

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 520.6.05

**Топчиев Николай Петрович**

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И СОЗДАНИЕ НАУЧНОЙ  
АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ И  
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

Специальность

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация

на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2017 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	5
Актуальность проблемы	5
Цель диссертационной работы	8
Научная новизна	9
Научная и практическая значимость полученных результатов	9
Достоверность полученных результатов	10
Апробация работы	11
Публикации	13
Личный вклад автора	13
<b>Глава 1. Анализ актуальных научных задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий</b>	14
1.1 Космическое гамма-излучение	14
1.2 Исследование гамма-излучения от дискретных источников	18
1.2.1 Дискретные источники космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий	18
1.2.2 Результаты исследований дискретных источников в космических экспериментах	19
1.2.3 Результаты исследований дискретных источников в наземных экспериментах	32
1.3 Исследование диффузного гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий	37
1.3.1 Диффузное гамма-излучение	37
1.3.2 Результаты исследования диффузного гамма-излучения в космических экспериментах	38
1.3.3 Результаты исследования диффузного гамма-излучения в наземных экспериментах	45
1.4 Исследование высокоэнергичного гамма-излучения от Солнца	48
1.5 Исследование природы «темной материи» методами высокоэнергичной гамма-астрономии	55

1.6 Анализ результатов исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий	67
<b>Глава 2. Анализ существующих методов регистрации гамма-излучения на космических аппаратах, требований к научной аппаратуре для исследования космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и определение оптимальной физической схемы</b>	72
2.1 Взаимодействие гамма-квантов с веществом	72
2.2 Методы регистрации гамма-излучения в космических экспериментах	75
2.2.1 OSO-3	80
2.2.2 Космос-208	82
2.2.3 OGO-5	83
2.2.4 SAS-2	84
2.2.5 COS-B	86
2.2.6 ГАММА-1	90
2.2.7 COMPTEL	91
2.2.8 EGRET	94
2.2.9 AGILE	98
2.2.10 Fermi-LAT	101
2.2.11 CALET	105
2.2.12 DAMPE	107
2.3 Анализ существующих методов регистрации гамма-излучения на космических аппаратах	109
<b>Глава 3. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры в эксперименте ГАММА-1 и анализ полученных результатов</b>	111
3.1 Гамма-телескоп ГАММА-1	111
3.2 Калибровка гамма-телескопа ГАММА-1	125
3.3 Результаты эксперимента ГАММА-1	130
3.4 Методы, разработанные в эксперименте ГАММА-1	131
<b>Глава 4. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры</b>	

<b>с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах</b>	134
4.1 Основные физико-технические требования к гамма-телескопам нового поколения	134
4.2 Разработка гамма-телескопа ГАММА-400	135
4.3 Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400	166
4.4 Орбита космического аппарата	173
4.5 Научные задачи гамма-телескопа ГАММА-400	174
4.6 Расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400	175
4.6.1 Расчет светосилы	175
4.6.2 Расчет эффективной площади	178
4.6.3 Расчет энергетического разрешения	182
4.6.4 Расчет углового разрешения	186
4.6.5 Расчет величины минимального потока гамма-квантов, который может быть зарегистрирован гамма-телескопом от точечного источника в плоскости Галактики	188
4.7 Оценка числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать ГАММА-400 от дискретных источников	194
4.8 Сравнение характеристик гамма-телескопа ГАММА-400 с Fermi-LAT и наземными гамма-телескопами	200
4.9 Методы разработки научной аппаратуры, применяемые в гамма-телескопе ГАММА-400	208
<b>Заключение</b>	211
Благодарности	221
Литература	222



## ВВЕДЕНИЕ

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Последние несколько десятилетий ознаменовались новым этапом в развитии астрономии, обусловленным активными наблюдениями во всех диапазонах электромагнитного спектра – от низкочастотного радиоизлучения до гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий. Диапазоны, в которых ранее не велись наблюдения, успешно осваиваются с помощью внеатмосферных средств: высотных аэростатов, спутников, космических станций, обсерваторий и т.п. Более того, возможность наблюдения во всех диапазонах длин волн позволила реализовать комплексный подход в исследованиях астрофизических объектов. Примерами этого являются исследования нашей Галактики, Крабовидной туманности, Солнца и многих других объектов, проведенные с помощью радиоастрономического, оптического, инфракрасного, рентгеновского и гамма-астрономического методов наблюдения.

Значительный вклад в астрофизические исследования вносит гамма-астрономия, которая изучает диапазон электромагнитного спектра с частотой более  $2 \times 10^{19}$  Гц, что соответствует энергии фотонов более 100 кэВ. Многочисленные исследования, проведенные в этой области, позволили открыть галактическое диффузное гамма-излучение, изотропное внегалактическое гамма-излучение, обнаружить и исследовать многочисленные галактические и внегалактические гамма-источники, провести исследования гамма-линий (511 кэВ от аннигиляции позитронов, 1808,63 кэВ от  $^{26}\text{Al}$ , 1773 и 1332 кэВ от  $^{60}\text{Fe}$  и др.), гамма-всплесков, исследовать гамма-излучение от Солнца. Все эти исследования в основном выполнены с помощью приборов, устанавливаемых на космических аппаратах.

Исследование гамма-излучения высоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) позволяет получать уникальную информацию:

- о физических условиях в дискретных астрофизических объектах: активных звездах, остатках сверхновых (пульсарах), двойных звездах, черных дырах, микроквазарах, галактиках с активными ядрами, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер);
- о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), в котором происходит распространение и взаимодействие высокоэнергичных космических заряженных частиц, в результате которого появляется высокоэнергичное диффузное гамма-излучение;
- о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек;
- о природе «темной материи», распределении плотности «темной материи» в Галактике и Вселенной, аннигиляции и распаде гипотетических частиц, составляющих «темную материю».

«Проблему темной материи и ее детектирования» нобелевский лауреат академик В.Л. Гинзбург отметил в списке особо важных проблем современной астрофизики на начало XXI века [1], которую можно решить методами гамма-астрономии.

Прямые внеатмосферные исследования гамма-излучения на космических аппаратах имеют значительное преимущество в связи с тем, что гамма-излучение проходит через Галактику до взаимодействия с атмосферой Земли практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывает на источник своего происхождения. При взаимодействии с атмосферой Земли гамма-излучение поглощается и создает широкие атмосферные ливни и черенковское излучение, которые регистрируются

наземными установками. Наземные гамма-телескопы регистрируют гамма-излучение, начиная с энергии  $\geq 100$  ГэВ.

Внеатмосферные исследования гамма-излучения на космических аппаратах проводятся различными методами, основанными на разных процессах взаимодействия гамма-излучения с веществом в зависимости от энергии гамма-квантов. В области энергий от 0,1 МэВ до 10-20 МэВ используются методы регистрации гамма-излучения, основанные на процессах фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Для гамма-излучения с энергией более 10-20 МэВ основным процессом взаимодействия является конверсия гамма-квантов с образованием электрон-позитронных пар.

Методы разработки и создания аппаратуры для регистрации гамма-излучения меняются с ростом энергии.

В первых исследованиях гамма-излучения на космических аппаратах использовались небольшие по размерам и массе детекторы, которые позволяли определять направление гамма-квантов с точностью в нескольких градусах и измерять их энергию с точностью до нескольких десятков процентов.

Значительный вклад в развитие методики исследования космического гамма-излучения внес гамма-телескоп ГАММА-1 [2], методы разработки которого позволили существенно повысить угловое разрешения до  $\sim 1$  градуса и улучшить энергетического разрешения до  $\sim 35\%$ . Большое значение в этом космическом эксперименте придавалось выделению гамма-квантов на фоне потока заряженных частиц космических лучей, превышающего на 4-5 порядков поток гамма-квантов. Для эффективного наблюдения гамма-источников впервые в мировой практике применялась переориентации космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1. По прогнозу предвспышечной активности Солнца также проводилась переориентация космического аппарата на Солнце для наблюдения солнечных вспышек.

В настоящее время, гамма-астрономические наблюдения, которые осуществлялись в космосе (ГАММА-1, EGRET, AGILE, Fermi-LAT) и на Земле (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC), позволили получить большой объем новой информации о высокоэнергичном космическом гамма-излучении. Однако для решения вышеперечисленных актуальных научных задач очевидно, что необходимо разрабатывать гамма-телескопы нового поколения с существенно лучшими угловым и энергетическим разрешениями для прямой регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах. Именно, таким уникальным прибором нового поколения станет гамма-телескоп ГАММА-400 [3], который будет входить в состав российской космической обсерватории.

### **ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Целью данной диссертационной работы является разработка новых методов и создание научной аппаратуры, позволяющей проводить измерения первичного гамма-излучения с высокими угловым и энергетическим разрешениями при астрофизических исследованиях дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) энергий на космических аппаратах.

Для достижения целей работы были поставлены и решены следующие **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ:**

1. Анализ актуальных научных задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.
2. Анализ существующих методов регистрации гамма-излучения на космических аппаратах, определение требований к научной аппаратуре для исследования космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и определение оптимальной физической схемы.

3. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры в эксперименте ГАММА-1 и анализ полученных результатов.
4. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий в космической миссии «ГАММА-400».

### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

Основным результатом работы явилась разработка новых методов и создание научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований на космических аппаратах гамма-излучения от дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) энергий. При регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ угловое и энергетическое разрешения гамма-телескопа составляют  $\sim 0,01^\circ$  и  $\sim 1\%$ , соответственно, что превышает характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз.

### **НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Разработаны и реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения на космических аппаратах астрофизических исследований высокоэнергичного гамма-излучения. В эксперименте ГАММА-1 впервые было зарегистрировано высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучение при солнечных вспышках, впервые в мировой практике была применена переориентация космического аппарата с гамма-телескопом для эффективного наблюдения гамма-источников и солнечных вспышек. В гамма-телескопе ГАММА-400, который предназначен

для исследования космического гамма-излучения в диапазоне высоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) энергий на высокоапогейной орбите, позволяющей проводить длительные (до 100 суток) непрерывные наблюдения, получены уникальные характеристики (угловое и энергетическое разрешения составляют  $\sim 0,01^\circ$  и  $\sim 1\%$  при регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ). Полученные характеристики превышают характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз. Это позволит получить новые данные для идентификации многих дискретных гамма-источников, данные о физических условиях в этих объектах, о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек, а также данные для определения природы «темной материи» во Вселенной, развития теории происхождения и ускорения космических лучей, физики элементарных частиц и использовать их при проектировании научной аппаратуры для исследования гамма-излучения, космических лучей, солнечных вспышек на космических аппаратах, а также в разработках экспериментальной ядерно-физической аппаратуры для проведения экспериментов на ускорителях.

### **ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Достоверность полученных результатов при разработке и реализации новых методов создания научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) энергий на космических аппаратах подтверждается многочисленными расчетами и экспериментами, в том числе при разработке и во время эксперимента ГАММА-1.

## АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы неоднократно докладывались соискателем и обсуждались на российских и международных конференциях, основные из которых:

1. Газовый черенковский счетчик в эксперименте ГАММА-1. Первый международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Фрунзе, 1976.
2. Лабораторный макет гамма-телескопа ГАММА-1. Второй международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Фрунзе, 1978.
3. Калибровка систем гамма-телескопа ГАММА-1 на ускорителях. Третий международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Одесса, 1982.
4. Калибровка гамма-телескопа ГАММА-1 в пучке «меченых» гамма-квантов. Совещание по проблемам гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий, Ташкент, 1986.
5. К вопросу о роли альбедо из калориметра телескопа «ГАММА-400» при регистрации первичного гамма-излучения. Международная конференция по космическим лучам, Москва, 1996 г.
6. Российский вариант телескопа для регистрации диффузного гамма-излучения в области энергий 10-1000 ГэВ. 28-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2004 г.
7. Разработка гамма-телескопа ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 1 ТэВ. 29-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2006 г.
8. Модернизированный гамма-телескоп ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 3 ТэВ. 30-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Санкт-Петербург, 2008 г.

9. Научные задачи и современное состояние проекта «ГАММА-400». 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2010 г.
- 10.2010: Status of the GAMMA-400 project. 38-я сессия COSPAR-2010, Германия, Бремен, 2010 г.
11. Возможности гамма-телескопа ГАММА-400 регистрировать частицы темной материи. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, НИЯУ МИФИ, Москва, 2012 г.
12. The space-based gamma-ray telescope GAMMA-400 and its scientific goals. 33-я Международная конференция по космическим лучам, Бразилия, Рио-де-Жанейро, 2013 г.
13. New generation high-energy space observatory GAMMA-400. 40-я сессия COSPAR-2014, МГУ, Москва, 2014 г.
14. Эксперимент ГАММА-400: состояние и перспективы. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, ОИЯИ, Дубна, 2014 г.
15. Новые методы разработки научной аппаратуры для регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий в космическом эксперименте ГАММА-400 с учетом эксперимента ГАММА-1. Восьмые Черенковские чтения, ФИАН, Москва, 2015 г.
16. The GAMMA-400 gamma-ray observatory. 34-я Международная конференция по космическим лучам, Нидерланды, Гаага, 2015 г.
17. The GAMMA-400 gamma-ray telescope for precision gamma-ray emission investigations. ICPPA-2015 (International Conference on Particle Physics and Astrophysics). Москва, 2015 г.
18. New stage in high-energy gamma-ray studying with GAMMA-400 after Fermi-LAT. ISVHECRI 2016 (International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions), Москва, 2016 г.
19. High-energy gamma-ray studying with GAMMA-400 after Fermi-LAT. ICPPA-2016 (International Conference on Particle Physics and Astrophysics). Москва, 2016 г.



20. V.L. Ginzburg and gamma-ray astronomy: from GAMMA-1 to GAMMA-400. Ginzburg centennial conference on physics. Москва, 2017 г.
21. High-energy gamma-ray studying with GAMMA-400. 35-я Международная конференция по космическим лучам, Южная Корея, Пусан, 2017 г.

### **ПУБЛИКАЦИИ**

В основу диссертационной работы положены материалы 36 статей, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, в том числе 16 статей в российских журналах, рекомендованных ВАК.

### **ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА**

Соискатель внес основной вклад на следующих этапах работы: постановка задач, разработка и создание гамма-телескопов, разработка и испытание методик проведения экспериментов, постановка и проведение измерений в космическом пространстве. Аналитические расчеты, компьютерное моделирование и обработка экспериментальных данных осуществлялись при непосредственном участии соискателя. Оформлению публикаций предшествовали коллективные обсуждения. Тексты многих публикаций написаны либо лично, либо при непосредственном участии соискателя.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ МЕТОДАМИ ГАММА-АСТРОНОМИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

## 1.1 Космическое гамма-излучение

Весь спектр космического электромагнитного излучения, возникающего в многочисленных физических процессах во Вселенной и достигающего верхней границы атмосферы Земли, традиционно представляется в виде спектральных диапазонов (Рис. 1.1): от длинноволнового радиодиапазона до наиболее коротковолнового гамма-диапазона с длиной волны менее  $10^{-9}$  см (с энергией более 100 кэВ).

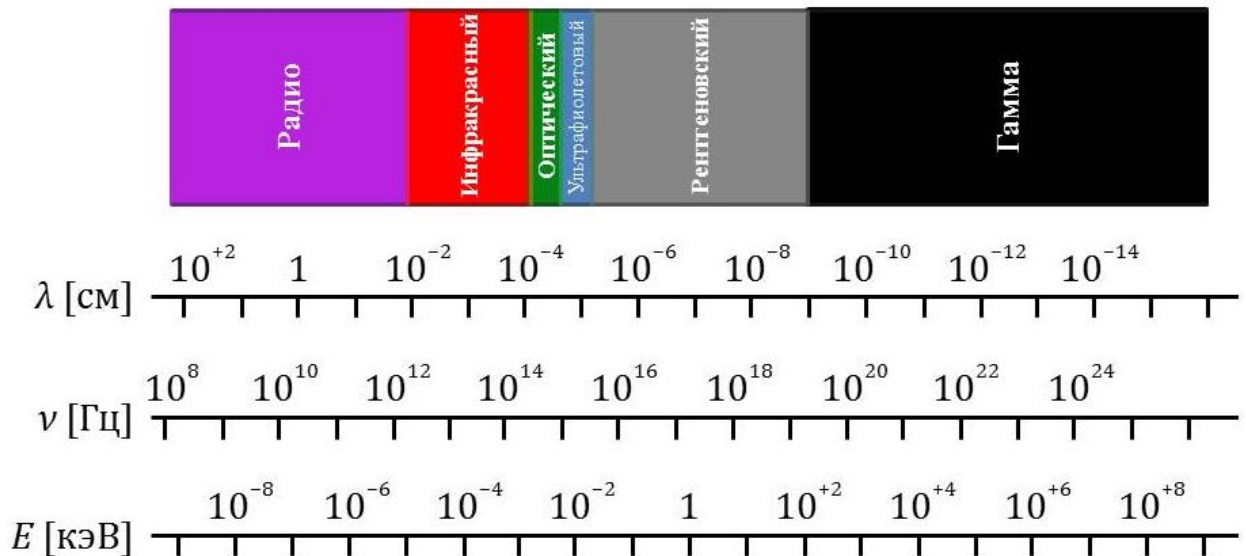


Рис. 1.1 Распределение электромагнитного излучения по спектральным диапазонам.

Космическое гамма-излучение с энергией более 100 кэВ ( $E_\gamma > 0,1$  МэВ) представляет значительный интерес. Оно образуется в процессах взаимодействия высокоэнергичных космических лучей с магнитными полями, с межзвездным и межгалактическим газом, аннигиляции вещества и антивещества, при радиоактивном распаде. Основными механизмами возникновения гамма-излучения являются следующие:

- высокоэнергичные электроны и позитроны в астрофизических объектах рожают синхротронное излучение при движении в магнитных полях, а также тормозное излучение при распространении в среде. Кроме того, возможен процесс рассеяния частиц на реликтовом излучении, практически равномерно заполняющем Вселенную и имеющем температуру 2,7 К, который также приводит к возникновению гамма-излучения. Каждый из механизмов является источником гамма-квантов с непрерывными энергетическими спектрами с отличающимися показателями;

- взаимодействие ядерной компоненты высокоэнергичных космических лучей с межзвездным и с межгалактическим веществом приводит в основном к множественному рождению нейтральных пионов, которые практически мгновенно распадаются на два гамма-кванта. В этом случае энергетический спектр гамма-излучения имеет показатель, близкий к спектру галактических протонов;

- аннигиляция частиц и античастиц - электронов и позитронов, протонов и антипротонов с образованием гамма-квантов или других экзотических частиц и античастиц, составляющих, возможно, темную материю. Если рождаются два гамма-кванта, то энергия каждого из них равна массе покоя частицы, участвующей в процессе аннигиляции. Гамма-излучение в этом случае имеет линейчатые спектры. Согласно современным теоретическим моделям при аннигиляции частиц «темной материи» в космическом излучении могут присутствовать гамма-кванты с энергиями от  $\sim 1$  ГэВ до нескольких ТэВ.

Интенсивность гамма-излучения сравнительно просто связана с такими величинами, как плотность вещества, излучения и космических лучей в источниках. Наблюдение гамма-излучения от различных объектов в совокупности с наблюдениями в других диапазонах приведет нас к более глубокому пониманию их структуры. Результаты гамма-астрономии должны помочь в решении вопроса об источниках космических лучей, о механизме их генерации и распространения в межзвездном и межгалактическом пространстве [4-9].

Исследование гамма-излучения высоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) позволяет получать уникальную информацию:

- о физических условиях в дискретных астрофизических объектах: активных звездах, остатках сверхновых (пульсарах), двойных звездах, черных дырах, микроквазарах, галактиках с активными ядрами, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер);
- о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), в котором происходит распространение и взаимодействие высокоэнергичных космических заряженных частиц, в результате которого появляется высокоэнергичное диффузное гамма-излучение;
- о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек;
- о природе «темной материи», распределении плотности «темной материи» в Галактике и Вселенной, аннигиляции и распаде гипотетических частиц, составляющих «темную материю».

Привлекательной особенностью космического гамма-излучения является высокая проникающая способность. Наша Галактика практически прозрачна для гамма-излучения в широком диапазоне энергий. Однако

гамма-излучение почти полностью поглощается в верхних слоях атмосферы Земли, поэтому прямые наблюдения гамма-излучения осуществляются за пределами атмосферы на орбитальных станциях или космических аппаратах. При взаимодействии с веществом атмосферы сверхвысокоэнергичное гамма-излучение (более 100 ГэВ) создает электромагнитный ливень, продукты которого регистрируют наземные гамма-телескопы.

Внеатмосферная гамма-астрономия обязана своим возникновением и развитием прогрессу в технике полетов и методах детектирования гамма-излучения. Уровень внеатмосферных наблюдений гамма-излучения в диапазоне высоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) определяется возможностью преодоления целого ряда физико-технических трудностей, связанных с созданием гамма-телескопов, обладающих высоким угловым и энергетическим разрешением, и созданием космических аппаратов, позволяющих проводить эти наблюдения. Первые наблюдения гамма-излучения были выполнены в 1967-1969 гг. на космических аппаратах OSO-3, Космос-208, Космос-251, Космос-264, OGO-5. Большой вклад в исследование гамма-излучения от дискретных источников и от солнечных вспышек внес гамма-телескоп ГАММА-1, работавший в 1990-1992 гг. в составе космической обсерватории. В настоящее время гамма-астрономия превратилась в активно развивающуюся область космофизики, приносящую уникальные и ценные наблюдательные данные о Вселенной, демонстрируя свое исключительное место во внеатмосферной астрономии.

## 1.2 Исследование гамма-излучения от дискретных источников

### 1.2.1 Дискретные источники космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий

Дискретные источники гамма-излучения наблюдаются на фоне диффузного гамма-излучения. Там, где диффузный поток сравнительно мал, они выделяются достаточно отчетливо. В областях повышенной интенсивности галактического гамма-излучения они «тонут» в диффузном потоке и для их выделения необходимо высокое угловое разрешение гамма-телескопов. Дискретные источники можно также отождествлять по их энергетическим и временным характеристикам и связывать с определенными астрофизическими объектами. Для отождествления также необходимо одновременное наблюдение таких гамма-источников в других диапазонах электромагнитного излучения (радио, рентген), в том числе и одновременное наблюдение наземными гамма-телескопами.

Гамма-излучение от дискретных источников определяется процессами ускорения заряженных космических частиц в этих источниках и последующим взаимодействием ускоренных частиц с магнитными полями и веществом, имеющимся в этих источниках. В качестве примера приведем активные внегалактические объекты, галактики с активными ядрами – источники космических лучей сверхвысокой энергии и соответственно внегалактического высокоэнергичного гамма-излучения. Это многочисленный класс активных внегалактических объектов, включающих галактики с активными ядрами, радиогалактики, квазары, блазары (галактики с активными ядрами, основная доля электромагнитного излучения которых лежит в гамма-диапазоне). Все эти объекты, возможно, имеют структуру, подобную микроквазарам: гигантская черная дыра массой  $\sim 10^8$ - $10^{10}$   $M_{\odot}$ , аккреция вещества на черную дыру, два джета и ускорение частиц до высокой энергии  $\sim 10^{20}$ - $10^{22}$  эВ. Ускоренные частицы, в свою очередь, являются источником синхротронного и тормозного излучения, идущего от внегалактического объекта.

## 1.2.2 Результаты исследований дискретных источников в космических экспериментах

Первые исследования первичного (внеатмосферного) гамма-излучения с энергией более 30-100 МэВ были выполнены в экспериментах на спутниках OSO-3 (1967-1968 гг.) [10], Космос-208 (1968 г.) [11], АННА-3 (Космос-251, 1968 г. и Космос-264, 1969 г.) [12, 13], OGO-5 (1968 г.) [14]. Было обнаружено гамма-излучение от галактического диска, а также от радиоисточника 3С 120. В ходе наблюдений на спутнике SAS-2 [15, 16] с 1972 по 1973 гг. была получена детальная структура распределения интенсивности гамма-излучения галактического диска с энергией более 35 МэВ, а также обнаружено гамма-излучение от некоторых дискретных источников, таких как Большое и Малое Магеллановы облака, Суг X-3 и др.

Первый каталог дискретных гамма-источников был получен по результатам наблюдений гамма-телескопа на спутнике COS-B [17] с 1975 г. по 1982 г. в диапазоне энергий от 30 МэВ до 5 ГэВ и состоял из 25 источников (Рис. 1.2), из которых только четыре удалось идентифицировать. Это источник Vela, значительная часть гамма-излучения (~90%) от которого определяется излучением пульсара PSR 0833-45. Спектр излучения можно считать степенным с показателем  $\gamma = 1,89$ . Светимость пульсара в диапазоне 100 МэВ – 2 ГэВ равна  $\sim 10^{35}$  эрг/с. Это Crab, излучение пульсара PSR 0531+21 в котором составляет ~75% излучения в гамма-диапазоне. Спектр излучения – степенной с показателем  $\gamma = 2,1$ . Светимость пульсара в интервале энергий 100 МэВ – 2 ГэВ равна  $\sim 5 \times 10^{35}$  эрг/с [18]. Кроме того гамма-источники были отождествлены с квазаром 3С 273 [19], имеющим светимость  $(2-4) \times 10^{46}$  эрг/с, и с облаком водорода  $\rho$ -Змееносца.

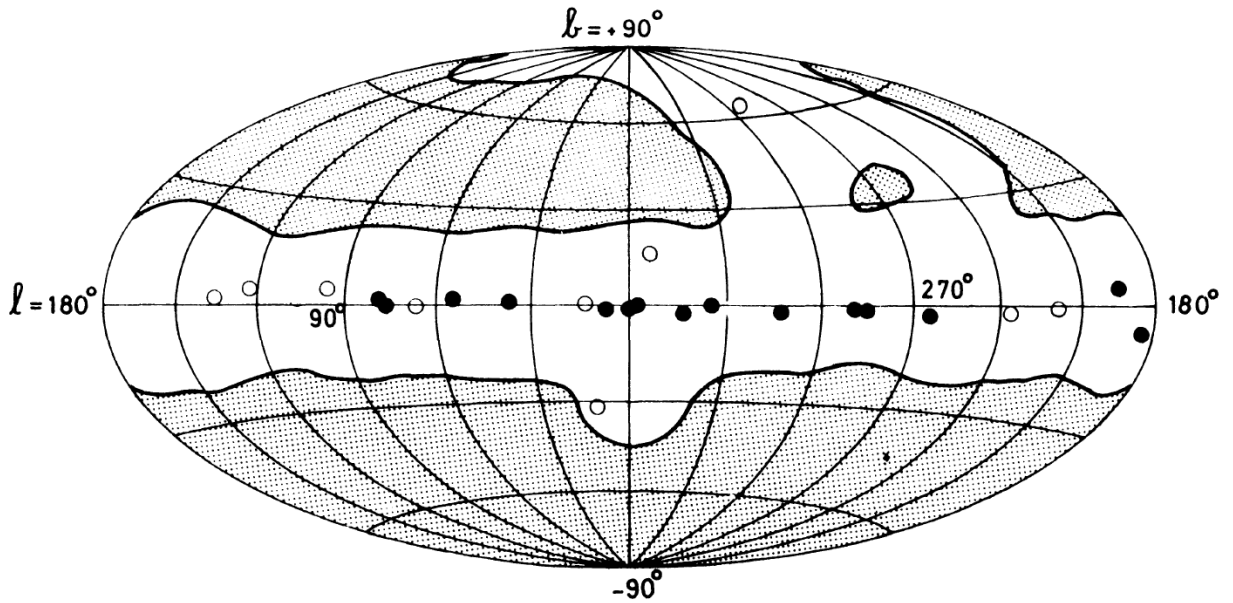


Рис. 1.2 Распределение (в галактических координатах) дискретных источников по данным гамма-телескопа COS-B; черные кружки – источники с потоком более  $1,3 \times 10^{-6}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , светлые кружки – источники с потоком менее  $1,3 \times 10^{-6}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ; заштрихованные области не исследовались [17].

Среди неидентифицированных источников необходимо отметить гамма-источник Geminga (2CG 195+04) – один из самых мощных источников в гамма-диапазоне ( $L_\gamma = 10^{48}$  эрг/с). Однако, небольшое угловое разрешение гамма-телескопа COS-B не позволило однозначно отождествить этот гамма-источник.

Рентгеновский источник Cyg X-3, который наблюдался в широком диапазоне частот от радио- до высокоэнергичного гамма-излучения, не был обнаружен по наблюдениям на COS-B. Это связано с переменностью источника Cyg X-3. Потоки гамма-квантов от Cyg X-3 были впервые обнаружены в двух энергетических интервалах: более 40 МэВ на гамма-телескопе при аэростатных измерениях [20] и более  $10^{12}$  эВ на наземном гамма-телескопе в Крымской астрофизической обсерватории [21]. Совместные наблюдения и анализ выявили периодичность в обоих энергетических интервалах с периодом 4,8 часа [22]. Пересмотр данных



спутника SAS-2 также обнаружил периодический поток гамма-квантов с тем же периодом [16]. Светимость источника Cyg X-3 в гамма-диапазоне составляет величину  $\sim 10^{38}$  эрг/с [23]. Уникальность источника Cyg X-3 требовала дальнейших наблюдений [24].

Дальнейший поиск и исследования высокоэнергичного гамма-излучения от дискретных гамма-источников проводились в эксперименте ГАММА-1 (1990-1992 гг.) в диапазоне энергий 50 МэВ – 5 ГэВ [2, 25-27]. Впервые в мировой практике была осуществлена переориентации космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1, которая позволила эффективно наблюдать дискретные источники. Были исследованы различные пульсары, центр Галактики, Cyg X-3 [28]. Наблюдения пульсара PSR 0833-45 (Vela) [28-33] проводились в трех сериях наблюдений. Анализ кривых светимости позволил определить поток пульсирующего излучения. Он составил  $(1,6 \pm 0,3) \times 10^{-6}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> для энергий более 50 МэВ. Значение полученного потока и его сравнение с результатами COS-B говорит о низкой активности пульсара Vela в период измерений. По данным ГАММА-1 при энергиях более 300 МэВ был получен спектр пульсирующего излучения источника Geminga, который оказался жестче, чем спектр, измеренный COS-B [28, 34, 35]. В трех сериях измерений наблюдалась двойная система Hercules X-1 [28, 36]. Источник Cyg X-3 наблюдался гамма-телескопом ГАММА-1 и не было обнаружено пульсирующего гамма-излучения, но был установлен верхний предел гамма-излучения с периодом 4,8 часа.

Существенно расширил список дискретных источников гамма-телескоп EGRET [37], работавший на космической обсерватории CGRO с 1991 г. по 2000 г. По данным третьего каталога EGRET в диапазоне энергий от 30 МэВ до 20 ГэВ был обнаружен 271 источник, из которых 170 не были идентифицированы (Рис. 1.3, [38]). В диапазоне широт  $|b| < 10^\circ$  представлено 80 источников, из которых 5 пульсаров, одна солнечная вспышка и 74 неидентифицированных источника. Для широт  $|b| > 10^\circ$  представлено 191 источник, включая Большое Магелланово облако, 66 блазаров,

радиогалактика Cen A, 27 активных галактических ядер и 96 неидентифицированных источников. Следует отметить, что около 15 источников из второго каталога EGRET не подтвердились при составлении третьего каталога.

После получения новых данных по межзвездному веществу (HI, CO и др.) и создания новых моделей распространения космических лучей (диффузная модель GALPROP [39-41]) данные EGRET по дискретным источникам были переобработаны и создан новый каталог данных EGRET, получивший название EGR (EGret Revised) [42]. Новый EGR каталог содержит 188 источников (вместо 271), из которых 14 недостоверных (confused). 107 источников из старого каталога EGRET не подтвердились, с другой стороны было обнаружено 30 новых источников.

No. 1, 1999

### THIRD EGRET CATALOG

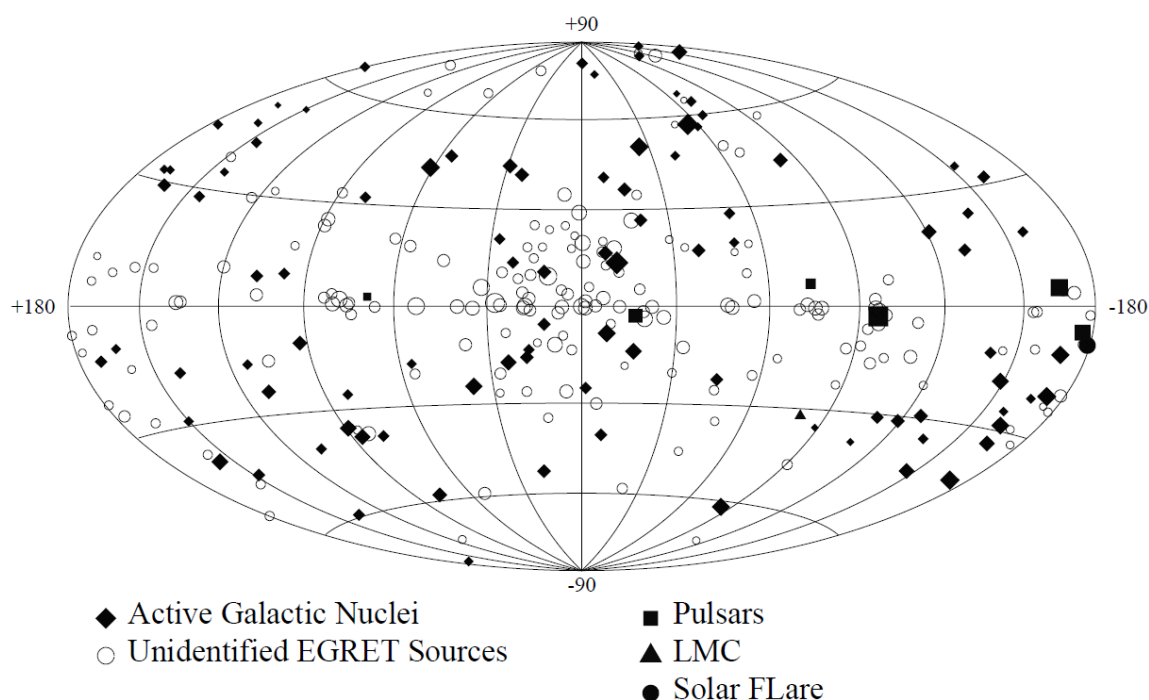


Рис. 1.3 Распределение (в галактических координатах) 271 дискретных источников по данным третьего каталога гамма-телескопа EGRET [38].

С 2007 г. по настоящее время на орбите работает итальянский гамма-телескоп AGILE [43]. Диапазон измерений гамма-излучения 30 МэВ - 50 ГэВ. По наблюдениям AGILE создан каталог из 47 дискретных источников (Рис. 1.4, [44]), из которых 21 ассоциируются с пульсарами или с их кандидатами, 13 с блазарами, 2 с высоко-массивными рентгеновскими двойными системами (HMXRB), 2 со сверхновыми (SRN), 1 с высоко-массивной двойной системой (CWB), 8 неидентифицированы. AGILE обнаружил 5 новых источников (3 блазара и 2 пульсара), не приведенных в каталоге EGRET.

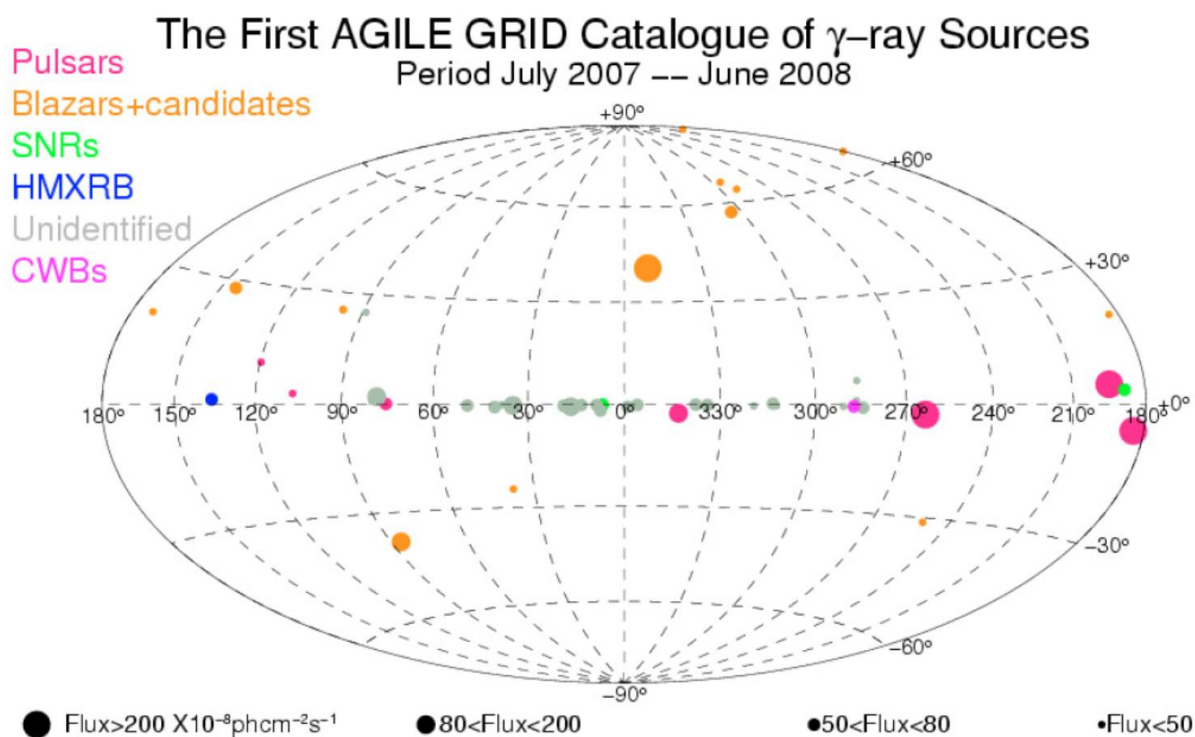


Рис. 1.4 Распределение (в галактических координатах) 47 дискретных источников по данным первого каталога гамма-телескопа AGILE [44].

Обновленный каталог AGILE [45] содержит 54 источника, из которых 7 новых высокоширотных источников, 8 новых источников, лежащих в галактической плоскости, 20 источников из первого каталога AGILE с уточненным положением, 8 источников после новой обработки исключены из каталога.

В июне 2008 г. в США запущена на орбиту космическая обсерватория GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) впоследствии переименованная в Fermi Gamma-ray Space Telescope. Основным инструментом обсерватории является Fermi-LAT (Large Area Telescope), гамма-телескоп для исследования космического гамма-излучения в диапазоне энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ [46, 47]. Главная научная цель – поиск и изучение гамма-источников (блазары, остатки сверхновых, пульсары, неидентифицированные гамма-источники), регистрация диффузного излучения, а также поиск гамма-линий, которые, возможно, возникают при аннигиляции вимпов - суперсимметричных частиц, претендующих на роль частиц «темной материи».

Fermi-LAT проводит наблюдения на околоземной орбите с высотой ~565 км и наклоном  $25^{\circ},5$  в режиме сканирования небесной сферы, совершая полный обзор за три часа. При этом ось телескопа на одной орбите (96 минут) направлена под углом  $+35^{\circ}$  к зениту, а на другой под углом  $-35^{\circ}$  (переориентация на  $180^{\circ}$ ). Время наблюдения небесной сферы составляет 76% от времени работы телескопа и ограничивается перерывами, в том числе при прохождении Южной Атлантической аномалии (~13%). Следует учитывать, что при попадании лимба Земли в поле зрения добавляется дополнительный фон от альбедных гамма-квантов. К настоящему времени по результатам наблюдений Fermi-LAT опубликовано три каталога источников гамма-излучения: 1FGL [48] и 2FGL [49] для диапазона энергий от 100 МэВ до 100 ГэВ, 3FGL [50] для диапазона энергий от 100 МэВ до 300 ГэВ. На Рис. 1.5 приведено процентное соотношение разных типов гамма-источников [51] по данным 3FGL. Кроме того опубликованы три каталога высокоэнергичных источников: 1FHL [52] для энергий более 10 ГэВ, 2FHL [53] для диапазона энергий 50 ГэВ - 2 ТэВ и 3FHL [130] для диапазона энергий 10 ГэВ - 2 ТэВ. В Табл. 1.1 по данным каталогов Fermi-LAT приведено сравнение количества обнаруженных, неидентифицированных, протяженных источников, а также их типы. На Рис. 1.6 и 1.7 показаны

распределения (в галактических координатах) дискретных источников для энергий 100 МэВ – 300 ГэВ по данным третьего каталога Fermi-LAT (3FGL) и для энергий более 10 ГэВ по данным первого каталога Fermi-LAT (1FHL). На Рис. 1.8 показана экспозиция наблюдений источников по данным третьего каталога Fermi-LAT (3FGL) [50]. Из нее видно, например, что за четыре года работы Fermi-LAT наблюдал галактический центр с экспозицией  $16 \times 10^6$  с, что составляет 185 дней, т.е. около 12,6% или  $\sim 1/8$  от всей работы телескопа. Отметим также, что гамма-телескоп Fermi-LAT имеет угловое разрешение  $\sim 0,1^\circ$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ и энергетическое разрешение  $\sim 10\%$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ. На Рис. 1.9 показаны примеры энергетических распределений гамма-источников от некоторых дискретных источников. Видно, что недостаточное энергетическое разрешение для энергий более 10 ГэВ приводит к большим ошибкам при построении энергетических спектров.

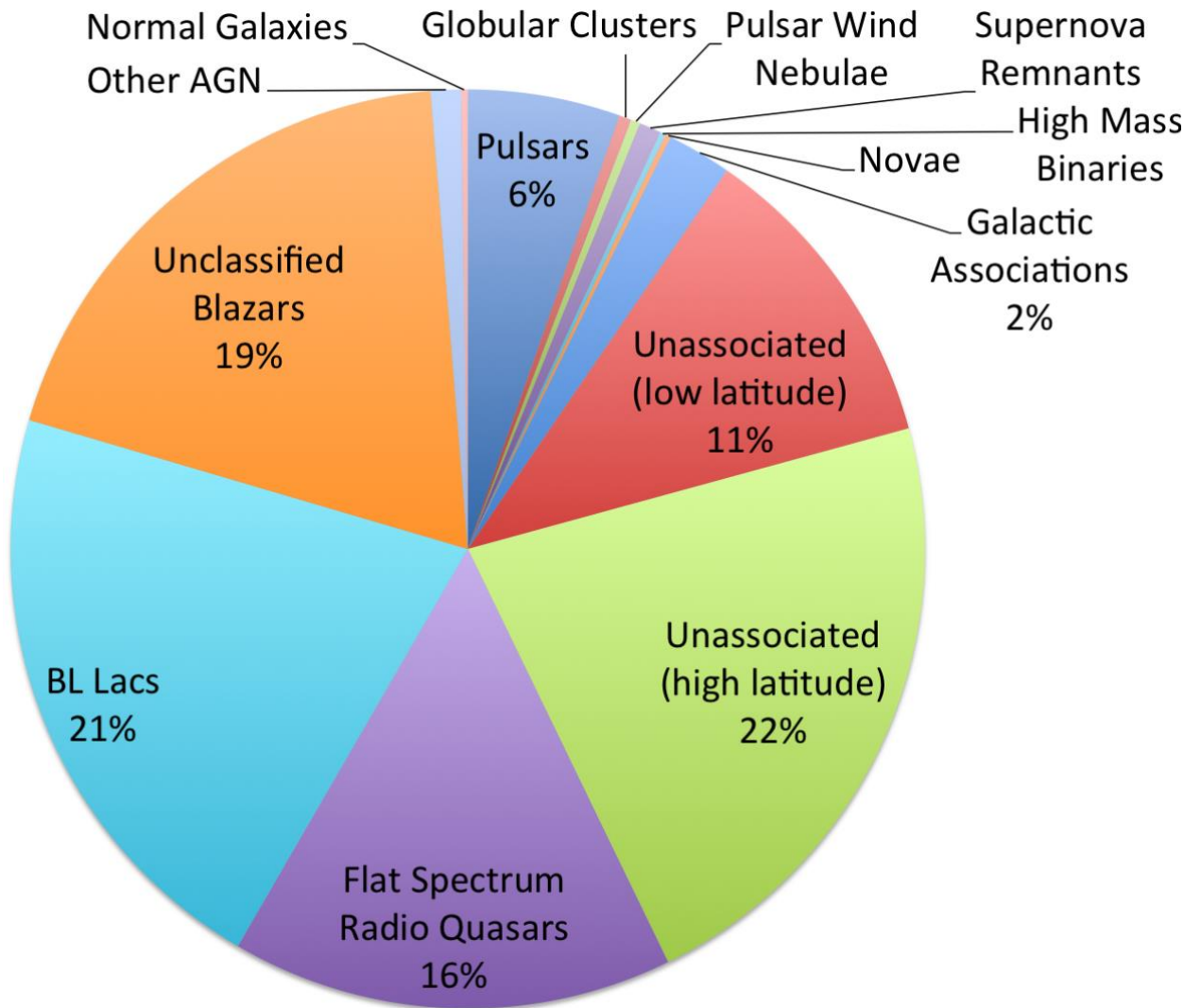


Рис. 1.5 Процентное соотношение разных типов гамма-источников [51] по данным каталога 3FGL [50].

Таблица 1.1

	<b>1FGL [48]</b>	<b>2FGL [49]</b>	<b>3FGL [50]</b>	<b>1FHL [52]</b>	<b>2FHL [53]</b>	<b>3FHL [130]</b>
Диапазон энергий	100 МэВ – 100 ГэВ	100 МэВ – 100 ГэВ	100 МэВ – 300 ГэВ	10 ГэВ – 500 ГэВ	50 ГэВ – 2000 ГэВ	10 ГэВ – 2000 ГэВ
Время наблюдений	~1 год	2 года	4 года	3 года	6,7 лет	7 лет
Количество источников	<b>1451</b>	<b>1873</b>	<b>3033</b>	<b>514</b>	<b>360</b>	<b>1558</b>
Пульсары (PSR)	80	108	166	27	1	65
Пульсары с туманностью (PWN)	2	3	11	9	14	14
Сверхновые и новые (SNR, nova)	38	69	75	14	20	41
Шаровые звездные скопления (GLC)	8	11	15			
Двойные системы (MQO+HXB+HMB+BIN)	0	4	4	3	3	5
Блазары+АГЯ+квазары (BZB+BZQ+BCU+AGN+CSS)	593	817	1152	330	265	1212
Радиогалактики (RDG)	-	12	16	5	6	12
Сейфертовские галактики	-	6	6			1
Активные галактики неопределенного типа (AGU)	92	257	583	58		
Нормальные галактики (GAL)	6	6	8	1	1	
Звездообразующие области (SBG+SFR+LBV)	2	4	5	2	2	6
Неизвестный тип						<b>24</b>
Неидентифицированные	<b>630 (43%)</b>	<b>576 (31%)</b>	<b>992 (33%)</b>	<b>65 (13%)</b>	<b>48 (13%)</b>	<b>178 (11%)</b>

Примечание. PSR (pulsars) – пульсары; PWN (pulsars wind nebula) – пульсары с туманностью, плерионы; SNR (supernova remnant) – сверхновые; nova – новые; GLC (globular cluster) – шаровые звездные скопления; MQO (micro-quasar object) – микроквазары; HXB (high-mass X-ray binary) – рентгеновские двойные системы с большой массой; HMB (high-mass binary) – двойные системы с большой массой; BIN (binary) – двойные системы; BZB (BLL, BL Lac type of blazar) – тип блазаров, лацертиды; BZQ (Flat Spectrum Radio Quasar type of blazar) – тип блазаров, радио квазар с плоским спектром; BLL (blazar candidate of uncertain type) – кандидат в блазары неопределенного типа; AGN (active galactic nuclei) – активные галактические ядра (АГЯ); CSS (compact steep spectrum quasar) – компактный квазар с крутым спектром; RDG (radio galaxy) – радиогалактики; AGU (active galactic of uncertain type) – активные галактики неопределенного типа; GAL – нормальные галактики; SBG (starburst galaxy) – галактики со вспышкой звездообразования; SFR (star forming region) – звездообразующие области; LBV (luminous blue variables) – яркие голубые переменные звезды.

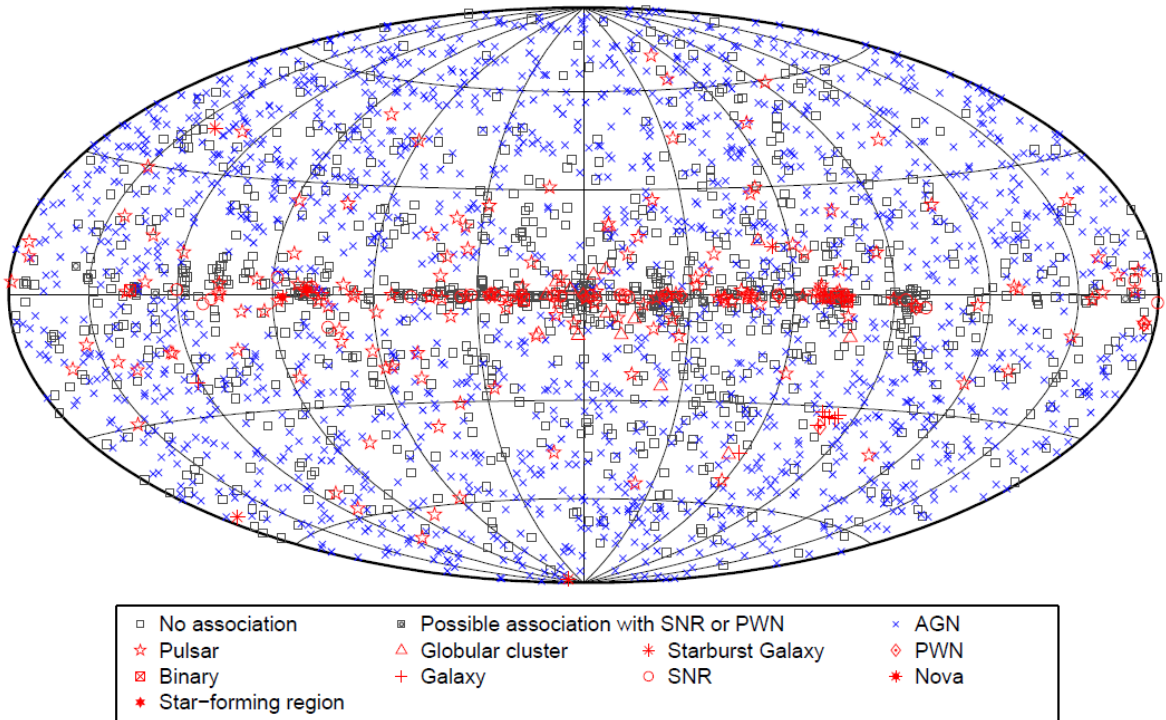


Рис. 1.6 Распределение (в галактических координатах) 3033 дискретных источников для энергий 100 МэВ – 300 ГэВ по данным каталога 3FGL гамма-телескопа Fermi-LAT [50].

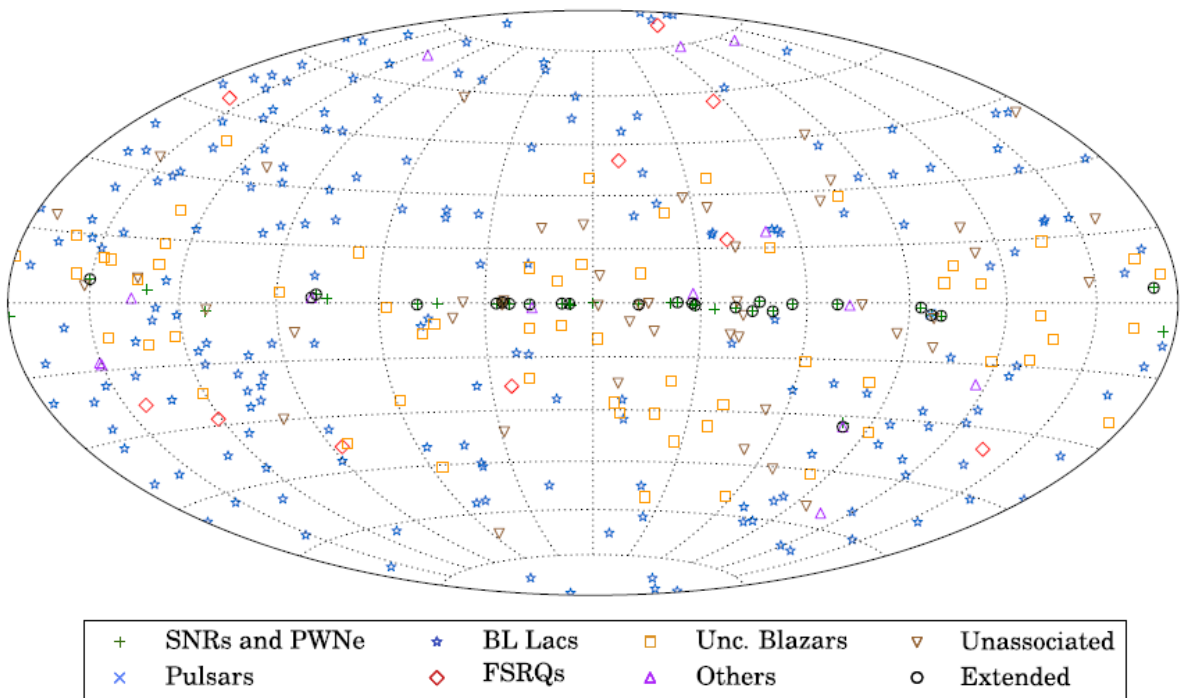


Рис. 1.7 Распределение (в галактических координатах) 360 дискретных источников для энергий 50 – 2000 ГэВ по данным каталога 2FHL гамма-телескопа Fermi-LAT [53].



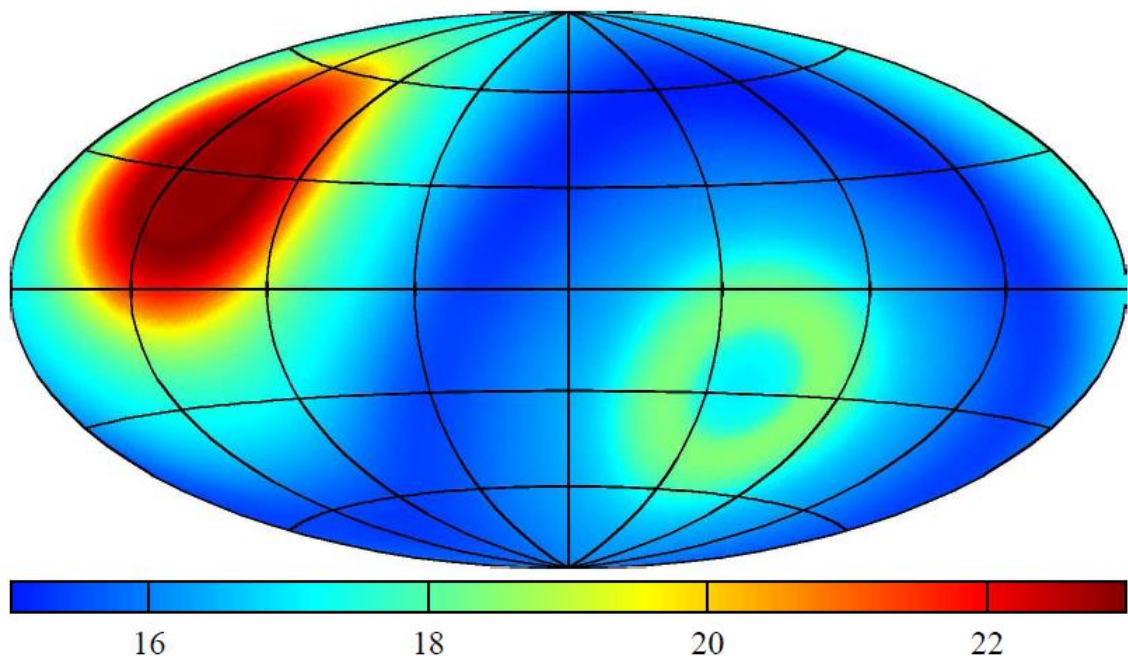


Рис. 1.8 Экспозиция наблюдений Fermi-LAT в галактических координатах за 4 года работы по данным каталога 3FGL, выраженная в  $10^6$  с [50].

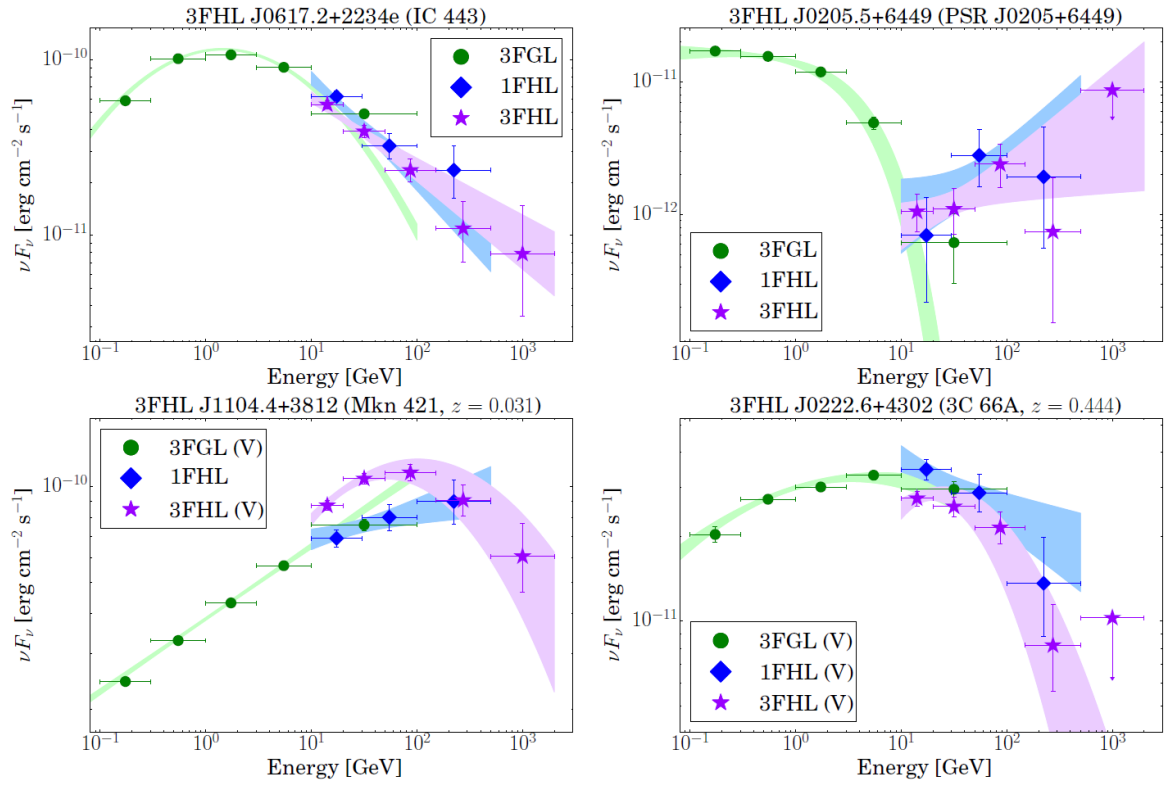


Рис. 1.9 Примеры энергетических спектров гамма-излучения от некоторых источников: IC 443, PSR J0205+6449, Mkn 421, 3C 66A [130].

### *Краткие выводы*

В проведенных и проводимых в настоящее время исследованиях высокоэнергичного гамма-излучения в космических экспериментах обнаружено гамма-излучение от ~3030 дискретных источников (в основном гамма-телескопом Fermi-LAT), причем одна треть источников не идентифицирована. Как видно из Рис. 1.5 доля неразрешенных высокоширотных источников по данным третьего каталога Fermi-LAT (3FGL) составляет 22%, а доля низкоширотных составляет 11%. По нашему мнению, это связано с тем, что Fermi-LAT имеет недостаточное угловое разрешение ( $\sim 0,1^\circ$  при  $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ). Также недостаточно и энергетическое разрешение ( $\sim 10\%$  при  $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ), что приводит к большим ошибкам при построении энергетических спектров для энергий более 10 ГэВ (Рис. 1.9).

Fermi-LAT проводит наблюдения на околоземной орбите с высотой ~565 км и наклоном  $25^\circ,5$  в режиме сканирования небесной сферы, совершая полный обзор за каждые три часа. При этом ось телескопа на одной орбите (96 мин) направлена под углом  $+35^\circ$  к зениту, а на другой (96 мин) под углом  $-35^\circ$  (переворот на  $180^\circ$ ). Время наблюдения небесной сферы составляет 76% от времени работы телескопа и ограничивается некоторыми перерывами, в том числе при прохождении Южной Атлантической аномалии ( $\sim 13\%$ ). Следует также учитывать, что при попадании лимба Земли в поле зрения добавляется дополнительный фон от альбедных гамма-квантов. Выбранная орбита необходима для выполнения основной задачи Fermi-LAT - сканированию всей небесной сферы, что обеспечивает поиск новых мощных гамма-источников, при этом реальное время наблюдения (экспозиция) дискретных гамма-источников в 8 раз меньше времени работы Fermi-LAT [50]. Все это не позволяет проводить длительные непрерывные наблюдения дискретных гамма-источников, многие из которых являются переменными [7].

Для идентификации многих дискретных гамма-источников требуются дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением  $< 0,05^\circ$  при  $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ, а также энергетическим разрешением  $< 2\%$  при  $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) на орбите, позволяющей проводить длительные непрерывные наблюдения.

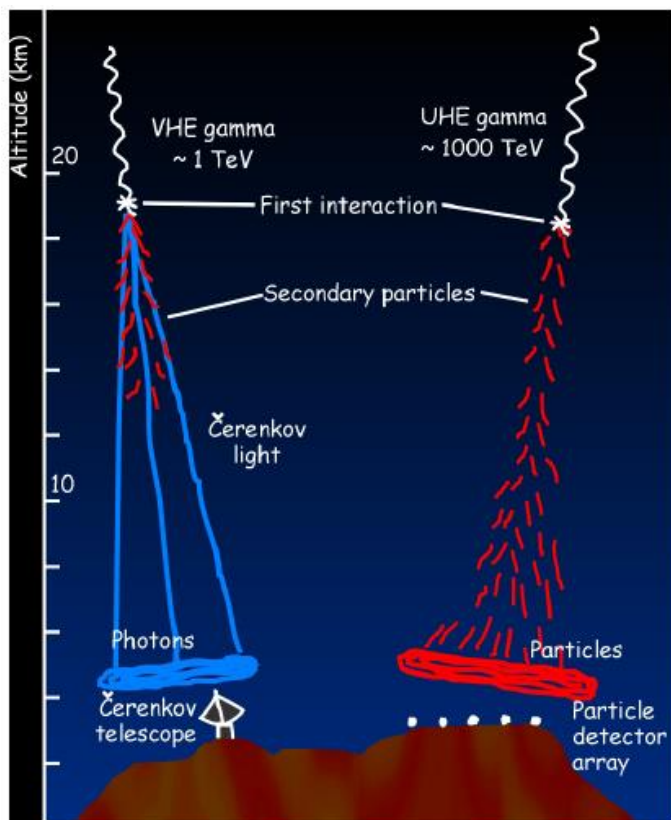
### **1.2.3 Результаты исследований дискретных источников в наземных экспериментах**

Исследования гамма-излучения сверхвысокой энергии ( $\gtrsim 100$  ГэВ) в наземных экспериментах проводят более десятка установок, регистрирующих как черенковское излучение электрон-фотонной компоненты широкого атмосферного ливня (ШАЛ), так и непосредственно заряженные частицы ШАЛ (Рис. 1.10). В этом случае верхняя часть атмосферы выступает как конвертер, а средние и нижние слои как калориметр. Направление на гамма-источник определяется по оси электрон-фотонного ливня.

Первыми попытались обнаружить гамма-излучение от Крабовидной туманности Галбрейт и Джелли в 1952 г. [54]. Однако поток гамма-квантов зарегистрировать не удалось. В 1955 г. на Памирской станции (3860 м) под руководством А.Е. Чудакова впервые в мире была создана специальная установка, регистрирующая черенковское излучение в атмосфере от космических лучей [55]. Метод заключался в регистрации вспышек от черенковского излучения, создаваемого в воздухе электронами широких атмосферных ливней. В 1960 г. на Крымской научной станции ФИАН была создана другая первая в мире установка для поиска локальных источников по их черенковскому излучению в атмосфере [56]. Был получен верхний предел для потока гамма-квантов от Крабовидной туманности с энергией более  $5 \times 10^{12}$  эВ.

Наиболее достоверные результаты были получены в области энергий более 1 ТэВ в 1989 г. на установке Whipple по изучению гамма-излучения от

Крабовидной туманности [57]. Список основных наземных установок по регистрации гамма-излучения сверхвысокой энергии представлен в Табл. 1.2 [58, 59]. Следует также отметить гамма-телескоп в Крымской астрофизической обсерватории [60, 61], впервые обнаруживший в 1972 г. гамма-излучение от Суг Х-3 [21].



Регистрация  
черенковского излучения  
от заряженных частиц,  
образующихся от  
первичного гамма-кванта с  
энергией  $\sim 1$  ТэВ.

Регистрация заряженных  
частиц в ливне ШАЛ,  
образующихся от  
первичного гамма-кванта с  
энергией  $\sim 1000$  ТэВ.

Рис. 1.10 Регистрация черенковского излучения и заряженных частиц в ливне ШАЛ, образующихся от гамма-квантов сверхвысоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ТэВ).

Крупнейшими наземными установками, регистрирующими гамма-излучение сверхвысокой энергии, являются:

- VERITAS [62], MAGIC [63], H.E.S.S. [64], FACT [65], CANGAROO [66], а также создающийся гамма-телескоп СТА [67], который будет обладать наилучшими характеристиками. Эти гамма-телескопы регистрируют черенковское излучение от гамма-излучения с помощью зеркального

построения образа источника; такие установки получили название Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT);

- Milagro [68], HAWC [69] и LHASSO-WCDA [70] - установки, регистрирующие гамма-излучение с помощью водных черенковских детекторов

- ARGO-YBJ [71], Tibet [72], HiSCORE [73] - установки, регистрирующие гамма-излучение с помощью детекторов ШАЛ.

Отметим также, что наземные гамма-телескопы имеют угловое разрешение  $\sim 0,1^\circ$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ и энергетическое разрешение  $\sim 10-15\%$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ.

Таблица 1.2 Основные наземные установки для измерения гамма-излучения сверхвысоких энергий.

Название	Высота км	Площадь м <sup>2</sup>	Поле зрения	Начало работы	Порог ГэВ	Располо- жение
КРАО	0,6	36	2,6°	1969 (РЧВ-1) 1989 (ГТ-48)	1000	Крым
Whipple	2,3	75	2,2°	1985	400	Аризона, США
ШАЛОН	3,3	2x11,2	8°	1992	800	Тянь-Шань, Казахстан
H.E.S.S. - H.E.S.S.-II	1,8	4x107 1x615	5° 3,6°	2003 2012	100 30	Намибия
MAGIC - MAGIC-II	2,2	236 2x226	3,5°	2005 2009	50 50	Канарские о-ва, Испания
CANGARO O	0,1	4x57	4°	2006	400	Австралия
VERITAS	1,3	4x106	3,5°	2007	100	Аризона, США
Milagro	2,6	80x60	2 ср	1999	100	Лос Аламос, США
HAWC	4,1	150x150	2 ср	2007	50	Мексика
СТА (проект)		10000	5°	2020	20	Испания, Чили

Данные о 181 дискретных источниках для энергии гамма-излучения более 100 ГэВ, полученные наземными установками, представлены в каталоге TevCat (<http://tevcat.uchicago.edu/>) (Рис. 1.11).

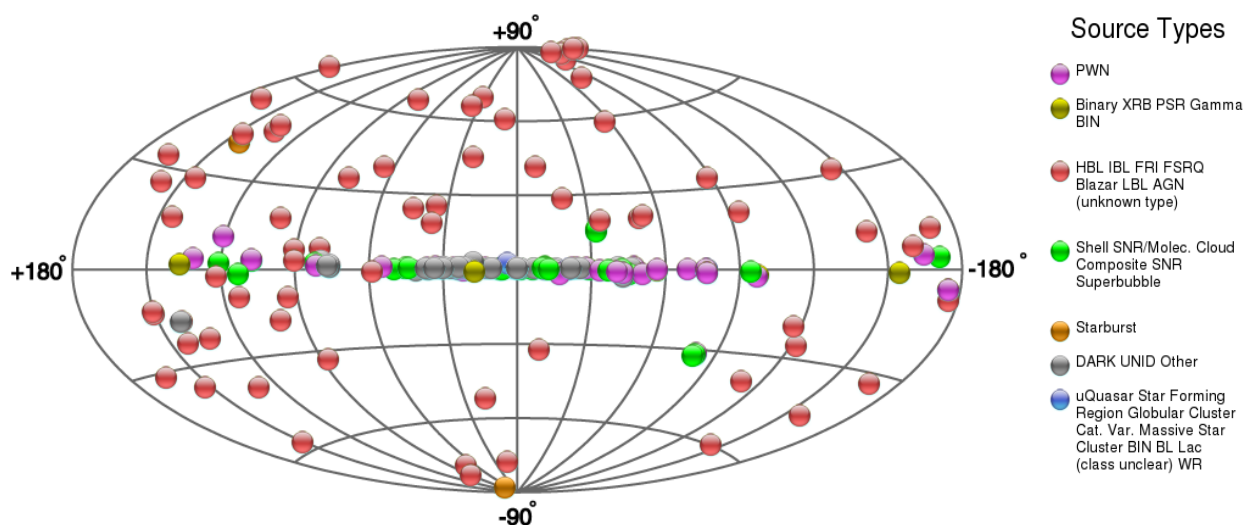


Рис. 1.11 Распределение (в галактических координатах) 181 дискретных источников для энергий более 100 ГэВ по данным каталога источников TevCat (<http://tevcat.uchicago.edu/>), гамма-излучение от которых зарегистрировано наземными установками.

