

**30-я Всероссийская конференция по космическим лучам
Санкт-Петербург, 2-7 июля 2008 г.**



ПРОЕКТ ГАММА-400

**Модернизированный гамма-телескоп ГАММА-400 для
регистрации космического гамма-излучения
с энергиями до 3 ТэВ**

В. Гинзбург¹, В. Каплин², М. Рунцо², Н. Топчиев¹, М. Фрадкин¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук, Москва

²Московский инженерно-физический институт, Москва

Исследование космического гамма-излучения

Регистрация космического гамма-излучения осуществляется двумя методами.

1. Прямые измерения гамма-телескопами, размещаемыми на космических аппаратах, первичных гамма-квантов с определением типа частицы, измерения ее энергии и направления прихода.
2. Получение сведений о гамма-излучении на основе регистрации наземными установками продуктов взаимодействия первичных частиц с веществом атмосферы (частиц ШАЛ).

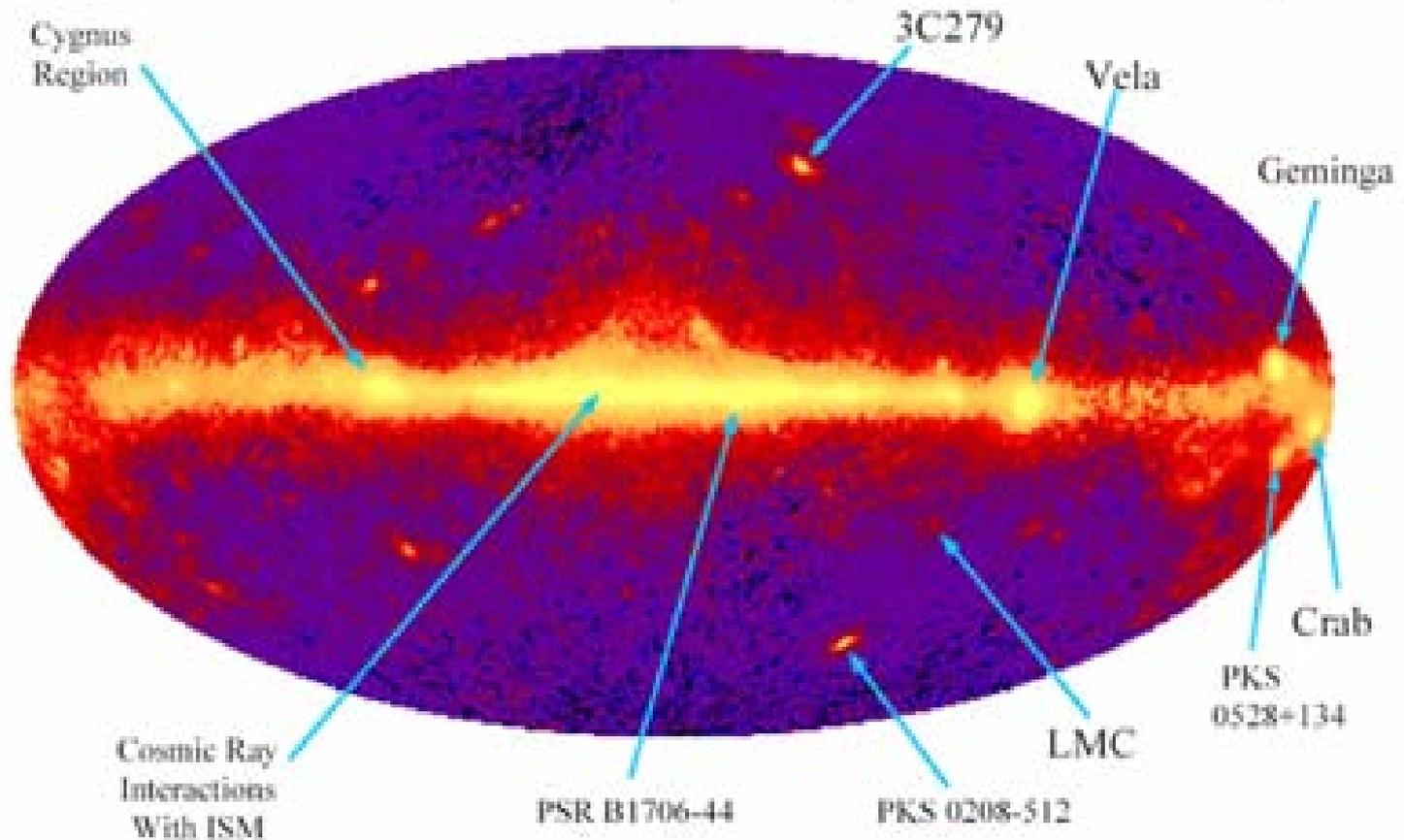
При проведении измерений вторым методом имеется трудность, связанная с тем, что отсутствует достоверная информация о том, какая частица (заряженная или незаряженная) инициировала конкретный ШАЛ.

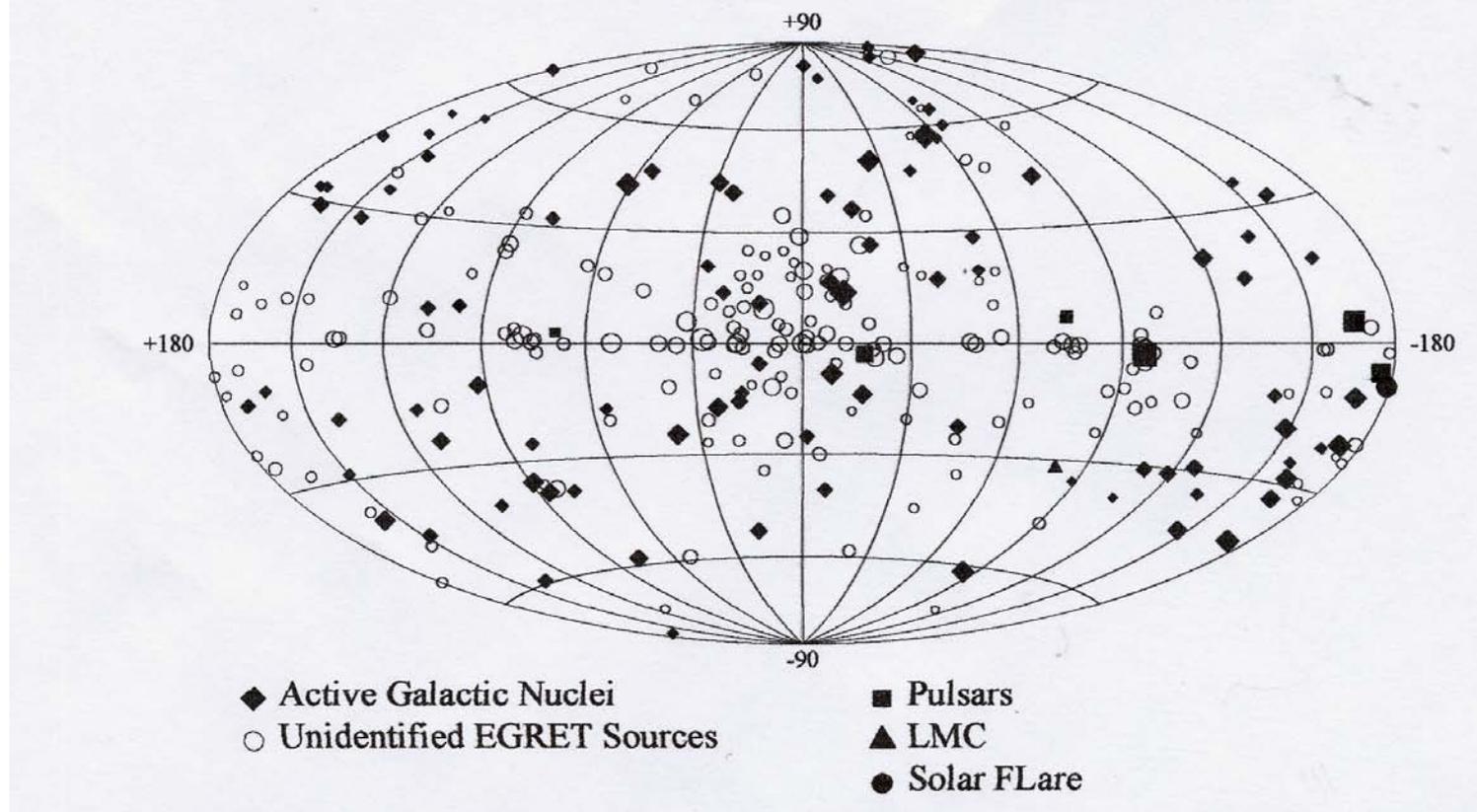
В связи с этим результаты измерений вторым методом диффузной составляющей нельзя считать достаточно достоверными.

