

Russian Academy of Sciences

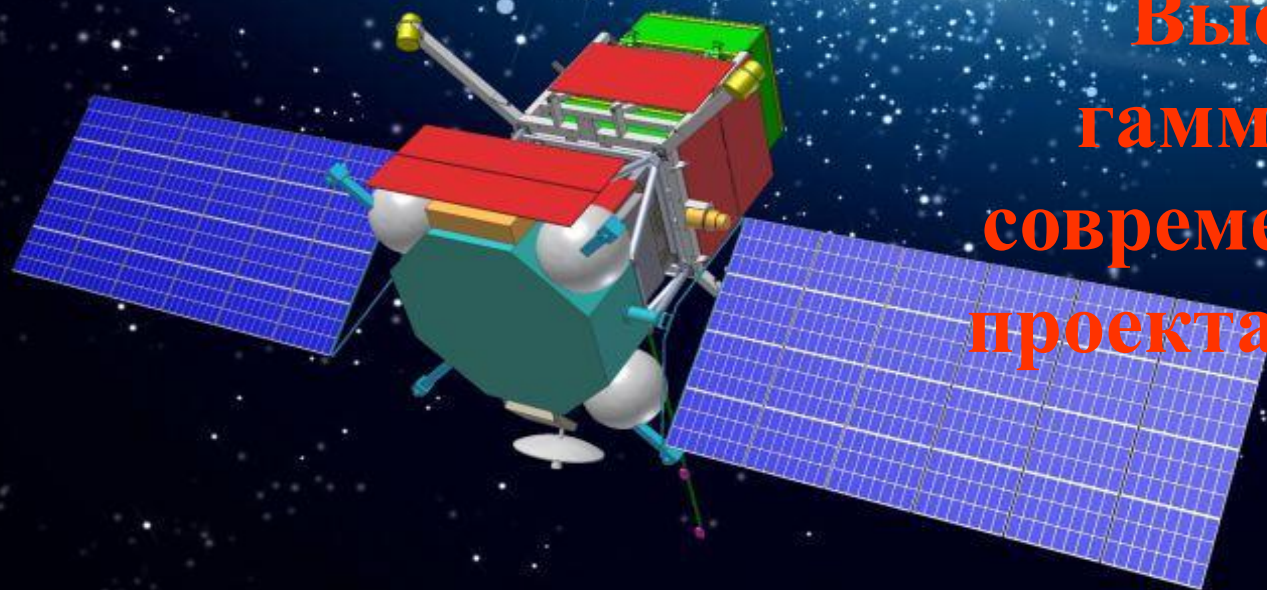
*P.N. Lebedev*



Physical  
Institute

L P I

**Топчиев Николай Петрович –  
д.ф.-м.н., заместитель научного  
руководителя проекта «ГАММА-400»**

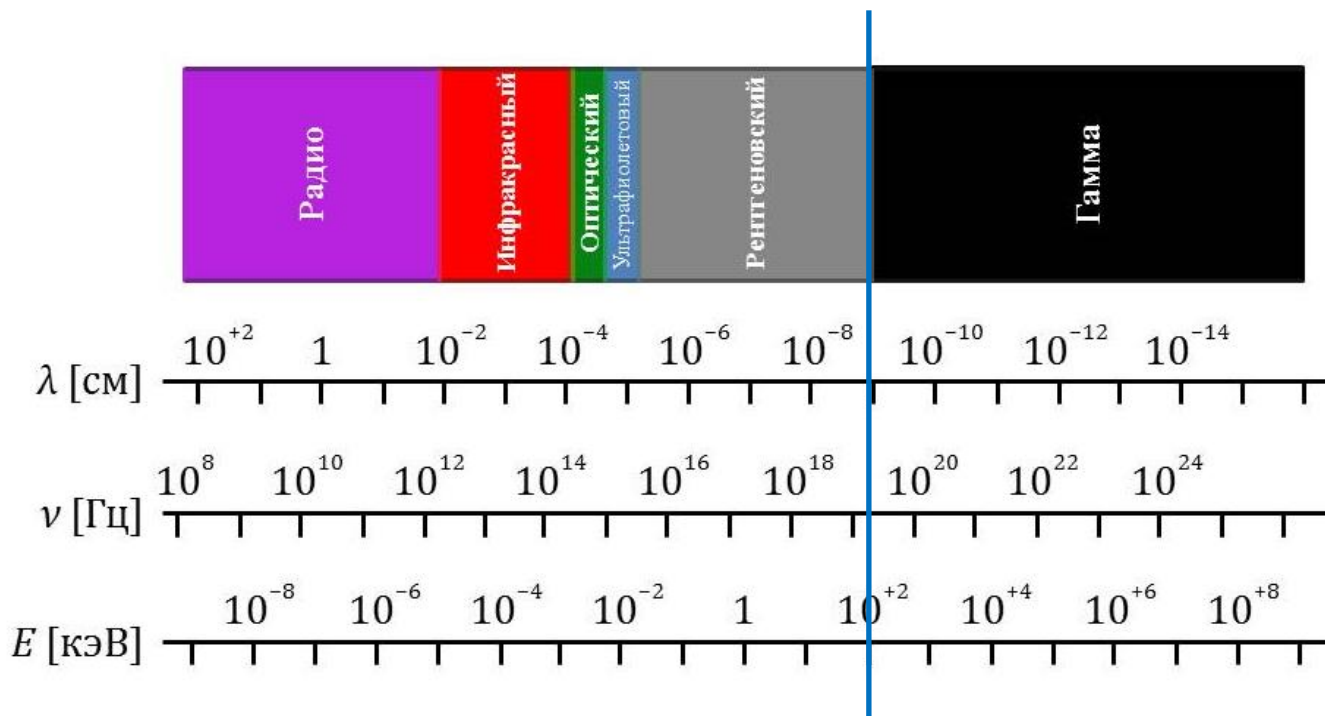


**Высокоэнергичная  
гамма-астрономия и  
современное состояние  
проекта «ГАММА-400»**

ОФВЭ ПИЯФ, 7 февраля 2023 г.