Стоит также отметить, что H.E.S.S. (<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/home/som/2016/01/>) зарегистрировал гамма-излучение от 77 источников, причем 47 из них неидентифицированы (Рис. 1.12).

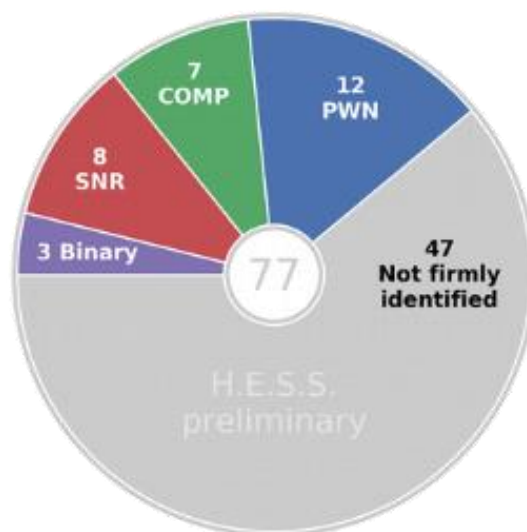


Рис. 1.12 Состав дискретных гамма-источников, зарегистрированных H.E.S.S.

### *Краткие выводы*

В настоящее время наземные установки по регистрации гамма-излучения сверхвысоких энергий ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) зарегистрировали гамма-излучение от 181 источника, что составляет  $\sim 6\%$  от числа источников, зарегистрированных Fermi-LAT согласно 3FGL ( $E_\gamma = 100$  МэВ – 300 ГэВ) или  $\sim 12\%$  от числа источников, зарегистрированных Fermi-LAT согласно 3FHL ( $E_\gamma = 10$  ГэВ – 2000 ГэВ). В основном, наземные установки проводят наблюдения по целеуказаниям от космических гамма-телескопов. Поиск новых гамма-источников они не проводят. Регистрация гамма-квантов проводится косвенными методами: по черенковскому излучению и по наблюдениям широких атмосферных ливней. При низкой интенсивности потока гамма-излучения сверхвысоких энергий ( $\leq 10^{-12}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ ) от источников требуется его надежное выделение на фоне диффузного гамма-излучения и во много раз превышающего потока широких атмосферных ливней от заряженных частиц космических лучей. Необходимо также контролировать толщину и прозрачность атмосферы.

Наземные установки имеют недостаточное угловое ( $\sim 0,1^\circ$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ) и энергетическое ( $\sim 10-15\%$  для  $E_\gamma = 100$  ГэВ) разрешения.



## 1.3 Исследование диффузного гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий

### 1.3.1 Диффузное гамма-излучение

Диффузное гамма-излучение представляет собой сумму нескольких компонентов: диффузное галактическое и внегалактическое гамма-излучение, а также вклад неразрешенных гамма-источников.

В галактической плоскости преобладает диффузное галактическое гамма-излучение от взаимодействия космических лучей с межзвездным газом с образованием и распадом  $\pi^0$ -мезонов, тормозным излучением высокоэнергичных космических электронов и излучением при обратном комптоновском рассеянии электронов на низкоэнергичном межзвездном излучении. Наблюдаемый поток диффузного галактического излучения определяется, в первую очередь, плотностью вещества и магнитных полей в межзвездном пространстве, а также пространственным распределением космических лучей. Диффузное галактическое излучение моделируется с помощью программы GALPROP ([39-41], <http://galprop.stanford.edu/>). GALPROP – это численная программа для расчета распространенности заряженных частиц и диффузных излучений, образованных при их распространении. Программа рассчитывает распространение ядер, антипротонов, электронов и позитронов космических лучей, а также диффузное гамма-излучение и синхротронное излучение. Наблюдение диффузного галактического гамма-излучения является инструментом изучения происхождения и распространения космических лучей и межзвездного вещества. Точные данные о диффузном излучении в области центра Галактики необходимы также для построения моделей распространения темной материи.

Знание диффузного излучения необходимо для его выделения от гамма-излучения дискретных (точечных и протяженных) источников. Для выявления неразрешенных гамма-источников на фоне диффузного излучения гамма-телескопы должны обладать высоким угловым разрешением.

Диффузное внегалактическое излучение, если исключить внегалактические дискретные источники, такие как активные галактические ядра, звездообразующие галактики и др., представляет собой изотропное диффузное гамма-излучение (isotropic diffuse gamma-ray background, IGRB [74]) и возникает при взаимодействии высокоэнергичной ядерной компоненты космического излучения с межгалактическим веществом.

### **1.3.2 Результаты исследования диффузного гамма-излучения в космических экспериментах**

Первые исследования диффузного гамма-излучения были проведены в 1967-1968 гг. на спутнике OSO-3 [14]. Была обнаружена анизотропия фонового излучения по галактической широте и долготе для энергий гамма-квантов  $E_\gamma > 50$  МэВ и высокая концентрация гамма-излучения вдоль галактического экватора, особенно для галактического центра. Наблюдения на спутниках SAS-2 [75] и COS-B [76] обнаружили связь распределения галактического диффузного гамма-излучения с распределением космических лучей и межзвездного вещества.

В наблюдениях, выполненных в рамках эксперимента EGRET, было детально исследовано диффузное галактическое гамма-излучение в диапазоне энергий от 30 МэВ до 30 ГэВ для галактических широт  $|b| \leq 10^\circ$  при вычитании вклада дискретных источников. На Рис. 1.13 представлен усредненный спектр диффузного гамма-излучения для области Галактики  $60^\circ < l < 300^\circ$ ,  $|b| \leq 10^\circ$  при вычитании вклада дискретных источников [77]. При энергии более 1 ГэВ измеренная интенсивность гамма-излучения значительно превышала модельные значения.

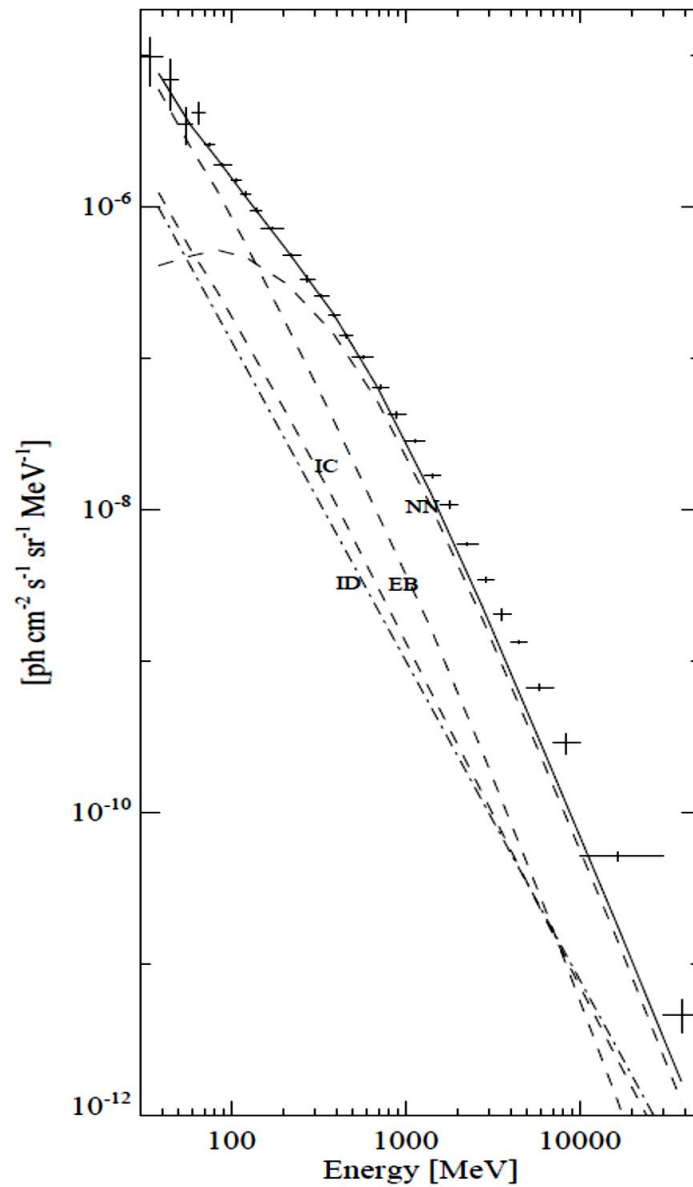


Рис. 1.13 Усредненный спектр диффузного гамма-излучения для области Галактики  $60^\circ < l < 300^\circ$ ,  $|b| \leq 10^\circ$  при вычитании вклада дискретных источников [77]. Показаны также результаты расчета отдельных вкладов нуклон-нуклонных взаимодействий (NN), тормозного излучения электронов (EB), излучения при обратном комптоновском рассеянии электронов (IC) и изотропного диффузного излучения (ID).

При вычитании галактического диффузного гамма-излучения из данных, полученных гамма-телескопом EGRET, остается изотропное гамма-излучение, образующееся за пределами нашей Галактики [78]. Проведенный анализ показал, что внегалактическое излучение хорошо описывается степенным спектром с показателем  $-(2,10 \pm 0,03)$  в диапазоне энергий от 30 МэВ до 120 ГэВ. На Рис. 1.14 представлен спектр внегалактического диффузного гамма-излучения [78].

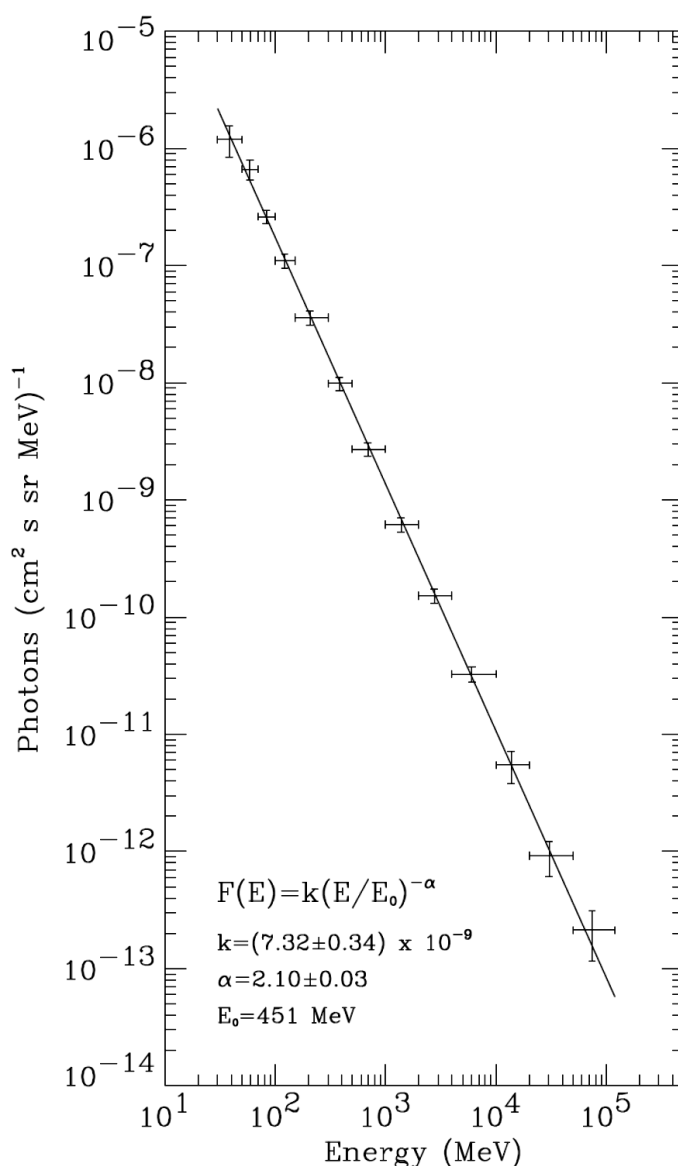


Рис. 1.14 Спектр внегалактического диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий от 30 МэВ до 120 ГэВ по данным EGRET [78].

Необходимо отметить, что в [79], используя модель GALPROP для определения распространенности космических лучей [39-41], были получены новые данные о вкладе диффузного галактического гамма-излучения и о вкладе внегалактического гамма-излучения. Интенсивность внегалактического гамма-излучения оказалась меньше и с более крутым спектром.

Регистрация космического гамма-излучения, выполняемая Fermi-LAT с 2008 г., показала, что 80% всех зарегистрированных гамма-квантов с энергией более 100 МэВ относятся к диффузному излучению. На Рис. 1.15 показана карта неба в гамма-лучах за 5 лет наблюдений Fermi-LAT, а также различные компоненты диффузного гамма-излучения (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/diffuse/>).

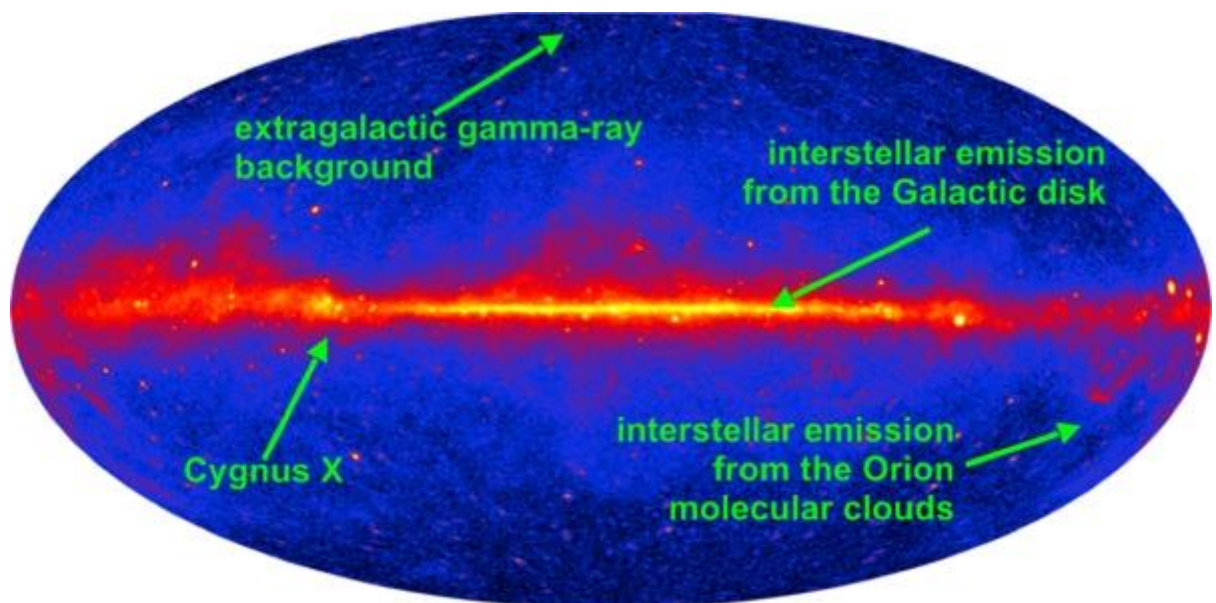


Рис. 1.15 Карта неба в гамма-лучах за 5 лет наблюдений Fermi-LAT и различные компоненты диффузного гамма-излучения (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/diffuse/>): межзвездное излучение от Галактического диска (interstellar emission from the Galactic disk), внегалактическое фоновое гамма-излучение (extragalactic gamma-ray background), межзвездное излучение от молекулярных облаков в области Орион (interstellar emission from the Orion molecular clouds); излучение от области Cygnus X.

Измерения диффузного гамма-излучения с помощью Fermi-LAT [80] показали, что основные процессы образования гамма-квантов для межзвездного галактического излучения понятны, а высокая статистическая значимость данных Fermi-LAT позволила уточнить соответствующие модели излучения. Такие модели имеют основополагающее значение как для изучения источников гамма-излучения и диффузных компонент, так и для понимания межзвездной среды и распространения космических лучей в Галактике.

Межзвездное гамма-излучение отслеживает плотность космических лучей по всей Галактике. Одним из неожиданных результатов Fermi-LAT является указание, что плотность космических лучей для внешней Галактики больше, чем было предсказано. Избыточная плотность космических лучей может быть обусловлена широким «галло» космических лучей в Млечном Пути, способствующим распространению космических лучей во внешнюю Галактику, или неравномерной диффузией или конвекционными процессами. В качестве альтернативы, этот избыток может быть связан с моделями излучения, которые недооценили количество газа, присутствующего в этих областях. Следует также отметить, что измеренная Fermi-LAT интенсивность галактического диффузного гамма-излучения, при энергии 10-50 ГэВ ниже, чем в измерениях EGRET; это различие становится принципиальным при интерпретации природы диффузного излучения и требует улучшения углового и энергетического разрешений.

Fermi-LAT выполнил новые измерения спектра внегалактического гамма-излучения в диапазоне энергий от 100 МэВ до 820 ГэВ (Рис. 1.16, [81]). Этот результат является первым измерением спектра внегалактического гамма-излучения выше 100 ГэВ. Сравнение спектра внегалактического гамма-излучения со спектрами излучения от разрешенных внегалактических источников указывает на значительную долю в нем неразрешенных источников.

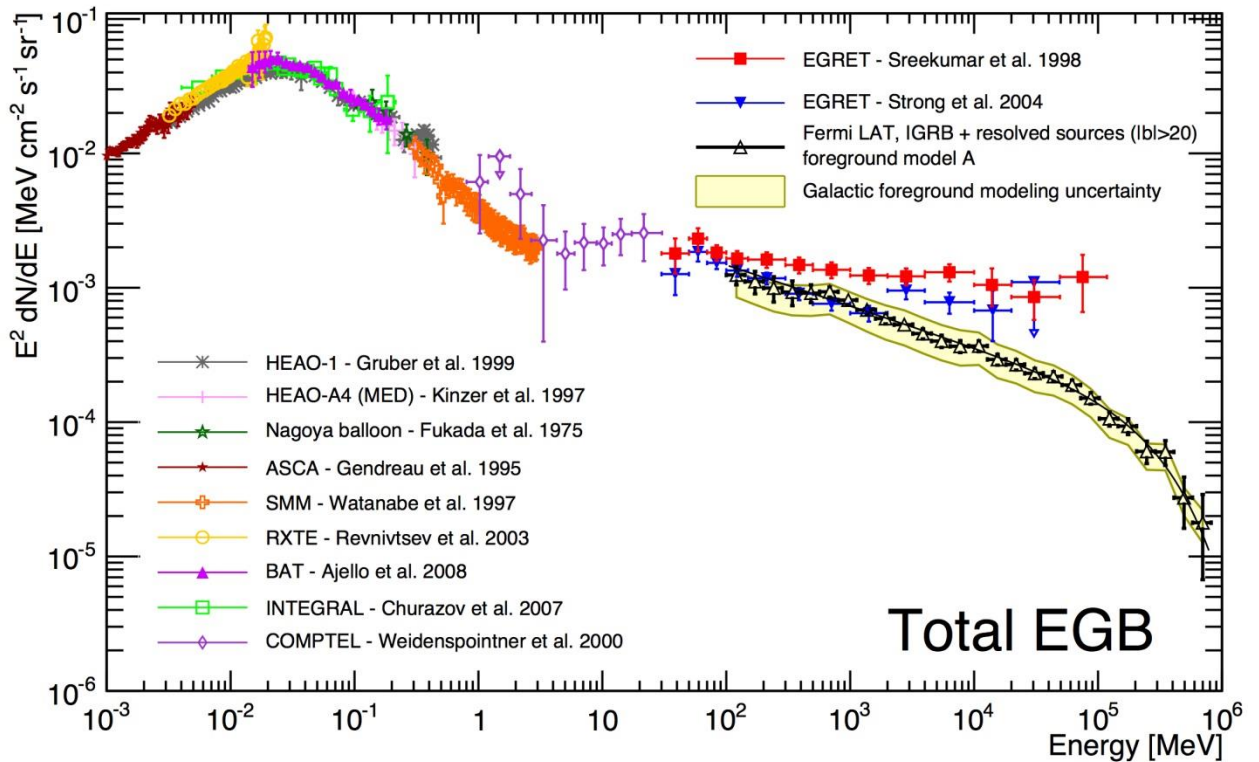
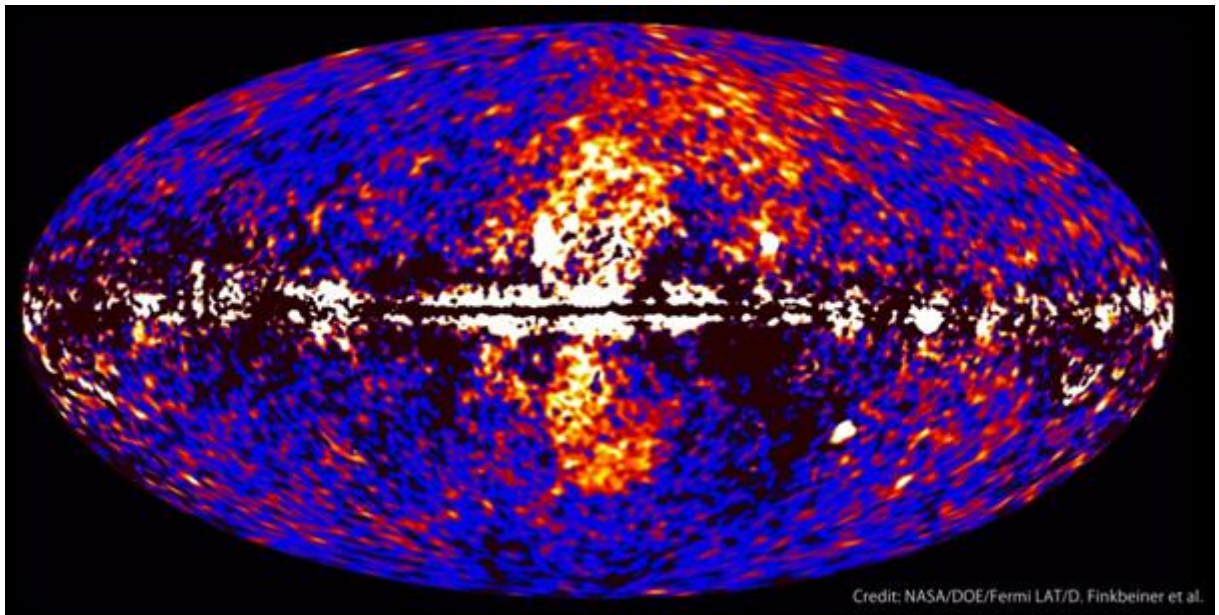


Рис. 1.16 Сравнение интенсивности внегалактического фонового гамма-излучения (EGB) с измерения в рентгеновском и гамма диапазонах [81].

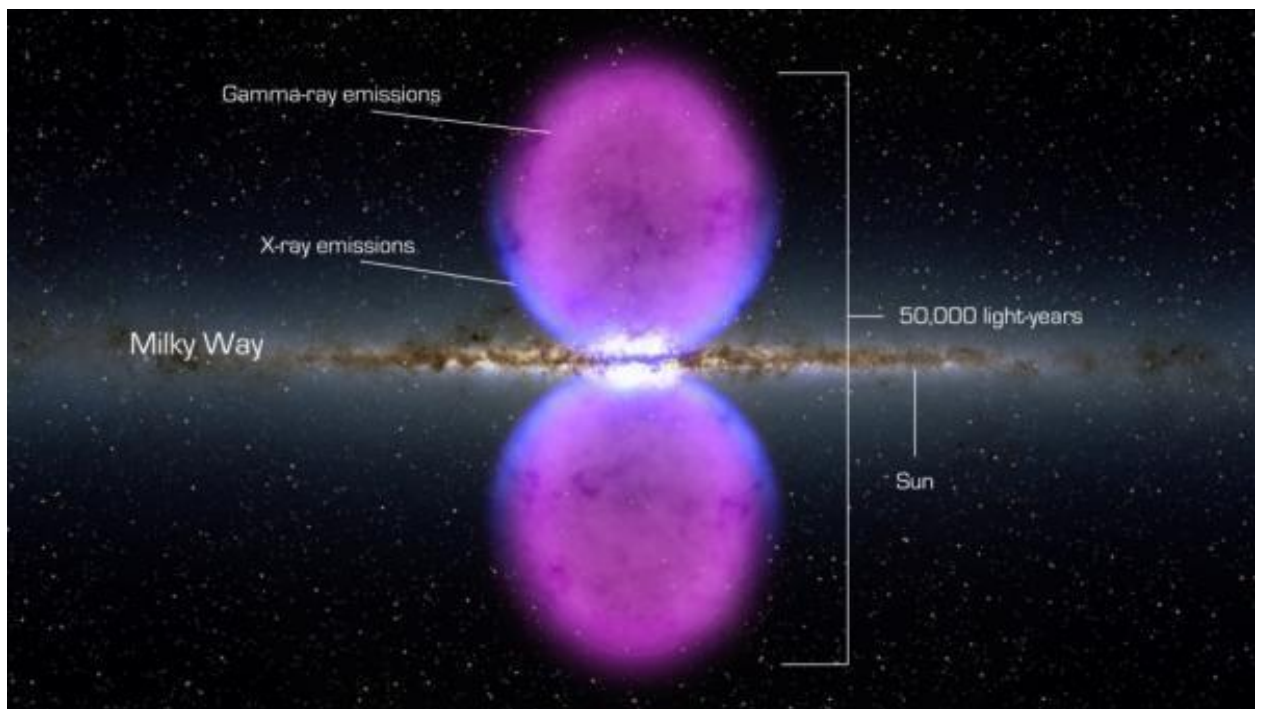
Анализ данных по диффузному гамма-излучению, полученных Fermi-LAT в диапазоне энергий от 100 МэВ до 500 ГэВ выше  $10^\circ$  галактической широты, выявил два гигантских пузыря (Fermi bubbles), простирающихся до  $55^\circ$  на север и на юг от плоскости нашей Галактики и имеющих стенки, излучающие в рентгеновском диапазоне ([82, 83], Рис. 1.17а и б, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/new-structure.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/new-structure.html)).

Протяженность каждого пузыря составляет около 25000 световых лет. Они излучают мощный поток энергии, эквивалентный взрыву ста тысяч сверхновых звезд. Ориентировочный возраст пузырей составляет несколько миллионов лет. По одной из версий пузыри являются своеобразными следами выбросов энергии гигантской черной дыры, расположенной в центре нашей Галактики.





a)



б)

Рис. 1.17 Гигантские пузыри в гамма и рентгеновском диапазонах к северу и югу от галактической плоскости, обнаруженных по данным Fermi-LAT ([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/new-structure.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/new-structure.html)).



Существование пузырей в нашей Галактике приводит к естественному предположению о возможном существовании подобных структур и у иных галактик. В [84], используя данные Fermi-LAT, выявлены аналогичные пузыри у Туманности Андромеды (M31).

### **1.3.3 Результаты исследования диффузного гамма-излучения в наземных экспериментах**

Длительные исследования диффузного галактического гамма-излучения провели Milagro [85] для энергий вблизи 10 ТэВ и ARGO-YBJ [86] для энергий вблизи 1 ТэВ. На Рис. 1.18 представлено сравнение энергетических спектров галактического диффузного гамма-излучения для областей  $25^\circ < l < 65^\circ$ ,  $|d| < 2^\circ$  и  $65^\circ < l < 85^\circ$ ,  $|d| < 2^\circ$  после вычитания гамма-излучения от известных дискретных источников по данным Fermi-LAT, Milagro и ARGO-YBJ. Необходимо отметить, что Milagro обладает угловым разрешением  $0,5^\circ$  ( $E_\gamma = 10$  ТэВ), а ARGO-YBJ –  $0,2^\circ$  ( $E_\gamma = 1$  ТэВ), что недостаточно для надежного выделения диффузного гамма-излучения от гамма-излучения известных дискретных источников. Наблюдения диффузного галактического гамма-излучения, выполненные H.E.S.S. с лучшим угловым разрешением  $0,1^\circ$  ( $E_\gamma = 1$  ТэВ), показали, что диффузное галактическое гамма-излучение для энергий более 100 ГэВ определяется в основном процессами обратного комптоновского рассеяния и распадом нейтральных пионов, а также возможным вкладом неразрешенных дискретных источников [87].

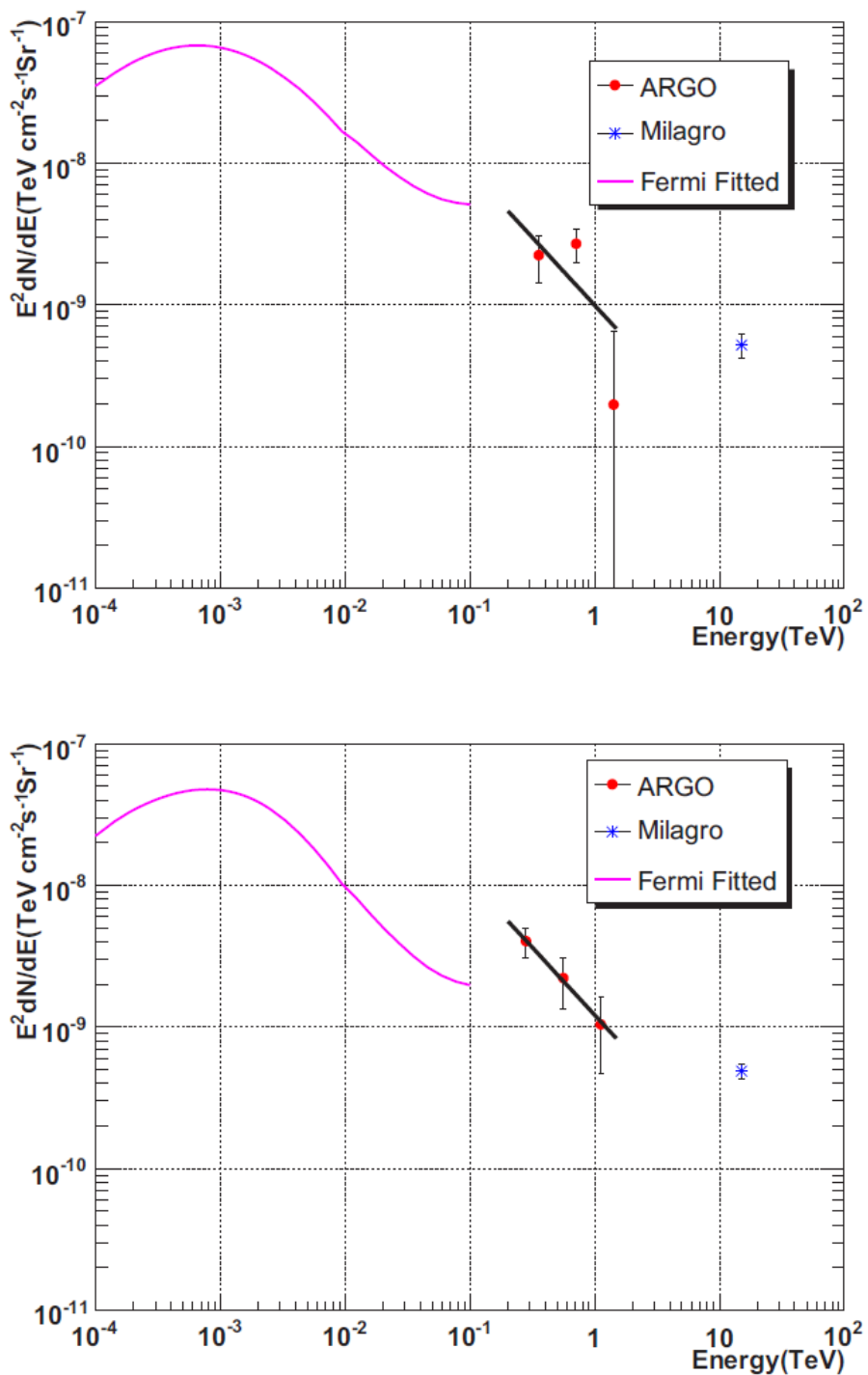


Рис. 1.18 Сравнение энергетических спектров галактического диффузного гамма-излучения для областей  $25^\circ < l < 65^\circ, |d| < 2^\circ$  (верхний рисунок) и  $65^\circ < l < 85^\circ, |d| < 2^\circ$  (нижний рисунок) после вычитания гамма-излучения от известных дискретных источников по данным Fermi-LAT, Milagro и ARGO-YBJ [87].

### *Краткие выводы*

Наблюдение диффузного галактического гамма-излучения является инструментом изучения происхождения и распространения космических лучей и межзвездного вещества. Точные данные о диффузном излучении в области центра Галактики необходимы также для построения моделей распространения темной материи. Знание диффузного излучения необходимо для его выделения от гамма-излучения дискретных (точечных и протяженных) источников.

Измеренная Fermi-LAT интенсивность галактического диффузного гамма-излучения, при энергии 10-50 ГэВ ниже, чем в измерениях EGRET; это различие становится принципиальным при интерпретации природы диффузного излучения и требует дальнейших исследований с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

Сравнение спектра внегалактического гамма-излучения со спектрами излучения от разрешенных внегалактических источников указывает на значительное долю в нем неразрешенных источников. Для выявления неразрешенных гамма-источников на фоне диффузного (галактического и внегалактического) излучения гамма-телескопы должны обладать высоким угловым разрешением.

Наблюдения диффузного галактического гамма-излучения, наземными установками с угловым разрешением  $0,1^\circ$  ( $E_\gamma = 1$  ТэВ), показали, что диффузное галактическое гамма-излучение для энергий более 100 ГэВ определяется в основном процессами обратного комптоновского рассеяния и распадом нейтральных пионов, а также возможным вкладом неразрешенных дискретных источников [87].

Таким образом, для выделения диффузного галактического и внегалактического гамма-излучения от гамма-излучения дискретных источников (галактических и внегалактических), среди которых много неразрешенных, требуются дальнейшие исследования с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

### 1.4 Исследование высокоэнергичного гамма-излучения от Солнца

Высокоэнергичное гамма-излучение от Солнца исследовалось как при солнечных вспышках, так и в период низкой солнечной активности.

Солнечные вспышки представляют собой взрывные явления, в результате которых происходит испускание электромагнитного излучения от радио- до гамма-излучения. Принято считать, что энергия магнитного поля, заключенная в солнечной короне и освобожденная в результате перезамыкания магнитных линий, является источником ускорения электронов и ионов до релятивистских энергий. Пучки протонов, альфа-частиц и электронов высоких энергий проходят через солнечную атмосферу, взаимодействуют с ней и приводят к появлению сопутствующего гамма-излучения (Рис. 1.19) [88]. Исследование гамма-излучения высоких энергий от солнечных вспышек призвано выяснить роль ядерных процессов во вспышке, механизм ускорения частиц и взаимодействия ускоренных пучков с солнечной атмосферой.

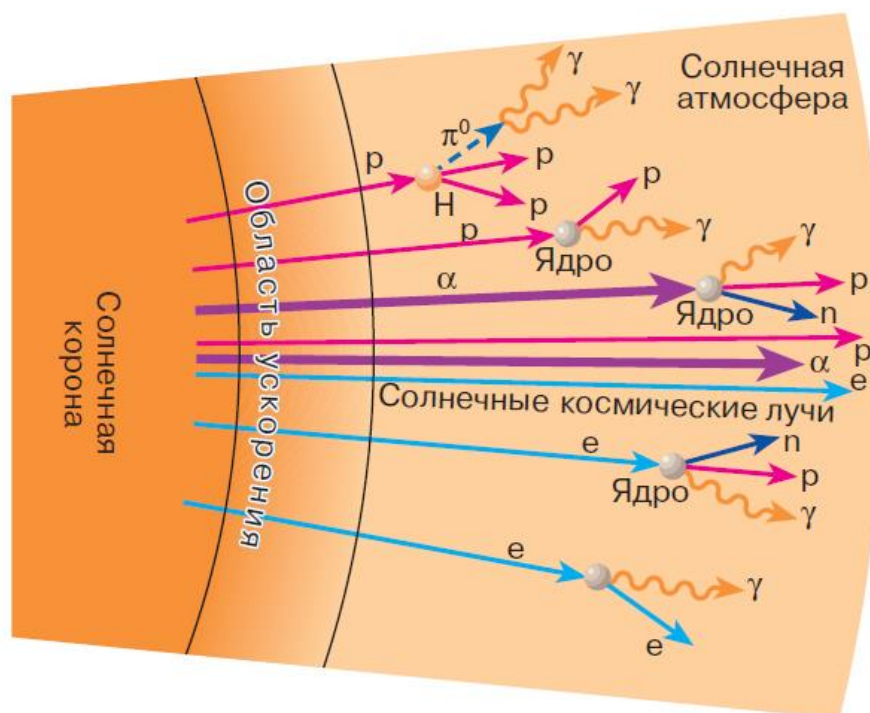


Рис. 1.19 Схема взаимодействия ускоренных частиц с атомами солнечной атмосферы [88].

Впервые гамма-излучение от солнечных вспышек было зарегистрировано в аэростатном эксперименте 20 марта 1958 г. [89]. Оно интерпретировалось как тормозное с энергией до 0,5 МэВ, образованное в солнечной атмосфере электронами с энергией 0,5-1,0 МэВ. Большое число солнечных вспышек, сопровождающихся гамма-излучением с энергией до 140 МэВ, было зарегистрировано спектрометром на обсерватории Solar Maximum Mission (SMM) в период 21-го солнечного цикла (1980-1985 гг.) [90].

По прогнозу предвспышечной активности Солнца проводилась переориентация космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1 на Солнце для наблюдения солнечных вспышек. Регистрация гамма-квантов высокой энергии в солнечных вспышках была проведена гамма-телескопом ГАММА-1 во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/Х4,7) и 15 июня (класс 3В/Х12+) 1991 г. (Рис. 1.20). Вспышка 26 марта была обусловлена тормозным излучением первичных ускоренных электронов, а вспышка 15 июня, длившаяся около 2 часов, – гамма-излучением от распада  $\pi^0$ -мезонов. В обеих вспышках впервые было зарегистрировано гамма-излучение с энергией более 1 ГэВ [91-96].

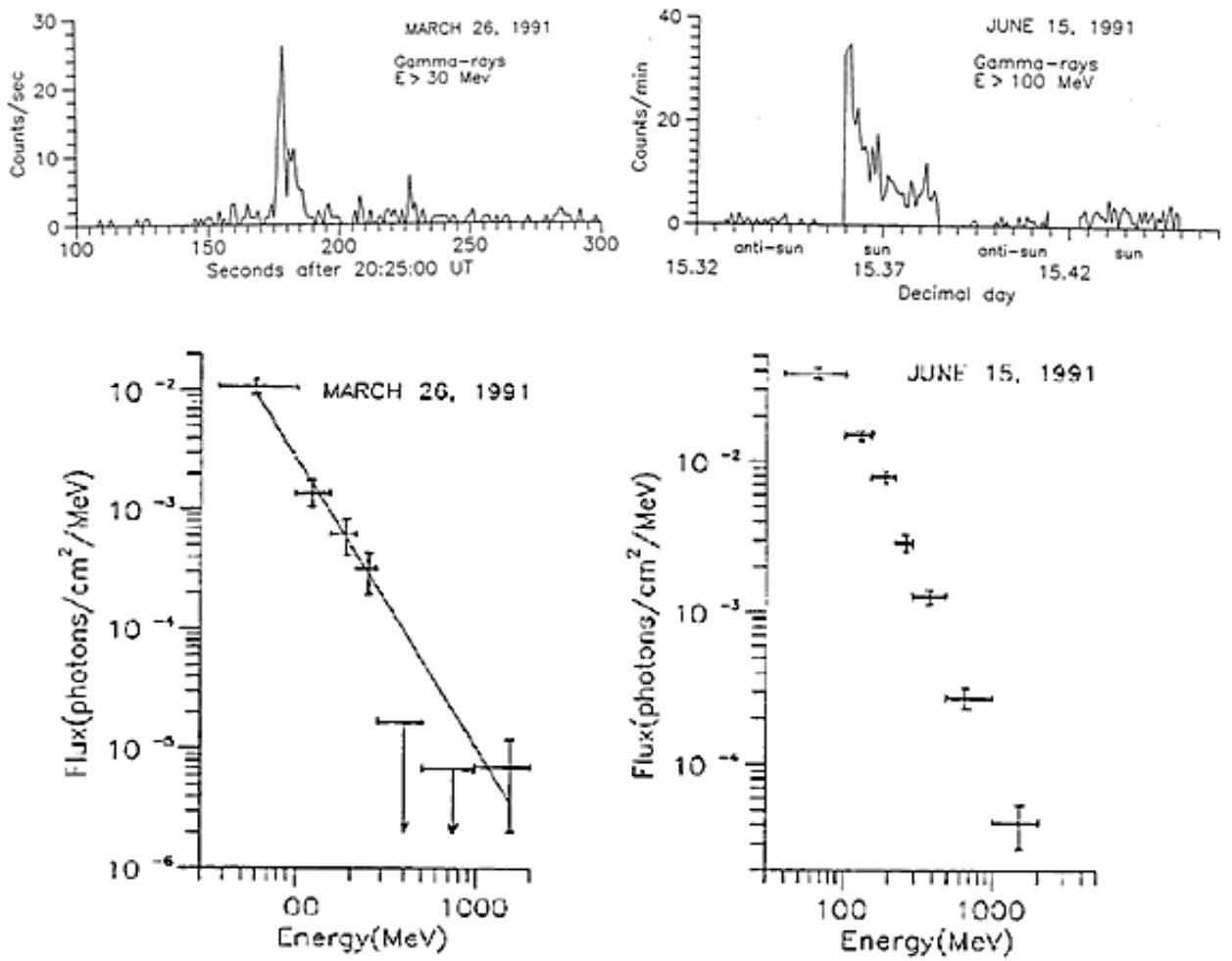


Рис. 1.20 Скорость счета и энергетические спектры гамма-квантов во время солнечных вспышек 26 марта и 15 июня 1991 г., зарегистрированных гамма-телескопом ГАММА-1 [91].

Гамма-излучение от солнечной вспышки 11 июня 1991 г. класса X было зарегистрировано гамма-телескопом EGRET примерно в течение 8 часов вплоть до нескольких ГэВ [97]. Энергетический спектр вспышки (Рис. 1.21) соответствовал вкладу тормозного излучения и излучения от распада  $\pi^0$ , которые были образованы высокоэнергичными электронами и протонами [97].

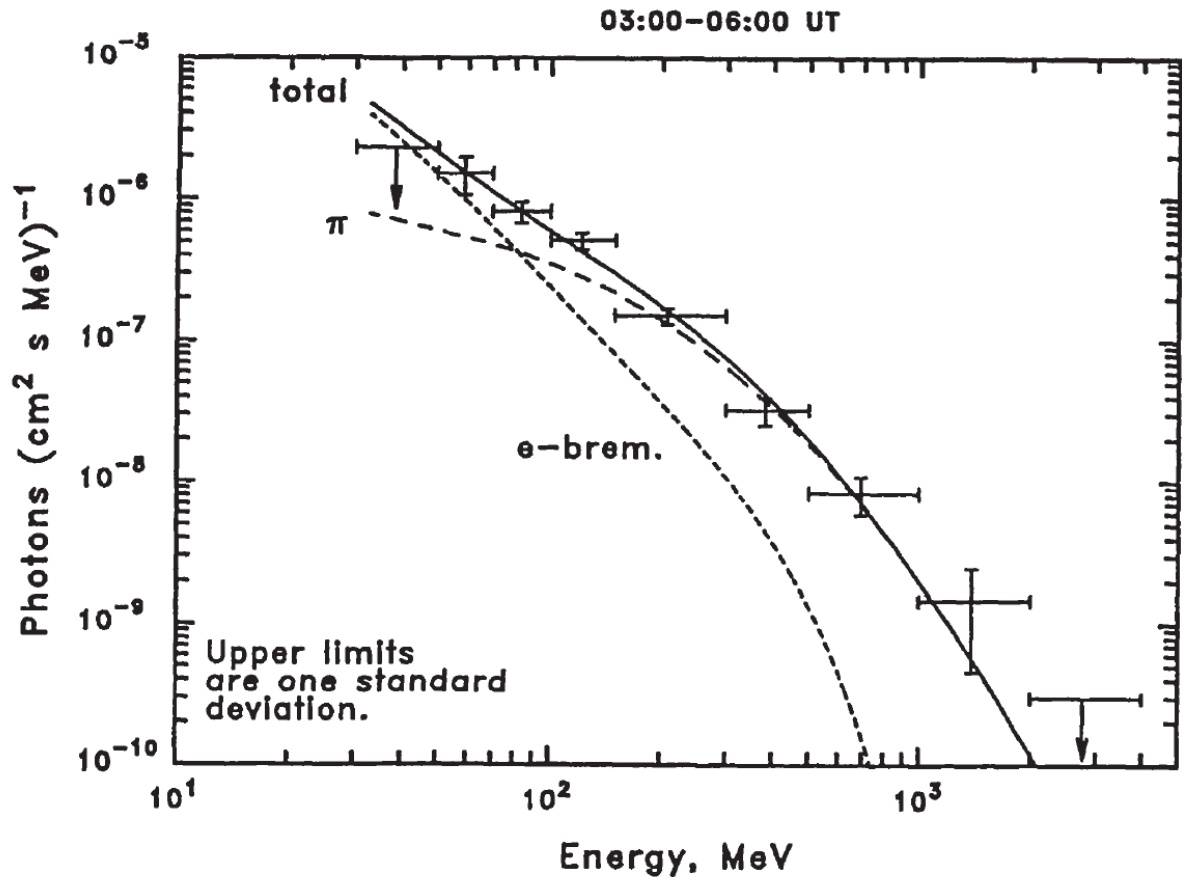


Рис. 1.21 Энергетический спектр гамма-излучения от солнечной вспышки 11 июня 1991 г., зарегистрированной EGRET [98].

EGRET также пытался, но не смог зарегистрировать гамма-излучение от спокойного Солнца [99].

Детальные исследования высокоэнергичного гамма-излучения Солнца стали возможными с 2008 г. после запуска гамма-телескопа Fermi-LAT. Fermi-LAT зарегистрировал гамма-излучение от Солнца в период низкой активности [100]: гамма-излучение ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) от солнечного диска,

обусловленное ливнями космических лучей в солнечной атмосфере, с величиной интегрального потока  $4.6 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , которое примерно в 7 раз выше ранее предсказанного, и гамма-излучение ( $E_\gamma \gtrsim 100 \text{ МэВ}$ ) от области с радиусом  $20^\circ$  с Солнцем в центре, обусловленное обратным комптоновским излучением электронов космических лучей на солнечных фотонах в гелиосфере, с величиной интегрального потока (исключая солнечный диск)  $6.8 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , хорошо согласующееся с теоретическими предсказаниями.

За первые 4 года работы Fermi-LAT зарегистрировал высокоэнергичное гамма-излучение ( $E_\gamma \geq 100 \text{ МэВ}$ ) от 18 солнечных вспышек (Табл. 1.3, [101]).

Около половины вспышек относились к классу М. Это предполагает, что ускорение электронов и/или протонов с энергиями до нескольких ГэВ возможно является более общим проявлением даже в умеренных (класса М) вспышках, чем считалось ранее по данным EGRET в ярких вспышках класса Х в июне 1991 г. Наибольшей энергией гамма-излучения от вспышки, зарегистрированной 7 марта 2011 г., была энергия  $\sim 1 \text{ ГэВ}$ . Она соответствует распаду пионов и соответствует энергии протонов  $\sim 5 \text{ ГэВ}$ . Эта вспышка представляет особый интерес: поток гамма-излучения от этой вспышки в 1000 раз больше, чем от спокойного Солнца и в 50 раз больше, чем от вспышек в Крабовидной туманности. Однако, недостаточное угловое разрешение не позволило разрешить детали излучения, оставив открытым вопрос о размерах и геометрии источника на Солнце.

Исследование гамма-излучения от Солнца в области более 1000 ГэВ невозможно с помощью наземных гамма-телескопов IACT, которые регистрируют черенковское излучение в воздухе с помощью зеркального построения образа источника, ввиду яркой оптической засветки от самого Солнца, однако водные черенковские установки типа HAWC и LHAASO могли бы наблюдать солнечное гамма-излучение [102].



Таблица 1.3 Солнечные вспышки, зарегистрированные Fermi-LAT с августа 2008 г. по август 2012 г. [101].

Date	GOES X-Ray Class, Start–End <sup>d</sup>	Type	Duration (hr)	CME Speed <sup>a</sup> (km s <sup>-1</sup> )	Fermi Time Window Start <sup>d</sup> , Duration (minutes)	TS <sup>b</sup>	Flux <sup>c</sup>	Energy Flux <sup>c</sup>
2010 Jun 12	M2.0, 00:30-01:02	I	...	486	00:55, 0.8	LLE <sup>e</sup>	...	...
2011 Mar 7	M3.7, 19:43-20:58	I/S	10.7	2125	20:15, 25	230	1.9 ± 0.3	6.7 ± 1.0
2011 Mar 8		S			23:26, 36	520	3.5 ± 0.3	11.9 ± 1.1
		S			02:38, 35	450	3.5 ± 0.3	11.6 ± 1.1
					05:49, 35	200	1.9 ± 0.3	5.4 ± 0.7
2011 Jun 2	C2.7, 9:42-9:50	I/S	0.8	976	09:43, 45	35	0.4 ± 0.2	1.4 ± 0.5
2011 Jun 7	M2.5, 06:16-06:59	S	2.2	1255	07:34, 53	570	3.6 ± 0.3	11 ± 0.9
2011 Aug 4	M9.3, 03:41-04:04	S	1.9	1315	04:59, 34	390	2.5 ± 0.3	7.9 ± 0.8
2011 Aug 9	X6.9, 07:48-08:08	I	...	1610	08:01, 3.3	LLE <sup>e</sup>	...	...
2011 Sep 6	X2.1, 22:12-22:24	I	0.6	575	22:17, 0.2	LLE <sup>e</sup>	...	...
		I/S			22:13, 35	r	r	
2011 Sep 7	X1.8, 22:32-22:44	S	2.1	792	23:36, 63	350	1.0 ± 0.1	3.5 ± 0.4
2011 Sep 24	X1.9, 09:21-09:48	I	...	1936	09:34, 0.8	LLE <sup>e</sup>	...	...
2012 Jan 23	M8.7, 03:38-04:34	I/S	5.7	1953	04:07, 51	180	0.8 ± 0.1	2.7 ± 0.4
		S			05:25, 69	650	2.1 ± 0.2	6.6 ± 0.5
		S			07:26, 16	69	3.7 ± 0.9	9.6 ± 2.2
		S			08:47, 35	97	2.6 ± 0.5	7.0 ± 1.3
2012 Jan 27	X1.7, 17:37-18:56	D	4.0	1930	19:45, 11	78	3.2 ± 0.8	9.6 ± 2.2
		S			21:13, 24	47	1.0 ± 0.3	2.8 ± 0.8
2012 Mar 5	X1.1, 02:30-04:43	I/S	5.3	1602	04:12, 49	69	0.5 ± 0.1	1.5 ± 0.3
		S			05:26, 71	250	0.9 ± 0.1	2.5 ± 0.3
		S			07:23, 28	39	0.8 ± 0.2	2.4 ± 0.7
2012 Mar 7	X5.4, 00:02-00:40 X1.3, 01:05–01:23	S	20.2	2684	00:46, 31	22000	r	r
		I/S			00:46, 60	LLE <sup>e</sup>	...	...
					03:56, 32	16000	113.1 ± 2.0	400.5 ± 6.6
					07:07, 32	8900	71.9 ± 1.6	232.6 ± 4.9
					10:18, 32	1900	30.1 ± 1.5	91.9 ± 4.3
					13:29, 32	120	8.9 ± 1.9	29.9 ± 5.9
	19:51, 25	50	0.4 ± 0.1	1.7 ± 0.5				
2012 Mar 9	M6.3, 03:22-04:18	D	5.7	844	05:17, 34	51	0.6 ± 0.2	2.0 ± 0.5
		S			06:52, 35	100	0.9 ± 0.2	2.8 ± 0.6
		S			08:28, 34	159	1.4 ± 0.2	4.3 ± 0.7
2012 Mar 10	M8.4, 17:15-18:30	D	4.3	1379	21:05, 30	43	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.3
2012 May 17	M5.1, 01:25-02:14	I/S	1.2	1582	02:18, 22	45	1.0 ± 0.3	3.4 ± 0.9
2012 Jun 3	M3.3, 17:48-17:57	I	0.2	605	17:52, 0.6	LLE <sup>e</sup>	...	...
		I/S			17:40, 23	300	3.2 ± 0.4	10.6 ± 1.2
2012 Jul 6	X1.1, 23:15-23:49	I/S	0.9	892	23:19, 52	930	3.5 ± 0.2	10.4 ± 0.7

Notes.

<sup>a</sup> CME data are available at the following url: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

<sup>b</sup> The significance of the detection in terms of  $\sigma$  is roughly  $\sqrt{\text{TS}}$ .

<sup>c</sup> Flux and energy flux are calculated between 100 MeV and 10 GeV and have units of  $\times 10^{-5}$  photons cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and  $\times 10^{-9}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively.

<sup>d</sup> In UT, hour:minute format.

<sup>e</sup> LLE detections are for  $E > 30$  MeV. Durations are evaluated from the LLE light curve above 30 MeV.

<sup>f</sup> The flux estimate is unreliable because of X-ray pileup in the ACD.

<sup>g</sup> Signal in LLE data is detected during the entire orbit; therefore, the reported duration is only a lower limit. See *Fermi-LAT Collaboration (2013)* for more details about this flare.

### *Краткие выводы*

Исследование гамма-излучения высоких энергий от солнечных вспышек призвано выяснить роль ядерных процессов во вспышке, механизм ускорения частиц и взаимодействия ускоренных пучков с солнечной атмосферой.

Высокоэнергичное гамма-излучение ( $E_\gamma > 1$  ГэВ) от солнечных вспышек впервые была зарегистрировано гамма-телескопом ГАММА-1, в дальнейшем гамма-телескопами EGRET, Fermi-LAT. Однако, недостаточное угловое разрешение не позволило во многих случаях разрешить детали излучения, оставив открытым вопрос о размерах и геометрии источника.

Требуются дальнейшие исследования высокоэнергичного гамма-излучения с улучшенным угловым разрешением.

#### 1.4 Исследование природы «темной материи» методами высокоэнергичной гамма-астрономии

Одним из важнейших астрофизических направлений является исследование природы «темной материи». В результате проведения прецизионных измерений реликтового микроволнового излучения в экспериментах WMAP (<http://wmap.gsfc.nasa.gov/media/080998/>) и Planck (<http://sci.esa.int/planck/51557-planck-new-cosmic-recipe/>) было показано, что только ~5% массы Вселенной приходится на обычную барионную материю: галактики, звезды, межзвездный газ (горячий и холодный), космические лучи и др. Остальные ~95% состоят из темной материи (~23%) и темной энергии (~72%) (Рис. 1.22).

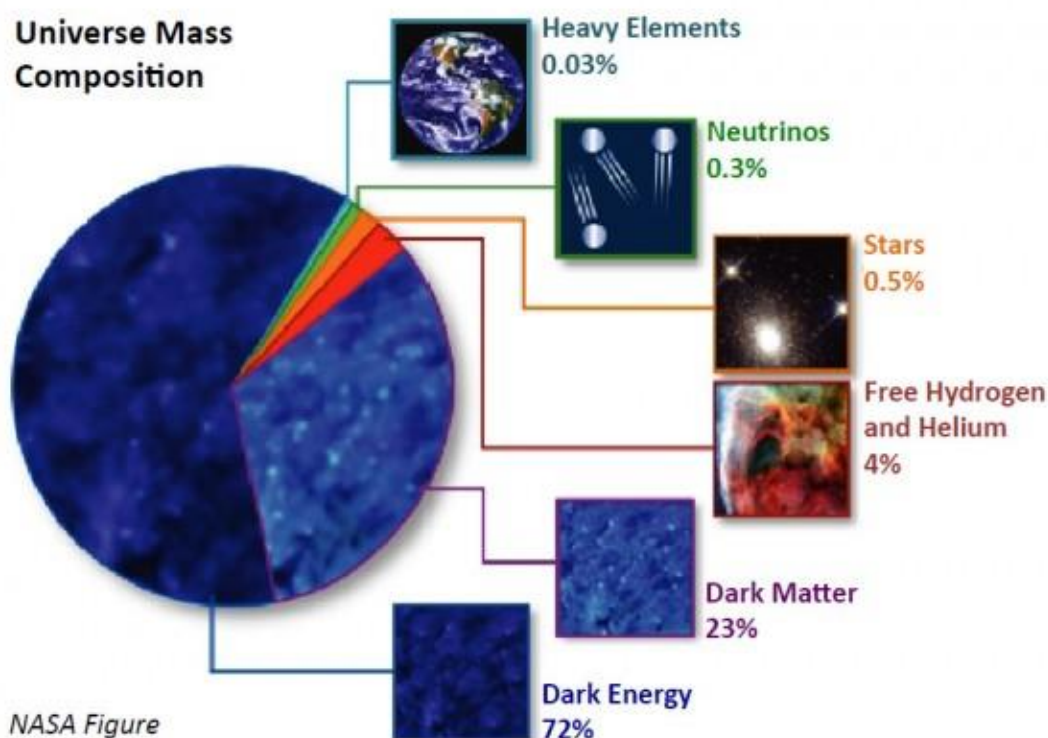


Рис. 1.22 Массовый состав Вселенной:  
 72% - темная энергия (Dark Energy); 23% - темная материя (Dark Matter);  
 4% - свободный водород и гелий (Free Hydrogen and Helium);  
 0,5% - звезды (Stars); 0,3% - нейтрино (Neutrinos);  
 0,03% - тяжелые элементы (Heavy Elements).

Природа темной материи пока остается неизвестной. Присутствие темной материи во Вселенной наблюдается исключительно по ее гравитационному влиянию на поведение астрофизических объектов. Среди огромного количества возможных кандидатов на роль частиц темной материи рассматриваются суперсимметричные частицы, стерильные нейтрино, аксионы и др. Чаще всего рассматриваются и исследуются слабо взаимодействующие массивные частицы - вимпы (WIMP, Weakly Interacting Massive Particles), масса которых может лежать в диапазоне от  $\sim$ ГэВ до  $\sim$ ТэВ [103-108].

«Проблему темной материи и ее детектирования» нобелевский лауреат академик В.Л. Гинзбург отметил в списке особо важных проблем современной астрофизики на начало XXI века [1]. Попытки регистрации и изучения свойств частиц темной материи проводятся прямыми и косвенными методами детектирования. На Рис. 1.23 представлено географическое расположение различных экспериментов по поиску частиц темной материи [109].

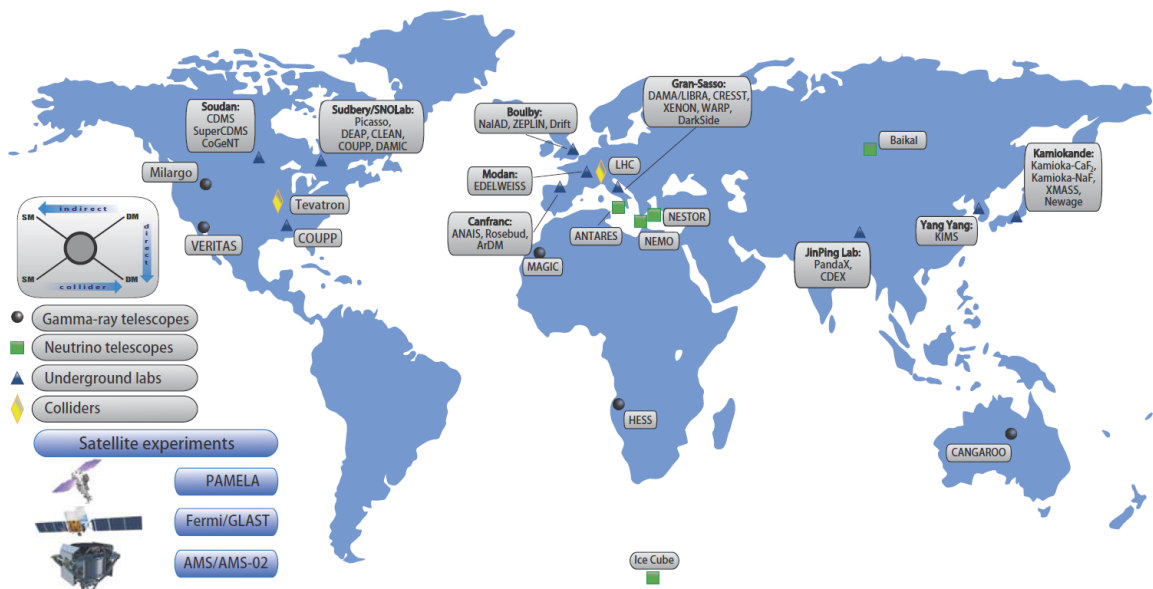


Рис. 1.23 Географическое расположение различных экспериментов по поиску частиц темной материи [109]. Прямые методы детектирования: подземные лаборатории (underground labs), ускорители (colliders); косвенные методы детектирования: гамма-телескопы (gamma-ray telescopes), нейтринные телескопы (neutrino telescopes), спутниковые эксперименты (satellite experiments) – PAMELA, Fermi/Glast, AMS/AMS-02.

Один из способов регистрации, относящийся к прямому методу детектирования, состоит в том, чтобы регистрировать энерговыделение в детекторе, вызванное возможным рассеянием тяжелой реликтовой частицы на ядре вещества детектора. При таких исследованиях детекторы располагают в подземных лабораториях и тщательно изолируют от фонового космического излучения.

Другой прямой метод детектирования состоит в предположении о том, что частицы темной материи должны рождаться на ускорителях, где изучаются продукты взаимодействия ускоренных частиц с мишенью из обычного вещества. Если энергия столкновения высока, то могут родиться частицы с большей массой. В экспериментах по поиску суперсимметричных частиц на ускорителях Tevatron (Брукхейвен) и LHC (ЦЕРН, Женева), частицы темной материи не обнаружены и получены только ограничения на массу этих частиц.

Косвенный метод детектирования заключается в регистрации не самих частиц темной материи, а продуктов их аннигиляции или распада: космические гамма-кванты (эксперименты Fermi-LAT, GAMMA-400, H.E.S.S.-II, MAGIC, VERITAS, HAWC, CTA), заряженные частицы космических лучей (эксперименты PAMELA, AMS-02, ATIC, IACTs, Fermi-LAT, Auger, CTA, GAPS), нейтрино (эксперименты IceCube/DeepCore/PINGU, ANTARES/KM3NET, BAIKAL-GVD, Super-Kamiokande/Hyper-Kamiokande) [110].

Поиск частиц темной материи путем регистрации гамма-квантов является чрезвычайно многообещающим «золотым» каналом, поскольку гамма-кванты распространяются через галактику практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывают на источник своего происхождения [111]. Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения.

Возможные каналы аннигиляции вимпов ( $W^+W^-$ ,  $Z^0Z^0$ ,  $b\bar{b}$ ,  $t\bar{t}$ ,  $\tau^+\tau^-$ ) с образованием вторичных гамма-квантов и прямые каналы аннигиляции  $\chi + \chi \rightarrow \gamma + \gamma$ ,  $\chi + \chi \rightarrow \gamma + Z$  и  $\chi + \chi \rightarrow \gamma + H$ , в результате которых образуются моноэнергетические гамма-кванты, изображены на Рис. 1.24 [112].

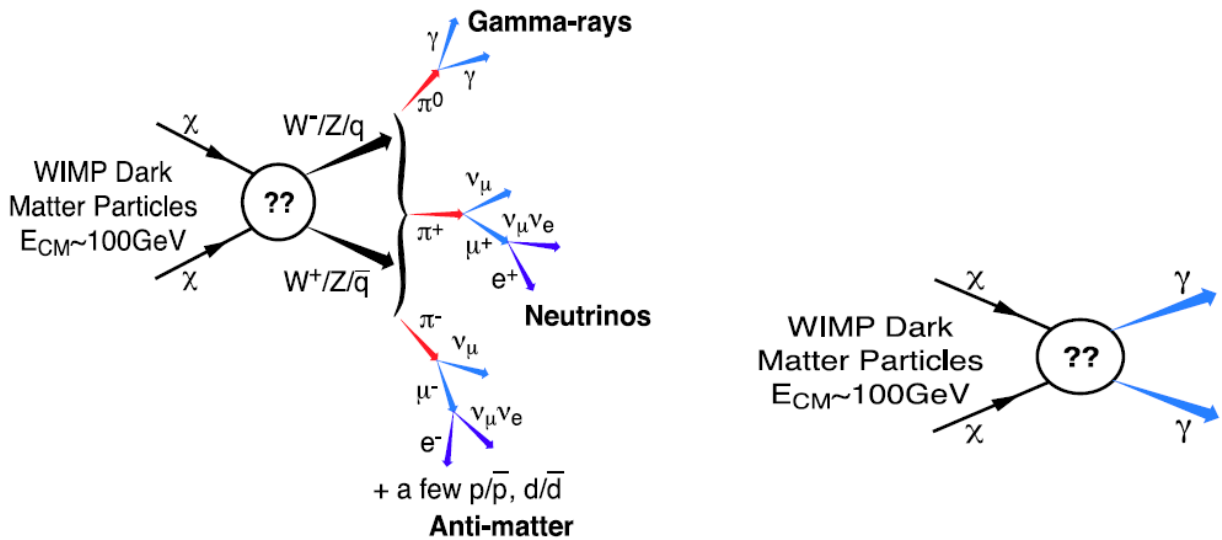


Рис. 1.24 Возможные каналы аннигиляции вимпов ( $W^+W^-$ ,  $Z^0Z^0$ ,  $b\bar{b}$ ,  $t\bar{t}$ ,  $\tau^+\tau^-$ ) с образованием гамма-квантов [112].

На Рис. 1.25 [111] показаны различные энергетические спектры гамма-излучения, ожидаемые при аннигиляции частиц темной материи, для случаев регистрации детекторами с энергетическим разрешением 15% и 2%. На Рис. 1.26 [113] представлен модельный энергетический спектр от аннигиляции вимпа с массой 300 ГэВ на гамма-кванты (линии  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma Z$  и  $\gamma H$ ), которые можно выделить над фоном различными детекторами с энергетическим разрешением 10%, 5% и 0,5%. Из этих рисунков видно, что для выделения таких линий над фоном энергетическое разрешение детекторов должно быть порядка нескольких процентов.

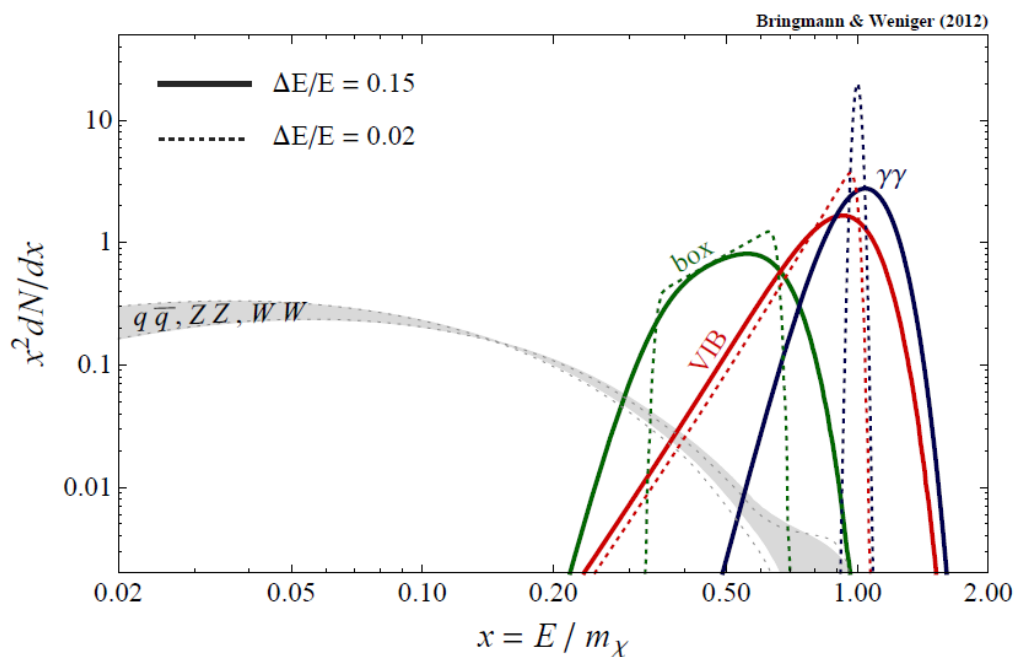


Рис. 1.25 Различные спектры гамма-излучения, ожидаемые при аннигиляции частиц темной материи. Серым цветом показаны спектры от вторичных гамма-квантов. Цветные пики от гамма-квантов при прямой аннигиляции показаны для случаев регистрации детекторами с энергетическим разрешением 0,15 и 0,02 [111].

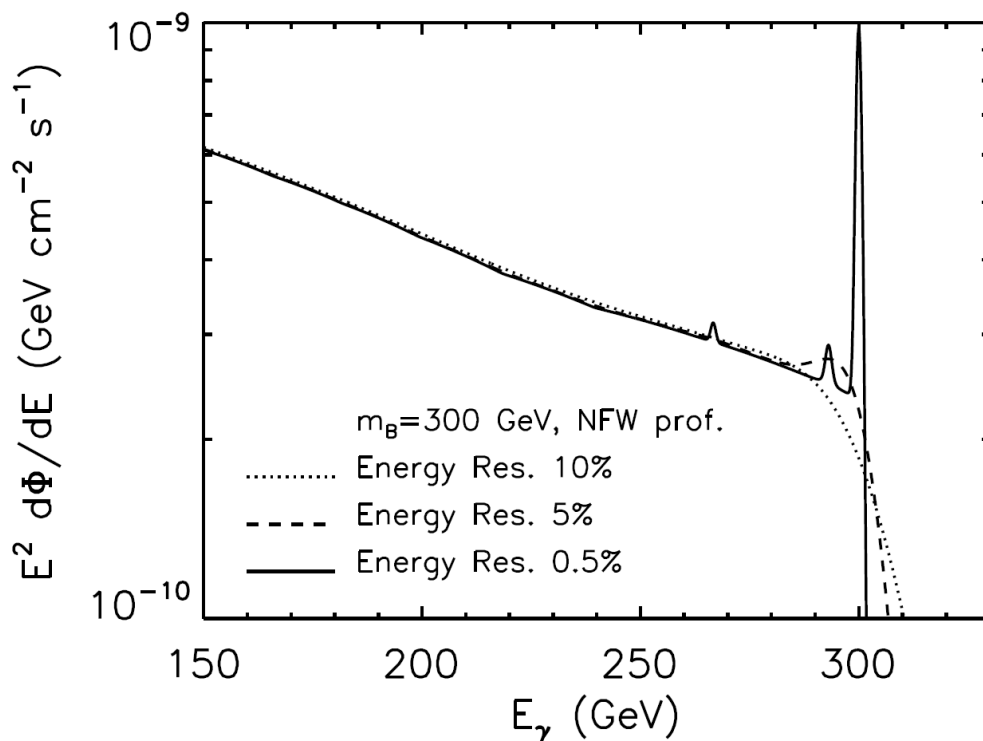


Рис. 1.26 Ожидаемый энергетический спектр от аннигиляции вимпов массой 300 ГэВ с образованием гамма-квантов (линии  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma Z$  и  $\gamma H$ ), которые можно выделить над фоном различными детекторами с энергетическим разрешением 10%, 5% и 0,5% [113].