Космические аппараты для исследования гамма-излучения							
	OSO-3	SAS-2	COS-B	ГАММА-1	EGRET	GLAST	ГАММА-400
Год запуска	1967	1972	1975	1990	1991	2008	2013*
Интервал между запусками (в среднем 7,5 лет)	5	3	15	1	17	5*	
Длительность функционирования, лет	1,5	1	7,5	1,5	9	5*	5*
Максим. энергия	50 МэВ	1 ГэВ	10 ГэВ	5 ГэВ	30 ГэВ	300 ГэВ*	3000 ГэВ*

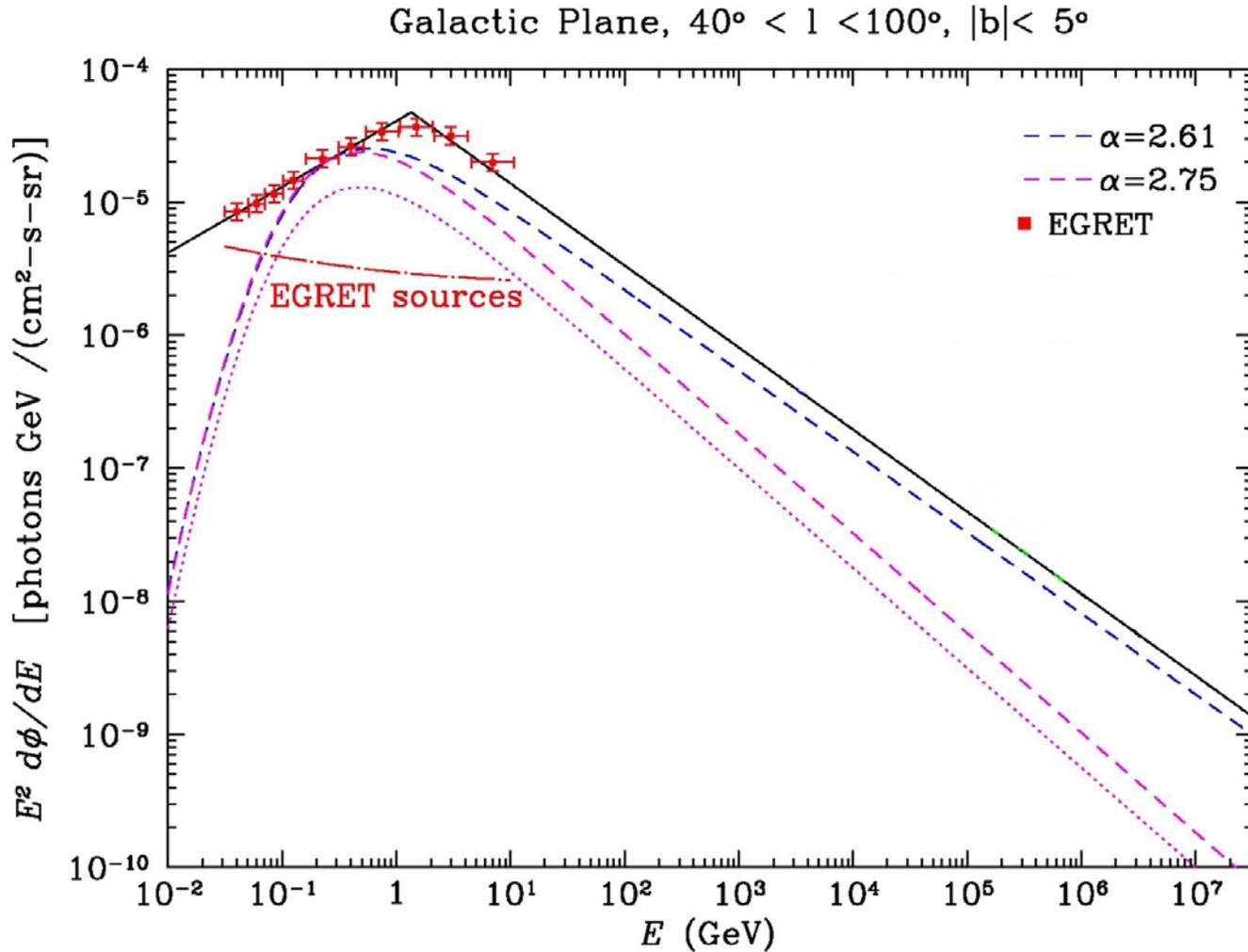
* Планируемые значения соответствующих параметров

EGRET All Sky Map (>100 MeV)





Третий каталог дискретных источников по данным EGRET
Зарегистрирован 271 гамма-источник ($E_\gamma > 100$ МэВ), из которых 170 не идентифицированы. Среди идентифицированных - 93 ядра активных галактик, 5 пульсаров.

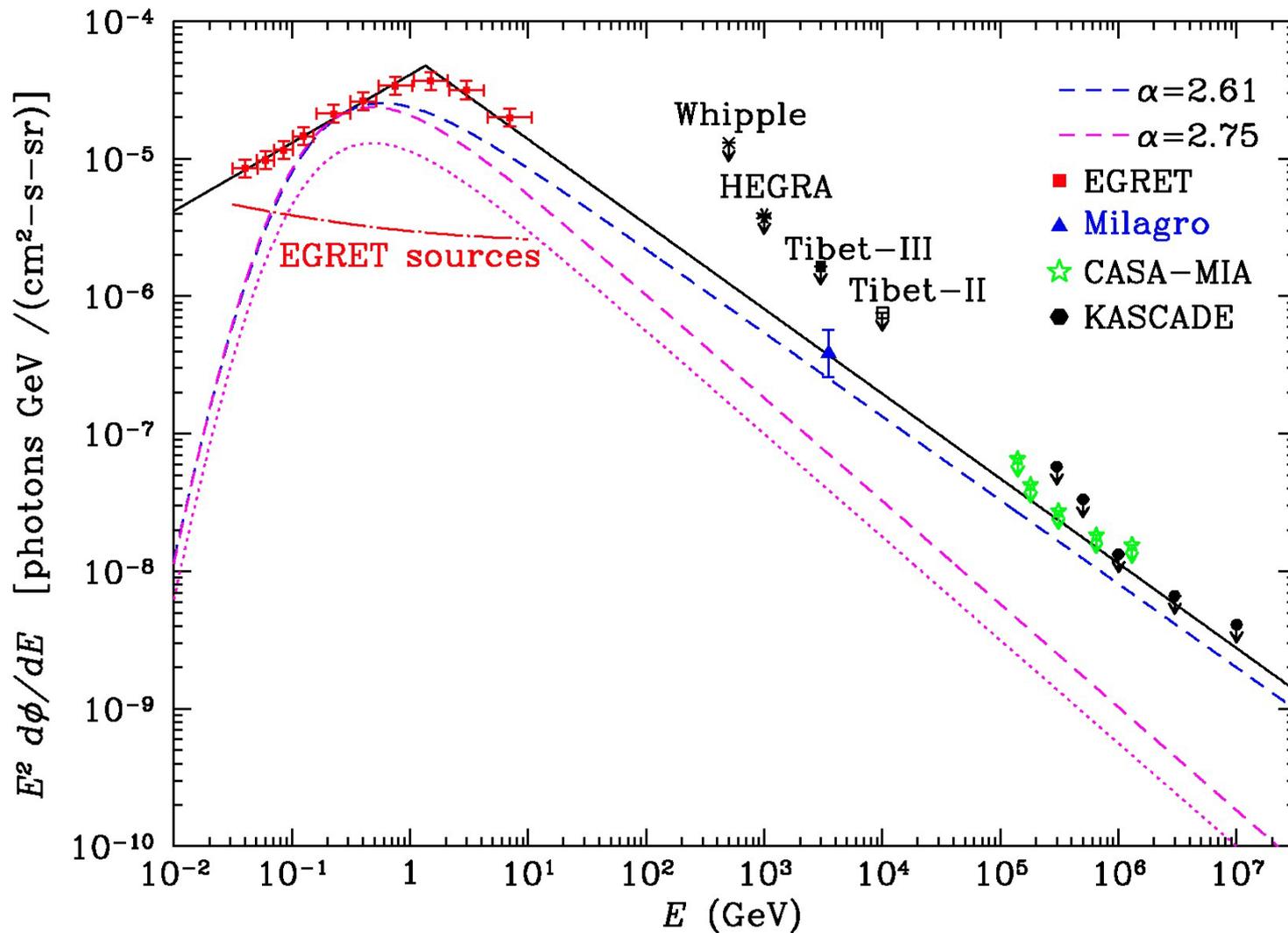


**Спектр диффузного гамма-излучения
в Галактической плоскости.**

Некоторые проблемные вопросы гамма-астрономии, которые планируется исследовать в рамках проекта ГАММА-400

- 1. Энергетический спектр гамма-квантов (диффузная компонента) с $E_\gamma > 30$ ГэВ.
- 1.1. Возможность изменения наклона гамма-спектра, связанного с нерегулярностью спектра первичных протонов («колени») при $E_p \geq 10^{12}$ эВ и при больших E_p .
- 1.2. Поиск «избыточного» излучения (континуум и моноэнергетические линии), обусловленного аннигиляцией частиц, формирующих темную материю.
- 2. Измерение энергетического спектра гамма-квантов дискретных источников в интервале энергий 30-3000 ГэВ.

