$  эВ) имеют внегалактическое происхождение. За последние полвека было получено множество косвенных подтверждений того, что основными источниками являются остатки сверхновых [0]. Прямые свидетельства наличия релятивистских частиц в остатках сверхновых следуют из наблюдений нетеплового излучения в радио-, рентгеновском- и гамма диапазонах, как было описано выше.

Хорошо разработан и теоретический механизм диффузный механизм ускорения на фронте ударной волны DSA (Diffusive Shock Acceleration) благодаря многократному пересечению фронта ударной волны диффундирующими быстрыми частицами [0, 0,0,0,0,0], см. также обзор [0]. Диффузия частиц обеспечивается их рассеянием на неоднородностях магнитного поля. При эффективном ускорении на ударной волне, давление релятивистских частиц оказывается столь большим, что профиль ударной волны модифицируется и возникающий самосогласованный спектр ускоренных частиц существенно отличается от случая пробных частиц – он укрупняется при нерелятивистских энергиях и может уплощаться вплоть до  $\sim E^{-3/2}$  в области самых высоких энергий. Необходимым условием ускорения до очень высоких энергий является маленький коэффициент диффузии на фронте ударной волны  $D \ll u_{sh} R_{sh}$ , где  $u_{sh}$  и  $R_{sh}$  - скорость и радиус ударной волны соответственно, включая область непосредственно перед фронтом, который будет обеспечивать удержание частиц около фронта волны вплоть до больших энергий. Это обеспечивается самими ускоряемыми частицами, которые выходят из области ускорения и создают повышенный уровень мдг-турбулентности за счет потоковой неустойчивости. Наличие сильного турбулентного магнитного поля подтверждается наблюдениями нетеплового рентгеновского излучения от молодых остатков сверхновых с характерным степенным спектром вплоть до энергий в десятки кэВ от ярких «ободков» в примерно десяти молодых галактических остатках сверхновых, включая SN1006, Cas A, RXJ 1713.7-3946, RX J08852-46/Vela Jr, RCW 86, G266.2-1.2 и другие см. обзор [0,0]. Большое усиление поля в молодых остатках является косвенным свидетельством ускорения протонов, которое сопровождается сильной потоковой

неустойчивостью. Пространственное распределение нетеплового излучения во всех диапазонах свидетельствует о том, что ускорение частиц в оболочечных остатках сверхновых происходит непосредственно на ударной волне, порожденной взрывом сверхновой.

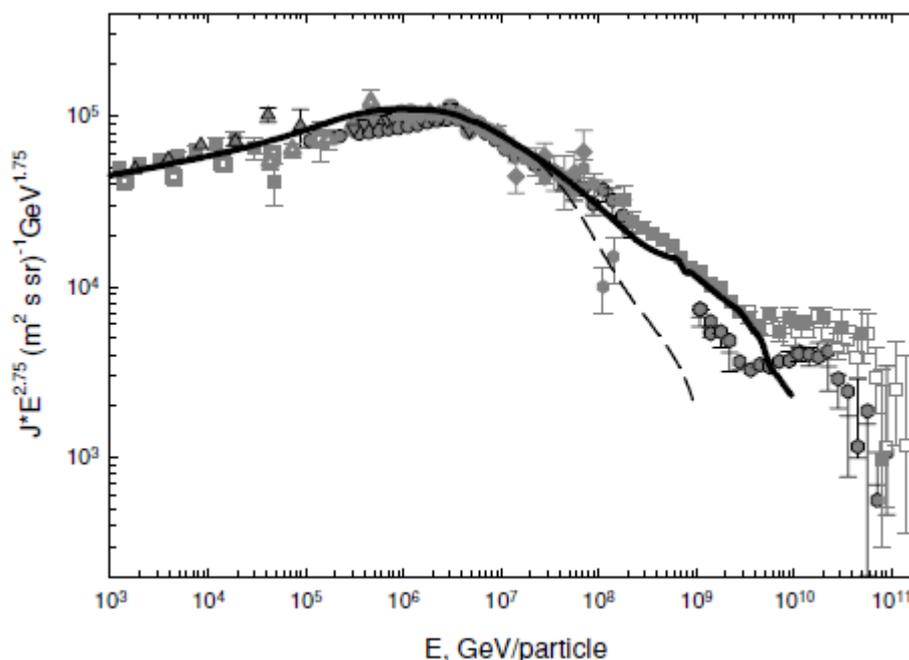


Рис. 3.1. Спектр всех частиц космических лучей, измеренный в различных экспериментах, и рассчитанный в работе [0] по модели с разными типами сверхновых.

Частицы максимальных энергий, ускоренные в галактических источниках, по-видимому, излучаются на начальной стадии разлета оболочек сверхновых, когда случайное поле может достигать величины до 1 мГ:  $\delta B_{\max} \sim 10^3 (u_{\text{sh}}/3 \times 10^4 \text{ км с}^{-1}) n^{1/2} \mu\text{Гс}$ , а максимальная энергия ускоренных частиц  $E_{\max} \sim 10^{17} Z (u_{\text{sh}}/3 \times 10^4 \text{ км с}^{-1})^2 M_{\text{ej}}^{1/3} n^{1/6} \text{ эВ}$  (здесь  $M_{\text{ej}}$  – масса сброшенной оболочки, измеренная в массах Солнца). Однако скорости ударных волн в различных сверхновых различаются значительно, как и условия окружающей среды и условия взрыва, что приводит к уменьшению доли сверхновых, ускоряющих до фиксированной энергии. В целом такая модель [0], где рассчитаны спектры КЛ от разных типов сверхновых, ускоряющих до разных энергий воспроизводит спектр космических лучей до  $10^{18}$  эВ и излом в спектре. На рисунке 3.1 показан рассчитанный в [0] спектр космических лучей в межзвездной среде. Расчет выполнен с помощью численного кода, который позволяет моделировать эволюцию сферической ударной волны, порожденной взрывом сверхновой, и ускорение частиц с учетом обратного влияния их давления на гидродинамическое течение. Учитывается ускорение космических лучей в остатках сверхновых типа Ia, II, Ib/c и IIb. Трансформация кинетической энергии взрыва сверхновой в энергию ускоренных космических лучей становится эффективной с момента начала Седовской (адиабатической) стадии эволюции ударной волны, т.е. когда масса выброса сверхновой становится равной массе нагребенного ударной волной газа. В результате, в усредненном за все время ускорения эволюционирующей ударной волной спектре частиц возникает характерный излом – «колени». Энергия колена приближенно оценивается, как

**Результаты** эВ. Рассчитанные спектры хорошо согласуются с наблюдениями вплоть до энергий примерно  $5 \cdot 10^{18}$  эВ (до этой максимальной энергии ускоряются ядра железа в остатках сверхновых типа IIb). Благодаря суммированию по различным типам сверхновых и по различным типам ядер, воспроизводится форма «колена» в спектре всех частиц при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ. В целом в космические лучи переходит примерно 1/3 кинетической энергии взрыва сверхновой.

### 3.2. Неразрешенные вопросы КЛ, которые может решить Тунка- Hiscore.

Указание на очень резкую форму колена получались и ранее, и этому было посвящено много работ, в том числе известные работы [0], в которых именно резкость излома интерпретировалась как доминирующий вклад близкого источника. В последние годы спектральные особенности в области колена значительно уточнились. Полученные в экспериментах Тунка -25, 133 [0] и KASCADE и KASCADE GRANDE [0] спектры всех частиц космических лучей обнаружили, что помимо классического колена при 3-6 ПэВ, в котором показатель наклона изменяется от  $g=-2.7$  до  $g=-3.2$ , в области 20 ПэВ показатель наклона достаточно резко изменяется и становится  $-2.9-3.0$ , а затем при энергии около 100 ПэВ происходит выполаживание  $g \sim -3.2$  при 20 ПэВ, 2-ое колено при энергии около 100 ПэВ. При этом в области 20 ПэВ – 100 ПэВ резко возрастает доля ядер железа до величины 60-70%. Сводка данных последних экспериментов приведена на рис. 3.2. Полученные спектральные особенности позволяют подтвердить одну из основных гипотез, выдвинутых для объяснения происхождения колена в спектре КЛ достаточно давно: колено является свидетельством ограниченности мощности источников КЛ в Галактике, способных ускорять КЛ до предельных энергий, эта энергия для протонов соответствует  $E_{\max} \sim 4$  ПэВ, а для остальных ядер  $Z \times 4$  ПэВ ( $z$ -заряд ядра). Поэтому выбывание частиц с заданным зарядом  $Z$  приводит к изменению общего показателя наклона в интервале  $E_{\max}-26 E_{\max}$  на величину  $\Delta\gamma$ , в первом приближении  $\Delta\gamma \sim \log_{10}(\Delta Fe)/\log 26 = 0.60$  (при доли железа  $\Delta Fe \sim 0.13$  – доля железа при 1 ТэВ), чтобы получить  $\Delta\gamma=0.5$  доля железа должна составлять около 20%.

Полученные на новом уровне точности данные Тунка-133 и KASCADE-Grande указывают на эффективную возможность исследования проблемы происхождения колена без прямого измерения массы первичной частицы, однако в обоих экспериментах не измеряется форма колена, порог регистрации лежит в области  $10^{16}$  эВ. Снижение порога регистрации до 100 ТэВ в эксперименте Hiscore позволит на новом уровне точности получить спектральные особенности в районе колена, и надежнее оценить массовый состав при энергиях частиц, не достижимых в прямых баллонных измерениях, таких как ATIC и CREAM. При этом будет проверена описанная выше гипотеза происхождения колена и возможно будет сделан выбор между гипотезой одного близкого источника и группы универсальных источников, а также исследована область смены различных классов источников в области от 100 ТэВ (до которой частицы ускоряются в наиболее многочисленных сверхновых IIp) до 4 ПэВ, где по-видимому доминируют сверхновые Ia, как это предсказывается в работе [0]. Следует отметить, что, согласно этой работе, ускорение значительной доли частиц с энергиями 100 ТэВ – 4 ПэВ происходит на ударной волне, которая распространяется не по межзвездной среде, а по ветру предсверхновой звезды, что должно приводить к составу космических лучей, существенно отличающемуся от

состава частиц с меньшими энергиями. Так, сверхновые типа Ib/c возникают при взрывах звезд Вольфа-Райе, в ветре которых содержится много гелия, углерода и кислорода, но отсутствует водород. Еще одним предсказанием нелинейной теории ускорения частиц ударными волнами является уплощение спектра космических лучей перед коленом. Имеющиеся данные экспериментов ATIC, CREAM, KASCADE, TUNKA, HEGRA, TIBET в целом не противоречат этим представлениям, но нуждаются в существенном уточнении.

Основной нерешенный вопрос, требующий дополнительного анализа - что это за класс источников? Может ли один очень близкий источник (гипотеза Ерлыкина-Вольфендейла [0]) или суперэнергичный источник (гиперновая) имитировать такое поведение частиц за коленом? Где происходит переход к Метагалактике? Требование резкого обрыва по энергии ускоренных частиц в этой сверхновой остается. Пока единственным кандидатом из близких идентифицированных остатков, оказался остаток сверхновой Vela Junior, такой источник мог бы дать до 20% интенсивности КЛ в районе колена и имитировать структуры.

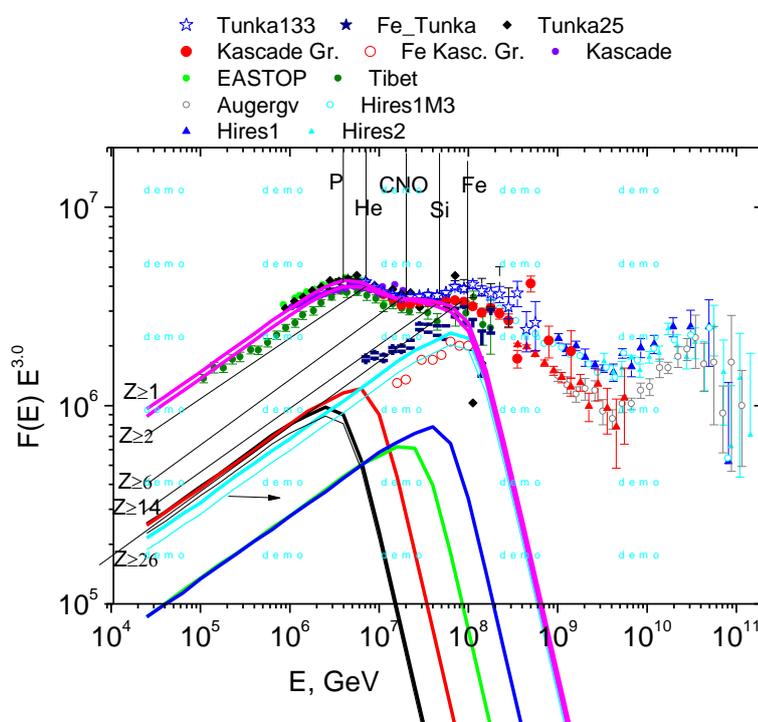


Рис. 3.2. Спектр всех частиц, полученные в экспериментах TUNKA -25[0], 133 и KASCADE и KASCADE GRANDE [0], Тибет, EAS TOP, Auger, Hires, и отдельно спектр ядер железа, полученный в экспериментах TUNKA -133 и KASCADE GRANDE. Линии – модель источников КЛ, в которых Сверхновые Ia являются абсолютно доминирующими источниками космических лучей в области  $10^{15}$ - $10^{18}$  эВ с химическим составом ускоренных КЛ лучей (28% Pr, 28 % He, 10 % CNO, 10% Si, (20-25) % Fe при 1 ПэВ).

Остатки сверхновых являются основными, но, конечно, не единственными источниками релятивистских частиц в межзвездной среде. В частности, пульсары, генерирующие высокоэнергичные электрон-позитронные пары, могут быть ответственны за наблюдаемые в космических лучах позитроны. Измеренный поток позитронов с энергиями более 10 ГэВ в эксперименте Памела оказался выше, чем ожидаемый поток вторичных позитронов, возникающих при взаимодействии космических лучей с атомами межзвездного газа, и вклад пульсаров в принципе объясняет это расхождение. Нельзя исключить, что в

пульсарных туманностях ускоряются не только электроны, но и протоны или ионы, их спектры должны быть сильно по составу отличны от спектров межзвездной среды. Поиск ускорителей, которые могут давать наблюдаемые спектральные особенности космических лучей в различных энергетических интервалах, на фоне космических лучей, ускоренных в остатках сверхновых, остается актуальным.

#### 4. Обсерватория Tunka-HiSCORE и физика частиц

Обсерватория Tunka-HiSCORE за счет большой эффективной площади сможет исследовать низкий поток фотонов в области энергий 20 ТэВ – 100 ПэВ. Большая часть данной области энергий остается неисследованной, так как существующие сегодня гамма-телескопы могут эффективно регистрировать фотоны с энергиями, не превышающими десятков ТэВ. В области энергий выше 100 ТэВ не было зарегистрировано ни одного фотона. В диапазоне энергий 250 ТэВ – 10 ПэВ установлен верхний предел на поток фотонов по данным эксперимента KASCADE [0], а при энергиях выше 1 ЭэВ ограничения на поток фотонов установлены экспериментами AGASA [0], Якутской установкой ШАЛ [0], Pierre Auger [0] и Telescope Array [0]. Чувствительность обсерватории Tunka-HiSCORE более чем в 30 раз превышает чувствительность эксперимента KASCADE при энергии 1 ПэВ [0], открывая возможности для проверки ряда моделей физики и астрофизики частиц. Гамма-кванты с энергией выше 1 ТэВ взаимодействуют с межгалактическим инфракрасным и микроволновым фоновым излучением, рождая электрон-позитронные пары. Последние конвертируются в фотоны более низких энергий посредством обратного комптоновского рассеяния. Для далеких внегалактических источников предсказываемое таким образом поглощение определяет форму спектра выше 1 ТэВ. Исследование формы спектра в данном энергетическом диапазоне позволяет получить ограничения сверху на плотность фонового излучения [0]. Расширение доступного для наблюдений диапазона энергий позволит наблюдать поглощение фотонов, испущенных как далекими, так и относительно близкими источниками и таким образом измерить спектр фонового излучения. Кроме того, на наблюдении поглощения основан метод определения расстояния до источников, расстояние до которых невозможно определить другими средствами.

Исследование спектров источников с большим красным смещением дает указание на недостаточно сильное поглощение фотонов высоких энергий по сравнению с предсказаниями, основанными на минимальном межгалактическом фоне [0]. Одним из механизмов, позволяющих объяснить чрезмерную прозрачность Вселенной, является сценарий DARMA [0]. В этом сценарии фотоны преобразуются в межгалактическом магнитном поле в аксионоподобные частицы (АПЧ) с массой много меньше 1 эВ и таким образом избегают поглощения. Часть аксионоподобных частиц преобразуется обратно в фотоны недалеко от Земли, формируя более жесткий наблюдаемый спектр гамма-квантов по сравнению с предсказанным Стандартной Моделью. В этом сценарии АПЧ является естественным кандидатом на роль темной материи. В качестве альтернативного механизма формирования жесткого наблюдаемого спектра предложено рождение вторичных частиц космическими лучами ультравысоких энергий в процессе их распространения от источника к Земле [0]. Гамма-телескоп Tunka-HiSCORE позволит исследовать особенности спектров гамма-источников, проверить известные сегодня указания на отклонения от Стандартной Модели и осуществить астрофизический поиск темной материи.

Нарушение Лоренц-инвариантности сегодня предсказывается в ряде моделей квантовой гравитации, в том числе в моделях с анизотропным скейлингом Хоравы-Лифшица [0]. Наиболее сильные ограничения на параметры возможного нарушения Лоренц-

инвариантности основаны на астрофизических наблюдениях (см. обзор [0] и ссылки в нем). Наблюдение переменных явлений, таких как гамма-всплески и вспышки блазаров ограничивает зависимость скорости света от энергии. В силу того, что большинство теорий квантовой гравитации предсказывают растущую с энергией (линейно или квадратично) поправку к скорости света, наблюдая явления при более высоких энергиях можно получить более сильные ограничения. С другой стороны, Лоренц-нарушение приводит к смещению порога реакции взаимодействия гамма-лучей с фоновым излучением и может быть ответственным за избыточную прозрачность межгалактической среды [0]. В область чувствительности эксперимента Tunka-HiSCORE также могут попасть продукты распада фотонов, рожденных с энергиями ЭэВ в реакции Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК). Распад фотона на три фотона не запрещен в определенной области параметров Лоренц-нарушения [0] и приводит к перекачке энергии всех ГЗК-фотонов в область энергий порядка ПэВ [0].

Такая модель электродинамики с нарушением Лоренц-инвариантности представлена в [0], в данной модели предельная скорость электронов может отличаться от скорости света (на величину, не превышающую  $10^{-15}$ , согласно ограничениям LEP), а в дисперсионное соотношение для фотонов и электронов добавлен член, пропорциональный четвертой степени трехмерного импульса. Модель сохраняет инвариантность относительно пространственных вращений, СРТ и калибровочную инвариантность. Простейшим следствием Лоренц-нарушения является то, что физические процессы протекают по-разному в разных системах отсчета. Таким образом, кинематику и сечения процессов следует исследовать в лабораторной системе, в которой и определена модель. Как следствие, в зависимости от параметров нарушения, может сместиться порог реакции рождения электрон-позитронных пар, фотон стать нестабильным, относительно распада на  $e^+e^-$  пары или на три фотона (через диаграмму с фермионной квадратной петлей). Распад фотона на  $e^+e^-$  в таких теориях - пороговая реакция, приводящая к исчезновению фотонов выше некоторой энергии. Реакция распада фотона на три фотона, напротив, не имеет порога, хотя ширина распада сильно растет с энергией. Такая реакция возможна, если энергия фотона как функция импульса растет быстрее линейного закона. В этом случае фазовый объем конечных состояний реакции не равен нулю, как это происходит в Стандартной Модели. На рисунке 4.1 показан возможный поток GZK-фотонов в Стандартной Модели для протонного первичного состава. Видно, что подобный поток лежит в пределе, достижимом по чувствительности для существующих и будущих масштабных экспериментов, регистрирующих космические лучи. Также показан поток вторичных фотонов в одной из моделей с нарушением Лоренц-инвариантности. В данной модели, рождение пар на межгалактическом фоне фотонами с энергией выше  $10^{16}$  эВ кинематически запрещено. Кроме того, предполагается, что расщепление фотона на три фотона эффективно протекает при энергии больше или порядка  $10^{18}$  эВ. В такой модели, поток вторичных фотонов может быть зарегистрирован в области энергий  $10^{16}$ - $10^{18}$  эВ, доступной только HiSCORE.