Ожидаемый поток гамма-излучения при аннигиляции частиц темной материи может быть записан в следующем виде [114]

$$\phi(\Delta\Omega, E_{\min}, E_{\max}) = \underbrace{\frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_{DM}^2} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{dN_{\gamma}}{dE_{\gamma}} dE_{\gamma}}_{\text{particle physics}} \times \underbrace{\int_{\Delta\Omega} \int_{\text{l.o.s.}} \rho_{DM}^2(r(l)) dl d\Omega}_{\text{J-factor}},$$

где правая часть состоит из двух частей:

- “particle physics”:  $\langle\sigma v\rangle$  - усредненное по скорости сечение аннигиляции;
- $m_{DM}$  – масса частицы темной материи;  $\frac{dN_{\gamma}}{dE_{\gamma}}$  – дифференциальный спектр гамма-излучения от исследуемой области;
- “J-factor” – квадрат плотности темной материи  $\rho_{DM}^2$  как функции  $r(l)$  вдоль луча зрения (l.o.s.), направленного на исследуемую область.

Наиболее интересными целями для исследования темной материи являются Галактический центр, гало Галактики, карликовые галактики, кластеры галактик и другие структуры.

Согласно моделям Einasto и Navarro-Frenk-White (NFW) в центре Галактики плотность темной материи  $\rho(r)$  максимальна и имеет зависимость от расстояния  $r$  до центра Галактики, изображенную на Рис. 1.27 [115].

Используя данные Fermi-LAT, получены ограничения для усредненных по скорости сечений аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle$  частиц темной материи с массой  $m_{\chi}$  для различных исследуемых областей (центр Галактики, гало Галактики, карликовые галактики и др.) для канала аннигиляции  $b\bar{b}$ , сравнение которых приведено на Рис. 1.28 [116].

В течение почти 6 лет работы Fermi-LAT исследовал гамма-излучение от Галактики в диапазоне от 200 МэВ до 500 ГэВ (в том числе и от Галактического центра), пытаясь обнаружить гамма-линии от темной материи [117]. Обработка этих данных (исключая галактическую плоскость с долготой  $|l| > 6^{\circ}$  и широтой  $|b| < 5^{\circ}$ ), используя улучшенный метод анализа Pass 8 [118], не выявила значимых спектральных линий.



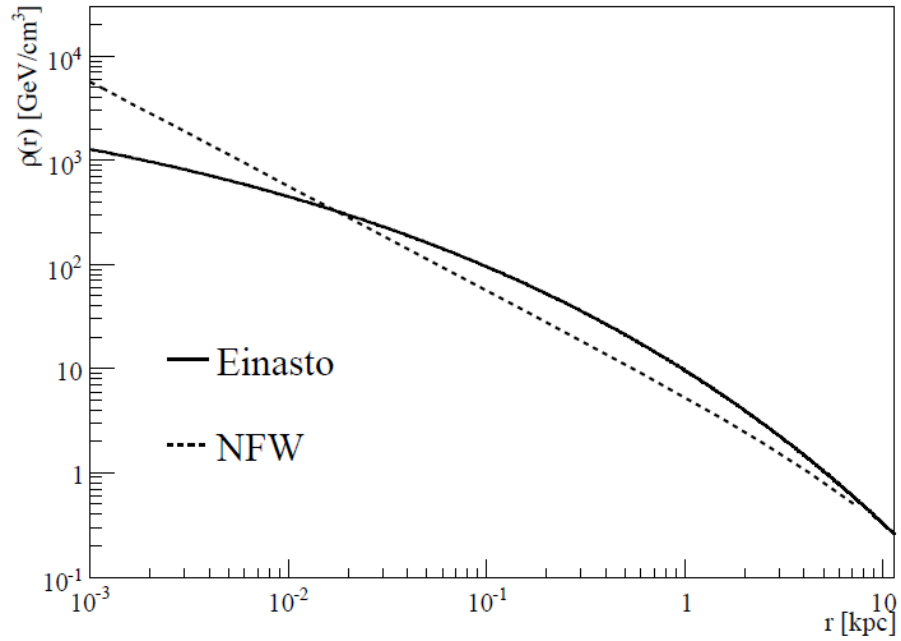


Рис. 1.27 Зависимость плотности темной материи от расстояния до центра Галактики для моделей Einasto и Navarro-Frenk-White (NFW) [115].

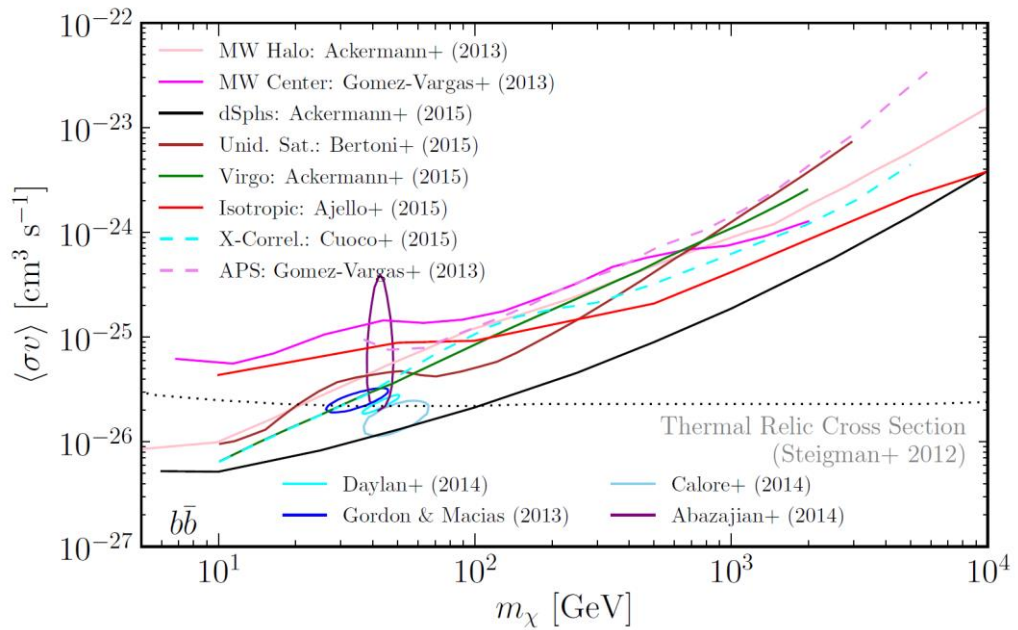


Рис. 1.28 Сравнение усредненных по скорости сечений аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle$  частиц темной материи с массой  $m_\chi$  для канала аннигиляции  $b\bar{b}$  для исследуемых областей: гало Галактики (MW Halo), центр Галактики (MW Center), карликовые галактики (dSphs) и др. [116].

За 10 лет работы H.E.S.S. получил данные наблюдений (254 часа) по поиску сигналов от аннигиляции частиц темной материи от центра Галактики (область радиусом  $1^\circ$ , исключая  $|b| < 0,3^\circ$ ). Никакого избытка гамма-излучения обнаружено не было [119]. Были получены ограничения для усредненного по скорости сечения аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle$  частиц темной материи с массой  $m_{DM}$  для канала аннигиляции  $W^+W^-$  для центра Галактики и карликовых галактик (Рис. 1.29).

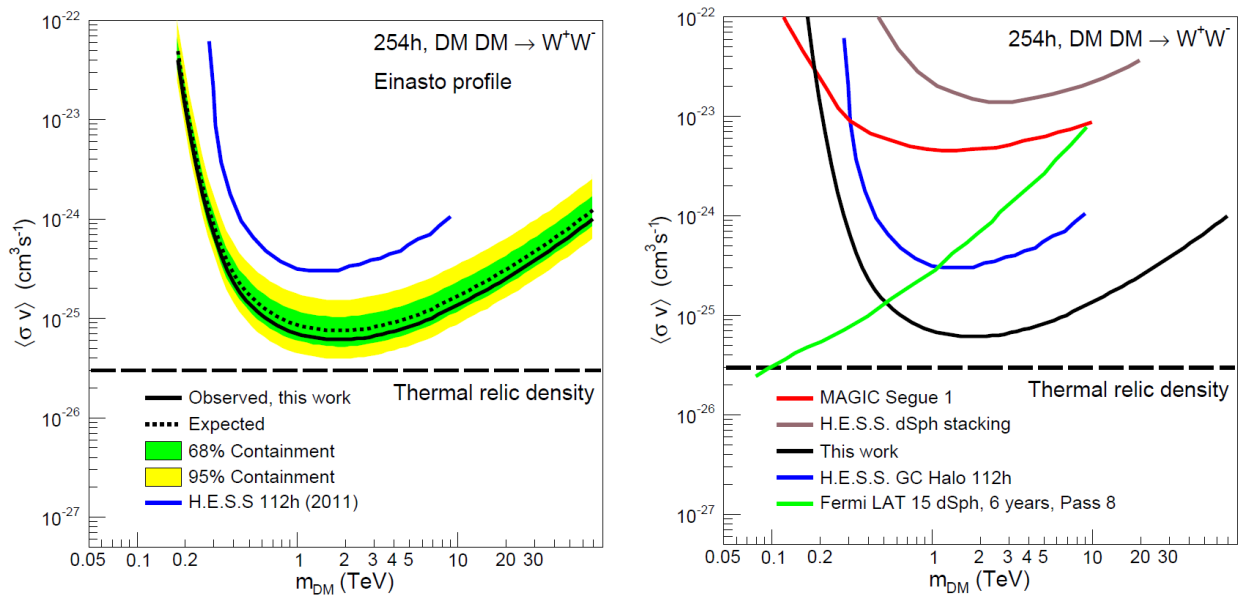


Рис. 1.29 Ограничения для усредненного по скорости сечения аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle$  частиц темной материи с массой  $m_{DM}$  от центра Галактики (GC) и карликовых галактик (dSph) для канала аннигиляции  $W^+W^-$ , полученные H.E.S.S. в сравнении с другими экспериментами [119].

Необходимо также отметить вопрос об избытке гамма-излучения при исследовании диффузного гамма-излучения от центра Галактики. В эксперименте EGRET [37] было зарегистрировано диффузное гамма-излучение с энергией 1-30 ГэВ, поток которого от центральной области Галактики превышал предсказываемый теоретическими расчетами. Одним из возможных объяснений избытка гамма-излучения было наличие гамма-излучения от частиц темной материи с массой от 50 до 100 ГэВ (Рис. 1.30, [120]).

Результаты измерений диффузного гамма-излучения от центра Галактики на Fermi-LAT [80] выявили избыток излучения, но значительно меньшее превышение потока гамма-излучения по сравнению с данными EGRET.

Другими объяснением избытка гамма-излучения от центра Галактики является наличие гамма-излучения от неразрешенных источников (например, маломасштабных субструктур темной материи [121]) или миллисекундных пульсаров [122, 123].

Для выделения дополнительного потока гамма-излучения от частиц темной материи необходимо из общего потока космического гамма-излучения вычесть диффузное излучение (галактическое и внегалактическое) и гамма-излучение от дискретных источников, а для этого необходимо высокое угловое разрешение.

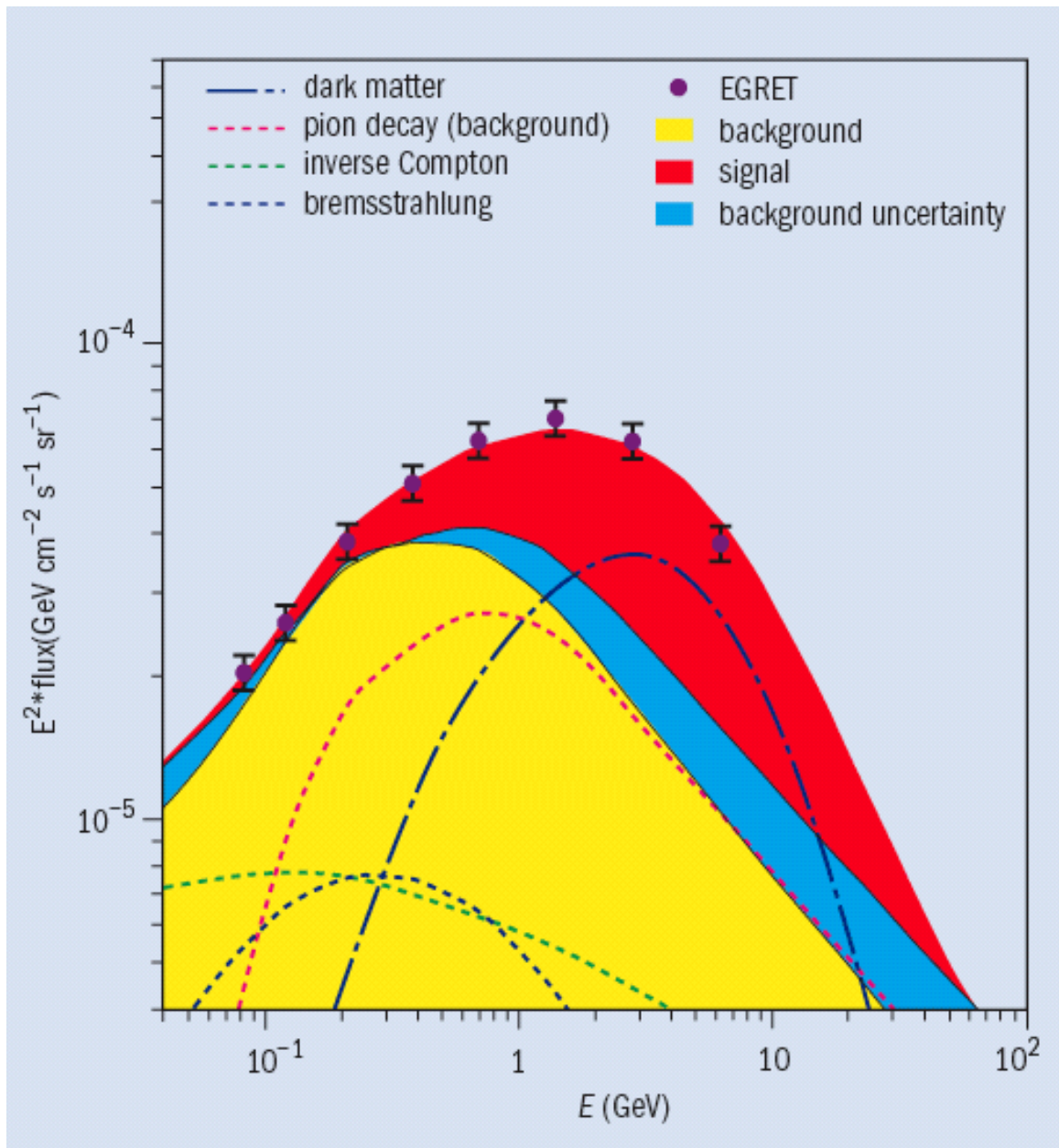


Рис. 1.30 Спектр диффузного гамма-излучения по данным EGRET и по теоретическим представлениям [120].

### *Краткие выводы*

Поиск частиц темной материи путем регистрации гамма-квантов является чрезвычайно многообещающим «золотым» каналом, поскольку гамма-кванты распространяются через галактику практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывают на источник своего происхождения. Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения.

Для выделения гамма-линий от аннигиляции частиц темной материи над фоном энергетическое разрешение гамма-телескопов должно быть лучше нескольких процентов.

Наиболее интересными целями для исследования темной материи являются Галактический центр, гало Галактики, карликовые галактики, кластеры галактик и другие структуры.

В течение длительного времени Fermi-LAT и H.E.S.S. пытались обнаружить гамма-линии от темной материи. Однако полученные данные не выявили значимых спектральных линий. Были получены ограничения для усредненного по скорости сечения аннигиляции  $\langle\sigma v\rangle$  частиц темной материи с массой  $m_{DM}$  для разных каналов аннигиляции для центра Галактики и карликовых галактик.

При исследовании диффузного гамма-излучения от центра Галактики EGRET зарегистрировал диффузное гамма-излучение с энергией 1-30 ГэВ, поток которого от центральной области Галактики превышал предсказываемый теоретическими расчетами. Одним из возможных объяснений избытка гамма-излучения было наличие гамма-излучения от частиц темной материи с массой от 50 до 100 ГэВ. Результаты измерений диффузного гамма-излучения от центра Галактики на Fermi-LAT выявили избыток излучения, но значительно меньшее превышение потока гамма-излучения по сравнению с данными EGRET. Другим объяснением избытка

гамма-излучения от центра Галактики является наличие гамма-излучения от неразрешенных источников (например, маломасштабных субструктур темной материи или миллисекундных пульсаров).

Для выделения дополнительного потока гамма-излучения от частиц темной материи необходимо из общего потока космического гамма-излучения вычесть диффузное излучение (галактическое и внегалактическое) и гамма-излучение от дискретных источников, а для этого необходимо высокое угловое разрешение.

Таким образом, требуется дальнейший поиск гамма-излучения от аннигиляции частиц темной материи с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

## **1.6 Анализ результатов исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий**

Проведенные и проводимые в настоящее время исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических ( $E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ГэВ}$ ), так в наземных ( $E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$ ) экспериментах выявили следующее:

1. В космических экспериментах OSO-3 (1967-1968 гг.), Космос-208 (1968 г.), АННА-3 (Космос-251, 1968 г. и Космос-264, 1969 г.), OGO-5 (1968 г.), SAS-2 (1972-1973 гг.), COS-B (1975-1982 гг.), ГАММА-1 (1990-1992 гг.) [3-14], EGRET (1991-2000 гг.), AGILE (с 2007 г.), и в основном усилиями Fermi-LAT (с 2008 г.) обнаружено гамма-излучение от  $\sim 3030$  дискретных источников, причем одна треть источников не идентифицирована, что связано с недостаточным угловым разрешением (Fermi-LAT имеет для  $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$  угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,1^\circ$  и  $\sim 10\%$ , соответственно). Энергетические спектры гамма-излучения от дискретных источников для энергий более  $10 \text{ ГэВ}$  построены с большими ошибками. Требуется дополнительные измерения с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. В наземных экспериментах Whipple, VERITAS, MAGIC, H.E.S.S., Milagro, HAWC и др. (наземные гамма-телескопы имеют для  $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$  угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,1^\circ$  и  $\sim 15\%$ , соответственно) обнаружено гамма-излучение только от  $\sim 180$  дискретных источников, что в основном связано с недостаточным угловым разрешением. Требуется дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

3. Наблюдение диффузного галактического гамма-излучения является инструментом изучения происхождения и ускорения космических лучей и межзвездного вещества. Знание диффузного излучения необходимо для его выделения от гамма-излучения дискретных (точечных и протяженных) источников. Интенсивность галактического диффузного гамма-излучения при энергии  $10\text{-}50 \text{ ГэВ}$  по измерениям Fermi-LAT меньше, чем по данным

EGRET. Для интерпретации природы диффузного излучения требуются дополнительные измерения с улучшенным угловым и энергетическим разрешениями.

4. Результаты измерений диффузного гамма-излучения от центра Галактики по данным Fermi-LAT выявили избыток излучения. Одним из возможных объяснений избытка гамма-излучения является наличие гамма-излучения от частиц темной материи с массой несколько сотен ГэВ. Другим объяснением избытка гамма-излучения от центра Галактики является наличие гамма-излучения от неразрешенных источников (например, маломасштабных субструктур темной материи) или от миллисекундных пульсаров. Для выделения дополнительного потока гамма-излучения от частиц темной материи необходимо из общего потока космического гамма-излучения вычесть диффузное излучение (галактическое и внегалактическое) и гамма-излучение от дискретных источников, а для этого необходимы дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

5. Сравнение спектра внегалактического гамма-излучения со спектрами излучения от идентифицированных внегалактических источников указывает на значительную долю в нем неразрешенных источников (на Рис. 1.5 видно, что доля неразрешенных высокоширотных источников в 3FGL составляет 22%), для идентификации которых также требуется высокое угловое разрешение.

6. Поиск частиц темной материи путем регистрации гамма-квантов является чрезвычайно многообещающим «золотым» каналом, поскольку гамма-кванты распространяются через галактику практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывают на источник своего происхождения. Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения. Исследования Fermi-LAT и H.E.S.S. не выявили значимых спектральных линий. Для выделения таких линий над фоном энергетическое



разрешение детекторов должно быть значительно лучше, чем у Fermi-LAT и H.E.S.S. и составлять величину порядка нескольких процентов. Требуется дополнительные измерения с улучшенным энергетическим разрешением.

7. Высокоэнергичное гамма-излучение ( $E_\gamma > 1$  ГэВ) от солнечных вспышек впервые была зарегистрировано гамма-телескопом ГАММА-1, в дальнейшем гамма-телескопами EGRET, Fermi-LAT. Однако, недостаточное угловое разрешение не позволило во многих случаях разрешить детали излучения, оставив открытым вопрос о размерах и геометрии источника. Требуется дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

Несмотря на многочисленные исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических, так и в наземных экспериментах, необходимы новые экспериментальные данные, которые должны быть получены с использованием гамма-телескопов, установленных на космических аппаратах и обладающих значительно лучшими угловым и энергетическим разрешениями, способными проводить длительные непрерывные наблюдения, в связи с тем, что многие источники гамма-излучения являются переменными.

Особенно важным является исследование гамма-излучения на космическом аппарате одним гамма-телескопом в диапазоне энергий от  $\sim$ ГэВ до  $\sim$ ТэВ:

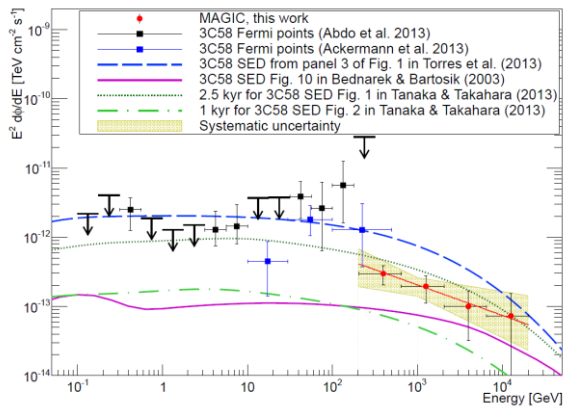
- это пограничная область, где заканчиваются данные космических гамма-телескопов и начинаются данные наземных гамма-телескопов. Эти данные либо слабо, либо совсем не перекрываются. Пример энергетического спектра от галактического диффузного гамма-излучения приведен на Рис. 1.18 [87] и Рис. 1.31д [129]. Примеры энергетических спектров гамма-излучения от некоторых источников приведены на Рис. 1.31а-г, [124-127];

- в этой области, начиная с энергии более 10 ГэВ, начинаются процессы ослабления потоков гамма-излучения после взаимодействия с межгалактическими фоновыми фотонами (extragalactic background light, EBL)

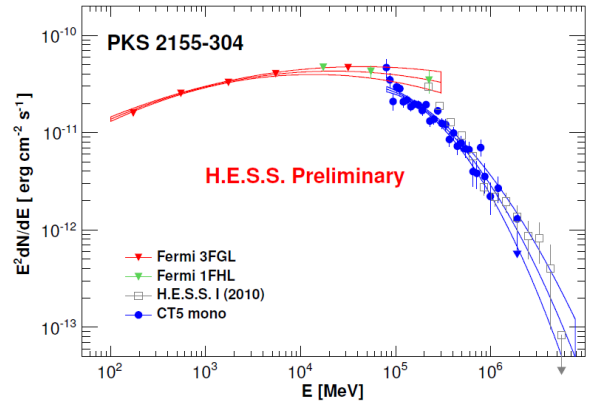
и происходит изменение показателя энергетического спектра гамма-излучения от источника (см. например, [128]);

- в этом энергетическом диапазоне следует искать следы от аннигиляции или распада частиц темной материи, где, как предполагается, должна находиться масса этих частиц.

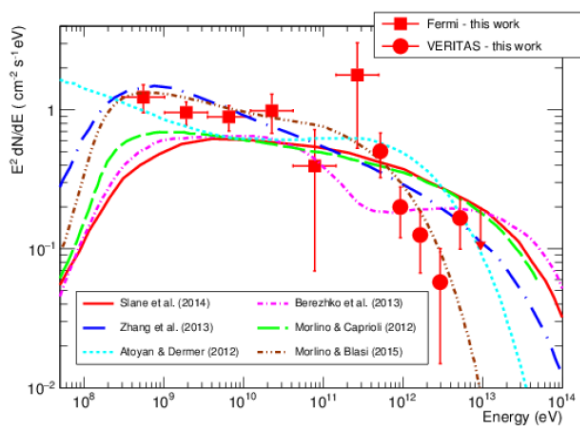
Таким образом, для решения вышеперечисленных астрофизических задач необходимо разработать новую космическую научную аппаратуру, которая должна обеспечить регистрацию одним гамма-телескопом высокоэнергичного гамма-излучения в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ и будет иметь значительно лучшие характеристики: угловое разрешение  $< 0,05^\circ$  при  $E_\gamma = 100$  ТэВ и энергетическое разрешение  $< 2\%$  при  $E_\gamma = 100$  ТэВ.



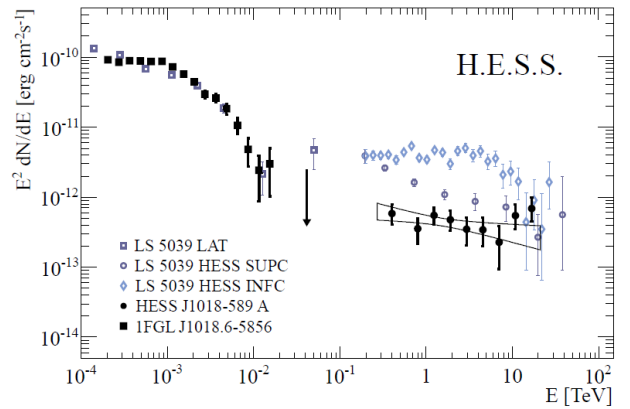
а



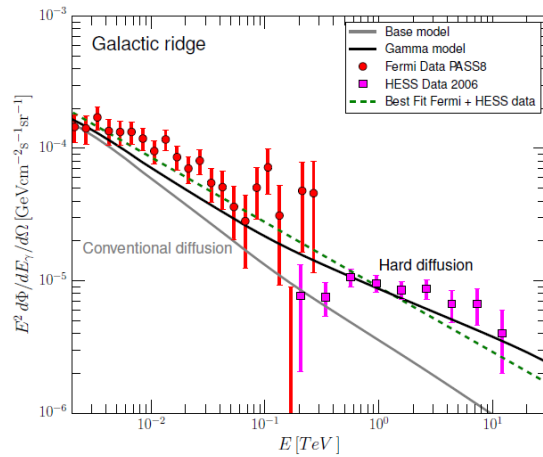
б



в



г



д

Рис. 1.31 Примеры энергетических спектров гамма-излучения от различных источников: (а) 3C 58 [124], (б) PKS 2155-304 [125], (в) Tycho's SNR [126], (г) HESS J1018-589A [127], (д) Galactic ridge [129].

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ, ТРЕБОВАНИЙ К НАУЧНОЙ АППАРАТУРЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ СХЕМЫ.

### 2.1 Взаимодействие гамма-квантов с веществом

При рассмотрении методов регистрации гамма-излучения необходимо, прежде всего, остановиться на процессах взаимодействия гамма-квантов с веществом детектора.

Параллельный пучок гамма-квантов при прохождении через толщину вещества  $t$  ослабляется по экспоненциальному закону

$$n = n_0 e^{-\mu t},$$

где  $n_0$  – число гамма-квантов, падающих на слой толщиной  $t$ ;  $n$  – число гамма-квантов с той же энергией и с тем же направлением после слоя вещества;  $\mu$  – коэффициент поглощения, имеющий размерность  $\text{см}^{-1}$ . Физический смысл коэффициента поглощения следующий: пучок гамма-квантов ослабляется в  $e$  раз на пути  $1/\mu$ . Если ввести полное сечение взаимодействия гамма-квантов с одним атомом  $\sigma$ , то

$$\mu = N\sigma,$$

где  $N$  – число атомов в  $1 \text{ см}^3$  и  $\sigma$  – сечение в  $\text{см}^2/\text{атом}$ ;

$$N = \frac{N_A}{A} \rho,$$

где  $N_A$  – число Авогадро,  $6,0221367 \cdot 10^{23}$  атом/моль,  $A$  – относительная масса атома, г/моль,  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;

$$\frac{\mu}{\rho} = \sigma \frac{N_A}{A}, \text{ см}^2/\text{г}.$$

При энергии гамма-квантов от 0,1 до нескольких МэВ взаимодействие излучения с веществом происходит посредством фотоэффекта и комптоновского рассеяния, а при более высоких энергиях путем образования электронно-позитронных пар. Полное сечение взаимодействия гамма-квантов с атомами  $\sigma$  складывается из сечения фотоэффекта  $\sigma_{\phi}$ , сечения комптоновского рассеяния  $\sigma_{\kappa}$  и сечения образования пар  $\sigma_n$ . На Рис. 2.1 [131] иллюстрируется роль различных процессов в поглощении фотонов гамма-диапазона.

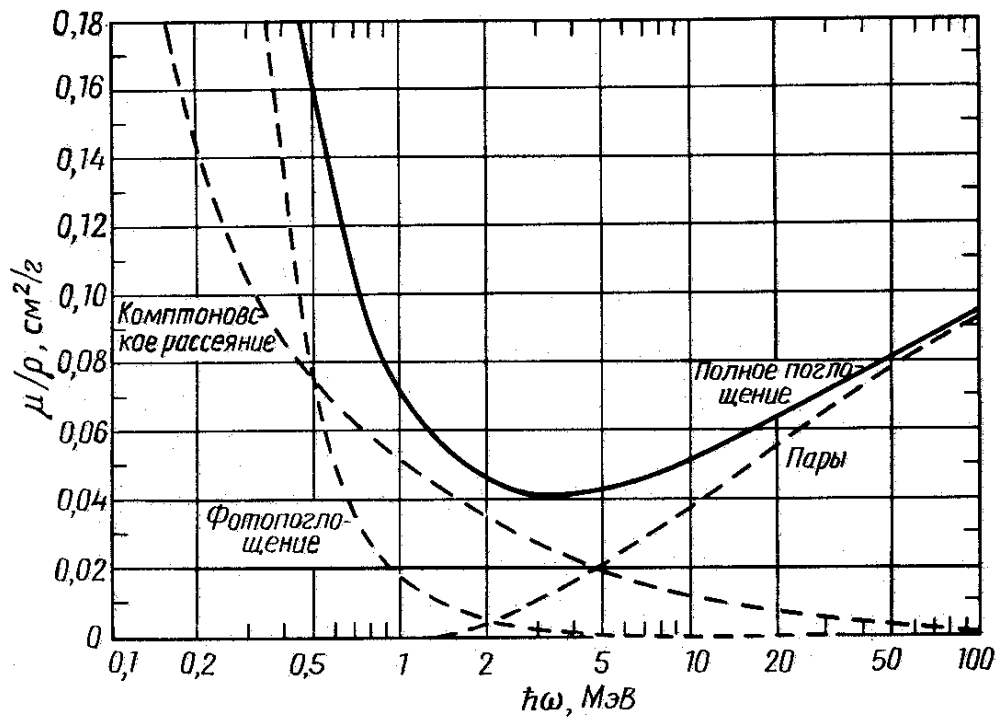


Рис. 2.1 Полные массовые коэффициенты поглощения гамма-излучения в свинце. Показан вклад фотоэффекта, комптоновского рассеяния и процесса рождения пар [131].

Фотоэффект – это испускание электронов веществом под действием света. Расчеты сечения фотоэффекта показали, что он происходит главным образом на  $K$ -оболочке (около 80%). Для энергии фотонов  $E_\gamma \sim m_e c^2$ , но не близких к границе  $K$ -полосы поглощения, сечение фотоэффекта на  $K$ -оболочке получено в виде [132]:

$$(\sigma_\phi)_K = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 4\sqrt{2} \frac{(m_e c^2)^{7/2}}{(137)^4} \frac{Z^5}{(E_\gamma)^{7/2}} = \text{const} \frac{Z^5}{(E_\gamma)^{7/2}}.$$

В этом выражении  $Z$  – заряд ядра атома;  $(\sigma_\phi)_K$  – сечение фотоэффекта,  $\text{см}^2/\text{атом}$ . Полное сечение фотоэффекта

$$\sigma_\phi \approx \frac{5}{4} (\sigma_\phi)_K.$$

Комптон-эффект представляет собой рассеяние фотона на свободном электроне (или на внешних электронах в электронной оболочке атома). При малых энергиях сечение комптон-эффекта близко к томпсоновскому умноженному на  $Z$ :

$$\sigma_\kappa = \frac{8\pi}{3} r_e^2 Z \left(1 - \frac{2E_\gamma}{m_e c^2}\right) \text{ см}^2/\text{атом}; E_\gamma \leq m_e c^2,$$

а при больших энергиях фотонов сечение падает обратно пропорционально энергии фотона

$$\sigma_\kappa = \pi Z r_e \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{2E_\gamma}{m_e c^2}\right) \text{ см}^2/\text{атом}; E_\gamma \geq m_e c^2,$$

и также пропорционально числу атомных электронов  $Z$  [133].

Начиная с пороговой энергии фотона, равной 1,02 МэВ, при прохождении гамма-кванта в поле ядра возможна реакция образования пар  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ . Сечение этого процесса растет с увеличением энергии фотонов и в пределе (в случае полного экранирования электрического поля ядра атомными электронами) достигает постоянной величины [134]

$$\sigma_n = 0,02Z(Z+1)r_e^2 \ln(183Z^{-1/3}) \text{ см}^2/\text{атом},$$

т.е. становится независимым от энергии и примерно пропорциональным  $Z^2$ .

Если энергия фотона не превышает нескольких МэВ, то при образовании пары в большинстве случаев эта энергия делится примерно поровну между электроном и позитроном. С увеличением же энергии фотона до сотен МэВ распределение образующихся частиц по энергиям становится более широким. Угол разлета пары

$$\theta_p \sim \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \ln \frac{E_\gamma}{m_e c^2}$$

в области энергий  $E \geq 100$  МэВ составляет менее  $1^\circ$  [133].

Информация о гамма-излучении (энергия и направление), проходящем через детектор, извлекается из измерений характеристик вторичных частиц - электронов и позитронов, образовавшихся при взаимодействии фотонов с веществом детектора.

## 2.2 Методы регистрации гамма-излучения в космических экспериментах

В космических экспериментах используются различные методы регистрации гамма-излучения, начиная от нескольких МэВ.

В диапазоне до нескольких десятков МэВ главным образом используются комптоновские гамма-телескопы, использующие регистрацию комптоновского взаимодействия гамма-излучения с веществом детекторов. Примерная схема комптоновского гамма-телескопа изображена на Рис. 2.2.

В комптоновском телескопе падающий фотон  $\gamma_0$  комптоновски рассеивается в верхнем детекторе D1 и после рассеяния под углом  $\theta$  регистрируется в нижнем детекторе D2. Зная координаты взаимодействия фотона  $X_1$  и  $X_2$ , а также энергоделения  $E_1$  и  $E_2$  можно определить энергию  $E_0$  и направление первичного фотона  $\theta$ :

$$E_0 = E_1 + E_2,$$

$$\theta = \arccos \left[ 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \right].$$

Область локализации на небе, откуда пришел зарегистрированный фотон определенной энергии, будет иметь форму круга с радиусом, равным угловому разрешению гамма-телескопа при данной энергии, совпадающим с направлением первичного фотона. При накоплении большого числа фотонов все круговые области будут пересекаться в одной точке. Таким образом, угловое разрешение телескопа может быть улучшено до величины порядка  $1^\circ$ .

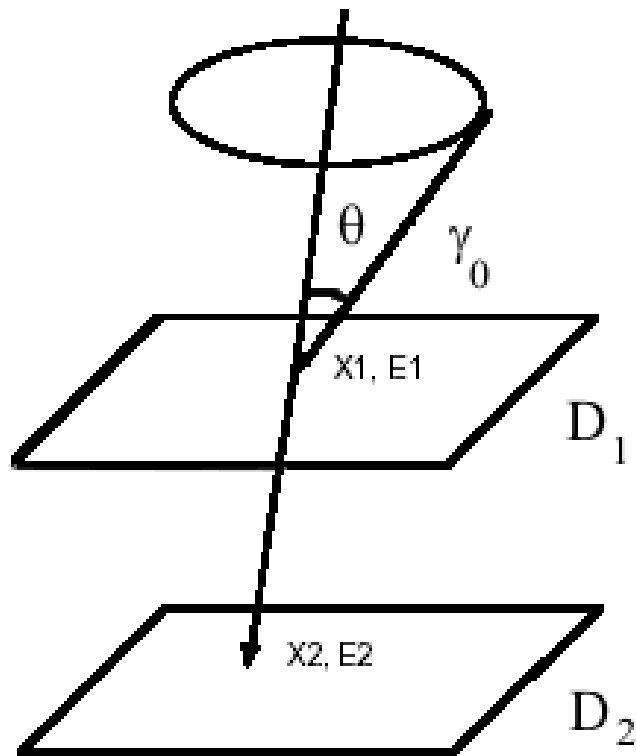


Рис. 2.2 Схема комптоновского гамма-телескопа.



При более высоких энергиях применяется метод, основанный на конверсии гамма-кванта в электрон-позитронную пару и последующей регистрации образовавшихся электрона и позитрона. Примерная схема гамма-телескопа, использующего метод регистрации конверсионной электрон-позитронной пары представлена на Рис. 2.3.

Гамма-квант без взаимодействия проходит антисовпадательную систему АС, конвертируется в электрон-позитронную пару в конвертере К. Возникшие электроны и позитроны регистрируются в сцинтилляционных детекторах С1 и С2. В калориметре КК происходит измерение энергии электронов и позитронов.

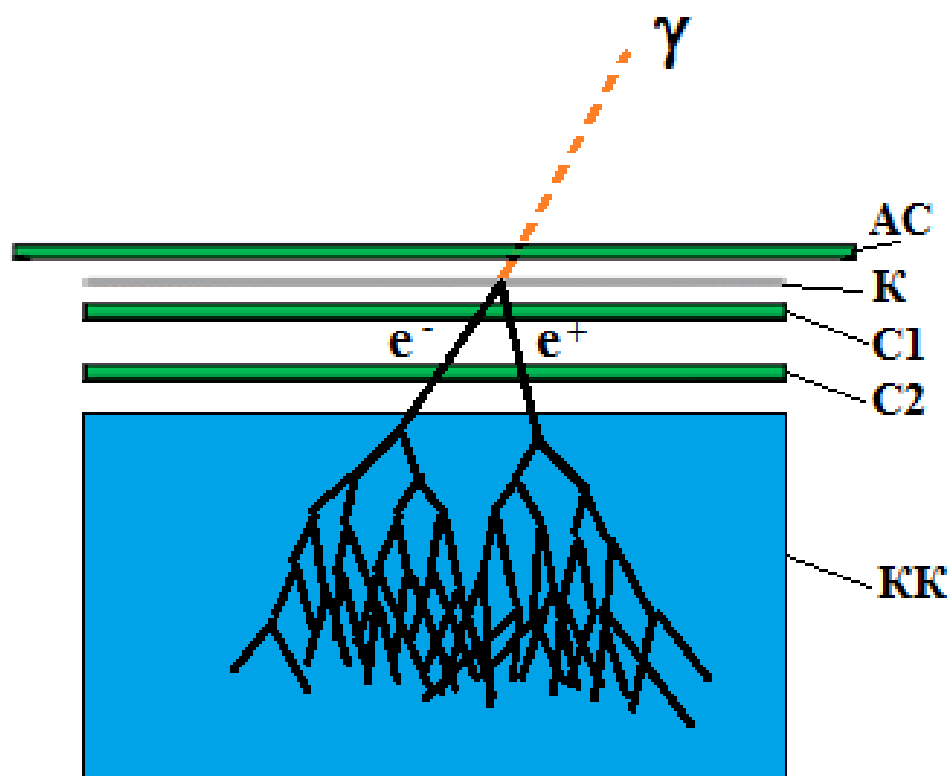


Рис. 2.3 Примерная схема гамма-телескопа с использованием метода регистрации электрон-позитронной пары, возникшей после конверсии регистрируемого гамма-кванта.

АС – антисовпадательная система, К – конвертер,  
С1 и С2 – сцинтилляционные детекторы,  
КК – калориметр.

Основная задача гамма-телескопа определить направление прилета гамма-кванта и его энергию.

Для выделения гамма-квантов на фоне громадного потока заряженных частиц применяются антисовпадательные сцинтилляционные детекторы. На Рис. 2.4 [135] приведены энергетические спектры потоков гамма-излучения и потоков протонов и электронов космических лучей для области энергий более 1 ГэВ. Видно, что соотношение потоков для гамма-квантов, электронов и протонов составляет  $1/(3 \times 10^3)/(3 \times 10^5)$  для энергии 10 ГэВ и  $1/10^2/10^5$  для энергии 100 ГэВ. Поэтому эффективность регистрации антисовпадательных детекторов должна быть лучше 0,9999. Дополнительную режекцию заряженных частиц необходимо осуществлять с помощью других детекторных систем.

Для конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару применяются конвертеры из вещества с большим  $Z$  (свинец, вольфрам, тантал), либо конвертеры-трекеры, состоящие из сцинтилляционных, полупроводниковых, искровых и других детекторов, прослоенных также веществом с большим  $Z$  (свинец или вольфрам).

Для определения направления регистрируемых электронов и позитронов, возникших после конверсии гамма-кванта, используются сцинтилляционные, черенковские, полупроводниковые детекторы, искровые камеры и другие.

Для измерения энергии применяются электромагнитные сцинтилляционные калориметры, в которых развивается электромагнитный ливень при взаимодействии электронов и позитронов с веществом калориметра.

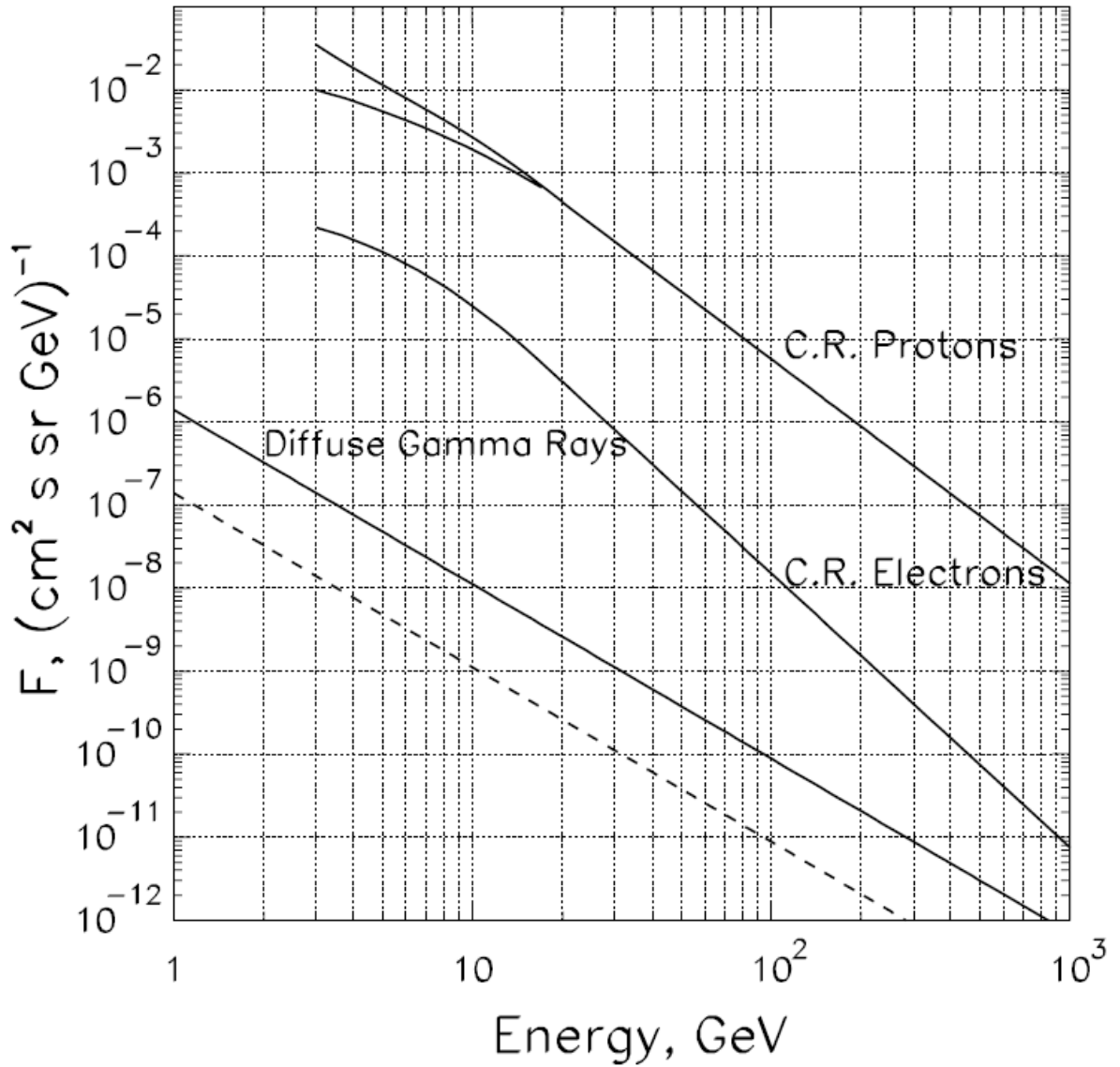


Рис. 2.4 Сравнение потоков гамма-излучения с потоками протонов и электронов космических лучей [135].

### 2.2.1 OSO-3

Одним из первых гамма-телескопов, установленных на космическом аппарате, был гамма-телескоп, установленный на спутнике OSO-3 (Orbiting Solar Observatory), который был запущен в марте 1967 г. (Рис. 2.5) [10]. Телескоп состоял из многослойного сцинтилляционного конвертера гамма-квантов  $S$ , направленного черенковского счетчика  $C$  с радиатором из люсита, верхняя часть которого размером  $\sim 55 \text{ см}^2$  покрыта черной краской (для поглощения света, возникающего при прохождении частиц снизу-вверх), калориметра  $T$  из  $\text{Na(Tl)}$ , прослоенного вольфрамом. Весь телескоп был окружен антисовпадательным защитным колпаком из сцинтилляторов  $A$ ,  $L$  и  $B$ . Регистрируемые события относились к гамма-квантам, когда после конверсии гамма-квантов электроны и позитроны давали сигнал в детекторах  $S$ ,  $C$ ,  $T$  и не давали в  $A$ ,  $L$ . При калибровке телескопа на пучке гамма-квантов были получены следующие основные характеристики: эффективная площадь  $3 \text{ см}^2$  ( $E_\gamma = 100 \text{ МэВ}$ ) и  $8 \text{ см}^2$  ( $E_\gamma = 300 \text{ МэВ}$ ), угловая направленность с полным углом обзора  $24^\circ$ , коэффициент отбора по направлению за счет чернения черенковского счетчика 300:1. Спутник был запущен в марте 1967 г. и проработал 16 месяцев. Ориентация спутника определялась по солнечному датчику и магнитометру с точностью  $2^\circ$ . За весь период работы зарегистрировано 621 событие, которые были отнесены к гамма-квантам с энергией более 50 МэВ. В ходе эксперимента впервые удалось отождествить гамма-излучение, связанное с нашей Галактикой, была обнаружена анизотропия фонового излучения по галактической широте и долготе для энергий более 50 МэВ.

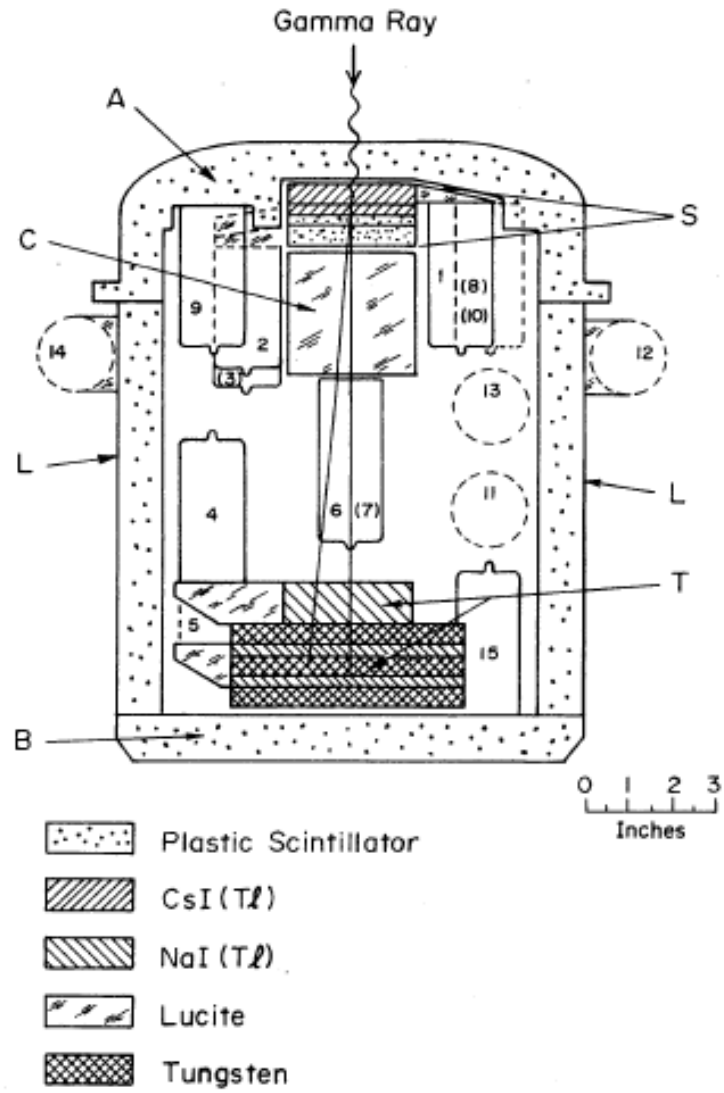


Рис. 2.5 Схема гамма-телескопа, установленного на OSO-3 [10].

### 2.2.2 Космос-208

На спутнике «Космос-208», запущенном в марте 1968 г., был установлен гамма-телескоп для регистрации гамма-излучения с энергией более 30 МэВ, представленный на Рис. 2.6 [11].

Два черенковских детектора из плексигласа (1) и свинцового стекла ТФ-5 (2) образуют телескоп, помещенный внутри антисовпадательного пластического сцинтилляционного счетчика (3, 4). Конвертерами гамма-квантов являются пластины из сцинтиллятора CsI(Tl) (5) толщиной 4 мм и свинца (6) толщиной 2 мм. Были получены экспериментальные данные, относящиеся к различным интервалам энергий гамма-квантов и диапазонам геомагнитных широт. Отмечено повышение интенсивности от диска Галактики.

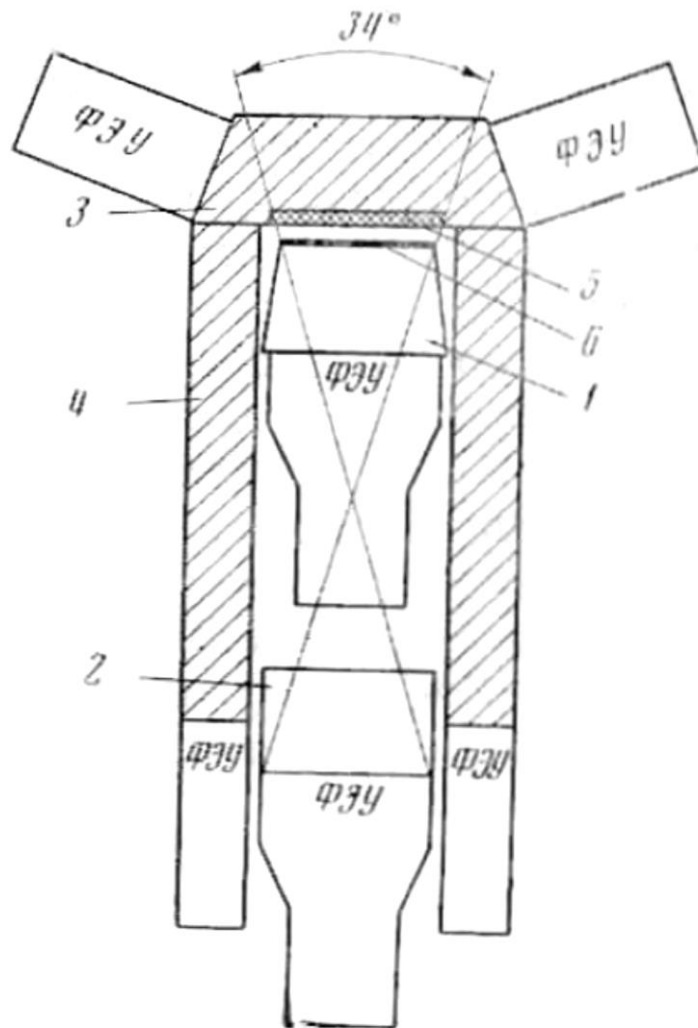


Рис. 2.6 Гамма-телескоп, установленный на спутнике «Космос-208» [11].

### 2.2.3 OGO-5

На спутнике OGO-5 (Orbiting Geophysical Observatory), запущенном в 1968 г., был установлен гамма-телескоп, показанный на Рис. 2.7 [13].

Антисовпадательный пластический сцинтилляционный детектор (A) закрывал акустическую шестизазорную искровую камеру. Гамма-телескоп включал в себя направленный черенковский детектор (B) и сцинтилляционный детектор (C), которые определяли угол обзора телескопа. По краям шести искровых камер устанавливались микрофоны для записи регистрируемых событий. Направленный черенковский детектор представлял собой диск из органического стекла диаметром 12,7 см и толщиной 1,9 см, верхняя плоскость которого покрашена черной краской для исключения из регистрации событий, приходящих из нижней полусферы. Гамма-телескоп имел угловое разрешение около  $3^\circ$  для энергии более 100 МэВ и имел чувствительность  $3 \times 10^{-6}$  фотонов/см<sup>2</sup> с за месяц наблюдений.

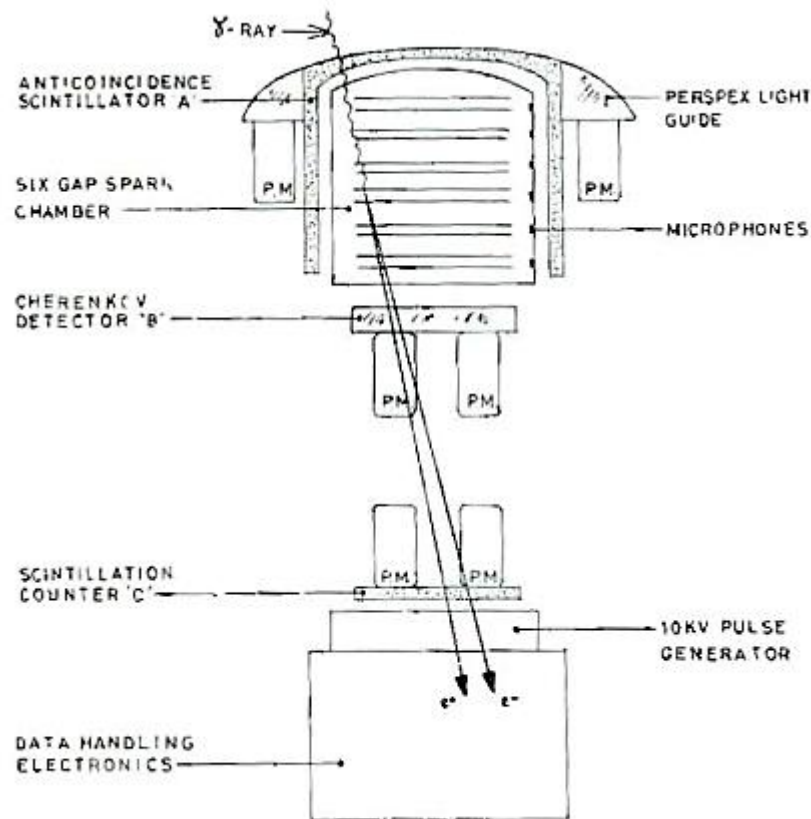


Рис. 2.7 Схема гамма-телескопа, установленного на спутнике OGO-5 [13].

### 2.2.4 SAS-2

Спутник SAS-2 (Small Astronomy Satellite) [14] был предназначен для исследования гамма-астрономии в диапазоне энергий от 35 МэВ до 1 ГэВ. Он проработал с ноября 1972 г. по июнь 1973 г.

Схематическая диаграмма гамма-телескопа, проработавшего на SAS-2, представлена на Рис. 2.8. Проволочные искровые камеры с ферритовыми кольцами располагались над (16 модулей) и под (16 модулей) блоком из 4 сцинтилляторов. Тонкие пластины из вольфрама (0,03 р.е.д.), проложенные между модулями, обеспечивали конвертацию гамма-квантов в электрон-позитронную пару. Такая конструкция обеспечивала определение угла падения первичного гамма-кванта по углу разлета пары и определение энергии по кулоновскому рассеянию электронов и позитронов. Четыре пластических сцинтиллятора и четыре направленных черенковских детектора, а также антисовпадательный сцинтилляционный экран обеспечивали надежное направление и выделение гамма-квантов на фоне заряженных частиц и являлись триггером для запуска искровых камер. Картина события (Рис. 2.9) в искровой камере позволяла с большой вероятностью относить его к гамма-квантам (по характерной конверсионной «вилке» от электрон-позитронной пары, начинающейся в одном из слоев камеры) и измерять угол входа в прибор гамма-кванта. Зная ориентацию прибора, можно было определить небесные координаты точки, откуда пришел гамма-квант. Многократное рассеяние компонент конверсионной пары «размывало» точку в кружок, размер которого зависит от энергии гамма-кванта и характеризует угловое разрешение телескопа, которое для энергии 100 МэВ составляло  $2,7^\circ$ . Чувствительная площадь гамма-телескопа составляла примерно  $640 \text{ см}^2$ . Полный угол зрения -  $35^\circ$ . При недельной длительности наблюдения предельно-измеримый поток от дискретного источника, который можно выделить на изотропном фоне, составлял  $\sim 10^{-6}$  фотон/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). В ходе наблюдений на SAS-2 была получена детальная



структура распределения гамма-излучение галактического диска в диапазоне энергий 35 МэВ – 1 ГэВ, измерен поток из высокоширотных галактических областей, а также обнаружен ряд дискретных источников.

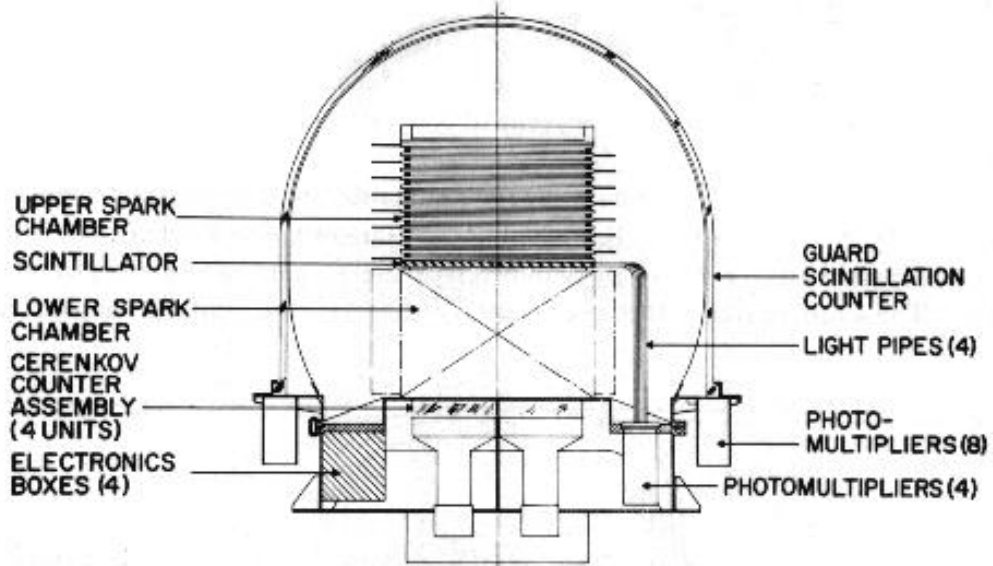


Рис. 2.8 Гамма-телескоп, установленный на спутнике SAS-2 [14].

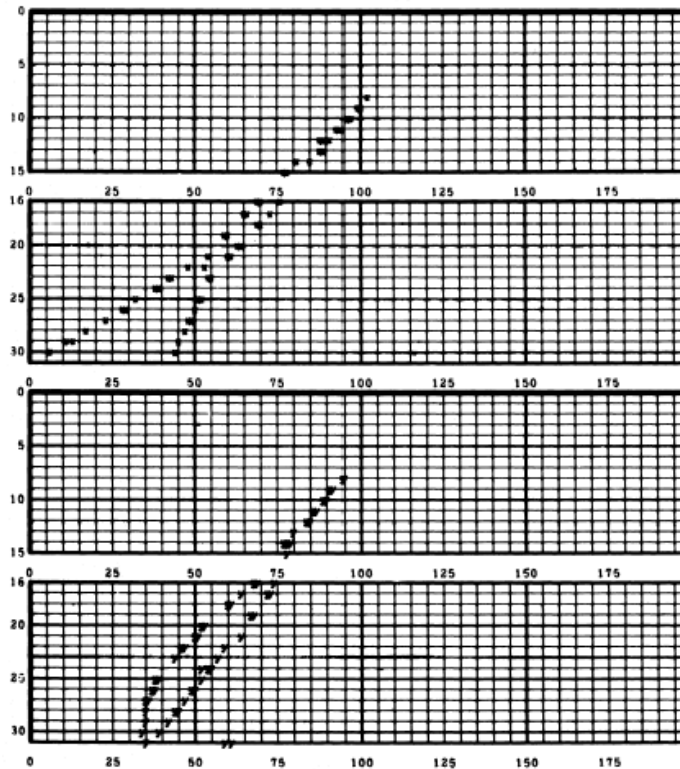


Рис. 2.9 Картина с искровых камер гамма-телескопа SAS-2 (в двух ортогональных плоскостях) при прохождении гамма-кванта и конвертации его в электрон-позитронную пару [14].

### 2.2.5 COS-B

Гамма-телескоп, установленный на спутнике COS-B (Европейское космическое агентство), был предназначен для исследования гамма-излучения в диапазоне от 30 МэВ до 5 ГэВ и проработал с августа 1975 г. по апрель 1982 г. [136]. Он первым использовал высокоэллиптическую орбиту с апогеем около 100 000 км, т.е. надолго выходил за пределы радиационных поясов.

По характеристикам спутника, по точности ориентации и стабилизации, по многим приборным характеристикам (интервал энергий гамма-квантов, чувствительная площадь, угловое разрешение и др.) эксперимент, проводившийся на COS-B (Рис. 2.10 и 2.11), подобен эксперименту SAS-2. Он также был нацелен в первую очередь на исследования галактического излучения и также оснащен многослойной проволочной искровой камерой с записью информации на ферритовые кольца. Однако ряд улучшений позволил COS-B получить более детальную информацию о гамма-излучении Галактики. В прибор был введен сцинтилляционный калориметр на основе CsI(Tl) толщиной 4,7 р.е.д. Это позволило измерять энергетические спектры гамма-квантов вплоть до нескольких ГэВ. Энергетическое разрешение составляло ~40% при энергии 150 МэВ и ~100% при энергии 3 ГэВ. Кроме того, за счет перехода к большим энергиям улучшилась точность пространственного разрешения направленных потоков гамма-излучения. За счет увеличения экспозиции каждого участка неба был снижен минимальный поток от дискретных источников до  $3 \times 10^{-7}$  фотон/(см<sup>2</sup>·с). Чувствительная площадь составляла ~580 см<sup>2</sup> (эффективная площадь 50 см<sup>2</sup>), угловое разрешение не превышало 2°.

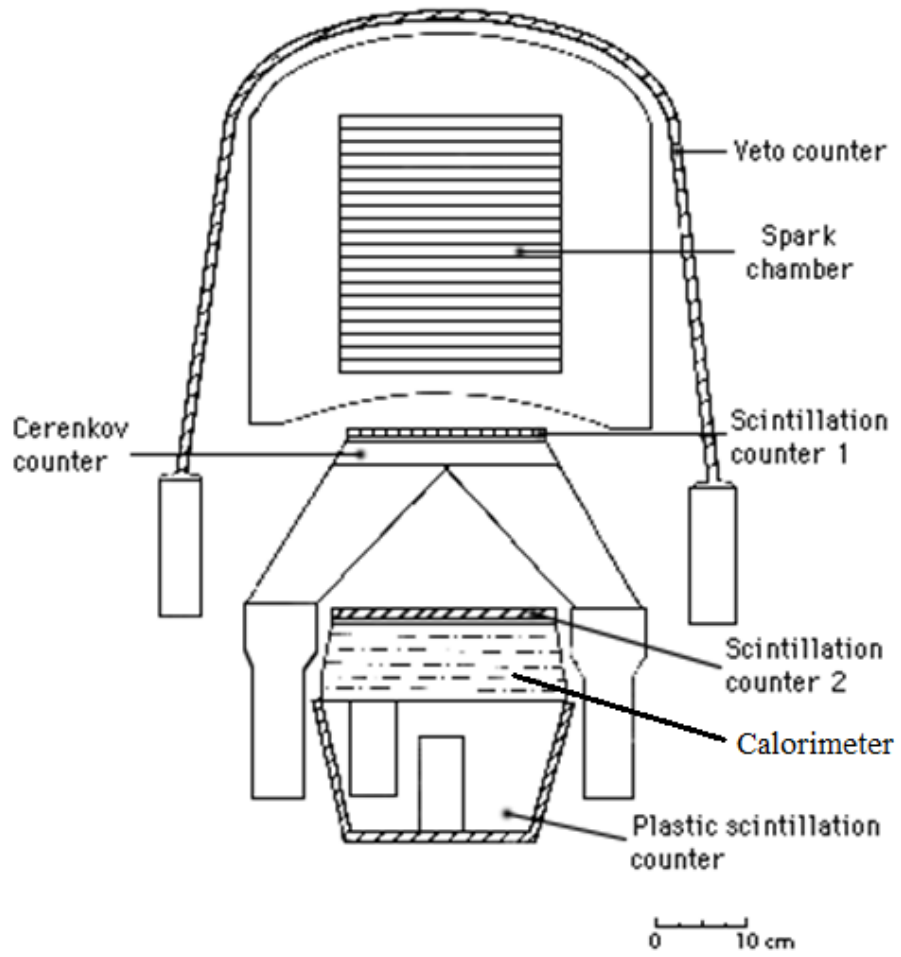


Рис. 2.10 Гамма-телескоп, установленный на спутнике COS-B [136].

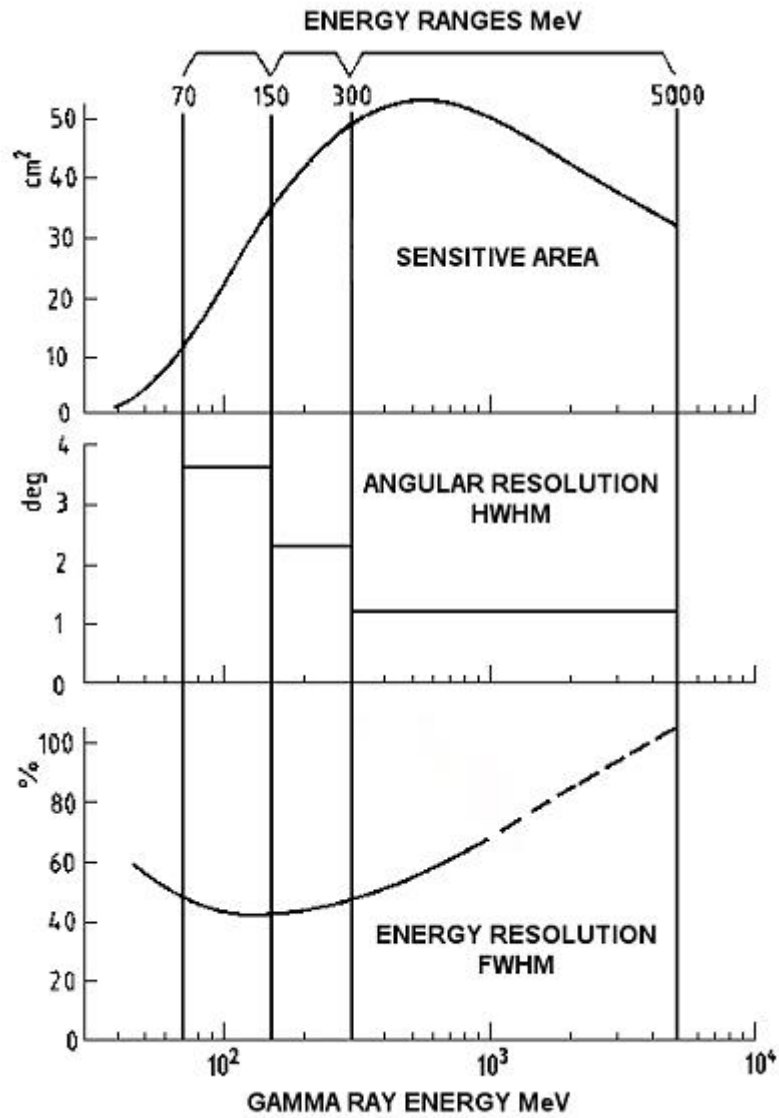


Рис. 2.11 Зависимости эффективной чувствительной площади (sensitive area), углового разрешения (angular resolution), энергетического разрешения (energy resolution) от энергии для гамма-телескопа COS-B (<http://sci.esa.int/cos-b/36277-cos-b-gamma-ray-detector-parameters/>).