Galactic Plane, $40^\circ < l < 100^\circ$, $|b| < 5^\circ$



**Спектр диффузного гамма-излучения
в Галактической плоскости.**

Поиск «темной материи»

Два возможных канала испускания гамма-квантов при аннигиляции пары нейтралино.

- 1. Аннигиляция «быстрых» нейтралино с испусканием большого числа разнообразных частиц (антипротоны, позитроны, гамма-кванты).
- 2. Аннигиляция «медленных» нейтралино ($E_{\text{кин}}/m_{\chi} \approx 10^{-3}$) с испусканием двух фотонов, энергии которых близки к массе нейтралино m_{χ} (аналогично аннигиляции покоящихся электрона и позитрона с испусканием двух фотонов с энергией 0,511 МэВ).

Возможность регистрации гамма-линии определяется соотношением между числом гамма-квантов с энергией E , регистрируемых в интервале ΔE , и числом сигналов флуктуационного характера от гамма-квантов диффузной компоненты, попадающих в тот же энергетический интервал.

- В случае поиска гамма-линий это соотношение с ростом энергии меняется в пользу регистрации моноэнергетических фотонов. Поток аннигиляционных гамма-квантов пропорционален квадрату концентрации нейтрино n_χ^2 , сечению аннигиляции $\langle \sigma v \rangle$ и расстоянию l (от детектора до границы Галактики), с которого собираются аннигиляционные гамма-кванты

$$F_{\tilde{f}\tilde{f} \rightarrow \gamma\gamma} = A n_\chi^2 \langle \sigma v \rangle l$$

Поскольку $n_\chi = \frac{\rho_{\tilde{\chi}}}{m_\chi}$, а $\langle \sigma v \rangle = k m_\chi^2$

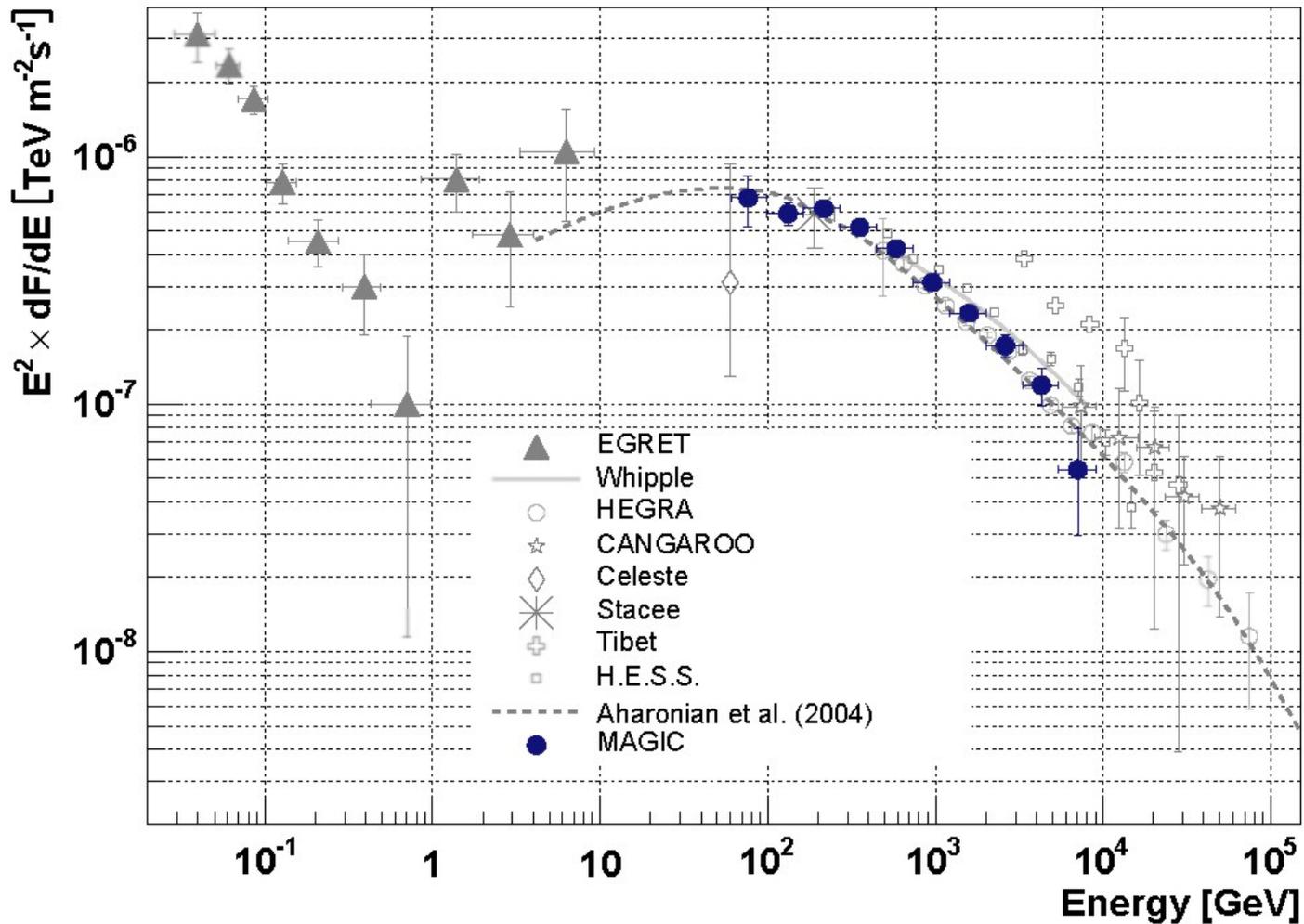
поток таких гамма-квантов не зависит от массы нейтрино:

$$F_{\tilde{f}\tilde{f} \rightarrow \gamma\gamma} = A \rho_{\tilde{\chi}}^2 l$$

Так как поток гамма-квантов диффузного излучения падает с ростом энергии, обнаружение аннигиляционной гамма-линии на этом фоне становится тем более вероятным, чем больше масса нейтрино.

Дискретные гамма-источники

- Наблюдение дискретных гамма-источников и исследование их характеристик (спектральный состав, стабильность излучения во времени, идентификация с определенными астрономическими объектами) проводятся как гамма-телескопами на космических аппаратах (в интервале энергий до 30 ГэВ), так и наземными установками (при энергиях выше 100 ГэВ). Сопоставление энергетических спектров, полученных двумя методами, показывает, что в некоторых случаях наблюдается несовпадение наклонов спектра.
- В качестве примера приведены результаты измерений для одного из наиболее интенсивных объектов – Крабовидной туманности.
- Прямые измерения спектра до 3 ТэВ помогут решить вопрос о природе наблюдаемого несовпадения.



- Энергетический спектр гамма-излучения от Крабовидной туманности.

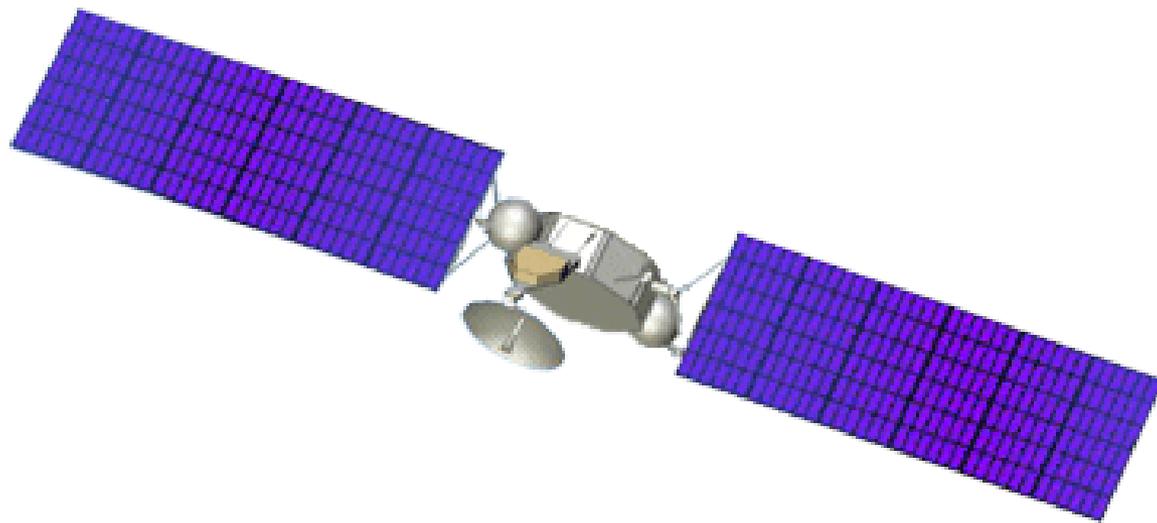
Эксперимент ГАММА-400

Для выполнения указанной программы исследований надо создать гамма-телескоп, который адекватен поставленным задачам и в то же время может быть реализован в условиях нашей действительности.