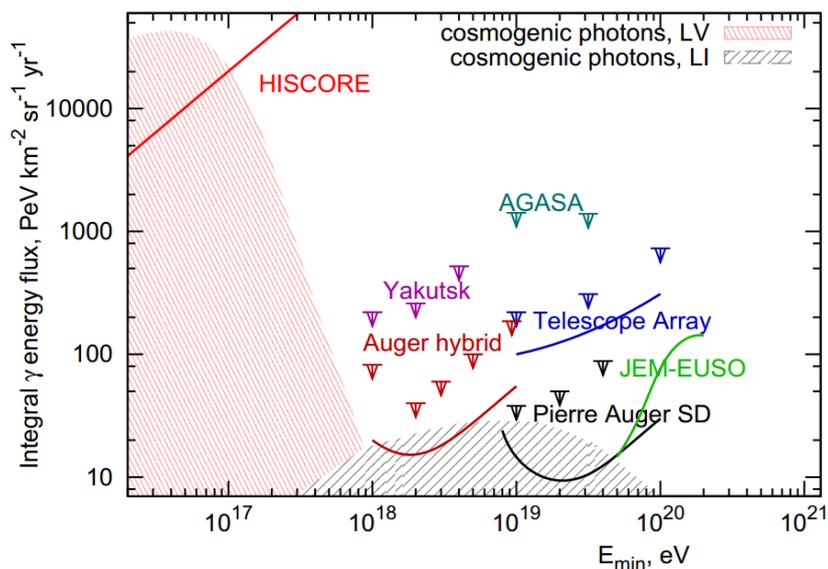


Рис. 4.1. Серая область - возможный поток GZK-фотонов в Стандартной Модели для протонного первичного состава. Красная область — поток космогенных фотонов в одной из моделей с Лоренц-нарушением. Показаны существующие ограничения на поток фотонов (Yakutsk, AGASA, Telescope Array, Pierre Auger) и проектная чувствительность к 2015 году (TA, Auger, JEM-EUSO). В приведенной модели с Лоренц-нарушением рождение электрон-позитронных пар фотоном на межгалактическом фоне кинематически запрещено при энергиях выше  $10^{16}$  эВ и присутствует процесс расщепления фотона на три фотона при энергии больше  $10^{18}$  эВ. Видно, что в случае Лоренц-нарушения существующие эксперименты не смогут зарегистрировать космогенные фотоны, лежащие в области чувствительности HiSCORE.

При других параметрах возможного нарушения Лоренц-инвариантности возможно существенное повышение прозрачности атмосферы для UHE фотонов за счёт снижения вероятности рождения пар в кулоновском поле ядра [85]. При обнаружении экспериментом HiSCORE атмосферных ливней, вызванных фотонами с энергией более 50 ТэВ будут получены новые ограничения на параметры Лоренц-нарушения; наоборот, отсутствие индуцированных гамма-квантами ливней может быть объяснено, наряду с другими гипотезами, нарушением Лоренц-инвариантности данного типа при независимом подтверждении механизма ускорения космических лучей в источниках до энергии ПэВ.

## 5. Главные направления исследования и ожидаемые результаты.

Сформулируем кратко главные направления исследований на обсерватории в которых мы ожидаем наиболее важные результаты

1. Поиск локальных галактических источников гамма-квантов с энергией выше 20-30 ТэВ (поиск Пэватронов).
2. Исследование потоков гамма-излучения в от известных источников в области энергии выше 20-30 ТэВ.
3. Поиск диффузного излучения от Галактического диска.
4. Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей в энергетическом диапазоне  $5 \cdot 10^{13}$  -  $10^{19}$  эВ на недостижимом ранее уровне статистической обеспеченности.
5. Исследование высокоэнергичной части спектра от наиболее ярких блазаров (поглощения гамма-квантов на межгалактическом фоне, поиск аксион-фотонных преходов)
6. Поиск диффузного излучения и излучения от локальных источников в диапазоне энергий  $10^{15}$  -  $10^{17}$  эВ ( поиск проявлений нарушений Лоренц-инвариантности)

## 6. Методика регистрации широких атмосферных ливней по черенковскому излучению на примере установки Тунка133

Установка Тунка-133 ( рис.6.1 А) начала работать в Тункинской долине осенью 2009. Внутренняя часть установки ( рис. 6.2 Б) состоит из 133 оптических детекторов, расположенных в в круге радиусом 500 м. Осень 2011 года в состав установки введены 42 удаленных оптических детектора и таким образом в настоящее время в состав установки входят 175 детекторов на площади 3 км<sup>2</sup>.

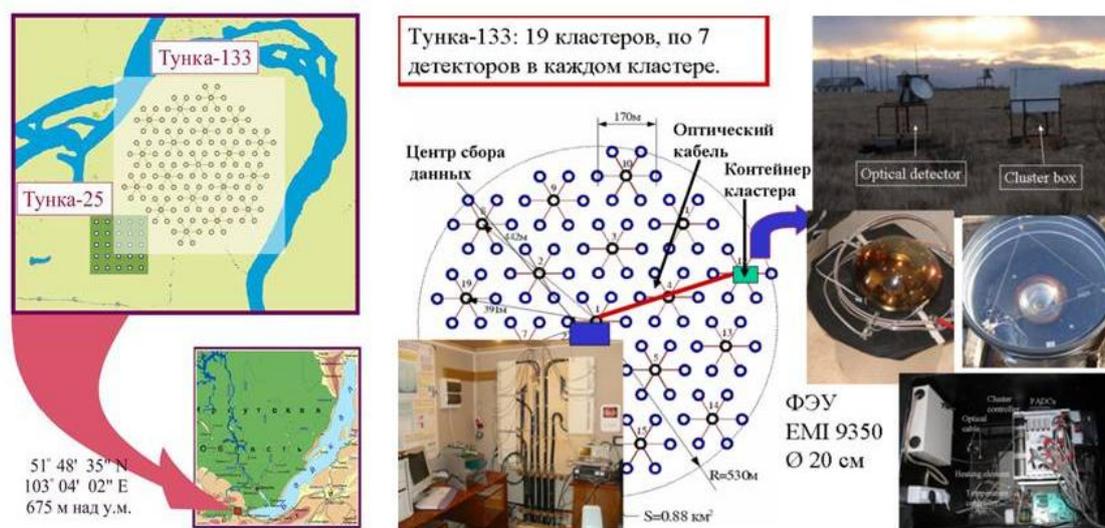


Рис.6.1 А: Расположение установки Тунка-133. Б: Структура установки.

Детекторы объединены в 25 кластеров, по 7 детекторов в каждом (19 внутренних кластеров и 6 удаленных кластеров). Шесть детекторов одного кластера расположены в вершинах правильного шестиугольника, один – в центре. Расстояние между детекторами 85 метров. Импульсы от всех детекторов передаются через коаксиальные кабели длиной ~95 м в контейнер с цифровой электроникой, расположенный возле центрального детектора. Контейнер с цифровой электроникой связан с центром сбора данных оптоволоконным кабелем.

Оптический детектор (рис.6.2) представляет собой металлический цилиндр диаметром 50 см, внутри которого установлен алюминиевый контейнер с фотоумножителем. Входное окно детектора направлено в зенит и покрыто подогреваемым оргстеклом. Детектор снабжен дистанционно-управляемой металлической крышкой для защиты окна от атмосферных осадков и солнечного света. Относительная угловая чувствительность детектора уменьшается плавно от 100% для вертикали до 80% при зенитном угле 40° и до 50% при 50°. Кроме ФЭУ, в оптическом детекторе помещены источник высоковольтного питания, предусилители, калибровочный светодиод и контроллер управления. Для обеспечения большого динамического диапазона с ФЭУ снимаются два сигнала с анода и промежуточного динода. Отношение амплитуд этих сигналов после предварительного усиления равно ~30.



Рис.6.2. Фотоумножители и оптический детектор

В состав цифровой электроники кластера входят четыре платы FADC (рис.6.3), оцифровывающие аналоговые сигналы с дискретностью 5 нс, контроллер кластера и плата управления оптическими детекторами.

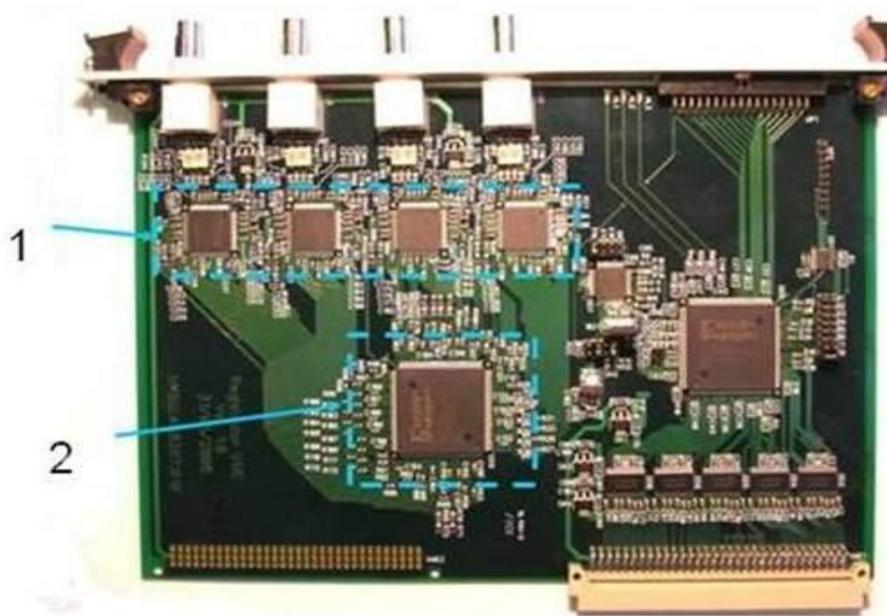


Рис.6.3. Плата FADC: 1 – AD9430, 12 бит, 200 МГц, 2 – FPGA XILINZ Spartan-3.

Контроллер кластера состоит из оптического приемопередатчика, модуля синхронизации, таймера и модуля выработки триггера. Оптический приемопередатчик ведет передачу на частоте 1000 МГц и формирует частоту 100 МГц для синхронизации таймера кластера. Точность синхронизации между таймерами отдельных кластеров 10 нс. Триггер кластера вырабатывается при появлении 3-х и более сигналов с амплитудой выше заданной во временном окне 0.5 мкс. Все перечисленные выше платы выполнены в стандарте VME. В контейнере автоматически поддерживается температура выше 15° с помощью электронагревателя, управляемого контроллером обогрева.

Обработка данных установки HiSCORE, в принципе, не отличается от обработки данных любой установки для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Дело в том, что электронно-фотонный ливень от первичного гамма-кванта не отличается в

первом приближении от ливня от любой заряженной частицы космических лучей. Так же формируется на поверхности земли пятно черенковского света, диаметром порядка 150-180 м с быстрым спадом света за границей этого пятна. По этой области быстрого спада света или, иначе говоря, по расстояниям, где имеется большой градиент потока света, можно восстановить положение центра этого пятна, которое считается следом оси ливня на плоскости наблюдения. По крутизне функции пространственного распределения света можно сделать заключение о расстоянии до максимума развития ливня в атмосфере, а по задержкам света в детекторах определить направление прихода первичной частицы. Отличия в методике будут скорее количественные, чем качественные.

Основой выделения гамма-квантов из фонового потока заряженных космических частиц является избыток частиц с определенного направления [0][0], причем, чем меньше будет выбранный телесный угол, тем лучше будет селекция. Заданный телесный угол определяется точностью измерения направления прихода частиц. Таким образом, для регистрации гамма-квантов требуется точность лучше, чем для регистрации заряженных частиц. Улучшение точности может быть достигнуто уменьшением минимальной длительности фронта импульса, уменьшением шага дискретизации и применением кривой априорной формы фронта ливня, близкой к реально наблюдаемой. Первые два момента будут реализованы аппаратно. Шаг дискретизации будет 1 нс вместо 5 нс, применяемых в Тунке-133. Коаксиальные кабели связи ФЭУ с АЦП будут около 5 м, в отличие от 95 м для установки Тунка-133.

Последний момент отлаживается при обработке данных расширенной установки Тунка-133 с внешними кластерами. При этом кривизна фронта такова, что ее неучет приведет к ошибке в определении направления около  $1^\circ$ .

Обработка данных включает точную калибровку амплитудных и временных измерений по зарегистрированным данным и восстановление для каждого ливня направления прихода (зенитный  $\theta$  и азимутальный  $\phi$  углы), положения оси ливня ( $X, Y$ ) на плоскости наблюдения и структурных параметров: крутизны функции амплитуда-расстояние (ФАР) и длительности импульсов на расстоянии 400 м от оси.

Восстановление направления первичной частицы на установке Тунка-133 начинается с калибровки собственных задержек импульса от каждого детектора. Основой калибровки является первоначальное выравнивание длин всех соединительных коаксиальных кабелей от каждого детектора до блока кластерной электроники. Средняя длина 95 м, но, к сожалению, точность выравнивания составила около 2 м ( $\sim 10$  нс). Кроме того, задержка импульса может меняться примерно на столько же при изменении высокого напряжения на ФЭУ.

Калибровка начинается с выравнивания собственных задержек в каждом кластере. Для этого по задержкам в 7 детекторах каждого кластера определяются зенитный  $\theta$  и азимутальный  $\phi$  углы оси ливня в предположении плоской формы фронта ливня. Для этого минимизируется функционал:

$$\chi^2 = \sum (t_e - t_i)^2, \text{ где}$$

$$t_i = (((x_i - x_1) \cdot \cos\phi + (y_i - y_1) \cdot \sin\phi) \cdot \sin\theta + (z_i - z_1) \cdot \cos\theta) / c, \text{ а}$$

$$t_e = t_i - t_1.$$

Средние остаточные отклонения ( $t_e - t_i$ ) считаются систематическими ошибками и добавляются к величинам собственных задержек. После этого проводится та же

процедура с измененными задержками. И так далее до получения нулевых остаточных отклонений (точнее менее 1 нс). В результате собственные задержки оказываются подобраны таким образом, что задержки импульсов каждого ливня ложатся на некоторую плоскость. Однако среднее направление плоскостей всех ливней может не совпадать с истинным направлением в зенит за счет случайного систематического поворота в пространстве плоскости собственных задержек. Оценки показывают, что возможная систематическая ошибка определения направления при пользовании этими калибровками для однокластерных событий может быть около  $3^\circ$ . Эта систематическая ошибка устраняется второй калибровочной процедурой, проводимой после первичного восстановления координат следа оси ливня на плоскости наблюдения.

Процедура состоит в определении направления прихода для ливней, в которых участвуют более 9 кластеров. При этом база для измерения составляет более 500 м. При такой базе междукластерные ошибки ( $\sim 10$  нс) и неточность измерения длин коаксиальных кабелей приводят к ошибке в определении направления прихода не более  $\arcsin(3/500)=0.3^\circ$ . Большая база и большое количество детекторов позволяют определить одновременно и кривизну фронта ливня.

Согласно расчетам по программе CORSIKA фронт ливня хорошо фитируется до расстояний 1000 м формулой с единственным параметром  $R_s$ :

$$D[\text{нс}] = ((200[\text{м}] + R)/R_s)^2 \cdot 1[\text{м}]/c[\text{м/нс}] \quad 1$$

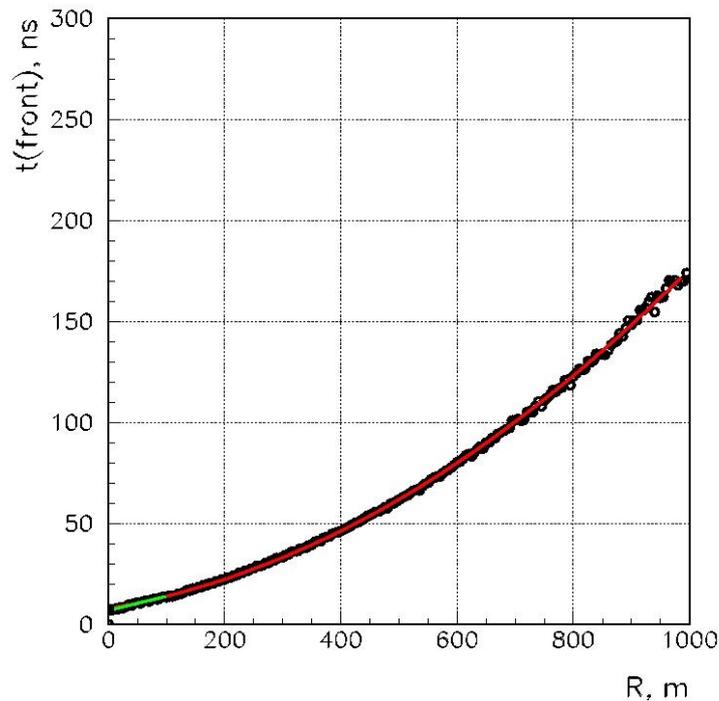


Рис. 6.4 Типичная форма фронта ливня, разыгранного по программе CORSIKA, аппроксимированная кривой вида 1.

При этом в минимизируемый функционал включается член, связанный с кривизной фронта:

$$\chi^2 = \sum (t_e - t_i)^2, \text{ где}$$

$$t_i = (((x_i - x_1) \cdot \cos\varphi + (y_i - y_1) \cdot \sin\varphi) \cdot \sin\theta + (z_i - z_1) \cdot \cos\theta +$$

$$((200+R_i)^2 - (200-R_i)^2)/R_s^2)/c, \text{ а}$$

$$t_e = t_i - t_1.$$

После восстановления параметров  $X, Y, \theta, \varphi, R_s$  для каждого «большого» ливня (9 и более кластеров) угол определяется для каждого кластера, участвующего в ливне. При этом фронт считается коническим с параметром конуса, определяемым как производная от квазисферической функции, описанной выше. Если парциальное направление не совпадает с направлением, определенным по всем детекторам, то производится синхронное изменение предполагаемых собственных задержек детекторов в кластере так, чтобы не менять настройку на плоский фронт, но повернуть базовую плоскость так, чтобы кластерное направление совпало с глобальным (с точностью лучше  $0.5^\circ$ ).

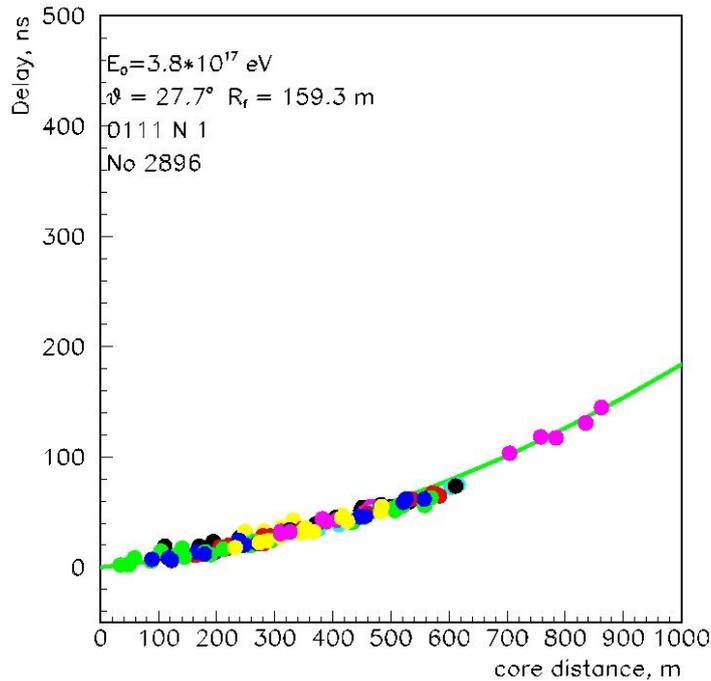


Рис.6.5 Фронт одного из экспериментальных ливней, восстановленный с использованием выражения 1. Разными цветами отмечены данные различных кластеров.

Процедура калибровки по «большим» ливням производится для каждой ночи, и полученные базовые задержки сводятся в калибровочные таблицы, применяемые для окончательной обработки.

Для восстановления следа оси ливня на плоскости наблюдения используется функция амплитуда-расстояние (ФАР). Ранее использовалась, так называемая, функция пространственного распределения (ФПР), т.е. фактически функция площадь импульса-расстояние. Пример расчетной ФАР приведен на рис. 6.6. Из рисунка видно, что новая функция ФАР круче предыдущей ФПР (в диапазоне расстояний 200 – 1000 м), что, в принципе, улучшает точность восстановления положения оси, особенно, в случае, когда ось находится далеко от сработавших детекторов, т.е. за пределами плотной части установки. Вид ФАР был получен по искусственным событиям, сгенерированным с помощью программы CORSIKA.

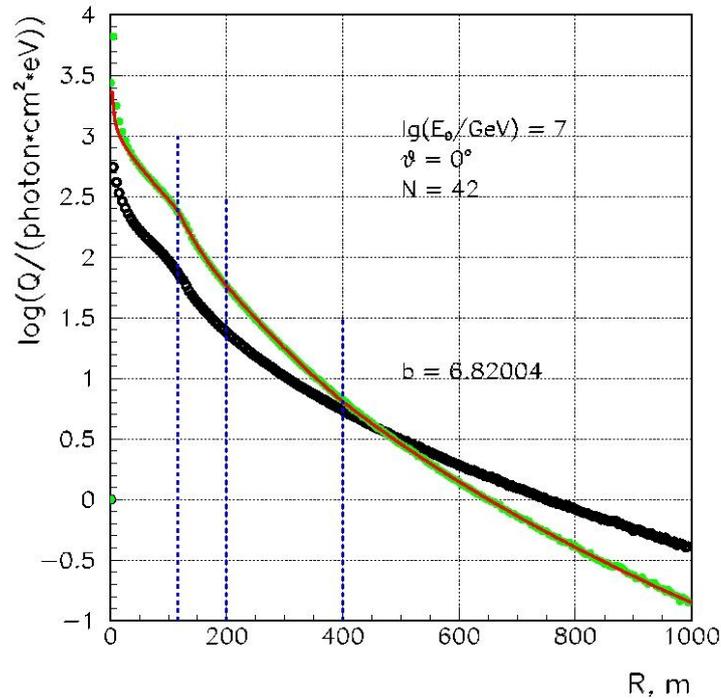


Рис.6.6 Функция амплитуда-расстояние (зеленые точки, красная фитирующая кривая) в сравнении с ФПР (черные точки).