За период работы COS-B было осуществлено 65 наблюдений длительностью около 1 месяца с углом обзора около 1 ср. Было детально изучено диффузное галактическое гамма-излучение, детально исследованы некоторые дискретные гамма-источники и молекулярные облака, исследовано спектральное и временное поведение пульсаров Crab и Vela. В результате работы COS-B количество известных источников достигло 25, но только четыре из них удалось идентифицировать – это были пульсары в Крабовидной туманности и в Парусах, квазар 3C273 и газовые облака, известные как  $\rho$ -Змееносца.

### 2.2.6 ГАММА-1

В течение 1990-1992 гг. на орбите работал гамма-телескоп ГАММА-1 [24-26], предназначенный для исследования космического гамма-излучения в диапазоне энергий 50-5000 МэВ. Телескоп по основным характеристикам – чувствительности и угловому разрешению – превосходил приборы, используемые ранее на американском SAS-2 и европейском COS-B спутниках. Чувствительная площадь телескопа составляла  $\sim 1500 \text{ см}^2$ , угловое разрешение –  $1,2^\circ$  при энергии 300 МэВ. Энергетическое разрешение 55% при 100 МэВ и 34% при 550 МэВ.

Для эффективного наблюдения дискретных источников впервые в мировой практике использовалась переориентация космического аппарата. По прогнозу предвспышечной активности Солнца также проводилась переориентация космического аппарата на Солнце для наблюдения солнечных вспышек.

Схема гамма-телескопа ГАММА-1 показана на Рис. 3.1.

Наблюдалось гамма-излучение от источников: пульсара PSR 0833-45 (Vela), пульсара Geminga, двойной системы Cyg X-3, двойной системы Hercules X-1. В 1991 г. в период максимума солнечной активности ГАММА-1 впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучения от Солнца во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/X4,7) и 15 июня (класс 3В/X12+) 1991 г.

Более подробная информация об этом эксперименте и методах создания научной аппаратуры представлена в Главе 3.

### 2.2.7 COMPTEL

Гамма-телескоп COMPTEL [137] входил в состав Комптоновской гамма-обсерватории (Compton Gamma-Ray Observatory, CGRO), выведенной в апреле 1991 г. космическим шаттлом на круговую орбиту с высотой 450 км и наклоном  $28,5^\circ$ . CGRO проработал до июня 2000 г. В состав CGRO входили следующие приборы:

- BATSE (Burst and Transient Source Experiment) для исследования гамма-всплесков в диапазоне энергий 20-1000 кэВ;
- OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment) для исследования гамма-излучения в диапазоне энергий 0,05-10 МэВ;
- COMPTEL (Compton Telescope) для исследования гамма-излучения в диапазоне энергий 0,7-30 МэВ;
- EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) для исследования гамма-излучения в диапазоне энергий 30 МэВ – 30 ГэВ.

Общая компоновка приборов на CGRO показана на Рис. 2.12 [36].

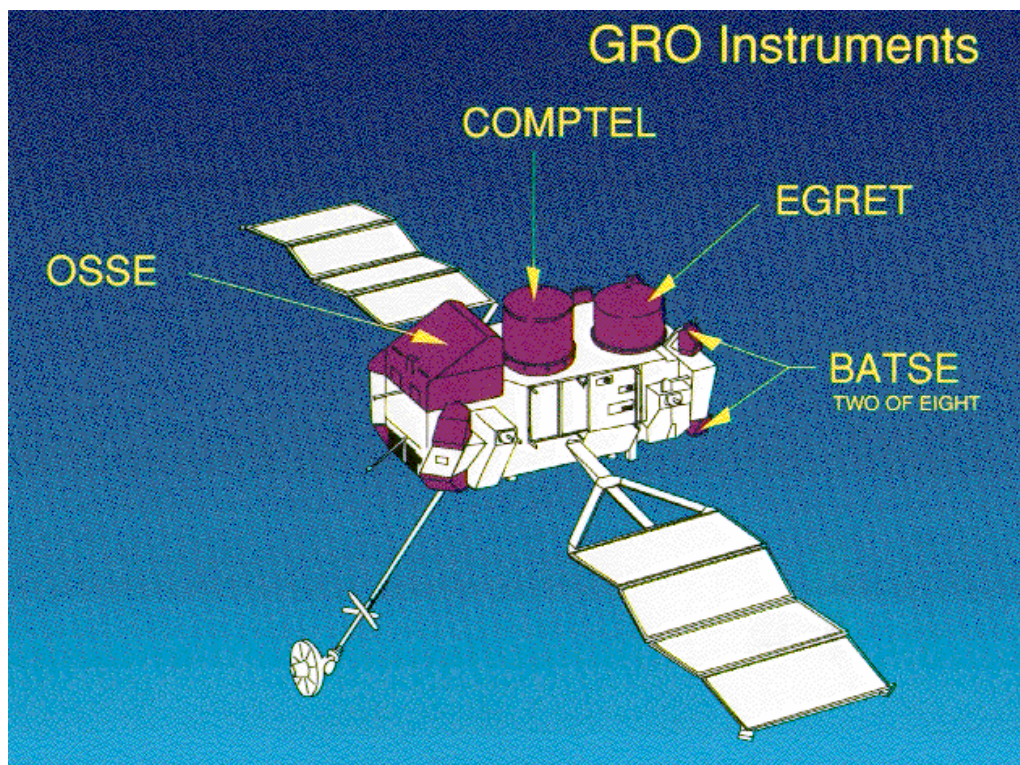


Рис. 2.12 Космическая Комптоновская гамма-обсерватория CGRO [36].

Гамма-телескоп COMPTEL (Рис. 2.13) состоял из двух сцинтилляционных слоев, разнесенных на расстояние 1,58 м. Гамма-квант попадал в верхний слой D1, состоящий из 7 модулей толщиной 8,5 см, наполненных жидким сцинтиллятором NE213A с низким  $Z$  и низкой плотностью ( $\sim 1 \text{ г/см}^3$ ), просматриваемых фотоумножителями. Чувствительная площадь D1 составляла  $4188 \text{ см}^2$ . После комптоновского рассеяния гамма-квант поглощался в нижнем слое D2, состоящем из 14 модулей из кристалла NaI(Tl), просматриваемых фотоумножителями. Над кристаллами NaI(Tl) располагалась алюминиевая сэндвич-пластина 20 мм с ячеистой структурой. Чувствительная площадь D2 составляла  $8744 \text{ см}^2$ . D1 и D2 были окружены анизотропной защитой из пластического сцинтиллятора для исключения из регистрации заряженных частиц и были включены во времяпролетную систему.

Прибор работал в диапазоне энергий 700 кэВ – 30 МэВ с обзором в 1,5 ср. При энергетическом разрешении 10% для 1 МэВ и 5% для 20 МэВ COMPTEL предназначался для исследования как непрерывного гамма-излучения, так и гамма-линий. Гамма-источники в пределах поля зрения прибора могли быть различимы с точностью 3-5 градусов.

За время работы COMPTEL исследовал как диффузное гамма-излучение, так и гамма-излучение дискретных источников (пульсары CRAB и VELA, квазары 3C273 и 3C279). Из центра Галактики была зарегистрирована гамма-линия 1,8 МэВ от  $^{26}\text{Al}$ .



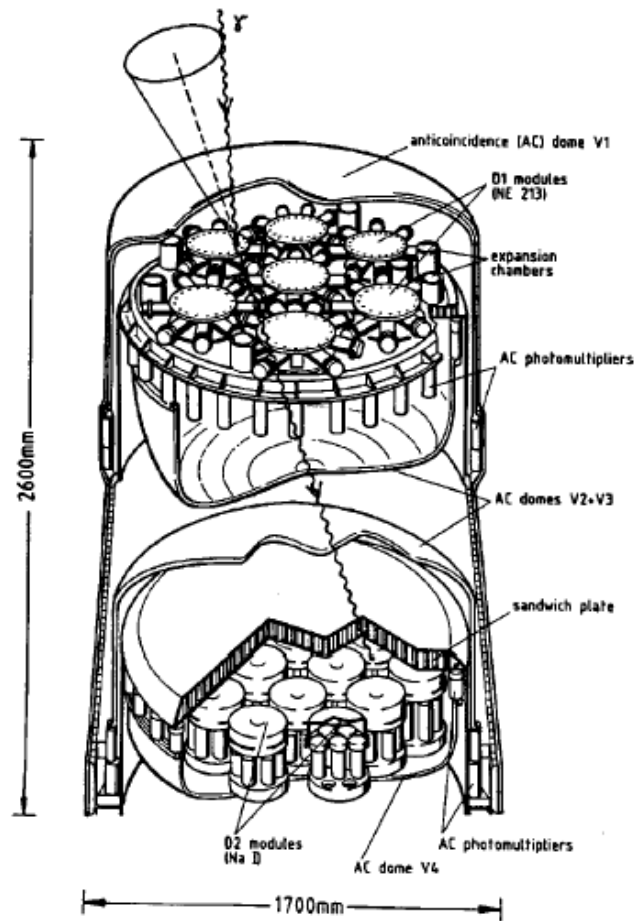


Рис. 2.13 Гамма-телескоп COMPTEL [137].

### 2.2.8 EGRET

Гамма-телескоп EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) входил в состав Комптоновской обсерватории CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) (Рис. 2.12), которая была выведена на орбиту в апреле 1991 г. и проработала до июня 2000 г.

Гамма-телескоп EGRET был предназначен для исследования космического гамма-излучения в диапазоне энергий от 30 МэВ до 30 ГэВ. Схема гамма-телескопа показана на Рис. 2.14 [36]. Гамма-телескоп состоял из антисовпадательной системы для исключения из регистрации первичных заряженных частиц космического излучения, искровых камер с конвертерами для конвертации гамма-квантов в электрон-позитронную пару и определения угла разлета пары, триггерной системы для выборки частиц в заданном направлении и запуска искровых камер, а также калориметра из NaI(Tl) для определения энергии падающих гамма-квантов. Общий вес прибора – 1830 кг, высота – 2,25 м, диаметр – 1,65 м, энергопотребление – 190 Вт, скорость передаваемой информации – 6859 бит/с.

Пластиковый интегральный антисовпадательный детектор из NE110 толщиной 2 см в виде колпака закрывает искровые камеры. Он просматривается 24 ФЭУ. Сами искровые камеры расположены внутри 2 мм алюминиевого контейнера. Конверсия гамма-квантов происходит в верхней стопке из 28 искровых камер, прослоенных фольгами из тантала толщиной 90 мкм (0,02 р.е.д.). При этом общая толщина вещества составляет 0,54 р.е.д., что приводит к эффективности конверсии в 30%. Объем верхней стопки искровых камер равен  $80 \times 80 \times 45 \text{ см}^3$ . Искровые камеры наполнены смесью газов из неона, аргона, этана при давлении 1,1 атм. Имелась возможность перезаполнения искровых камер новой газовой смесью. Ширина зазора камеры 4 мм. Внутри камеры имелись 992 проволоочки, что обеспечивало хорошее пространственное разрешение.

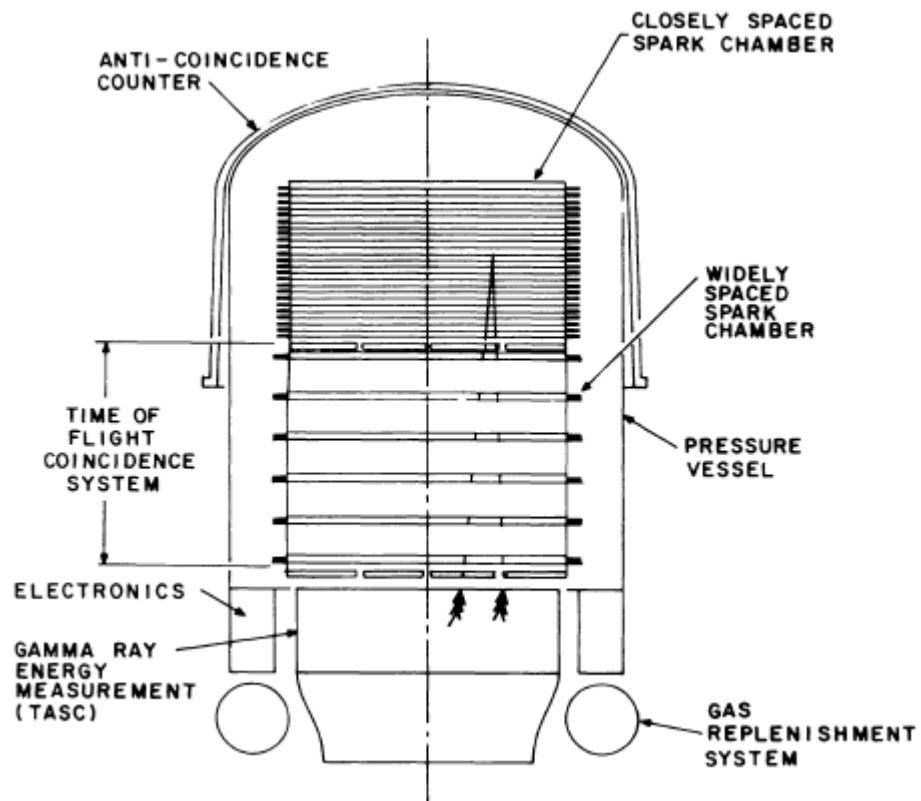


Рис. 2.14 Гамма-телескоп EGRET [36].

Под верхней стопкой искровых камер располагались две плоскости сцинтилляционных детекторов (по 4x4 полосы в каждой плоскости) времяпролетной системы на расстоянии 60 см друг от друга. Триггерный сигнал от времяпролетной системы при отсутствии сигнала в антисовпадательной системе запускал искровые камеры путем подачи высоковольтного импульса для последующей регистрации гамма-события. Между сцинтилляторами времяпролетной системы располагались несколько стопок искровых камер с большим зазором, чем в верхней стопке для лучшей идентификации траектории электрон-позитронной пары. Внизу располагался калориметр (спектрометр полного поглощения TASC) из NaI(Tl) размером 77x77x20 см<sup>3</sup> и весом 435 кг (8 р.е.д.). Свет собирался 16 ФЭУ диаметром 12,7 см. Гамма-телескоп EGRET с эффективной площадью ~2000 см<sup>2</sup> ( $E_\gamma > 200$  МэВ), с углом обзора ~40°, угловым разрешением 0,1°-0,4° и энергетическим разрешением около 15% имел минимальную чувствительность  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

При регистрации высокоэнергичных гамма-квантов ( $E_\gamma > 10$  ГэВ) после взаимодействия с веществом калориметра возникает поток малоэнергичных частиц (электроны, позитроны и гамма-кванты с  $E_\gamma \sim 1$  МэВ), движущихся во всех направлениях. Малоэнергичные гамма-кванты, проходя в обратном направлении без взаимодействия детекторные системы могут дать сигнал в антисовпадательной системе, тем самым исключая истинные гамма-кванты из регистрации. Эти события не позволили EGRET исследовать гамма-излучение с энергией более 10 ГэВ.

За период наблюдения EGRET получил новые важнейшие результаты в широком диапазоне астрофизики [138]. Был обнаружен новый класс объектов - блазары, испускающие высокоэнергичные гамма-кванты. Были обнаружены высокоэнергичные гамма-вспышки длительностью около часа с энергией примерно ГэВ и 10 ГэВ. Было исследовано высокоэнергичное гамма-излучение от 7 пульсаров. Результаты EGRET позволили утверждать,

что космические лучи имеют галактическое происхождение. Была получена детальная карта галактического диффузного гамма-излучения и определен вклад  $\pi^0$ -мезонов в спектр высокоэнергичного гамма-излучения. Было измерено внегалактическое диффузное гамма-излучение.

### 2.2.9 AGILE

AGILE (Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero) – это следующее поколение небольших научных приборов для исследований в гамма-астрономии. AGILE разрабатывался под руководством Итальянского Космического Агентства (Italian Space Agency, ASI) [139]. Прибор предназначен для исследования диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от дискретных источников.

AGILE состоит из трех приборов (Рис. 2.15): GRID (Gamma-Ray Imaging Detector) – гамма-телескоп для измерения гамма-квантов в диапазоне энергий 30 МэВ – 50 ГэВ, SA (Super-AGILE) – детектор, обеспечивающий дополнительную информацию в жестком рентгеновском диапазоне 10-40 кэВ и MCAL (Mini-Calorimeter) – калориметр из CsI(Tl) для измерения энергии, являющийся частью GRID.

Основная часть GRID – это кремниевый стриповый детектор (Silicon Tracker), содержащий 12 ( $x, y$ )-плоскостей из множества кремниевых сборок размером  $9,5 \times 9,5 \text{ см}^2$  со стрипами с шагом 121 мкм и толщиной 410 мкм. Первые 10 слоев состоят из 3 подслоев: слой из вольфрама ( $0,07 X_0$ ) для конверсии гамма-квантов и затем два ортогональных кремниевых микростриповых слоя. Общее количество считывающих каналов около 43000. Общая толщина вещества GRID составляет  $\sim 0,08 X_0$ .

MCAL состоит из двух плоскостей столбиков из CsI(Tl) (общее количество вещества –  $1,5 X_0$ ). Сигнал с каждого столбика собирается на 2 фотодиода, расположенных на двух торцах. Благодаря сегментированному антисовпадательному детектору (AC) решается проблема «обратного тока» из калориметра.

Антисовпадательный детектор для исключения из регистрации заряженных частиц состоит из трех слоев пластического сцинтиллятора (0,6 см), свет с которых собирается с помощью спектросмещающего волокна на фотоумножителе.

Основные характеристики AGILE следующие: поле зрения – 2,5-3 ср, пространственное разрешение – 40 мкм, угловое разрешение – 1-2° ( $E_\gamma = 300$  МэВ) и 0,2° ( $E_\gamma = 10$  ГэВ), энергетическое разрешение 50% ( $E_\gamma = 1$  ГэВ); эффективная площадь – 550 см<sup>2</sup> ( $E_\gamma = 10$  ГэВ), чувствительность -  $2 \cdot 10^{-7}$  фотон/см<sup>2</sup>с, мертвое время меньше 100 мкс, масса – ~80 кг.

Гамма-телескоп AGILE работает на орбите с 2007 г. по настоящее время на орбите. По наблюдениям AGILE создан каталог из 47 дискретных источников [43]), из которых 21 ассоциируются с пульсарами или с их кандидатами, 13 с блазарами, 2 с высоко-массивными рентгеновскими двойными системами, 2 со сверхновыми, 1 с высоко-массивной двойной системой, 8 неидентифицированы.

AGILE имеет недостаточный диапазон измеряемых энергий ( $E_\gamma < 50$  ГэВ) и недостаточное угловое 0,2° ( $E_\gamma = 10$  ГэВ) и энергетическое 50% ( $E_\gamma = 1$  ГэВ) разрешения.

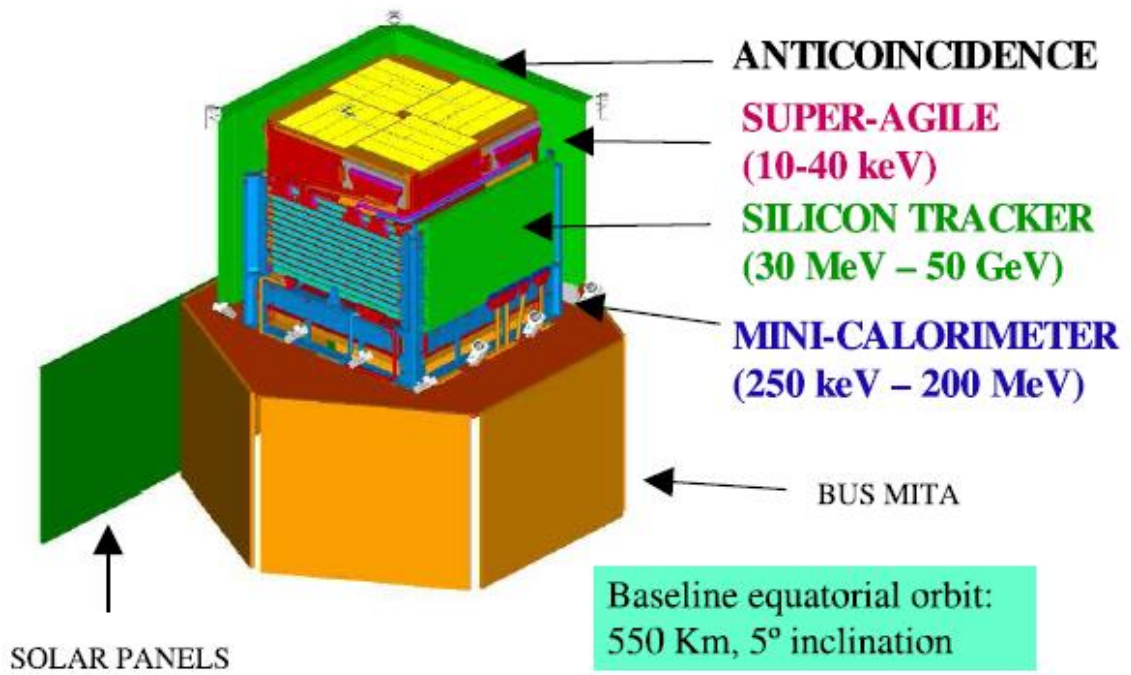


Рис. 2.15 Гамма-телескоп AGILE [139].



### 2.2.10 Fermi-LAT

В июне 2008 г. в США была запущена на орбиту космическая обсерватория GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) впоследствии переименованная в Fermi Gamma-ray Space Telescope. Наблюдения продолжаются по настоящее время. В состав обсерватории входят два прибора: LAT (Large Area Telescope) и GBM (Gamma Burst Monitor), предназначенный для исследования гамма-всплесков в диапазоне энергий 10 кэВ – 25 МэВ. Орбита космической обсерватории – круговая с высотой ~565 км и наклоном 25,5°. Режим наблюдения – сканирующий, примерно за 3 часа осуществляется полный обзор неба. Предполагается, что обсерватория будет функционировать до 2018 года.

Основным инструментом обсерватории является Fermi-LAT (Рис. 2.16), гамма-телескоп для исследования космического гамма-излучения в диапазоне энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ [45].

Гамма-телескоп LAT состоит из 16 (4x4) идентичных вертикальных блоков. Каждый блок включает конвертер-трекер из 18 (x, y)-плоскостей, каждая из которых состоит из двух слоев (x и y) односторонних кремниевых стриповых детекторов с шагом 228 мкм (каждая плоскость имеет площадь 37x37 см<sup>2</sup> с 11500 стриповыми детекторами общая площадь составляет 83 м<sup>2</sup> и около 1 миллиона каналов). Для увеличения вероятности конверсии гамма-квантов первые 16 плоскостей конвертер-трекера содержат веществом с высоким Z (вольфрам) и делятся на две части: «front» - первые 12 (x, y)-плоскостей с тонкими конвертерами (0,03 р.е.д.) и «back» - последние 4 (x, y)-плоскости с толстыми конвертерами (0,18 р.е.д.). Запускающим триггером конвертера-трекера для регистрации гамма-квантов является срабатывание трех последовательных (x, y)-плоскостей с последующим бинарным съемом информации. Сегментированный калориметр для измерения энергии состоит из 96 блоков с кристаллами CsI(Tl) и имеет толщину 8,5 р.е.д. Сегментированные антисовпадательные пластические детекторы со спектросмещающими волокнами расположены сверху и сбоку гамма-

телескопа для исключения из регистрации заряженных частиц. Детекторы анτισопадений имеют эффективность  $\sim 0,9997$ .

Главная научная цель – поиск и изучение гамма-источников (блазары, остатки сверхновых, пульсары, неидентифицированные гамма-источники), регистрация диффузного излучения, а также поиск гамма-линий при энергиях более 30 ГэВ, которые, возможно, возникают при аннигиляции вимпов, суперсимметричных частиц, претендующих на роль компонент «темной материи».

Основными характеристиками Fermi-LAT, полученными расчетным методом Монте-Карло ([http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm)) и подтвержденными при обработке экспериментальных данных, являются:

- эффективная площадь (при нормальном падении):  $\sim 5000 \text{ см}^2$  для «front» и  $\sim 4000 \text{ см}^2$  для «back»;
- угол обзора 2,4 ср;
- угловое разрешение:  $\sim 3,5^\circ$  при  $E_\gamma = 100 \text{ МэВ}$ ,  $\sim 1^\circ$  при  $E_\gamma = 1 \text{ ГэВ}$ ,  $\sim 0,1^\circ$  при  $E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$ ;
- энергетическое разрешение:  $\sim 10\%$  при  $E_\gamma \gtrsim 10 \text{ ГэВ}$ ;
- чувствительность для точечного источника лучше  $3 \cdot 10^{-9}$  фотон/см<sup>2</sup>с при  $E_\gamma > 100 \text{ МэВ}$ .

Некоторые другие параметры Fermi-LAT: объем передаваемых данных 15 Гбайт/день; потребляемая мощность 650 Вт; размеры  $1,8 \times 1,8 \times 0,72 \text{ м}^3$ ; масса 2800 кг.

#### Fermi-LAT:

- использует круговую орбиту с высотой  $\sim 565$  км с постоянной переориентацией аппарата на  $180^\circ$ , что не позволяет проводить непрерывные наблюдения гамма-источников;

- осуществляет постоянный обзор неба в режиме сканирования за 3 часа для поиска гамма-источников, что не дает возможность изучать

зависимость светимости гамма-источника от времени, при этом реальное время наблюдения и детального исследования гамма-источников примерно в 8 раз меньше времени работы Fermi-LAT;

- антисовпадательная система имеет недостаточную эффективность регистрации заряженных частиц (всего 0,9997) и недостаточную эффективность исключения частиц «обратного тока»;

- конвертер-трекер запускает регистрацию гамма-квантов при срабатывании трех последовательных плоскостей стриповых детекторов, что вместе с недостаточной эффективностью антисовпадательной системы явно недостаточно для исключения фоновых событий. Как результат, нет никакой информации о регистрации гамма-квантов с энергий до 100 МэВ;

- стриповые детекторы имеют шаг всего 228 мкм и бинарным съём информации, что приводит к угловому разрешению только  $\sim 0,1^\circ$  при  $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ;

- отсутствует времяпролетная система, которая позволила бы дополнительно исключать фоновые события;

- небольшое расстояние между конвертером-трекером и калориметром ( $\sim 10$  см) позволяет фоновым частицам «обратного тока», идущим от калориметра в направлении конвертера-трекера и антисовпадательной системы, исказить информацию о реальных гамма-квантах;

- толщина калориметра для частиц, попадающих в телескоп вдоль его оси, всего 8,5 р.е.д. и, в результате, плохая точность измерения энергии частиц для  $E_\gamma > 300$  ГэВ и недостаточное энергетическое разрешение ( $\sim 10\%$  при  $E_\gamma = 100$  ГэВ).

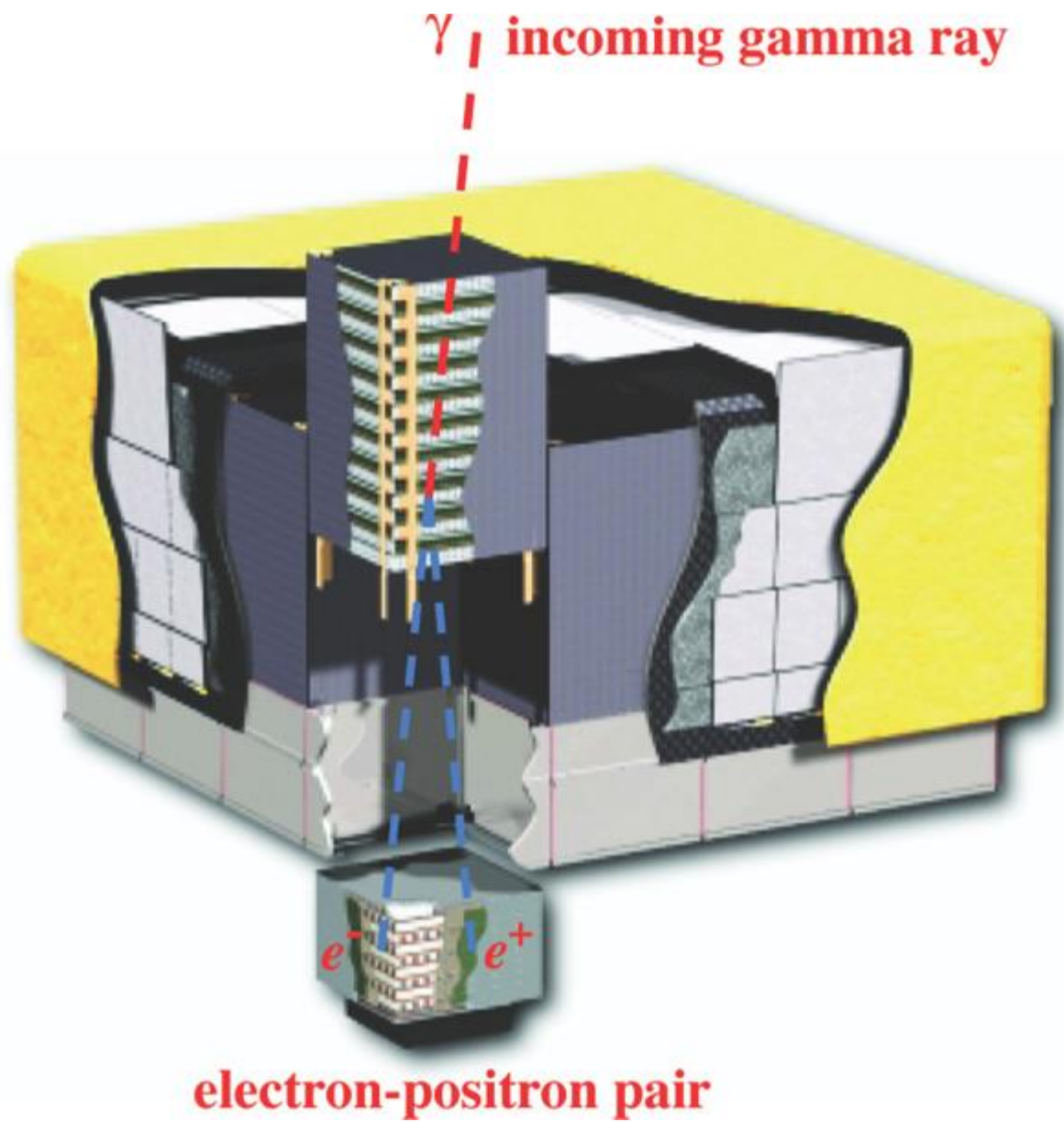


Рис. 2.16 Гамма-телескоп Fermi-LAT [45].

### 2.2.11 CALET

С 2015 г. на борту МКС (Международная Космическая Станция) на японском экспериментальном модуле (JEM-EF) работает телескоп CALET (CALorimetric Electron Telescope) [140]. CALET состоит из основного прибора CAL (CALorimeter) и CGBM (CALET Gamma-ray Burst Monitor) – для регистрации гамма-всплесков. Телескоп CAL (Рис. 2.17) предназначен для исследования высокоэнергичных электронов в диапазоне энергий от  $\sim 1$  ГэВ от  $\sim 20$  ТэВ, протонов, ядер с зарядом до  $Z = 40$  от  $\sim 10$  ГэВ до 1000 ТэВ и гамма-квантов от  $\sim 1$  ГэВ от  $\sim 10$  ТэВ. Поле зрения составляет  $\sim 45^\circ$ , геометрический фактор равен примерно  $1200 \text{ см}^2 \text{sr}$ , масса 613 кг.

Прибор включает в себя:

- двухслойные сегментированные пластиковые сцинтилляторы для зарядовой идентификации космических лучей (CHD); каждый слой состоит из 14 пластиковых сцинтилляционных пластин с размерами  $450 \times 32 \times 10 \text{ мм}^3$ ;

- калориметр для построения изображения (IMC) толщиной 3 р.е.д. из сцинтилляционных волокон диаметром 1 мм, прослоенных вольфрамом;

- толстый калориметр толщиной 27 р.е.д. (TASC); калориметр состоит из 12 слоев по 16 столбиков из кристалла PWO с фотоприемниками APD; площадь калориметра  $326 \times 326 \text{ мм}^2$ .

Угловое разрешение, определяемое в IMC, составляет  $\sim 0,16^\circ$  для электронов с энергией более 10 ГэВ и  $\sim 0,24^\circ$  для гамма-квантов с энергией более 10 ГэВ.

Энергетическое разрешение, определяемое в TASC, составляет  $\sim 2\%$  для энергий выше 100 ГэВ.

Основные научные задачи: поиск близких источников высокоэнергичных электронов, измерение потоков ядер, поиск частиц темной материи.

CALET имеет небольшую чувствительную площадь  $\sim 0,1 \text{ м}^2$  и недостаточное угловое разрешение  $0,2^\circ$  ( $E_\gamma = 10 \text{ ГэВ}$ ) при регистрации гамма-

квантов. Кроме того, при работе на МКС создается дополнительное фоновое излучение от вещества станции и ограничен выбор наблюдения астрофизических объектов.

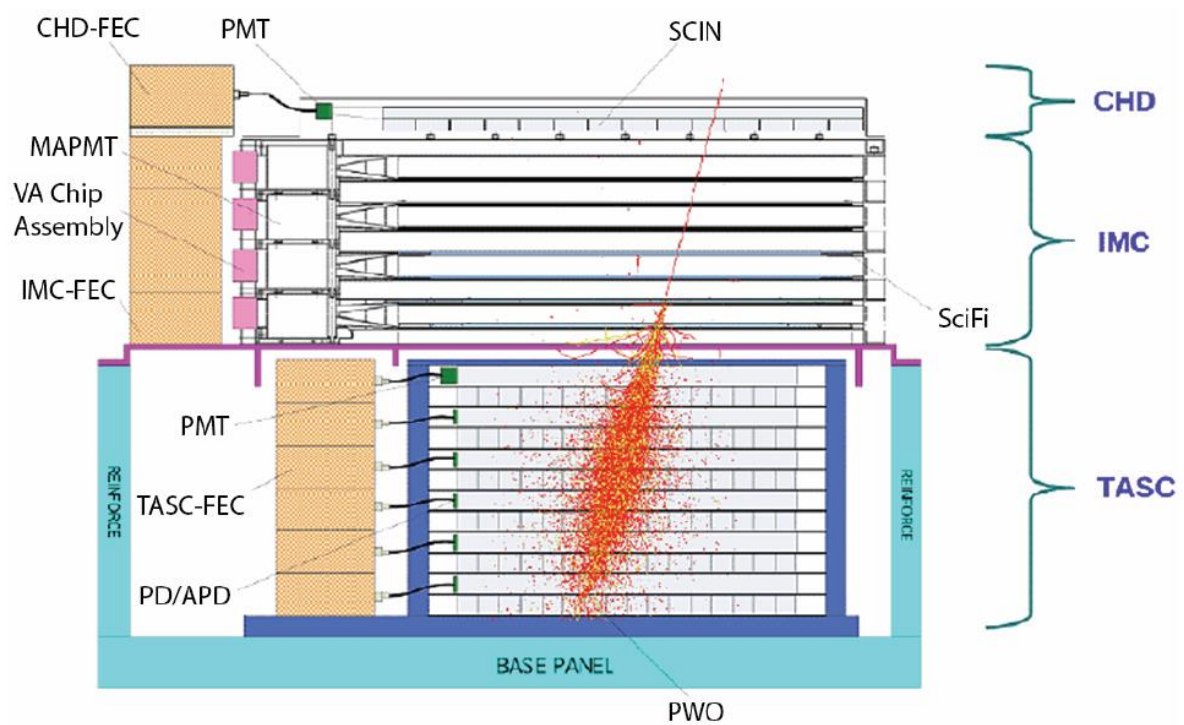


Рис. 2.17 CALET [140].

### 2.2.12 DAMPE

В декабре 2015 г. запущен на солнечно-синхронную орбиту высотой 500 км китайский спутник с телескопом DAMPE (Dark Matter Particle Explore) [141].

DAMPE (Рис. 2.18) с геометрическим фактором  $\sim 0,3 \text{ м}^2 \text{ ср}$  предназначен для измерений потоков электронов, ядер космических лучей в диапазоне от нескольких десятков ГэВ до  $\sim 100 \text{ ТэВ}$  и поиска частиц темной материи, а также для исследования диффузного гамма-излучения с угловым  $\sim 0,1^\circ$  при  $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$  и энергетическим  $1,5\%$  при  $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$  разрешениями.

Телескоп состоит из 4 детекторов:

- набор пластических сцинтилляционных стриповых детекторов, использующихся как антисовпадательный детектор и детектор для регистрации ядер до  $Z = 26$ ;

- кремниевый стриповый конвертер-трекер для определения направления падающих частиц, состоящий из 12 позиционно-чувствительных кремниевых детекторных плоскостей (6 для определения  $x$ -координаты и 6 для определения  $y$ -координаты). Шаг стрипов составляет 121 мкм. Между плоскостями 2, 3, 4 и 5 расположены слои вольфрама общей толщиной 1 мм для увеличения вероятности конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару. Активная площадь –  $0,5534 \text{ м}^2$ ;

- калориметр из 308 кристаллов BGO (размером  $2,5 \times 2,5 \times 60 \text{ см}^3$ ) для измерения энергии и построения профиля электромагнитного ливня. Кристаллы оптически изолированы друг от друга и расположены горизонтально в 14 слоях по 22 кристалла. Активная площадь –  $60 \times 60 \text{ см}^2$ . Полная толщина калориметра составляет 32 р.е.д.;

- нейтронный детектор из боросодержащего сцинтиллятора для дополнительного разделения заряженных частиц и гамма-квантов по содержанию нейтронов в адронном и электромагнитном ливнях.

DAMPE имеет небольшую чувствительную площадь  $\sim 0,36 \text{ м}^2$  и недостаточное угловое разрешение только  $0,1^\circ$  ( $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$ ) при регистрации гамма-квантов.

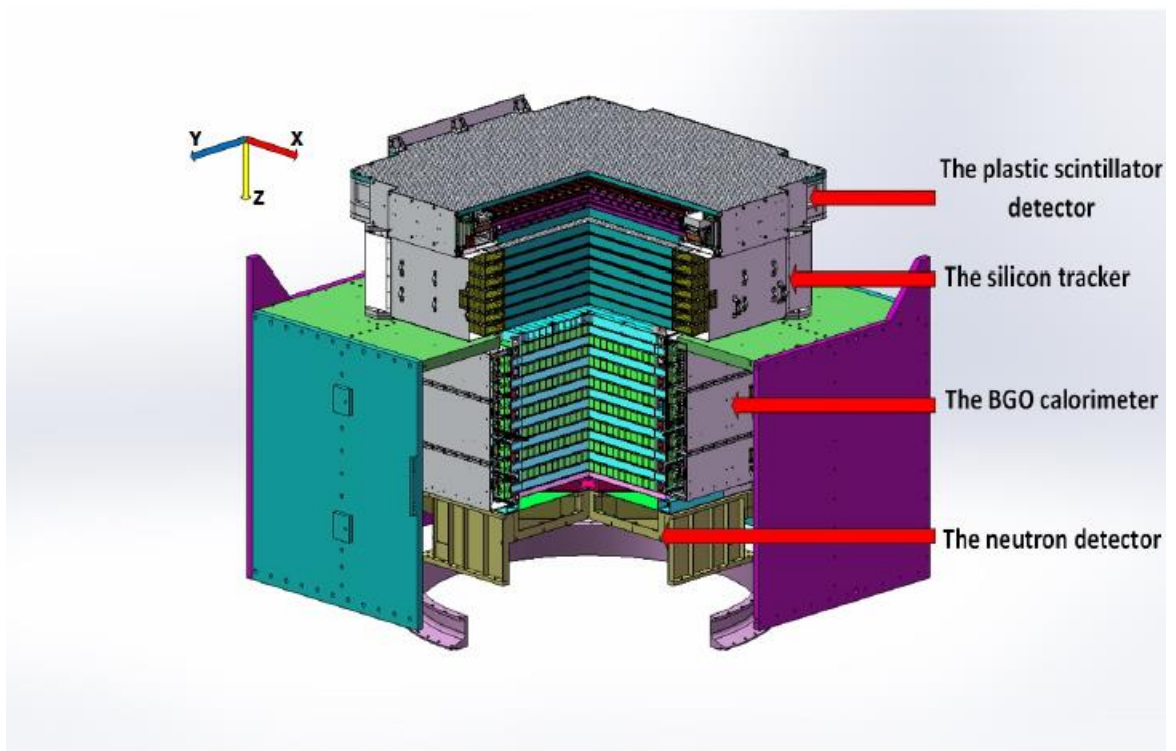


Рис. 2.18 DAMPE [141].



### 2.3 Анализ существующих методов регистрации гамма-излучения на космических аппаратах

При взаимодействии гамма-квантов с конвертером в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ происходит конверсия с образованием электрон-позитронной пары. Далее различными методами регистрируются образовавшиеся электроны и позитроны. В гамма-телескопах используются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы, искровые и дрейфовые камеры, черенковские детекторы (твердотельные и газообразные), калориметры на основе сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.

Рассматривая различные методы регистрации гамма-квантов гамма-телескопами на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ можно сделать следующие выводы:

1. Использование искровых и дрейфовых камер требует постоянного внимания к газоразрядным системам, газовой смеси в камерах, ее регулярного перезарядки. Газовые системы в условиях длительных космических полетах не обладают высокой надежностью.

2. При использовании газовых черенковских детекторов возникают такие же недостатки и к тому же для получения необходимых сигналов требуется большая длина детекторов.

3. Будущие космические гамма-телескопы для решения актуальных астрофизических задач должны проводить непрерывные, длительные измерения для получения хорошей статистики и для измерения вариаций светимости одновременно во всем диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ, иметь большую чувствительную площадь ( $0,5-1 \text{ м}^2$ ), высокое угловое ( $< 0,05^\circ$  при  $E_\gamma = 100 \text{ ТэВ}$ ) и энергетическое ( $< 2\%$  при  $E_\gamma = 100 \text{ ТэВ}$ ) разрешения, и иметь в своем составе:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,9999;

- конвертеры-трекеры из кремниевых стриповых детекторов с высоким координатным разрешением, которые позволяют определять направление регистрируемых гамма-квантов с точностью лучше  $0,05^\circ$ ;

- времяпролетные сцинтилляционные системы, позволяющие выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,5 нс;

- калориметры с большой толщиной (не менее 20 р.е.д.) на основе сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты в широком диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением лучше 3%;

- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И СОЗДАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ГАММА-1 И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В результате исследований, проведенных гамма-телескопами SAS-2 (1972-1973 гг.) [14] и COS-B (1975-1982 гг.) [136] в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ГэВ был получен ряд важных научных результатов, основные из которых – обнаружение около 25 дискретных галактических и внегалактических источников, регистрация диффузного галактического и изотропного внегалактического излучения.

Эти результаты были получены при использовании гамма-телескопов с чувствительной площадью  $\sim 500-600 \text{ см}^2$ , угловым разрешением  $4-5^\circ$  ( $E_\gamma = 100 \text{ МэВ}$ ), энергетическим разрешением около 50%, минимальным регистрируемым потоком  $F \sim 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  ( $E_\gamma \geq 100 \text{ МэВ}$ ) при длительности измерений около одного года.

Для успешного осуществления планируемого в 1980-ые – 1990-ые годы эксперимента ГАММА-1 в области исследования гамма-излучения в диапазоне энергий 50-5000 МэВ стояла задача – создать гамма-телескоп с высокой чувствительностью, большой площадью, высоким угловым, временным и энергетическим разрешениями [2, 24-26, 142]. По этим параметрам проектируемый гамма-телескоп должен был превосходить гамма-телескопы SAS-2 и COS-B.

#### **3.1 Гамма-телескоп ГАММА-1**

Схема гамма-телескопа ГАММА-1 представлена на Рис. 3.1.

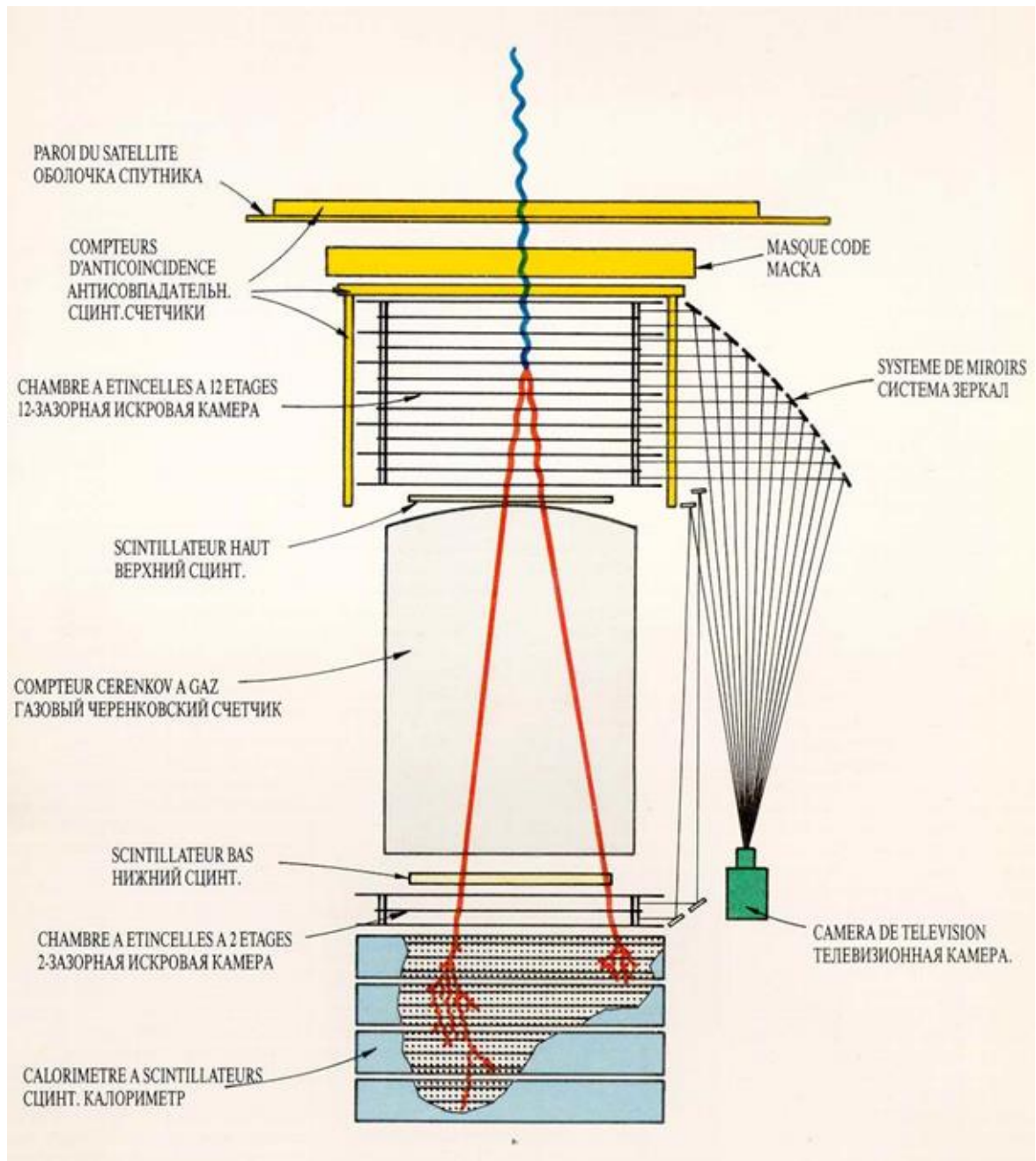


Рис. 3.1 Схема гамма-телескопа ГАММА-1.

Основным методом регистрации гамма-квантов было использование комбинации детекторов: широкозазорной искровой камеры для конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару и измерения направления падения гамма-квантов, сцинтилляционной времяпролетной системы с большой пролетной базой для исключения из регистрации частиц, попадающих в гамма-телескоп вне апертуры (снизу и сбоку), газового черенковского счетчика большой площади для исключения из регистрации частиц с энергией ниже порога возникновения черенковского излучения, антисовпадательной сцинтилляционной системы для исключения заряженных частиц, которая перекрывает широкозазорные искровые камеры сверху и с четырех боковых сторон, и сцинтилляционного калориметра для измерения энергии гамма-квантов.

### ***Широкозазорная искровая камера***

Основным детектором гамма-телескопа являлась широкозазорная искровая камера.

Искровая камера-конвертер гамма-телескопа имела 12 зазоров шириной 3 см каждый и общей толщиной электродов  $\sim 0,45$  р.е.д. [143]. В электродах камер гамма-кванты конвертировались в электрон-позитронные пары и характерный вид треков («вилки») позволял надежно идентифицировать регистрируемые гамма-кванты и восстанавливать направление их прилета. Искровая камера позволяла также измерять энергию гамма-квантов в области энергий от 50 до 200 МэВ по многократному рассеянию электронов.

Конструктивно искровая камера-конвертер состояла из 12 модулей. Каждый модуль представлял собой широкозазорную камеру с рабочей поверхностью  $500 \times 500$  мм<sup>2</sup>. Боковые стенки были изготовлены из оптического стекла, причем две стенки выполнены матовыми, а через две другие, прозрачные, производился вывод информации. Электроды,

соединенные с землей, были изготовлены из алюминиевого сплава. На один заземленный электрод приклеивались два модуля. Газовым наполнением служила смесь 96% Ne + 2% Ar + 2% CO<sub>2</sub>. Питание модулей искровых камер параллельное, один высоковольтный генератор на два модуля.

Под нижним счетчиком времяпролетной системы располагалась двухззорная искровая камера, которая помогала выявлять «вилки» от электрон-позитронных пар, не раскрывшиеся в верхних камерах, а также уточнять место входа частиц в калориметр.

Искровые камеры просматривались с помощью двух оптических систем и двух телевизионных камер, расположенных в ортогональных проекциях для получения пространственного изображения треков в искровых камерах. Телевизионная система измеряла и оцифровывала как абсциссу видеосигнала от каждой искры в каждой проекции, так и его ширину. Горизонтальная развертка была разделена на 4096 точек, т.е. один отсчет телевизионной системы, определяющий точность локализации искры, соответствовал 0,125 мм на передней стенке камеры и 0,175 мм на задней стенке. Каждый зазор искровых камер просматривался тремя строками развертки, крайние из которых отстояли друг от друга на 17 мм (в масштабе передней стенки искровой камеры), а средняя строка соответствовала средней плоскости зазора.

Характеристики искровых камер исследовались на пучке «меченых» гамма-квантов, получаемых на синхротроне DESY [144] и синхротроне С25-Р «Пахра» ФИАН [145]. Измерения проводились на энергиях гамма-квантов  $E_\gamma = 50, 100$  и  $200$  МэВ. Для энергии гамма-квантов  $E_\gamma = 100$  МэВ угловое разрешение составило  $1,4 \pm 0,1$  и  $2,0 \pm 0,15^\circ$  при углах  $0$  и  $20^\circ$ .

### ***Времяпролетная система***

Времяпролетная система гамма-телескопа в качестве одной из систем отбора событий осуществляла следующие функции [146]:

1) выделение событий, связанных с пролетом частиц сверху-вниз в пределах апертуры телескопа и дискриминация фоновых частиц, летящих снизу-вверх;

2) разделение по амплитуде сцинтилляционного импульса с верхнего сцинтилляционного детектора событий, связанных с регистрацией одной однозарядной релятивистской частицы (ОРЧ) и двух ОРЧ (при регистрации электрон-позитронной пары).

Времяпролетная система состояла из двух сцинтилляционных детекторов (верхний и нижний) размером  $40 \times 40$  см<sup>2</sup>, расположенных на расстоянии 75 см друг от друга. Толщина сцинтилляционных детекторов, разделенных на четыре одинаковых полосы, составляла 10 мм для верхнего и 20 мм для нижнего. Каждая из полос просматривалась с противоположных торцов двумя ФЭУ-85А. Сигнал с анода каждого ФЭУ разветвлялся в каналы временного и амплитудного анализа. В амплитудном канале вырабатывались логические сигналы кодировки номера сработавшей полосы и аналоговые сигналы, амплитуда которых пропорциональна интенсивности сцинтилляционной вспышки в каждом из детекторов. Во временном канале сигналы с четырех ФЭУ, просматривающих детектор с одной стороны, складывались в токовых сумматорах и поступали на формирователи со следящим порогом. Сигналы с формирователей верхнего детектора поступали на входы «старт» двух время-амплитудных преобразователей (ВАП), а с формирователей нижнего – на вход «стоп». Выходные сигналы двух ВАП складывались, что позволяло осуществить компенсацию зависимости амплитуды выходного сигнала от координат попадания частицы в детекторы системы. Амплитуды выходного сигнала ВАП для частиц «прямого» и «обратного» направлений образовывали два распределения, расстояние между которыми определялось пролетной базой, а ширина на половине высоты – временным разрешением системы. Сигнал с ВАП поступал на дискриминатор, который обладал порогом, расположенным

между этими распределениями, и выработывал логический сигнал, соответствующий регистрации частиц «прямого» направления.

Экспериментальная проверка на мюонах космических лучей показала, что временное разрешение времяпролетной системы составило  $\sim 1,2$  нс. Также были измерены эффективности регистрации ОРЧ в «прямом» и «обратном» направлениях. Эффективность регистрации ОРЧ в «прямом» направлении составила  $\eta_{пр} = (96,1 \pm 0,6)\%$ , в «обратном» -  $\eta_{обр} = (0,06 \pm 0,01)\%$ .

По измеренным значениям эффективностей был вычислен коэффициент отбора по направлению, который составил  $K_{отб} = 1600 \pm 270$ .

Характеристики времяпролетной системы измерялись на пучке электронов с энергией 400 МэВ ускорителя С-60 ФИАН [145]. Эффективность регистрации времяпролетной системы составила  $\geq 96\%$ .

### ***Газовый черенковский счетчик***

Расположенный между двумя сцинтилляционными детекторами газовый черенковский счетчик (ГЧС) (Рис. 3.2, [147, 148]) состоял из четырех секций, конструктивно объединенных в один контейнер и имеющих общее газовое наполнение. Контейнер ГЧС цилиндрической формы был изготовлен из сплава АМЦ толщиной 3 мм, верхнее днище из того же сплава толщиной 2 мм. Такая тонкостенная конструкция обеспечивала достаточную прочность и герметичность в диапазоне давлений 0-6 атм (рабочее давление 4 атм). Суммарная негерметичность ГЧС, в котором имелось более 10 разъемных соединений, уплотняемых резиновыми прокладками, такова, что давление рабочего газа сохранялось с точностью до 10% в течение десяти лет.

В каждой из четырех секций размещалось зеркало  $Z$ , представляющее собой часть сферической поверхности, вблизи фокальной плоскости которого расположен фотоумножитель ФЭУ, регистрирующий отраженный зеркалом черенковский свет. Зеркало было изготовлено из оргстекла; на внутреннюю (отражающую) поверхность была напылена алюминиевая



пленка (коэффициент отражения 86% для света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм). Верхнее днище и боковые и боковые стенки изнутри были покрыты черной поглощающей краской (коэффициент поглощения 98,5% для света с  $\lambda = 500$  нм). Геометрический фактор ГЧС с учетом угловой направленности составлял  $\sim 270$  см<sup>2</sup>ср. Количество вещества, содержащееся в конструкции ГЧС, которое проходили регистрируемые частицы, составляло 2,04 г/см<sup>2</sup>.

В качестве черенковского радиатора был выбран газ фреон-13. Этот газ, инертный и не токсичный, является наиболее безопасным и при этом обладает достаточно большим световыходом. Фреон-13 находился в ГЧС под давлением 4 атм. При этом количество вещества, проходимое частицей в газе, составляло 1,9 г/см<sup>2</sup>.

Основные параметры оптической системы (радиус кривизны сферического зеркала, координаты его центра, положение и наклон плоскости изображения и т.п.) были определены расчетным путем. Черенковское излучение после отражения от зеркала, прежде чем попасть на фотокатод ФЭУ, проходило через окно из сцинтиллятора *Сц* (полистирол), необходимое для дискриминации частиц, попадающих непосредственно на фотокатод.

Испытания показали, что ГЧС полностью сохранял работоспособность после воздействия линейных и вибрационных (в интервале частот от 1 до 2000 Гц) перегрузок в диапазоне до 10g и ударных до 50g и мог работать в условиях вакуума и повышенной влажности при температуре окружающей среды от 0 до 40°C. При этом темп счета шумов ФЭУ при температуре 20°C не превышал 1 кГц, а при температуре 40°C – 5 кГц.

При давлении 4 атм пороговая энергия для регистрации протонов составляла  $\sim 12$  ГэВ, а для электронов –  $\sim 7$  МэВ. При этом угол черенковского излучения составлял  $\theta_{\text{чер}} = 5^\circ$ .

Для определения физических характеристик ГЧС калибровался на пучках электронов ускорителя С60 Физического института АН СССР (ФИАН) и дейтронов ускорителя Лаборатории высоких энергий Объединенного института

ядерных исследований (ОИЯИ). При калибровке на электронах с энергией 200-400 МэВ определялись эффективность ГЧС в прямом и обратном направлениях (при прохождении частиц от верхнего днища в сторону зеркал и наоборот), а также угловые характеристики ГЧС. Облучение прибора проводилось в различных точках каждой секции, а также на границе секций. На Рис. 3.3 представлены амплитудные распределения для центра и периферии.

Из рисунка видно, что амплитудное разрешение (относительная ширина распределения на половине высоты) счетчика составило ~60% для центральной области и ~80% для периферии, при этом амплитуда изменилась на 30%. Эффективность в центральной части ГЧС превышает 99% и уменьшается до 95-98% на периферии. Средняя по площади эффективность регистрации электронов составила  $98,5 \pm 0,2\%$  в прямом направлении и  $0,85 \pm 0,15\%$  в обратном, т.е. коэффициент отбора ГЧС был более 100.

Для выявления причин появления отсчетов при облучении в обратном направлении было проведено дополнительное исследование. Экспериментально методом задержанных совпадений было найдено, что вклад случайных событий составлял ~0,15%. При облучении вакуумированного ГЧС эффективность составила ~0,3%. Это, вероятно, связано с регистрацией фоновых частиц, генетически связанных с электронами пучка, проходящими через управляющие счетчики и попадающими в ФЭУ, минуя сцинтилляционное окно. Возможный вклад  $\delta$ -электронов был оценен расчетным путем. С учетом телесного угла, под которым ФЭУ регистрирует черенковский свет, он составляет ~0,05%. Оставшаяся величина эффективности в обратном направлении (~0,35% для наполненного газом ГЧС), по-видимому, связана со сцинтилляциями в газе.

Эффективность регистрации существенно зависит от порога регистрации  $I_{nor}$ , задаваемого электроникой. В указанных выше измерениях порог устанавливался на уровне 0,1 от наиболее вероятной амплитуды при регистрации в прямом направлении одной однозарядной релятивистской частицы  $I_{орч}$ , соответствующей 30 фотоэлектронам. Повышая порог

регистрации до  $\sim 0,25 I_{орч}$  можно добиться увеличения коэффициента отбора до 350, при этом эффективность регистрации в прямом направлении уменьшится незначительно (до  $\sim 90\%$ ). Исследование угловой направленности ГЧС показало, что ГЧС обладает угловым разрешением (апертурой)  $12-13^\circ$  (угол влета частицы относительно оси ГЧС, при котором эффективность регистрации снижается на 50%). На Рис. 3.4 показаны расчетная зависимость эффективности ГЧС от угла влета частицы  $\theta$  и результаты измерений для центральной области и периферии.

С целью выяснения вопроса об эффективности ГЧС для регистрации частиц с энергией ниже порога черенковского свечения была проведена калибровка ГЧС на дейтронах. Так как интенсивность черенковского излучения пропорциональна квадрату заряда регистрируемой частицы и не зависит от массы, то калибровка на дейтронах эквивалентна калибровке на протонах. Для дейтронов пороговая энергия образования черенковского излучения равна 24 ГэВ (12 ГэВ/нуклон). Калибровка на дейтронах проводилась при двух энергиях 3,5 и 9 ГэВ. В результате измерений эффективность ГЧС в среднем по площади оказалась равной  $0,46 \pm 0,04\%$  и  $0,64 \pm 0,05\%$  соответственно. Причинами отсчетов в черенковском счетчике при облучении его частицами с энергией ниже пороговой могут быть случайные совпадения,  $\delta$ -электроны, создаваемые дейтронами пучка,  $\pi$ -мезоны, имеющиеся в пучке дейтронов, сцинтилляции газа в ГЧС при пролете через него дейтрона. Вклад случайных совпадений был измерен методом задержанных совпадений и оставил  $\sim 0,01\%$ . Отметим, что при энергии дейтронов 3,5 ГэВ не могут образовываться  $\delta$ -электроны, способные вызвать черенковское излучение. Таким образом, разность значений эффективностей при двух энергиях, равную 0,18%, можно объяснить вкладом  $\delta$ -электронов. Расчетная величина, учитывающая энергетическое и угловое распределения  $\delta$ -электронов, близка к этому значению. Из измерений эффективностей регистрации дейтронов с энергией 3,5 ГэВ в прямом и обратном направлениях был оценен вклад  $\pi$ -мезонов, который составил

$\sim 0,08\%$ . Величина эффективности, равная  $\sim 0,37\%$ , оставшаяся после учета вклада случайных совпадений,  $\delta$ -электронов и примеси  $\pi$ -мезонов, по-видимому, как и в случае электронов, обусловлена сцинтилляцией газа в ГЧС.

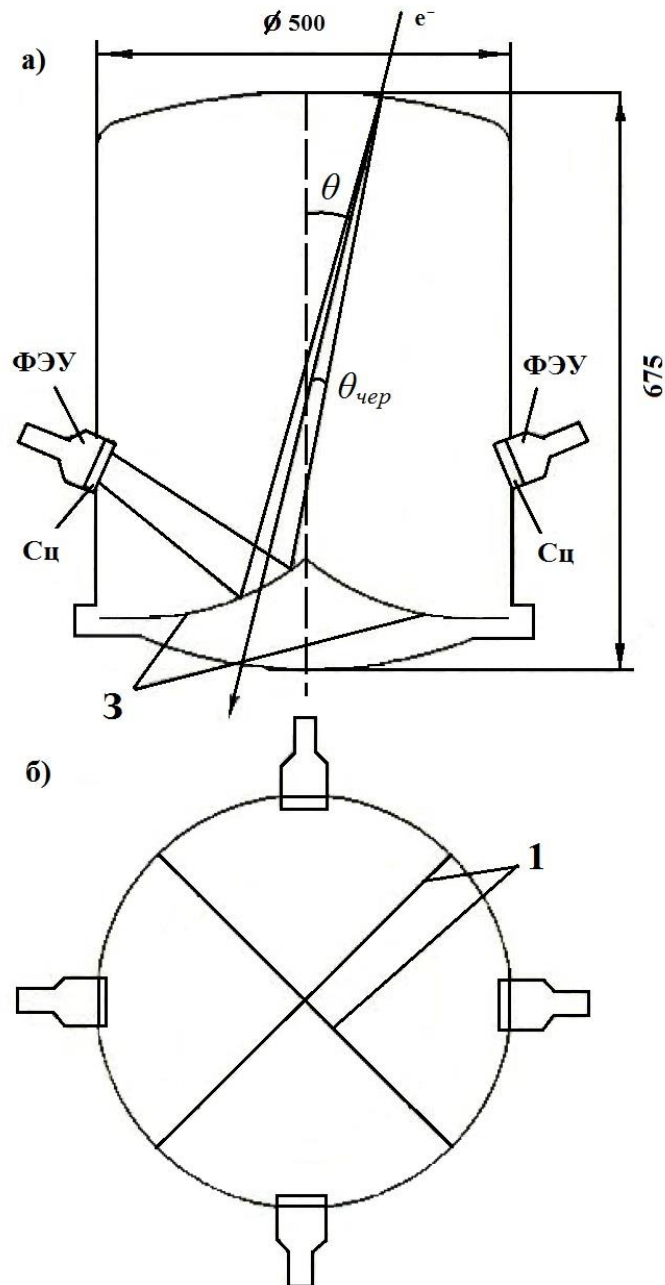


Рис. 3.2 Газовый черенковский счетчик: *a* – вид сбоку; *б* – вид сверху. *Сц* – сцинтилляторы, *ФЭУ* – фотоумножители, *З* – зеркала;  $\theta_{\text{чер}}$  – угол черенковского излучения; *1* – границы секций [147].

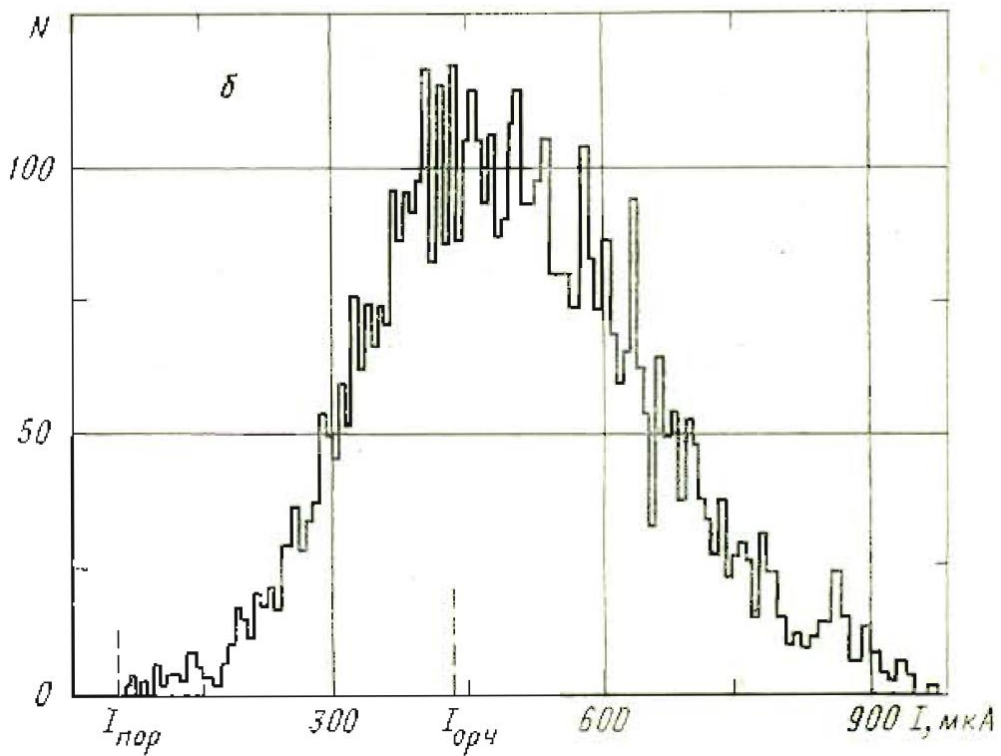
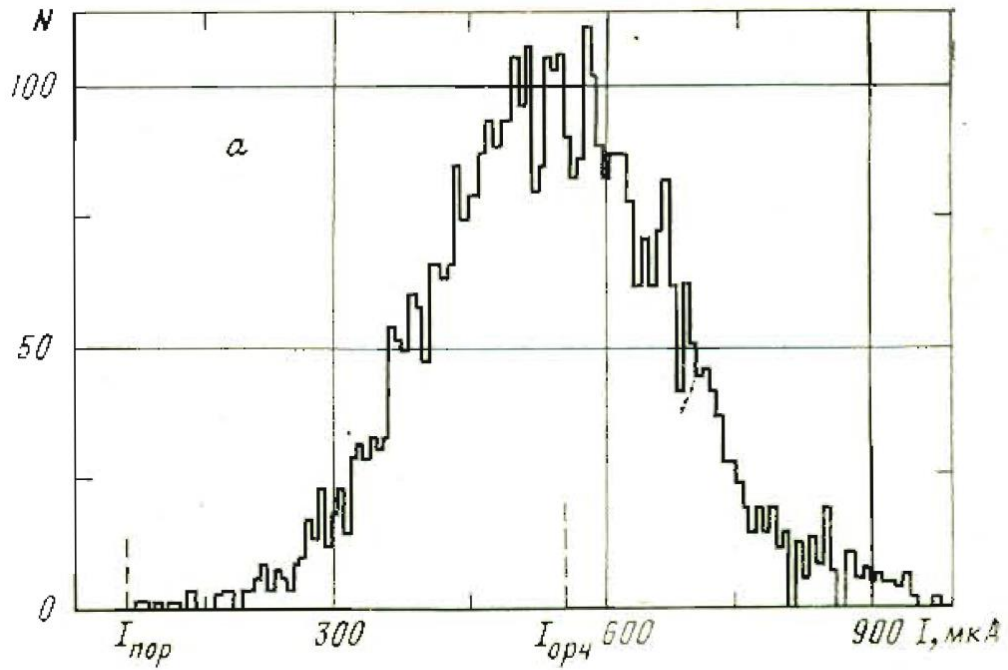


Рис. 3.3 Амплитудный спектр при облучении ГЧС электронами в прямом направлении: а – для центральной части ГЧС; б – для периферии.  $I_{пор}$  – пороговый ток,  $I_{орч}$  – ток, при котором в прямом направлении регистрируется одна однозарядная релятивистская частица [147].