Работы над проектом ГАММА-400 начались в конце 80-х – начале 90-х годов по инициативе группы сотрудников ФИАН В.Л. Гинзбург, Л.В. Курносовой, Л.А. Разоренова и др. Основным лидером в деле реализации проекта ГАММА-400 была Л.В. Курносова, благодаря активности и настойчивости которой проект ГАММА-400 был включен в Федеральную космическую программу РФ (ФКП РФ). К сожалению два года назад Л.В. Курносова скончалась, не дожив до того дня, когда эксперимент ГАММА-400 будет осуществлен.

ФКП РФ предусматривает создание космической обсерватории ГАММА-400 для исследований в интервале энергий 30-1000 ГэВ в период 2009-2015 гг.

Предполагается, что космический аппарат для обсерватории ГАММА-400 будет создаваться в НПО им. С.А. Лавочкина, где разработан базовый модуль «Навигатор», дающий возможность выводить научную аппаратуру большой массы на высокоапогейную орбиту.



Базовый модуль "Навигатор" – унифицированная космическая платформа для служебных систем космических аппаратов научного назначения, создаваемых в НПО им. С.А.Лавочкина .

Некоторые характеристики модуля «Навигатор»

- 1.Высокоэллиптическая орбита, начальные параметры: высота апогея - 300000 км, высота перигея - 500 км, период обращения - 7 суток, угол наклона орбиты- 51,8°.**
- 2.Ракета-носитель «Зенит» или «Союз».**
- 3.Допустимая масса научной аппаратуры – 1700 кг.**
- 4. Время активного существования – не менее 5 лет.**
- 5.Время баллистического существования на рабочей орбите ИСЗ – не менее 10 лет.**
- 6.Точность ориентации осей научной аппаратуры - (5-10) угловых минут.**
- 7.Возможность переориентации научной аппаратуры в полете по бортовой программе и по командам с Земли.**
- 8.Объем научной информации, подлежащей передаче на приемные пункты – 500 Мбайт/сутки.**
- 9.Максимальная скорость передачи телеметрической информации научной аппаратуры – 1 Мбит/с.**
- 10.Энергопотребление научной аппаратуры – 500-800 Вт.**

Гамма-телескоп ГАММА-400

При разработке гамма-телескопа мы исходили из того, что при прочих равных условиях прибор должен быть надежным, а его стоимость, по возможности минимальной.

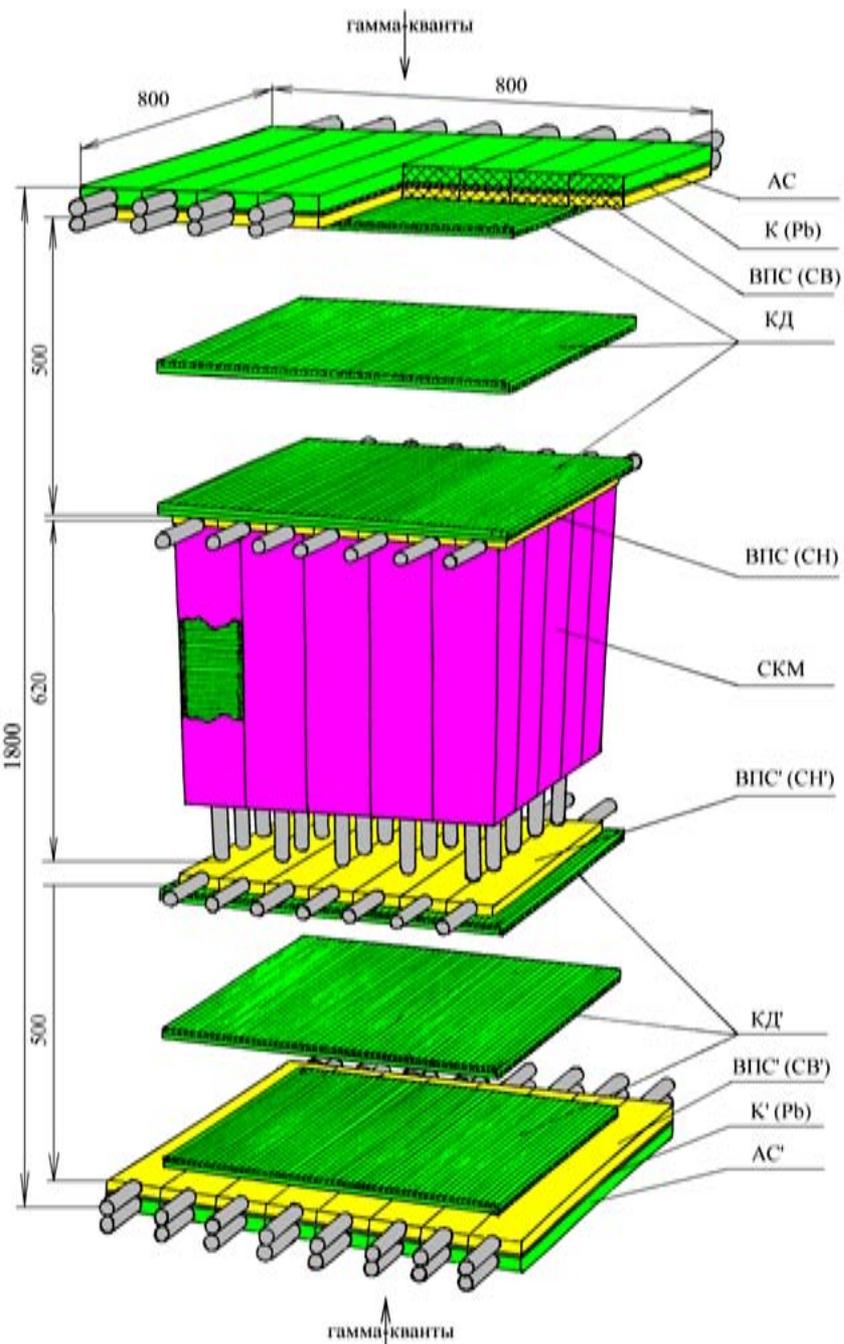
В связи с этим гамма-телескоп ГАММА-400 обладает **некоторыми отличительными чертами:**

1. Все используемые детекторы созданы на основе пластических сцинтилляторов, что обеспечивает высокую надежность и низкую стоимость.

2. Имеется специальная система исключения влияния частиц «обратного тока», возникших в результате рассеяния в калориметре и движущихся к антисовпадательному детектору, что дает возможность измерять энергию вплоть до нескольких ТэВ.

3. Детекторы координатной системы представляют собой узкие сцинтилляционные полосы, в которых для **собираения света используется спектросмещающее оптическое волокно,** а в качестве светоприемников **применяются низковольтные кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ).** По сравнению с применением вакуумных ФЭУ существенно уменьшается энергопотребление и стоимость.

4. Используются два комплекта системы отбора гамма-квантов, расположенных над и под калориметром. При этом геометрический фактор удваивается при небольшом увеличении веса телескопа.



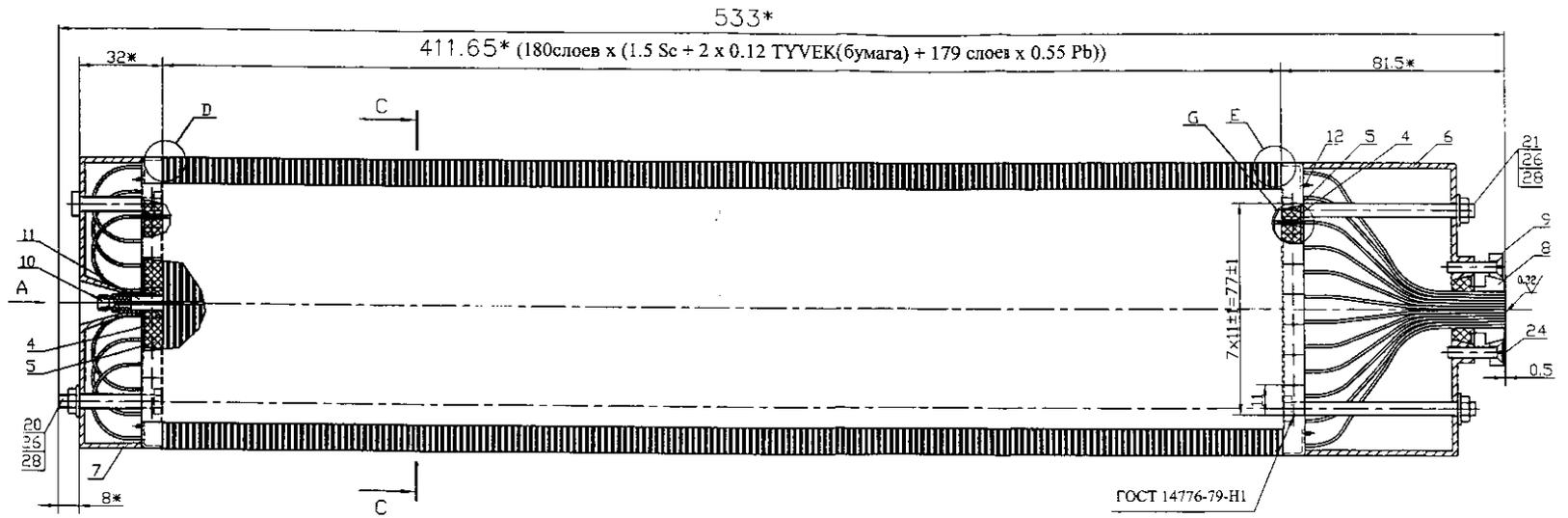
Гамма-телескоп ГАММА-400 состоит из следующих систем:

1. Система первичного отбора гамма-квантов: антисовпадательный детектор (АС), свинцовый конвертор (К), сцинтилляционная времяпролетная система (ВПС, СВ и СН) для регистрации продуктов конверсии.
2. Координатная система (КД), определяющая направление заряженных частиц.
3. Система измерения энергии (семплинговый калориметр СКМ).

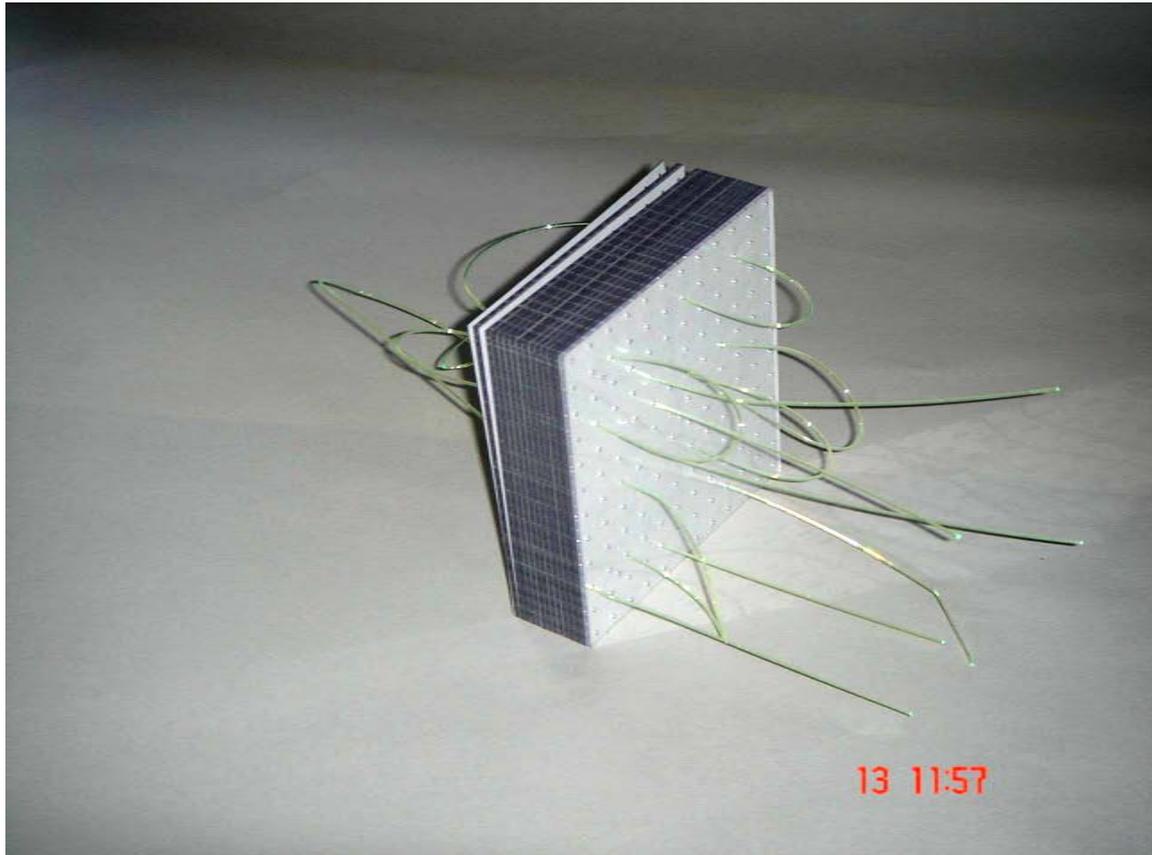
Калориметр

Одна из основных частей гамма-телескопа – семплинговый гетерогенный калориметр, разработанный в ИВФЭ (Протвино) и предназначенный для измерения энергии электронов (позитронов) и гамма-квантов в исследованиях по физике высоких энергий на ускорителе RHIC (эксперимент PHENIX).

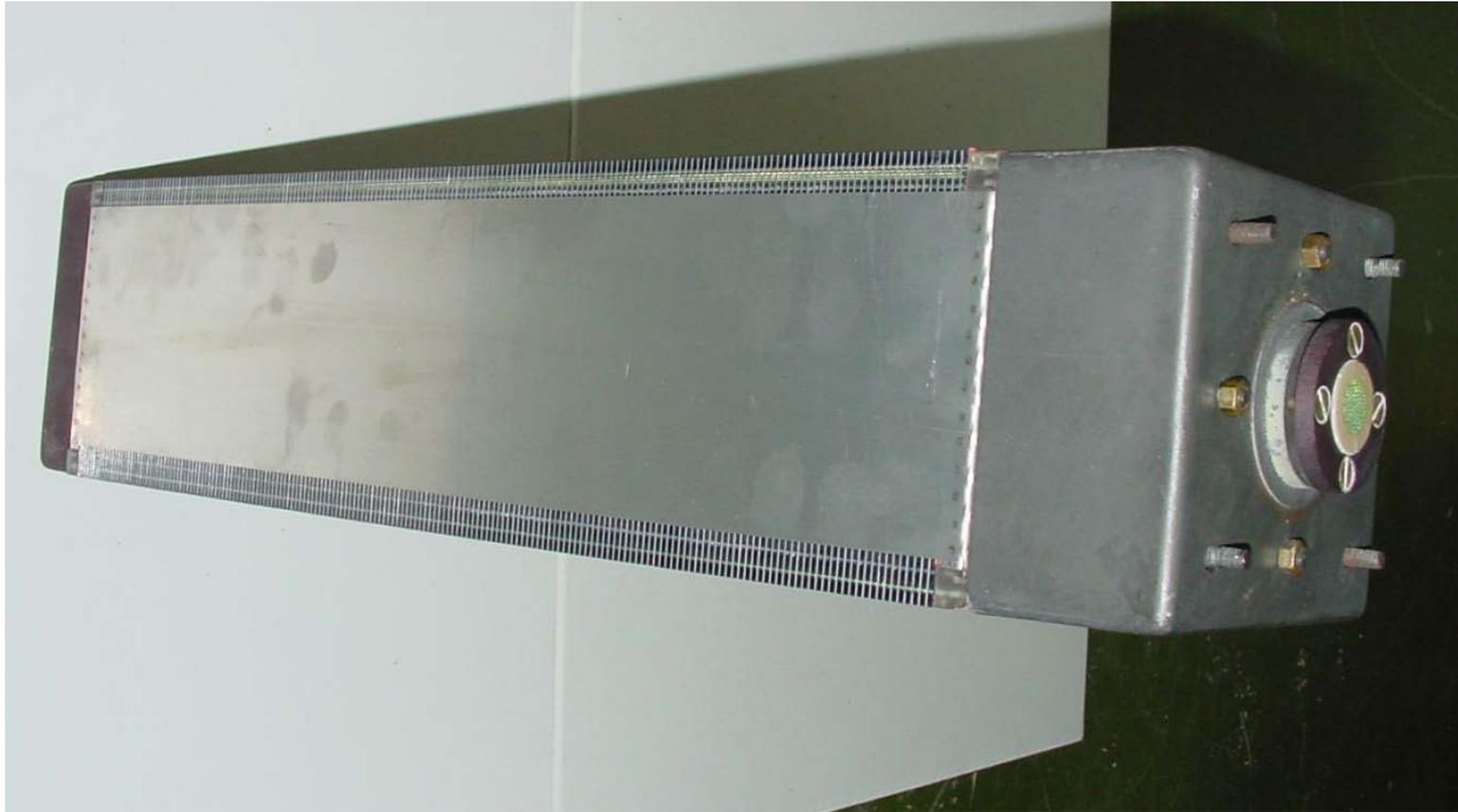
Калориметр собирается из модулей, которых в основном варианте ГАММА-400 25. Отдельный модуль собран из большого числа стандартных элементов, каждый из которых состоит из тонкого слоя свинца (0,55 мм), слоя сцинтиллятора (1,5 мм) и слоя светоотражающей бумаги. В основном варианте модуль содержит 180 элементов, что соответствует 18 рад. ед. длины. Сцинтилляционный свет собирается с помощью 144 спектросмещающих волокон, пронизывающих все элементы в модуле, и направляется на вакуумный ФЭУ-115М.