Аналитически функция описывается четырьмя различными выражениями для четырех различных диапазонов по расстоянию от оси ШАЛ:  $0 - R_k$ ,  $R_k - 200$  м,  $200 - 400$  м,  $400 - 1000$  м.

$$\begin{aligned}
 A &= A_k \cdot \exp(((R_k - R_i)(1 + 3/(R_i + 2)))/(2.3 \cdot R_0))) & , 0 - R_k \\
 A &= A_{200} \cdot (R_i/200)^{-d} & , R_k - 200 \text{ м} \\
 A &= A_{400} \cdot ((R_i/400 + a)/(1 + a))^{-b} & , 200 - 400 \text{ м} \\
 A &= A_{400} \cdot ((R_i/400 + 1)/2)^{-b} & , 400 - 1000 \text{ м}
 \end{aligned}$$

Для параметров  $R_0$ ,  $R_k$ ,  $d$ ,  $a$  найдены аналитические зависимости от параметра  $b$ , поэтому функция имеет всего один независимый параметр формы –  $b$ . Естественно, требуется непрерывность функции во всех точках перехода с одного вида на другой.

Процедура восстановления состоит в минимизации функционала, представляющего собой сумму квадратов разностей экспериментально измеренных и вычисляемых по ФАР амплитуд. При этом три переменных  $X_{осн}$ ,  $Y_{осн}$ ,  $b$  являются независимыми, а базовая амплитуда  $A_{200}$  вычисляется как зависимая переменная на каждом шаге минимизации.

Энергия определяется по потоку черенковского света, причем для оценки полного потока подходит любое расстояние в пределах от 200 до 400 м от оси. Мы выбрали 200 м, чтобы определять этот параметр единым образом для любых энергий, начиная с достаточно низких. Описание ФПР несколько изменилось, по сравнению с использовавшимся ранее [0], что связано необходимостью описывать больший диапазон расстояний и распространить описание на большие зенитные углы ливней. ФПР описывается тремя различными выражениями для трех диапазонов по расстояниям от оси ШАЛ:  $0 - R_c$ ,  $R_c - 300$  м,  $300 - 1000$  м.

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_c \cdot \exp(((R_c - R_i)(1 + 3/(R_i + 3)))/(2.3 \cdot R_0))) & , 0 - R_c \\
 Q &= Q_c \cdot (R_i/R_c)^{-f} & , R_c - 300 \text{ м}
 \end{aligned}$$

$$Q = Q_{300} \cdot ((R_i/300+1)/2)^{-g}, \quad 300 - 1000 \text{ м}$$

В случае ФПР все параметры  $R_0$ ,  $R_c$ ,  $f$  являются функциями одного параметра  $g$ .

Мерой энергии считается величина  $Q_{200}$ . На рис. 4 показана зависимость отношения  $E_0/Q_{200}$  от крутизны ФПР (параметра  $g$ ).

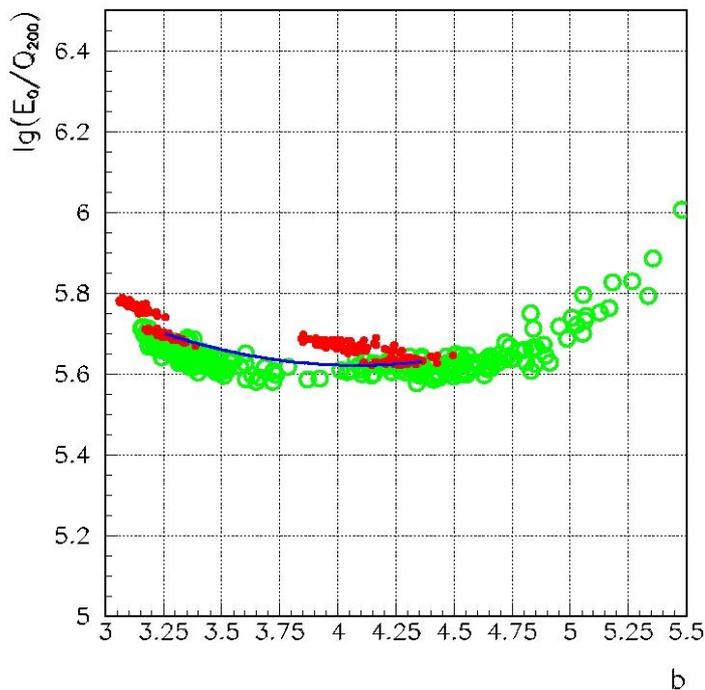


Рис. 6.7 Отношение  $E_0/Q_{200}$  как функция крутизны ФПР – расчет по программе CORSIKA.

Приведены точки для двух энергий  $10^{16}$  и  $10^{17}$  эВ, двух зенитных углов -  $0^\circ$  и  $45^\circ$  - и двух сортов первичных ядер – протонов и железа. Слабая зависимость от энергии убирается, если вместо  $Q$  использовать  $Q^{0.95}$ . Зависимость от крутизны ФПР может быть аппроксимирована параболой:

$$\lg(E_0/Q_{200}^{0.95}) = 5.717 + 0.115 \cdot (g-4)^2.$$

С учетом указанных поправок теоретическая погрешность восстановления энергии становится менее 0.04 в логарифмическом масштабе или менее 10%.

На рис. 6.8 приведен пример геометрии для одного из событий. Пример восстановления параметров этого события приведен на рис. 6.7.

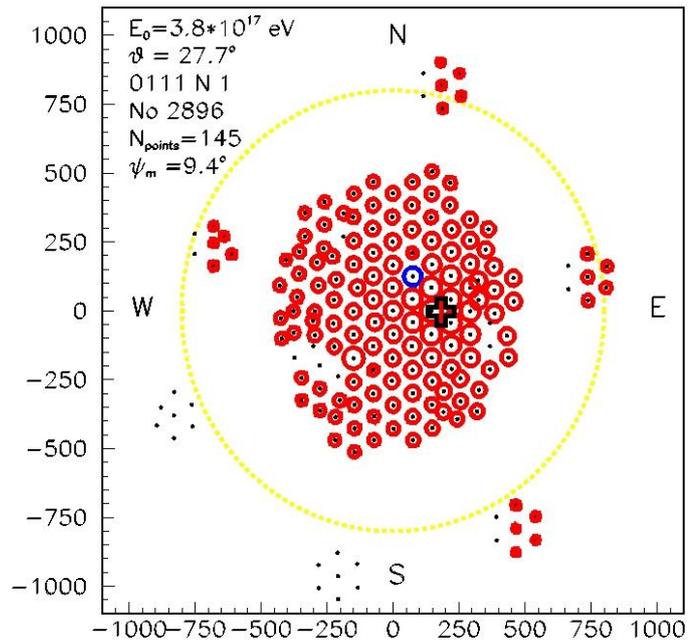


Рис. 6. 7 Пример геометрии одного из событий.

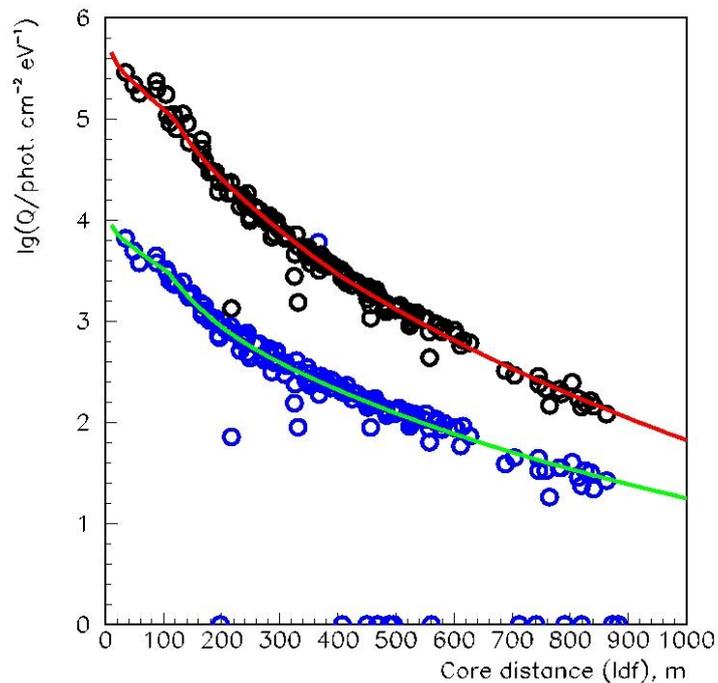


Рис. 6.9 Пример фитирования экспериментальных данных для одного из событий с помощью ФАР (черные точки) и полученная в результате ФПР (синие точки).

Особенностями ливней от гамма-квантов с энергией  $10^{13} - 10^{14}$  эВ будут более плоская форма ФАР и ФПР вблизи оси и существенно меньшие флуктуации этой формы и формы фронта ШАЛ. Причиной более плоской формы ФАР и ФПР будет большее расстояние от места наблюдения до максимума развития ШАЛ для указанных энергий. Пример подобных ФАР и ФПР из расчетов по программе CORSIKA приведен на рис 6.10.

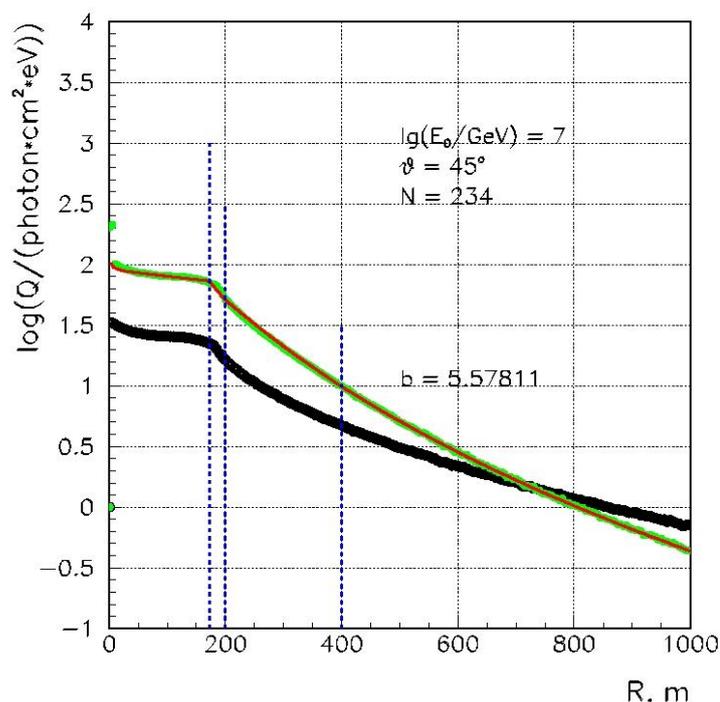


Рис. 6.10. Пример ФАР и ФПР для разыгранного ливня с далеким положением максимума.

Использование кривой формы фронта ливня (1) требует знания положения оси ШАЛ. Если все детекторы, участвующие в ливне, будут расположены в плоской центральной части ФПР, точность локации оси может быть очень плохой, и, соответственно, точность определения направления будет недостаточной. Такая ситуация будет на пороге, когда срабатывают всего 4 триггерных детектора. Чтобы обеспечить обработку таких событий, можно дополнить установку более чувствительными детекторами, которые будут давать информацию в этих ливнях на расстояниях более 200 м от оси.

Малые флуктуации ФПР для гамма-квантов позволят упростить восстановление параметров за счет использования фиксированных значений кривизны фронта и крутизны ФПР. Хорошей точности определения направления прихода ШАЛ можно достичь для 7 и более сработавших детекторов.

## 7. Обсерватория Tunka-HiSCORE

Обсерватория Tunka-HiSCORE ( рис.7.1 ) будет состоять из решетки оптических станций расположенных на расстоянии 150 м для внутренней части установки (площадь 1.5 км) и 200 м для внешней части установки, площадью 100 км<sup>2</sup>.. Восемьдесят станций внутренней части будут содержать 16 ФЭУ, а внешние 200 станций ( внутри площади 8.5 км<sup>2</sup> ) части по четыре ФЭУ. На остальной площади будут установлены станции с одним фотоумножителем. Полное число ФЭУ в установке около 4500. Внутренняя установка будет содержать 1280 ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см, в внешняя 800 ФЭУ.

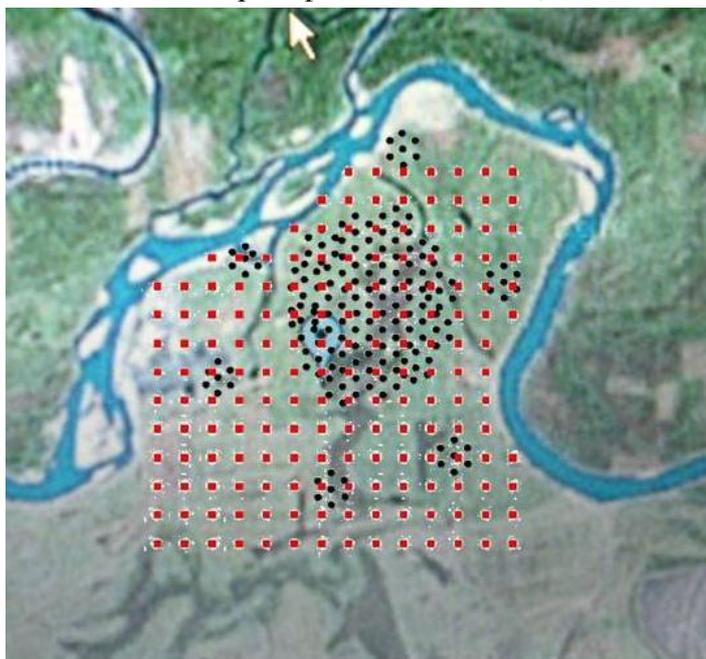


Рис.7.1 Расположение оптических станций ( красные квадраты) гамма-телескопа в Тункинской долине. Расстояние между станциями 150 м. Станции внешней части установки не показаны. Черными кружками – оптические детекторы установки Тунка-133

Каждая оптическая станция связана с центром сбора данных одномодовым оптическим кабелем для передачи данных и синхронизации и бронированным силовым кабелем для подачи питания. Цифровая электроника оптической станции будет располагаться в подогреваемых контейнерах, аналогичных использованным в установке Тунка-133. Длина оптического кабеля для внутренней части установки 30 км , для внешней части установки - 2000 км. Длины силовых кабелей примерно совпадают с длинами оптического кабеля.

## 7.1 Оптическая станция.

Оптическая станция состоит из определенного числа ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см установленных в светособирающие конуса ( конуса Винстона) для увеличения эффективной площади регистрации фотонов ( рис.7.1). Верхний диаметр конуса равен 40 см и, таким образом эффективная площадь ФЭУ увеличивается в 4 раза.

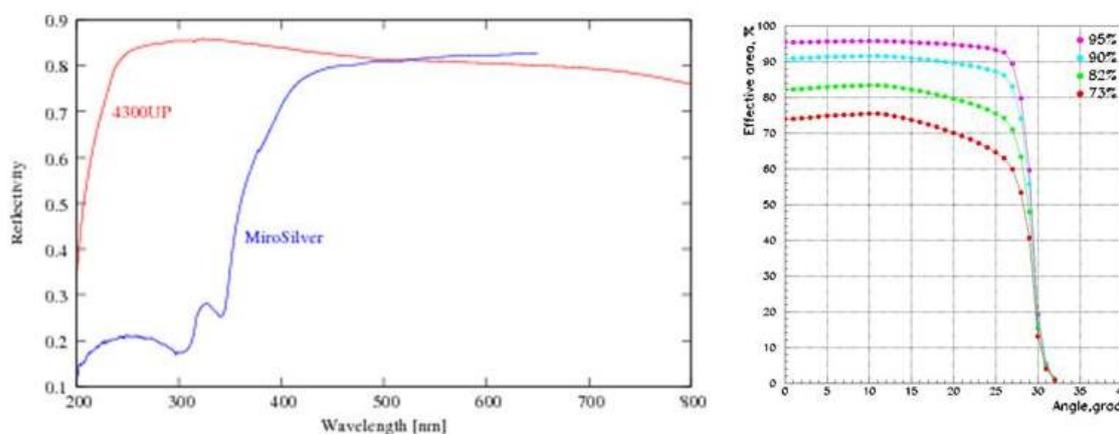


А

Б

Рис. 7.2 Светосборники ( конуса Винстона) (А) и фотоумножитель (Б).

Конуса будет изготавливаться из пластика Alapod-4300, с высоким коэффициентом отражения ( выше 80%) в широком диапазоне длин волн – 250 -500 нм (рис.7.3.а) . При таком отражении эффективная площадь конуса будет выше 90% от геометрической площади вплоть до зенитного угла  $30^\circ$  ( рис.7.3.б)



А

Б

Рис.7.3 А: Зависимость коэффициента отражения для материала конусов от длины волны  
Б: Зависимость эффективной площади от зенитного угла для различных значений коэффициента отражения.

Сигналы с ФЭУ одной станции суммируются аналоговым образом, это приведет к дополнительному понижению энергетического порога в  $n^{1/2}$  раз, где  $n$  – число ФЭУ в одной станции. В установке будут использованы ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см ( см. следующий параграф).

Структурная схема электроники оптической станции приведена на рис.7.4. Как и в установке Тунка-133 в оптической станции расположена только аналоговая электроника, а основная цифровая электроника помещена в отдельный обогреваемый контейнер. Делители и предусилители ( с анода и промежуточного динода) будут во многом аналогичны делителям и предусилителям установки Тунка-133, с заменой операционных усилителей на более быстродействующие. Будут использованы, разработанные для установки Тунка-133, источники высокого напряжения, во многом аналогичный, контроллер управления.

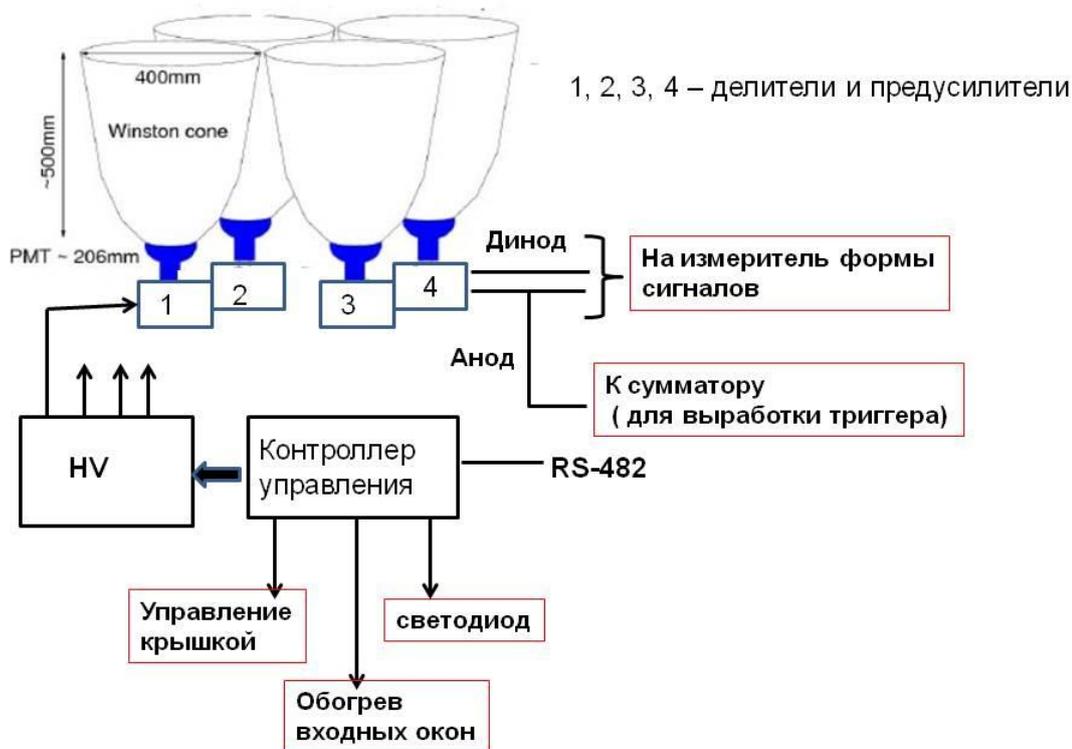


Рис 7.4. Структурная схема оптической станции.

Сигналы с анодов и динодов будут передаваться в контейнер с цифровой электроникой по коаксиальным кабелям RG-58, длиной не более 5 м, что не приведет к искажению сигнала. В оптической станции предполагается осуществлять обогрев только защитных входных окон, выполненных из оргстекла, толщиной 4 мм.

## 7.2. Фотоумножитель

В установке предполагается использовать фотоумножители 9352KB фирмы Electron Tube (рис.7.2.Б) или R5912 производства фирмы Hamamatsu. с полусферическими бищелочными ( $K_2CsSb$ ) фотокатодом диаметром  $\sim 20$  см. Фотоумножители разработаны для применения в черенковских и сцинтилляционных установках экспериментов в физике космических лучей. Цена при закупке большой партии может составить 1300 евро (с учетом затрат на растаможивание). Фирмы готовы производить до 1000 таких ФЭУ в год

Стеклооболочка фотоумножителей выполнена из боросиликатного стекла. Эти фотоумножители содержат высокоэффективные коробчатые первые диоды большой площади и последующие корытообразные диодные системы с линейной фокусировкой.