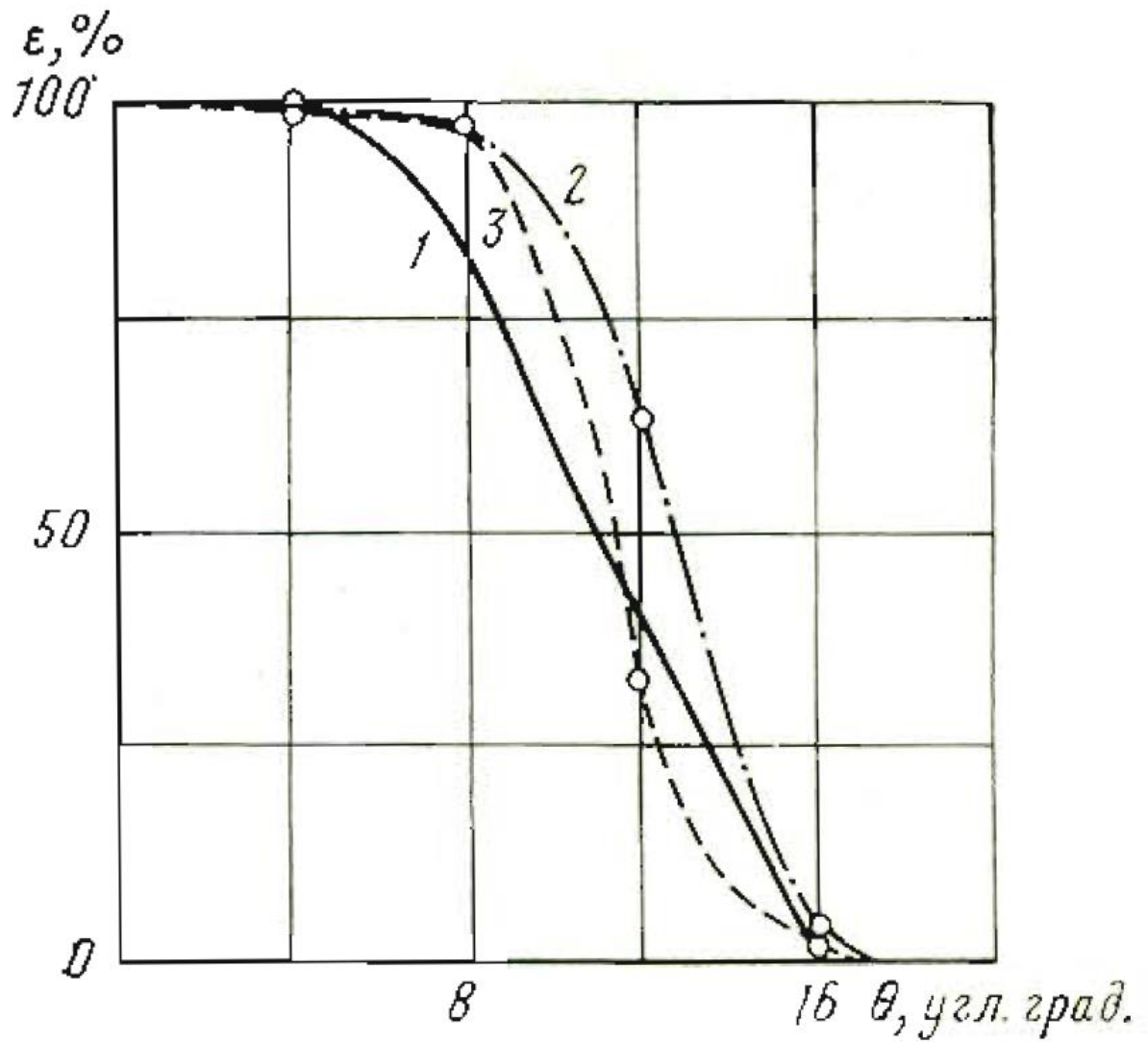


Рис. 3.4 Зависимости эффективности ГЧС  $\epsilon$  от угла влета  $\theta$  частицы: 1 – расчетная; 2, 3 – экспериментальные соответственно для центральной области ГЧС и для периферии [147].

### *Антисовпадательная система*

Двенадцатизазорная искровая камера и верхний сцинтилляционный детектор времяпролетной системы были защищены от заряженных частиц антисовпадательными сцинтилляционными счетчиками. Наружный антисовпадательный детектор был предназначен для исключения из регистрации вторичного гамма-излучения, образующего в стенке герметизированного контейнера, в котором располагался гамма-телескоп, при взаимодействии с ней первичного космического излучения. В антисовпадательную систему также входили: верхний торцевой детектор и четыре боковых детектора, расположенные над искровой камерой и сбоку с четырех сторон. Все антисовпадательные детекторы изготовлены из сцинтилляторов на основе полиметилметакрилата. Эти счетчики должны обладать высокой эффективностью регистрации заряженных частиц и на много порядков уменьшать частоту срабатывания запускающего телескопа от заряженных частиц и имитацию гамма-квантов этими частицами. Калибровка детекторов на пучке  $\pi$ -мезонов с энергией  $E_{\pi} = 700$  МэВ ускорителя Ленинградского института ядерной физики им. Б.П. Константинова показала, что средняя по площади эффективность регистрации релятивистских частиц верхним торцевым детектором была равна  $0,999997 \pm 0,000001$ , боковыми счетчиками - 0,9994 и наружным счетчиком 0,99 [145].

### *Калориметр*

Ионизационный калориметр был предназначен для измерения энергии гамма-квантов в исследуемом диапазоне и состоял из четырех идентичных секций, в каждой из которых регистрировалось энерговыделение, создаваемое электронно-фотонной лавиной в веществе секции. Каждая секция состояла из шести свинцовых пластин площадью  $60 \times 60$  см<sup>2</sup>, толщиной 1,95 р.е.д., прослоенных сцинтилляционными пластинами толщиной 0,5 см. Свет, возникающий в сцинтилляторах, регистрировался с

четырёх углов секции четырьмя ФЭУ-110. Суммарный сигнал был пропорционален полному энерговыделению в секции. Общая толщина калориметра составляла 7,4 р.е.д. и являлась достаточной для поглощения электронов и гамма-квантов измеряемых энергий и относительно «прозрачной» для протонов и ядер первичных космических лучей.

Калориметр градуировался на пучке электронов синхротрона С-60 ФИАН [145]. Энергии электронов менялись в пределах 100-550 МэВ. Зависимость среднего энерговыделения и энергетического разрешения от энергии представлены на Рис. 3.5. Энергетическое разрешение менялось от 55% при энергии 100 МэВ до 34% при энергии 550 МэВ.

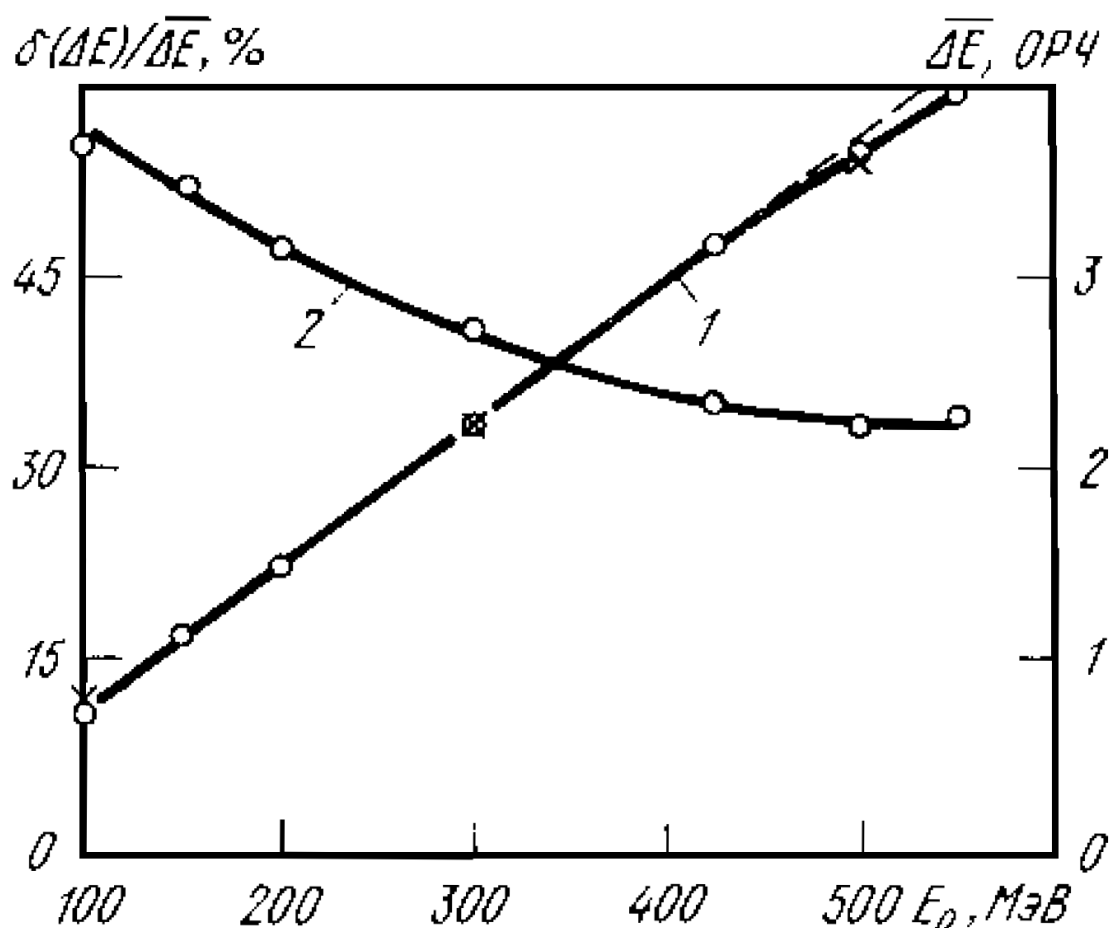


Рис. 3.5 Зависимость среднего энерговыделения (1) и энергетического разрешения (2) от энергии электронов, попадающих в калориметр (точками обозначены экспериментальные значения, крестиками — расчетные) [145].



### 3.2 Калибровка гамма-телескопа ГАММА-1

Для получения основных физических характеристик ГАММА-1 и проверки правильности расчетов его характеристик методом Монте-Карло была проведена калибровка гамма-телескопа на пучке «меченых» гамма-квантов на синхротроне С25-Р «Пахра» ФИАН [2]. Пучок «меченых» гамма-квантов имел угловую расходимость  $\sim 2,5$  мрад, энергетическое разрешение около 30 МэВ для всего диапазона энергий (30-700 МэВ). Поперечный размер пучка (ширина на полувысоте) около 4 см. Вся калибровка включала в себя 500 сеансов измерений, в каждом из которых регистрировалось до 2000 гамма-квантов. Кроме калибровки на пучке были проведены  $\sim 100$  сеансов регистрации атмосферных гамма-квантов.

Основными задачами калибровки являлись: определение зависимости углового и энергетического разрешений от энергии гамма-квантов; получение зависимости эффективности гамма-телескопа от энергии и угла падения в некоторых точках падения и сравнение этой зависимости с результатами расчетов Монте-Карло. Целью калибровки на атмосферных гамма-квантах являлось определение эффективной площади гамма-телескопа, усредненной по спектру, и определение пороговой энергии гамма-телескопа. Учитывая, что сигнал, запускающий искровые камеры, является логической комбинацией элементарных сигналов с отдельных детекторов и эта комбинация определяется телеметрическими командами, поданными на гамма-телескоп, все измерения при калибровках проводились при наиболее простой комбинации сигналов. При обработке данных калибровки по отметкам о срабатывании отдельных детекторов формировалась такая комбинация элементарных сигналов, которая имитировала интересующий нас управляющий сигнал. Некоторые основные результаты калибровки для управляющего сигнала, соответствующего срабатыванию только сцинтилляционного телескопа при отсутствии сигналов в системе антисовпадения, представлены на Рис. 3.6-3.8.

На Рис. 3.6 представлена зависимость эффективности гамма-телескопа от энергии в некоторой точке падения. На этом же рисунке даны рассчитанные методом Монте-Карло точки. Видно вполне удовлетворительное согласие расчетов с экспериментом.

На Рис. 3.7 представлена зависимость углового разрешения гамма-телескопа от энергии. При энергиях больше 300 МэВ зависимость разрешения от энергии выходит на плато и достигает своего наилучшего значения  $1,2^\circ$ . Данная зависимость наглядно демонстрирует преимущество широкозасорной искровой камеры перед узкозасорной. Узкозасорная искровая камера COS-B давала угловое разрешение  $\sim 5^\circ$  при энергии 100 МэВ, в то время как широкозасорная искровая камера гамма-телескопа ГАММА-1 дает разрешение  $\sim 2^\circ$  при той же энергии.

На Рис. 3.8 представлена зависимость энергетического разрешения сцинтилляционного калориметра от энергии регистрируемых гамма-квантов. При энергиях 500 МэВ энергетическое разрешение составляет  $\sim 35\%$ , что соответствует проведенным калибровкам отдельного калориметра.

По результатам обработки результатов калибровки на атмосферном гамма-излучении получена эффективная площадь гамма-телескопа, равная  $318 \pm 23 \text{ см}^2$ , и интегральная пороговая энергия гамма-телескопа, составляющая  $59 \pm 5 \text{ МэВ}$ . Последняя величина выбрана таким образом, что эффективная площадь практически не зависит от спектра излучения.

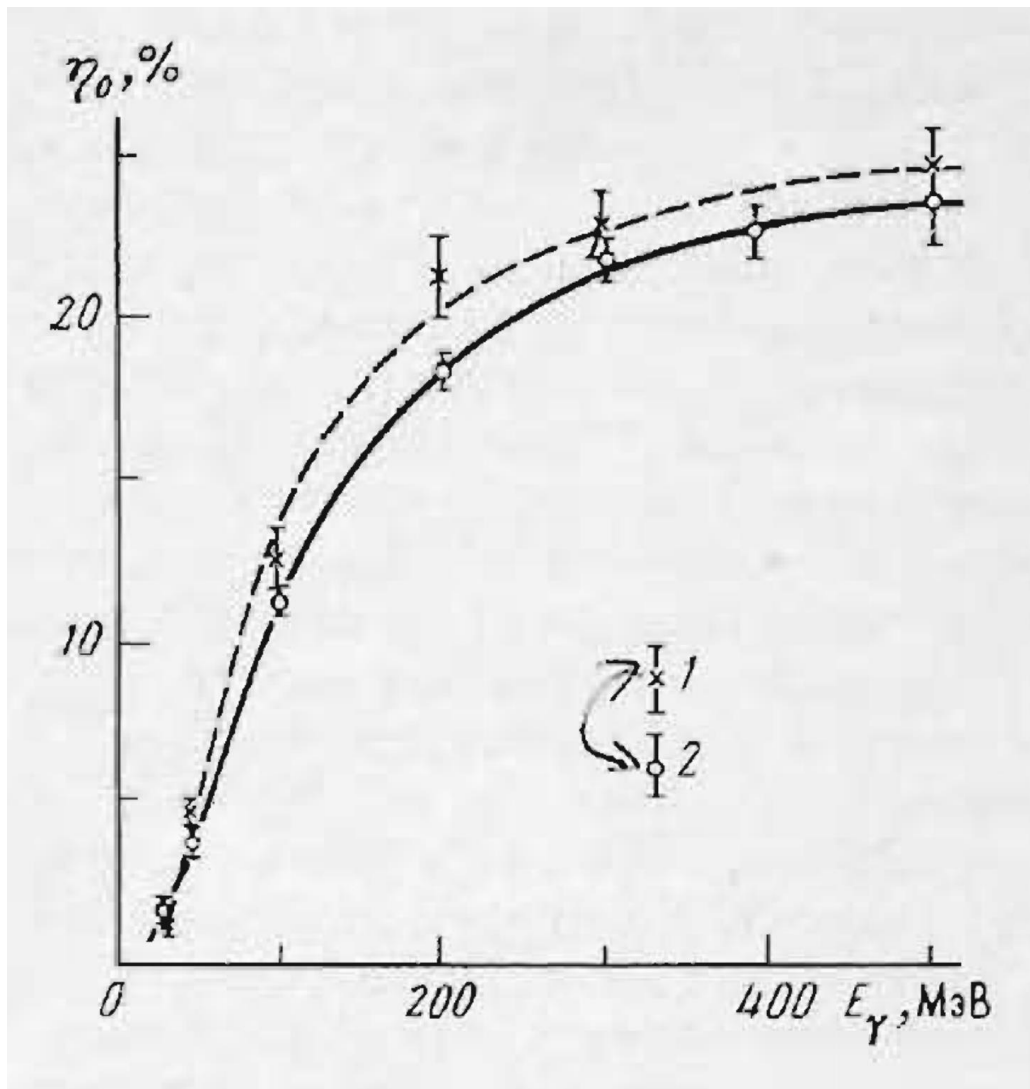


Рис. 3.6 Зависимость эффективности гамма-телескопа от энергии гамма-кванта, полученная из эксперимента (1) и в результате расчета методом Монте-Карло (2) [2].

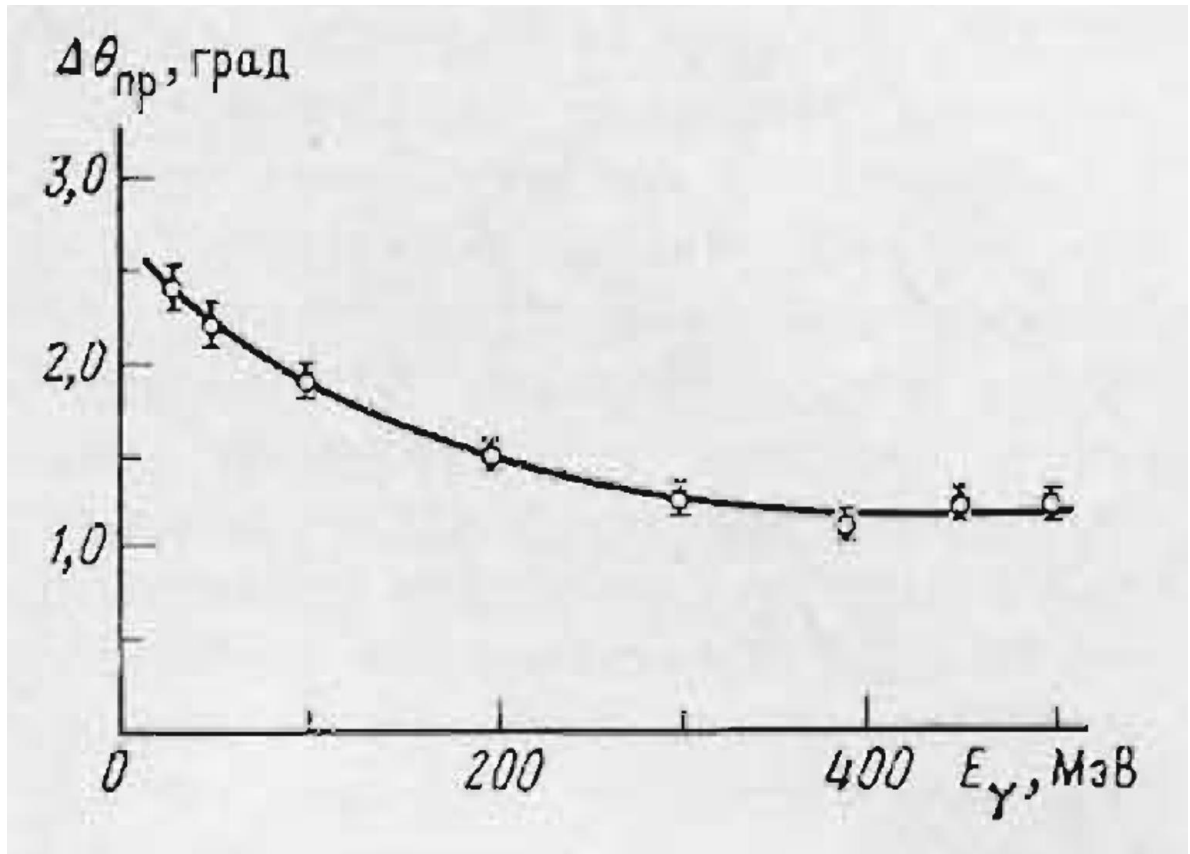


Рис. 3.7 Зависимость углового разрешения от энергии гамма-квантов [2].

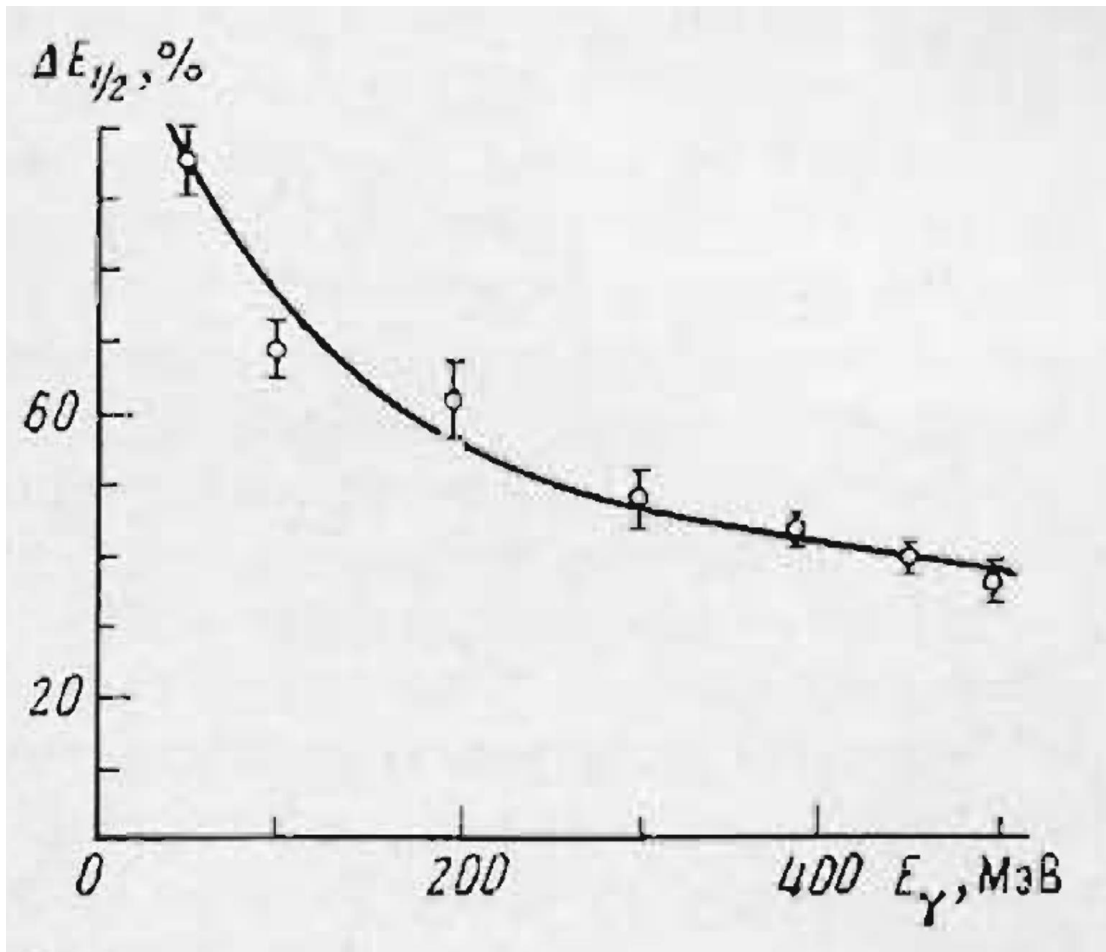


Рис. 3.8 Зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-квантов [2].

### 3.3 Результаты эксперимента ГАММА-1

Гамма-телескоп был запущен в составе астрофизической обсерватории «ГАММА» 11 июля 1990 г. на низкоапогейную круговую орбиту с высотой около 400 км, наклоном  $51,6^\circ$  и периодом обращения около 90 мин. Обсерватория «ГАММА» была принудительно спущена с орбиты и затоплена 28 февраля 1992 г. В течение полета был произведен 421 сеанс наблюдений общей экспозицией около 2700 ч [27]. Для эффективного наблюдения гамма-источников впервые в мировой практике применялась переориентации космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1. По прогнозу предвспышечной активности Солнца также проводилась переориентация космического аппарата на Солнце для наблюдения солнечных вспышек.

Наблюдалось гамма-излучение от источников:

- пульсара PSR 0833-45 (Vela) [27-32], которое составило 950 ч. Наблюдение проводилось в: август – октябрь 1990 г., февраль – апрель 1991 г., июль 1991 г. Анализ кривых светимости позволил определить поток пульсирующего излучения. Он составил  $(1,6 \pm 0,3) 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  для энергий больше 50 МэВ;

- пульсара Geminga [27, 33, 34] – 176 ч. Наблюдение проводилось с 30 ноября 1990 г. по 2 февраля 1991 г. Поток пульсирующего излучения для энергий более 300 МэВ составил величину  $(1,1 \pm 0,3) 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;

- двойной системы Cyg X-3 [27] – 557 ч. Наблюдения проводились в октябре – декабре 1990 г. и феврале – апреле 1991 г. ГАММА-1 не обнаружил пульсирующего гамма-излучения, но был установлен верхний предел гамма-излучения с периодом 4,8 часа, который не превышал  $5 \times 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;

- двойной системы Hercules X-1 [27, 35] – 413 ч. Наблюдалась в декабре 1990 г., январе 1991 г., июне 1991 г. Полученные данные свидетельствуют о существовании пульсирующего излучения пульсара в двойной системе, поток которого составил  $\sim 6,3 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  для энергий больше 50 МэВ;

- Солнца – 400 ч. В 1991 г. в период максимума солнечной активности ГАММА-1 впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучения от Солнца во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/Х4,7) и 15 июня (класс 3В/Х12+) 1991 г. [90-95];

- центра Галактики – 40 ч;

- а также проводились методические измерения – 175 ч.

ГАММА-1 наряду с гамма-квантами регистрировал высокоэнергичные заряженные частицы и смог выделять сравнительно слабые потоки электронов на фоне протонов. Было подтверждено, что во внутреннем радиационном поле Земли существуют потоки захваченных электронов с энергиями в диапазоне 50-200 МэВ, которые в десятки раз превышают потоки электронов альбедо той же энергии [149].

### **3.4 Методы, разработанные в эксперименте ГАММА-1**

Основным методом регистрации гамма-квантов в эксперименте ГАММА-1 с гамма-телескопом нового типа было использование комбинации детекторов: широкозасорной искровой камеры для конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару и измерения направления падения гамма-квантов, сцинтилляционной времяпролетной системы с большой пролетной базой для исключения из регистрации частиц, попадающих в гамма-телескоп вне апертуры (снизу и сбоку), газового черенковского счетчика большой площади для исключения из регистрации частиц с энергией ниже порога возникновения черенковского излучения, антисовпадательной сцинтилляционной системы для исключения заряженных частиц, которая перекрывает широкозасорные искровые камеры сверху и с четырех боковых сторон, и сцинтилляционного калориметра для измерения энергии гамма-квантов.

Применение широкозасорных камер в ГАММА-1 позволило улучшить угловое разрешение почти в 2 раза по сравнению с телескопами SAS-2 и

COS-B, в которых использовались узкозачеренковские камеры, и достичь  $2^\circ$  при энергии фотонов 100 МэВ и  $1,2^\circ$  при энергии 300 МэВ.

Применение ионизационного калориметра площадью  $60 \times 60 \text{ см}^2$  толщиной 7,4 р.е.д. позволило получить энергетическое разрешение 55% при энергии 100 МэВ и 34% при энергии 550 МэВ.

Было уделено существенное внимание методам выделения гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц путем использования комбинации высокоэффективной антисовпадательной системы, времяпролетной системы и газового черенковского счетчика. Эффективность регистрации релятивистских частиц верхним торцевым антисовпадательным детектором составила  $0,999997 \pm 0,000001$ , а боковых антисовпадательных детекторов - 0,9994, наружным детектором - 0,99. Применение времяпролетной системы с большой пролетной базой ( $\sim 75 \text{ см}$ ) позволило получить временное разрешение  $\sim 1,2 \text{ нс}$ , эффективность регистрации частиц в «прямом» направлении  $\eta_{\text{пр}} = (96,1 \pm 0,6)\%$ , в «обратном» -  $\eta_{\text{обр}} = (0,06 \pm 0,01)\%$ , коэффициент отбора по направлению составил  $K_{\text{отб}} = 1600 \pm 270$ . По сравнению с твердотельными черенковскими счетчиками (люсит), используемыми в SAS-2 и COS-B, применение газового черенковского счетчика (ГЧС) большой площади и длины ( $\varnothing 50 \text{ см}$  и  $l \sim 70 \text{ см}$ ), обладающего хорошей направленностью благодаря малому углу черенковского излучения в газовой среде, позволило исключать из регистрации электроны с энергией менее 7 МэВ и протоны с энергией менее 12 ГэВ, в то время как пороговая энергия для люсита составляла всего 0,7 МэВ для электронов и 1,3 ГэВ для протонов. ГЧС обладал эффективностью регистрации  $98,5 \pm 0,2\%$  в «прямом» направлении и  $0,85 \pm 0,15\%$  в обратном, т.е. коэффициент отбора был более 100.

В Табл. 3.1 представлено сравнение характеристик SAS-2, COS-B и ГАММА-1. Видно, что методы, разработанные в эксперименте ГАММА-1



позволили существенно улучшить характеристики гамма-телескопа ГАММА-1 по сравнению с SAS-2 и COS-B.

Таблица 3.1

	<b>SAS-2</b>	<b>COS-B</b>	<b>ГАММА-1</b>
Период работы	1972-1973	1975-1982	1990-1992
Диапазон энергий	35 МэВ – 1 ГэВ	30 МэВ – 5 ГэВ	50 МэВ – 5 ГэВ
Чувствительная площадь, см <sup>2</sup>	640	570	~1500
Чувствительность, фотон/(см <sup>2</sup> с) (E <sub>γ</sub> > 100 МэВ, t = 1 год),	~5×10 <sup>-6</sup>	~2×10 <sup>-6</sup>	~3×10 <sup>-7</sup>
Угловое разрешение, град (E <sub>γ</sub> = 100 МэВ) (E <sub>γ</sub> = 300 МэВ)	~4-5 ~2,0	~4-5 ~2,0	~2 ~1,2
Энергетическое разрешение, % (E <sub>γ</sub> = 300 МэВ) - толщина калориметра, р.е.д.	-	~50 4,7	~35 7,4
Искровая камера	Узко- зазорная	Узко- зазорная	Широко- зазорная
Времяпролетная система	-	-	+
Черенковский детектор - угол черенковского излучения - пороговая энергия для электронов - пороговая энергия для протонов	Твердо- тельный 48° 0,7 МэВ 1,3 ГэВ	Твердо- тельный 48° 0,7 МэВ 1,3 ГэВ	Газовый ~5° 7 МэВ 12 ГэВ

## **Глава 4. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах**

### **4.1 Основные физико-технические требования к гамма-телескопам нового поколения**

На основе анализа актуальных астрофизических задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и анализа существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах было показано, что для регистрации космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий гамма-телескопы нового поколения:

- **должны проводить длительные (для получения хорошей статистики) непрерывные наблюдения гамма-источника на соответствующей для этих измерений орбите космического аппарата;**

- **иметь:**

- **диапазон энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ;**

- **большую чувствительную площадь  $\sim 1 \text{ м}^2$ ;**

- **высокое энергетическое разрешение  $< 2\%$  при энергии гамма-квантов более 100 ГэВ;**

- **высокое угловое разрешение  $< 0,05$  градуса при энергии гамма-квантов более 100 ГэВ;**

- **эффективную систему отбора гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц космических лучей;**

- **эффективную систему режекции «обратного тока».**

- **содержать:**

- **антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,9999;**
- **конвертер-трекер с высоким координатным разрешением, которые позволяют определять угловое направление прилета регистрируемых гамма-квантов с точностью лучше 0,05°;**
- **времяпролетные сцинтилляционные системы, позволяющие выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,5 нс;**
- **калориметры с большой толщиной (не менее 20 р.е.д.), позволяющие регистрировать гамма-кванты до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением лучше 2%;**
- **детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающих при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ТэВ.**

#### **4.2 Разработка гамма-телескопа ГАММА-400**

После разработки, изготовления и измерения характеристик детекторных систем по отдельности и гамма-телескопа ГАММА-1 в целом во второй половине восьмидесятых годов в ФИАН В.Л. Гинзбургом и Л.В. Курносовой было предложено разработать гамма-телескоп нового поколения для исследования гамма-излучения в неизученном в то время диапазоне энергий от 5 до 400 ТэВ. Впервые об этом предложении было доложено на 20-й Международной конференции по космическим лучам в 1987 г. в Москве [150] и в 1988 г. опубликована статья в журнале *Space Science Reviews* [151]. Отсюда и появилось название будущего проекта «ГАММА-400» (Гамма-Астрономическая Многофункциональная Модульная Аппаратура), где 400 означает верхнюю границу 400 ТэВ диапазона измерения энергии гамма-излучения.

Для исследования диффузного гамма-излучения и гамма-излучения от дискретных источников была предложена схема гамма-телескопа, представленная на Рис. 4.1 [151]. Основным методом регистрации гамма-квантов в гамма-телескопе было использование комбинации детекторов:

- антисовпадательного сцинтилляционного детектора;
- времяпролетной системы, состоящей из двухслойных сцинтилляционных полос размером 1 м и сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$  при пролетной базе 1 м;
- координатных сцинтилляционных детекторов размером 1 м и сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$ ;
- сцинтилляционно-свинцового калориметра толщиной 22 р.е.д.

В качестве конвертера использовалась пластина из вольфрама толщиной 1 р.е.д. При этом эффективность конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару составляла ~50%.

При такой схеме точность определения угла составляла  $1,6^\circ$ . Энергетическое разрешение в диапазоне энергий 1-10 ГэВ составляло ~20%.

В середине девяностых годов по предложению академика В.Л. Гинзбурга научные задачи гамма-телескопа ГАММА-400 были расширены с целью поиска частиц темной материи. Для этого в дальнейших модификациях гамма-телескопа ГАММА-400 [152-154] был увеличен диапазон измеряемых энергий до 1000 ГэВ и предложено использовать калориметр, энергетическое разрешение которого было улучшено до нескольких процентов. Калориметр состоял из кристаллов CsI(Tl) размером  $40 \times 40 \times 300 \text{ мм}$ . Общий размер калориметра составлял  $600 \times 600 \times 300 \text{ мм}$ , толщина 16 р.е.д. (Рис. 4.2). Чувствительная площадь гамма-телескопа составляла  $0,64 \text{ м}^2$ , угловое разрешение -  $\sim 3^\circ$ . Следует отметить, что габариты и масса гамма-телескопа ограничивались возможностями предполагаемого космического аппарата.

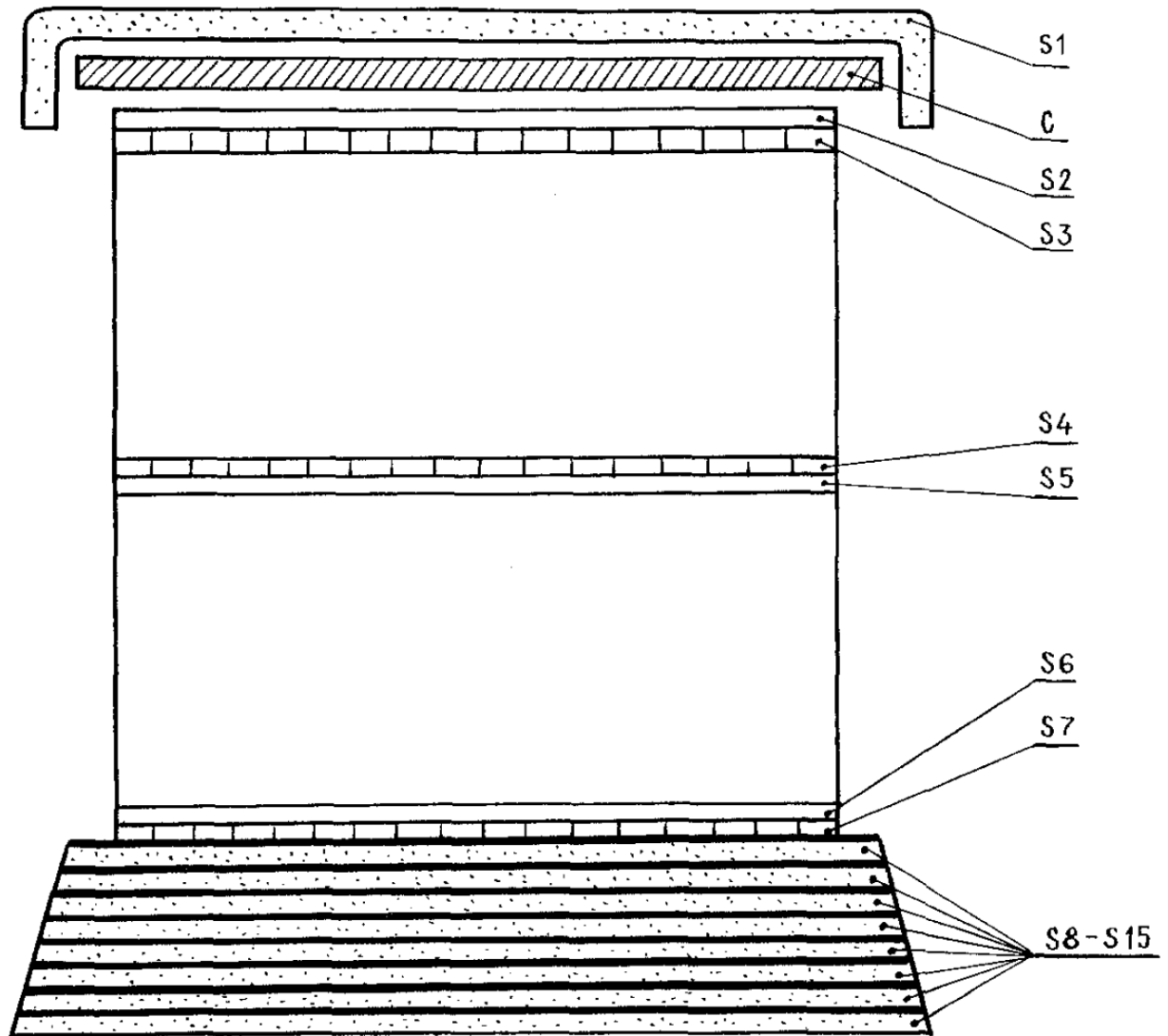


Рис. 4.1 Схема гамма-телескопа ГАММА-400, предложенная в 1988 г. [151].

S1 – сцинтилляционный антисовпадательный детектор; С – конвертер из вольфрама; S2 – S7 – сцинтилляционные координатные детекторы (S2, S3 и S6, S7 образуют времяпролетную систему), S8 – S15 – сцинтилляционно-свинцовый калориметр.



Кроме того, для предотвращения влияния описанного ранее эффекта «обратного тока» (при взаимодействии электронов и позитронов, образовавшихся при конверсии первичных высокоэнергичных гамма-квантов, с веществом калориметра возникает большой поток гамма-квантов с энергией  $\sim 1$  МэВ, часть из которых может достигнуть антисовпадательного детектора, испытать комтоновское рассеяние, дать сигнал от комптоновского электрона в АС и тем самым исключить из регистрации первичный гамма-квант) в составе гамма-телескопа предусмотрена система регистрации событий с «обратным током» (СОТ), действие которой основано на измерении временного интервала между срабатыванием антисовпадательного детектора АС и верхнего сцинтилляционного детектора СВ времяпролетной системы: при пролете заряженной частицы они срабатывают практически одновременно, а в случае регистрации гамма-кванта, сопровождающегося взаимодействием с АС частиц «обратного тока», срабатывание детектора АС задержано относительно срабатывания СВ примерно на 4-5 нс. В последнем случае вырабатывается сигнал СОТ, который используется для разблокирования гамма-событий, связанных с эффектом «обратного тока».

В [155] был проведен анализ влияния «обратного тока» от калориметра на работу гамма-телескопа при регистрации гамма-излучения с энергией 10-1000 ГэВ и предлагались методы снижения влияния «обратного тока» на результаты измерений. Расчетным путем была определена зависимость эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии для различных порогов регистрации в АС, показанная на Рис. 4.3. Видно, что без применения специальных мер эффективность регистрации значительно уменьшается с ростом энергии. Для уменьшения влияния «обратного тока» были предложены три метода:

- координатный, который отделял бы частицы «обратного тока» от первичного гамма-кванта по месту их регистрации (АС должен состоять из отдельных полос);

- амплитудный, который исключал бы с помощью порога в АС события с низким энерговыделением от частиц «обратного тока»;

- временной, который исключал бы частицы «обратного тока» по времени запаздывания сцинтилляции в АС относительно сигнала детектора СВ.

Была предложена схема выделения событий с «обратным током», представленная на Рис. 4.4. В этой схеме детектор АС наряду с высокой эффективностью (более 99,999%) должен обладать хорошим временным разрешением ( $< 1$  нс при регистрации однозарядной релятивистской частицы). Сцинтилляционные импульсы с детектора АС поступают в два канала, обладающих равными порогами регистрации. Один (ЭАС) блокирует через схему антисовпадений САС2 срабатывание гамма-телескопа при пролете через АС заряженной частицы. Второй (канал СОТ) включен совместно с детектором СВ во времяпролетную систему СОТ и отбирает события, соответствующие задержке срабатывания АС относительно СВ на  $4 \pm 2$  нс. Таким образом, при пролете заряженной частицы канал ЭАС срабатывает и блокирует выработку триггерного сигнала. Если ЭАС сработал от частиц ОТ, то вырабатывается сигнал СОТ, который в свою очередь через схему совпадений САС1 блокирует сигнал СОТ, который в свою очередь через схему антисовпадений САС1 блокирует сигнал с ЭАС, и сигнал ВПС запускает систему регистрации событий гамма-телескопа.

Также было предложено введение второго АС, который был бы включен с первым АС по схеме «ИЛИ» и обеспечивал перекрытие щелей между полосами одного детектора с другим.



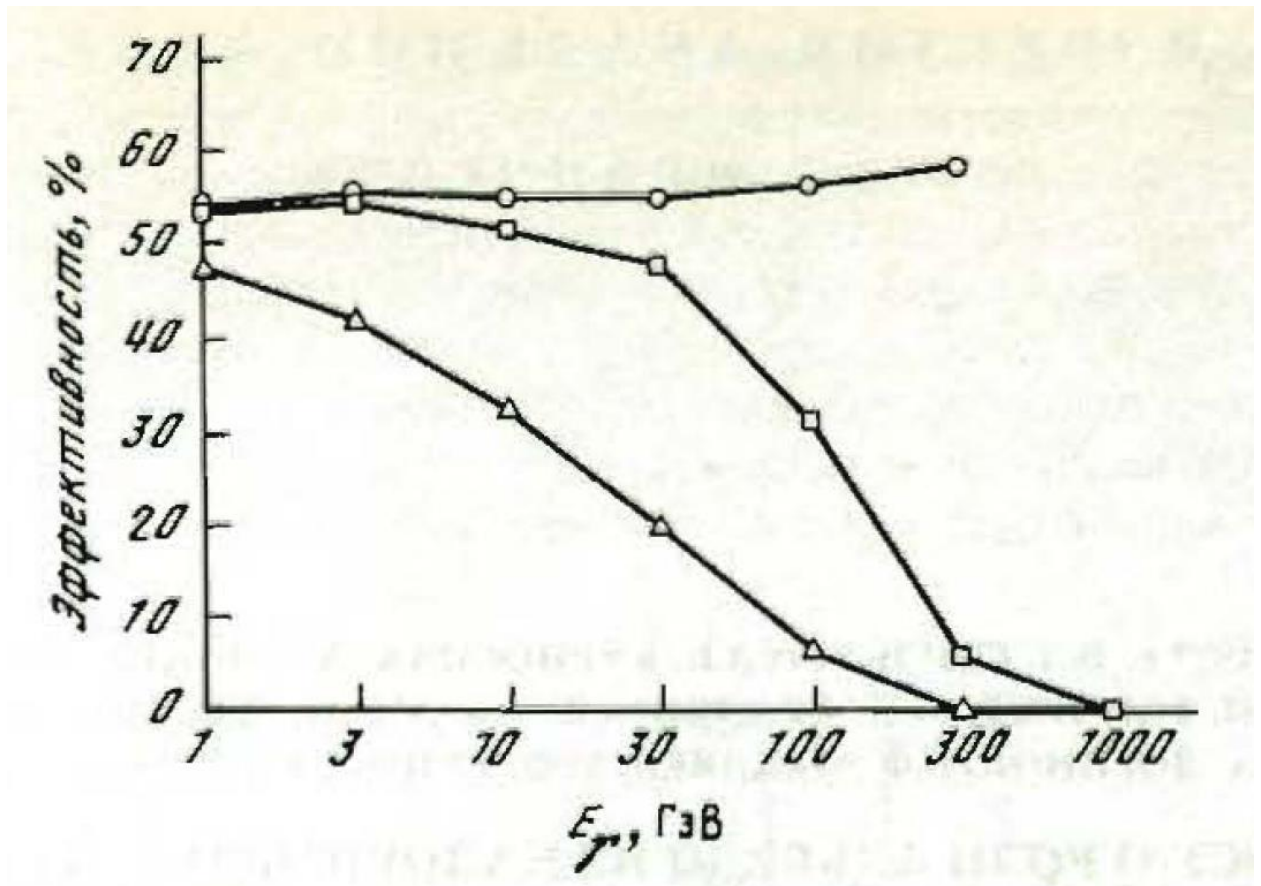


Рис. 4.3 Зависимость эффективности регистрации гамма-квантов гамма-телескопом ГАММА-400 от их энергии: O – без калориметра,  $\Delta$  - порог АС 100 кэВ,  $\square$  – порог АС 1 МэВ (толщина АС – 3 см) [155].

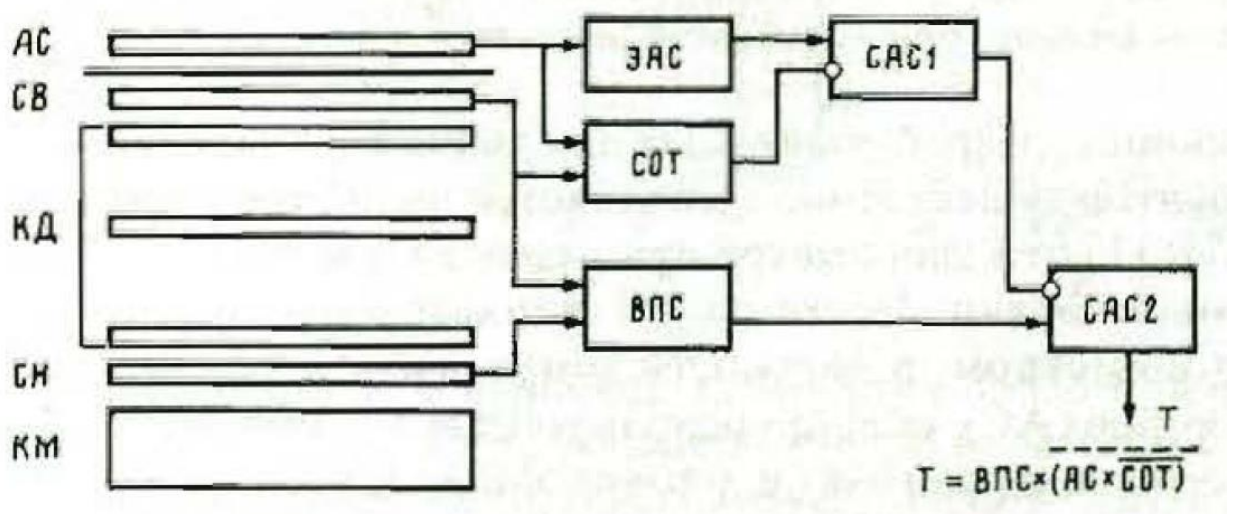


Рис. 4.4 Схема выделения событий с «обратным током» по задержке времени срабатывания детектора АС относительно детектора СВ [155].

Дальнейшая модификация ГАММА-400 представлена в [156, 157]. На Рис. 4.5 представлена схема модифицированного гамма-телескопа ГАММА-400. В состав гамма-телескопа ГАММА-400 входила система детекторов, обеспечивающих регистрацию и определение природы прошедших через него частиц, и система детекторов семплингового калориметра (СКМ). Для увеличения светосилы телескопа в нем имелись две детектирующие системы, размещенные на двух торцах СКМ. Каждая детектирующая система состояла из антисовпадательного детектора (АС), свинцового конвертора (К), сцинтилляционных детекторов (СВ и СН), регистрирующих продукты конверсии и запускающих времяпролетную систему, определяющую направление прихода частицы, а также системы координатных детекторов (КД).

Антисовпадательный детектор (АС) давал возможность выделять гамма-кванты на фоне потока заряженных частиц. В ГАММА-400 производилась идентификация событий «обратного тока» путем сопоставления времен появления сигналов в детекторах АС и СВ.

Важнейшими элементами гамма-телескопа являлись координатная система и калориметр, некоторые параметры которых были определены расчетами и измерениями.

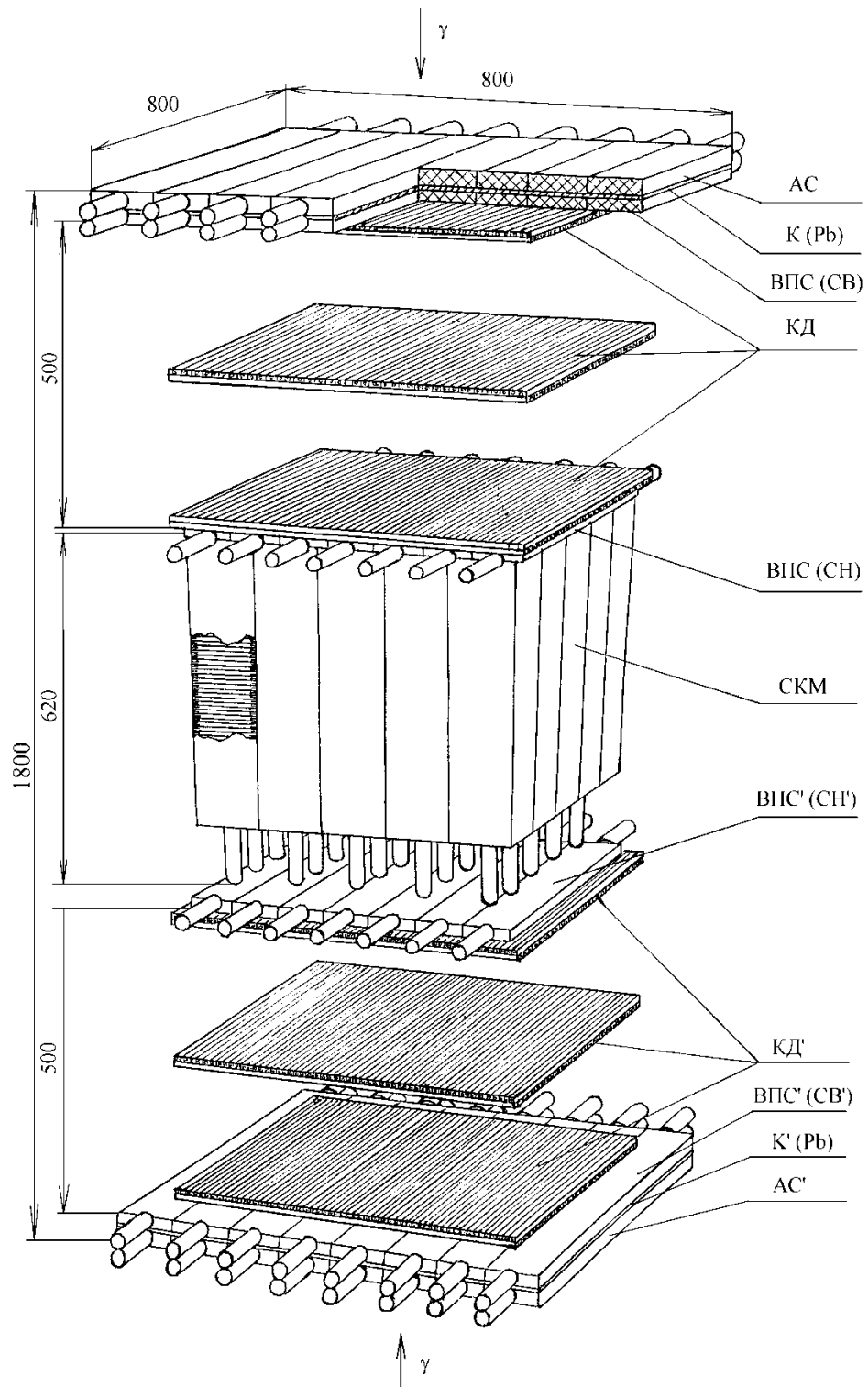


Рис. 4.5 Схема гамма-телескопа ГАММА-400, предложенная в 2005 г. [156, 157].

Калориметр гамма-телескопа ГАММА-400 собирался из модулей (Рис. 4.6, 4.7), каждый из которых измерял выделившуюся в нем энергию, а полная энергия частицы определялась как сумма измерений во всех модулях. Отдельный модуль имел размеры  $110 \times 110 \times 411$  мм<sup>3</sup> и представлял собой последовательную (семплингую) структуру из трехслойных сборок (формирующих элементов), каждая из которых состояла из слоя свинца (толщиной 0,55 мм), сцинтиллятора и светоотражателя. На плоскости формирующего элемента имелись отверстия, предназначенные для размещения в них спектросмещающих волокон (ССВ). Каждый модуль содержал 180 формирующих элементов (полная толщина - 18 р.е.д.). Сцинтилляционное свечение, генерируемое в сцинтилляторе заряженными частицами ливня, передавалось на фотоприемник ФЭУ-115М при помощи ССВ BSF-91А диаметром 1 мм.

На макетном образце СКМ (Рис. 4.8, 4.9), собранном из 9 модулей, проводились измерения интенсивности потоков космических лучей на поверхности Земли. Снимались распределения сигналов на выходе всех 9 модулей макета. Сравнение данных для различных модулей макета показало идентичность их характеристик, что давало основание суммировать показания всех модулей без введения каких-либо поправок.

Были проведены расчеты энергетического разрешения семплингового калориметра методом математического моделирования. Результаты расчетов для калориметра с 180 слоями приведены в Табл. 4.1. Расчет показал, что энергетическое разрешение калориметра толщиной более 180 слоев при  $E_\gamma = 1000$  ГэВ лучше 2,6%.

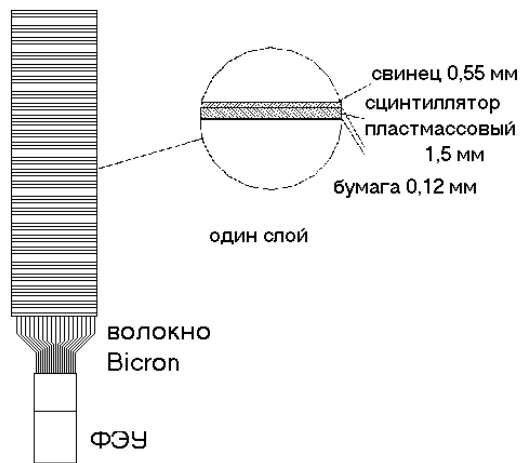


Рис. 4.6 Структура одного модуля семплингового калориметра.

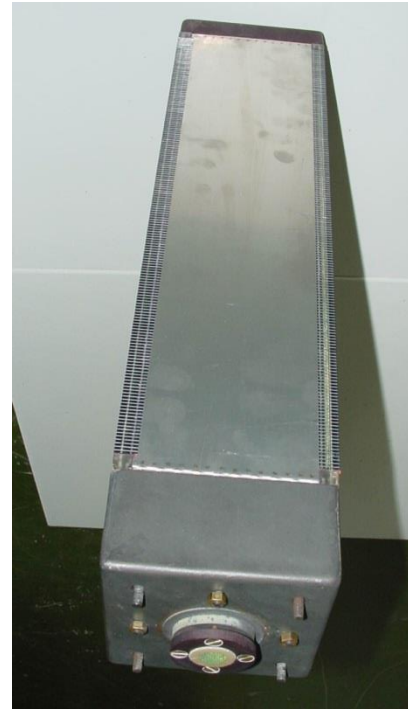


Рис. 4.7 Модуль семплингового калориметра.



Рис. 4.8 Семплинговый калориметр из 9 модулей в монтажной стойке.



Рис. 4.9 Семплинговый калориметр из 9 модулей.

Таблица 4.1

Энергия гамма-квантов, ГэВ	Энергетическое разрешение, %	Эффективность регистрации, %
100	2,08±0,1	75
200	2,09±0,1	82
300	2,49±0,2	89
500	2,54±0,2	95
700	2,42±0,2	93
1000	2,54±0,2	99

В состав системы выделения попадающих в телескоп частиц входили, как указано выше, координатные детекторы. Координатная система состояла из трех идентичных блоков, в каждом из которых имелось два слоя детекторов, собранных из длинных сцинтилляционных брусков сечением 10x10 мм<sup>2</sup>. Оси сцинтилляторов в двух слоях блока были ориентированы взаимно перпендикулярно, что позволило бы получать информацию в каждом из трех блоков о двух координатах следа заряженной частицы.

Для регистрации световой вспышки, создаваемой заряженной частицей в сцинтилляторе, планировалось применять твердотельные (кремниевые) светочувствительные элементы (Si-ФЭУ). Отдельный Si-ФЭУ представлял совокупность большого числа (порядка 10<sup>3</sup> на 1 мм<sup>2</sup>) лавинных фотодиодов (пикселей), функционирующих в гейгеровском режиме, при котором регистрация даже одного фотона давала на выходе стандартный сигнал достаточно большой амплитуды. Твердотельный Si-ФЭУ по своим параметрам вполне конкурентоспособен с обычными вакуумными ФЭУ, что иллюстрирует Табл. 4.2.

Таблица 4.2

Параметр	Вакуумный фотоумножитель	Твердотельный ФЭУ (Si-ФЭУ)
Напряжение питания	1-2 кВ	25 В
Коэффициент усиления	$10^6$ - $10^7$	$10^6$
Порог чувствительности	1 фотоэлектрон	1 фотоэлектрон
Временное разрешение	30-100 пс	30 пс
Возможность работы в магнитном поле	Ограничена	Без ограничений

Были проведены измерения некоторых характеристик координатного детектора. В частности, измерялась зависимость амплитуды сигнала от места прохождения частицы. Разработанная методика могла быть успешно использована при создании координатной системы. Такая координатная система позволяла определять угол влета отдельной частицы в гамма-телескоп с точностью до  $\pm 2^\circ$ , что достаточно при измерениях потоков диффузного космического гамма-излучения.

Применение вместо вакуумных ФЭУ твердотельных Si-ФЭУ и ССВ позволило создать компактную, легкую, энергоэкономичную и сравнительно недорогую координатную систему, что существенно при проведении измерений на космических аппаратах. Результаты измерений и расчетов давали основание считать разрабатываемую методику адекватной задаче исследования космического гамма-излучения при энергиях до 1 ТэВ.

Дальнейшая модернизация гамма-телескопа ГАММА-400 позволила улучшить его метрологические характеристики, расширить энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов [408]. В процессе проведения работ по привязке гамма-телескопа к предполагаемому космическому аппарату были выявлены возможности увеличения площади семплингового

калориметра. Число модулей увеличилось с 25 до 36. Поперечное сечение калориметра достигло  $660 \times 660$  мм<sup>2</sup> вместо  $550 \times 550$  мм<sup>2</sup>. Менялась «семплинговость» в каждом модуле: толщина свинцового слоя в элементе (сборка из слоев свинца, полистирола и бумаги) составила 0,275 мм (0,05 р.е.д.) вместо 0,55 мм (0,1 р.е.д.), возросло число элементов до 400, что соответствовало 20 р.е.д. Проведенные исследования и калибровки показали, что в этом случае можно улучшить энергетическое разрешение калориметра до 1,5%. При этом в гамма-телескопе ГАММА-400 (Рис. 4.10) изменялись размеры антисовпадательных и управляющих детекторов, что позволило увеличить светосилу гамма-телескопа в два раза. Сравнение характеристик гамма-телескопов до модернизации (ГАММА-400) и после модернизации (ГАММА-400М), а также основные параметры приведены в Табл. 4.3.

Также была проведена экспериментальная проверка метода выделения событий, связанных с «обратным током» на специально созданной установке, позволяющей проимитировать эффект альбедо (Рис. 4.11). Для этой цели на поверхность стартового детектора (СД) размещался источник  $\text{Co}^{60}$ , при распаде которого излучались два гамма-кванта. События, в которых один из фотонов конвертировался в СД, а другой в АС, считались альбедными, а совпадения сигналов в АС и СД в отсутствии  $\text{Co}^{60}$  при регистрации мюонов соответствовали первичным заряженным частицам. Для каждого события измерялось время между срабатыванием СД и АС и строились временные спектры, показанные на Рис. 4.12. Как видно, события двух видов хорошо разделялись.



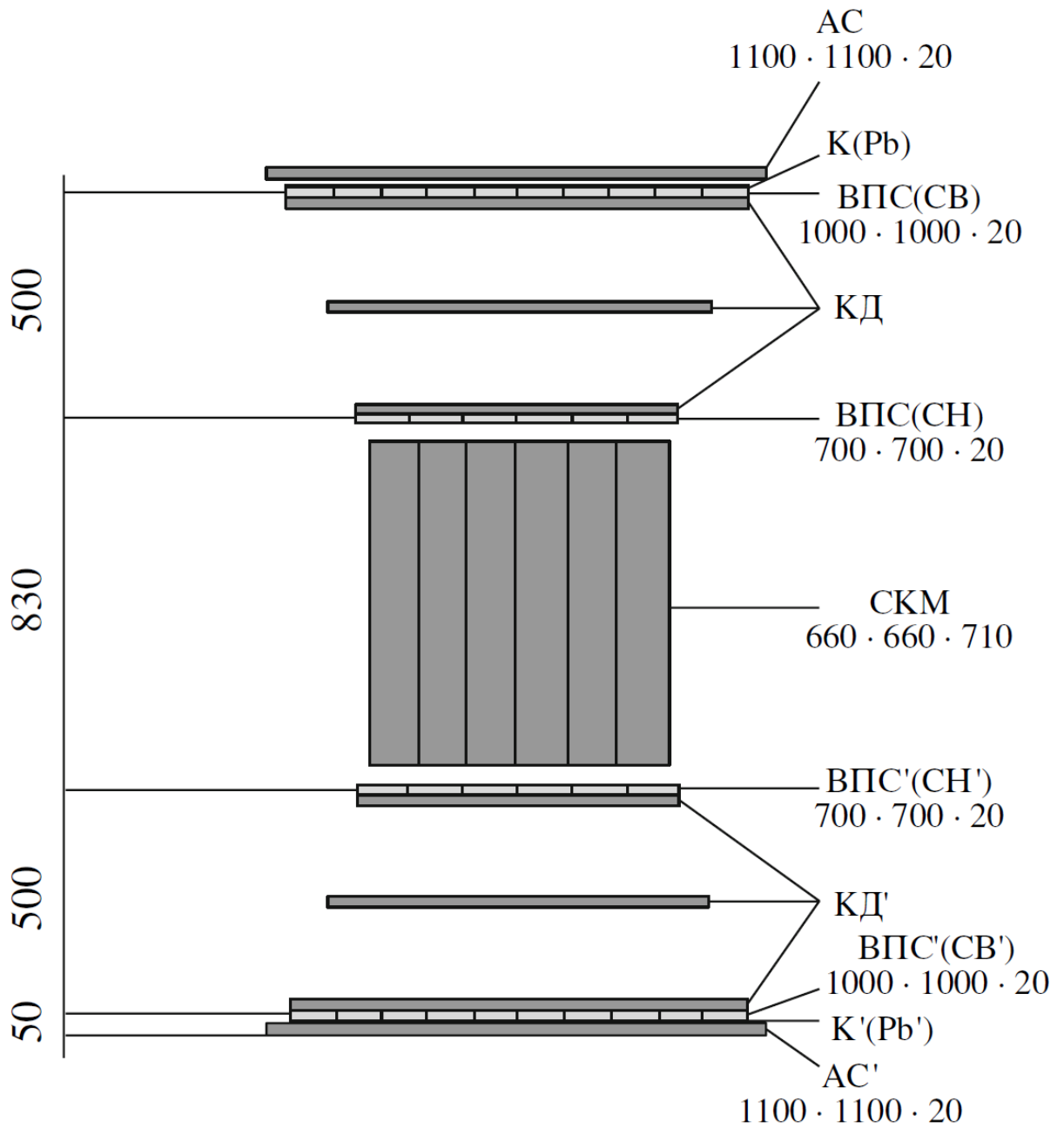


Рис. 4.10 Модернизированный вариант гамма-телескопа ГАММА-400, предложенный в 2008 г. [158].

Таблица 4.3

Параметр	ГАММА-400	ГАММА-400М
	Гамма-телескоп	
Диапазон энергий	30–1000 ГэВ	30–3000 ГэВ
Геометрический фактор	0.92 м <sup>2</sup> · ср	1.96 м <sup>2</sup> · ср
Угловое разрешение	1°–2°	1°–2°
Временное разрешение	0.6 нс	0.6 нс
Координатное разрешение	1–2 см	1–2 см
Площадь АС	800 × 800 мм <sup>2</sup>	1100 × 1100 мм <sup>2</sup>
Площадь СВ ВПС	800 × 800 мм <sup>2</sup>	1000 × 1000 мм <sup>2</sup>
Площадь СН ВПС	600 × 600 мм <sup>2</sup>	700 × 700 мм <sup>2</sup>
Расстояние между СВ и СН	500 мм	500 мм
Масса	1200 кг	1700 кг
Объем информации	500 Мбайт/сут	500 Мбайт/сут
Энергопотребление	500 Вт	800 Вт
Время функционирования	Не менее 5 лет	Не менее 5 лет
	Оценка статистики измерений диффузного $\gamma$ -излучения в направлении на центр Галактики (время наблюдения 1 год, показатель спектра $k = 2.6$ )	
$E_\gamma > 1000$ ГэВ	38	81
$E_\gamma > 2000$ ГэВ	13	27
$E_\gamma > 3000$ ГэВ	7	14
	Калориметр (СКМ)	
Площадь калориметра	550 × 550 мм <sup>2</sup>	660 × 660 мм <sup>2</sup>
Масса калориметра	615 кг	820 кг
Число модулей	25	36
Толщина калориметра	18 р.е.д.	20 р.е.д.
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma = 1$ ТэВ)	2.5%	1.5%
	Модуль калориметра	
Площадь модуля	110 × 110 мм <sup>2</sup>	110 × 110 мм <sup>2</sup>
Длина модуля	370 мм	700 мм
Масса модуля	17 кг	23 кг
Толщина модуля	18 р.е.д.	20 р.е.д.
Число элементов	180	400
	Элемент модуля (свинец + полистирол + бумага)	
Толщина свинца	0.55 мм (0.1 р.е.д.)	0.275 мм (0.05 р.е.д.)
Толщина полистирола	1.5 мм	1.5 мм

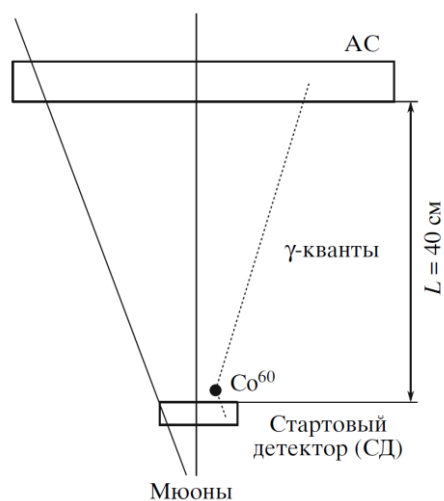


Рис. 4.11 Блок-схема установки имитации альбедных событий.

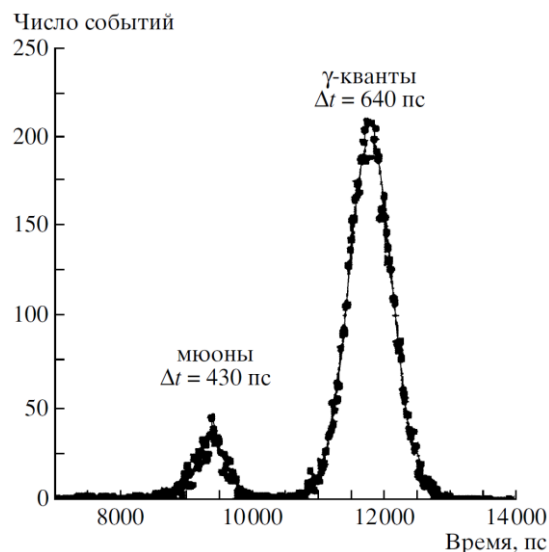


Рис. 4.12 Временные спектры регистрации мюонов и гамма-квантов.

С 2000 г. проект «ГАММА-400» входил в Федеральные космические программы РФ в качестве научно-исследовательской работы (НИР). С 2009 г. статус проекта «ГАММА-400» изменился и стал опытно-конструкторской работой (ОКР). Для размещения комплекса научной аппаратуры был определен космический аппарат с платформой «Навигатор», разработку которого ведет НПО им. С.А. Лавочкина. Научным руководителем проекта «ГАММА-400» стал профессор А.М. Гальпер.

В связи с запуском в 2008 г. гамма-телескопа Fermi-LAT была оптимизирована структура гамма-телескопа ГАММА-400 с целью получения лучшего, чем у Fermi-LAT углового и энергетического разрешений, а также с целью одновременной регистрации не только гамма-излучения, но и потоков электронов и позитронов. Проект «ГАММА-400» «Исследование космического гамма-излучения и потоков электронов и позитронов в диапазоне 1-3000 ГэВ» был утвержден академиками Г.А. Месяцем и В.Л. Гинзбургом (Рис. 4.13).