# 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: от длинноволнового радиодиапазона до наиболее коротковолнового гамма-диапазона с длиной волны менее  $10^{-9}$  см (с энергией более  $100$  кэВ =  $0,1$  МэВ).



# Космические аппараты с научной аппаратурой для исследования в различных областях электромагнитного спектра с использованием платформы «Навигатор» (АО «НПО Лавочкина»)

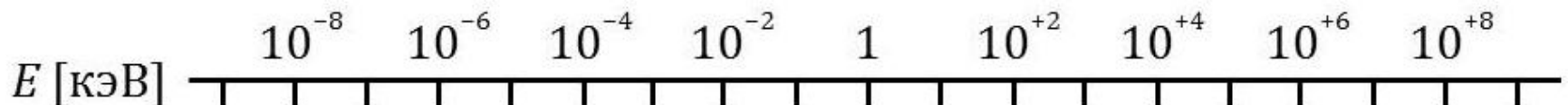
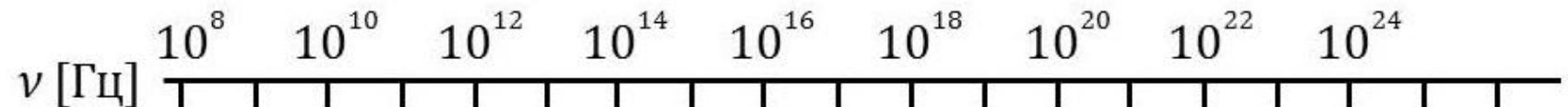
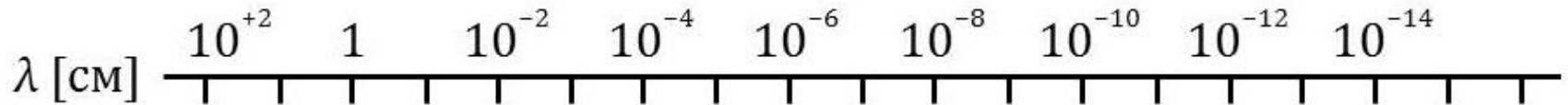
Спектр-М  
Миллиметрон  
~2030

Спектр-УФ  
~2025

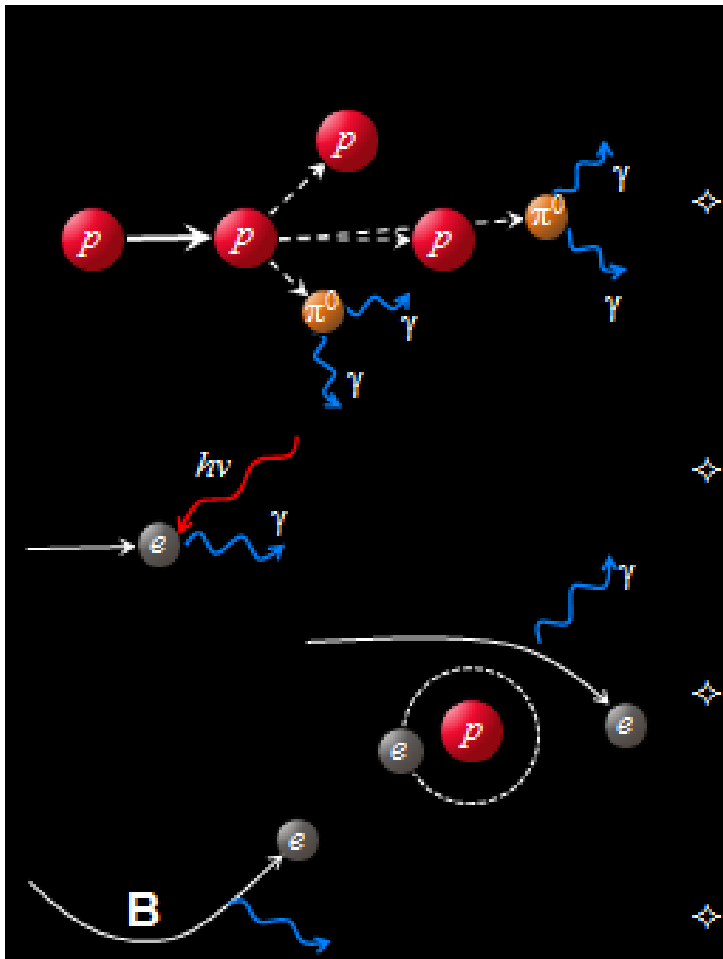
ГАММА-400  
~2030

Спектр-Р  
Радиоастрон  
2011-2019

Спектр-РГ  
2019-н/в



# Основные процессы образования гамма-излучения высоких энергий ( $E_\gamma > 100$ МэВ) и сверхвысоких энергий ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)