В фотоумножителе R5912 первый диод выполнен из напыленного материала CsSb с высоким коэффициентом вторичной эмиссии  $\sigma \geq 10$ . Остальные диоды – это эмиттеры из сплава CuBe. Площади поверхностей эмиттеров последних диодов увеличены для того, чтобы обеспечить устойчивость работы фотоумножителя в условиях светового фона ночного неба, а также для обеспечения высокой линейности отклика фотоумножителя. Полное число каскадов в диодной системе 10, что позволяет достичь коэффициента усиления  $G \sim 10^7$ . R5912 обладает прекрасными однофотоэлектронными характеристиками. Отношение пик/долина зарядового распределения однофотоэлектронных импульсов составляет не менее 2,5. Распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода (джиттер) имеет ширину на полувысоте -  $\sim 3$  нс. Все это позволяет успешно использовать фотоумножитель R5912, как в черенковских, так и сцинтилляционных детекторах.

В фотоумножителе ET9352KB число каскадов умножения в диодной системе ограничено до 6. Все диоды выполнены из сплава CuBe. Для надежной работы в условиях светового фона ночного неба под фотокатодом нанесены тонкие проводящие полосы из напыленного алюминия шириной  $\sim 1$  мм. Усиление фотоумножителя  $G \sim 10^4$  достигается при рабочем напряжении  $< 1400$  В. Малое число каскадов в диодной системе приводит и к хорошему временному отклику фотоумножителя – время нарастания анодного импульса не превышает 5 нс. При применении быстродействующих трансимпедансных усилителей возможно также достижение хороших однофотоэлектронных характеристик и с этим фотоумножителем. Фотоумножители R5912 и ET9352KB надежно работают при постоянных анодных токах вплоть до 100 мкА.

Чувствительность обоих типов фотоумножителей достигает максимума при  $\lambda = 360 \div 400$  нм, резко спадая практически до нуля при  $\lambda = 300$  нм, что обусловлено в первую очередь пропускиванием стеклооболочки фотоумножителей. Кривая зависимости квантовой эффективности фотокатода фотоумножителей R5912 от длины волны света  $\lambda$  представлена на рис.7.5. Спектр же черенковского излучения, как известно, изменяется с длиной волны излученного света по закону  $\lambda^{-2}$ . Таким образом, значительная часть излученного черенковского света остается незарегистрированной, что приводит, например, к увеличению энергетического порога черенковских детекторов ШАЛ. Следовательно, для эффективного уменьшения энергетического порога установки желательно увеличить чувствительность фотоумножителей к черенковскому свету.

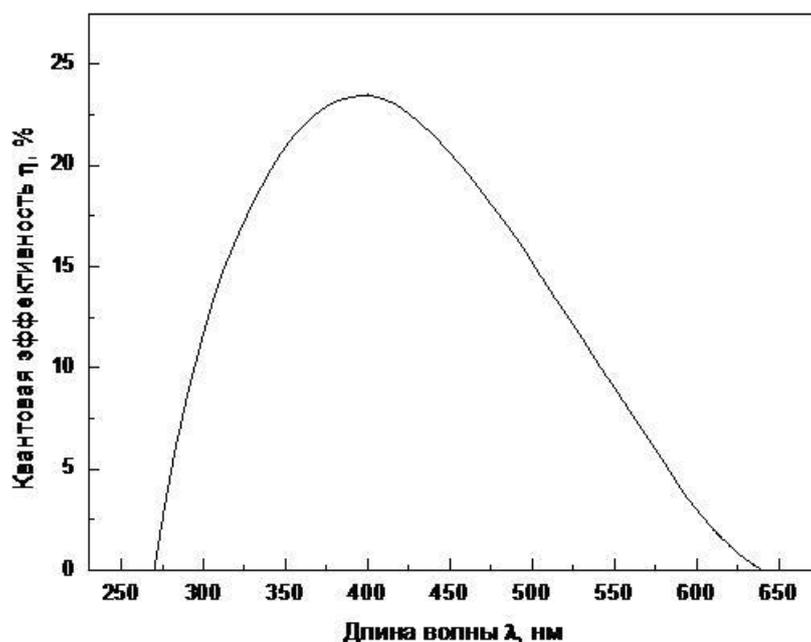


Рис. 7.5. Спектральная зависимость квантовой эффективности  $\eta$  фото катода фотоумножителя R5912.

Прекрасную возможность для решения данной задачи предоставляет использование плёночных сместителей спектра, описанных ранее в литературе [0 0 0 0]. Такие сместители спектра эффективно поглощают черенковский свет в диапазоне длин волн 200÷300 нм и переизлучают свет в область спектра, где чувствительность фотоумножителей оптических пунктов уже высока.

При подборе сцинтиллирующих добавок для плёночных сместителей спектров следует учитывать следующие факторы: высокая квантовая эффективность в диапазоне длин волн  $\lambda=200\div350$  нм; большой Стоксовский сдвиг; малая антистоксова область; максимум спектра поглощения света - в диапазоне длин волн  $\lambda=200\div330$  нм; максимум спектра излучения в области  $\lambda=360\div400$  нм; малое время высвечивания; хорошая растворимость в доступных органических растворителях (толуоле, дихлорметане и т.д.); хорошая адгезия получающейся пленки к стеклу фотоумножителя; устойчивость оптических и механических свойств пленки в воздухе. В настоящее время существует широкий выбор сцинтиллирующих добавок люминофоров [80 0], которые подходят для нашей задачи. На рис. 7.6 показаны спектры поглощения и излучения одного из перспективных люминофоров - 2-(4-Бифенилил)-5-(4-*t*-бутилфенил)-1,3,4-оксадиазол (Butyl PBD).

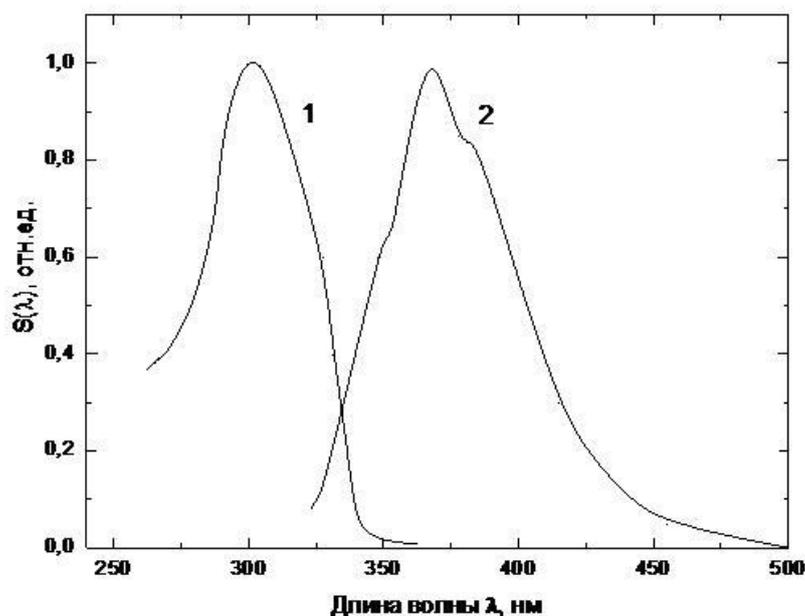


Рис. 7.6. Спектры поглощения (1) и излучения (2) сцинтиллирующей добавки Butyl PBD.

При изготовлении сместителей спектра в качестве связующей основы пленки можно использовать гранулированный сополимер метилакрилата и этилметакрилата - Paraloid B72 производства фирмы ROTH GmbH. Этот материал характеризуется хорошей прозрачностью в интересующем нас диапазоне длин волн 200÷300 нм и малым (~1 нс) временем высвечивания сцинтилляторов на его основе. Кривая спектрального пропускания пленки толщиной ~1 мм из этого материала представлена на рис.7.7 [0]. Для сравнения на этом же рисунке приведены кривые пропускания широко используемых для изготовления пластиковых сцинтилляторов полиметилметакрилата (PMMA) и полистирола. Сцинтилляторы на основе PMMA и полистирола имеют большие времена высвечивания по сравнению со сцинтилляторами на основе Paraloid B72 [0 0 80 0].

При изготовлении пленок сместителей спектра связующее вещество (Paraloid B72) необходимо растворить в дихлорметане ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) или в толуоле ( $\text{C}_7\text{H}_8$ ). В получившийся раствор добавляются соответствующие сцинтиллирующие добавки. Приготовленный таким образом раствор наносится тонким слоем на предварительно обезжиренную поверхность фотоумножителя. Ожидаемый эффект использования таких пленок – увеличение чувствительности фотоумножителей оптических пунктов к черенковскому свету в 1,5-2 раза.

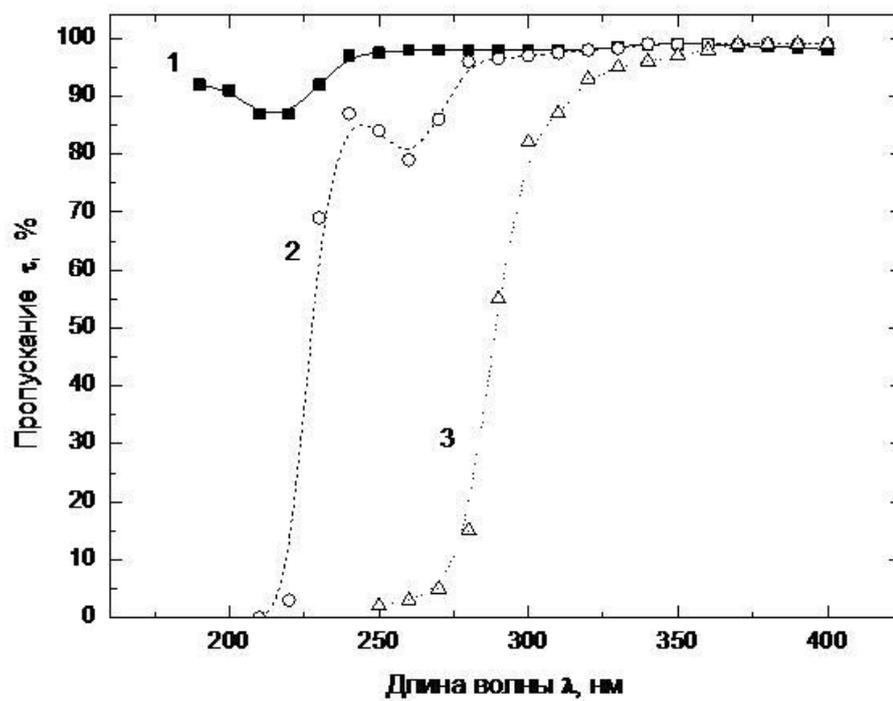


Рис. 7.7. Спектры пропускания  $\tau$  пленок из Paraloid B72 (1), полистирола (2) и полиметилметакрилата (3).



### 7.3. Система сбора данных и синхронизации

Цифровая электроника оптической станции будет помещена в обогреваемый контейнер, аналогичный контейнеру кластера установки Тунка-133. К контейнеру подведен оптоволоконный кабель, содержащий 8 одномодовых волокон, и силовой кабель для подачи питания.

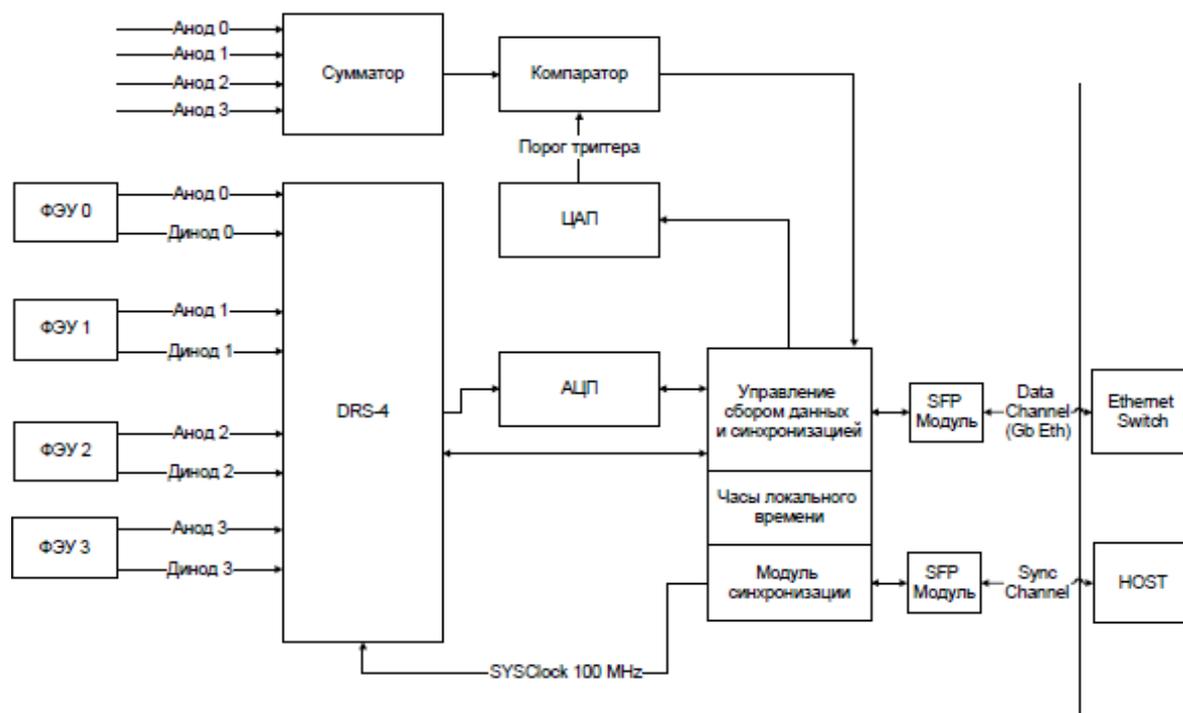


Рис. 7.8 Структурная схема электроники оптической станции

На рис.7.8 приведена функциональная схема электроники оптической станции. Функционально она состоит из 3-х частей: модуля синхронизации и передачи данных (1), модуля оцифровки импульсов (2) и модуля аналогового сумматора (3)

Модуль синхронизации и передачи данных может быть создан на коммерчески доступной плате для FPGA Spartan- 6 SP 605[ 0] ( рис.7.9 ). Плата содержит необходимое количество модулей обмена и разработка системы синхронизации и передачи данных сведется к созданию программы для FPGA.

Модуль оцифровки формы сигналов планируется разработать на основе микросхемы DRS4 [9]. DRS ( Domino Ring Sampler) 4 – это 9-входовой оцифровщик формы сигнала с шагом 0.2 нс в 1024 точках ( рис.7.10). Форма сигнала запоминается на емкостях и при поступлении триггерного сигнала. Считывание сигналов проводится с частотой 33 МГц и может проходить через один мультиплексор на один внешний АЦП или параллельно со всех каналов на 9 АЦП.

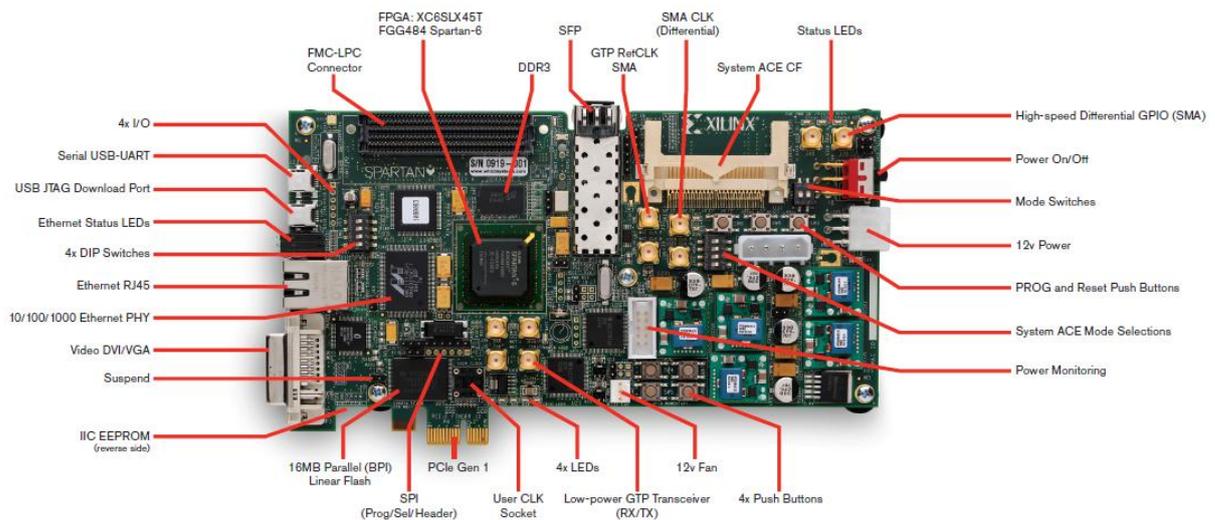


Рис. 7.9 Плата SP605 с установленным FPGA Spartan-6

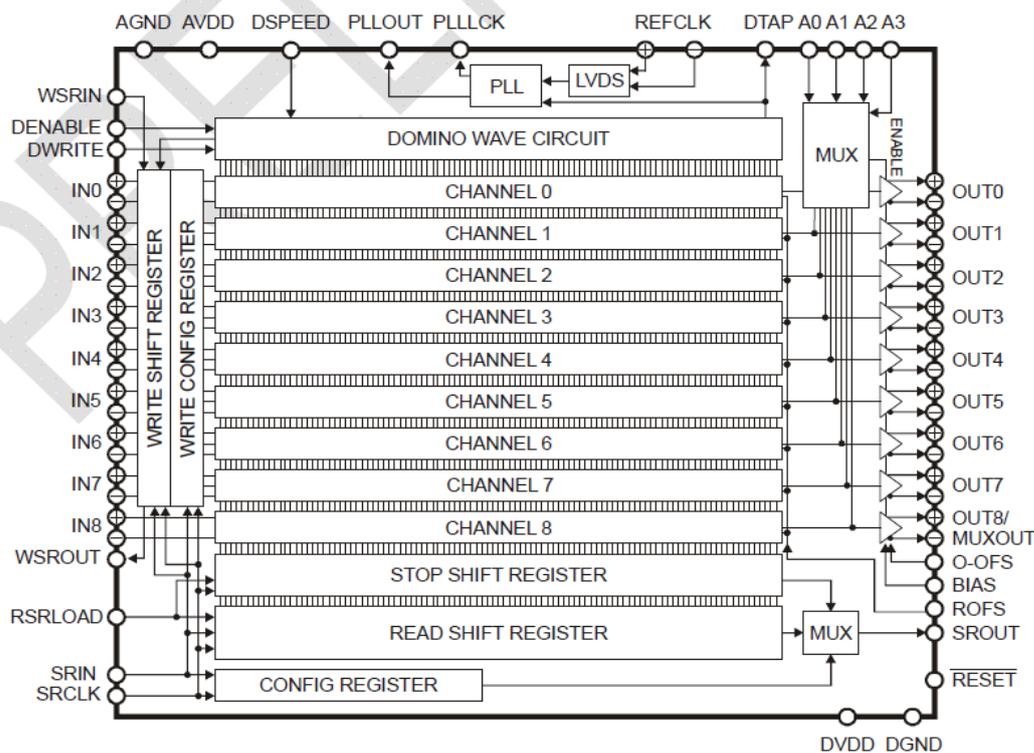


Рис.7.10 Функциональная схема микросхемы DRS4.

Система синхронизации ( рис. 7.11 ) работает следующим образом.

HOST имеет базовый генератор (100 МГц), который задает частоту работы всей системы. HOST также содержит таймер, который вырабатывает синхроимпульс. Базовая частота и синхроимпульс поступают в модулятор, где синхроимпульс подмешивается к частоте, после чего этот сигнал передается через SFP модуль по оптоволокну в DAQ.

В DAQ сигнал поступает в демодулятор, где, с одной стороны, восстанавливается базовая частота, а с другой, выделяется синхроимпульс. А смешанный сигнал передается обратно по оптоволокну в HOST.

В HOSTе принятый сигнал также поступает в демодулятор, где аналогичным образом восстанавливается частота и выделяется синхроимпульс. По задержке принятого синхроимпульса относительно переданного производится грубое вычисление сдвига фазы часов с точностью до периода базовой частоты (10 нс). Кроме этого, базовая и восстановленная частота подаются в фазовый детектор, основанный на модуле DRS-4. В нем обе этих частоты оцифровываются, и производится измерение разности их фаз внутри периода с точностью частоты оцифровки DRS-4 (до 200 пс). И, таким образом, после суммирования значений грубой и точной разности фаз, с учетом прохождения сигнала по оптоволокну в обе стороны, вычисляется абсолютная фаза часов локального времени в соответствующем DAQ.