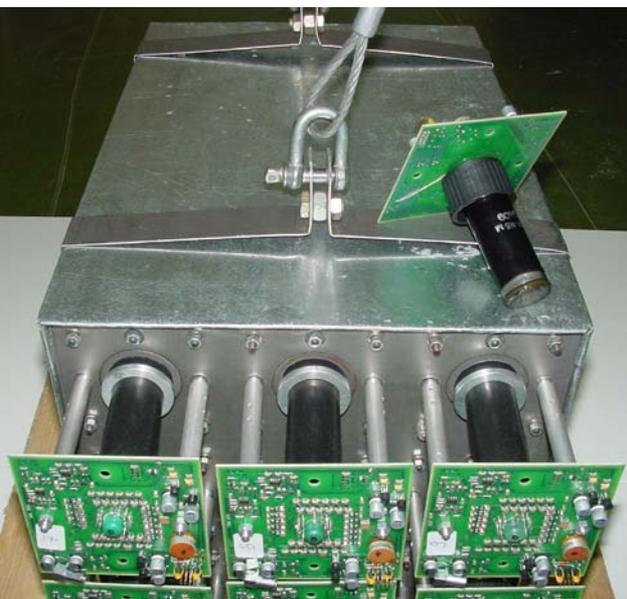
Чертеж собранного модуля калориметра.



Часть сборки отдельных элементов внутри модуля.

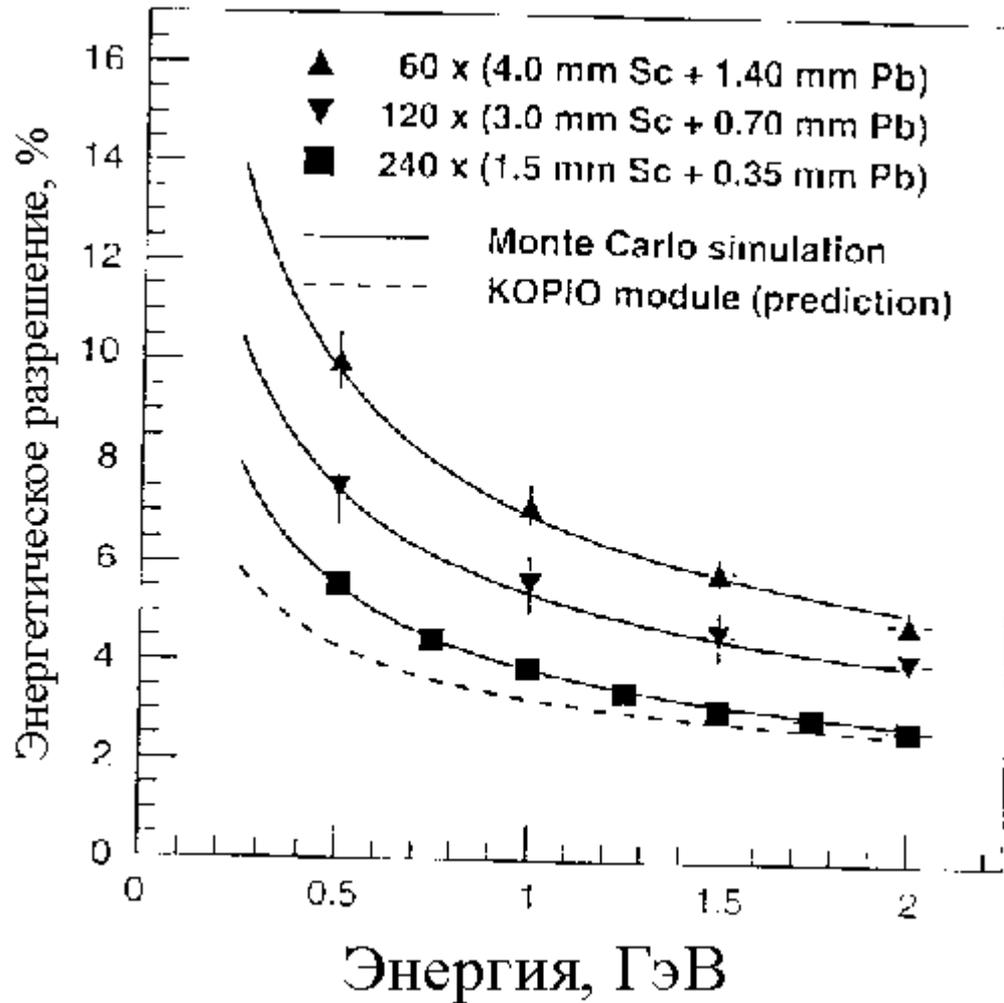


Внешний вид собранного модуля.



Лабораторный макет калориметра из 9 модулей.

Энергетическое разрешение калориметра по расчетам ИФВЭ и по результатам калибровки на ускорителе – 2,5% ($E_\gamma=2$ ГэВ)

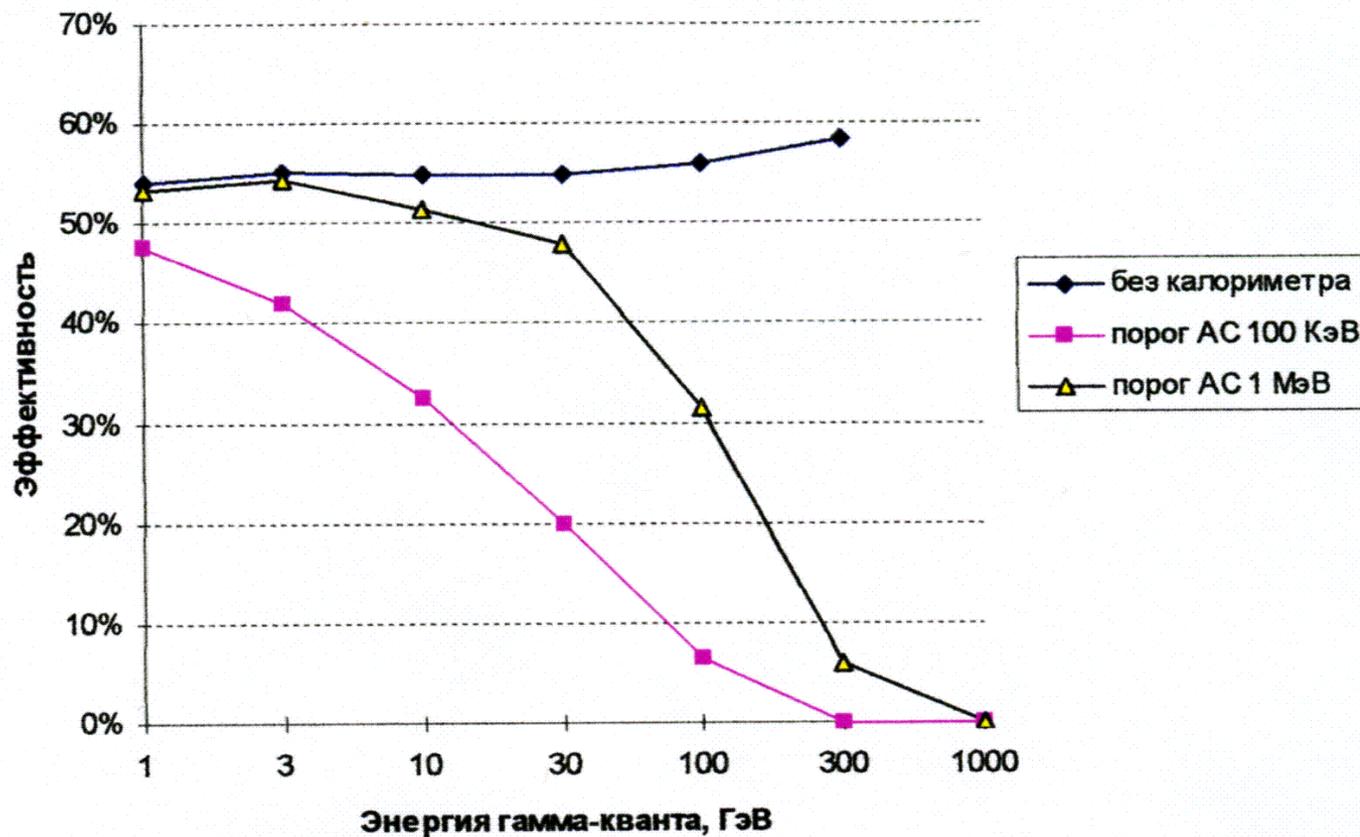


Энергетическое разрешение калориметра по нашим модельным расчетам - 2 0,5% ($E_\gamma=100-1000$ ГэВ). ²³