Взаимодействие протонов космических лучей с протонами межзвездного и межгалактического вещества

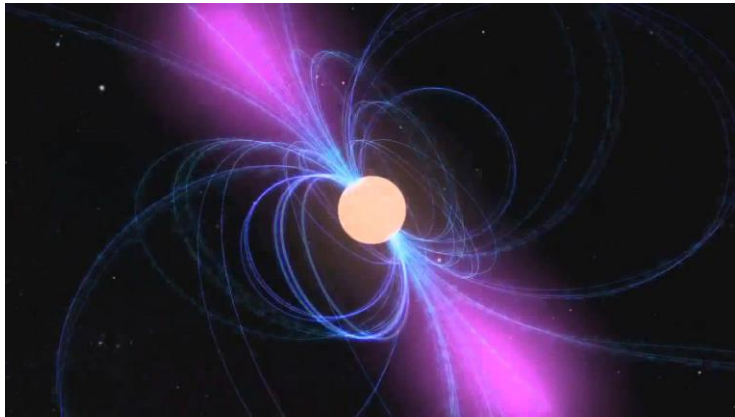
Обратный комптон-эффект - рассеяние релятивистских электронов на фотонах (световых, тепловых)

Тормозное излучение – взаимодействие релятивистских электронов с межзвездной средой

Синхротронное излучение – излучение релятивистских электронов в магнитных полях

**Наблюдения астрофизических объектов в гамма-диапазоне позволяют получить чрезвычайно важную информацию об основополагающих процессах:**

**-о физических условиях в дискретных астрофизических объектах, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер);**



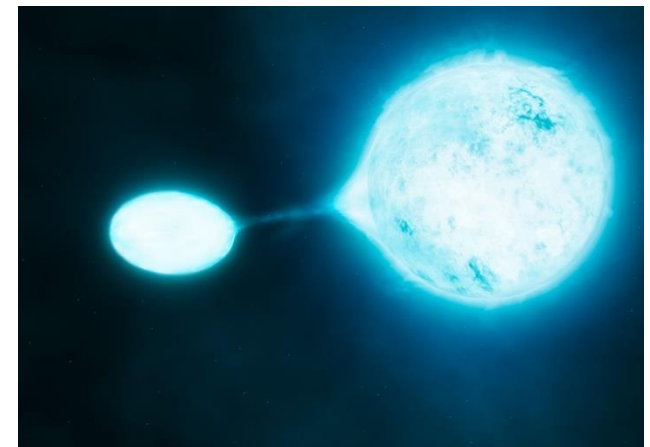
← Пульсар  
(pulsar)



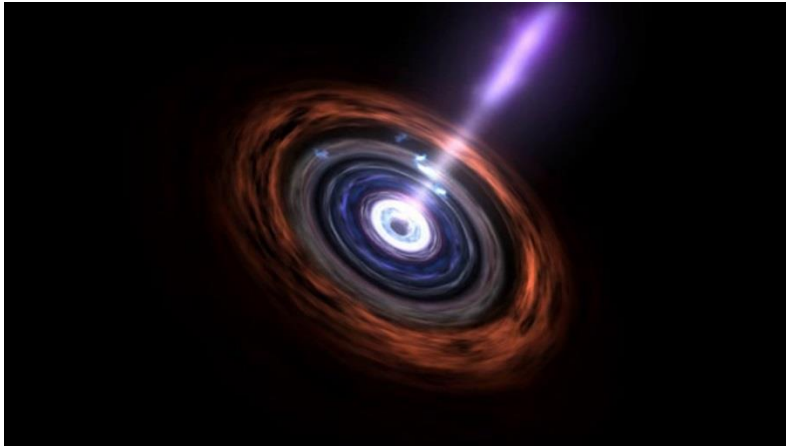
↗ Пульсарные туманности  
(плерионы)  
(PWN)



← Микроквазар  
(Microquasar)

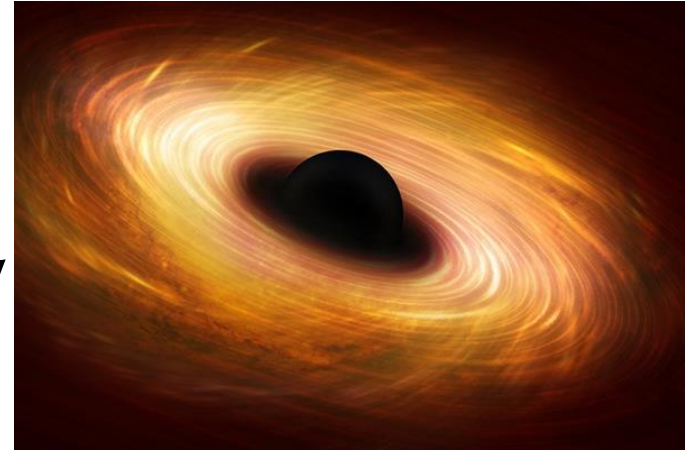


↗ Двойные звезды  
(Binaries)



← Активные  
галактические  
ядра (AGN)

↗ Черные дыры  
(Black holes)