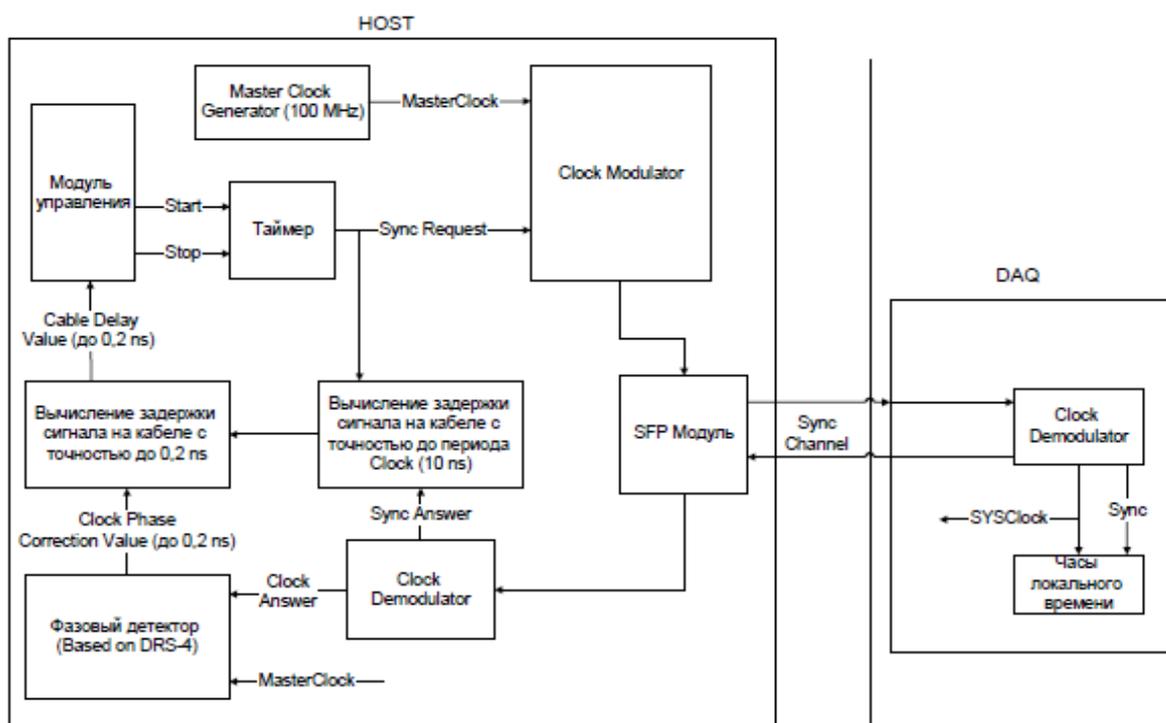


Рис. 7.11 Система синхронизации оптических станций

Альтернативной системой синхронизации оптических станций является активно развиваемая система White Rabbit [ 0]

#### 7.4. Узкоугольные черенковские детекторы

Для улучшения чувствительности установки в области низких энергий, при исследовании энергетического спектра от известных источников, в состав установки могут быть включены узкоугольные черенковские детекторы с площадью зеркала 2-3 м<sup>2</sup> и углом зрения  $\pm 7$  градусов. Наличие таких детекторов позволит сохранить высокое угловое разрешение установки вплоть до 20 ТэВ и, соответственно, существенно улучшит чувствительность установки при этих энергиях.

Для орбитального эксперимента ТУС в ОИЯИ совместно с консорциумом «Космическая регата» (г.Королев) на основе углепластика и алюминиевого хоникомба была разработана методика изготовления составного зеркала Френеля площадью  $\sim 2$  м<sup>2</sup> для работы в условиях открытого космоса, не теряющего своих оптических характеристик при вариации температуры  $\pm 80^\circ$  (Рис.7.12)

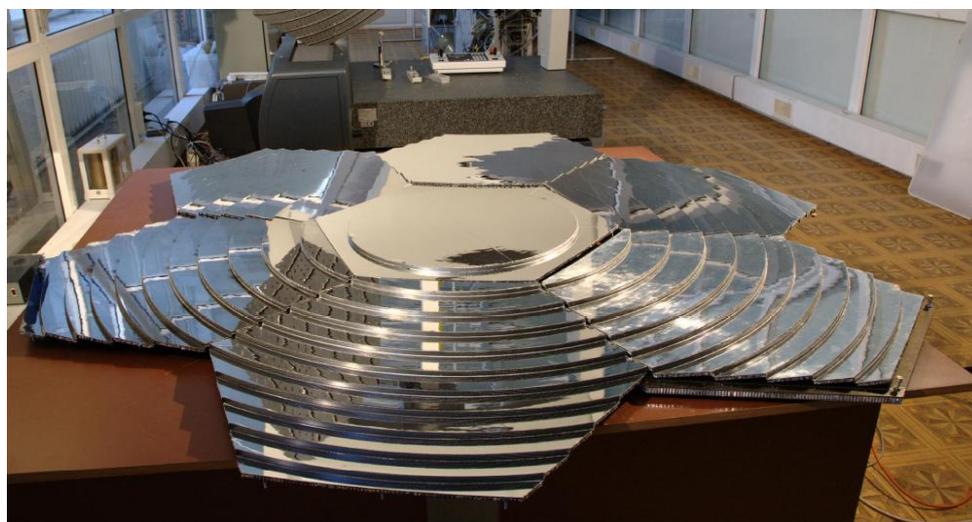


Рис.7.12. Составное зеркало Френеля для детектора ТУС

Для изготовления модулей составного зеркала концентратора (СЗК) потребуется, по-видимому, доработать эту методику: использовать сферическую пресс-форму нужного радиуса кривизны, если окажется невозможным обеспечить сферическую зеркала давлением воздуха.

Разработанная методика может быть частично использована также для изготовления составных зеркал для эксперимента Тунка-HiSCORE, хотя в этом случае условия эксплуатации менее суровы и составные сферические зеркала из более дешевых материалов будут приемлемы.

Несколько лет тому назад в ОИЯИ для черенковского детектора эксперимента ГИПЕРОН в ИФВЭ была разработана методика и были изготовлены сферические зеркала диаметром  $\sim 50$  см на основе пенополиуретана (Рис.7.13). В качестве отражающего слоя использовался майлар толщиной 30-40 микрон, на который в вакуумной камере напылялся отражающий слой чистого алюминия толщиной менее одного микрона. Затем майлар закреплялся на кольцевой оправке нужного размера и давлением воздуха ему

придавалась сферическая форма нужного радиуса кривизны. В таком состоянии на тыльную сторону майлара наносились 2 слоя пластичной подложки на основе эпоксидной смолы и тканевого материала (стекло- или угле-ткань). После неполной полимеризации смолы наносился слой 3-х компонентного пенополиуретана. Окончательные габариты модуля зеркала вырезались из полученной описанным образом заготовки после окончательной полимеризации смолы и пенополиуретана.



Рис.7.3. Фрагмент сферического зеркала на основе пенополиуретана для детектора ГИРЕРОН в ИФВЭ

Сферическое зеркало-концентратор диаметром 2-3 метра состоит из нескольких одинаковых модулей метрового размера, закрепленных на несущем основании. Каждый модуль имеет регулировочные винты для юстировки в общий фокус всего зеркала. Основание вместе с закрепленными на нем модулями зеркала и фотодетектором находится на подвижной опоре, позволяющей поворачивать всю конструкцию со скоростью  $\sim 4$  град/мин вокруг горизонтальной оси (изменение зенитного угла в пределах  $\sim \pm 70^\circ$ ) и вертикальной оси (изменение азимутального угла в пределах  $\pm 180^\circ$ ). Возможен вариант, когда зеркало с фотодетектором поднимаются вверх из помещения вдоль вертикальной оси с целью увеличения углов обзора.

Управление движениями зеркала, включения и выключения аппаратуры должны быть автоматизированы и выполняться дистанционно по командам из контрольной комнаты эксперимента.

Электронный блок фотодетектора (ЭБФ) – одно или матрица ФЭУ (или SiPM) вместе с электроникой – находится в фокусе зеркала СЗК и закрепляются на том же основании, что и зеркало, и поворачиваются вместе с ним. На Рис. 7.14 (А,Б) показаны варианты поворотной платформы для СЗК Френеля и сферического зеркала соответственно. Параметры поворотной платформы:

1. Диапазон поворотов вокруг горизонтальной оси зеркала (зенитный угол)  $50 \pm 20^\circ$ ,
2. Диапазон поворотов вокруг вертикальной оси (азимутальный угол)  $0 \pm 20^\circ$ .
3. Точность установки углов  $1^\circ$ .
4. Система приводов – ручная и электрическая-дистанционная (от компьютера) с помощью шаговых двигателей.
5. Скорости вращения 1-4 градуса/мин.
6. ЭБФ крепится несущими фермами на расстоянии  $1500 \pm 1$  мм от СЗК на основании,

- к которому крепится СЗК, но связанное с ним.
7. Условия эксплуатации – температура минус  $30\pm 20^{\circ}$

Общий вес СЗК, ЭБФ и несущих ферм ~150 кг. Предполагается, что конструкция будет находиться в неотапливаемом помещении с раздвигающейся крышей и обдуваться вентилятором для устранения инея на зеркале.

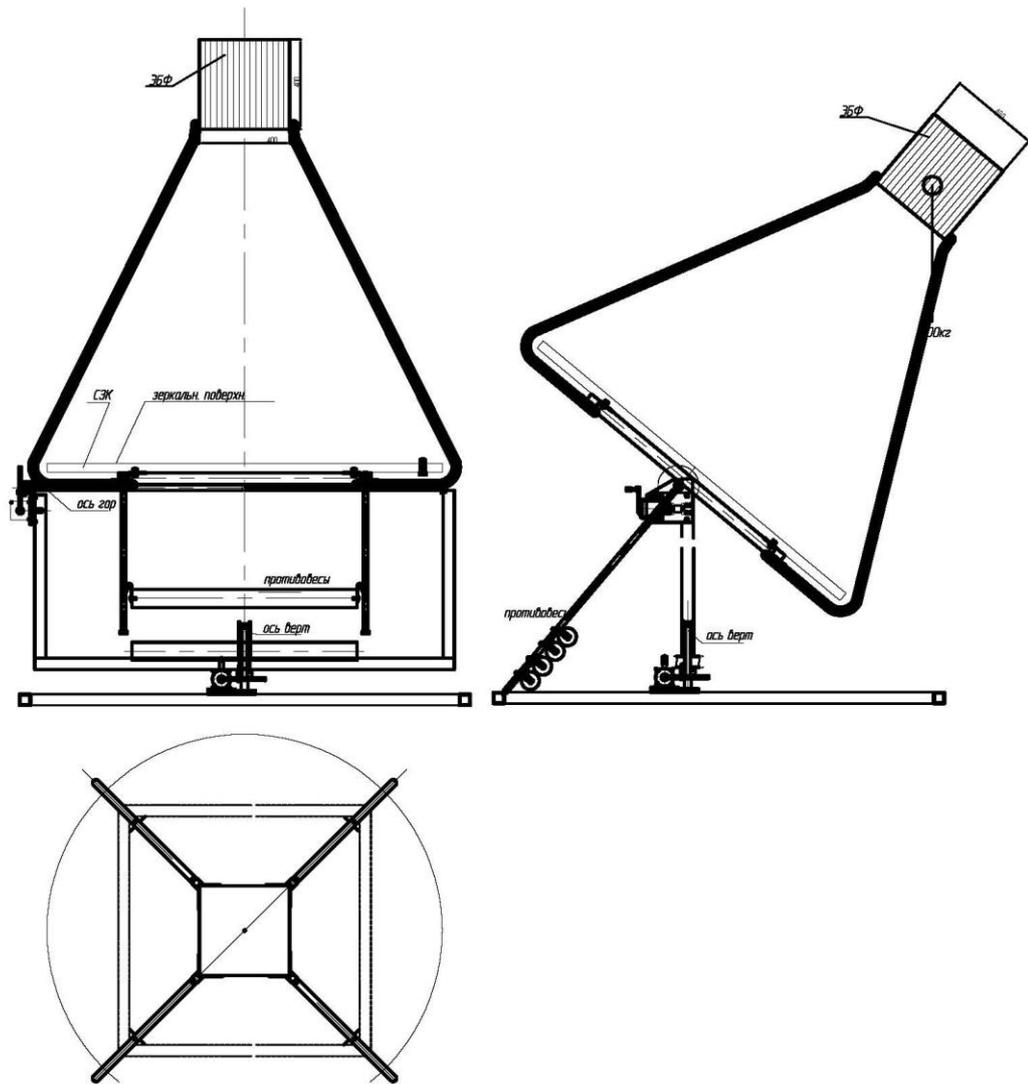


Рис.7.14 А. Поворотная платформа СЗК Френеля.

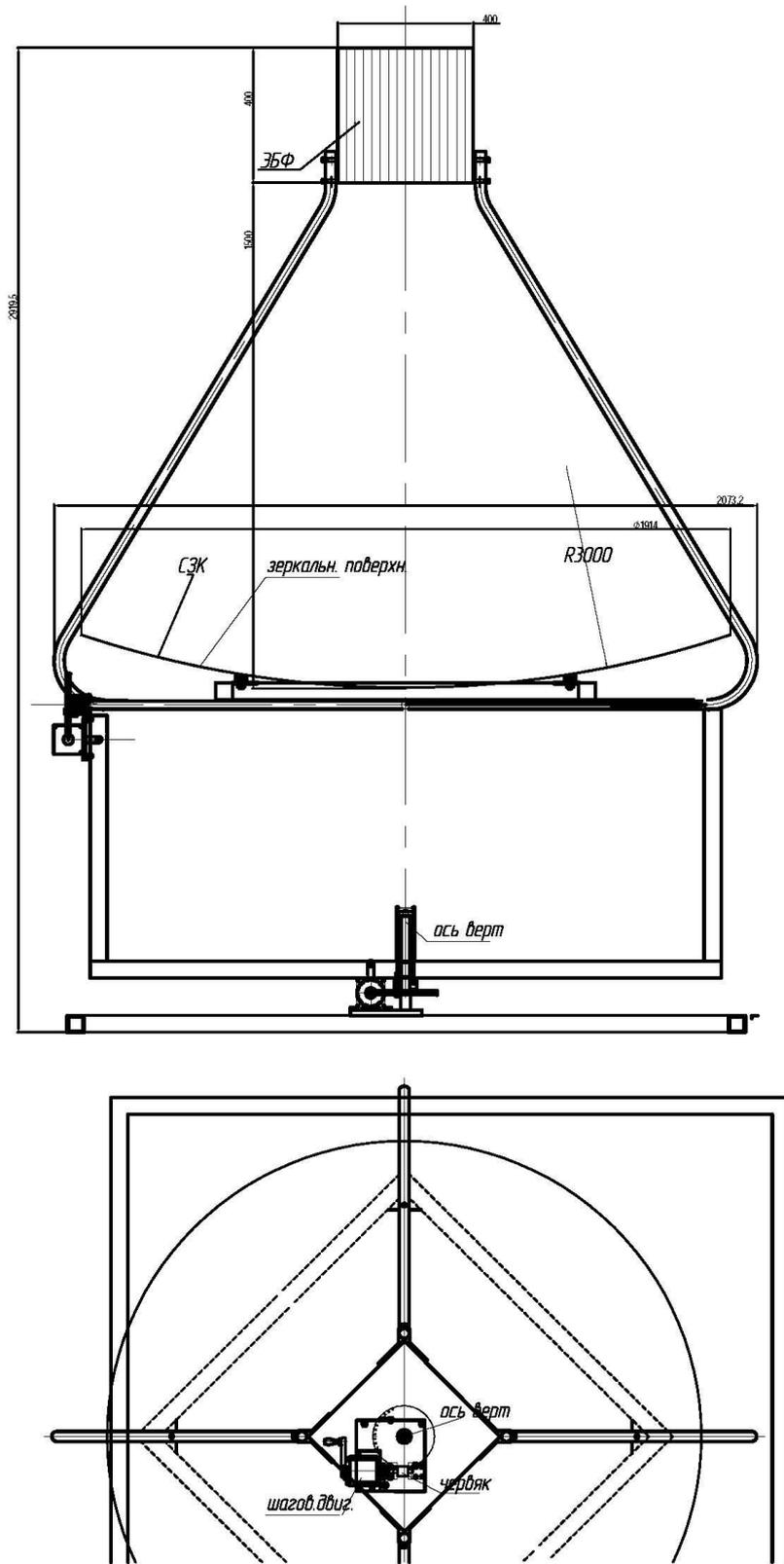


Рис.7.14 Б. Поворотная платформа сферического СЗК.

Помещение для детектора должно быть оборудовано дистанционно открывающейся частью наклонной крыши. По-видимому, будет удобно использовать для

этого имеющиеся в продаже сдвигающиеся гаражные ворота – типа сэндвич-панели размером от 3.5x2.0 до 4.5x3.0 кв. м и стоимостью от 42 до 60 тыс.р.

С учетом того, что детектор будет работать зимними холодными ночами должен быть предусмотрен обдув или обогрев отражающей поверхности зеркала против конденсирования на ней атмосферной влаги.

На основе разработанной в ОИЯИ методики изготовления фокусирующих зеркал большого размера для орбитального детектора ТУС и ускорительного эксперимента ГИПЕРОН предложена концепция изготовления одного из типов детектора черенковского излучения ШАЛ в проекте Тунка-HiSCORE, которая может быть реализована в ОИЯИ в разумные сроки. Ожидаемая стоимость ~500 тыс.р./зеркало.

## 7.5. Сцинтилляционные детекторы заряженных частиц

### 1. Мюоны от гамма- и протонных ШАЛ

В рамках проекта создания широкоугольного гамма-телескопа Тунка-HiSCORE с целью улучшения возможностей режекции фоновых ШАЛ от протонов и ядер предлагается использовать мюонные детекторы.

Чтобы сформулировать основные требования, предъявляемые к мюонным детекторам, были проведены предварительные расчеты с помощью программы CORSIKA (версия 6.990) с моделями адронных взаимодействий FLUKA 2011.2 – для энергий менее 80 ГэВ, SIBYLL 2.1 – для более высоких энергий и моделью электромагнитных взаимодействий EGS4. Использовалась стандартная U.S. атмосфера, магнитное поле Земли не учитывалось, пороговые энергии вторичных частиц составляли: для адронов и мюонов – 100 МэВ, для электронов – 2 МэВ, для гамма-квантов – 1 МэВ, уровень наблюдения – 150 м над уровнем моря. Моделировались ШАЛ от первичных протонов и гамма-квантов космических лучей с фиксированными энергиями  $E_0 = 10^{13}$ ,  $3 \times 10^{13}$ ,  $10^{14}$  эВ, зенитные углы составляли  $\theta = 0$ , 20 и  $40^\circ$ . Статистика моделирования составила 200 ливней для каждого набора параметров.

На рис.7.15 приведены распределения по числу мюонов ливней от первичных протонов и гамма-квантов с энергиями  $E_0 = 3 \times 10^{13}$  (зенитные углы  $\theta = 0$  и  $40^\circ$ ), из которых видно, что ШАЛ от протонов и гамма-квантов уверенно разделяются. Число мюонов при этой энергии составляет в среднем сотни частиц, поэтому для организации многократных совпадений площадь мюонного детектора должна составлять по меньшей мере проценты от площади всей установки.

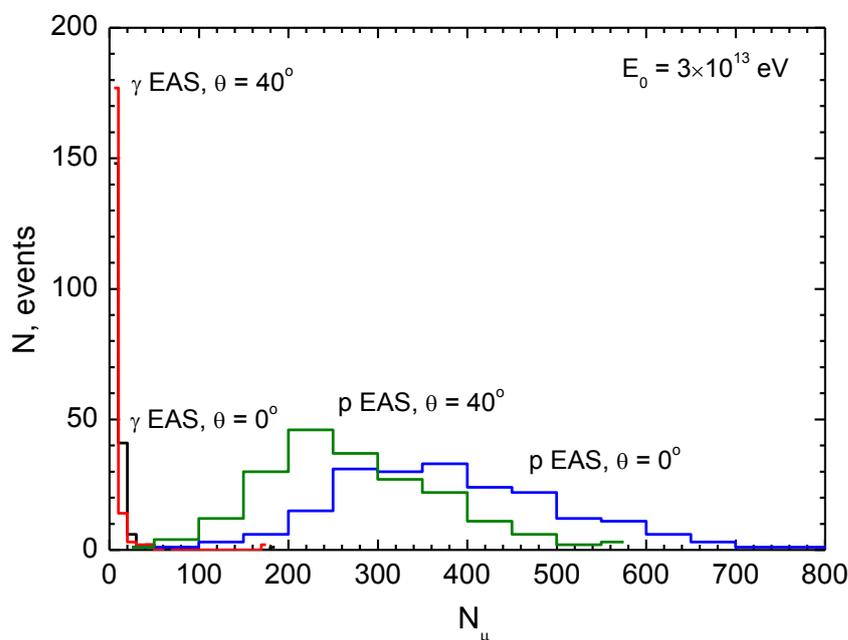


Рис.7.15. Распределения ШАЛ от протонов и гамма-квантов по числу мюонов.

Средние ФПР мюонов и электронов в ливнях, инициированных первичными протонами и гамма-квантами, представлены на рис.7.16. Видно, что плотность мюонов значительно медленнее меняется с расстоянием от оси ШАЛ по сравнению с плотностью электронов. Рис.7.17 иллюстрирует вклад различных расстояний до оси ШАЛ от первичных протонов и гамма-квантов в полное число мюонов в ливне. Наиболее существенный вклад в отклик детектора дают расстояния порядка сотен метров, что и

определяет (по порядку величины) площадь установки и оптимальный шаг расположения мюонных детекторов.