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Учреждения Российской академии наук

Физического института

им. П.Н. Лебедева РАН

академик



*Месяц Г.А.*

2009 г.

## ПРОЕКТ ГАММА-400

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 1-3000 ГэВ

От ФИАН

Руководитель научного направления

академик

*В.Л. Гинзбург*

Гинзбург В.Л.

29/12 2009 г.

Научный руководитель проекта

ГАММА-400

профессор, г.н.с.

*А.М. Гальпер*

Гальпер А.М.

21 мая 2009 г.

Москва, 2009 г.

Рис. 4.13 Титульная страница пояснительной записки проекта «ГАММА-400».

Оптимизированная схема гамма-телескопа ГАММА-400 представлена на Рис. 4.14 [159-160]. Гамма-телескоп состоял из трех блоков.

1. Наверху расположен конвертер С, где первичные гамма-кванты конвертировались в электрон-позитронную пару. Конвертер состоял из четырех слоев вольфрама, прослоенного кремниевыми стриповыми детекторами. Над конвертером расположены двухслойный антисовпадательный детектор АС и боковые антисовпадательные детекторы для исключения заряженных частиц. Над антисовпадательным детектором расположен детектор переходного излучения TRD. Он предназначен для разделения электронов (позитронов) от протонов. Ниже конвертера расположены два сцинтилляционных детектора S1, S2 времяпролетной системы (TOF), разнесенных на расстояние 600 мм, а также три слоя кремниевых стриповых детекторов CD1, CD2, CD3. Времяпролетная система (TOF) определяла направление движения частиц. Сигналы от детекторов АС и S1 также поступали в систему «обратного тока», которая позволяла использовать времяпролетный метод для исключения событий, когда в АС появлялся сигнал от вторичных частиц «обратного тока». Детекторы CD1-CD3 позволяли определять точку конверсии и траекторию движения заряженных частиц.

2. В середине гамма-телескопа расположен координатный калориметр из трех частей СС1, СС2, СС3 для измерения энергии частиц и формы электромагнитного ливня, образованного вторичными частицами от первичного гамма-кванта. Первые две части состояли из восьми слоев с вольфрамом толщиной 0,25 и 0,5 р.е.д., соответственно, прослоенных кремниевыми стриповыми детекторами. Третья часть состояла из восьми слоев из кристаллов  $PbWO_4$ , прослоенных кремниевыми стриповыми детекторами. После каждой части калориметра расположены быстрые сцинтилляционные детекторы S3, S4 и SLD. Сигналы от этих детекторов использовались для выработки специального триггера и определяли

дополнительные характеристики электромагнитного ливня от вторичных частиц.

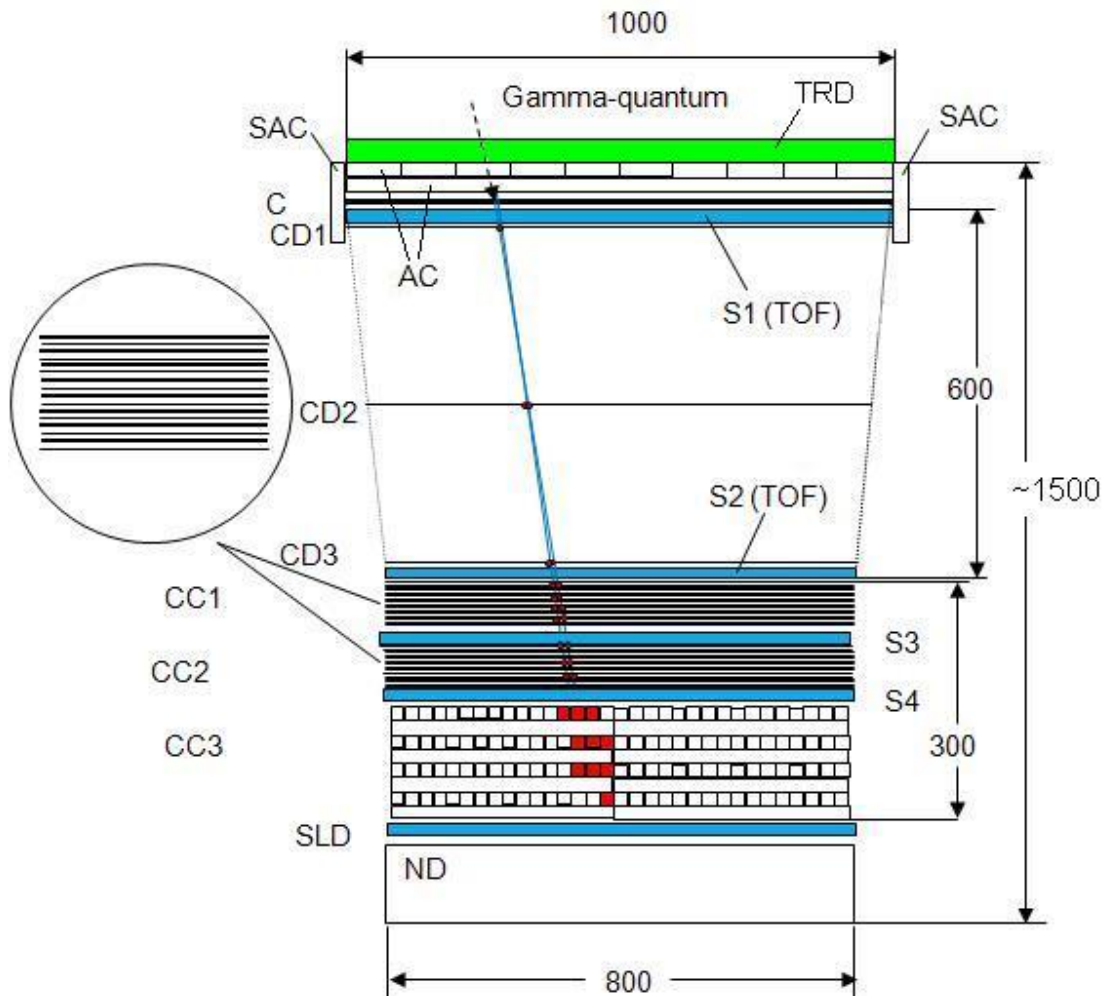


Рис. 4.14 Схема гамма-телескопа ГАММА-400, предложенная в 2009 г. [159-160].

TRD – детектор переходного излучения; AC – антисовпадательный детектор; SAC – боковые антисовпадательные детекторы; C – вольфрамовый конвертер; S1, S2 – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы (ВПС); CD1, CD2, CD3 – координатные кремниевые стриповые детекторы; CC1, CC2 – две части координатного калориметра с кремниевыми стриповыми детекторами, прослоенными вольфрамом; CC3 – третья часть координатного калориметра с кристаллами  $\text{PbWO}_4$  с кремниевыми стриповыми детекторами, прослоенными вольфрамом; S3, S4 – сцинтилляционные детекторы; SLD – сцинтилляционный детектор утечки; ND – нейтронный детектор.

3. В нижней части гамма-телескопа расположен нейтронный детектор ND, который использовался для детектирования нейтронов, образовавшихся при взаимодействии частиц с веществом калориметра. Информация о числе нейтронов позволяла различать события от электромагнитного и от адронного ливней.

При такой схеме гамма-телескоп ГАММА-400 имел диапазон измеряемых энергий для гамма-квантов, электронов (позитронов) 1-3000 ГэВ, а также обеспечивал угловое разрешение  $0,05^\circ$  и энергетическое разрешение 1-2% для энергии  $E_\gamma = 100$  ГэВ.

В дальнейшем физическая схема ГАММА-400 была немного изменена [161-163].

Для повышения углового разрешения была увеличена пролетная база между конвертором и калориметром, а также использовался многослойный конвертор с координатными кремниевыми стриповыми детекторами с малым шагом стрипа, что позволило более точно измерять положение места конверсии гамма-кванта, и определять пространственную картину развития электронно-фотонного ливня в первой части калориметра.

Для расширения энергетического диапазона и увеличения точности измерения энергии регистрируемых высокоэнергичных гамма-квантов, электронов и позитронов использовался координатно-чувствительный калориметр с активным поглотителем из кристаллов BGO, прослоенных кремниевыми стриповыми детекторами и общим размером вдоль оси телескопа, в два-три раза превышающим расстояние до максимума развития электромагнитного ливня.

Для подавления фона, создаваемого протонно-ядерной компонентой космических лучей, а также для формирования сигнала запуска телескопа при регистрации гамма-квантов использовались сегментированный антисовпадательный детектор и дополнительные сигналы системы «обратного тока» (для устранения методом время-амплитудного анализа эффекта от вторичных частиц, движущихся в «обратном» направлении от

калориметра к конвертору). На стадии наземной обработки и анализа зарегистрированных событий, должны были использоваться также показания детектора переходного излучения и нейтронного детектора.

Описанная физическая схема ГАММА-400 и его основные характеристики приведены на Рис. 4.15 и в Табл. 4.4. Гамма-кванты проходили без взаимодействия антисовпадательный детектор  $AC$  и конвертировались в  $(e^- + e^+)$ -пару в шестислойном конверторе  $K$  ( $6 \times 0,14 = 0,84$  р.е.д.), состоящим из кремниевых стриповых детекторов  $KД1-KД6$  и вольфрама. Времяпролетная система  $ВПС$ , состоящая из разнесенных на  $\sim 100$  см детекторов  $C1$  и  $C2$  обеспечивала выделение первичных гамма-квантов, летящих в «сверху-вниз» в апертуре гамма-телескопа. Координатные детекторы  $KД7-KД8$  определяли координаты точки прохождения через них  $(e^- + e^+)$ -пары, образовавшейся при конверсии гамма-кванта. Далее  $(e^- + e^+)$ -пара создавала в двух частях координатно-чувствительного калориметра  $KK1$  и  $KK2$  (суммарная толщина 30 р.е.д. или 1,5 я.д.) электромагнитный ливень. Для выделения  $e^-$  и  $e^+$  после конверсии первичных гамма-квантов, а также  $e^-$  и  $e^+$  космических лучей из потока протонов космических лучей использовались: детекторы  $C3$  и  $C4$  (для определения количества частиц, выходящих из  $KK1$  и  $KK2$ ); детектор переходного излучения  $ДПИ$ ;  $KK2$  (для использования различия в продольном и поперечном профилях электромагнитного и адронного ливней); нейтронный детектор  $НД$  (для использования различия в количестве нейтронов, образовавшихся в калориметре при прохождении электромагнитного и адронного ливней). Суммарная режекция протонов составляла  $10^6$ . В процессе измерений в гамма-телескопе одновременно использовались две основные триггерные системы: первая - для регистрации гамма-квантов (при отсутствии сигналов в  $AC$ ) и вторая для регистрации  $e^-$  и  $e^+$  (при наличии сигнала в  $AC$ ).



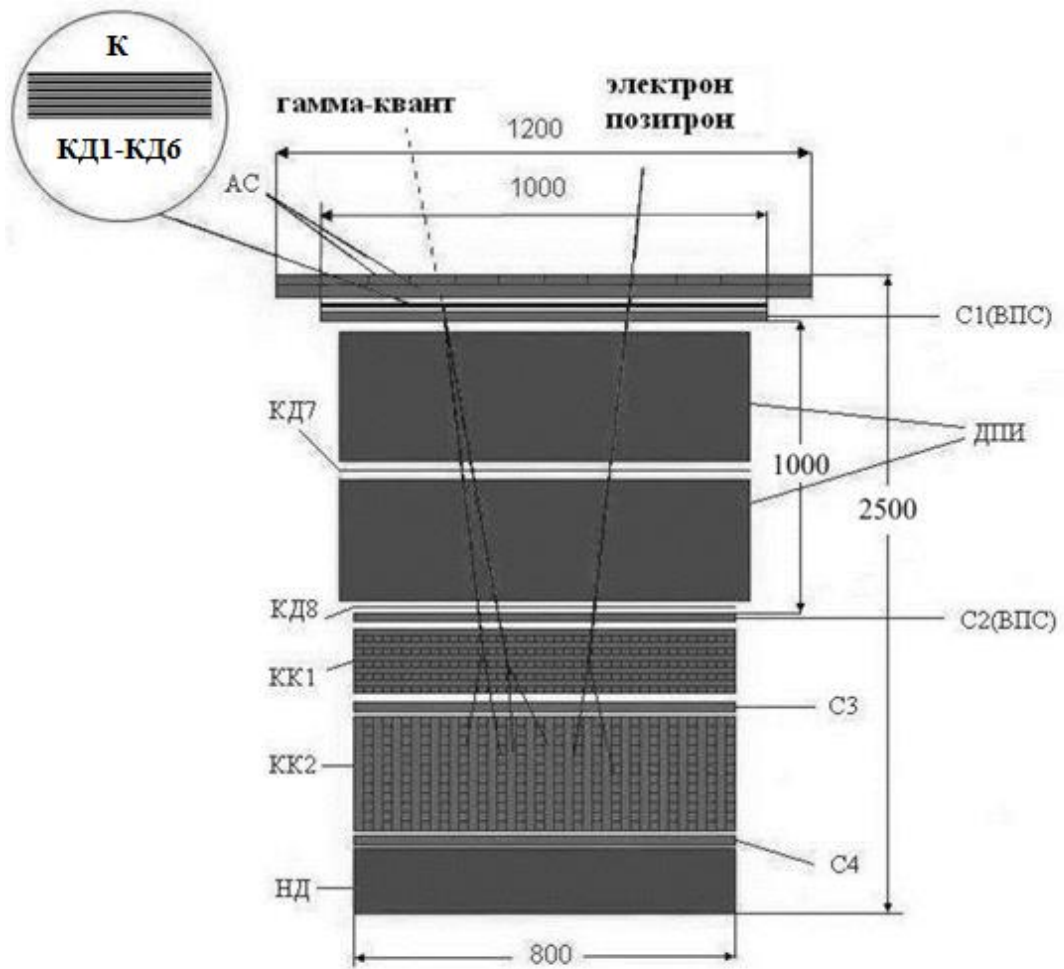


Рис. 4.15 Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400, предложенная в 2011 г. [161].

Энергетический диапазон измерения гамма-квантов	100 МэВ – 3000 ГэВ
Чувствительная площадь, см <sup>2</sup>	6400
Чувствительность ( $E_\gamma > 100$ МэВ), фотон/(см <sup>2</sup> с)	$5 \times 10^{-9}$
Угловое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 0,01^\circ$
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 1\%$
Толщина калориметра	30 р.е.д.
Коэффициент режекции протонов	$10^6$
Точность определения ориентации гамма-телескопа (по звездному датчику)	$0,005^\circ$
Объем передаваемой информации, Гбайт/сутки	100
Масса, кг	2500
Габаритные размеры, м <sup>3</sup>	2,0x2,0x2,5
Энергопотребление, Вт	2000

Угловое разрешение гамма-телескопов отражает точность определения направления прилета регистрируемых гамма-квантов. В [164] был предложен метод восстановления направления прилета первичного гамма-кванта для предложенной на Рис. 4.15 физической схемы. Полученное угловое разрешение оказалось существенно более высоким по сравнению с существующими и проектируемыми телескопами.

Для восстановления направления прилета первичного гамма-кванта использовалась информация с кремниевых стрипов плоскостей *KK1* (шаг стрипов 0,5 мм) и с кремниевых стрипов детектора *КД6* (шаг стрипов 0,1 мм). На первом этапе находилась ось ливня, развившегося в *KK1*, определялся центр тяжести потерь энергии в каждой стриповой плоскости. Полученная зависимость центров тяжести потерь от глубины фиксировалась как линейная

функция методом наименьших квадратов. На следующем этапе также использовалась информация о центре тяжести потерь энергии в плоскостях *КД1-КД6* ( $x$  и  $y$ ) и восстанавливалась траектория первичного гамма-кванта. Для вертикально падающего потока гамма-квантов были получены зависимости:

- углового разрешения для *КК1* от энергии для шагов стрипов 0,5 мм и 1,0 мм (Рис. 4.16). Видно, что угловое разрешение *КК1* улучшается при уменьшении шага стрипов;

- углового разрешения для ГАММА-400 от расстояния между конвертером и калориметром для энергий 100 и 1000 ГэВ (Рис. 4.17) и от энергии для величин пролетной базы между *КД6* и *КК1* 60 и 100 см (Рис. 4.18).

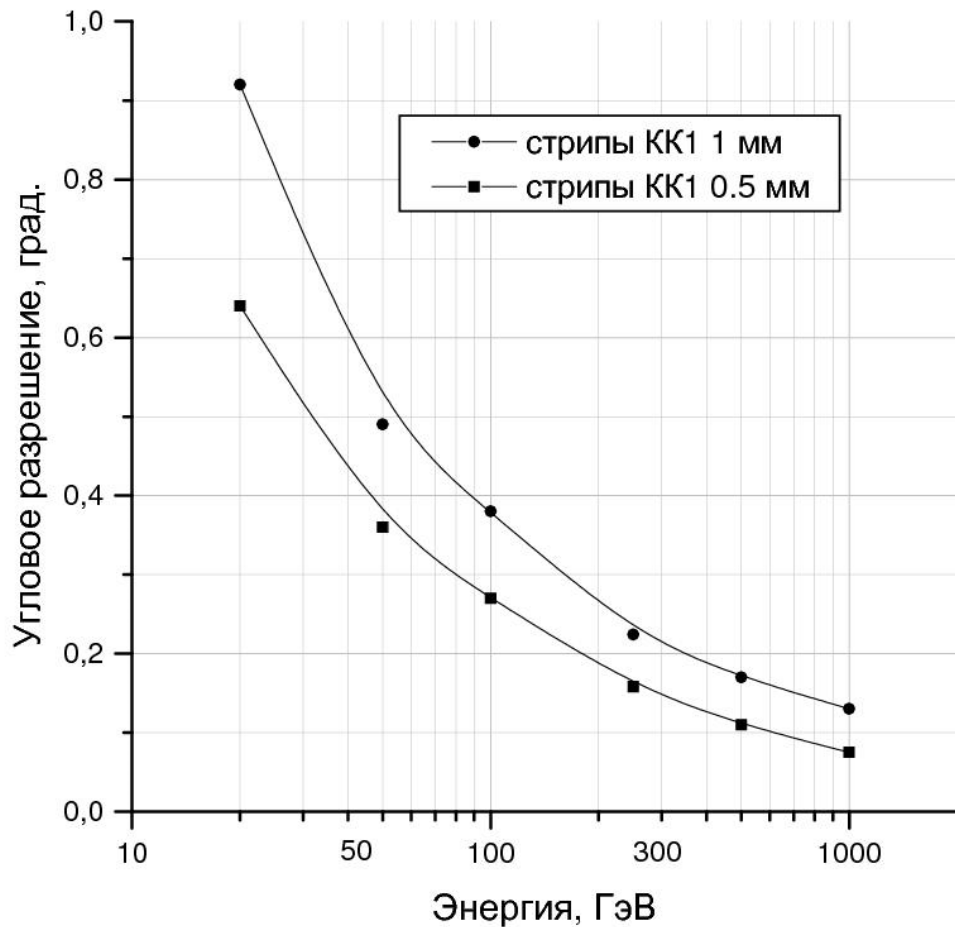


Рис. 4.16 Зависимость углового разрешения *КК1* от энергии для величин шагов стрипов 0,5 и 1 мм.

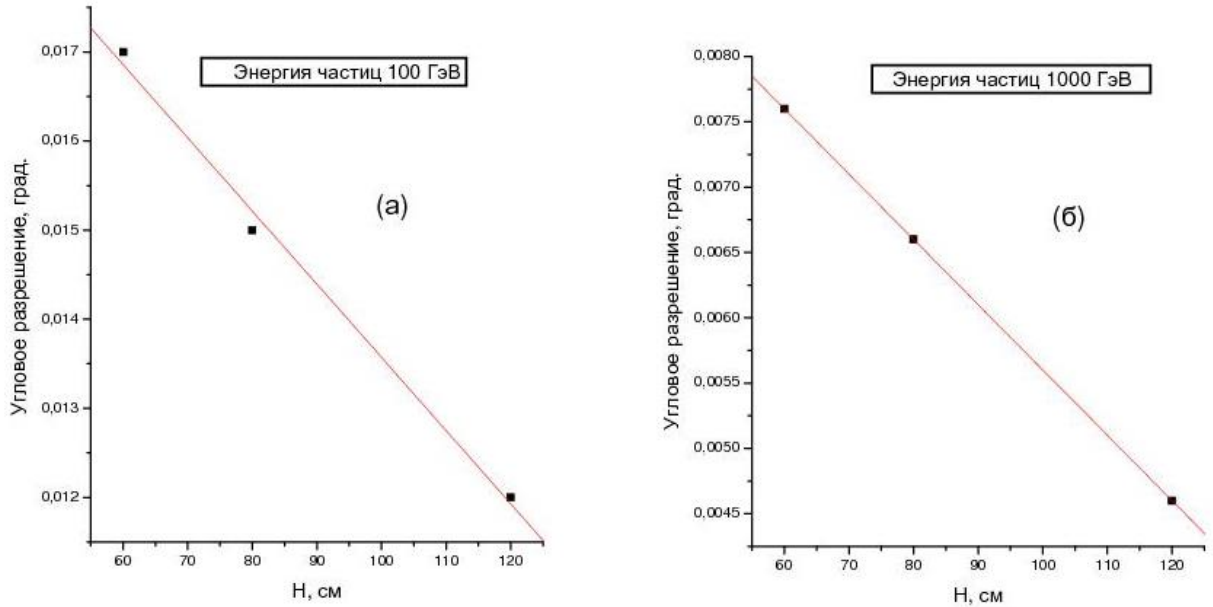


Рис. 4.16 Зависимость углового разрешения ГАММА-400 от расстояния между конвертером и калориметром КК1 ( $H$ ) для энергий 100 (а) и 1000 (б) ГэВ.

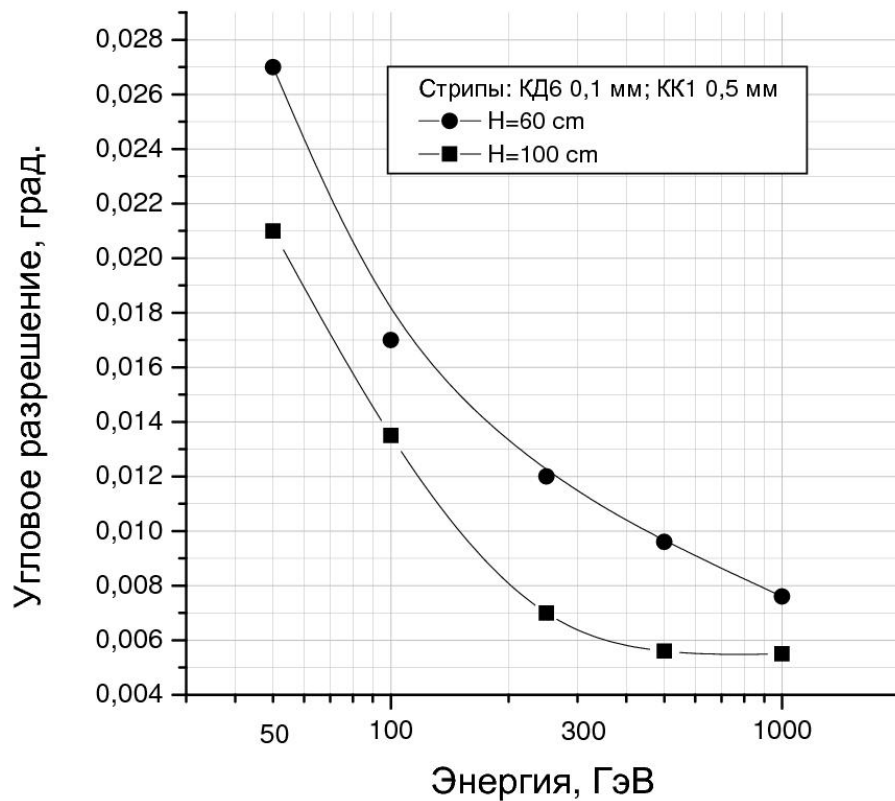


Рис. 4.17 Зависимость углового разрешения ГАММА-400 от энергии для различных величин пролетной базы  $H$  (60 и 100 см).

Таким образом, для конфигурации гамма-телескопа ГАММА-400 (шаг стрипов *КДб* - 0,1 мм; шаг стрипов *КК1* - 0,5 мм;  $H = 100$  см) было получено угловое разрешение лучше  $0,015^\circ$  для энергии гамма-квантов более 100 ГэВ, что существенно лучше, чем у существующих и проектируемых гамма-телескопов.

По согласованию с Российским космическим агентством и НПО им. С.А. Лавочкина было определено, что космическая обсерватория «ГАММА-400» с гамма-телескопом ГАММА-400, установленном на платформе «Навигатор», будет выведена в космос на высокоэллиптическую орбиту с апогеем 300000 км, перигеем 500 км и наклоном  $51,8^\circ$ . Время жизни космической обсерватории не менее 7 лет. Предполагалось длительное непрерывное наблюдение наиболее интересных дискретных источников.

Дальнейшая модификация гамма-телескопа ГАММА-400 была представлена в [165-168]. Основные характеристики ГАММА-400 приведены в Табл. 4.5. Физическая схема ГАММА-400 была изменена и представлена на Рис. 4.18.

Таблица 4.5

Энергетический диапазон	100 МэВ – 3000 ГэВ
Эффективная площадь, см <sup>2</sup>	~4000
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~1%
Угловое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~0.01°
Толщина калориметра, р.е.д.	~25
Коэффициент режекции протонов	~10 <sup>6</sup>
Объем передаваемой информации, Гбайт/сутки	100
Масса, кг	2600
Габаритные размеры, м	2,0 × 2,0 × 3,0
Энергопотребление, Вт	2000

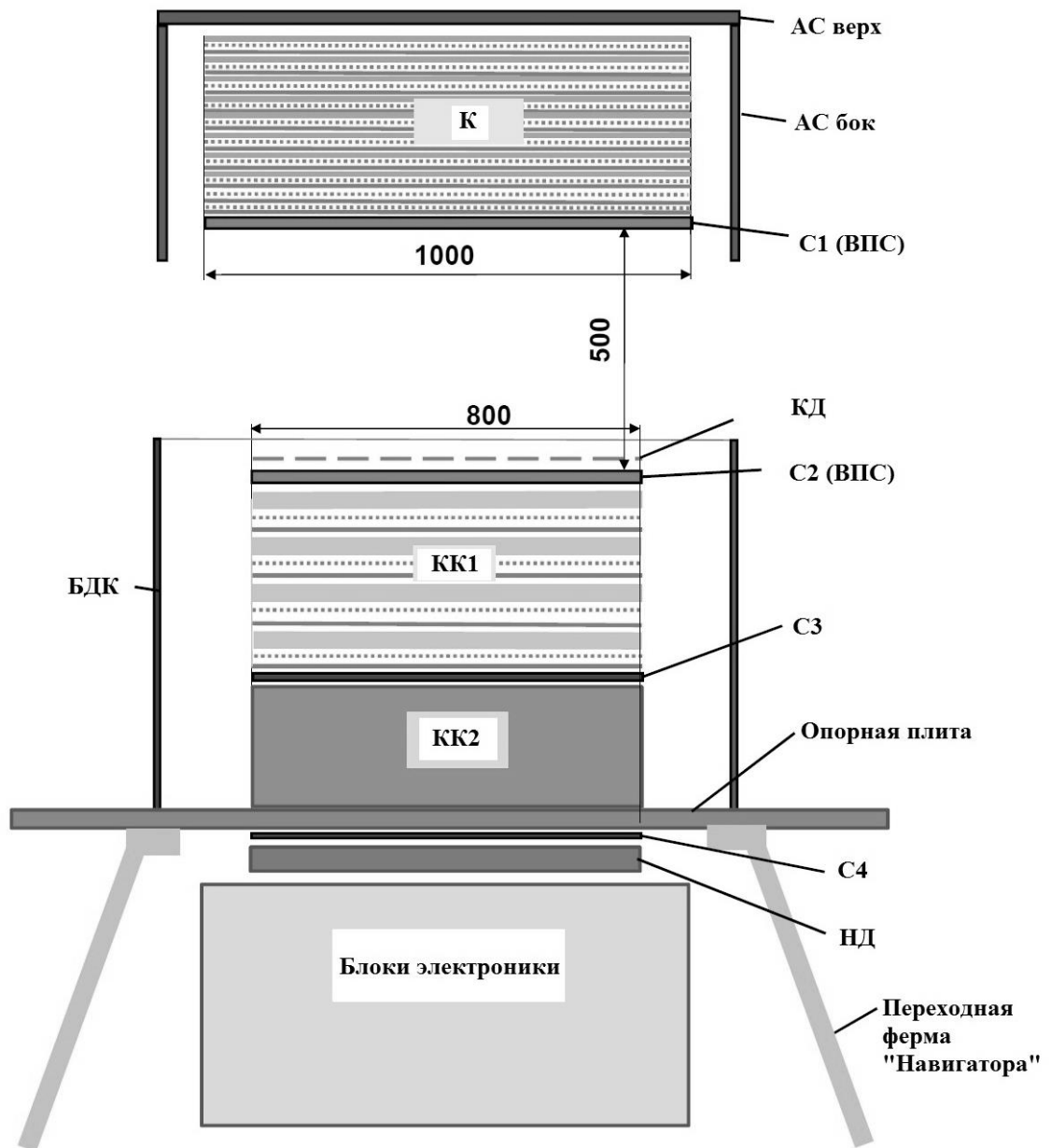


Рис. 4.18 Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400, предложенная в 2013 г. [168]:

$АС_{\text{верх}}$  – верхний антисовпадательный сцинтилляционный детектор;  
 $АС_{\text{бок}}$  – боковые антисовпадательные сцинтилляционные детекторы;  
 К – конвертер-трекер; С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы  
 времяпролетной системы; КД – координатный детектор;  
 КК1 и КК2 – координатно-чувствительный калориметр; С3 и С4 –  
 сцинтилляционные детекторы; НД – нейтронный детектор.

Гамма-телескоп ГАММА-400 включал в себя следующие системы и детекторы:

- верхний ( $АС_{\text{верх}}$ ) и боковые ( $АС_{\text{бок}}$ ) антисовпадательных детекторы;
- конвертер-трекер (К), представляющий собой 10 прослоенных вольфрамом плоскостей двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых координатных детекторов (шаг 0,1 мм). Общая толщина конвертора-трекера составляла 1,0 р.е.д.;
- времяпролетную систему (ВПС) из сцинтилляционных детекторов С1 и С2, разнесенных на 500 мм;
- координатно-чувствительный калориметр из двух частей:
  - а) КК1, содержащий четыре слоя, каждый из которых представлял собой набор кристаллов CsI(Tl) и двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых детекторов с шагом 0,5 мм. Толщина КК1 составляла 3 р.е.д.
  - б) КК2 из кристаллов ВГО (размером 25 × 25 × 250 мм). Толщина КК2 составляла 22 р.е.д.

Общая толщина калориметра для нормального падения частиц составляла 25 р.е.д. или 1,2 я.е.д. Общая толщина калориметра для бокового падения частиц – 70 р.е.д. или 3,5 я.е.д.
- сцинтилляционные детекторы С3 и С4;
- боковые детекторы калориметра (БДК);
- нейтронный детектор (НД).

Гамма-кванты конвертировались в электрон-позитронную пару в конвертере-трекере, которая в дальнейшем регистрировалась в нижних детекторах. Антисовпадательные детекторы обеспечивали выделение гамма-квантов из фона заряженных частиц, а времяпролетная система обеспечивала выделение направления падающих «сверху-вниз» частиц и формировала апертуру гамма-телескопа. Электромагнитный ливень, созданный электрон-

позитронной парой, развивался в двух частях калориметра и регистрировался в калориметре и сцинтилляционных детекторах С3 и С4.

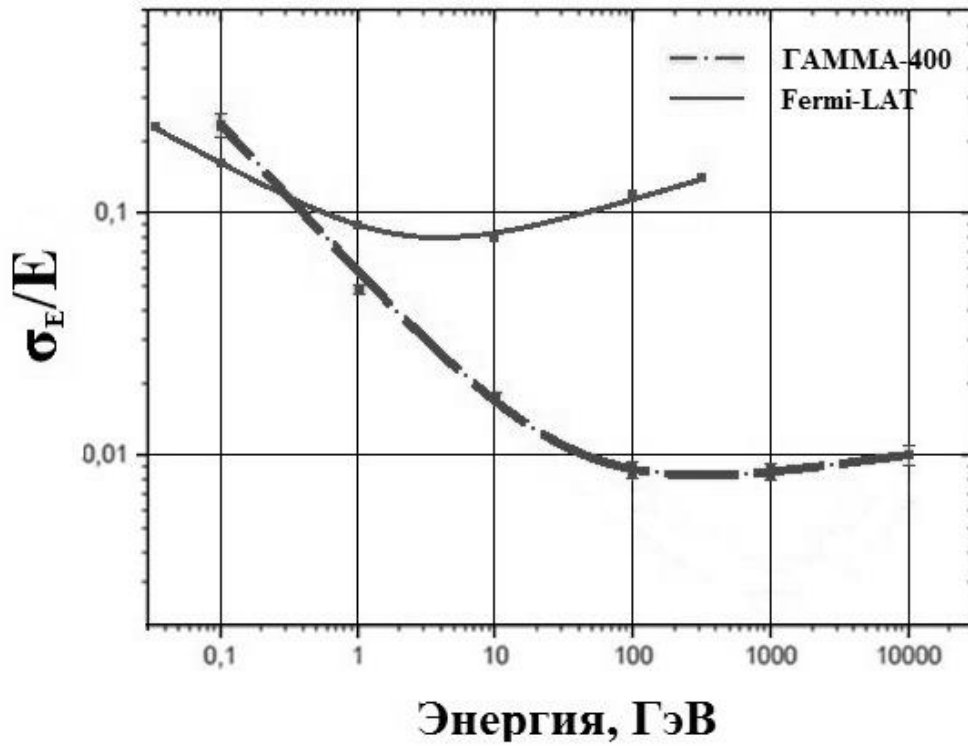
Регистрация гамма-квантов осуществлялась при отсутствии сигнала в АС. Регистрация электронов (позитронов) осуществлялась при наличии сигнала в АС при пролете как сверху вниз, так и с боковых направлений.

Использование калориметра толщиной  $\sim 25$  р.е.д. позволило расширить энергетический диапазон регистрируемых частиц до нескольких ТэВ и повысить энергетическое разрешение гамма-телескопа до  $\sim 1\%$  при энергиях более 10 ГэВ. Методом Монте-Карло была рассчитана зависимость энергетического разрешения ГАММА-400 от начальной энергии гамма-квантов. Эта зависимость представлена на Рис. 4.19а (для сравнения приведена такая же зависимость для Fermi-LAT [45]). Видно, что в области энергий от 10 до 10000 ГэВ энергетическое разрешение составляет  $\sim 1\%$ , что крайне важно при выделении гамма-линий от частиц темной энергии.

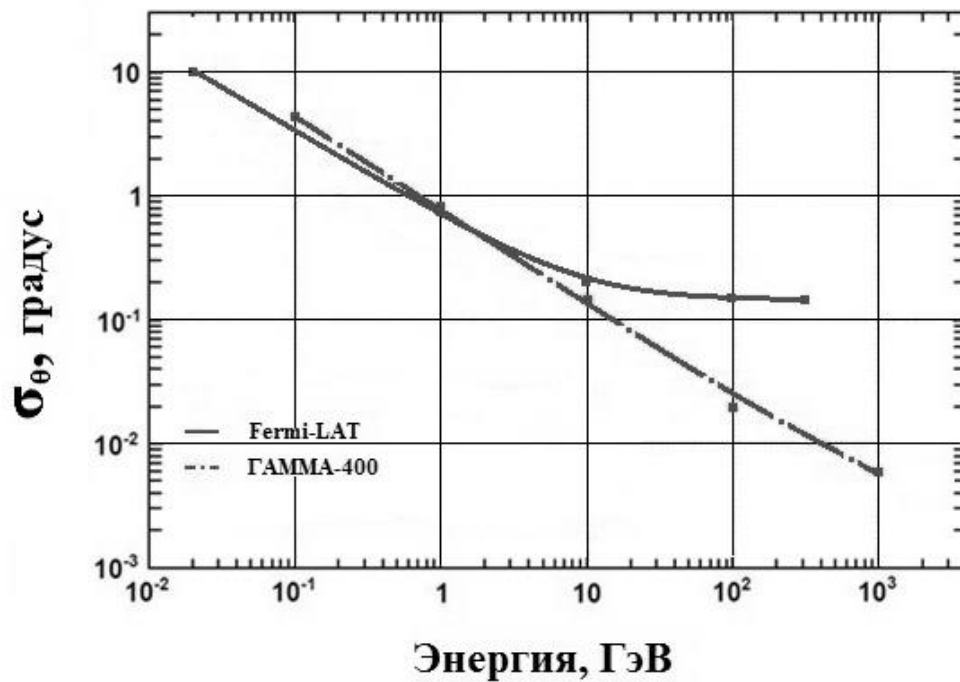
Высокое угловое разрешение достигается с помощью определения точки конверсии в многослойном конвертере и реконструкции оси ливня в КК1. Этот метод позволяет достичь высокого углового разрешения  $\sim 0,01^\circ$  при энергиях более 100 ГэВ (Рис. 4.19б), что позволит определить направление на возможный источник гамма-излучения от частиц темной энергии.

Для исключения из регистрации частиц «обратного тока», движущихся в обратном направлении, наряду с сегментационным методом использовался метод разделения падающих частиц и частиц «обратного тока» по времени пролета.





а)



б)

Рис. 4.19 Зависимости энергетического (а) и углового (б) разрешений от энергии для гамма-телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT [168].

### 4.3 Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400

Учитывая методы разработки научной аппаратуры в астрофизических исследованиях высокоэнергичного гамма-излучения для гамма-телескопов в эксперименте ГАММА-1 и в проекте «ГАММА-400» в предыдущие годы, а также технические возможности космического аппарата с платформой «Навигатор», была предложена следующая физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400, представленная на Рис. 4.20 [3]. Основные характеристики представлены в Табл. 4.6. По сравнению с физической схемой, представленной ранее, увеличены размеры калориметра (КК1 и КК2), С2, С3, С4 и НД до  $1000 \times 1000 \text{ мм}^2$  вместо прежних  $800 \times 800 \text{ мм}^2$ . При этом масса увеличена до 4100 кг вместо 2600 кг. Это стало возможно благодаря переходу к более мощной ракете-носителю «Протон-М» для вывода космической обсерватории с гамма-телескопом ГАММА-400.

В состав научной аппаратуры, расположенной на платформе «Навигатор», кроме гамма-телескопа ГАММА-400 входят два магнитометра и два звездных датчика. Предполагается также установка рентгеновского телескопа.

Для успешного управления работой научной аппаратуры необходимо знать направление магнитного поля и ориентацию оси гамма-телескопа в каждый момент регистрации полезного события. С этой целью включены два магнитометра, позволяющие измерять вектор магнитного поля.

Звездный датчик формирует информацию, которая будет использоваться при регистрации полезных событий для определения текущей ориентации визирных осей гамма-телескопа ГАММА-400 при регистрации полезных событий относительно инерциальной системы координат с заданной точностью  $\sim 5$  угловых секунд.

Одновременные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах центра Галактики, пузырей Ферми и т.п. значительно улучшили бы наше понимание процессов, происходящих в астрофизических объектах. Еще в

1964 г. в [169] В.Л. Гинзбург писал о важности наблюдений в гамма- и рентгеновском диапазонах.

Гамма-телескоп ГАММА-400 включает в себя:

- верхний ( $AC_{\text{верх}}$ ) и четыре боковых ( $AC_{\text{бок}}$ ) антисовпадательных детектора из двухслойных пластиковых сцинтилляционных пластин длиной 100 мм и толщиной 10 мм, обеспечивающих эффективность регистрации заряженных частиц 0,999995;

- конвертер-трекер (К), состоящий из 10 двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых координатных детекторов с шагом 0,08 мм с аналоговым съемом информации, что значительно улучшает пространственную точность. Восемь слоев содержат дополнительно вольфрамовые пластины толщиной 0,35 мм (0,1 р.е.д.). Общая толщина конвертора-трекера составляет 1,0 р.е.д.;

- времяпролетную систему (ВПС) из двухслойных пластиковых сцинтилляционных детекторов С1 (1000x1000x20 мм) и С2 (1000x1000x20 мм) из сцинтилляционных пластин длиной 100 мм и толщиной 10 мм. Детекторы С1 и С2 разнесены на расстояние  $L_{\text{ВПС}} \sim 500$  мм; ВПС обеспечивает коэффициент разделения событий, идущих сверху и снизу – не менее 1000 и имеет временное разрешение лучше 300 пс;

- координатно-чувствительный калориметр (КК) площадью 1000x1000 мм<sup>2</sup>. КК состоит из двух частей КК1 и КК2:

- а) КК1 состоит из 2 слоев. Каждый слой представляет набор сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых детекторов с шагом 0,08 мм. Толщина КК1 составляет 2 р.е.д.

- б) КК2 состоит из 28x28 кристаллов CsI(Tl). Каждый кристалл размером 36x36x430 мм обернут тайвеком (нетканый

светоотражающий материал) и расположен в решетке из углепластика толщиной 0,4 мм. Толщина КК2 составляет 23 р.е.д. Общая толщина калориметра для нормального падения частиц составляет 25 р.е.д. или 1,2 я.е.д. (я.е.д. - ядерная единица длины). Общая толщина калориметра при регистрации частиц сбоку 54 р.е.д. или 2,5 я.е.д. Основная и боковая апертуры для регистрации частиц представлены на Рис. 4.21. Полное поле зрения основной апертуры составляет  $\pm 45^\circ$ .

- пластиковые сцинтилляционные детекторы калориметра С3 и С4 размером 1000×1000 мм, состоящие из двух слоев сцинтилляционных пластин, имеющих ширину 200 мм и толщину 10 мм;
- двухслойные пластиковые боковые детекторы калориметра (БДК);
- нейтронный детектор (НД), который представляет собой многослойную систему из чередующихся слоев полиэтилена (замедлитель нейтронов) и слоев комбинированного сцинтиллятора на основе экранов из  $\text{ZnS(Ag)+}^6\text{LiF}$  и органического стекла, один слой которого является сцинтиллятором, а два других – световодом.

Таблица 4.6

Энергетический диапазон	100 МэВ – 3000 ГэВ
Эффективная площадь, см <sup>2</sup>	~4000
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~1%
Угловое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~0,01°
Толщина калориметра, р.е.д.	~25
Коэффициент режекции протонов	~10 <sup>6</sup>
Объем передаваемой информации, Гбайт/сутки	100
Масса, кг	4100
Габаритные размеры, м	2,0 × 2,0 × 3,0
Энергопотребление, Вт	2000

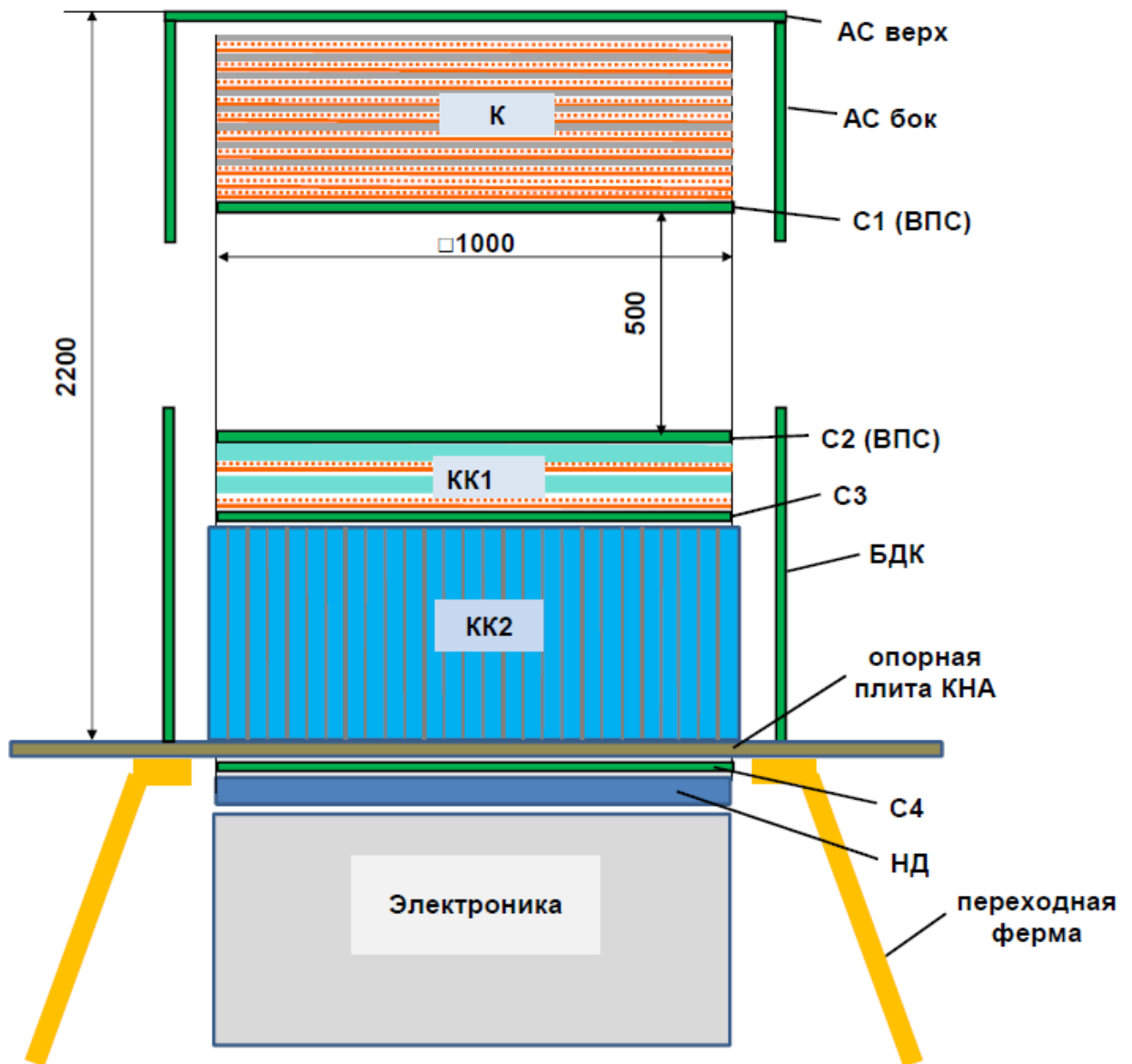


Рис. 4.20 Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400 [3]:  
 АС<sub>верх</sub> – верхний антисовпадательный детектор; АС<sub>бок</sub> – боковые антисовпадательные детекторы; К – конвертер-трекер; С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы; КК1 и КК2 – координатно-чувствительный калориметр; С3 и С4 – сцинтилляционные детекторы; НД – нейтронный детектор.

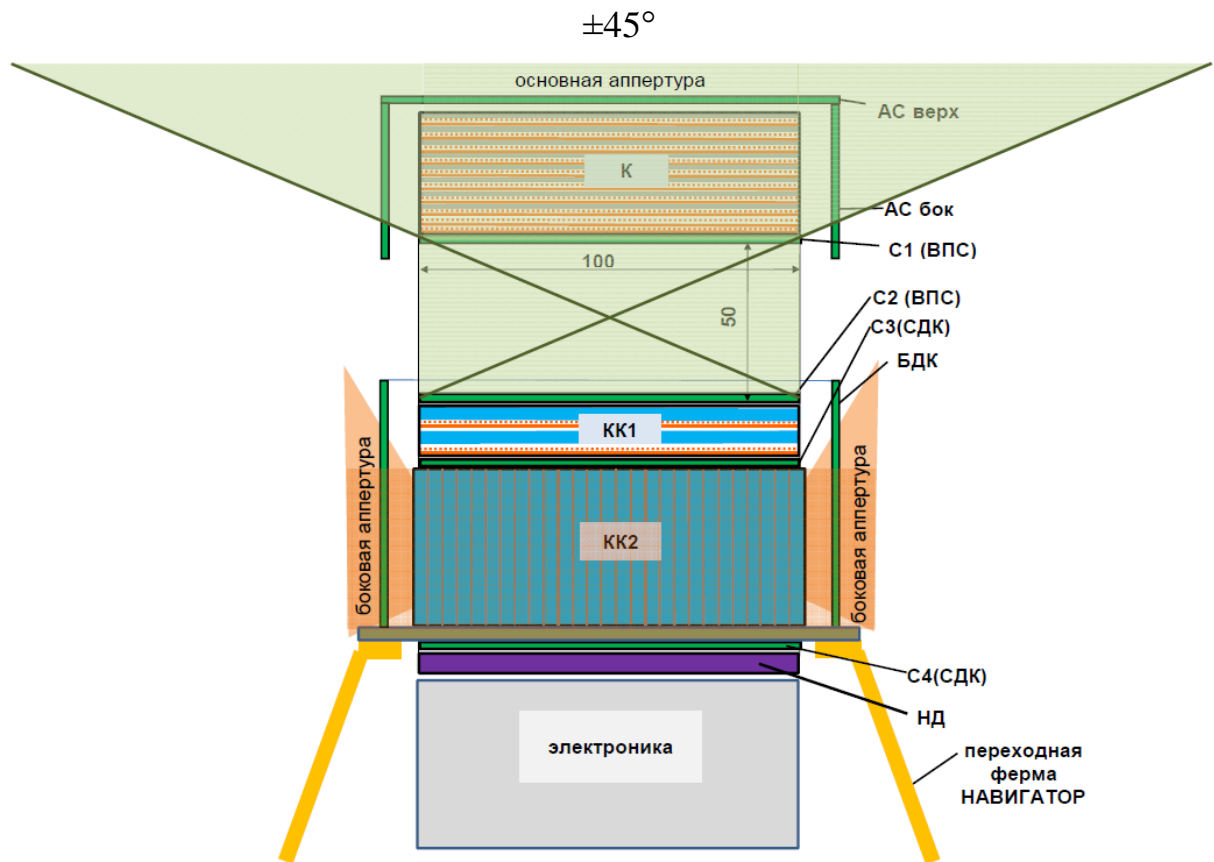


Рис. 4.21 Схема гамма-телескопа ГАММА-400 и его основная и боковая апертура.

В потоке заряженных космических лучей подавляющее число составляют протоны. Приблизительное соотношение потоков частиц в первичном космическом излучении между протонами, ядрами гелия, электронами, позитронами и гамма-квантами составляет  $1/10^{-1}/10^{-2}/10^{-3}/10^{-4}$ , соответственно.

Для выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц используются антисовпадательные детекторы, окружающие сверху и с боков конвертер-трекер. Отсутствие сигналов с этих детекторов с учетом режекции «обратного тока» означает, что гамма-квант конвертировался внутри конвертера-трекера в электрон-позитронную пару, которая в дальнейшем регистрируется в детекторах. Времяпролетная система выделяет летящие «сверху-вниз» частицы.

Основным отличием метода режекции «обратного тока» в гамма-телескопе ГАММА-400 от методики, применяемой в уже существующих гамма-телескопах, является использование секционированных двухслойных антисовпадательных детекторов, в которых различается энерговыделение от «обратного тока» и прямого прохождения заряженных частиц, а также использование времячувствительного верхнего детектора антисовпадений  $AS_{\text{верх}}$ , учитывающего, что приход частиц обратного тока будет с задержкой, как минимум соответствующей прохождению длины  $2 \times L_{\text{ВПС}}$ , т.е. составляющей более 3 нс. Ранее в гамма-телескопах использовались только секционированные однослойные детекторы без учета временной задержки и особенностей энергетических характеристик «обратного тока».

Электромагнитный ливень, созданный электрон-позитронной парой, которая, в свою очередь, образовалась в конвертере-трекере, развивается в двух частях калориметра и регистрируется в калориметре и сцинтилляционных детекторах С3 и С4.

Регистрация полезных событий, в том числе и выделение движущихся сверху-вниз частиц, инициируется системой формирования триггерных и

счетных сигналов. Триггерные сигналы запускают электронные узлы для преобразования информации с детекторов в цифровой код, а так же формирование быстрых сигналов (триггерных маркеров, соответствующих регистрации гамма-квантов, электронов/позитронов, ядер) для анализа событий в триггерной системе и формирования массивов выходных данных, т.е. именно триггерные маркеры определяют тип зарегистрированного события.

Использование толстого калориметра (~25 р.е.д.) позволяет расширить энергетический диапазон регистрируемых частиц до нескольких ТэВ и повысить энергетическое разрешение гамма-телескопа до ~1% при энергиях более 100 ГэВ. Использование кремниевых стриповых детекторов с меньшим шагом, а также времяпролетной базы между стриповыми плоскостями конвертера-трекера и стриповыми плоскостями в первой части калориметра КК1 позволяет достичь высочайшего углового разрешения ~0,01° при энергиях более 100 ГэВ.

Выделение электронов и позитронов от протонов, используя физико-технические возможности гамма-телескопа ГАММА-400, проводится по следующим основным критериям:

1. По глубине начала ливня в калориметре.
2. По продольному и поперечному профилям ливня в калориметре.
3. По энерговыведениям в детекторах С2, С3, С4.
4. По количеству нейтронов, зарегистрированных в нейтронном детекторе.

В результате обеспечивается режекция протонов на уровне  $\sim 5 \times 10^5$  [170].

Одновременно с основными задачами астрофизического исследования высокоэнергичного гамма-излучения ГАММА-400 может решать дополнительные задачи - регистрировать электроны/позитроны и легкие ядра с боковых направлений электромагнитного калориметра КК2 (Рис. 4.21).



Возможности регистрации заряженных частиц в боковой апертуре представлены в Табл. 4.6.

Таблица 4.6

	GF (м <sup>2</sup> ср)	$\sigma(E)/E$	Толщина	Диапазон
Электроны	3,4	~2%	54 р.е.д.	1 – 3000 ГэВ
Протоны и ядра гелия	4	~32%	54 р.е.д. 2,56 я.е.д.	100 ГэВ – 100 ТэВ
Ядра с Z>2	4,8	~32%	54 р.е.д. 2,56 я.е.д.	до 10 ТэВ/нукл

При регистрации частиц с пяти сторон (верхняя и боковые стороны) общий геометрический фактор составит 9,5 м<sup>2</sup>ср.

#### 4.4 Орбита космического аппарата

Космическая обсерватория с гамма-телескопом ГАММА-400 выводится на высокоапогейную орбиту с начальными параметрами:

- высота апогея не менее 300000 км;
- высота перигея не менее 500 км;
- наклонение к плоскости Земного экватора 51,4°;
- период обращения 7 суток.

Примерно через 6 месяцев из-за гравитационного воздействия Луны, Солнца и Земли орбита станет почти круговой с радиусом ~150000 км. Космический аппарат (КА) не будет затеняться Землей и входить в области радиационных поясов.

Время баллистического существования на рабочей орбите не менее 10 лет. Срок активного существования КА на рабочей орбите 7 лет с продлением до 10 лет

КА обеспечит следующие режимы наведения:

1) Наблюдение точечных источников с продолжительностью непрерывного сеанса до 100 суток. При этом точность наведения КА на

источник не хуже 30", точность удержания не хуже 30". Ориентация осей КА определяется по измерительной информации астродатчиков АД-1 платформы «Навигатор» с погрешностью 20". Информация с астродатчиков КА также как и со звездных датчиков поступает в систему сбора научной информации.

2) Сканирование небесной сферы - непрерывное равномерное вращение КА с угловой скоростью, задаваемой в диапазоне от 10 до 30 град/ч при допустимом отклонении угловой скорости от заданной  $\pm 10\%$ .

Научная информация с гамма-телескопа ГАММА-400 накапливается в запоминающем устройстве ГАММА-400 объемом 500 Гбайт, также имеется 500 Гбайт резервной памяти. Передача информации на наземные приемные пункты объемом до 100 Гбайт/сутки осуществляется не реже 1 раза в сутки со скоростью 128 Мбит/с с возможностью повторной передачи не позднее двух суток. Передача научной информации на наземные приемные пункты осуществляется через высокоинформативный радиоканал (ВИРК).

#### **4.5 Научные задачи гамма-телескопа ГАММА-400**

С учетом наилучших, по сравнению с другими экспериментами, физико-технических характеристик гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для реализации следующих научных задач:

а) при непрерывном наблюдении отдельных дискретных астрофизических объектов, включая наблюдение активного Солнца:

- детальное изучение пространственной структуры дискретных источников, в первую очередь протяженных;
- детальное изучение энергетических спектров гамма-излучения;
- поиск особенностей в энергетических спектрах высокоэнергичного гамма-излучения, которые могут быть связаны с частицами темной материи;
- наблюдение изменений светимости;

- изучение источников высокоэнергичного излучения гамма-всплесков;
- регистрация потоков электронов, позитронов и ядер от ближайших к Солнечной системе остатков сверхновых;
- измерение потоков ядер космических лучей;
- проведение одновременных наблюдений дискретных гамма-источников совместно с космическими телескопами других диапазонов электромагнитного излучения, а также с наземными установками.

б) при обзоре небесной сферы:

- поиск новых переменных гамма-источников;
- измерение потоков диффузного и изотропного гамма-излучения;
- измерение потоков галактических электронов, позитронов, изотопов легких ядер и ядер до группы железа.

#### **4.6 Расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400**

Модельные расчеты физических характеристик гамма-телескопа ГАММА-400 были проведены с использованием пакета программ “GEANT4”.

##### **4.6.1 Расчет светосилы**

На Рис. 4.22 представлена упрощенная схема для расчета светосилы гамма-телескопа ГАММА-400. На поверхности площадки, расположенной на плоскости верхнего детектора антисовпадений, моделировался изотропный поток гамма-квантов различной энергии. Размер данной площадки ( $4600 \times 4600$  мм) полностью перекрывает апертуру гамма-телескопа. Все гамма-кванты, которые конвертировали в конвертере-трекере, вызывают сигналы в сцинтилляционных детекторах С1 и С2. Причём сигнал в сцинтилляционном детекторе С1 появляется раньше, чем в С2 ( $t_{C1} < t_{C2}$ ). Если при этом

отсутствуют энерговыделения в верхнем и боковых детекторах антисовпадений, то такие гамма-кванты считаются зарегистрированными.

Частицы «обратного тока» (заряженные частицы и гамма-кванты, рожденные электромагнитным ливнем в калориметре и движущиеся от калориметра вверх), возникающие в результате взаимодействия гамма-квантов высокой энергии с веществом гамма-телескопа ГАММА-400 (Рис. 4.23), могут вызвать срабатывание детекторов антисовпадений. В этом случае значительная часть полезных событий может быть исключена. Расчет показывает, что в детекторы антисовпадений попадают частицы «обратного тока» низких энергий. Если подобрать соответствующий порог для энерговыделений в детекторах антисовпадений, то влияние «обратного тока» для полезных событий можно минимизировать.

Величина порога для энерговыделения в верхнем двухслойном детекторе антисовпадений толщиной 20 мм выбиралась равной  $0.75 \times MIP_{\text{ВЕРХ}}$ , что соответствует 3 МэВ

$$(1 MIP_{\text{ВЕРХ}} = 2 \frac{\text{МэВ}}{\text{г/см}^2} \times 1.06 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \times 2 \text{ см} \approx 4 \text{ МэВ}).$$

Величина порога для энерговыделения в боковых двухслойных детекторах антисовпадений толщиной 20 мм выбиралась равной  $0.75 \times MIP_{\text{БОК}}$ , что соответствует 3 МэВ

$$(1 MIP_{\text{БОК}} = 2 \frac{\text{МэВ}}{\text{г/см}^2} \times 1.06 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \times 2 \text{ см} \approx 4 \text{ МэВ}).$$

Светосила для данной энергии  $E$  рассчитывалась из следующего соотношения

$$G(E) = \frac{N_{\text{ЗАР}}}{N_0} \times \pi S,$$

где  $N_{\text{ЗАР}}$  - число зарегистрированных гамма-квантов,  $N_0$  - число гамма-квантов изотропного потока с энергией  $E$  на поверхности плоскости моделирования,  $S$  - площадь этой поверхности. На Рис. 4.24 показана зависимость рассчитанной, таким образом, светосилы от энергии гамма-квантов. Величина светосилы ГАММА-400 в диапазоне энергий более

0,2 ГэВ, достигает значения  $\sim 4200 \text{ см}^2 \text{ ср}$ . Величина геометрического фактора (величина светосилы гамма-телескопа ГАММА-400 без учета вероятности конверсии гамма-квантов и без учета срабатывания детекторов антисовпадений), равная  $13600 \text{ см}^2 \text{ ср}$ , показана на Рис. 4.24 зеленой линией.

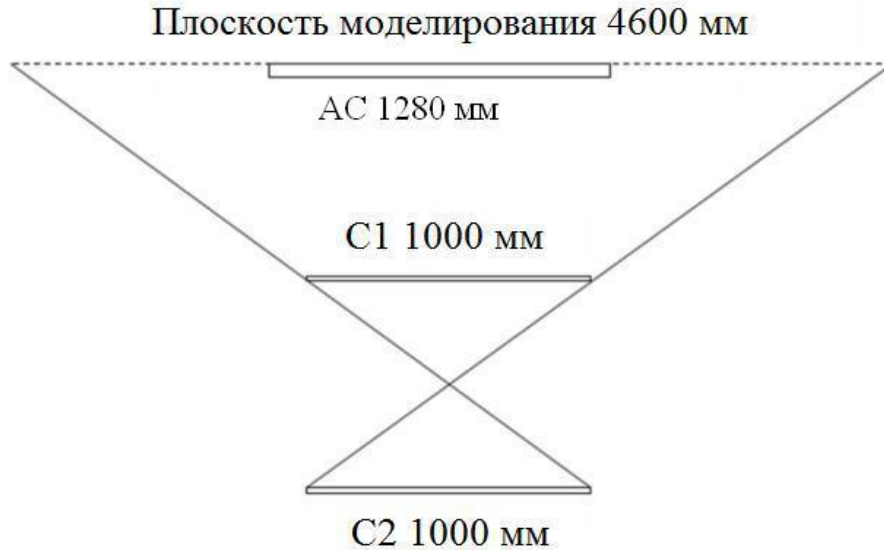


Рис. 4.22 Упрощенная схема для расчета светосилы гамма-телескопа ГАММА-400.

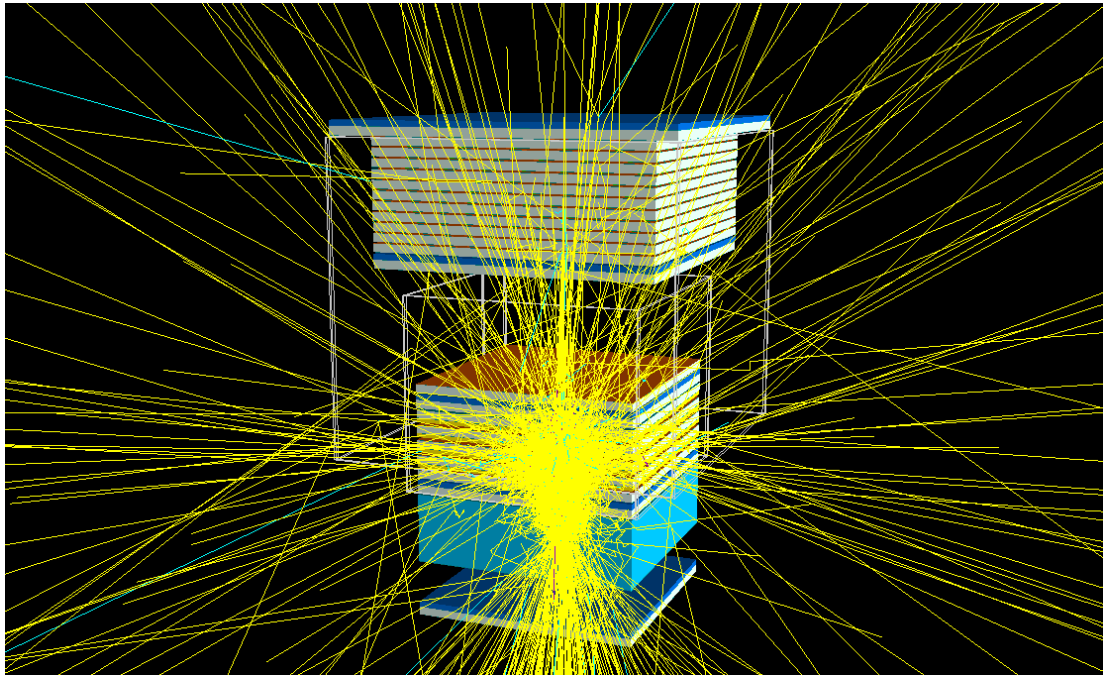


Рис. 4.23 Взаимодействие гамма-кванта ( $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$ ) с веществом гамма-телескопа ГАММА-400 с образованием частиц «обратного тока».

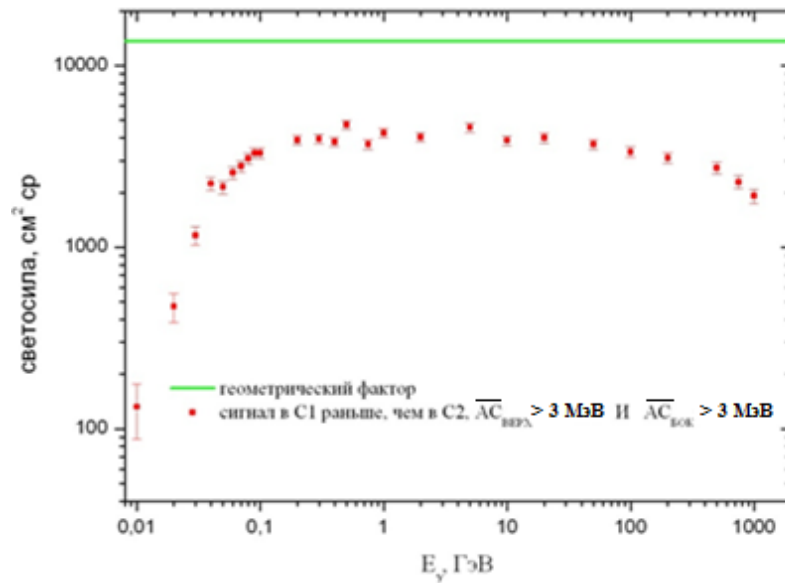


Рис. 4.24 Зависимость светосилы гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии гамма-квантов. Величина геометрического фактора гамма-телескопа ГАММА-400 показана зелёной линией.

#### 4.6.2 Расчет эффективной площади

Для расчета эффективной площади гамма-телескопа ГАММА-400 на поверхности площадки, расположенной на плоскости верхнего детектора антисовпадений (Рис. 4.22), моделировался плоский поток гамма-квантов в диапазоне энергий от 100 МэВ до 3 ТэВ.

Все события, в которых гамма-кванты конвертировались в конвертере-трекере, считались зарегистрированными при наличии энерговыделений в сцинтилляционных детекторах С1, С2 и отсутствии энерговыделений в верхнем и боковых детекторах антисовпадений. Величина порога для энерговыделения в детекторах антисовпадений выбиралась равной  $0.75 \times \text{MIP}$ . На Рис. 4.25 показаны зависимости эффективной площади ГАММА-400 от энергии гамма-квантов для вертикального плоского потока при разных значениях величины порога в МIP. Для величины порога  $0.75 \times \text{MIP}$  величина эффективной площади составила  $4400 \text{ см}^2$  ( $E_\gamma = 1 \text{ ГэВ}$ ). Для величины порога  $1,0 \times \text{MIP}$  величина эффективной площади составила  $4600 \text{ см}^2$  ( $E_\gamma = 1 \text{ ГэВ}$ ), но

при этом эффективность режекции заряженных частиц в системе АС значительно уменьшится.

Эффективная площадь для данного зенитного угла  $\theta$  плоского потока рассчитывалась из следующего соотношения:

$$S_{\text{эфф}}(\theta) = \frac{N_{\text{ЗАР}}}{N_0} \times S \times \cos\theta,$$

где  $N_{\text{ЗАР}}$  - число зарегистрированных гамма-квантов,  $N_0$  - число гамма-квантов на поверхности плоскости моделирования,  $S$  - площадь этой поверхности.

На Рис. 4.26 показана зависимость эффективной площади гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии  $E_\gamma$  регистрируемых гамма-квантов для вертикального плоского потока. Также представлена аналогичная зависимость эффективной площади гамма-телескопа Fermi-LAT для передней части трекера с тонкими слоями вольфрама, где прибор имеет наилучшее угловое разрешение. На Рис. 4.27 представлена зависимость эффективной площади ГАММА-400 от угла влета гамма-квантов в гамма-телескоп с энергией 100 ГэВ. Величина эффективной площади для углов влета  $0-10^\circ$  в среднем составила  $\sim 3650 \text{ см}^2$ . Также на Рис. 4.27 приведена зависимость для величины геометрической площади гамма-телескопа ГАММА-400 (зелёная линия). Для угла влета  $0^\circ$  величина геометрической площади равна  $10000 \text{ см}^2$ .