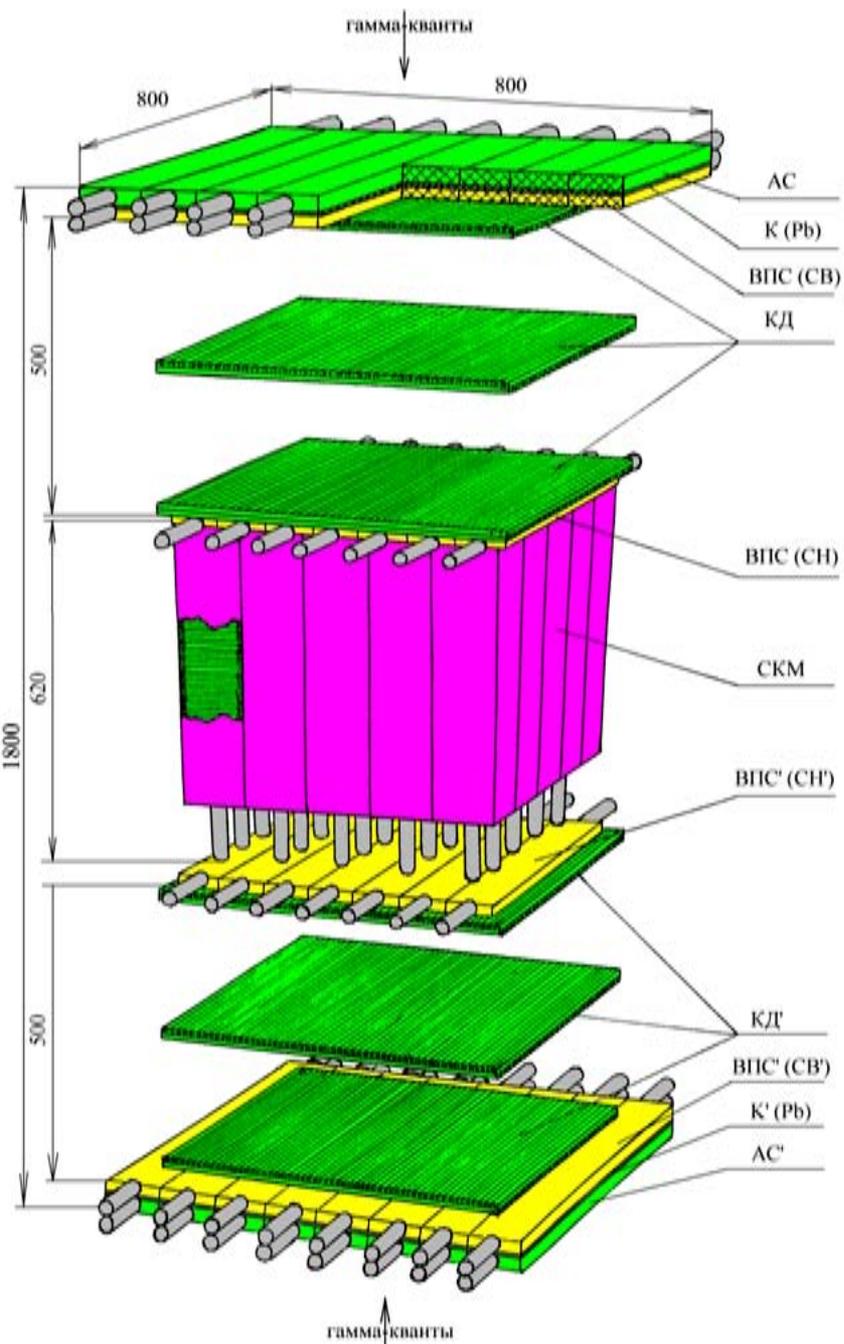
Эффект частиц «обратного тока»

Важным элементом ГАММА-400 является система устранения эффекта «обратного тока» (эффекта альбедо). При взаимодействии с веществом калориметра продуктов конверсии первичного гамма-кванта появляется большое число частиц умеренной энергии (до нескольких МэВ), которые в результате рассеяния вылетают из калориметра в направлении детектора АС («обратный ток»). Фотоны «обратного тока» в детекторе АС могут создавать заряженные частицы, в результате чего детектор АС выдаст сигнал, имитирующий первичную **заряженную частицу и гамма-событие будет переведено в разряд заряженных.**

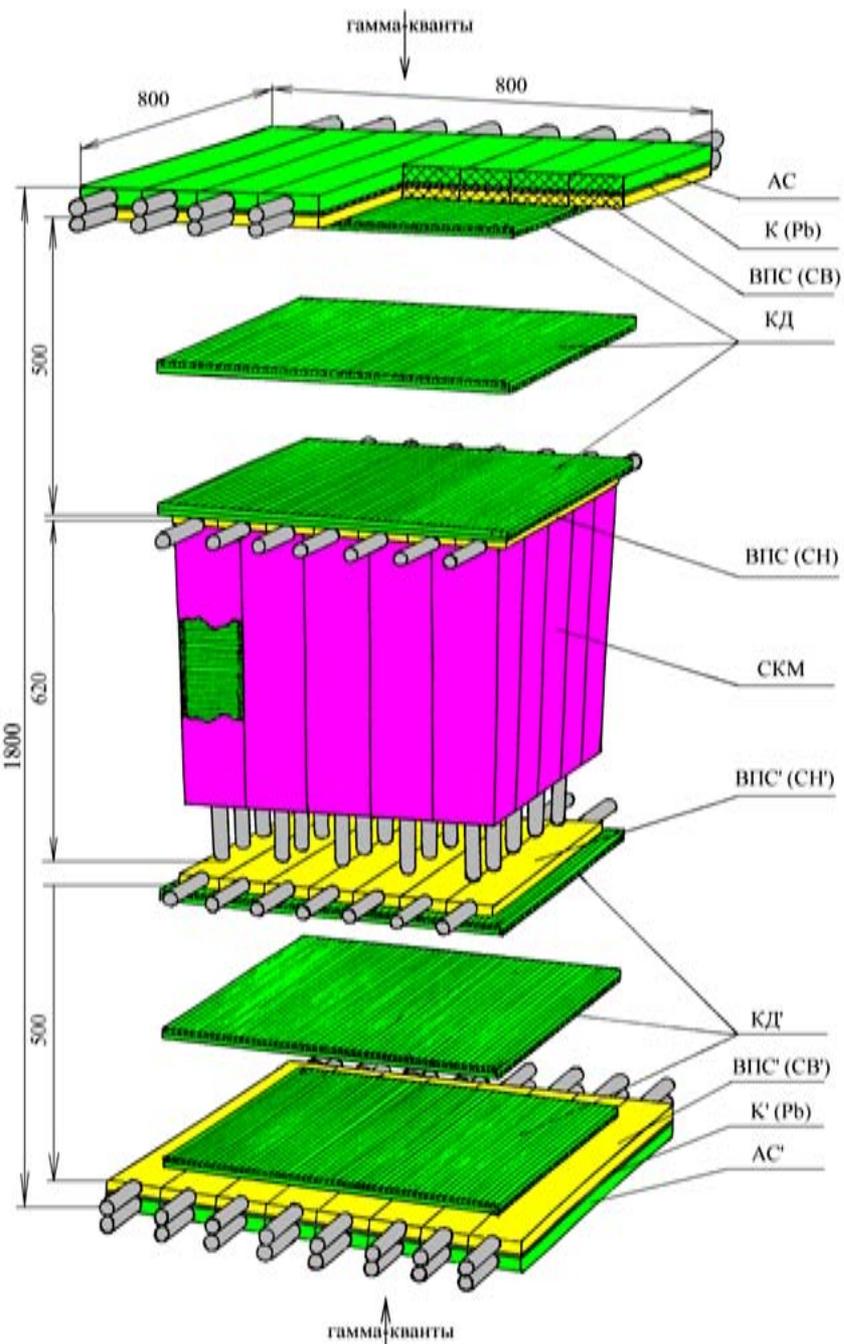
С ростом энергии гамма-кванта растет доля случаев перевода гамма-события в разряд заряженных, а это может приводить к завалу энергетического спектра, что видно на графике.



Зависимость от энергии эффективности регистрации телескопом ГАММА-400 первичных гамма-квантов космического излучения.