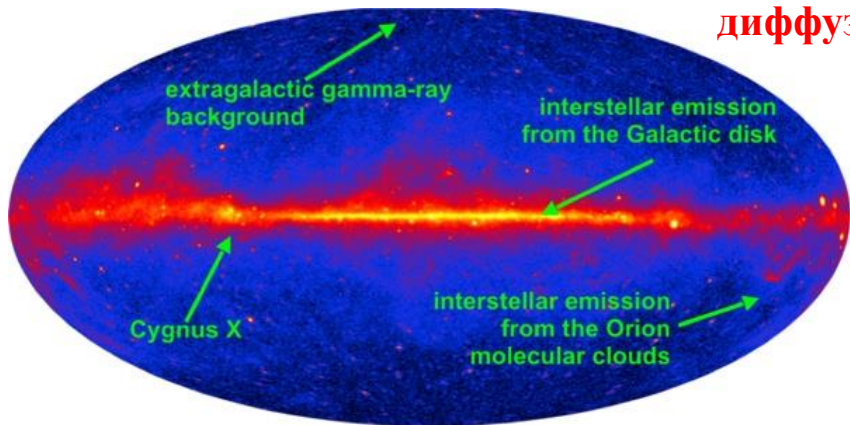
Остатки сверхновых  
(SNR)



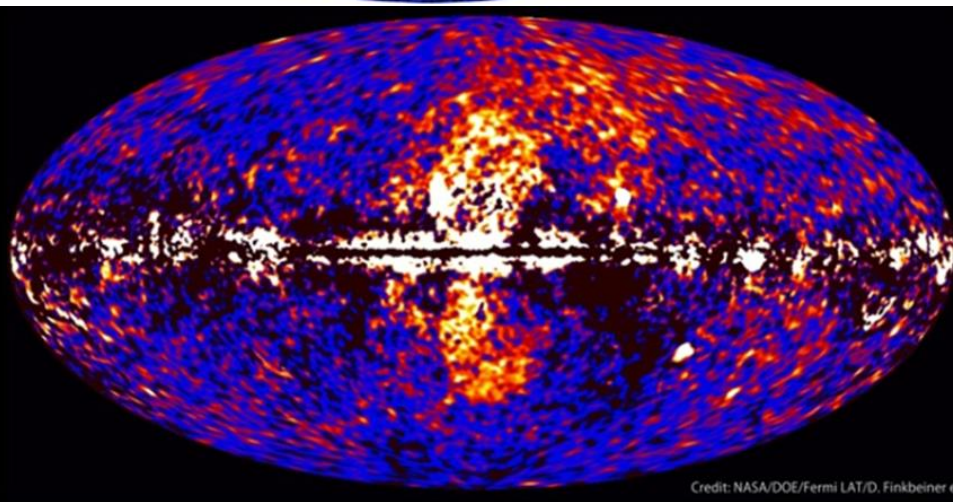
Гамма-всплески  
(Gamma-ray bursts)

-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;

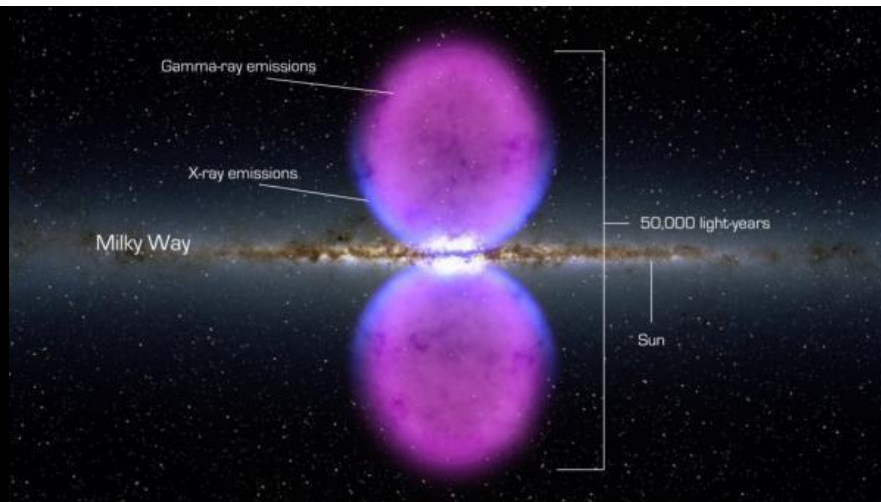
**80% всех зарегистрированных гамма-квантов с энергией более 100 МэВ относятся к диффузному излучению.**



Карта неба в гамма-лучах от Fermi-LAT и компоненты диффузного гамма-излучения : межзвездное излучение от Галактического диска (interstellar emission from the Galactic disk), внегалактическое фоновое гамма-излучение (extragalactic gamma-ray background).



Credit: NASA/DOE/Fermi LAT/D. Finkbeiner et al.



Анализ данных диффузного гамма-излучения, полученных Fermi-LAT в диапазоне энергий от 100 МэВ до 500 ГэВ выявил два гигантских пузыря, достигающих 55 град северной и южной галактической широты (Fermi bubbles).