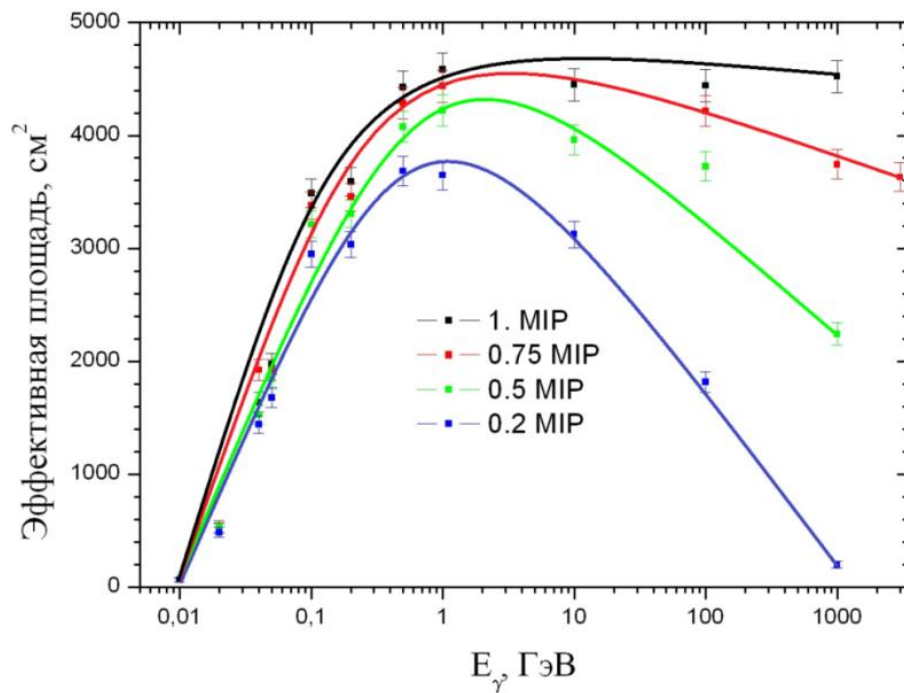


Рис. 4.25 Зависимости эффективной площади ГАММА-400 для плоского вертикального потока гамма-квантов от величины порога в МІР.

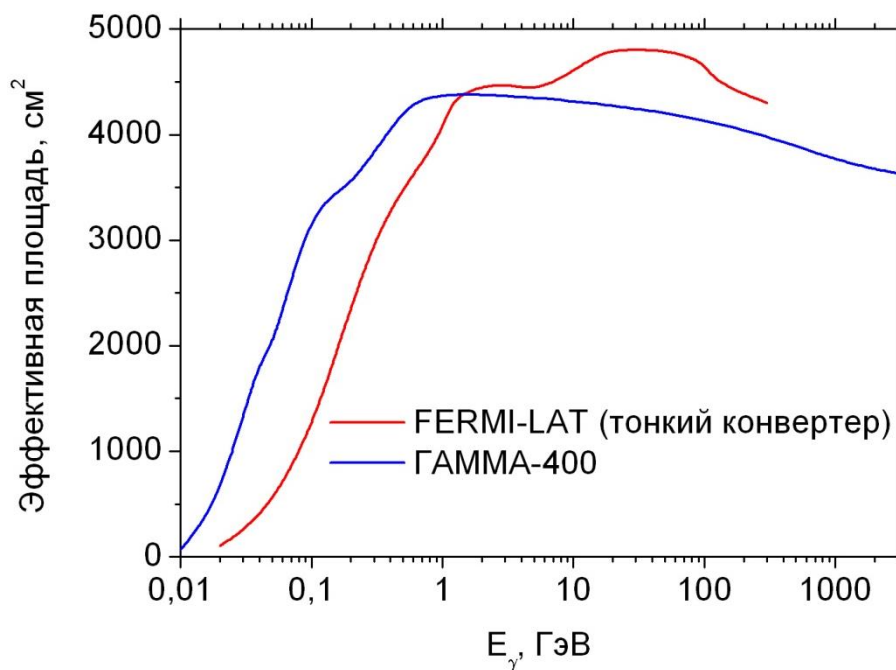


Рис. 4.26 Зависимость эффективной площади гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии для вертикальных гамма-квантов (синяя линия). Также приведена аналогичная зависимость эффективной площади для Fermi-LAT (красная линия)

([http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm)).



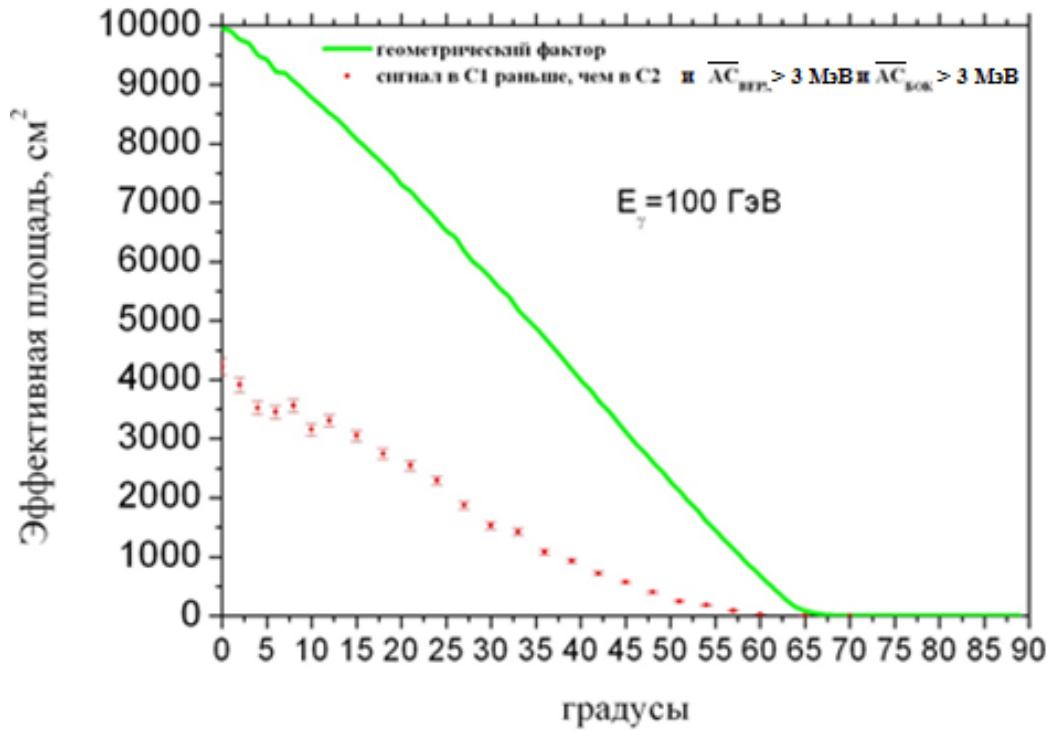


Рис. 4.27 Зависимость эффективной площади гамма-телескопа ГАММА-400 от угла влета гамма-квантов с энергией 100 ГэВ (красные точки). Зависимость величины геометрической площади гамма-телескопа ГАММА-400 показана зелёной линией.

### 4.6.3 Расчет энергетического разрешения

Для расчета энергетического разрешения применялся следующий численный метод. Над верхней частью прибора моделировался вертикальный плоский поток гамма-квантов с энергиями от 100 МэВ до 3 ТэВ. Около 50% гамма-квантов в результате взаимодействия с вольфрамом в конвертере-трекере толщиной  $\sim 1$  р.е.д. образуют электрон-позитронную пару. Эти частицы, в свою очередь, пролетая через координатно-чувствительный калориметр (КК1 и КК2), генерируют электромагнитный каскад. Пример взаимодействия гамма-квантов с начальными энергиями 100 и 1000 ГэВ в веществе гамма-телескопа показан на Рис. 4.28 и 4.29 (фиолетовым цветом показаны треки позитронов, голубым – электронов, треки вторичных гамма-квантов не показаны). Рождение электрон-позитронной пары первичным высокоэнергичным гамма-квантом идентифицируется по наличию энерговыделений в стриповых плоскостях конвертера-трекера, а также из анализа временной последовательности сигналов в сцинтилляционных детекторах времяпролетной системы С1 и С2 ( $t_{C1} < t_{C2}$ ).

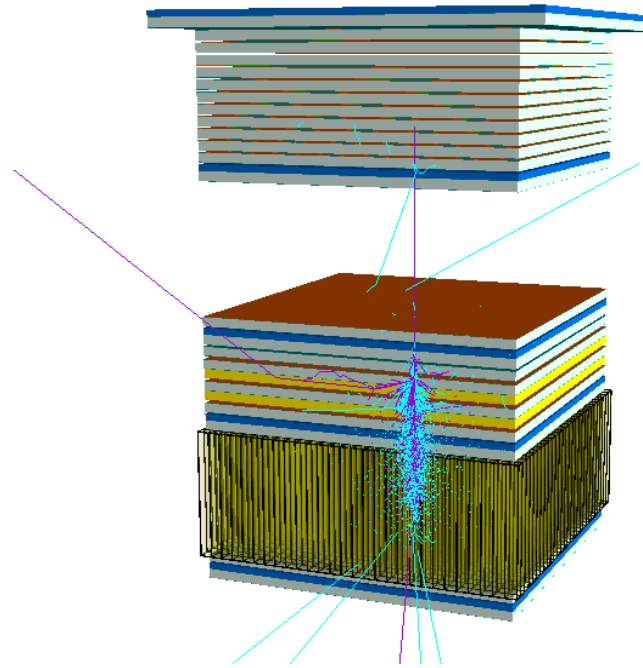


Рис. 4.28 Развитие электромагнитного каскада в гамма-телескопе ГАММА-400 при начальной энергии гамма-кванта 100 ГэВ (фиолетовым цветом показаны треки позитронов, голубым – электронов, треки вторичных гамма-квантов не показаны).

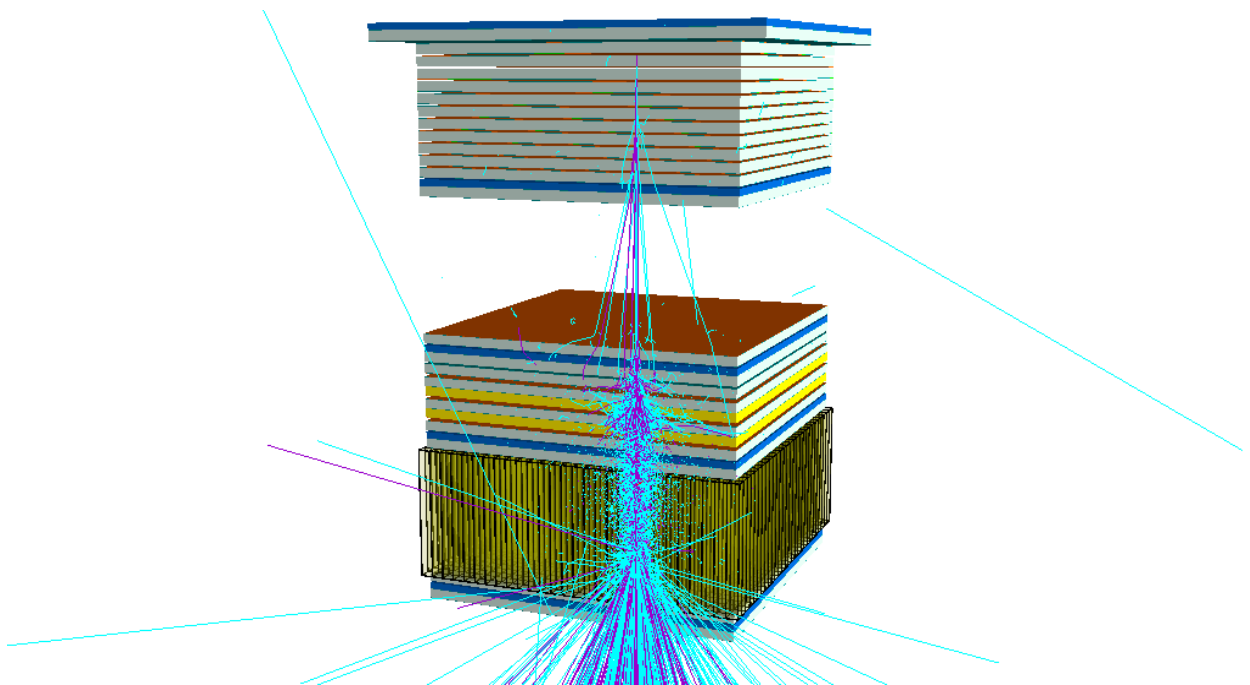


Рис. 4.29 Развитие электромагнитного каскада в гамма-телескопе ГАММА-400 при начальной энергии гамма-кванта 1000 ГэВ (фиолетовым цветом показаны треки позитронов, голубым – электронов, треки вторичных гамма-квантов не показаны).

Энергетическое разрешение прибора для высокоэнергичных гамма-квантов фиксированной энергии, которые конвертировали конвертировали в веществе конвертера-трекера, определялось из анализа распределения суммарных энерговыделений в активных слоях гамма-телескопа: в стрипах кремниевых плоскостей конвертера-трекера К и позиционно-чувствительного калориметра КК1, в сцинтилляторах позиционно-чувствительного калориметра КК1 и в кристаллах CsI(Tl) электромагнитного калориметра КК2. Это распределение хорошо аппроксимируется стандартным распределением Гаусса. На Рис. 4.30 показано распределение суммарных энерговыделений ( $E_{\text{АКТ}}$ ) в активных слоях гамма-телескопа при начальной энергии гамма-квантов 100 ГэВ. Энергетическое разрешение определяется как отношение стандартного отклонения для аппроксимирующего распределения Гаусса к среднему значению.

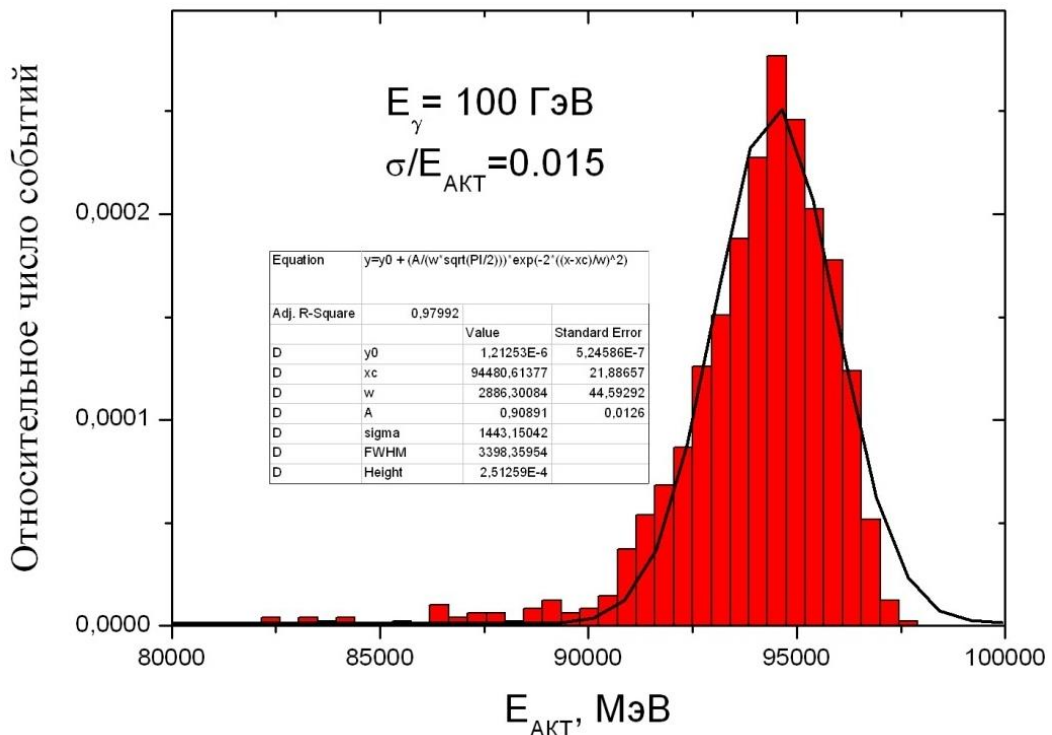


Рис. 4.30 Распределение суммарного энерговыделения в детекторах гамма-телескопа ГАММА-400 при начальной энергии гамма-квантов 100 ГэВ.

На Рис. 4.31 представлены результаты расчетов зависимости энергетического разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от начальной энергии гамма-квантов. Также приведены данные по энергетическому разрешению для гамма-телескопа Fermi-LAT.

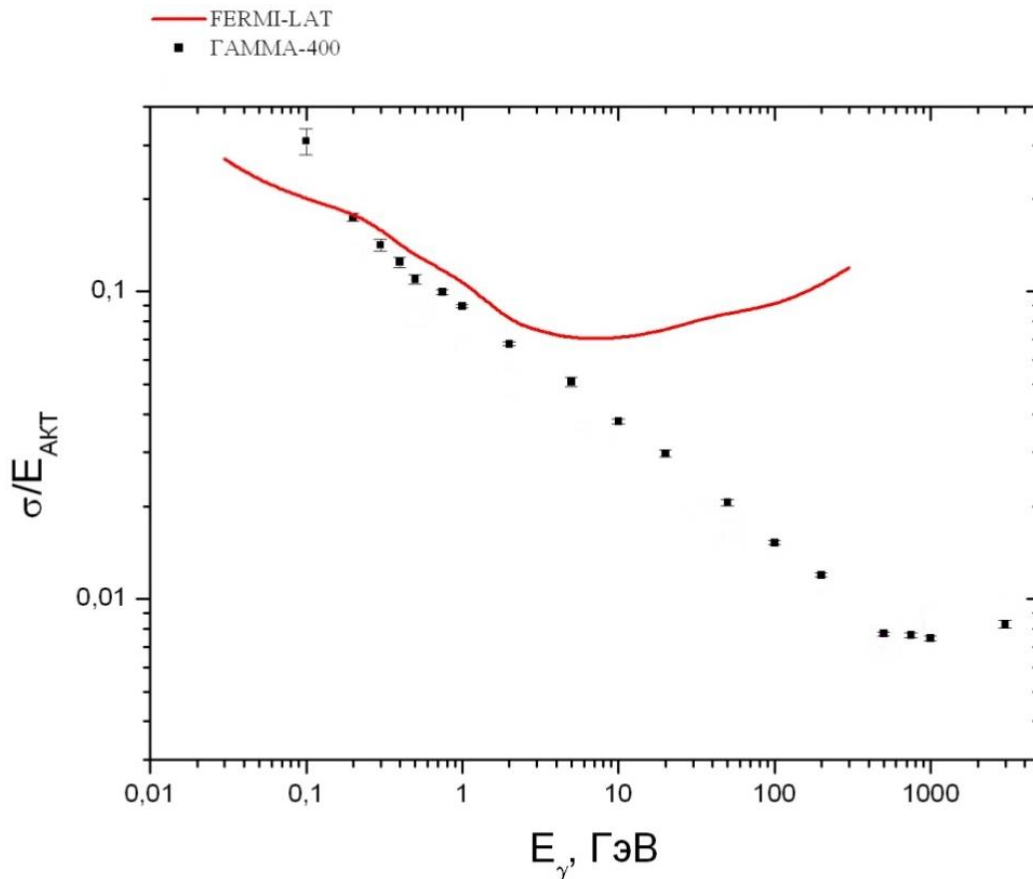


Рис. 4.31 Зависимость энергетического разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от начальной энергии  $E_{\gamma}$  регистрируемых гамма-квантов. Также представлены данные для гамма-телескопа Fermi-LAT ([http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm)).

Из Рис. 4.31 видно, что энергетическое разрешение гамма-телескопа ГАММА-400 лучше, чем у Fermi-LAT в диапазоне энергий, начиная с 400 МэВ. Величина энергетического разрешения ГАММА-400 для энергии 100 ГэВ составила 1,5%, а в диапазоне энергий 100–3000 ГэВ - в среднем около 1,0%.

#### 4.6.4 Расчет углового разрешения

Угловое разрешение гамма-телескопа отражает точность определения направления прилета регистрируемых гамма-квантов. Методика восстановления направления прилета высокоэнергичных гамма-квантов в гамма-телескопе ГАММА-400 заключается в следующем.

Для восстановления угла влета гамма-кванта в гамма-телескоп используются энерговыделения в 12 двойных стриповых кремниевых плоскостях (10 двойных плоскостей в конвертере-трекере, 2 двойных плоскости в позиционно-чувствительном калориметре). Стрипы моделируются как равные объемы, расположенные вплотную друг к другу. Срабатывание стрипов происходит, когда при прохождении частицы в их объеме выделяется энергия  $\mathcal{E}_{\text{выд}} \geq 15$  кэВ. Если в данном стрипе выделилась энергия, то запоминается номер стрипа и величина энерговыделения в стрипе.

Множественное рождение вторичных частиц затрудняет восстановление направления первичной частицы. Большое осложнение оказывает «обратный ток».

Направление оси каскада позволяет оценить, какие из сработавших стрипов относятся к следу первичной электрон-позитронной пары. Критерием того, что конверсия гамма-кванта произошла именно в конвертере-трекере, является факт срабатывания детектора С1 раньше детектора С2 ( $t_{C1} < t_{C2}$ ). Это позволяет исключить события, в которых срабатывание С1 происходит за счет «обратного тока». Также для дальнейшего анализа отбираются события, в которых сработал хотя бы один стрип в каждом слое из последних двух двойных кремниевых плоскостей конвертера-трекера. Это позволяет более надежно отобрать события с конверсией в трекаре. Описанный отбор проходит около 48% событий, что согласуется с тем, что суммарная толщина слоев вольфрама в конвертере-трекере составляет одну радиационную единицу.

На Рис. 4.32 приведены результаты расчетов для зависимости углового разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии первичных гамма-квантов при различных углах падения. Также показаны данные по угловому разрешению для передней части конвертера-трекера гамма-телескопа Fermi-LAT с тонкими слоями вольфрама в конвертере, где прибор имеет наилучшее угловое разрешение. Из Рис. 4.32 видно, что угловое разрешение ГАММА-400 для энергии гамма-квантов 100 ГэВ составляет примерно 0,01-0,02 градуса. Проведенные расчеты не обнаруживают сильной зависимости углового разрешения ГАММА-400 от угла падения первичной частицы в пределах  $30^\circ$ . Значительно лучшее угловое разрешение гамма-телескопа ГАММА-400, по сравнению с угловым разрешением гамма-телескопом Fermi-LAT, для энергий более 10 ГэВ связано с возможностью аналогового съёма информации со стрипов, которая использовалась при восстановлении первичного направления гамма-кванта, а также с меньшим размером шага стрипов и с наличием пролётной базы  $\sim 50$  см между стриповыми плоскостями конвертера-трекера и КК1.

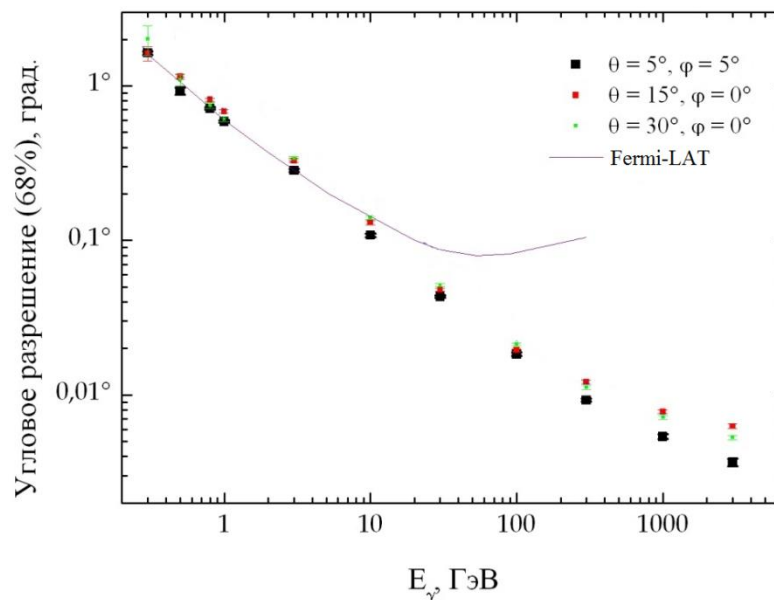


Рис. 4.32 Расчёты зависимости углового разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии первичных гамма-квантов при различных углах падения. Также показаны данные по угловому разрешению для передней части трекера гамма-телескопа Fermi-LAT с тонкими слоями вольфрама в конвертере

([http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat\\_Performance.htm](http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm))

#### 4.6.5 Расчет величины минимального потока гамма-квантов, который может быть зарегистрирован гамма-телескопом от точечного источника в плоскости Галактики

Статистическая значимость для выделения точечного источника гамма-квантов в присутствии постоянного фона определяется следующим образом:

$$\sigma = \frac{N_{SOURCE}}{\sqrt{N_{SOURCE} + N_{BG}}} \quad (1),$$

где  $N_{SOURCE}$  - число гамма-квантов от точечного источника, зарегистрированных прибором за время  $T$  в интервале энергий  $(E_1, E_2)$ ;

$N_{BG}$  - число гамма-квантов от постоянного фона, зарегистрированных прибором за время  $T$  в интервале энергий  $(E_1, E_2)$ .

Спектр источника предполагается степенным с показателем спектра, равным -2:

$$J_{SOURCE}(E) \frac{1}{\text{cm}^2 \times \text{sec} \times \text{MeV}} \sim E^{-2}.$$

Тогда, число гамма квантов от точечного источника, зарегистрированных прибором за время  $T$  в интервале энергий  $(E_1, E_2)$ , будет:

$$N_{SOURCE} = 0.68 \times \int_T \int_{E_1}^{E_2} A_{eff}(E) \times C_{MIN}(E_1, E_2) \times E^{-2} dE dt$$

$$\approx 0.68 \times T \times A_{eff} \times C_{MIN}(E_1, E_2) \times \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)$$

$$= a \times C_{MIN} \quad (2),$$

где  $A_{eff}(E)$  - эффективная площадь прибора (для ГАММА-400 при энергиях более 1 ГэВ может приближенно считаться постоянной и равной  $4000 \text{ cm}^2$ );

$C_{MIN}(E_1, E_2), \frac{1}{\text{cm}^2 \times \text{sec} \times \text{MeV}}$  - нормировочный множитель потока гамма-квантов от источника в интервале энергий  $(E_1, E_2)$ ;

Коэффициент 0,68 вводится из-за того, что угловое разрешение прибора имеет конечную величину, поэтому в пределах одного  $\sigma$  углового разрешения будет лежать только 68% гамма квантов от точечного источника;

$$a = 0.68 \times T \times A_{eff} \times \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right).$$



Для оценки диффузного фонового потока гамма-квантов в плоскости Галактики, где изотропная компонента фона на порядок меньше, использовались модельные данные из [79] (Рис. 4.33). Эти данные были получены с использованием нормировки на данные измерений Fermi-LAT.

Число гамма квантов от постоянного диффузного фона находится из следующего соотношения:

$$N_{BG} = \int_T \int_{E_1}^{E_2} J_{BG}(E) \times A_{eff}(E) \times \left( \int_{\Omega_{PSF}(E)} \sin\theta \cos\theta d\theta d\varphi \right) dE dt \approx$$

$$\pi T A_{eff} \times \int_{E_1}^{E_2} J_{BG}(E) \times (1 - \cos^2\theta_{PSF}(E)) dE = b \quad (3),$$

где  $J_{BG}(E)$  находится из Рис. 4.33;

$\Omega_{PSF}(E)$  - телесный угол, соответствующий размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ .

С учетом (2) и (3) соотношение (1) примет вид:

$$\sigma = \frac{a \times C_{MIN}(E_1, E_2)}{\sqrt{a \times C_{MIN} + b}} \quad (4).$$

Отсюда можно найти величину нормировочного множителя, соответствующего минимальному потоку гамма-квантов от источника в интервале энергий  $(E_1, E_2)$ :

$$C_{MIN}(E_1, E_2) = \frac{\sigma \times (\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4b})}{2a} \quad (5).$$

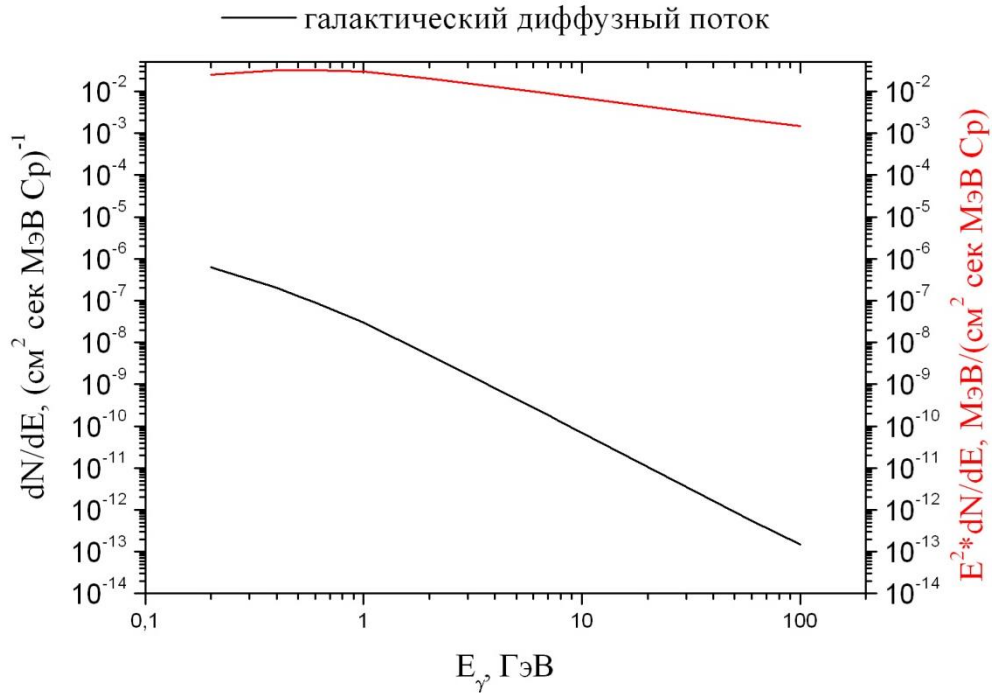


Рис. 4.33 Диффузный поток в плоскости Галактики. Красная линия соответствует величине потока, умноженной на квадрат энергии гамма-квантов [79].

Среднее значение минимального потока в интервале энергий  $(E_1, E_2)$  будет:

$$\langle J_{MIN}(E_1, E_2) \rangle = \frac{1}{E_2 - E_1} \times \int_{E_1}^{E_2} C_{MIN}(E_1, E_2) \times E^{-2} dE = \frac{1}{E_2 - E_1} \times C_{MIN}(E_1, E_2) \times \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \quad (6).$$

При дальнейших вычислениях величина энергетических интервалов выбиралась равной  $\frac{1}{4}$  логарифмической декады. Используя (5) и (6) было найдено число событий, необходимых для идентификации точечного источника со значимостью  $5\sigma$  из (1) за год измерений ГАММА-400 (Рис. 4.34). Также было получено число фоновых гамма-квантов (диффузный поток) в телесном угле, соответствующем размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ , за год измерений ГАММА-400 (Рис. 4.35).

Зависимость отношения числа фоновых гамма-квантов в телесном угле, соответствующем размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ , к числу гамма-квантов, необходимых для идентификации

точечного источника со значимостью  $5\sigma$  за год измерений ГАММА-400, от энергии представлена на Рис. 4.36.

Из Рис. 4.35 и Рис. 4.36 видно, что при энергиях регистрируемых гамма-квантов более 10 ГэВ фон диффузный надёжно выделяется в пределах телесного угла, соответствующего размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ .

Дифференциальный минимальный поток ( $5\sigma$ ) от точечного источника в плоскости Галактики, который может быть измерен при помощи гамма-телескопа ГАММА-400 за три года, получен из (6) и показан на Рис. 4.37. Оценку минимального интегрального потока ( $5\sigma$ ) от точечного источника для ГАММА-400 в диапазоне энергий 10–100 ГэВ за три года измерений можно получить, умножив (6) на величину энергетического интервала ( $E_2 - E_1$ ):

$$J = 2.47 \times 10^{-10} \frac{1}{\text{cm}^2 \times \text{Sr} \times \text{sec}}.$$

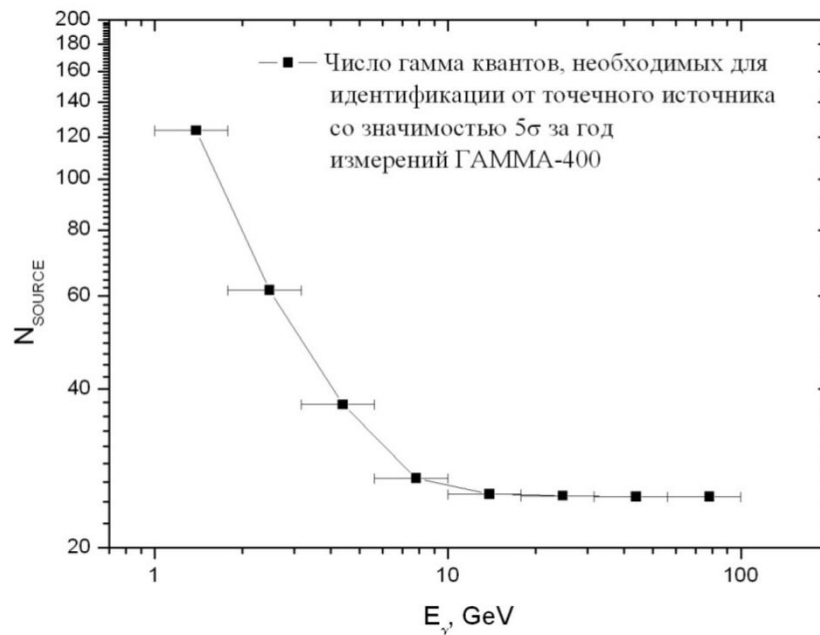


Рис. 4.34 Число гамма-квантов, необходимых для идентификации точечного источника со значимостью  $5\sigma$  из (1) за год измерений ГАММА-400.

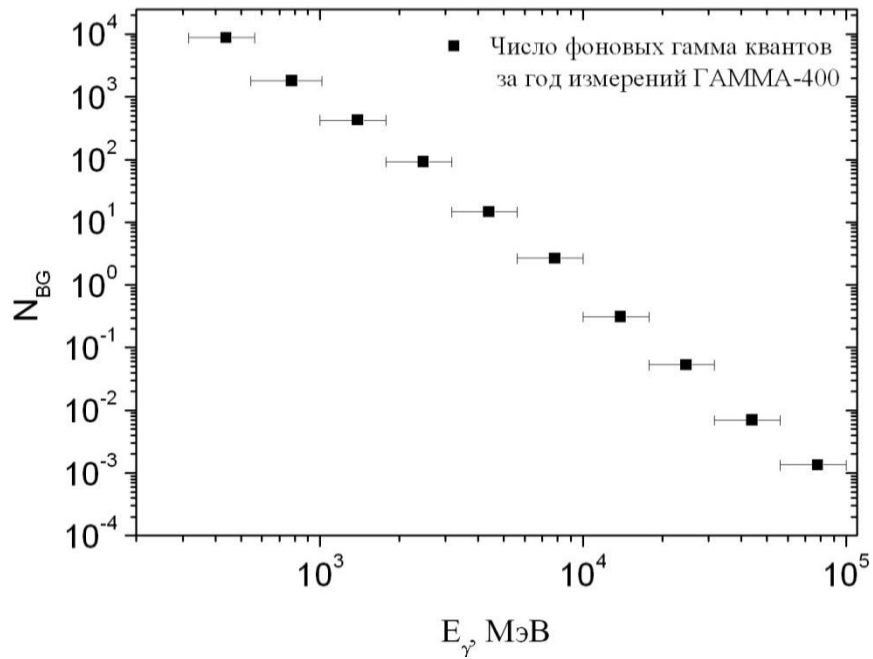


Рис. 4.35 Число фоновых гамма-квантов (диффузный поток) в телесном угле, соответствующем размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ , за год измерений ГАММА-400.

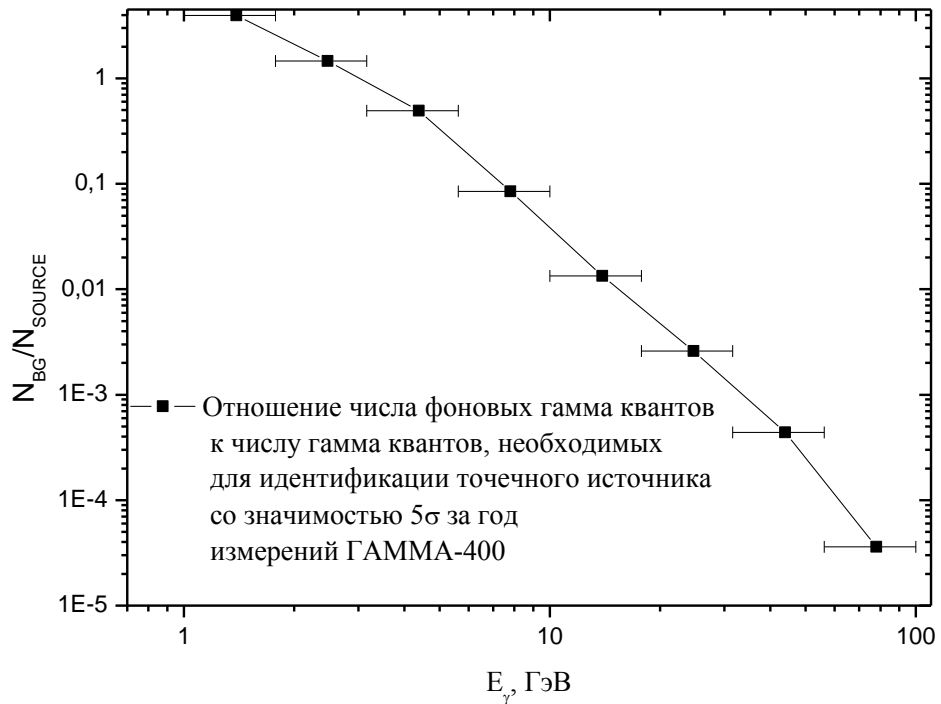


Рис. 4.36 Зависимость отношения числа фоновых гамма-квантов в телесном угле, соответствующем размытию углового разрешения прибора в пределах одного  $\sigma$ , к числу гамма-квантов, необходимых для идентификации точечного источника со значимостью  $5\sigma$  за год измерений ГАММА-400, от энергии.

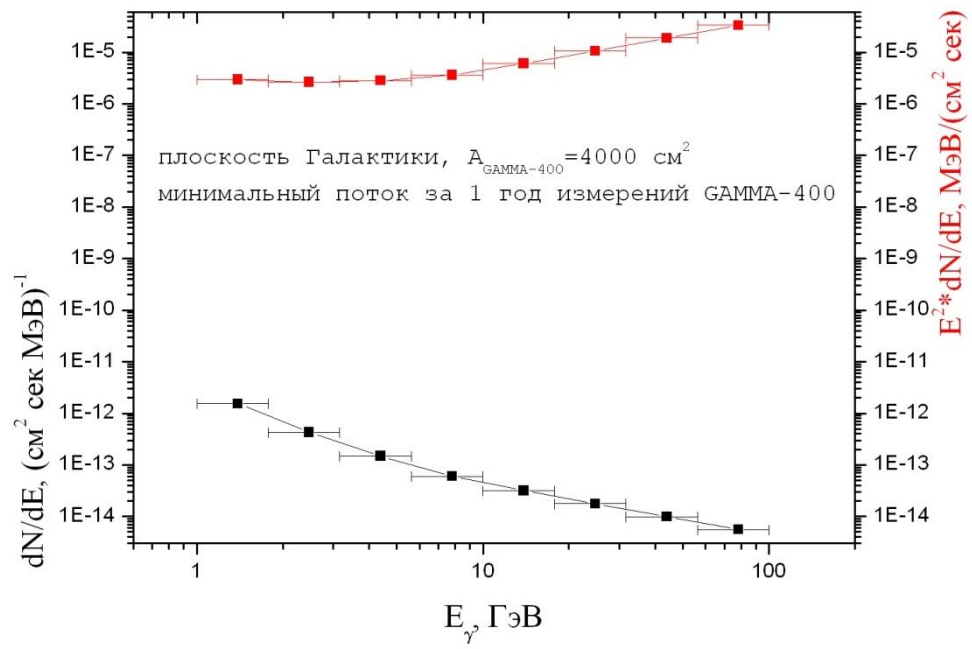


Рис. 4.37 Дифференциальный минимальный поток ( $5\sigma$ ) от точечного источника в плоскости Галактики за год измерений ГАММА-400, полученный из (6).

#### 4.7 Оценка числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать ГАММА-400 от дискретных источников

Для оценки числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать гамма-телескоп ГАММА-400, использовалась база данных дискретных источников из каталога 3FGL Fermi-LAT за четыре года работы ([https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr\\_catalog/](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr_catalog/)). В ней представлены потоки гамма-квантов от 3034 дискретных источников для следующих диапазонов энергий: 100 – 300 МэВ, 300 МэВ – 1 ГэВ, 1 – 3 ГэВ, 3 – 10 ГэВ, 10 – 100 ГэВ. Используя эти данные, были проведены оценки числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать ГАММА-400 с эффективной площадью 4000 см<sup>2</sup> за 100 дней и 1 год наблюдений гамма-источников. В Табл. 4.7 представлены оценки числа гамма-квантов для диапазонов энергий 100 МэВ – 100 ГэВ, 1 – 100 ГэВ, 10 – 100 ГэВ за 100 дней и 1 год наблюдений от всех источников 3FGL.

Таблица 4.7

Энергетический диапазон	Число гамма-квантов	
	100 дней	1 год
100 МэВ – 100 ГэВ	3 685 809	13 453 202
1 – 100 ГэВ	288 628	1 053 493
10 – 100 ГэВ	7 758	28 318

За 100 дней наблюдений в диапазоне энергий 10 – 100 ГэВ ГАММА-400 регистрирует гамма-излучение от 130 источников в количестве не менее 10 гамма-квантов и от 34 источников в количестве не менее 30 гамма-квантов. В Табл. 4.8 представлено число гамма-квантов от этих 34 дискретных источников из каталога 3FGL для диапазонов энергий 100 МэВ – 100 ГэВ, 1 – 100 ГэВ, 10 – 100 ГэВ за 100 дней и 1 год наблюдений.

Таблица 4.8

Источник (3FGL)	Источник (TeVCat)	l	b	Спектр. индекс	Число гамма-квантов					
					100 МэВ – 100 ГэВ		1 – 100 ГэВ		10 – 100 ГэВ	
					100 дней	1 год	100 дней	1 год	100 дней	1 год
3FGL J1615.3-5146e	HESS J1614-518	331,659	-0,6591	1,86	703	2567	420	1535	33	121
3FGL J1616.2-5054e	HESS J1616-508	332,3651	-0,1309	2,14	9119	33283	478	1746	32	117
3FGL J1633.0-4746e	HESS J1632-478	336,517	0,1211	2,11	5475	19984	831	3033	38	137
3FGL J0852.7-4631e	RX J0852.0-4622	266,4909	-1,2332	1,94	4798	17514	375	1368	46	167
3FGL J0835.3-4510	Vela Pulsar	263,5542	-2,7874	1,00	341823	1247655	44850	163703	393	1436
3FGL J1709.7-4429	HESS J1708-443	343,098	-2,689	1,03	48537	177159	6525	23817	87	317
3FGL J0538.8-4405		250,0828	-31,0902	1,93	11557	42181	1152	4204	61	221
3FGL J0449.4-4350	PKS 0447-439	248,8062	-39,9124	1,85	2587	9444	370	1352	40	145
3FGL J1713.5-3945e	RX J1713.7-3946	347,3355	-0,4727	1,62	721	2633	143	523	32	118
3FGL J0428.6-3756		240,7037	-43,618	1,95	6584	24032	696	2540	36	132
3FGL J2158.8-3013	PKS 2155-304	17,729	-52,2489	1,75	4230	15441	745	2719	83	302
3FGL J1745.6-2859c	Galactic Center	359,9552	-0,0391	2,32	22674	82758	751	2740	35	126
3FGL J1801.3-2326e	W 28	6,5266	-0,251	2,34	17774	64874	1811	6610	38	137
3FGL J1805.6-2136e	HESS J1804-216	8,6038	-0,2105	2,19	7009	25584	872	3184	39	142
3FGL J1824.5-1351e	HESS J1825-137	17,5669	-0,4532	1,68	246	899	233	851	84	308
3FGL J1512.8-0906	PKS 1510-089	351,2883	40,135	2,30	32038	116939	1413	5159	30	109
3FGL J1836.5-0655e	HESS J1837-069	25,0811	0,1361	1,97	1272	4641	321	1173	31	114
3FGL J1840.9-0532e	HESS J1841-055	26,7955	-0,1983	1,81	996	3636	445	1625	38	137
3FGL J1555.7+1111	PG 1553+113	21,9179	43,9599	1,60	1968	7183	444	1622	77	283
3FGL J1923.2+1408e	W 51	49,1158	-0,4616	2,12	13955	50936	1339	4888	57	207
3FGL J2254.0+1608		86,1208	-38,1917	1,63	82037	299436	3638	13278	38	138
3FGL J0633.9+1746	Geminga	195,1326	4,2698	0,92	133002	485458	23917	87298	113	413
3FGL J0534.5+2201i	Crab	184,5529	-5,7815	1,64	4336	15827	1005	3667	194	707

3FGL J0534.5+2201	Crab Pulsar	184,5514	-5,776	2,05	80998	295642	5296	19332	78	285
3FGL J0617.2+2234e	IC 443	189,0476	3,0334	2,00	15598	56933	2087	7617	96	349
3FGL J1427.0+2347	PKS 1424+240	29,4898	68,2031	1,76	2821	10296	469	1712	60	218
3FGL J1104.4+3812	Markarian 421	179,8267	65,0344	1,77	6233	22751	1053	3845	147	537
3FGL J0136.5+3905	RGB J0136+391	132,4128	-22,944	1,70	1005	3667	172	628	32	118
3FGL J1653.9+3945	Markarian 501	63,5931	38,8505	1,72	1811	6611	332	1212	53	194
3FGL J2028.6+4110e	MGRO J2031+41	79,6007	1,3963	2,18	30738	112195	2640	9634	225	822
3FGL J0319.8+4130	NGC 1275	150,5798	-13,2563	1,98	8083	29503	732	2671	34	124
3FGL J0222.6+4301	3C 66A	140,15	-16,7671	1,88	4950	18069	656	2394	57	209
3FGL J0721.9+7120	S5 0716+71	143,9793	28,0232	1,95	7802	28478	771	2815	42	152
3FGL J0007.0+7302	CTA 1	119,6617	10,4605	1,21	11875	43343	2242	8182	50	183
<b>СУММА</b>					<b>925357</b>	<b>3377553</b>	<b>109226</b>	<b>398675</b>	<b>2527</b>	<b>9222</b>

Примечание: Источник (3FGL) – название источника по каталогу 3FGL; Источник (TeVCat) - название источника по каталогу TeVCat; l и b – галактические координаты.



Для оценки числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать гамма-телескоп ГАММА-400, также использовалась база данных дискретных источников из каталога 2FHL Fermi-LAT за 80 месяцев работы (<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/2FHL/>). В ней представлены потоки гамма-квантов от 360 дискретных источников для диапазона энергий 50 ГэВ – 2000 ГэВ. Используя эти данные, были проведены оценки числа гамма-квантов, которые может зарегистрировать ГАММА-400 с эффективной площадью 4000 см<sup>2</sup> за 100 дней и 1 год наблюдений гамма-источников. Общее количество гамма-квантов от всех 360 дискретных источников составило 656 гамма-квантов за 100 дней наблюдения и 2393 за 1 год наблюдений (Табл. 4.9).

Таблица 4.9

Энергетический диапазон	Число гамма-квантов	
	100 дней	1 год
50 – 2000 ГэВ	656	22 393

В Табл. 4.10 представлено число гамма-квантов от 27 дискретных источников из каталога 2FHL с количеством гамма-квантов не менее 5 за 100 дней наблюдений для диапазона энергий 50 – 2000 ГэВ за 100 дней и 1 год наблюдений.

Таблица 4.10

Источник (2FHL)	Источник	l	b	Спектр. индекс	Число гамма- квантов 50 – 2000 ГэВ	
					100 дней	1 год
2FHL J1419.3-6047e	PSR J1420-6048	313,4488	0,2646	1,89	6	21
2FHL J1514.0-5915e	MSH 15-52	320,2687	-1,2756	2,02	5	19
2FHL J1615.3-5146e	HESSJ1614-518	331,659	-0,6591	2,15	8	30
2FHL J1616.2-5054e	HESS J1616-508	332,3651	-0,1309	1,74	6	23
2FHL J1633.5-4746e	HESSJ1632-478	336,517	0,1211	2,04	9	33
2FHL J0852.8-4631e	Vela Jr	266,4908	-1,2332	1,92	17	63
2FHL J0449.4-4349	PKS 0447-439	248,7924	-39,9111	2,77	6	21
2FHL J1713.5-3945e	RX J1713.7-3946	347,3355	-0,4727	2,03	6	21
2FHL J2158.8-3013	PKS 2155-304	17,7331	-52,2466	2,38	13	46
2FHL J1805.6-2136e	W30	8,606	-0,2111	1,98	9	34
2FHL J1824.5-1350e	HESS J1825-137	17,5689	-0,4524	1,89	25	90
2FHL J1834.5-0846e	W 41	23,2018	-0,28	2,27	5	20
2FHL J1836.5-0655e	HESS J1837-069	25,0811	0,1361	2,03	7	24
2FHL J1840.9-0532e	HESS J1841-055	26,7955	-0,1983	2,00	14	51
2FHL J1555.7+1111	PG 1553+113	21,9028	43,959	2,81	15	53
2FHL J0521.7+2112	TXS 0518+211	183,607	-8,7136	2,92	7	26
2FHL J0534.5+2201	Crab	184,552	-5,7798	2,13	45	165
2FHL J0617.2+2234e	IC 443	189,0477	3,0335	2,66	9	34
2FHL J1427.0+2348	PKS 1424+240	29,4981	68,2026	2,84	8	29
2FHL J1104.4+3812	Mkn 421	179,8315	65,0366	2,14	43	156
2FHL J1653.9+3945	Mkn 501	63,5929	38,8521	2,13	17	60
2FHL J2021.0+4031e	Gamma Cygni	78,2408	2,1967	1,99	8	28
2FHL J2028.6+4110e	Cygnus Cocoon	79,6007	1,3963	2,39	15	53
2FHL J0222.6+4301	3C 66A	140,1454	-16,7687	2,95	7	26
2FHL J1015.0+4926	1H 1013+498	165,5284	52,7114	2,50	6	20
2FHL J2000.1+6508	1ES 1959+650	98,005	17,6556	1,90	5	20
2FHL J0507.9+6737	1ES 0502+675	143,7918	15,8941	2,15	6	21
<b>СУММА</b>					<b>325</b>	<b>1186</b>

Примечание: Источник (2FHL) – название источника по каталогу 2FHL; Источник - ассоциированное наименование; l и b – галактические координаты.

Следует отметить, что гамма-телескоп ГАММА-400 имеет апертуру  $\pm 45^\circ$  и может одновременно и непрерывно до 100 дней наблюдать десятки дискретных источников. На Рис. 4.38 представлены некоторые из областей, которые может наблюдать гамма-телескоп ГАММА-400: область созвездия Лебедя (Cygnus), область центра Галактики (Galactic Center), область пузырей Fermi (Fermi Bubbles), область созвездия Паруса (Vela), области Крабовидной туманности (Crab) и пульсара Геминги (Geminga).

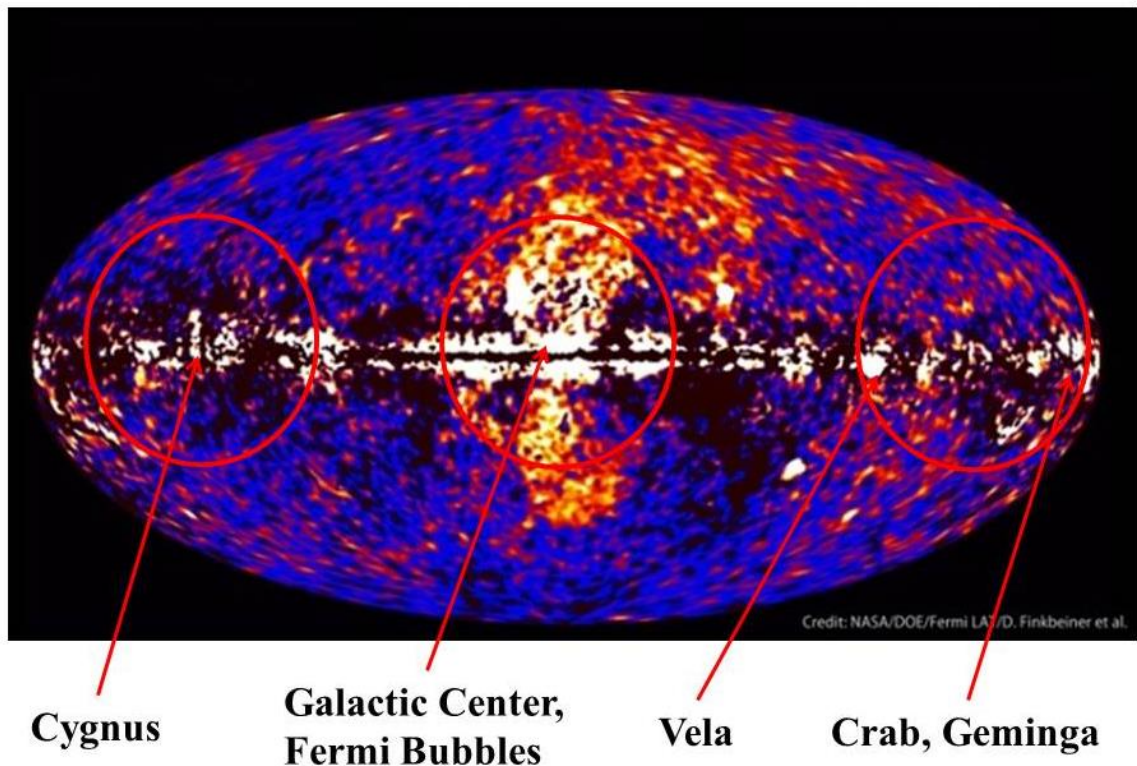


Рис. 4.38 Предполагаемые области наблюдения гамма-телескопом ГАММА-400: область созвездия Лебедя (Cygnus), область центра Галактики (Galactic Center), область пузырей Fermi (Fermi Bubbles), область созвездия Паруса (Vela), области Крабовидной туманности (Crab) и пульсара Геминги (Geminga).

#### 4.8 Сравнение характеристик гамма-телескопа ГАММА-400 с Fermi-LAT и наземными гамма-телескопами

Сравнение характеристик гамма-телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT приведено в Табл. 4.11.

Таблица 4.11

Детекторная система	Fermi-LAT	ГАММА-400
<b>Антисовпадательная</b> - эффективность - методы подавления «обратного тока»	0,9997 - сегментация - однослойные сцин. детекторы	0,999995 - сегментация - двухслойные сцин. детекторы - временной метод
<b>Времяпролетная</b> - пролетная база, мм - временной метод подавления ОТ	нет нет	500 да
<b>Конвертер-трекер</b> - шаг, мкм - съем информации	Si (стрипы)+W 225 бинарный	Si (стрипы)+W 80 аналоговый
<b>Калориметр</b> - толщина	CsI(Tl) 8,5 р.е.д.	КК1 - 2 р.е.д. CsI(Tl) + Si КК2 - 23 р.е.д. CsI(Tl)
<b>Триггерная</b> - триггер	$\overline{AC}x(3 \text{ стрип. пл. })x\text{Ecal}(100 \text{ MeV})$	$\overline{AC}x\text{ВПС}$

Антисовпадательная система в ГАММА-400 в отличие от Fermi-LAT представляет собой двухслойные сцинтилляционные детекторы с перекрытием щелей, что позволяет достигнуть величины выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц 0,999995 по сравнению с 0,9997 у Fermi-LAT.

Выбранная конструкция конвертера-трекера дает значительное улучшение углового разрешения по сравнению с Fermi-LAT практически во всем диапазоне энергий от ~100 МэВ до ~1000 ГэВ, особенно, начиная с

10 ГэВ и составляет  $\sim 0,01^\circ$  по сравнению с  $\sim 0,1^\circ$  для Fermi-LAT при энергии 100 ГэВ. Это достигается за счет:

- улучшения пространственного разрешения кремниевых стриповых детекторов (использование стриповых детекторов с шагом 80 мкм по сравнению с 225 мкм у Fermi-LAT и аналоговым съемом информации по сравнению с бинарным у Fermi-LAT. Аналоговый съем информации улучшает пространственное разрешение в 1,5-2 раза по сравнению с бинарным съемом информации [171]);

- использование большой пролетной базы от стриповых детекторов конвертера до стриповых детекторов калориметра;

- значительного снижения уровня фона от «обратного тока» за счет большого расстояния от конвертера до калориметра  $\sim 100$  см (у Fermi-LAT  $\sim 10$  см);

- дополнительно применения быстрого триггера, обеспечивающего снижение фона от космического излучения  $\sim 50$  нс (у Fermi-LAT  $\sim 1,5$  мкс).

Калориметр (КК1 и КК2) с полной толщиной для нормального падения частиц  $\sim 25$  р.е.д. (в то время как у Fermi-LAT  $\sim 8,5$  р.е.д.) позволит получить энергетическое разрешение  $\sim 1\%$  для энергии 100 ГэВ, что значительно лучше, чем у Fermi-LAT ( $\sim 10\%$ ).

Следующие конструктивные особенности, применяемые в ГАММА-400 по сравнению с Fermi-LAT, значительно снижают влияние «обратного тока» при регистрации высокоэнергетического гамма-излучения:

- сегментирование (включая двухслойную структуру) детекторов АС, уменьшающее вероятность срабатывания сегментов АС от частиц «обратного тока»;

- использование КК1, существенно уменьшающего «обратный ток», образовавшийся в КК2;

увеличенное расстояние от КК2 до конвертера-трекера - 100 см.

Расчеты показали, что при выбранной конструкции гамма-телескопа ГАММА-400 даже для гамма-квантов с энергией 1000 ГэВ число событий с

«обратным током», которые могут интерпретироваться как заряженные частицы и исключаться из регистрации, составляет не более нескольких процентов.

Кроме того, для уменьшения «обратного тока» применяется временной метод, основанный на измерении времени пролета частиц между детекторами данных систем.

Триггером для регистрации гамма-квантов ГАММА-400 являются:

срабатывание  $C1$  ВПС ранее  $C2$ ;

отсутствие сигнала АС.

Задержка между запуском триггера и считыванием информации с детекторов составляет  $\sim 50$  нс, в то время как у Fermi-LAT  $\sim 1,5$  мкс.

Использование более быстрого триггера позволяет в ГАММА-400 существенно уменьшить влияние фона от космического излучения.

Сравнение физических характеристик и основных параметров гамма-телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT представлено в Табл. 4.12.

В Табл. 4.13 представлено сравнение характеристик существующих и планируемых космических и наземных гамма-телескопов.

На Рис. 4.39 представлено сравнение зависимостей энергетического и углового разрешений от энергии для ГАММА-400, Fermi-LAT, НАВС, H.E.S.S. и СТА, используя рисунок из [172].

В качестве примера, показывающего значение углового разрешения, на Рис. 4.40 приведем данные по рентгеновскому наблюдению Галактического центра телескопом Chandra [173], где желтым кругом обозначено угловое разрешение Fermi-LAT, а красным кружком – угловое разрешение ГАММА-400.

В качестве примера, показывающего значение энергетического разрешения, приведем Рис. 4.41 [174], где отмечаются возможности регистрировать гамма-линии от частиц темной материи для Fermi-LAT с энергетическим разрешением  $\sim 10\%$  и ГАММА-400 с энергетическим разрешением  $\sim 1\%$ .

Таблица 4.12

	<b>Fermi-LAT</b>	<b>ГАММА-400</b>
Орбита	круговая, 565 км	высокоэллиптическая, 500-300000 км (без затенения Землей)
Режим работы	обзор неба (3 часа)	наблюдение (до 100 дней)
Время наблюдения источника/Время работы	1/8	1
Энергетический диапазон	20 МэВ - 300 ГэВ	~100 МэВ – ~1000 ГэВ
Эффективная площадь ( $E_\gamma > 1$ ГэВ)	~5000 см <sup>2</sup> (front)	~4000 см <sup>2</sup>
Координатные детекторы	Si стрипы (шаг 0,225 мм)	Si стрипы (шаг 0,08 мм)
Угловое разрешение	~0,2° ( $E_\gamma = 10$ ГэВ) ~0,1° ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~0,1° ( $E_\gamma = 10$ ГэВ) ~0,01° ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)
Калориметр - толщина	CsI(Tl) ~8.5X <sub>0</sub>	CsI(Tl)+Si ~25X <sub>0</sub>
Энергетическое разрешение	~10% ( $E_\gamma = 10$ ГэВ) ~10% ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~3% ( $E_\gamma = 10$ ГэВ) ~1% ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)
Коэффициент режекции протонов	~10 <sup>4</sup>	~5x10 <sup>5</sup>
Масса	2800 кг	4100 кг
Объем информации	15 Гбайт/день	100 Гбайт/день

Таблица 4.13

	Космические эксперименты					Наземные гамма-телескопы			
	AGILE	Fermi-LAT	DAMPE	CALET	ГАММА-400	Н.Е.С.С.-II	MAGIC	VERITAS	СТА
Частицы	$\gamma$	$\gamma$	е, ядра, $\gamma$	е, ядра, $\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
Период работы	2007-	2008-	2015-	2015-	~2025	2012-	2009-	2007-	~2020
Энергетический диапазон, ГэВ	0,03-50	0.02-300	5-10000	10-10000	0,1-~1000	> 30	> 50	> 100	> 20
Угловое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	0.1° ( $E_\gamma \sim 1$ ГэВ)	0.1°	0.1°	0.1°	~0.01°	0.07°	0.07° ( $E_\gamma = 300$ ГэВ)	0.1°	0.1° ( $E_\gamma = 100$ ГэВ) 0.05° ( $E_\gamma > 1$ ТэВ)
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	50% ( $E_\gamma \sim 1$ ГэВ)	10%	1.5%	2%	~1%	15%	20% ( $E_\gamma = 100$ ГэВ) 15% ( $E_\gamma = 1$ ТэВ)	15%	20% ( $E_\gamma = 100$ ГэВ) 5% ( $E_\gamma = 10$ ТэВ)



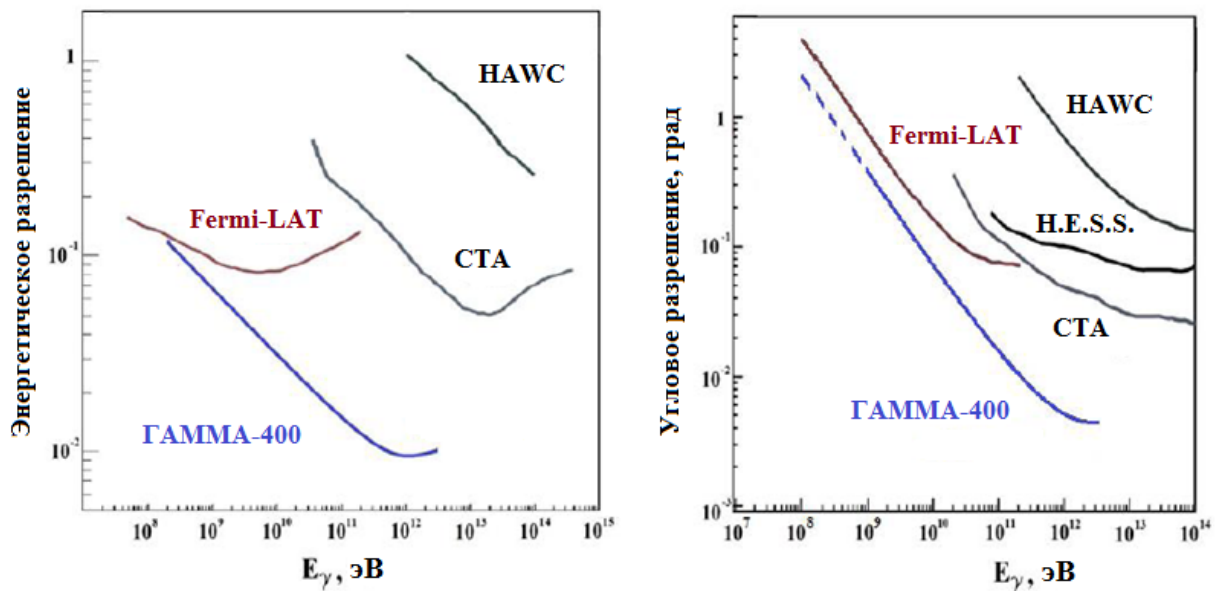


Рис. 4.39 Сравнение зависимостей энергетического и углового разрешений от энергии для ГАММА-400, Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S. и СТА, используя рисунок из [172].

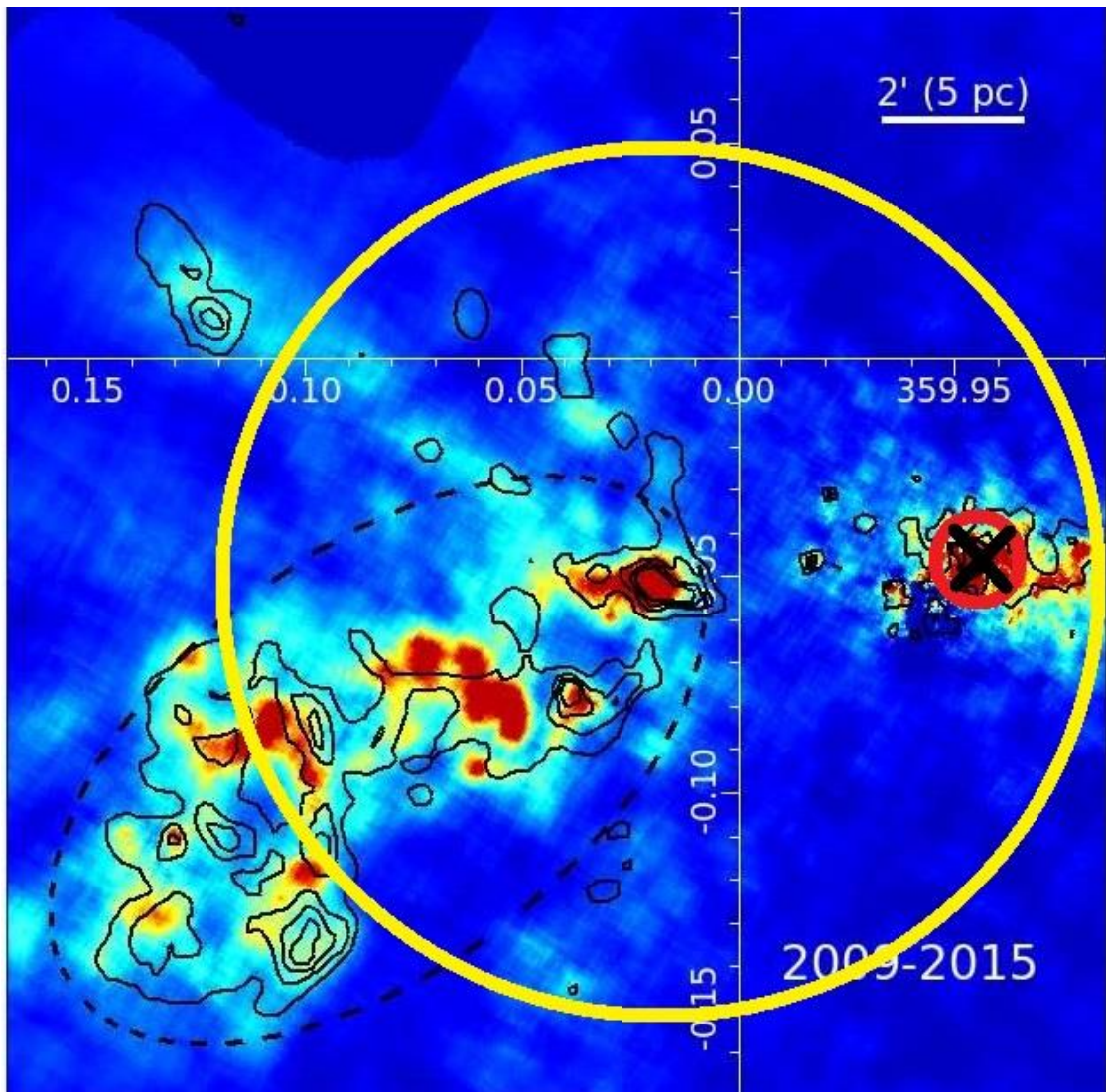


Рис. 4.40 Сравнение возможностей наблюдения Галактического центра для Fermi-LAT (угловое разрешение  $\sim 0,1^\circ$  отмечено желтым кругом) и ГАММА-400 (угловое разрешение  $\sim 0,01^\circ$  отмечено красным кругом), используя рентгеновские наблюдения телескопа Chandra [173]. Крестом отмечено положение Sgr A\*.

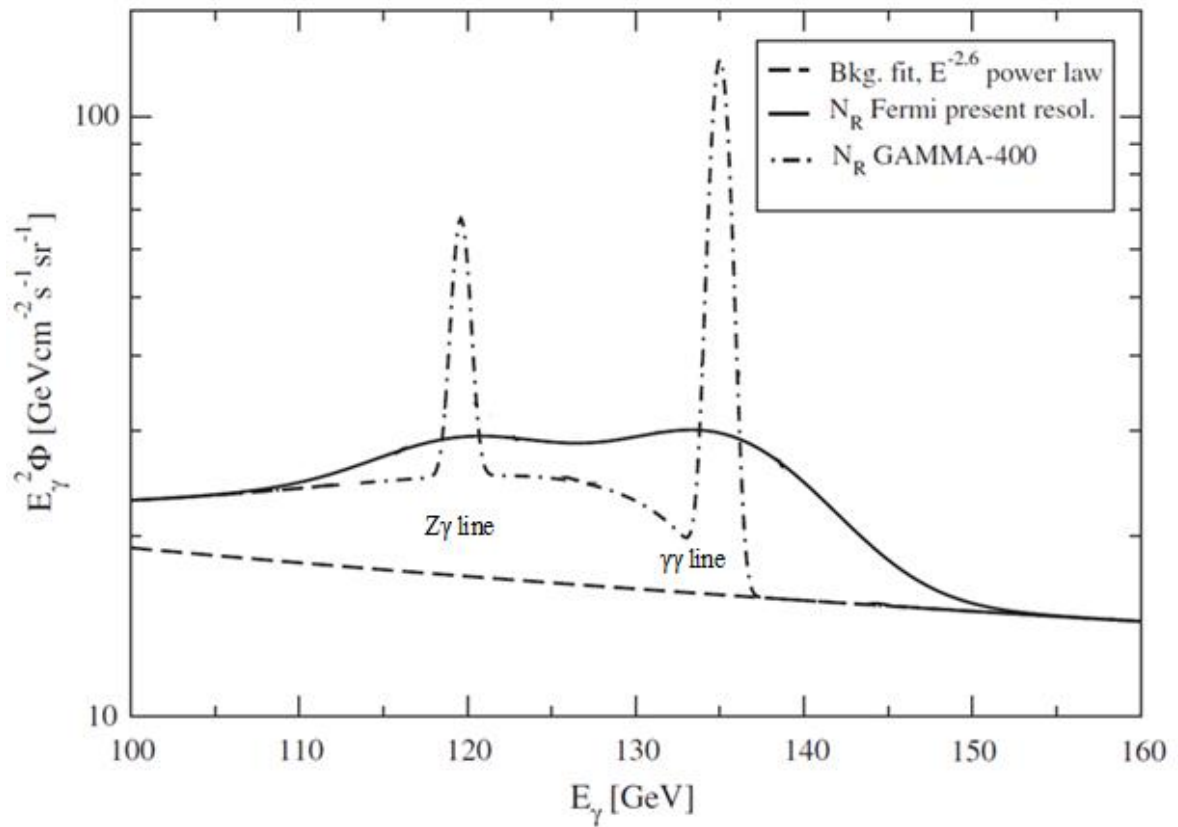


Рис. 4.41 Сравнение возможностей регистрировать гамма-линии от частиц темной материи для Fermi-LAT с энергетическим разрешением  $\sim 10\%$  и для ГАММА-400 с энергетическим разрешением  $\sim 1\%$ . Фоновое излучение фитировано по  $E^{-2.6}$  [174].