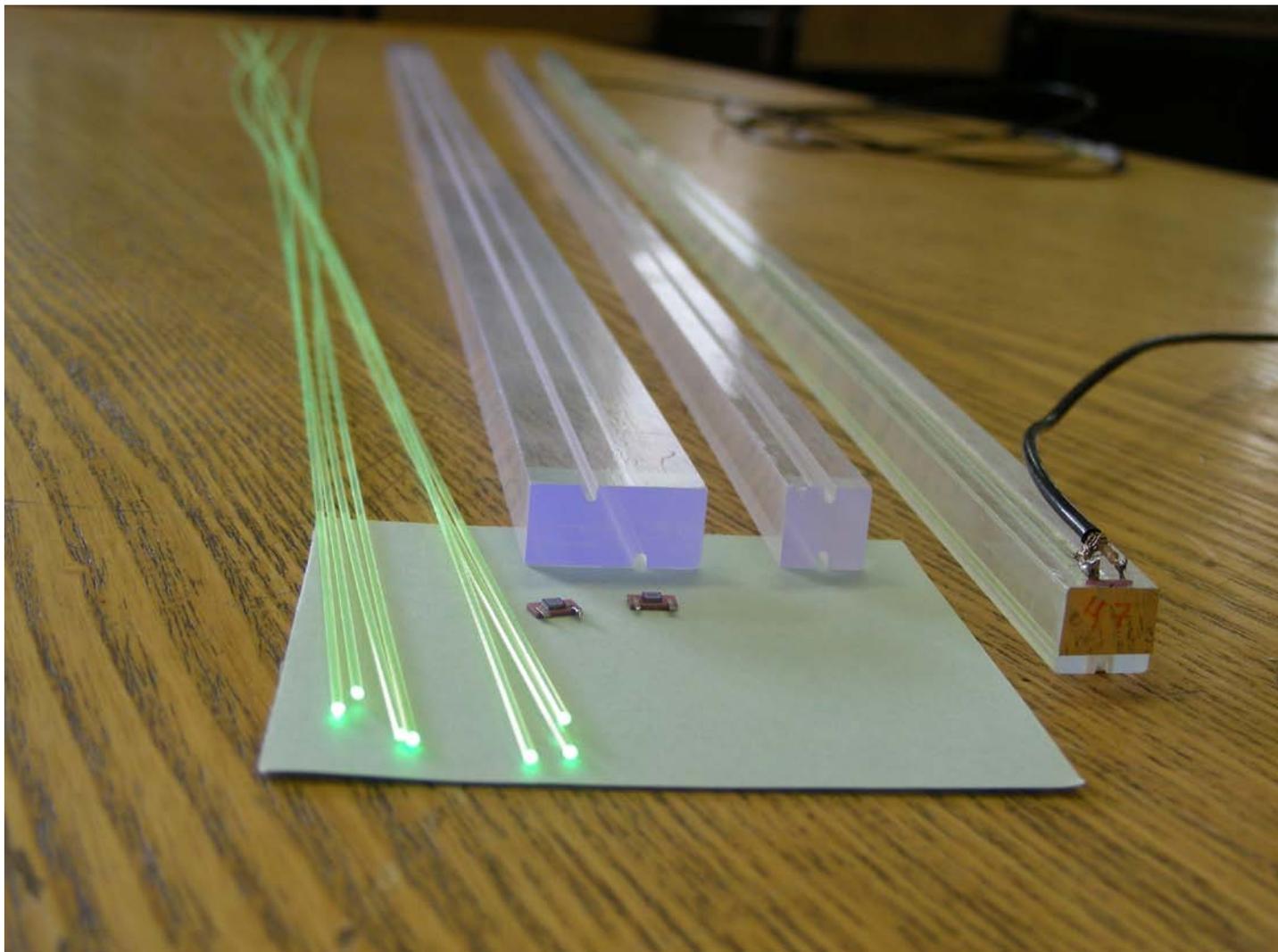
Использованный нами способ устранения эффекта альбедо (использование времяпролетной системы) основан на сопоставлении моментов появления сигналов в детекторе АС и в нижнем детекторе времяпролетной системы (СН), разнесенных на 50 см. В случае прохождения через АС **первичной заряженной частицы сигнал в АС опережает** сигнал в СН примерно на 1,5 нс, а в случае регистрации в АС **фотона альбедо сигнал в АС запаздывает** по сравнению с сигналом в СН на 1,5 нс, что позволяет надежно дискриминировать события «обратного тока».



Координатная система

Координатная система (КД) собрана из трех блоков, каждый из которых состоит из двух слоев набора сцинтилляционных полос шириной по 1 или 2 см; длинные оси полос в двух слоях ориентированы взаимно перпендикулярно, что позволяет определить X- и Y-координаты точки прохождения частицы.

При расстоянии между верхним и нижним блоками 50 см угловое разрешение системы КД составляет 1-2 градуса.



Внешний вид сцинтилляционных полос ($600 \times 20 \times 10$ мм³) со спектросмещающим волокном (ССВ) и Si-ФЭУ для координатной системы.

Модернизация ГАММА-400

В процессе проработки проектируемой обсерватории ГАММА-400 выяснилось, что ее потенциальные возможности допускают внесение в конструкцию телескопа ГАММА-400 изменений, улучшающих его метрологические характеристики. В связи с этим были изменены некоторые конструктивные параметры, что позволит увеличить светосилу прибора и улучшить энергетическое разрешение.

1. Увеличено число модулей в калориметре с 25 до 36 и, соответственно, поперечное сечение калориметра и детекторов системы отбора, что позволит **удвоить светосилу** и получить статистически обеспеченные измерения потока до энергий нескольких ТэВ.

2. Той же цели служит размещение второй системы отбора событий с противоположной стороны калориметра (возможность, связанная с независимостью калориметрического сигнала от направления входа в него регистрируемых частиц).

3. Улучшена «семплингость» калориметра: толщина свинцового слоя уменьшена вдвое (до 0,275 мм), число слоев увеличено до 400, что по данным разработчиков из ИФВЭ, **позволит довести энергетическое разрешение до 1,5%**, что улучшит условия для поиска аннигиляционных гамма-линий.

Сравнение параметров основного варианта телескопа (ГАММА-400) и модернизированного (ГАММА-400М) даны в таблице.

Сравнение измененных параметров ГАММА-400 и ГАММА-400М

Параметр	ГАММА-400	ГАММА-400М
<i>Гамма-телескоп</i>		
Диапазон энергий	30-1000 ГэВ	30-3000 ГэВ
Геометрический фактор	0,92 м ² ср	1,96 м²ср
Угловое разрешение	1-2°	1-2°
Масса	1200 кг	1700 кг
Площадь АС	800x800 мм ²	1100x1100 мм ²
Площадь СВ ВПС	800x800 мм ²	1000x1000 мм ²
Площадь СН ВПС	600x600 мм ²	700x700 мм ²
<i>Калориметр (СКМ)</i>		
Площадь калориметра	550x550 мм ²	660x660 мм ²
Масса калориметра	615 кг	820 кг
Число модулей	25	36
Толщина калориметра	18 р.е.д.	20 р.е.д.
Энергетическое разрешение (E _γ = 1 ТэВ)	2,5%	1,5%
<i>Модуль калориметра</i>		
Площадь модуля	110x110 мм ²	110x110 мм ²
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
<i>Элемент модуля – свинец + полистирол + бумага</i>		30
Толщина свинца в элементе	0,55 мм (0,1 р.е.д.)	0,275 мм (0,05 р.е.д.)

Оценка статистики измерений диффузного гамма-излучения в
направлении на центр Галактики
(показатель спектра $k=2,6$)

Энергия, ГэВ	Число отсчетов (за год)
30	22252
100	3242
1000	81
2000	27
3000	14

Оценка статистики измерений гамма-излучения
некоторых интенсивных дискретных источников
(за 100 суток)

Энергия, ГэВ	CRAB PULSAR (k=2,19)	GEMINGA PULSAR (k=1,66)	VELA PULSAR (k=1,69)
30	7677	21440	49044
100	550	2906	6411
1000	3,5	64	131
2000	0,8	20	41
3000	0,3	10	20

Ожидаемая статистика регистрации
 фотонов аннигиляционных гамма-линий $N_{\gamma, \text{лин}}$
 и фона диффузной компоненты $N_{\gamma, \text{фон}}$
 за 1 год наблюдений
 (при энергетическом разрешении $\Delta E_{\gamma}/E_{\gamma}=2\%$)

E_{γ} , ГэВ	100	200	300	500
$N_{\gamma, \text{лин}}$	32,4	32,4	32,4	32,4
$N_{\gamma, \text{фон}}$	18,5	5,7	2,9	1,2
$\sqrt{N_{\gamma, \text{ош}}}$	4,3	2,4	1,7	1,1
$\frac{N_{\gamma, \text{эел}} - N_{\gamma, \text{ош}}}{\sqrt{N_{\gamma, \text{ош}}}}$	3,2	10	17	30

Планируется в дальнейшем обсудить возможности расширения программы измерений, постановки новых научных задач, учитывая возможности космической обсерватории.

Авторы будут благодарны участникам конференции за возможные замечания и предложения к проекту ГАММА-400.