# Поиск особенностей в энергетических спектрах высокоэнергичного гамма-излучения, которые могут быть связаны с частицами темной материи

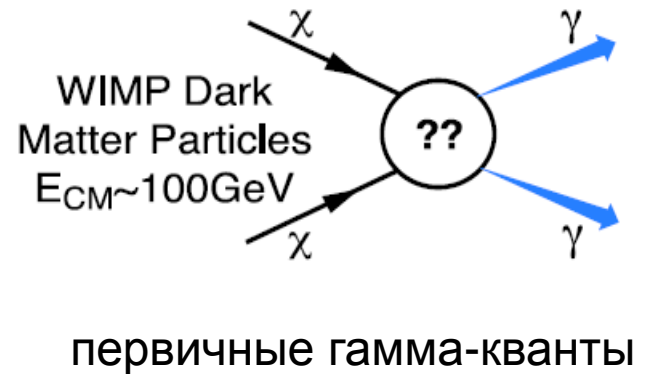
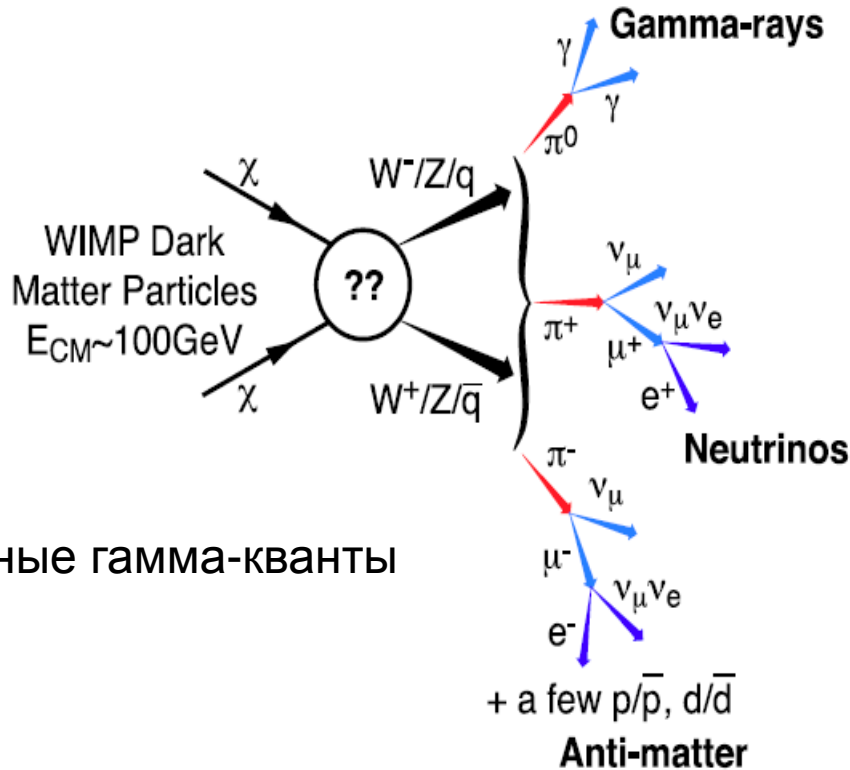


В результате проведения прецизионных измерений реликтового микроволнового излучения в космических экспериментах WMAP и Planck определен массовый состав Вселенной



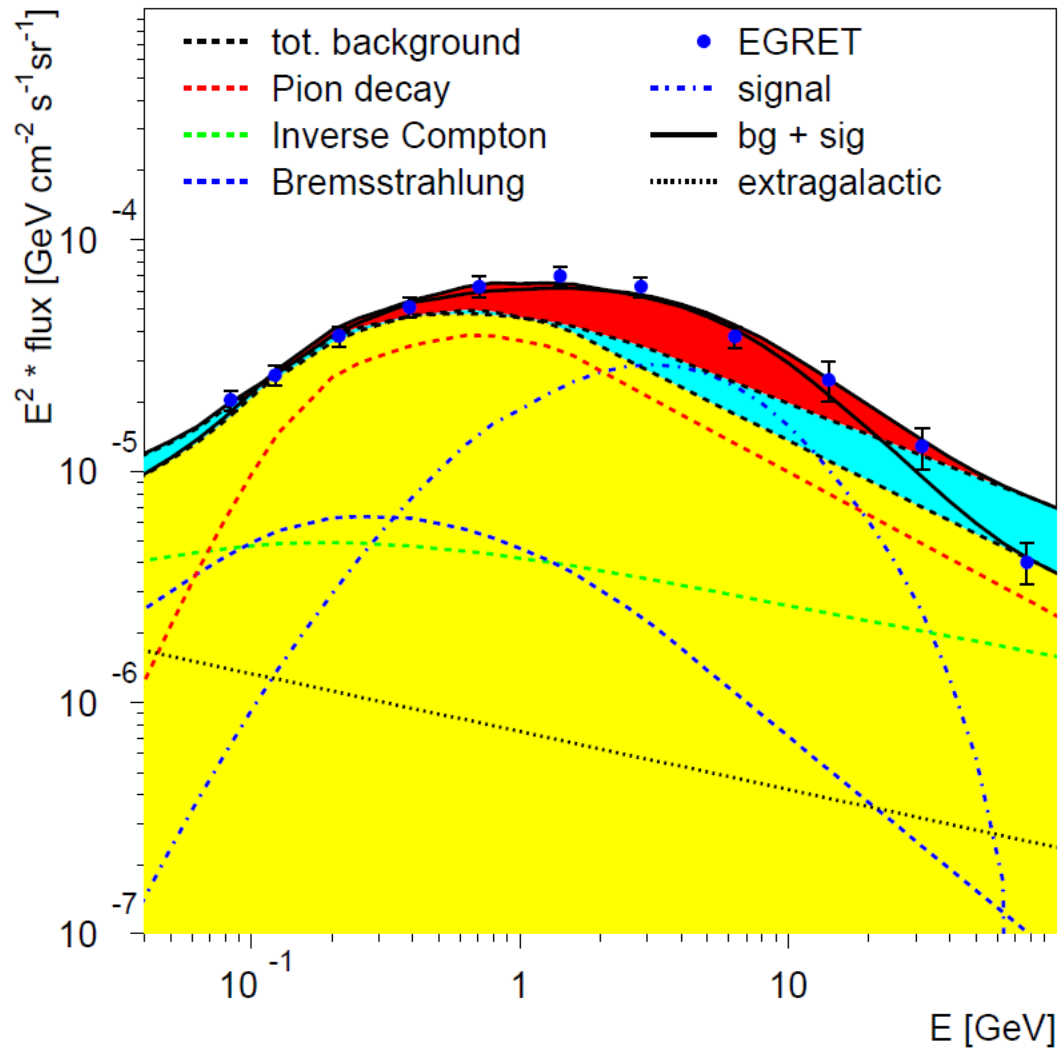
# Возможные каналы аннигиляции WIMP с образованием гамма-квантов, электронов и позитронов