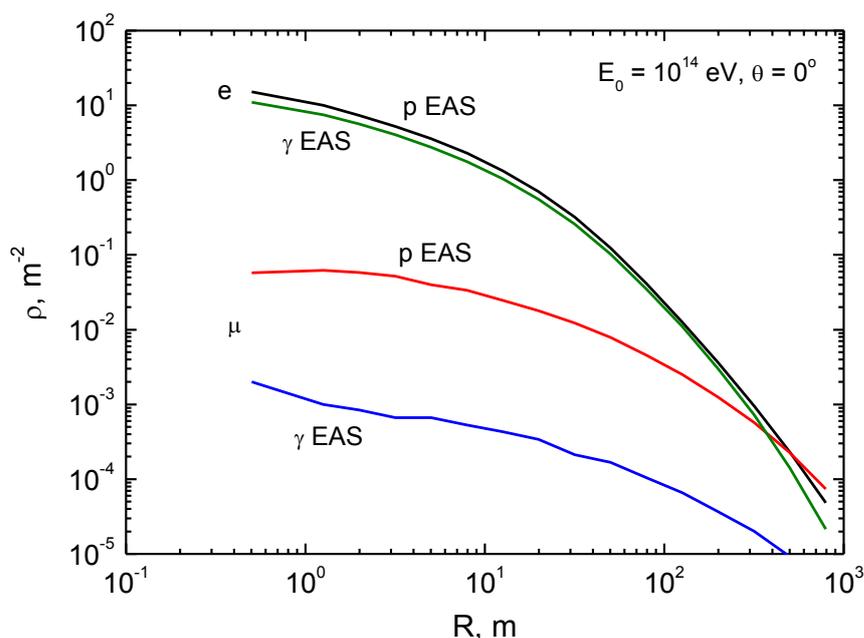


Рис.7.16. ФПР электронов и мюонов в составе ШАЛ от первичных протонов и гамма-квантов.

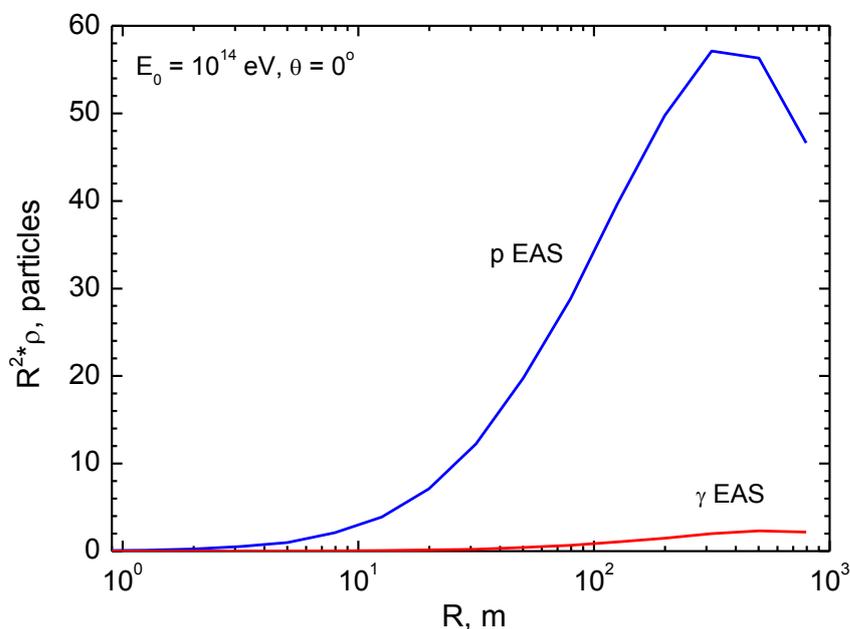


Рис.7.17. Вклад различных расстояний до оси ШАЛ от протонов и гамма-квантов в полное число мюонов в ливне.

На рис.7.18 показаны зависимости среднего числа электронов (для трех порогов регистрации  $E_{th} = 5, 20$  и  $100$  МэВ) и мюонов ( $E_{th} = 100$  МэВ) от энергии первичных протонов и гамма-квантов. Из рисунков следует, что число электронов в составе ШАЛ сопоставимо или больше числа мюонов, причем с ростом энергии первичной частицы

число электронов растет быстрее, чем число мюонов. Таким образом, встает вопрос об экранировке мюонных детекторов.

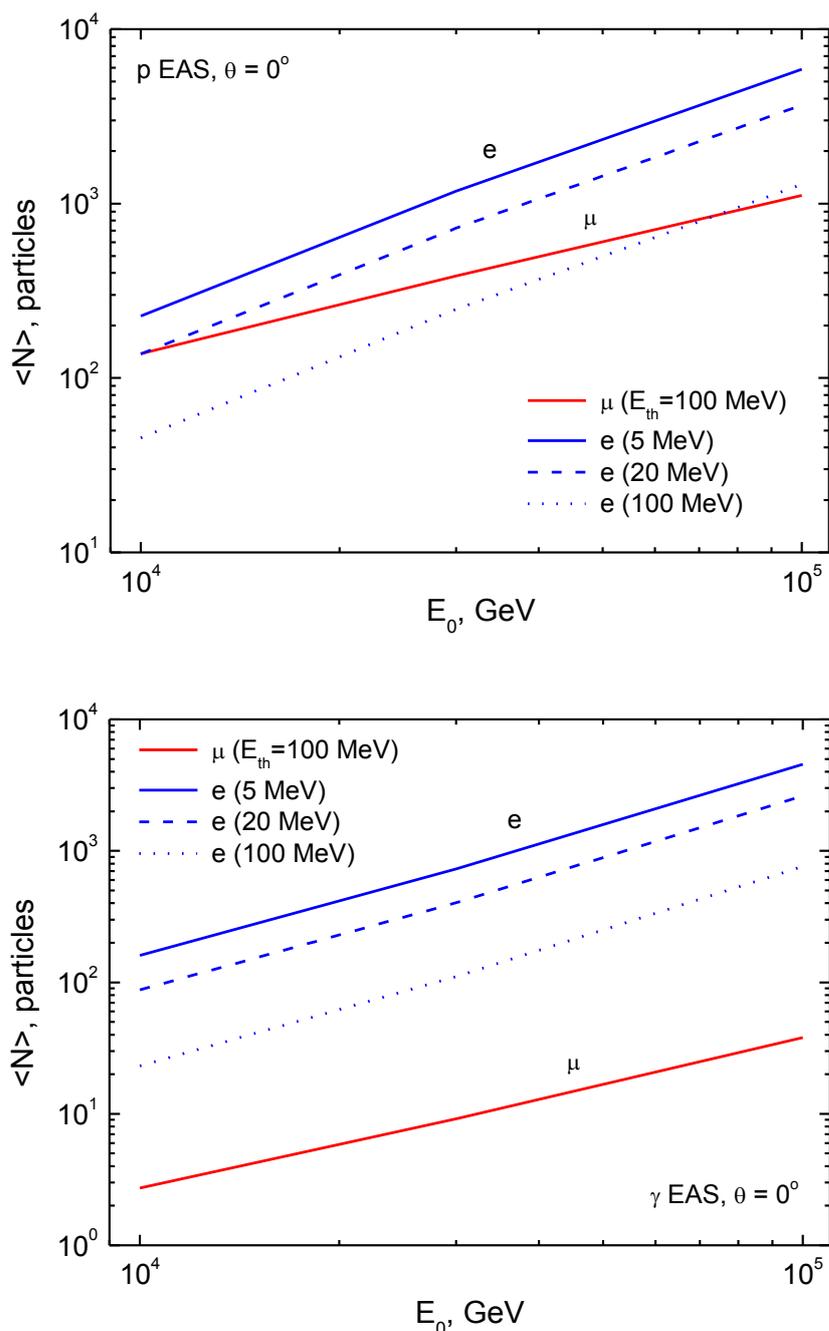


Рис.7.18. Зависимость среднего числа электронов (для трех порогов по их энергии) и мюонов от энергии первичной частицы.

Оценка толщины грунта ( $\text{SiO}_2$ , плотность –  $1.5 \text{ г/см}^3$ , рад. ед. –  $27 \text{ г/см}^2$ ,  $Z/A - 0.5$ ) необходимой для экранировки мюонных детекторов, проводилась с помощью пакета программ Geant4 (версия 4.9.5.p01). На рис.7.19 приведена зависимость числа частиц (мюонов, гамма-квантов, электронов) в составе ШАЛ от первичного протона с энергией  $E_0 = 10^{13} \text{ эВ}$ , дающих энерговыделение более 2 или 5 МэВ в пластическом сцинтилляторе толщиной 3 см, от толщины слоя грунта. Оказалось, что наиболее значительный вклад в отклик детектора дают каскады, образованные в грунте вторичными гамма-квантами ШАЛ, что, по-видимому, обусловлено высокоэнергичным “хвостом” их энергетического спектра. Чтобы подавить фон от таких гамма-квантов на порядок по сравнению с

сигналом от мюонов, необходимо экранировать мюонные детекторы слоем грунта толщиной 5-10 рад. ед. (1-2 м насыпного грунта).

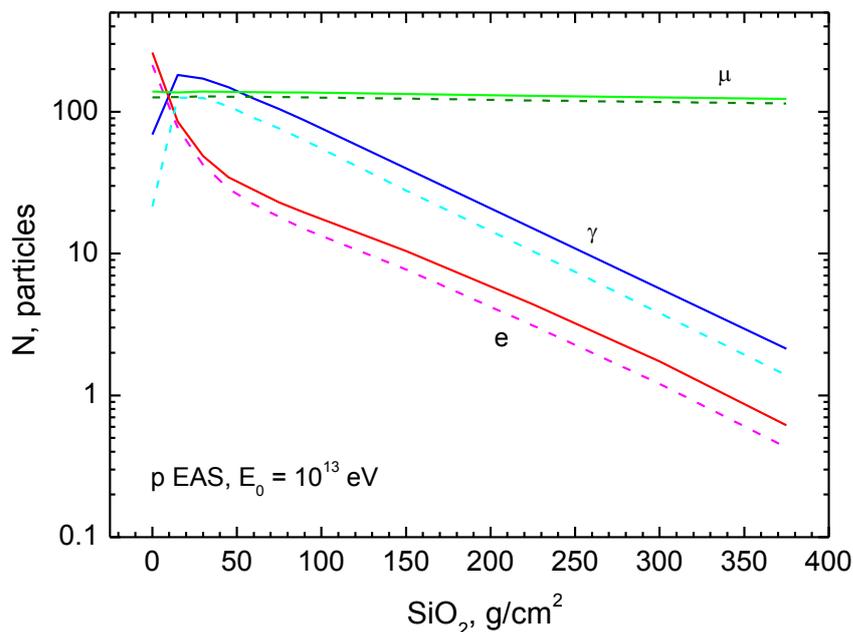


Рис.7.19. Зависимость числа мюонов, гамма-квантов, электронов в составе ШАЛ, дающих энерговыделение  $\geq 2$  и  $\geq 5$  МэВ (сплошные и штриховые линии, соответственно) в пластическом сцинтилляторе толщиной 3 см, от глубины расположения сцинтиллятора в грунте.

Необходимо отметить, что расчеты носят предварительный характер. В дальнейшем возможна оптимизация методов режекции ливней от протонов и ядер, например, с использованием дополнительной информации о пространственных распределениях вторичных частиц в составе ШАЛ.

## 1. Детектор мюонов ШАЛ.

Из полученных модельных оценок следует, что мюонный детектор должен занимать не менее 1% от общей площади детектора ШАЛ. Если площадь гамма-телескопа Тунка-HiSCORE будет иметь  $1 \text{ км}^2$ , то суммарная площадь мюонного детектора должна составлять около  $10^4 \text{ м}^2$ . Мюонный детектор предлагается в виде регулярной решетки 1024 мюонных станций на площади квадрата  $1 \text{ км}^2$ , расположенных с шагом 33 м ( $32 \times 32$  станций). Каждая станция должна иметь площадь  $10 \text{ м}^2$ .

### Мюонная станция.

Для создания мюонной станции должны использоваться дешевые детекторы частиц большой площади. В качестве одного из вариантов могут использоваться базовые модули Сцинтилляционного мюонного годоскопа, разработанного в НОЦ НЕВОД (N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, D.V. Chernov, A.N. Dmitrieva, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, A.I. Teregulov, I.I. Yashin. *Large area scintillation muon hodoscope for monitoring of atmospheric and heliospheric processes. Astrophys. Space Sci. Trans.*, 7, 435-438, 2011.). СцМГ состоит из нескольких координатных плоскостей (КП), в которых определяются X–Y координаты точек

пересечения трека мюона с соответствующей плоскостью. Каждая КП площадью  $\sim 11 \text{ м}^2$  формируется из двух слоев с взаимно ортогональным расположением детектирующих элементов. Один слой включает два базовых модуля (БМ), расположенных в одной плоскости и состоящих из определенного количества стрипов, конструктивно и функционально объединенных в одном корпусе, обеспечивающем возможность транспортировки и быстрого монтажа.

В качестве детектирующих элементов базового модуля используются изготовленные методом экструзии сцинтилляционные полоски-стрипы с размерами  $10.6 \times 26.3 \times 3460 \text{ мм}^3$ . Для улучшения светосбора поверхность стрипов покрыта тонким ( $\sim 150 \text{ мкм}$ ) слоем полистирола с растворенным в нем  $\text{TiO}_2$ , обеспечивающим высокий коэффициент диффузного отражения. Вдоль одной из широких граней стрипа прорезана продольная канавка, в которую специальным клеем клеивается спектросмещающее оптическое волокно (Kuragau Y11-175) диаметром 1 мм с длиной ослабления света  $\sim 5 \text{ м}$  для длин волн  $\sim 500 \text{ нм}$ . При прохождении заряженной релятивистской частицы через стрип образуется сцинтилляционная вспышка, фотоны которой частично попадают в спектросмещающее оптоволокно и, переизлучаясь в зеленую часть спектра, доходят до ФЭУ. Благодаря большой длине ослабления света в волокне, для изготовления стрипов можно использовать недорогой промышленный полистирол, что существенно снижает стоимость годоскопа. Базовый модуль является независимой детектирующей системой и представляет собой сборку из 64 стрипов (рис. 7.20а), скрепленных с помощью двухстороннего скотча в корпусе, придающем всей конструкции необходимую жесткость и обеспечивающем светоизоляцию и защиту стрипов от повреждений. Концы оптических волокон, с которых осуществляется светосбор, посредством специального оптического разъема (ОР, рис. 7.20б) позиционируются напротив центров соответствующих пикселей 64-анодного ФЭУ Hamamatsu H7546 с размерами входного окна каждого пикселя  $2 \times 2 \text{ мм}$ . Для улучшения светосбора со стрипов торцы всех волокон полируются с обоих концов стрипа. Полированные торцы стрипов, противоположенные ФЭУ, и канавка с вклеенным оптоволокном заклеиваются зеркальным скотчем. К ОР крепится ФЭУ вместе с платой считывания данных. Конструктивно все БМ годоскопа одинаковы и взаимозаменяемы.

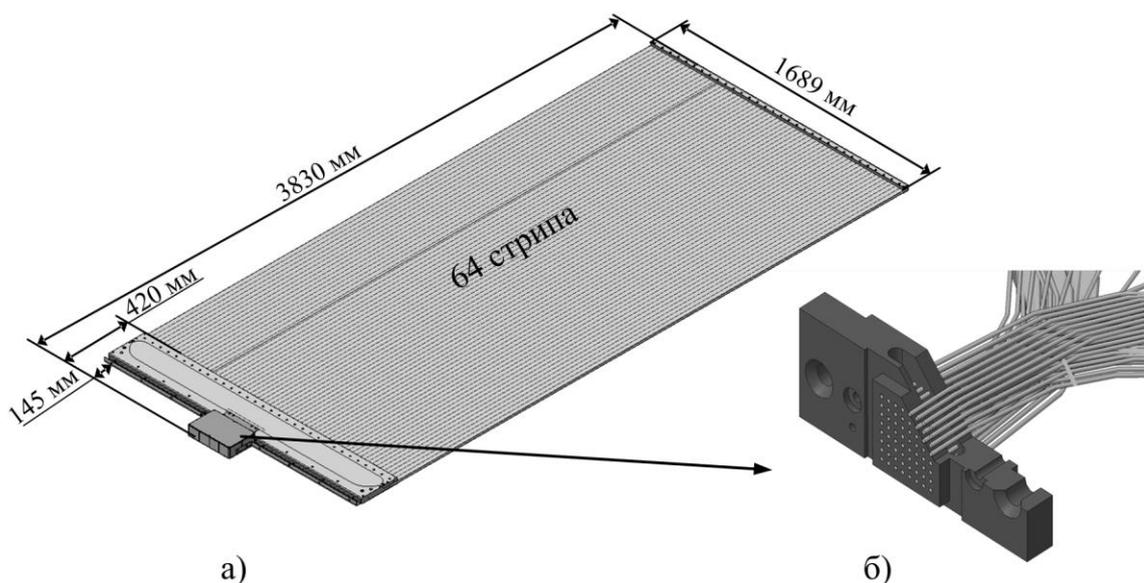


Рис. 7.20. Общий вид базового модуля  $\text{CsMg}$  (а) и оптического разъема (б).

Регистрирующая система (РС) супермодуля  $\text{CsMg}$  также выполнена по модульному принципу и включает в себя: платы считывания данных с ФЭУ, центральный блок формирования триггера, модуль сбора и обработки информации. Общая схема РС годоскопа приведена на рис. 3. Каждая плата ФЭУ регистрирующей системы

обеспечивает регистрацию сигналов 64 каналов с одного БМ, а также светодиодную (СИД) калибровку и высоковольтное питание ФЭУ. Центральный блок (ЦБ) (DAQ&Trig. Controller FPGA), выполненный на базе платы Cyclone III FPGA Development Kit, обеспечивает управление режимами работы плат ФЭУ, выработку триггерного сигнала, сбор, хранение в промежуточном буфере и передачу данных в центральную ЭВМ посредством локальной сети. Шина данных между платами ФЭУ и ЦБ выполнена в стандарте LVDS и обеспечивает временную привязку по триггерным сигналам не хуже 5 нс, а скорость передачи данных не менее 20 Мбит/с. Имеется дополнительный порт USB для работы непосредственно с ЭВМ.

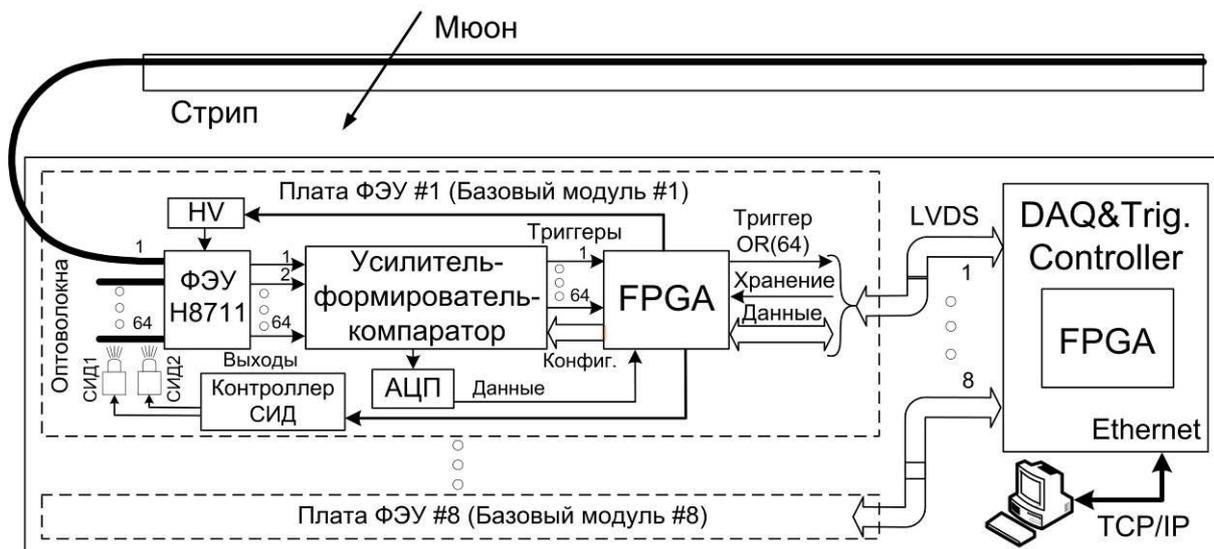


Рис. 7.21. Блок-схема системы регистрации СМ СцМГ.