#### **4.9 Методы разработки научной аппаратуры, применяемые в гамма-телескопе ГАММА-400**

На основе анализа актуальных астрофизических задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и анализа существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах, в том числе эксперимента ГАММА-1, были разработаны и реализованы методы создания гамма-телескопа ГАММА-400 с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.

В результате разработан гамма-телескоп нового поколения ГАММА-400, способный проводить длительные непрерывные наблюдения гамма-источников на высокоэллиптической орбите космической обсерватории с начальными параметрами: апогей 300 000 км, перигей 500 км, наклонение  $51,4^\circ$ , при которой поле зрения гамма-телескопа не затеняется Землей и космический аппарат находится, в основном, вне радиационных поясов Земли.

Гамма-телескоп ГАММА-400 содержит:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,999995;
- конвертер-трекер с высоким координатным разрешением, который позволяет определять угловое направление регистрируемых гамма-квантов с точностью  $\sim 0,01$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- времяпролетную сцинтилляционную систему, позволяющую выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,3 нс;
- калориметр с большой толщиной 25 р.е.д. из сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением  $\sim 1\%$ ;

- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

Гамма-телескоп ГАММА-400 имеет следующие уникальные характеристики:

- диапазон энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ;
- большую чувствительную площадь  $\sim 1 \text{ м}^2$ ;
- высокое энергетическое разрешение  $\sim 1\%$  при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- высокое угловое разрешение  $\sim 0,01$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- эффективную систему отбора гамма-квантов при значительном фоне заряженных частиц космических лучей;
- эффективную систему режекции «обратного тока».

Уникальные характеристики ГАММА-400 (при  $E_\gamma = 100$  ГэВ угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,01^\circ$  и  $\sim 1\%$ , соответственно) в 5-10 раз превосходят характеристики космического гамма-телескопа Fermi-LAT и существующих наземных гамма-телескопов H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC, а также проектируемого СТА. При непрерывном длительном (до 100 суток) наблюдении областей небесной сферы, например, центра Галактики, пузырей Ферми и др., позволят гамма-телескопу ГАММА-400, имеющему поле зрения  $\pm 45^\circ$ , значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников гамма-излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, выделения потоков гамма-излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

На космической обсерватории наряду с гамма-телескопом устанавливается рентгеновский телескоп. Одновременные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах центра Галактики, пузырей Ферми и т.п.

значительно улучшат наше понимание процессов, происходящих в астрофизических объектах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ современного состояния исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических ( $E_\gamma = \sim 100$  МэВ –  $\geq 300$  ГэВ), так в наземных ( $E_\gamma \geq 100$  ГэВ) экспериментах выявил следующее:

1.1 В космических экспериментах OSO-3 (1967-1968 гг.), Космос-208 (1968 г.), АННА-3 (Космос-251, 1968 г. и Космос-264, 1969 г.), OGO-5 (1968 г.), SAS-2 (1972-1973 гг.), COS-B (1975-1982 гг.), ГАММА-1 (1990-1992 гг.) [3-14], EGRET (1991-2000 гг.), AGILE (с 2007 г.), и в основном усилиями Fermi-LAT (с 2008 г.) обнаружено гамма-излучение от  $\sim 3030$  дискретных источников, причем одна треть источников не идентифицирована, что связано с недостаточным угловым разрешением (Fermi-LAT имеет для  $E_\gamma = 100$  ГэВ угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,1^\circ$  и  $\sim 10\%$ , соответственно). Энергетические спектры гамма-излучения от дискретных источников для энергий более 10 ГэВ построены с большими ошибками. Требуется дополнительные измерения с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

1.2. В наземных экспериментах Whipple, VERITAS, MAGIC, H.E.S.S., Milagro, HAWC и др. (наземные гамма-телескопы имеют для  $E_\gamma = 100$  ГэВ угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,1^\circ$  и  $\sim 15\%$ , соответственно) обнаружено гамма-излучение только от  $\sim 180$  дискретных источников, что в основном связано с недостаточным угловым разрешением. Требуется дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

1.3 Наблюдение диффузного галактического гамма-излучения является инструментом изучения происхождения и ускорения космических лучей и межзвездного вещества. Знание диффузного излучения необходимо для его выделения от гамма-излучения дискретных (точечных и протяженных) источников. Интенсивность галактического диффузного гамма-излучения при энергии 10-50 ГэВ по измерениям Fermi-LAT меньше, чем по данным

EGRET. Для интерпретации природы диффузного излучения требуются дополнительные измерения с улучшенным угловым и энергетическим разрешениями.

1.4 Результаты измерений диффузного гамма-излучения от центра Галактики по данным Fermi-LAT выявили избыток излучения. Одним из возможных объяснений избытка гамма-излучения является наличие гамма-излучения от частиц темной материи с массой несколько сотен ГэВ. Другим объяснением избытка гамма-излучения от центра Галактики является наличие гамма-излучения от неразрешенных источников (например, маломасштабных субструктур темной материи) или от миллисекундных пульсаров. Для выделения дополнительного потока гамма-излучения от частиц темной материи необходимо из общего потока космического гамма-излучения вычесть диффузное излучение (галактическое и внегалактическое) и гамма-излучение от дискретных источников, а для этого необходимы дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

1.5 Сравнение спектра внегалактического гамма-излучения со спектрами излучения от идентифицированных внегалактических источников указывает на значительное долю в нем неразрешенных источников, для идентификации которых также требуется высокое угловое разрешение.

1.6 Поиск частиц темной материи путем регистрации гамма-квантов является чрезвычайно многообещающим «золотым» каналом, поскольку гамма-кванты распространяются через галактику практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывают на источник своего происхождения. Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения. Исследования Fermi-LAT и H.E.S.S. не выявили значимых спектральных линий. Для выделения таких линий над фоном энергетическое разрешение детекторов должно быть значительно лучше, чем у Fermi-LAT и



H.E.S.S. и составлять величину порядка нескольких процентов. Требуется дополнительные измерения с улучшенным энергетическим разрешением.

1.7 Высокоэнергичное гамма-излучение ( $E_\gamma > 1$  ГэВ) от солнечных вспышек впервые была зарегистрировано гамма-телескопом ГАММА-1, в дальнейшем гамма-телескопами EGRET, Fermi-LAT. Однако, недостаточное угловое разрешение не позволило во многих случаях разрешить детали излучения, оставив открытым вопрос о размерах и геометрии источника. Требуется дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

Несмотря на многочисленные исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических, так и в наземных экспериментах, необходимы новые экспериментальные данные, которые должны быть получены с использованием гамма-телескопов, установленных на космических аппаратах и обладающих значительно лучшими угловым и энергетическим разрешениями, способными проводить длительные непрерывные наблюдения, в связи с тем, что многие источники гамма-излучения являются переменными.

Особенно важным является исследование гамма-излучения на космическом аппарате одним гамма-телескопом в диапазоне энергий от  $\sim$ ГэВ до  $\sim$ ТэВ:

- это пограничная область, где заканчиваются данные космических гамма-телескопов и начинаются данные наземных гамма-телескопов. Эти данные либо слабо, либо совсем не перекрываются;

- в этой области, начиная с энергии более 10 ГэВ, начинаются процессы ослабления потоков гамма-излучения после взаимодействия с межгалактическими фоновыми фотонами (extragalactic background light, EBL) и происходит изменение показателя энергетического спектра гамма-излучения от источника;

- в этом энергетическом диапазоне следует искать следы от аннигиляции или распада частиц темной материи, где, как предполагается, должна находиться масса этих частиц.

Таким образом, для решения вышеперечисленных астрофизических задач необходимо разработать новую космическую научную аппаратуру, которая должна обеспечить регистрацию одним гамма-телескопом высокоэнергичного гамма-излучения в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ и будет иметь значительно лучшие характеристики: угловое разрешение  $< 0,05^\circ$  при  $E_\gamma = 100$  ГэВ и энергетическое разрешение  $< 2\%$  при  $E_\gamma = 100$  ГэВ.

2. Проведенный анализ существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах: OSO-3, Космос-208, АННА-3, OGO-5, SAS-2, COS-B, ГАММА-1, COMPTEL, EGRET, AGILE, Fermi-LAT, CALET, DAMPE и требований к научной аппаратуре показал:

Будущие космические гамма-телескопы для решения актуальных астрофизических задач должны проводить непрерывные, длительные измерения для получения хорошей статистики и для измерения вариаций светимости одновременно во всем диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ, иметь большую чувствительную площадь ( $0,5-1$  м<sup>2</sup>), высокое угловое ( $< 0,05^\circ$  при  $E_\gamma = 100$  ГэВ) и энергетическое ( $< 2\%$  при  $E_\gamma = 100$  ГэВ) разрешения, и иметь в своем составе:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,9999;

- конвертеры-трекеры из кремниевых стриповых детекторов с высоким координатным разрешением, которые позволяют определять направление регистрируемых гамма-квантов с точностью лучше  $0,05^\circ$ ;

- времяпролетные сцинтилляционные системы, позволяющие выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,5 нс;

- калориметры с большой толщиной (не менее 20 р.е.д.) на основе сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты в широком диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением лучше 3%;

- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

3. Основным методом регистрации гамма-квантов в эксперименте ГАММА-1 с гамма-телескопом нового типа было использование комбинации детекторов: широкозасорной искровой камеры для конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару и измерения направления падения гамма-квантов, сцинтилляционной времяпролетной системы с большой пролетной базой для исключения из регистрации частиц, попадающих в гамма-телескоп вне апертуры (снизу и сбоку), газового черенковского счетчика большой площади для исключения из регистрации частиц с энергией ниже порога возникновения черенковского излучения, антисовпадательной сцинтилляционной системы для исключения заряженных частиц, которая перекрывает широкозасорные искровые камеры сверху и с четырех боковых сторон, и сцинтилляционного калориметра для измерения энергии гамма-квантов.

Применение широкозасорных камер в ГАММА-1 позволило улучшить угловое разрешение почти в 2 раза по сравнению с телескопами SAS-2 и COS-B, в которых использовались узкозасорные камеры, и достичь  $2^\circ$  при энергии фотонов 100 МэВ и  $1,2^\circ$  при энергии 300 МэВ.

Применение ионизационного калориметра площадью  $60 \times 60 \text{ см}^2$  толщиной 7,4 р.е.д. позволило получить энергетическое разрешение 55% при энергии 100 МэВ и 34% при энергии 550 МэВ.

Было уделено существенное внимание методам выделения гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц путем использования комбинации высокоэффективной антисовпадательной системы, времяпролетной системы и газового черенковского счетчика. Эффективность регистрации релятивистских частиц верхним торцевым антисовпадательным детектором составила  $0,999997 \pm 0,000001$ , а боковых антисовпадательных

детекторов - 0,9994, наружным детектором - 0,99. Применение времяпролетной системы с большой пролетной базой (~75 см) позволило получить временное разрешение ~1,2 нс, эффективность регистрации частиц в «прямом» направлении  $\eta_{\text{пр}} = (96,1 \pm 0,6)\%$ , в «обратном» -  $\eta_{\text{обр}} = (0,06 \pm 0,01)\%$ , коэффициент отбора по направлению составил  $K_{\text{отб}} = 1600 \pm 270$ . По сравнению с твердотельными черенковскими счетчиками (люсит), используемыми в SAS-2 и COS-B, применение газового черенковского счетчика (ГЧС) большой площади и длины ( $\varnothing 50$  см и  $l \sim 70$  см), обладающего хорошей направленностью благодаря малому углу черенковского излучения в газовой среде, позволило исключать из регистрации электроны с энергией менее 7 МэВ и протоны с энергией менее 12 ГэВ, в то время как пороговая энергия для люсита составляла всего 0,7 МэВ для электронов и 1,3 ГэВ для протонов. ГЧС обладал эффективностью регистрации  $98,5 \pm 0,2\%$  в «прямом» направлении и  $0,85 \pm 0,15\%$  в обратном, т.е. коэффициент отбора был более 100.

Методы, разработанные в эксперименте ГАММА-1, позволили существенно улучшить характеристики гамма-телескопа ГАММА-1 по сравнению с SAS-2 и COS-B, получить в ходе космического эксперимента новые данные по дискретным источникам Vela, Cyg X3, Hercules X-1, Geminga и впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучения от Солнца во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/Х4,7) и 15 июня (класс 3В/Х12+) 1991 г.

Для эффективного наблюдения гамма-источников впервые в мировой практике применялась переориентации космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1. По прогнозу предвспышечной активности Солнца также проводилась переориентация космического аппарата на Солнце для наблюдения солнечных вспышек.

На основе анализа актуальных астрофизических задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и анализа существующих методов регистрации гамма-

излучения в космических экспериментах, в том числе эксперимента ГАММА-1, были разработаны и реализованы методы создания гамма-телескопа ГАММА-400 с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.

В результате разработан гамма-телескоп нового поколения ГАММА-400, способный проводить длительные непрерывные наблюдения гамма-источников на высокоэллиптической орбите космической обсерватории с начальными параметрами: апогей 300 000 км, апогей 500 км, наклонение  $51,4^\circ$ , при которой поле зрения гамма-телескопа не затеняется Землей и космический аппарат находится, в основном, вне радиационных поясов Земли.

Гамма-телескоп ГАММА-400 содержит:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,999995;
- конвертер-трекер с высоким координатным разрешением, который позволяет определять угловое направление регистрируемых гамма-квантов с точностью  $\sim 0,01$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- времяпролетную сцинтилляционную систему, позволяющую выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,3 нс;
- калориметр с большой толщиной 25 р.е.д. из сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением  $\sim 1\%$ ;
- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

Гамма-телескоп ГАММА-400 имеет следующие уникальные характеристики:

- диапазон энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ;

- большую чувствительную площадь  $\sim 1 \text{ м}^2$ ;
- высокое энергетическое разрешение  $\sim 1\%$  при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- высокое угловое разрешение  $\sim 0,01$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- эффективную систему отбора гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц космических лучей;
- эффективную систему режекции «обратного тока».

Уникальные характеристики ГАММА-400 (при  $E_\gamma = 100$  ГэВ угловое и энергетическое разрешения  $\sim 0,01^\circ$  и  $\sim 1\%$ , соответственно) в 5-10 раз превосходят характеристики космического гамма-телескопа Fermi-LAT и существующих наземных гамма-телескопов H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC, а также проектируемого СТА. При непрерывном длительном (до 100 суток) наблюдении областей небесной сферы, например, центра Галактики, пузырей Ферми и др., позволят гамма-телескопу ГАММА-400, имеющему поле зрения  $\pm 45^\circ$ , значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников гамма-излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, выделения потоков гамма-излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

На космической обсерватории наряду с гамма-телескопом устанавливается рентгеновский телескоп. Одновременные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах центра Галактики, пузырей Ферми и т.п. значительно улучшат наше понимание процессов, происходящих в астрофизических объектах.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведенный анализ современного состояния исследования дискретных источников, диффузного излучения и природы темной материи методами высокоэнергичной гамма-астрономии как в космических ( $E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ГэВ}$ ), так и в наземных ( $E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$ ) экспериментах показал необходимость:

- непрерывных длительных измерений для получения хорошей статистики и изучения переменности астрофизических объектов;

- повторных измерений в связи с переменностью многих астрофизических объектов;

- расширения энергетического диапазона в сторону больших энергий (до нескольких ТэВ) для исследования пограничного диапазона энергий между космическими и наземными гамма-телескопами (в районе 100 ГэВ);

- улучшения энергетического разрешения научной аппаратуры для повышения точности измерений и разрешения гамма-линий при аннигиляции или распаде частиц «темной материи»;

- улучшения углового разрешения научной аппаратуры для идентификации астрофизических объектов и изучения структуры протяженных источников;

- создания гамма-телескопа нового поколения с большой площадью и улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. Проведенный анализ существующих методов регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре показал, что для решения актуальных астрофизических задач методами высокоэнергичной гамма-астрономии необходима научная аппаратура нового поколения, которая должна иметь:

- большую чувствительную площадь  $\sim 1 \text{ м}^2$ ;

- широкий энергетический диапазон от  $\sim 100 \text{ МэВ}$  и до нескольких ТэВ;

- высокое энергетическое разрешение  $< 2\%$  при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокое угловое разрешение  $< 0,05$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- эффективную систему выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц;
- эффективную систему исключения из регистрации частиц «обратного тока»;
- возможность одновременно с наблюдением гамма-излучения регистрировать электроны и позитроны космического излучения.

3. По результатам разработки новых методов, создания и проведения наблюдений на гамма-телескопе ГАММА-1, разработан гамма-телескоп ГАММА-400, в котором реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований в диапазоне высоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  МэВ) и сверхвысоких ( $E_\gamma \gtrsim 100$  ГэВ) энергий с уникальными характеристиками, превышающими характеристики космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз и который обладает:

- высокочувствительной координатной системой, позволяющей регистрировать гамма-кванты с высокой точностью и получать угловое разрешение  $\sim 0,01$  градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- высокоэффективным координатно-чувствительным калориметром, позволяющим регистрировать гамма-кванты в диапазоне от  $\sim 100$  МэВ до  $\sim 1000$  ГэВ с энергетическим разрешением  $\sim 1\%$  при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;
- высокоэффективными антисовпадательной и времяпролетной системами, способными выделять гамма-кванты на фоне заряженных частиц;
- высокоэффективной системой для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающих при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ;
- высокоэффективной системой режекции протонов при одновременной регистрации с гамма-квантами электронов + позитронов.



## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Автор выражает большую признательность руководителю Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН профессору О.Д. Далькарову, главному научному сотруднику, научному руководителю проекта «ГАММА-400» профессору А.М. Гальперу, главному научному сотруднику В.А. Рябову, сотрудникам Лаборатории гамма-астрономии С.И. Сучкову, А.А. Леонову, Ю.В. Гусакову, В.Г. Звереву, а также сотрудникам НИЯУ МИФИ Ю.Т. Юркину, С.А. Воронову, М.Д. Хеймицу, А.И. Архангельскому, И.В. Архангельской, М.Ф. Рунцо, В.А. Каплину.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Гинзбург В.Л. Нобелевская лекция. О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о «физическом минимуме» на начало XXI века. УФН, 2004, т. 174, №11, с. 1240-1255.
- [2] Авиньон М., Агринье Е., Акимов В., Балебанов В., Белоусов А., Блохинцев И., Базер-Баши А., Бауэр А., Ведрен Ж., Воронов С., Гальпер А., Герасимов И., Григорьев В., Гузенко М., Гро М., Добриян М., Дуладе К., Дюкро Ж., Дюран Ж., Жоли Ж., Зверев В., Земсков В., Калинин Л., Кардон Ф., Кириллов-Угрюмов В., Козлов В., Колдашев С., Керль П., Креталь Ж., Котен Ф., Курносова Л., Лавинь Ж., Лейков Н., Леконт А., Лере Ж., Масс П., Мандру П., Моисеев А., Мули Ж., Мужен Б., Нагорных Ю., Нестеров В., Нобиле М., Озеров Ю., Орсаль Е., Парлье Б., Поль Ж., Полуэктов В., Попов А., Прилуцкий О., Прохин В., Пуавийе М., Равьяр А., Русакович М., Серов А., Серра Ж., Сорока Ф., Табалдыев С., **Топчиев Н.**, Фрадкин М., Фурнье Д., Фукс В., Чуйкин Е., Чесноков В., Юго К., Юркин Ю. Телескоп ГАММА-1 для гамма-астрономических наблюдений в области энергий 50-5000 МэВ. *Астрономический журнал*, 1986, т. 63, №5, с. 856-866.
- [3] **Топчиев Н.П.**, Гальпер А.М., Бонвичини В., Адриани О., Аптекарь Р.Л., Архангельская И.В., Архангельский А.И., Бергстрем Л., Берти Е., Бигонгьяри Г., Бобков С.Г., Богомолов Э.А., Боецио М., Бонги М., Бонеки С., Боттаи С., Боярчук К.А., Вакки А., Ваннуччини Е., Васильев Г.И., Кастеллини Г., Каттанео П.В., Кумани П., Деденко Г.Л., Догель В.А., Де Донато С., Гнатык Б.И., Горбунов М.С., Гусаков Ю.В., Зампа Н., Зверев В.Г., Зиракашвили В.Н., Кадилини В.В., Каплин В.А., Каплун А.А., Корепанов В.Е., Ларссон Ж., Леонов А.А., Логинов В.А., Лонго Ф., Маэстро П., Маррокези П.С., Михайлов В.В., Моккьютти Э., Моисеев А.А., Мори Н., Москаленко И.В., Наумов П.Ю., Папини П.,

- Пикоцца П., Пирс М., Попов А.В., Райд Ф., Рапполди А., Рикьярини С., Рунцо М.Ф., Сердин О.В., Спарволи Р., Спиллантини П., Сучков С.И., Тавани М., Тараскин А.А., Тиберио А., Тюрин Е.М., Уланов М.В., Фуглесанг Ч., Хеймиц М.Д., Юркин Ю.Т. Эксперимент “ГАММА-400”: состояние и перспективы. Известия РАН (сер. физ.), 2015, т. 79, №3, с. 454–457.
- [4] Астрофизика космических лучей. (под ред. В.Л. Гинзбурга). М.: “Наука”, 1984.
- [5] Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. Изд. 3, перераб. и доп. М.: “Наука”, 1995.
- [6] Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Лучков Б.И., О.Ф. Прилуцкий. Исследование космического гамма-излучения. УФН, 1971, т. 105, вып. 2, с. 209-250.
- [7] Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Лучков Б.И. Наблюдательная гамма-астрономия. УФН, 1974, т. 112, вып. 3, с. 491-515.
- [8] Гальпер А.М., Лучков Б.И., О.Ф. Прилуцкий. Гамма-лучи и структура Галактики. УФН, 1979, т. 128, вып. 2, с. 313-343.
- [9] Фундаментальные космические исследования. Книга 1. Астрофизика. (под ред. Г.Г. Райкунова). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
- [10] Kraushaar W.L., et al. High-energy cosmic gamma-ray observations from the OSO-3 satellite. *Astrophys. J.*, 1972, v. 177, pp. 341-363.
- [11] Братолобова-Цулукидзе Л.С., Григоров Н.Л., Калинин Л.Ф. и др. Измерение потоков гамма-квантов высокой энергии в первичном космическом излучении на ИСЗ «Космос-208». *Геомагнетизм и аэрономия*, 1971, т. 11, с. 585-589.
- [12] Волобуев С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г. и др. Исследование первичного гамма-излучения с  $E \geq 200$  МэВ на ИСЗ с помощью искровой камеры. *Известия АН СССР, сер. физ.*, т. 34, №11, с. 2259-2264.

- [13] Волобуев С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Лучков Б.И., Озеров Ю.В. Наблюдение гамма-квантов с энергией больше 100 МэВ от радиоисточника 3С 120. Письма в ЖЭТФ, 1971, т. 13, с. 43-46.
- [14] Dean A., Hutchinson G., Ramsden D., et al. The OGO-5 spark chamber telescope for gamma-ray astronomy. Nucl. Instr. and Meth., 1968, v. 65, p. 293-300.
- [15] Fichtel C.E., et al. High-energy gamma-ray results from the second Small Astronomy Satellite. Astrophys. J., 1975, v. 198, pp. 163-182.
- [16] Lamb R.C., Fichtel C.E., Hartman R.C., et al. Observation of gamma rays with a 4.8 hour periodicity from Cygnus X-3. Astrophys. J. Lett., 1977, v. 212, pp. L63.
- [17] Swanenburg B., Bennett K., Bignami G., et al. Second COS-B catalog of high-energy gamma-ray sources. Astrophys. J. (Lett.), 1981, v. 243, pp. L69-L73.
- [18] Panagia N. and Zamorani G. On the nature of the galactic gamma-ray sources. Astron. and Astrophys., 1979, v. 75, p. 303-310.
- [19] Swanenburg B., Bennett K., Bignami G., et al. COS-B observation of high-energy gamma-radiation from 3C 273. Nature, 1978, v. 275, no. 5678, p. 298.
- [20] Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Курочкин А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 18, с. 217.
- [21] Vladimirsky B.M., Stepanian A.A., Fomin V.P. High-energy gamma-ray outburst in the direction of the X-ray source Cyg X-3. Proc. 13<sup>th</sup> International Cosmic-Ray Conference, Denver, 1973, v. 1, pp. 456-460.
- [22] Владимирский Б.М., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г. и др. О переменности гамма-излучения рентгеновского источника Cyg X-3. Письма в АЖ, 1975, т. 1, с. 25-29.
- [23] Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Курочкин А. и др. Наблюдения периодического гамма-излучения дискретного источника Лебедь X-3. Письма в ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 381-385.

- [24]Владимирский Б.М., Гальпер А.М., Лучков Б.И., Степанян А.А.  
Мощный галактический источник жесткого излучения Лебедь X-3.  
УФН, 1985, т. 145, вып. 2, с. 255-284.
- [25]Akimov V., Balebanov V., Belaousov A., Blochintsev I., Veselova G.,  
Dobriyan M., Kalinkin L., Kovalenko S., Kozlov V., Leikov N., Mordvov N.,  
Nagornih Yu., Nesterov V., Prilutskiy O., Prohin V., Rodin V., Tabaldiev S.,  
Chuprov V., Fuks V., Gerasimov I., Ovtchinnikov V., Poluektov V.,  
Serov A., Tugaenko V., Kurnosova L., Rusakovich M., **Topchiev N.**,  
Fradkin M., Bugakov I., Gorodinskiy G., Chuikin E., Voronov S., Galper A.,  
Grigoriev V., Guzenko M., Kirillov-Ugryumov V., Koldashev S.,  
Korotkov M., Luchkov B., Moiseev A., Ozerov Yu., Popov A., Rudko V.,  
Runtso M., Chesnokov B., Agrinier B., Bovera A., Gros M., Leray J.,  
Leconte A., Masse P., Mongin B., Keirle P., Cretolle J., Paul J., Raviart A.,  
Parlier B., Poiviller M., Hugot C., Soroka F., Serra G., Bazer-Bachi A.,  
Doulade C., Ducros J., Vedrene G., Cotin F., Lavigne Y., Mandrou P.,  
Orsal E., Avignon M., Durand J., Joli J., Cardon F., Monli J., Nobileau M.,  
Fournier D. The gamma-ray telescope GAMMA-1, Space Science Reviews,  
1988, v. 49, no. 1-2, pp. 111-124.
- [26]Akimov V., Balebanov V., Belaousov A., Blohintsev I., Volzhenskaya V.,  
Gerasimov I., Dobriyan M., Kalinkin L., Kozlov V., Kotova V., Leikov N.,  
Mordvov N., Nagornih Yu., Nesterov V., Poluektov V., Prilutskiy O.,  
Prokhin V., Repin S., Rodin V., Serov A., Tabaldiev S., Tugaenko V.,  
Voronov S., Galper A., Grigoriev V., Zverev V., Zemskov V., Kalinin I.,  
Kirillov-Ugryumov V., Ozerov Yu., Popov A., Runtso M., Yurkin Yu.,  
Kurnosova L., Rusakovich M., **Topchiev N.**, Fradkin M., Chuikin E., Gros  
M., Leray J., Masse P., Parlier B., Soroka F., Bazer-Bachi A., Lavigne Y.  
Determination of the characteristics of the gamma-ray telescope GAMMA-1,  
Space Science Reviews, 1988, v. 49, no. 1-2, pp. 125-138.
- [27]Akimov V., Belaousov A., Blochintsev I., Kalinkin L., Leikov N.,  
Nesterov V., Rodin V., Galper A., Ozerov Yu., Popov A., Runtso M.,

- Voronov S., Fradkin M., **Topchiev N.**, Chuikin E., Gerasimov I., Polezhaev P., Tugaenko V., Gros M., Bazer-Bachi A., Lavigne J., Juchniewicz J. Performance of GAMMA-1 telescope in flight: in Proc. 22<sup>nd</sup> International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991, v. 2, pp. 483-486.
- [28]Воронов С., Гальпер А., Зверев В., Кириллов-Угрюмов В., Лучков Б., Озеров Ю., Попов А., Рудько В., Рунцо М., Земсков В., Фрадкин М., Курносова Л., Русакович М., **Топчиев Н.**, Разоренов Л., Тугаенко В., Чуйкин Е.. Исследование и поиск гамма-пульсаров на обсерватории ГАММА-1. Известия Академии наук (сер. физ.), 1993, т. 57, №4, с. 152-157.
- [29]Акимов В., Афанасьев В., Балебанов В., Блохинцев И., Боярский М., Волженская В., Гаврилова Е., Калинин Л., Кизенков И., Козлов В., Лейков Н., Мерсов Г., Нестеров В., Плюснина Н., Прохин В., Репин С., Родин В., Суханов А., Тихонов А., Чупров В., Белоусов А., Бургеев Д., Добриян М., Канупер Р., Каримов Б., Кириллова Т., Корнев Е., Курмангалиев А., Мордвов Н., Мосевнина Л., Табалдыев С., Шевченко Д., Шмелев В., Ямпольский С., Воронов С., Гальпер А., Григорьев В., Зверев В., Земсков В., Кириллов-Угрюмов В., Коротков М., Лучков Б., Моисеев А., Озеров Ю., Попов А., Рудько В., Рунцо М., Чесноков В., Юркин Ю., Гинзбург В., Курносова Л., Разоренов Л., Русакович М., **Топчиев Н.**, Фрадкин М., Бугаков И., Чуйкин Е., Герасимов И., Полежаев П., Полуэктов В., Серов А., Тугаенко В., Тян Т., Баруш Е., Гринье И., Гро М., Дюкро Ж., Лере Ж., Парлье Б., Равьяр А., Сорока Ф., Базер-Баши А., Лавинь Ж., Олив Ж., Дюран Ж., Козик Ж., Бучковская А., Григорчук И., Косацкий К., Макаль С., Чайковский Д., Южвицкий Р., Юхневич Ю.. Наблюдение пульсара PSR 0833-45 телескопом ГАММА-1, Письма в Астрономический журнал, 1991, т. 17, №6, с. 501-504.
- [30]Akimov V., Afanasyev V., Belaousov A., Blochintsev I., Kalinkin L., Leikov N., Nesterov V., Volzhenskaya V., Galper A., Kirillov-Ugryumov V.,

- Luchkov B., Ozerov Yu., Rudko V., Runtso M., Zemskov V., Fradkin M., Kurnosova L., Rusakovich M., **Topchiev N.**, Tugaenko V., Chuikin E., Gros M., Grenier I., Barouch E., Wallyn P., Bazer-Bachi A., Lavigne J., Olive J., Juchniewicz J.. Analysis of the temporal behavior of the Vela pulsar with the high-energy telescope GAMMA-1. Proc. 22<sup>nd</sup> International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991, v. 1, pp. 153-156.
- [31]АКИМОВ В., АФАНАСЬЕВ В., БЕЛОУСОВ А., БЛОХИНЦЕВ И., КАЛИНКИН Л., ЛЕЙКОВ Н., НЕСТЕРОВ В., ВОЛЖЕНСКАЯ В., ГАЛЬПЕР А., КИРИЛЛОВ-УГРЮМОВ В., ЛУЧКОВ Б., ОЗЕРОВ Ю., РУДЬКО В., РУНЦО М., ЗЕМСКОВ В., ФРАДКИН М., КУРНОСОВА Л., РУСАКОВИЧ М., **ТОПЧИЕВ Н.**, ТУГАЕНКО В., ЧУЙКИН Е., ГРО М., ГРИНЬЕ И., БАРУШ Е., ВАЛЛИН П., БАЗЕР-БАШИ А., ЛАВИНЬ Ж., ОЛИВ Ж., ЮХНЕВИЧ Ю.. Особенности фазовой кривой светимости гамма-пульсара PSR 0833-45 по данным наблюдений телескопом ГАММА-1. Письма в Астрономический журнал, 1992, т. 18, №4, с. 315-321.
- [32]Olive J., Bazer-Bachi A., Lavigne J., Leikov N., Akimov V., Afanassyev V., Blochintsev I., Nesterov V., Barouch E., Grenier I., Gros M., Chuikin E., Fradkin M., **Topchiev N.**, Galper A., Ozerov Yu., Rudko V., Zemskov V., Buczkowska A., Grygorczuk J., Juchniewicz J., McCulloch P.. Observation of the Vela gamma-ray pulsar with the GAMMA-1 telescope. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1993, v. 97, no. 1, pp. 325-327.
- [33]Akimov V.V., Afanasiev V.G., Blokhintsev I.D., Leikov N.G., Nesterov V.E., Galper A.M., Ozerov Y.V., Rugki Y.V., Zemskov V.M., Fradkin M.I., **Topchiev N.P.**, Chuikin E.I., Barouch E., Grenier I., Gros M., Bazer-Bachi A.R., Lavigne J.-M., Olive J.-F., Buczkowska A., Grygorczuk J., Juchiewicz J., Mcculloch P. Time variations of high-energy gamma-emission of Vela pulsar observed by GAMMA-1 telescope. Advances in Space Research, 1993, v. 13, no. 12, pp. 657-664.
- [34]Akimov V.V., Afanasiev V.G., Blokhintsev I.D., Kalinlin L.F., Leikov N.G., Nesterov V.E., Galper A.M., Ozerov Y.V., Rudko V.A., Runtso M.F.,

- Zemskov V.M., Fradkin M.I., Kurnosova L.V., Rusakovich M.A., **Topchiev N.P.**, Chuikin E.I., Tugaenko V.Y., Gros M., Bazer-Bachi A.R., Lavigne J.-M., Olive J.-F. Geminga pulsar observations with gamma-telescope GAMMA-1. *Advances in Space Research*, 1993, v. 13, no. 12, pp. 739-742.
- [35] Акимов В., Афанасьев В., Блохинцев И., Калинин Л., Лейков Н., Нестеров В., Гальпер А., Озеров Ю., Рудько В., Рунцо М., Земсков В., Курносова Л., Русакович М., **Топчиев Н.**, Фрадкин М., Чуйкин Е., Тугаенко В., Гро М., Гринье И., Базер-Баши А., Лавинь Ж., Олив Ж. Кривая светимости гамма-пульсара Геминга на энергиях 400-4000 МэВ по данным телескопа ГАММА-1. *Письма в Астрономический журнал*, 1993, т. 19, №7, с. 579-582.
- [36] Chuikin E., Galper A., Fradkin M., Kirillov-Ugryumov V., Kurnosova L., Luchkov B., Ozerov Yu., Popov A., Razorenov L., Rudko V., Runtso M., Rusakovich M., **Topchiev N.**, Tugaenko V., Voronov S., Zemskov V., Zverev V. Observation of High-Energy Gamma-Radiation from the Binary System Hercules X-1/HZ Hercules with GAMMA-1 Telescope. *Proc. 23<sup>rd</sup> International Cosmic Ray Conference, Calgary, 1993, v. 1, pp. 184-187.*
- [37] Kanbach G., et al. The Project EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) on NASA's Gamma-Ray Observatory GRO. *Space Science Review*, 1988, v. 49, pp. 69-84.
- [38] Hartman R.C., et al. The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources. *Astrophysical Journal Suppl.*, 1999, v. 123, pp. 79-202.
- [39] Strong A.W. and Moskalenko I.V. Propagation of cosmic-ray nucleons in the Galaxy. *Astrophysical Journal*, 1998, v. 509, pp. 212-228.
- [40] Moskalenko I.V., et al. Secondary antiprotons and propagation of cosmic rays in the Galaxy. *Astrophysical Journal*, 2002, v. 565, pp. 280-296.
- [41] Strong A. W., Moskalenko I. V., and Reimer O. Diffuse galactic continuum gamma rays: a model compatible with EGRET data and cosmic-ray measurements. *Astrophysical Journal*, 2004, v. 613, pp. 962



- [42] Casandjian J.-M. and Grenier I.A. A revised catalogue of EGRET gamma-ray sources. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, v. 489, pp. 849-883.
- [43] Tavani M., et al. The AGILE mission. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, v. 502, pp. 995-1013.
- [44] Pittori C., et al. First AGILE catalog of high-confidence gamma-ray sources. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, v. 506, pp. 1563-1574.
- [45] Verrecchia F., Pittori C., Chen A. W., et al. An updated list of AGILE bright gamma-ray sources and their variability in pointing mode. *Astronomy & Astrophysics*, vol. 558, A137, 2013.
- [46] Atwood W.B., et al. The Large Area Telescope on the Fermi gamma-ray telescope mission. *Astrophysical Journal*, 2009, v. 697, pp. 1071-1102.
- [47] Abdo A.A., et al. The on-orbit calibration of the Fermi Large Area Telescope. *Astroparticle Physics*, 2009, v. 32, pp. 193-219.
- [48] Abdo A.A., et al. Fermi Large Area Telescope first source catalog. *Astrophysical Journal*, 2010, v. 188, pp. 405-436.
- [49] Nolan P.L., et al. Fermi Large Area Telescope second source catalog. *Astrophysical Journal Suppl.*, 2012, v. 199, p. 31.
- [50] Acero F., et al. Fermi Large Area Telescope third source catalog. *Astrophysical Journal Suppl.*, 2015, v. 218, p. 23; arXiv :1501.02003, 2015.
- [51] Bühler R. Status of space-based gamma-ray astronomy. arXiv :1509.00012, 2015.
- [52] Ackermann M., et al. The first Fermi-LAT catalog of sources above 10 GeV. *Astrophysical Journal Suppl.*, 2013, v. 209, pp. 1-34.
- [53] Ackermann M., et al. 2FHL: the second catalog of hard Fermi-LAT sources. *Astrophysical Journal Suppl.*, 2016, v. 222 pp. 1-19.
- [54] Galbraith W. and Jelley J. J. *Atmosph. Phys.*, 1955, v. 6, p. 250.
- [55] Chudakov A.E. and Nesterova N.M. Cherenkov radiation of extensive air showers. *Il Nuovo Cimento*, 1958, v. 1, no. 2, pp. 606-611.

- [56] Чудаков А.Е. и др. Поиски фотонов с энергией  $\sim 10^{13}$  эВ от локальных источников космического радиоизлучения. Труды ФИАН, 1965, т. 26, с. 118-141.
- [57] Weekes T.C., et al. Observation of TeV gamma rays from the Crab Nebula using the atmospheric Cherenkov imaging technique. *Astrophysical Journal*, 1989, v. 342, pp. 379-395.
- [58] Weekes T.C. TeV gamma-ray astronomy: the story so far. arXiv:0811.1197, 2008.
- [59] Hillas A.M. Evolution of ground-based gamma-ray astronomy from the early days to the Cherenkov Telescope Arrays. *Astroparticle Physics*, 2013, v. 43, pp. 19-43.
- [60] Фиделис В.В. и др. *Астроном. журнал*, 2005, т. 82, №11, с. 963-966.
- [61] Фиделис В.В. и др. *Письма в АЖ*, 2005, т. 31, №9, с. 643-647.
- [62] Ong R.E. et al. Highlights from VERITAS on VHE gamma-ray sources in our Galaxy. *Advances in Space Research*, 2014, v. 53, pp. 1483-1491.
- [63] Mazin D., et al. Upgrade of the MAGIC telescopes. arXiv:1410.5073, 2014.
- [64] Balzer A., et al., The H.E.S.S. central data acquisition system. arXiv:1311.3486, 2013.
- [65] Dorner D., et al. FACT – monitoring blazars at very high energies. arXiv:1502:02582, 2015.
- [66] Mizumura Y., et al. Searches for very high energy gamma rays from blazars with CANGAROO-III telescope in 2005-2009. arXiv:1202.2181, 2012.  
H. Kubo et al., *New Astron. Rev.*, 48, 323 (2004). (CANGAROO)
- [67] CTA Consortium. Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental Astronomy*, 2011, v. 32, pp. 193-316.
- [68] Patricelli B., et al. Estimation of TeV gamma-ray duty cycle of Mrk 421 with the Milagro observatory. arXiv:1401.2464, 2014.
- [69] Westerhoff S., et al. HAWC: a next-generation all-sky gamma-ray telescope. *Advances in Space Research*, 2014, v. 53, pp. 1492-1498.

- [70] Han-Rong Wu, et al. Study on optimization of water Cherenkov detector array of LHASSO project for surveying VHE gamma rays sources. arXiv:1307.1025, 2013.
- [71] Bartoli B., et al. Identification of the TeV gamma-ray source ARGO J2031+4157 with the Cygnus Cocoon. arXiv:1406.6436, 2014.
- [72] Sako T.K., et al. Exploration of a 100 TeV gamma-ray northern sky using the Tibet air-shower array combined with an underground water-Cherenkov muon detector array. *Astroparticle Physics*, 2009, v. 32, pp. 177-184.
- [73] Tluczykont M., et al. The HiSCORE concept for gamma-ray and cosmic-ray astrophysics beyond 10 TeV. *Astroparticle Physics*, 2014, v. 56, pp. 42-53.
- [74] Ackermann M., et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV. *Astrophysical Journal*, 2015, v. 799, pp. 86-109.
- [75] Stecker F.W. Observations of galactic gamma-rays and their implications for galactic structure studies. *Astrophysical Journal*, 1977, v. 212, pp. 60-70.
- [76] Hermsen W. COS-B views on the diffuse galactic gamma-ray emission and some point sources. *Space Science Reviews*, 1988, v. 49, pp. 17-39.
- [77] Hunter S.D., et al. EGRET observations of the diffuse gamma-ray emission from the galactic plane. *Astrophysical Journal*, 1997, v. 481, pp. 205-240.
- [78] Sreekumar P., et al. EGRET observations of the extragalactic gamma-ray emission. *Astrophysical Journal*, 1998, v. 494, pp. 523-534.
- [79] Strong A.W., Moskalenko I.V., and Reimer O. A new determination of the extragalactic diffuse gamma-ray background from EGRET data. *Astrophysical Journal*, 2004, v. 613, pp. 956-961.
- [80] Ackermann M., et al. Fermi-LAT observations of the diffuse gamma-ray emission: implications for cosmic rays and the interstellar medium. *Astrophysical Journal*, 2012, v. 750, pp. 3-37.
- [81] Ackermann M., et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV. *Astrophysical Journal*, 2015, v. 799, pp. 86-109.

- [82]Meng Su, et al. Giant gamma-ray bubbles from Fermi-LAT: active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind? *Astrophysical Journal*, 2010, v. 724, pp. 1044-1082.
- [83]Ackermann M., et al. The spectrum and morphology of the Fermi bubbles. *Astrophysical Journal*, 2014, v. 793, pp. 64-97.
- [84]Pshirkov M., et al. Evidence of Fermi bubbles around M31. arXiv:1603.07245, 2016.
- [85]Abdo A., et al. A measurement of the spatial distribution of diffuse TeV gamma-ray emission from the Galactic plane with Milagro. *Astrophysical Journal*, 2008, v. 688, pp. 1078-1083.
- [86]L. Ma (ARGO-YBJ Collaboration), in *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2011*, v. 7, pp. 2-5.
- [87]Abramowski A., et al. Diffuse Galactic gamma-ray emission with H.E.S.S. *Physical Review D*, 2014, v. 90, pp. 122007-1-122007-8.
- [88]Лучков Б.И. Гамма-диагностика солнечных вспышек. *Соровский образовательный журнал*, 2000, т. 6, №9, с. 73-79.
- [89]Murphy R.J., et al. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1987, v. 63, no. , pp. 721.
- [90]Peterson L. and Winckler J.R. Short gamma-ray burst from a solar flare. *Physical Review Letters*, 1958, v. 1, no. 6, pp. 205-206.
- [91]Akimov V., Afanasyev V., Belaousov A., Blochintsev I., Kalinkin L., Leikov N., Nesterov V., Volzhenskaya V., Galper A., Chesnokov V., Kirillov-Ugryumov V., Luchkov B., Ozerov Yu., Popov A., Rudko V., Runtso M., Voronov S., Zemskov V., Fradkin M., Kurnosova L., Rusakovich M., **Topchiev N.**, Tugaenko V., Tian T., Chuikin E., Ishkov V., Gros M., Grenier I., Barouch E., Wallyn P., Bazer-Bachi A., Lavigne J., Olive J., Juchniewicz J. Observation of high energy gamma-rays from the Sun with GAMMA-1 telescope ( $E > 30$  MeV): in *Proc. 22<sup>nd</sup> International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991*, v. 3, pp. 73-76.

- [92]Акимов В., Афанасьев В., Белоусов А., Блохинцев И., Волженская В., Калинин Л., Лейков Н., Нестеров В., Гальпер А., Воронов С., Земсков В., Кириллов-Угрюмов В., Лучков Б., Озеров Ю., Попов А., Рудько В., Рунцо М., Чесноков В., Курносова Л., Русакович М., **Топчиев Н.**, Фрадкин М., Чуйкин Е., Тугаенко В., Тянь Т., Ишков В., Гро М., Гринье И., Баруш Е., Валлин П., Базер-Баши А., Лавинь Ж., Олив Ж., Юхневич Ю. Регистрация гамма-лучей высоких энергий телескопом ГАММА-1 при солнечных вспышках 26 марта и 15 июня 1991 г. Письма в Астрономический журнал, 1992, т. 18, №2, с. 167-172.
- [93]Leikov N., Akimov V., Volsenskaya V., Kalinkin L., Nesterov V., Galper A., Zemskov V., Ozerov Yu., **Topchiev N.**, Fradkin M., Chuikin E., Tugaenko V., Gros M., Grenier I., Bazer-Bachi A., Lavigne J., Olive J. Spectral characteristics of high-energy gamma-ray solar flares. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1993, v. 97, no. 1, pp. 345-348.
- [94]Bazer-Bachi A.R., Lavigne J.M., Olive J.F., Gros M., Grenier I., Leikov N.G., Akimov V.V., Volsenskaya V.A., Kalinkin L.F., Nesterov V.E., Galper A.M., Zemskov V.M., Ozerov Y.V., **Topchiev N.P.**, Fradkin M.I., Chuikin E.I., Tugaenko V.Y. High-energy gamma rays from the Sun as seen by the GAMMA-1 telescope. Nuclear Physics B Supplements, 1993, v. 33AB, no. 1-2, pp. 208-212.
- [95]Гальпер А., Земсков В., Кочаров Г., Лучков Б., Озеров Ю., **Топчиев Н.**, Тугаенко В., Фрадкин М., Чуйкин Е., Базер-Баши А., Гро М., Лавинь Ж., Олив Ж., Юхневич Ю. Временная структура гамма-излучения солнечной вспышки 26 марта 1991 г. Известия Академии наук (сер. физ.), 1993, т. 57, №7, с. 132-134.
- [96]Leikov N.G., Akimov V.V., Volsenskaya V.A., Kalinkin L.F., Nesterov V.E., Galper A.M., Zemskov V.M., Ozerov Yu.V., **Topchiev N.P.**, Fradkin M.I., Chuikin E.I., Tugaenko V.Yu., Gros M., Grenier I., Bazer-Bachi A.R., Lavigne J.-M., Olive J.-F.. Energy spectra of solar flare gamma-

- ray emission in the range 0.03-2 GeV registered by GAMMA-1 telescope. *Advances in Space Research*, 1993, v. 13, no. 9, pp. 249-253.
- [97] Kanbach G., et al. Detection of a long-duration solar gamma-ray flare on June 11, 1991 with EGRET on COMPTON-GRO. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1993, v. 97, pp. 349-353.
- [98] Schneid E.J. et al. EGRET observations of X-class solar flares. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1996, v. 120, pp. 299-302.
- [99] Thompson D.J. and Bertsch D.L. Energetic gamma ray experiment telescope high-energy gamma ray observations of the Moon and quiet Sun. *Journal of Geophysical Research*, 1997, v. 102, no. A7, pp. 14735-14740.
- [100] Abdo A.A. et al. Fermi large area telescope observations of two gamma-ray emission components from the quiescent Sun. *Astrophysical Journal*, 2011, v. 734, pp. 116-125.
- [101] Ackermann M., et al. High-energy gamma-ray emission from solar flares: summary of Fermi Large Area Telescope detections and analysis of two M-class flares. *Astrophysical Journal*, 2014, v. 787, pp. 15-27.
- [102] Kenny C. Y. Ng., et al. First observation of time variation in the solar-disk gamma-ray flux with Fermi. *arXiv:1508.06276*, 2015.
- [103] Jungman G., Kamionkowski M., Griest K. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports*, 1996, v. 267, pp. 195-373.
- [104] Рябов В.А., Царев В.А., Цховребов А.М. Поиски частиц темной материи. *Успехи физических наук*, 2008, т. 178, №11, с. 1129-1164.
- [105] Feng J. Dark matter candidates from particle physics and methods of detection. *arXiv:1003.0904*, 2010.
- [106] Троицкий С.В. Нерешенные проблемы физики элементарных частиц. *Успехи физических наук*, 2012, т. 182, №1, с. 77-103.
- [107] Березинский В.С., Докучаев В.И., Ерошенко Ю.Н. Мелкомасштабные сгустки темной материи. *Успехи физических наук*, 2014, т. 184, №1, с. 3-42.

- [108]Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛЕНАНД, 2016.
- [109]Deliyergiyev M.A. Recent progress in search for dark sector signatures. arXiv:1510.06927, 2015.
- [110]Gaskins J.M. A review of indirect searches for particle dark matter. arXiv:1604.00014, 2016.
- [111]Bringman T., Weniger C. Gamma ray signals from dark matter: concepts, status and prospects. arXiv:1208.5481.
- [112]Baltz E.A., et al. Pre-launch estimates for GLAST sensitivity to dark matter annihilation signals. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2008, 07, 013.
- [113]Bertone G., et al. Gamma ray lines from a universal extra dimension. arXiv:1009.5107, 2010.
- [114]Albert A., et al. Searching for dark matter annihilation in recently discovered Milky Way satellites with Fermi-Lat. arXiv:1611.03184, 2016.
- [115]Nekrassov D. et al. Searches for DM signals from the Galactic Centre region with H.E.S.S. arXiv:1106.2752, 2011.
- [116]Charles E. et al. Sensitivity projections for dark matter searches with the Fermi Large Area Telescope. arXiv:1605.02016, 2016.
- [117]Ackermann M., et al. Updated search for spectral lines from Galactic dark matter interactions with Pass 8 data from Fermi Large Area Telescope. arXiv:1506.00013, 2015.
- [118]Atwood W., et al. Pass 8: toward the full realization of the Fermi-LAT scientific potential. arXiv:1303.3514, 2013.
- [119]Lefranc V. et al. Dark matter search in the inner Galactic center halo with H.E.S.S. arXiv:1608.08453, 2016.
- [120]Wim de Boer. Do gamma rays reveal our galaxy's dark matter? *CERN COURIER*, 2005, 29491 (November 25).
- [121]Clark H.A., et al. Substructure considerations rule out dark matter interpretation of Fermi Galactic Center excess. arXiv:1612.01539, 2016.

- [122]Bartels R., et al. Strong Support for the Millisecond Pulsar Origin of the Galactic Center GeV Excess. arXiv:1506.05104, 2015.
- [123]Horiuchi Sh., et al. Investigating the Uniformity of the Excess Gamma rays towards the Galactic Center Region. arXiv:1604.01402, 2016.
- [124]Lopez-Coto Ruben, et al. Discovery of Tev gamma-ray emission from the pulsar wind nebula 3C 58 by MAGIC. arXiv:1509.09173, 2015.
- [125]Zaborov D., et al. AGN observations with a less than 100 GeV threshold using H.E.S.S. II. arXiv:1509.06509, 2015.
- [126]Archambault S. et al. Gamma-ray observations of Tycho's supernova remnant with VERITAS and Fermi. arXiv:1701.06740, 2017.
- [127]H.E.S.S. Collaboration. Discovery of variable VHE gamma-ray emission from the binary system 1 FGL J1018.6-5856. arXiv:1503.02711, 2015.
- [128]Dwek E. and Krennrich F. The extragalactic background light and the gamma-ray opacity of the universe. *Astroparticle Physics*, 2013, v. 43, pp. 112-133.
- [129]Gaggero D., et al. Diffuse cosmic rays in the Galactic center: a novel interpretation of H.E.S.S. and Fermi-LAT gamma-ray data. arXiv:1702.01124, 2017.
- [130]Fermi -LAT Collaboration. 3FHL: The third catalog of hard Fermi-LAT sources. arXiv:1702.00664, 2017.
- [131]Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий. М: Мир, 1984.
- [132]Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Атомиздат, 1977.
- [133]Москаленко Е.И. Методы внеатмосферной астрономии. М.: Наука, 1984.
- [134]Мурзин В.С. Физика космических лучей. М.: Атомиздат, 1979.
- [135]Moiseev A. et al. The anti-coincidence detector for the GLAST large area telescope. *Astroparticle Physics*, 2007, v. 27, pp. 339-358.
- [136]Bignami G. et al., The COS-B experiment for gamma-ray astronomy. *Space Science Instrumentation*, 1975, v. 1, pp. 245-268.



- [137] Schoenfelder V. et al., *Astrophys. J. Suppl.*, 1993, v. 86, no. 2, p. 657.
- [138] Fichtel C. EGRET overview: achievements in the light of expectations. *Astronomy and Astrophysics, Supplement series*, 1996, v. 120, pp. 23-29.
- [139] Pittori C. and Tavani M. Scientific goals and instrument performance of the gamma-ray imaging detector AGILE. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 2004, v. 134, pp. 72-74.
- [140] Torii S. et al. The CALorimetric Electron Telescope (CALET): high energy astroparticle physics observatory on the International Space Station. *PoS(ICRC2015)581*.
- [141] Gargano F. et al. DAMPE space mission: first data. *arXiv:1701.05046*, 2017.
- [142] Акимов В.В., Балебанов В.М., Белоусов А.С., Воронов С.А., Гальпер А.М., Герасимов И.А., Григорьев В.А., Добриян М.Б., Земсков В.М., Калинин Л.Ф., Кириллов-Угрюмов В.Г., Курносова Л.В., Лучков Б.И., Нестеров В.Е., Озеров Ю.В., Полуэктов В.П., Попов А.В., Прилуцкий О.Ф., Родин В.Г., Рунцо М.Ф., Серов А.В., Табалдыев С.Р., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Чуйкин Е.И., Юркин Ю.Т. Светосильный гамма-телескоп ГАММА-1. В сб. «Космофизические исследования», изд-во «Энергоатомиздат», Москва, 1986, с. 3-10.
- [143] Белоусов А.С., Воронов С.А., Гальпер А.М. и др. Многослойная широкозаязорная искровая камера-конвертер для регистрации космического гамма-излучения. В сб.: «Научное космическое приборостроение», изд-во «Наука», Москва, 1981, с. 27-31.
- [144] Akimov V., Bazer-Bachi R., Bonfand E., Galper A., et al. An accelerator evaluation of the performance of the Soviet-French wide-gap spark chamber for gamma-ray astronomy. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 147, is. 2, pp. 329-332, 1977.
- [145] Акимов В.В., Белоусов А.С., Блохинцев И.Д., Воронов С.А., Григорьев В.А., Добриян М.Б., Калинин И.В., Калинин Л.Ф., Каримов Б.Т., Колдашев С.В., Моисеев А.А., Попов А.В., Прохин В.Л.,

- Рунцо М.Ф., Русакович М.А., **Топчиев Н.П.**, Чуйкин Е.И. Калибровка систем гамма-телескопа «ГАММА-1» на ускорителях. В сб.: «Научное космическое приборостроение», изд-во «Металлургия», Москва, 1983, с. 29-38.
- [146]Воронов С.А., Григорьев В.А., Калинин И.В. и др. Измерение характеристик времяпролетной системы гамма-телескопа «ГАММА-1». В сб.: «Космические исследования», изд-во «Энергоатомиздат», Москва, 1983, с. 59-66.
- [147]Бененсон А.И., Курносова Л.В., Русакович М.А., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И. Газовый черенковский счетчик большой площади для исследования космического излучения. Приборы и техника эксперимента, т. 4, с.45-48, 1986.
- [148]Курносова Л.В., Разоренов Л.А., Русакович М.А., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И. Газовые черенковские счетчики в гамма-астрономии. В сб.: «Проблемы методики современного ядерно-физического эксперимента», МИФИ, Москва, 1991, с. 42-52.
- [149]Воронов С.А., Гальпер А.М., Земсков В.М., Зверев В.Г., Рудько В.А., Озеров Ю.В., Попов А.В., Соболева М.Н., Чесноков В.Ю., Курносова Л.В., Русакович М.А., Разоренов Л.А., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Калинин Л.Ф. Электроны высокой энергии в радиационном поясе Земли, Космические исследования, 1993, т. 31, вып. 3, с. 138-140.
- [150]Dogiel V.A., Kostin A.P., Kurnosova L.V., Razorenov L.A., Rusakovich M.A., **Topchiev N.P.**, Fradkin M.I. On the gamma-astronomy observations in the energy range 4-400 GeV. In Proc. 20th ICRC, 1987, v. 2, pp. 356-359.
- [151]Dogiel V.A., Fradkin M.I., Kurnosova L.V., Razorenov L.A., Rusakovich M.A., **Topchiev N.P.** Some tasks of observational gamma-ray astronomy in the energy range 5-400 GeV. Space Science Reviews, 1988, v. 49, pp. 215-226.

- [152]Fradkin M.I., Ginzburg V.L., Gorchakov E.V., Kaplin V.A., Kurnosova L.V., Labensky A.G., Runtso M.F., **Topchiev N.P.** Gamma-radiation of the high energy and GAMMA-400 project. In Proc. 26th ICRC, 1995, v. 3, pp. 705-708.
- [153]Гинзбург В.Л., Курносова Л.В., Разоренов Л.А., Фрадкин М.И., Лабенский А.Г., **Топчиев Н.П.**, Русакович М.А., Каплин В.А., Рунцо М.Ф., Макляев Е.Ф., Логинов В.А., Линин И.В., Горчаков Е.В., Хованская А.И. Космическое гамма-излучение высокой энергии и проект гамма-телескопа ГАММА-400. Препринт ФИАН №3, 1995.
- [154]Fradkin M.I., Ginzburg V.L., Kurnosova L.V., Labensky A.G., Razorenov L.A., Rusakovich M.A., **Topchiev N.P.**, Kaplin V.A., Runtso M.F., Gorchakov E.V., Ignatiev P.P. Some problems of the detection of high-energy gamma-radiation in space. Advances in Space Research, 1995, v. 15, no. 5, pp. 93-94.
- [155]Гинзбург В.Л., Курносова Л.В., Лабенский А.Г., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Каплин В.А., Каплин Д.В., Логинов В.А., Макляев Е.Ф., Рунцо М.Ф., Горчаков Е.В. К вопросу о роли альbedo из calorиметра телескопа «ГАММА-400» при регистрации первичного гамма-излучения: Известия Академии наук (сер. физ.), 1997, т. 61, №3, с. 613-615.
- [156]Гинзбург В.Л. Каплин В.А. Каракаш А.И., Курносова Л.В., Рунцо М.Ф., Солдатов А.П., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Черниченко С.К., Шеин И.В. Российский вариант телескопа для регистрации диффузного гамма-излучения в области энергий 10-1000 ГэВ: Известия Академии наук (сер. физ.), 2005, т. 69, №3, с. 428-430.
- [157]Гинзбург В.Л., Каплин В.А., Каракаш А.И., Курносова Л.В., Лабенский А.Г., Рунцо М.Ф., Солдатов А.П., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Черниченко С.К., Шеин И.В. Разработка гамма-телескопа ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения

- с энергиями до 1 ТэВ. Космические исследования, 2007, т. 45, №5, с. 475-477.
- [158] Гинзбург В.Л., Каплин В.А., Рунцо М.Ф., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И. Модернизированный гамма-телескоп ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 3 ТэВ. Известия РАН (сер. физ.), 2009, т. 73, №5, с. 703-705.
- [159] Ginzburg V.L., Galper A.M., Fradkin M.I., Kaplin V.A., Runtso M.F., **Topchiev N.P.**, and Zverev V.G. The GAMMA-400 Project. Investigation of cosmic gamma-radiation and electro-positron fluxes in the energy range of 1-3000 GeV. Preprint of Lebedev Physical Institute no. 10, 2009.
- [160] Ginzburg V.L., Galper A.M., Kaplin V.A., Runtso M.F., **Topchiev N.P.**, Fradkin M.I., and Zverev V.G. Status of the GAMMA-400 Project. Investigation of cosmic gamma-radiation and electro-positron fluxes in the energy range of 1-3000 GeV. In Proc. of the 31<sup>st</sup> International Cosmic-Ray Conference, Łódź, Poland, 2009.
- [161] Гальпер А.М., **Топчиев Н.П.**, Аптекарь Р.Л., Архангельская И.В., Боецио М., Бонвичини В., Вакки А., Геча В.Я., Долгошеин Б.А., Зампа Н., Зверев В.Г., Каплин В.А., Качанов В.А., Мазец Е.П., Меньшенин А.Л., Пикоцца П., Прилуцкий О.Ф., Родин В.Г., Рунцо М.Ф., Спиллантини П., Сучков С.И., Фарбер М.О., Фрадкин М.И., Юркин Ю.Т. Научные задачи и современное состояние проекта ГАММА-400. Известия РАН (сер. физ.), 2011, т. 75, №6, с. 926-928.
- [162] Galper A.M., Aptekar R.L., Arkhangel'skaya I.V., Boezio M., Bonvicini V., Dolgoshein B.A., Farber M.O., Fradkin M.I., Gecha V.Ya., Kachanov V.A., Kaplin V.A., Mazets E.P., Menshenin A.L., Picozza P., Prilutskii O.F., Rodin V.G., Runtso M.F., Spillantini P., Suchkov S.I., **Topchiev N.P.**, Vacchi A., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zverev V.G. The possibilities of simultaneous detection of gamma rays, cosmic-ray electrons and positrons on the GAMMA-400 space observatory. Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, v. 7, pp. 75–78.

- [163]Galper A.M., Aptekar R.L., Arkhangelskaya I.V., Boezio M., Bonvicini V., Dolgoshein B.A., Farber M.O., Fradkin M.I., Gecha V.Ya., Kachanov V.A., Kaplin V.A., Mazets E.P., Menshenin A.L., Picozza P., Prilutskii O.F., Runtso M.F., Spillantini P., Suchkov S.I., **Topchiev N.P.**, Vacchi A., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zverev V.G. GAMMA-400 space observatory. II Nuovo Cimento, 2011, v. 34C, no. 3, pp. 71-75.
- [164]Гальпер А.М., Борисов С.В., Зверев В.Г., Сучков С.И., **Топчиев Н.П.**, Фарбер М.О., Фрадкин М.И., Юркин Ю.Т. Метод восстановления направления прилета гамма-квантов в системе конвертер и калориметр. Краткие сообщения по физике, ФИАН, 2011, №7, с. 14-23.
- [165]Galper A.M., Adriani O., Aptekar R.L., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Boezio M., Bonvicini V., Boyarchuk K.A., Gusakov Yu.V., Farber M.O., Fradkin M.I., Kachanov V.A., Kaplin V.A., Kheymits M.D., Leonov A.A., Longo F., Maestro P., Marrocchesi P., Mazets E.P., Mocchiutti E., Moiseev A.A., Mori N., Moskalenko I., Naumov P.Yu., Papini P., Picozza P., Rodin V.G., Runtso M.F., Sparvoli R., Spillantini P., Suchkov S.I., Tavani M., **Topchiev N.P.**, Vacchi A., Vannuccini E., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zverev V.G. Status of the GAMMA-400 project. Advances in Space Research, v. 51, no. 2, pp. 297-300 (2013).
- [166]Galper A.M., Adriani O., Aptekar R.L., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Boezio M., Bonvicini V., Boyarchuk K.A., Fradkin M.I., Gusakov Yu.V., Kaplin V.A., Kachanov V.A., Kheymits M.D., Leonov A.A., Longo F., Mazets E.P., Maestro P., Marrocchesi P., Mereminskiy I.A., Mikhailov V.V., Moiseev A.A., Mocchiutti E., Mori N., Moskalenko I.V., Naumov P.Yu., Papini P., Picozza P., Rodin V.G., Runtso M.F., Sparvoli R., Spillantini P., Suchkov S.I., Tavani M., **Topchiev N.P.**, Vacchi A., Vannuccini E., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zverev V.G., Zirakashvili V.N. Design and performance of the GAMMA-400 gamma-ray telescope for the dark matter searches. AIP Conf. Proc., v. 1516, pp. 288-292, 2013.

- [167]Mocchiutti E., Galper A.M., Adriani O., Aptekar R.L., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Boezio M., Bonvicini V., Boyarchuk K.A., Carbone R., Cumani P., Fradkin M.I., Gusakov Yu.V., Kaplin V.A., Kachanov V.A., Kheyimits M.D., Leonov A.A., Longo F., Mazets E.P., Maestro P., Marrocchesi P., Mereminskiy I.A., Mikhailov V.V., Moiseev A.A., Mori N., Moskalenko I.V., Naumov P.Yu., Papini P., Picozza P., Rodin V.G., Runtso M.F., Sarkar R., Sparvoli R., Spillantini P., Suchkov S.I., Tavani M., **Topchiev N.P.**, Vacchi A., Vannuccini E., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zverev V.G., Zirakashvili V.N. The GAMMA-400 space experiment: gammas, electrons and nuclei measurements, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), v. 239–240, pp. 204–209, 2013.
- [168]Гальпер А.М., Адриани О., Аптекарь Р.Л., Архангельская И.В., Архангельский А.И., Боецио М., Бонвичини В., Боярчук К.А., Вакки А., Вануччини Е., Гусаков Ю.В., Зампа Н., Зверев В.Г., Зиракашвили В.Н., Каплин В.А., Качанов В.А., Леонов А.А., Лонго Ф., Мазец Е.П., Маэстро П., Маррокези П., Мереминский И.А., Михайлов В.В., Моисеев А.А., Моккьюти Е., Мори Н., Москаленко И., Наумов П.Ю., Папини П., Пикоцца П., Родин В.Г., Рунцо М.Ф., Спарволи Р., Спиллантини П., Сучков С.И., Тавани М., **Топчиев Н.П.**, Фрадкин М.И., Хеймиц М.Д., Юркин Ю.Т. Характеристики гамма-телескопа ГАММА-400 для поиска следов темной материи. Известия РАН (сер. физ.), 2013, т. 77, №11, с. 1605–1608.
- [169]Гинзбург В.Л. и Сыроватский С.И. Некоторые вопросы гамма- и рентгеновской астрономии. Успехи физических наук, т. 84, вып. 2, стр. 201-242, 1964.
- [170]Leonov A.A, Galper A.M., Bonvicini V., **Topchiev N.P.**, Adriani O., Aptekar R.L., Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Bergstrom L., Berti E., Bigongiari G., Bobkov S.G., Boezio M., Bogomolov E.A., Bonechi S., Bonghi M., Bottai S., Castellini G., Cattaneo P.W., Cumani P., Dedenko G.L., De Donato C., Dogiel V.A., Gorbunov M.S., Gusakov Yu.V., Hnatyk B.I.,

- Kadilin V.V., Kaplin V.A., Kaplun A.A., Kheymits M.D., Korepanov V.E., Larsson J., Loginov V.A., Longo F., Maestro P., Marrocchesi P.S., Mikhailov V.V., Mocchiutti E., Moiseev A.A., Mori N., Moskalenko I.V., Naumov P.Yu., Papini P., Pearce M., Picozza P., Rappoldi A., Ricciarini S., Runtso M.F., Ryde F., Serdin O.V., Sparvoli R., Spillantini P., Suchkov S.I., Taraskin A.A., Tavani M., Tiberio A., Tyurin E.M., Ulanov M.V., Vacchi A., Vannuccini E., Vasilyev G.I., Yurkin Yu.T., Zampa N., Zirakashvili V.N., Zverev V.G. Separation of electrons and protons in the GAMMA-400 gamma-ray telescope. *Advances in Space Research* 56 (2015) 1538-1545.
- [171]Barbellini G. et al. The AGILE silicon tracker: testbeam results of the prototype silicon detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 490 (2002), 146-158.
- [172]Funk S., Hinton J.A., for the CTA Consortium. Comparison of Fermi-CTA in the region between 10-100 GeV. *Astroparticle Physics* 43 (2013), pp. 348-355.
- [173]Churazov E., Khbibullin I., Sunyaev R., Ponti G. Not that long time ago in the nearest galaxy: 3D slice of molecular gas revealed by a 110 years old flare of Sgr A\*. *arXiv:1610.06699*, 2016.
- [174]Bergström L. 130 GeV fingerprint of right-handed neutrino dark matter. *Physical Review D* 86, 103514, 2012.