$$b\bar{b}, t\bar{t}, \tau^+\tau^-, \mu^+\mu^-, e^+e^-, Z^0Z^0, Z^0\gamma, W^+W^-, HH, \dots$$



Среди огромного количества возможных кандидатов на роль частиц темной материи рассматриваются суперсимметричные частицы, аксионоподобные частицы и др. Чаще всего рассматриваются и исследуются слабо взаимодействующие массивные частицы - вимпы (WIMP, Weakly Interacting Massive Particles), масса которых может лежать в диапазоне от  $\sim 10 \text{ ГэВ}$  до  $\sim \text{ТэВ}$ .

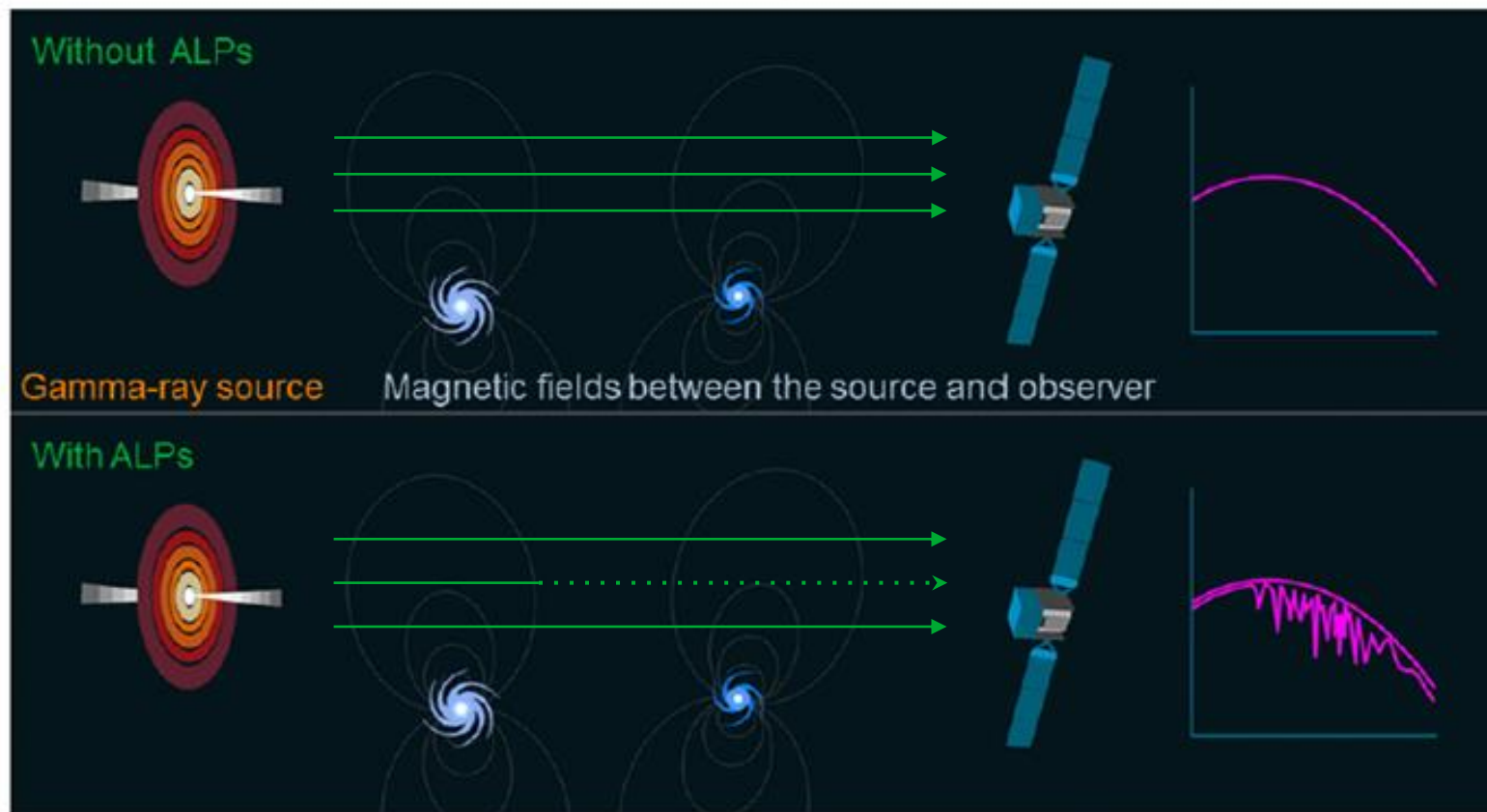
Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения.