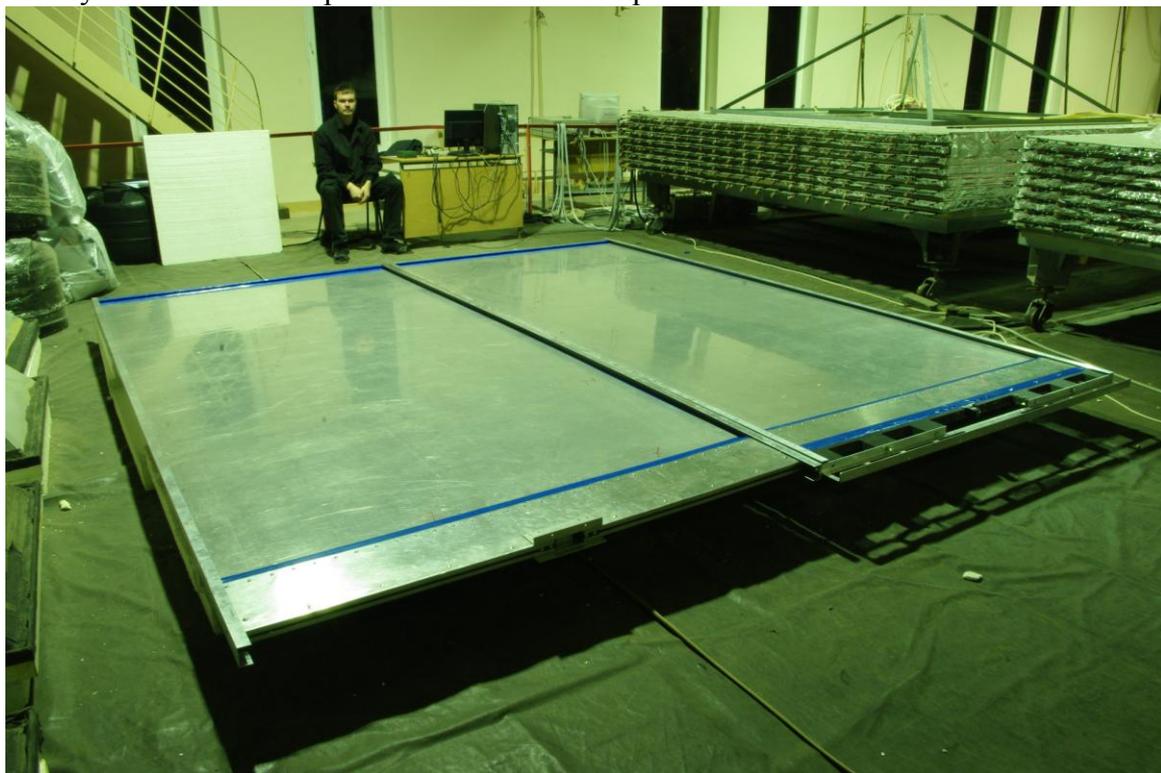
Основу всей считывающей электроники БМ составляет 64-канальная специализированная интегральная микросхема, на которую приходят сигналы со всех анодов ФЭУ H7546. Каждый канал микросхемы включает в себя предусилитель с регулируемым коэффициентом усиления для компенсации разброса коэффициентов преобразования каналов ФЭУ (которые могут отличаться в 3 раза), зарядочувствительный усилитель-формирователь и компаратор с регулируемым порогом (минимальный порог равен примерно 50 фКл, что при коэффициенте усиления ФЭУ  $10^6$  соответствует величине 0.3 фотоэлектрона). Микросхема имеет мультиплексированный аналоговый выход на АЦП. Сформированные сигналы поступают на микросхему FPGA, обеспечивающую формирование триггера первого уровня. С помощью FPGA осуществляется и управление настройками 64-канальной микросхемы усилителя-формирователя-компаратора и работой АЦП. На плате ФЭУ также расположена двухканальная система светодиодной подсветки состоящая из контроллера и двух плат управления СИД, которые обеспечивают необходимую длительность и регулируемую мощность световых импульсов. Управление режимом работы контроллера также осуществляет FPGA.

В качестве мюонной станции предлагается использовать два базовых модуля СцМГ с общей площадью 11 м<sup>2</sup>. (см. рис. 7.22). К недостаткам детектора на основе сцинтилляционных стрипов с оптоволоконным съемом информации является его отнесенная дороговизна.

### Детектор ИФВЭ.

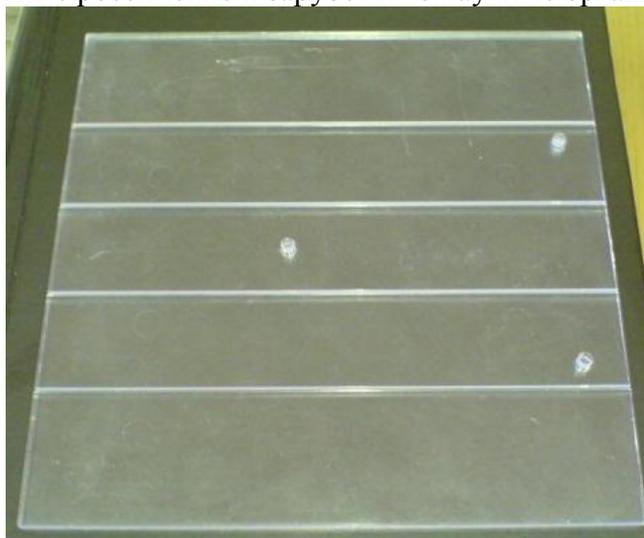
Другим возможным вариантом мюонной станции может быть кластер из 10 счетчиков ШАЛ, разработанных ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино). Счетчик представляет собой двухслойную сборку сцинтилляционных пластин с общей площадью 1 м<sup>2</sup>. Каждый слой

собран из пластин  $20 \times 20 \times 0.5 \text{ см}^3$  (см. рис. 7.23). Светосбор осуществляется с помощью спектросмещающих волокон-файберов. В каждой пластине имеются 4 канавки с шагом 3.6 см глубиной 2.2 мм на расстоянии 4.6 см от краев.



*Рис. 7.22. Два базовых модуля (слой координатной плоскости) перед тестированием на супермодуле МГ УРАГАН (справа).*

Пластины собраны таким образом, чтобы канавки одной были продолжением другой. В эти канавки вклеены волокна диаметром 1 мм. Концы волокон собраны в жгут, проклеены и отполированы. Торцевой жгут закреплен напротив фотокатода ФЭУ. Счетчик является компактным, легким и удобным для эксплуатации. Фотография собранного счетчика приведена на рис. 7.24. Такие счетчики серийно производятся в ГНЦ ИФВЭ и поставляются в различные российские и зарубежные научные организации.



*Рис. 7.23. Сцинтилляционная пластина  $20 \times 20 \times 0.5 \text{ см}^3$ .*

FrontEnd электроника выполнена на одной плате и включает: активный источник напряжения для диодной системы (Кокрофт), один спектрометрический канал съема

информации с анода. Также на данной плате имеется возможность осуществлять съем с 12-го и 7-го динодов.



*Рис.7.24. Фотография волоконного счётчика (без крышки блока front-end электроники).*

Анодный усилитель имеет коэффициент усиления около 57. Кокрофт обеспечивает максимальное напряжение на динодной системе – 1920 – 1980 В. В качестве фотоприемника используется ФЭУ-115М, максимум спектральной чувствительности фотокатода которого смещен в зеленую часть спектра регистрируемых фотонов.

Исходя из приведенных выше расчетов мюонные детекторы необходимо помещать под слоем грунта не менее 1 м. Регистрирующая система заглубленных 10 детекторов мюонной станции организуется по принципу станций KASCADE-Grande.

Стоимость одного детектора (2012 г.) (сцинтиллятор 1 см в корпусе, ФЭУ и Front-End) – 60 тыс. руб. Реализуется ИФВЭ как готовое изделие.

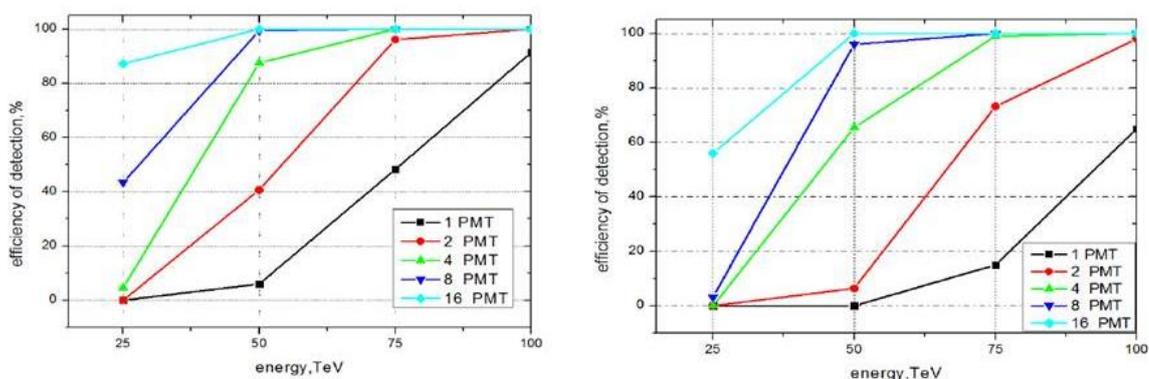
Для обеспечения эффективного подавления фоновых мюонов (около 1 кГц на одну станцию) синхронизация системы регистрации каждой станции на уровне 10 нс. Этот уровень достигается с помощью современной системы GPS.

Требуются дополнительные исследования по созданию совместного с гамма-телескопом триггера.

## 7.6. Результаты моделирования, оценка чувствительности.

Эффективный порог регистрации ШАЛ одной станцией выбирался из условия превышения на  $5\sigma$  сигналом среднего светового фона звездного неба в заданном временном окне. При моделировании временное окно принималось равным 10 нс, средняя квантовая эффективность ФЭУ – 10%, телесный угол – 0.6 стер, уровень светового фона -  $2 \cdot 10^{12}$  фотон  $\text{м}^{-2} \text{сек}^{-1}$ . Расстояние между станциями выбраны равным 150 м. ШАЛ считается зарегистрированным, если превышен порог регистрации в более чем 3-х оптических станциях.

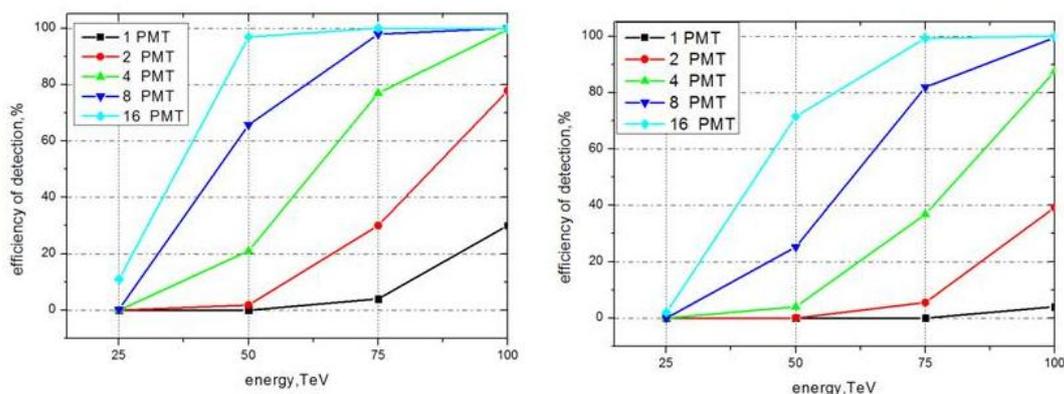
На рис.7.25 приведена эффективность регистрации ШАЛ от гамма-квантов, в зависимости от энергии гамма-кванта и числа ФЭУ в оптической станции. На рис.7.26 приведена эффективность регистрации ШАЛ от протонов.



А

Б

Рис.7.25 Эффективность регистрации ШАЛ от гамма-квантов различных энергий для вертикали (А) и зенитного угла 25 град (Б) для разного числа ФЭУ в оптической станции.



А

Б

Рис.7.26 Эффективность регистрации ШАЛ от протонов различных энергий для вертикали (А) и зенитного угла 25 град (Б) для разного числа ФЭУ в оптической станции.

Кроме эффективности регистрации, для определения чувствительности необходимо знать угловое разрешение установки. При расстоянии между детекторами 150 м и точности

синхронизации 1 нс угловое разрешение было бы равным 0.1 град при плоском фронте черенковского фронта. К сожалению, фронт черенковского излучения не плоский. В хорошем приближении вблизи оси его можно описать конусом с углом раствора 179 град. В силу этого, если не восстанавливать положение оси ливня угловое разрешение окажется около 1 град. Точность локации оси от ШАЛ низких энергий усложняется «пологой» ФПР до расстояний 150 м ( см.рис. 7.27)

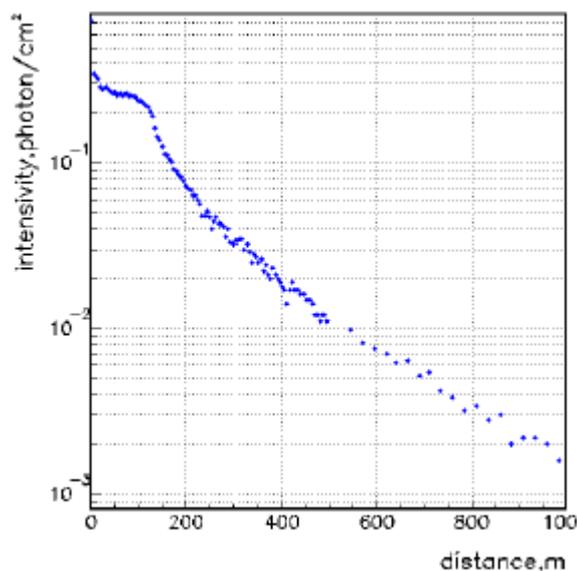


Рис. 7.27. ФПР для ШАЛ от гамма-кванта с энергией 25 ТэВ

Угловое разрешение для сети оптических станции, содержащих 4 ФЭУ приведено на рис.7.28. Видно, что при пороговых энергиях угловое разрешение равно примерно 0.5 град. Расчет углового разрешения для станции содержащих 16 ФЭУ и узкоугольные черенковские детекторы до настоящего времени не выполнен. При расчете чувствительности установки для станций, содержащих 16 ФЭУ, предполагалась, что угловое разрешение в пороговой области равно 0.2 град.

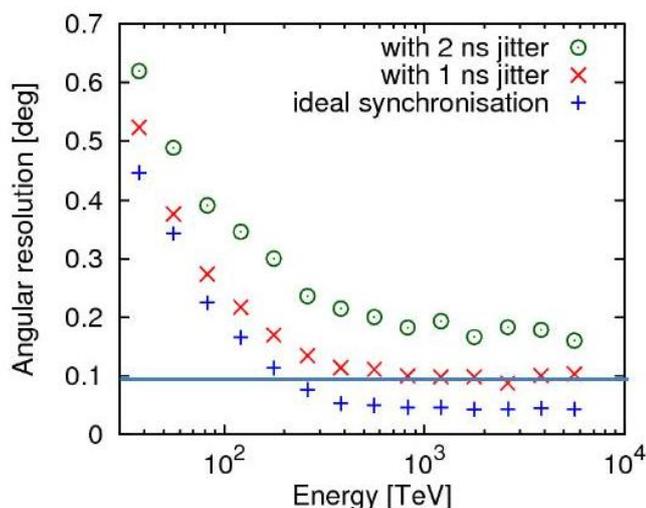


Рис. 7.28. Угловое разрешение станций содержащих 4 ФЭУ

При расчете чувствительности установки (рис.7.29) предполагалось, что ливни от протонов и гелия нельзя отличить от ливней от гамма-квантов. Учитывалась неэффективность регистрации ливней от протонов и гелия при пороговых энергиях. Потоки протонов и гелия, заложенные в расчет, взяты и работы [86]

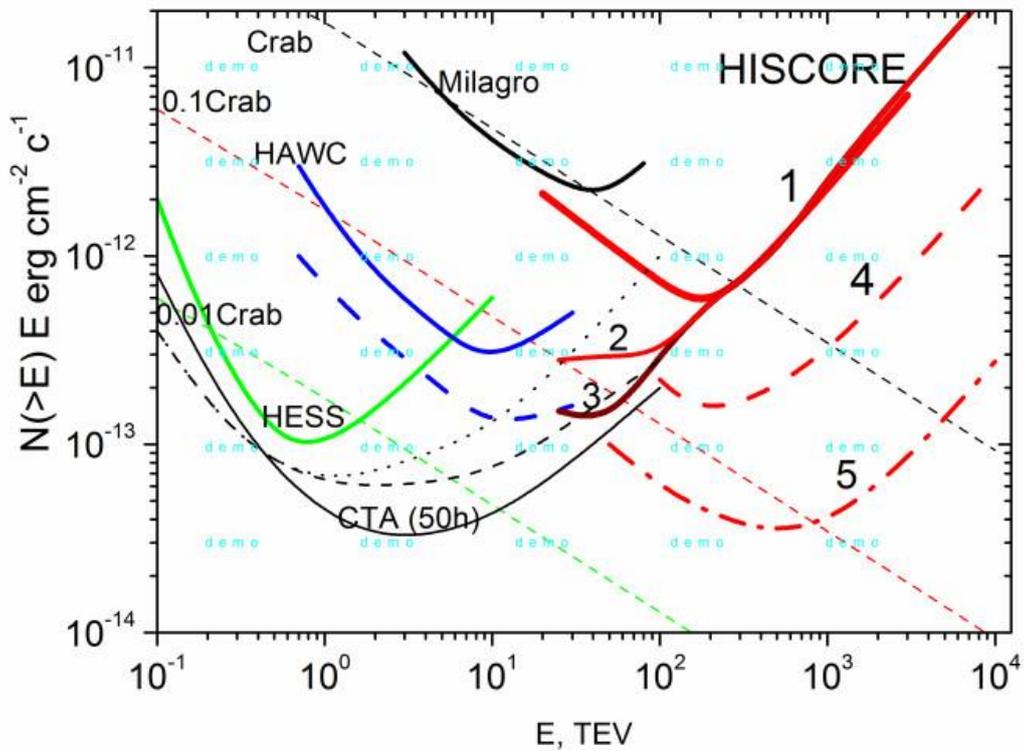


Рисунок 2.19 Чувствительность обсерватории Тунка-HiSCORE ( 500 часов наблюдения на за источником, 50 событий или  $5\sigma$  превышение над адронным фоном).  
 1-  $S= 1.5 \text{ км}^2$  (4 ФЭУ в станции), 2-  $S=1.5 \text{ км}^2$  (16 ФЭУ в станции),  
 3-  $S =1.5 \text{ км}^2$  (16 ФЭУ+мюонные детекторы), 4-  $S =10 \text{ км}^2$  (4 ФЭУ в станции),  
 5-  $S=100 \text{ км}^2$ (1 ФЭУ в станции)  
 CTA –(50 часов наблюдения за источником , В, Е, С конфигурации телескопов:  
 HESS, Veritas (50 часов) – зеленая кривая, Milagro (1 год) – черная кривая, HAWC (1 год) – синяя кривая, 5 лет – синий пунктир.

## 8. Этапы развертывания обсерватории

Обсерватория будет развертываться в 6 этапов.

### **Первый этап**

На первом этапе будут развернуты 5 оптических станций, по два фотоумножителя в каждой. К каждой станции будет подведен оптический кабель. Оцифровка импульсов с ФЭУ будет производиться платами FADC установки Тунка-133. С точки зрения системы сбора данных оптические станции будут тождественны кластерам установки Тунка-133. Такое включение станций в состав установки Тунка-133 позволит отождествлять события зарегистрированные кластерами установки Тунка-133 и оптическими станциями и проводить взаимное сравнение параметров восстанавливаемых событий. Использование на этом этапе электроники установки Тунка-133 позволит очень быстро непосредственно к измерениям и проверки надежности работы в полевых условиях электроники и механики оптических станций. Предполагается развернуть пять оптических станций в октябре 2012 года.

### **Второй этап.**

На втором этапе предполагается развернуть 60 оптических станций (по 4 ФЭУ в станции) на площади 1.5 км. Системой сбора и синхронизации будет уже новой основанной на микросхеме DRS4. ФЭУ оптических станций будут ориентированы вертикально и наклон их не будет меняться в течение сезона. Энергетический порог установки будет около 40 ТэВ и это позволит приступить к поиску ПЭВатронов и исследовать спектр и массовый состав космических лучей в области выше  $10^{14}$  эВ на недостижимом ранее уровне статистической обеспеченности. Так за сезон работы (400 часов) будет зарегистрировано свыше  $10^8$  событий с энергией выше  $10^{14}$  эВ. Созданная установка позволит апробировать подходы к реконструкции событий, точности восстановления зенитного угла и энергии. Предполагается развернуть эту установку в течении 2013 и первой половины 2014 года. Провести первый сезон измерений зимой 2014-2015 года. Успех этого этапа позволит перейти к реализации третьего этапа. Стоимость создания этой установки около 30 млн. руб.

### **Третий этап**

На третьем этапе количество ФЭУ в каждой из установленных 60 станций будет увеличен с 4 до 16. Соответственно энергетический порог будет понижен до 20 ТэВ. Чувствительность установки в диапазоне 20-100 ТэВ будет снижена до уровня  $2.5 \cdot 10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup>см<sup>2</sup> Новая конструкция фундамента станций позволит изменять угол наклона ФЭУ в течение сезона. Новая установка позволит приступить к исследованию характеристик локальных гамма-источников. Предполагается развернуть эту установку к осени 2016 года. Стоимость этого этапа около 80 млн.руб. Вместо увеличения числа фотоумножителей в одной станции можно ввести в состав установки систему из 20 зеркал площадью 2-3 м<sup>2</sup> и углом зрения  $\pm 7$  градус, осуществляющую слежение за источником. Добавление системы зеркал увеличит стоимость работ на 40 млн.

#### **Четвертый этап**

.На четвертом этапе установку будет расширена станциями по 4 ФЭУ в каждой и расположенными на расстоянии 200 м. Полная площадь установки будет доведена до 10 км. Всего дополнительно будет развернуто 200 оптических станций. Чувствительность установки при энергиях выше 200 ТэВ будет снижена в 7 раз.(кривая 3) Стоимость этого этапа около 150 млн руб.

#### **Пятый этап**

Центральная часть установки будет дополнена сцинтилляционными детекторами общей площадью  $1.5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$  ( 1% площади центральной части ). Чувствительность установки в диапазоне 20-50 ТэВ при этом понизится до  $(5-7) \cdot 10^{-14} \text{ эрг/ см}^2 \text{ см}^2$  . Предполагается закончить развертывание этой установки к 2018-19 годам. Стоимость этого этапа – около 1 млрд. руб ( 20-25 млн евро),.