**EGRET (CGRO) C13A**  
**1991- 1998**  
**30 M<sub>3</sub>B - 30 Г<sub>3</sub>B**

# Регистрация особенностей в энергетическом спектре гамма-излучения, вызванных преобразованием гамма-квантов в аксионоподобные частицы (Axion-Like Particles)

## ALP signature searches in pulsar and blazar spectra



$$\gamma + \mathbf{B} \leftrightarrow \gamma + ALP \text{ — conversion}$$

The key relevant parameters of ALP are its mass  $m_a$  and electromagnetic coupling constant  $g_{a\gamma}$ . These parameters define the character of spectral features due to conversion.

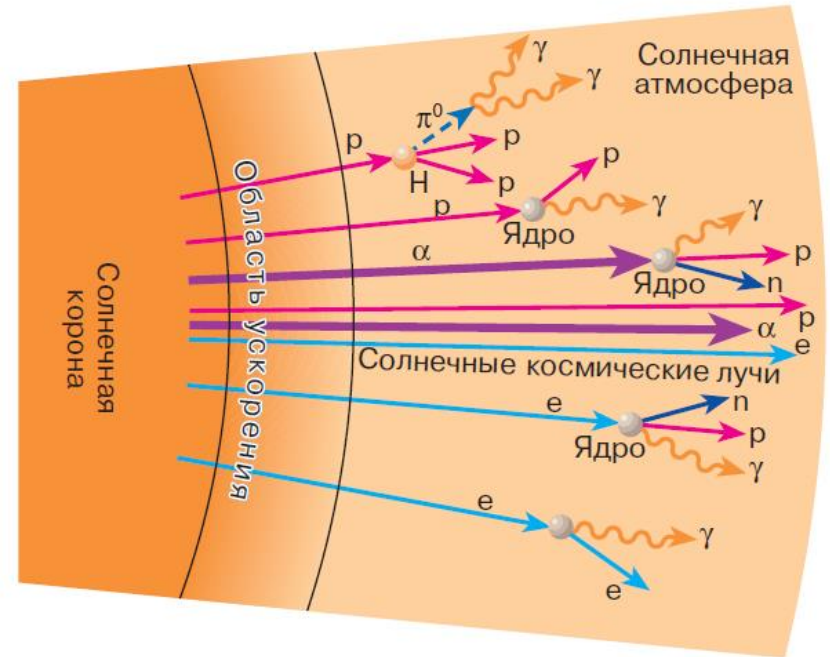
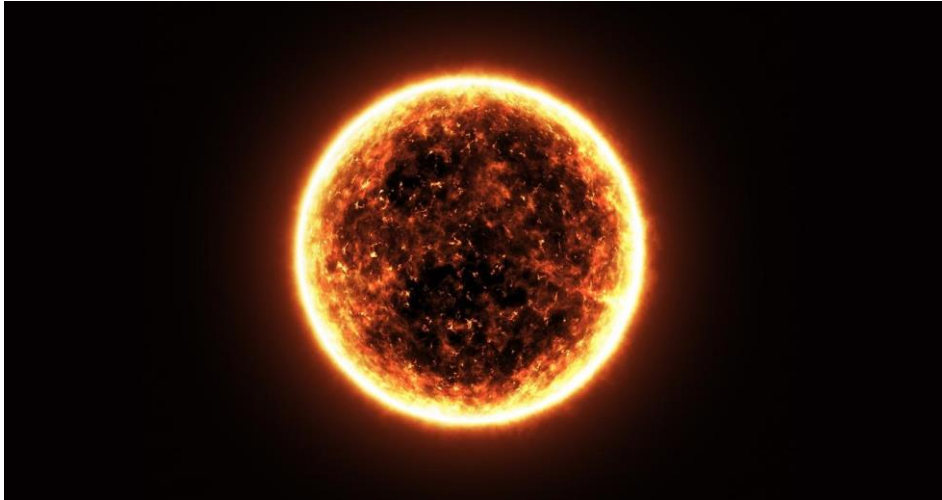
## Поиск и исследование гамма-всплесков



**GRB 221009A** (Swift J1913.1+1946) — необычно яркий длинный [гамма-всплеск](#), обнаруженный космическим аппаратом [Swift](#) 9 октября 2022 года.

Зафиксированный 9 октября гамма-всплеск GRB 221009A является самым сильным в истории. Энергия фотонов от него составляет до 18 ТэВ (LHAASO). Считается, что она образовалась в процессе вспышки чрезвычайно мощной сверхновой.

Исследование гамма-излучения от Солнца  
в спокойное время (после взаимодействия космических лучей с фотонами и  
веществом солнечной атмосферы) и во время вспышек



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.