#### **Шестой этап**

На последнем, пятом этапе, площадь установки будет расширена до площади в 100 км<sup>2</sup>. Чувствительность установки в диапазоне 200 – 1000 ТэВ при этом составит  $(3-5) \cdot 10^{-14} \text{ эрг/ см}^2 \text{ см}^2$ . В этом случае станции будут располагаться на расстоянии 200 м и каждой станции будет располагаться один ФЭУ. Полное число ФЭУ примерно равно -2500. Общая стоимость этого этапа около 450 млн руб ( 11 млн евро). Работы по созданию этой установки могут быть завершены к 2020-2022 году.

Таким образом полная стоимость работ около 1.5 млрд. рублей ( 35-38 млн. евро). Полное создание обсерватории может быть завершено в 8-10 лет

Очередность этапов, приведенная выше, не обязательно должна соблюдаться. Так после 2-го этапа, т.е после создания установки площадью  $1.5 \text{ км}^2$  , можно перейти к понижению энергетического порога ( 3 этап), а можно сразу приступить к расширению площади установки ( 4этап)

## **9. Развитие инфраструктуры Тункинского астрофизического центра.**

В настоящее время инфраструктура «Тункинского астрофизического центра (ТАЦ) включает в себя 3 одноэтажных здания, построенных в 1971 – 1972 годах из железобетонных панелей: гостиница -общежитие площадью 146 кв.м на 20 человек, лабораторное здание площадью 80 кв.м, теплый гараж на 8 машин с механическими мастерскими площадью 216 кв.м.; склад из бруса площадью 32 кв.м, здание центра управления установки Тунка-133 из бревен площадью 36 кв.м, баню из бруса, площадью 32 кв.м.

Для приведения инфраструктуры ТАЦ в соответствие задачам проекта необходимо выполнить следующие работы.

### **1. Система электроснабжения.**

1. Разработка проекта и капитальный ремонт ЛЭП напряжением 6 кВ протяженностью 2,2 км, включая замену всех деревянных столбов. Стоимость работ – 1 млн. рублей
  2. Разработка проекта и замена силовых кабелей от трансформаторной подстанции до зданий лаборатории протяженностью 300 м, до гостиницы общежития протяженностью 500 м, до центра управления установки Tunka-HiSCORE протяженностью 900 м. Стоимость работ – 1,2 млн. рублей.
  3. Разработка проекта и создание системы резервирования электроснабжения на базе дизельной электростанции и системы бесперебойного электропитания. Стоимость работ – 1,8 млн. рублей.
  4. Разработка проекта и капитальный ремонт систем электроснабжения лаборатории, гостиницы-общежития, гаража с мастерскими, хозяйственных помещений. Стоимость работ – 0,9 млн. рублей.
- Общая стоимость работ - 4,9 млн. рублей.

### **2. Системы водоснабжения и канализации.**

1. Проведение изыскательских работ по определению водоносных слоев надлежащего качества и разработка проекта систем водоснабжения и канализации ТАЦ. Стоимость работ – 0,3 млн. рублей.
  2. Бурение и обустройство 2-х скважин около зданий лаборатории и гостиницы-общежития. Стоимость работ – 0,4 млн. рублей.
  3. Строительство и обустройство бетонных накопителей канализационных стоков. Стоимость работ – 0,6 млн. рублей.
  4. Создание системы водоочистки и водоснабжения и канализации лаборатории и гостиницы-общежития. Стоимость работ – 0,5 млн. рублей.
  5. Строительство сантехнических блоков с душем и теплым туалетом, стиральной машиной-автомат лаборатории и гостиницы-общежития. Стоимость работ – 0,6 млн. рублей.
- Общая стоимость работ - 2,4 млн. рублей

### **3. Ремонт и реконструкция здания лаборатории.**

1. Разработка проекта ремонта и реконструкции здания.
2. Укрепление каркаса и фундаментов лаборатории

3. Замена окон, ремонт и утепление фасадов.
  4. Ремонт крыши со строительством жилых комнат на 2-ом этаже.
  5. Ремонт внутренних помещений
  6. Замена системы отопления.
- Общая стоимость работ - 2 млн. рублей.

**4. Ремонт и реконструкция здания гостиницы-общежития.**

1. Разработка проекта ремонта и реконструкции здания.
  2. Укрепление каркаса и фундаментов лаборатории
  3. Замена окон, ремонт и утепление фасадов.
  4. Ремонт крыши со строительством жилых комнат и конференц-зала на 2-ом этаже.
  5. Ремонт внутренних помещений
  6. Замена системы отопления.
- Общая стоимость работ - 3,5 млн. рублей

**5. Ремонт и реконструкция здания гаража с мастерскими.**

1. Разработка проекта ремонта и реконструкции здания.
  2. Укрепление каркаса и фундаментов лаборатории
  3. Замена окон, ремонт и утепление фасадов.
  4. Ремонт крыши с обустройством лабораторных помещений на 2-ом этаже.
  5. Ремонт внутренних помещений
  6. Замена системы отопления.
- Общая стоимость работ - 2,5 млн. рублей

**6. Реконструкция хозяйственно бытового блока.**

Ремонт деревянных конструкций бани.  
Замена печи.  
Общая стоимость работ - 0,7 млн. рублей

**7. Строительство здания центра управления и сбора данных для установки Tunka-HiSCORE.**

Общая стоимость работ - 1,0 млн. рублей

**8. Развитие систем связи.**

1. Подключение к оптоволоконному кабелю.
2. Организация локальной сети ТАЦ.
3. Организация систем радио и телефонной связи.

Общая стоимость работ - 3,0 млн. рублей

Общая стоимость работ по развитию инфраструктуры ТАЦ 20 миллионов рублей.

## 10. Заключение

Выполнение данного проекта будет способствовать возрождению и развитию в России самых передовых направлений экспериментальных и теоретических исследований по гамма-астрономии сверхвысоких энергий, поиску темной материи и частиц сверхвысоких энергии во Вселенной. Основы этой науки в нашей стране были заложены и развиты трудами выдающихся отечественных ученых, имена которых известны во всем мире. Среди них есть нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург, академики Я.Б. Зельдович, С. Н. Вернов, Г.Т. Зацепин, Г.Б. Христиансен, А.Е. Чудаков, и многие другие.

Достижения отечественной науки в данной области исследований на начальном этапе ее развития и в недалеком прошлом были пионерскими и выдающимися (предсказание существования нейтронных звезд, новых видов нейтрино и их осцилляций, создание Баксанской нейтринной обсерватории и целой сети станций для наблюдения космических лучей, экспериментальное открытие нейтринного излучения от сверхновой 1987А, предсказание свойств черных дыр и их мощного гамма-излучения, наблюдения квазаров, пульсаров, ядер галактик и других астрофизических объектов, экспериментальное обнаружение излома в спектре первичных космических лучей и теоретическое предсказание обрезания в их спектре из-за рассеяния на реликтовом излучении во Вселенной, создание теоретических моделей ускорения космических лучей до сверхвысоких энергий).

Этот далеко не полный список крупных достижений и заслуг в прошлом легко продолжить. Он может быть также продолжен уже в ближайшем будущем, поскольку в данном проекте впервые глубоко исследуются неизвестные ранее свойства в недоступной ранее энергетической области гамма-излучения. Будут созданы новые методы и технологии физического эксперимента, новые рабочие места для высококвалифицированных исследователей и молодых ученых, которые приложат свои силы у себя на родине и принесут ей пользу вместо того, чтобы искать возможность для реализации своих талантов за границей и приносить пользу там. Выполнение проекта поднимет научный статус России и принесет ей большую пользу.

## 11. Список литературы

- 1.F. Aharonian. Very HIGH ENERGY COSMIC GAMMA RADIATION.A Crucial Window on the Extreme Universe. World Scientific. 2004.
- 2.TeVCat - онлайн каталог ТЭВ-ных источников: <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 3.Куликов Г.В., Христиансен Г.Б., ЖЭТФ, 1959, Т.35, С.441
- 4.M.Actis et al. Experimental Astronomy (2011) 121;CTA consortium. Design Concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA arXiv:1008.3703v2 [astro-ph.IM]
- 5.G.Sinnis. Nucl.Instrum.Meth.A623:410-412,2010. HAWC collaboration. <http://hawc.umd.edu/>
- 6.Q.An et al et // Nucl.Instrum.Meth.A644:11-17,2011.LHAASO collaboration <http://english.ihep.cas.cn/ic/ip/LHAASO/>
- 7.F.Aharonian (HESS Collaboration)//Astroparticle Physics 34(2011) 738-747 HESS- <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>
- 8.J.Albert et al // Astrophys.J.639:761-765,2006 e-Print: astro-ph/0508543 MAGIC <http://www.magic.mppmu.mpg.de/>
- 9.V.Acciari (VERITAS Collaboaration) Ap.J Letters 730 (2011) L20 VERITAS <http://veritas.sao.arizona.edu>
- 10.F,Aharonian et al // Astron.Astrophys. 390 (2002) 39-46 AIROBIC <http://en.wikipedia.org/wiki/HEGRA>
11. Kuzmichev L.A.Tunka-133:the new EAS Cherenkov Light Array for Cosmic Ray Study. Proc. of 25th Simp. on Relativistic Astroph., Heidelberg, 2010.
12. M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, T. Kneiske, R. Eichler, R. Nachtigall and G. Rowell, “The ground-based large-area wide-angle gamma-ray and cosmic-ray experiment HiSCORE”, Adv. Space Res. 48, 1935 (2011), arXiv:1108.5880.
13. Березинский В.С и др. Астрофизика космических лучей, М., Наука, 1990.
14. Lozinskaya T.A. 1992, Supernovae and Stellar Wind: The Interaction with the Interstellar Medium, AIP
- 15.Hamuy, M. 2003, Review on the observed and the physical properties of the core collapse supernovae. astro-ph/0301006, Review for 'Core Collapse of Massive Stars', ed. by C.L. Fruer (Kluwer academic Publishers, Dordrecht).
- 16.Kargaltsev O, Pavlov GG (2008) Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era. In: 40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More (eds. Bassa C, Wang Z, Cumming A, Kaspi VM), vol. 983 of *AIP Conf. Series*, pp. 171–185.
17. Mathieu de Naurois for the H.E.S.S. collaboration. The Galactic Sky seen by H.E.S.S. arXiv:1104.1680v1 [astro-ph.HE], 2011.
- 18.Bluemer J., Engel R., Hoerandel J.R. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **63** 293 (2009)
19. Torres D. F., Anchordoqui L. A. *Reports Progr. Phys.* **67** 1663 (2004,)
20. Sigl G. *New Journal of Physics* **11** 065014 (2009)
21. A. de Angelis, M. Roncadelli, O. Mansutti 2007, Phys. Rev. D, 76, 121301
- 22.J.Vink. Supernova remnants: the X-ray perspective arXiv:1112.0576v2 [astro-ph.HE] 2012

23. V. Ptuskin, V. Zirakashvili, et al. Spectrum of galactic cosmic rays accelerated in supernova remnants. *The Astrophysical Journal*, 718:31–36, 2010 July 20.
24. V. A. Acciari, E. Aliu, T. Arlen and Veritas collaboration. DISCOVERY OF TEV GAMMA RAY EMISSION FROM TYCHO'S SUPERNOVA REMNANT. arXiv:1102.3871v2 [astro-ph.HE] . 2011
25. Ellison, D. C., Baring, M. G., & Jones, F. C., Acceleration Rates and Injection Efficiencies in Oblique Shocks, *ApJ*, 453, 873. 1995
26. Bell A.R., 1978 *MNRAS*, 182, 14. Bell A.R., Lucek S.G. 2001, *MNRAS*, 321, 433
27. Ptuskin, V.S. & Zirakashvili, V.N. 2003, *A&A*, 403,
28. Ptuskin, V.S. & Zirakashvili, V.N. 2005, *A&A*, 429, 755
29. Berezhko, E. G., Pühlhofer, G., & Volk, H. J., Theory of cosmic ray and g-ray production in the supernova remnant RX J0852.0-4622, *A&A*, 505, 641-654. 2009
30. Uchiyama, Y., Aharonian, F. A., Tanaka, T., Takahashi, T., & Maeda, Y., Extremely fast acceleration of cosmic rays in a supernova remnant, *Nature*, 449, 576-578. 2007
31. Helder, E. A., Vink, J., Bassa, C. G., et al., Measuring the Cosmic-Ray Acceleration Efficiency of a Supernova Remnant, *Science*, 325, 719-. 2009.
32. Rho J, Dyer KK, Borkowski KJ, Reynolds SP (2002) Xray synchrotron-emitting Fe-rich ejecta in supernova remnant RCW 86. *ApJ*581:1116–1131
33. S. Veselovsky, Dimensionless parameters and their use in space and laboratory plasma physics. Proceedings 2nd International Symposium on Unconventional Plasmas (ISUP-06), 14-16 August, 2006, TUE, Eindhoven, The Netherlands, Eds. D.K. Callebaut, G.C. Dijkhuis & H. Kikuchi, pp. 172-179, 2006.
34. Sturrock, P; [Aschwanden, M. J.](#) (2012). Flares in the Crab Nebula Driven by Untwisting Magnetic Fields. *Astrophys. J. Letters*, Volume 751, Issue 2, article id. L32 (2012).: DOI [10.1088/2041-8205/751/2/L32](https://doi.org/10.1088/2041-8205/751/2/L32)
35. [Kohri, Kazunori](#); [Ohira, Yutaka](#); [Ioka, Kunihiro](#) (2012) Gamma-ray flare and absorption in Crab Nebula: Lovely TeV-PeV astrophysics. eprint [2012arXiv1202.6439K](https://arxiv.org/abs/2012arXiv1202.6439K)
36. Zirakashvili VN, Aharonian FA (2010) Nonthermal Radiation of Young Supernova Remnants: The Case of RX J1713.7-3946. *ApJ*708:965–980, 0909.2285
37. Gabici, S., Aharonian, F. A., & Casanova, S., Broad-band non-thermal emission from molecular clouds illuminated by cosmic rays from nearby supernova remnants, *MNRAS*, 396, 1629-1639. 2009
38. Unified model for the gamma-ray emission of supernova remnants. Q. Yuan, S. Liu, X.-J. Bi. arXiv:1203.0085v1 [astro-ph.HE]. 2012.
39. Weekes, T. C., Cawley, M. F., Fegan, D. J., et al., Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique, *ApJ*, 342, 379-395. 1989
40. Atoyan, A. M. & Aharonian, F. A., On the fluxes of inverse Compton gammarays expected from the Crab Nebula., *A&AS*, 120, C453+. 1996
41. Wenig, I., Förster, A., Carrigan, S., & Hofmann, W., Statistical Search for Counterparts of Galactic VHE Gamma-Ray Sources. in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 1085, American Institute of Physics Conference Series, ed. F. A. Aharonian, W. Hofmann, & F. Rieger, 698–700. 2008
42. Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Barres de Almeida, U., et al., HESS very-high-energy gamma-ray sources without identified counterparts, *A&A*, 477, 353-363. 2008b
43. Hartman, R. C., Bertsch, D. L., Bloom, S. D., et al., The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources, *ApJS*, 123, 79-202. 1999
44. Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al., Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-Ray Source List, *ApJS*, 183, 46-66. 2009a.
45. de Jager, O. C., Ferreira, S. E. S., Djannati-Ata'i, A., et al., (H.E.S.S. Collaboration), Unidentified Gamma-Ray Sources as Ancient Pulsar Wind Nebulae. in 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz. 2009, arXiv:0906.2644

46. Klepach, E. G., Ptuskin, V. S., & Zirakashvili, V. N., Cosmic ray acceleration by multiple spherical shocks, *Astroparticle Physics*, 13, 161-172. 2000
47. Bykov, A. M., Particle Acceleration and Nonthermal Phenomena in Superbubbles, *Space Sci. Rev.*, 99, 317-326. 2001
48. Norman, C.A., Melrose, D.B., Achterberg, A., 1995, *ApJ* 454, 60
49. Istomin, Y.N., Sol, H., 2009, *Ap&SS* 321, 57
50. O. Blanch, M. Martinez Exploring the Gamma Ray Horizon with the next generation of Gamma Ray Telescopes. Part 2: Extracting cosmological parameters from the observation of  $\gamma$ -ray sources arXiv:astro-ph/0406061v1 2 Jun 2004
51. D. Horns and M. Meyer, "Indications for a pair-production anomaly from the propagation of VHE gamma-rays," *JCAP* 1202, 033 (2012)
52. M. Meyer, M. Raue, D. Mazin, and D. Horns. Limits on the extragalactic background light in the Fermi era. arXiv:1202.2867v1 [astro-ph.CO] 2012
53. M. Hillas, Proc. 19th ICRC, La Jolla 3 (1985) 445
54. Weekes, T. C., Cawley, M. F., Fegan, D. J., et al., Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique, *ApJ*, 342, 379-395. 1989
55. <http://www.lanl.gov/milagro/>; Milagro Observations of Multi-TeV Emission from Galactic Sources in the Fermi Bright Source List A. A. Abdo,<sup>1,2</sup> B. T. Allen,<sup>3,4</sup> T. Aune,<sup>5</sup> D. 2009, *ApJ*, 700L, 127A
56. В.С. Птушкин. Происхождение космических лучей. Успехи физических наук. Т. 180. N 9. С. 28-32. 2011.
57. Erlykin A.D., Wolfendale A.W., 1997, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 23, 979
58. Structura Fig.6. J.C. Arteaga-Velazquez,<sup>1</sup> \* W.D. Apel,<sup>2</sup> K. Bekk,<sup>2</sup> M (KASCADE Grande col.) The KASCADE-Grande experiment: measurements of the all-particle energy spectrum of cosmic rays arXiv:1009.4716v1 [astro-ph.HE] 23.
59. G. Scahzt et al., "Search for Extremely High Energy Gamma rays with the KASCADE Experiment", Proc. 28th ICRC.
60. K. Shinozaki et al., "Upper limit on gamma-ray flux above  $10^{19}$ -eV estimated by the Akeno Giant Air Shower Array experiment," *Astrophys. J.* 571, L117 (2002).
61. A.V. Glushkov et al., "Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies  $E > 10^{18}$  eV from Yakutsk muon data", *Phys. Rev. D* 82, 041101 (2010).
62. M. Settimo, et al. [The Pierre Auger Collaboration], "The Pierre Auger Observatory III: Other Astrophysical Observations," Proceedings of 32nd ICRC, Beijing, 2011, arXiv:1107.4805
63. G. Rubtsov, et al. [Telescope Array Collaboration], "Search for ultra-high energy photons using Telescope Array surface detector.", Proceedings of International Symposium on The Recent Progress of UHECR Observation, AIP Conf. Proc. 1367 (2011) 181-184.
64. M. Meyer, M. Raue, D. Mazin and D. Horns, "Limits on the extragalactic background light in the Fermi era", arXiv:1202.2867.

65. D. Horns and M. Meyer, "Indications for a pair-production anomaly from the propagation of VHE gamma-rays," JCAP 1202, 033 (2012)
66. A. de Angelis, M. Roncadelli, O. Mansutti 2007, Phys. Rev. D, 76, 121301
67. A. Prosekin, W. Essey, A. Kusenko and F. Aharonian, "Time structure of gamma-ray signals generated in line-of-sight interactions of cosmic rays from distant blazars," arXiv:1203.3787.
68. P. Horava, "Quantum Gravity at a Lifshitz Point", Phys. Rev. D 79, 084008 (2009)
69. S. Liberati, "Lorentz breaking Effective Field Theory and observational tests," arXiv:1203.4105.
70. R. J. Protheroe, H. Meyer, "An Infrared background TeV gamma-ray crisis?", Physics Letters B, 493, 1 (2000)
71. G. Gelmini, S. Nussinov and C.E. Yaguna, "On photon splitting in theories with Lorentz invariance violation," JCAP 0506, 012 (2005)
72. G. Rubtsov, Lorentz-invariance violation and the highest energy cosmic rays, Dual year Russia-Spain. Particle Physics, Nuclear Physics and Astroparticle Physics workshop, Barcelona, Nov 8-11, 2011 <http://icc.ub.edu/congress/ESP-RUS2011/talks.php>
73. Н.М. Буднев и др. // Известия РАН, сер. физ. 2009 т. 73 вып 5 стр. 627-631
74. N. Budnev et al., (Tunka Coll.), Proc of 10<sup>th</sup> ICATPP, Italy 2007, World Scientific, 2008, pp 287-291, arXiv: 0804.0856
75. Eigen G., Lorenz E. // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. V.166. P.165.
76. Акимов Ю.К. // ЭЧАЯ. 1994. Т.25. Вып.2. С.496.
77. Горин А.М., Какауридзе Г.Д., Пересыпкин А.И. и др. Препринт ИФВЭ 84-100. Протвино, 1984.
78. Гаврищук О.П., Семенов В.К. Препринт ИФВЭ 84-66. Протвино, 1984.
79. Лубсандоржиев Б.К., Шпиринг К., Кузьмичев Л.А. ПТЭ. 2003.
80. Brackmann U. Lambdachrome® Laser Dyes. Göttingen: Lambda Physik GmbH, 1997.
81. Berlman I. Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules. N. Y., London: Academic Press, 1971.
82. Evaluation board SP605 : <http://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/EK-S6-SP605-G.htm>
83. DRS4 <http://drs.web.psi.ch/datasheets>
- 84. White Rabbit**
85. G. Rubtsov, P. Satunin and S. Sibiryakov. On calculation of cross sections in Lorentz violating theories. arXiv: 1204.5782
86. V.I.Zatsepin, N.V.Sokolskaya arXiv: astro-ph/0601475