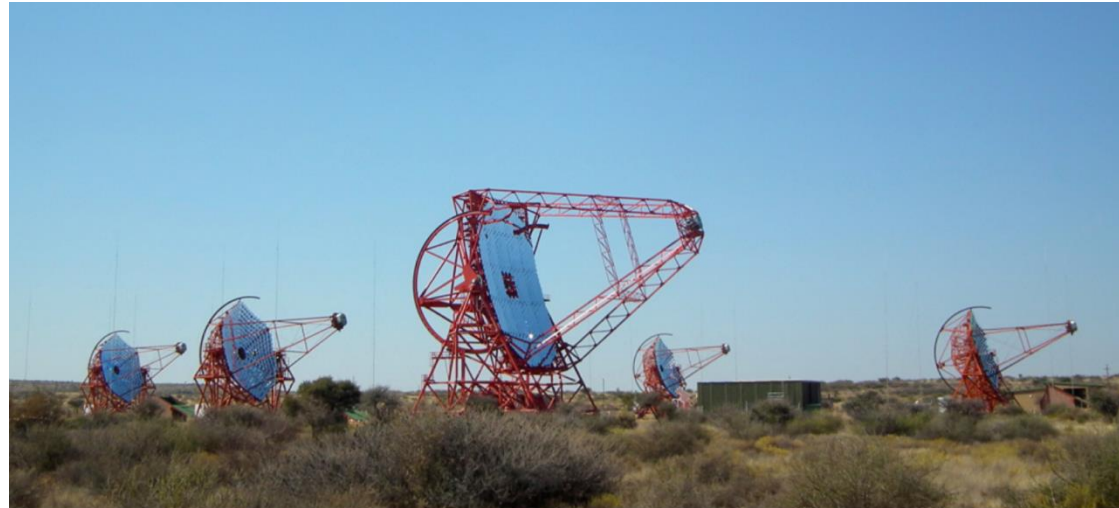
Советский гамма-телескоп **ГАММА-1** в **1991 г.** впервые зарегистрировал гамма-кванты высокой энергии (**более 1 ГэВ**) во время мощных солнечных вспышек 26 марта (класс 3В/X4,7) и 15 июня (класс 3В/X12+).

# Регистрация гамма-излучения

## Прямая регистрация на космических аппаратах



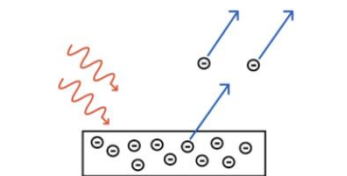
## Косвенная регистрация на наземных установках



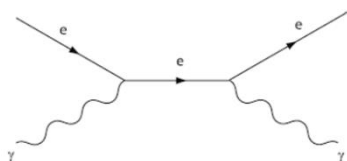
Прямые внеатмосферные исследования гамма-излучения на космических аппаратах имеют значительное преимущество в связи с тем, что гамма-излучение проходит через галактику до взаимодействия с атмосферой Земли практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывает на источник своего происхождения. Начиная с энергии более 10 ГэВ, начинаются процессы ослабления потоков гамма-излучения после взаимодействия с межгалактическими фоновыми фотонами (extragalactic background light, EBL).

# Исследование гамма-излучения на космических аппаратах

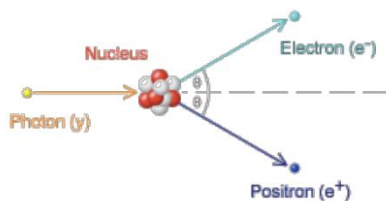
Процессы образования гамма-квантов в гамма-телескопах



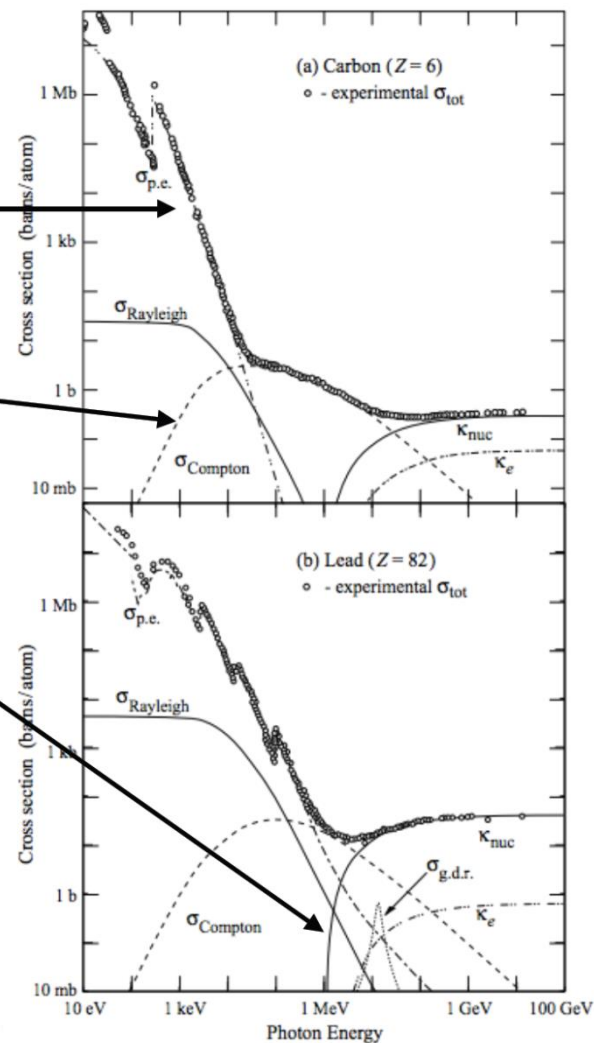
Фотоэффект



Комptonовское  
рассеяние

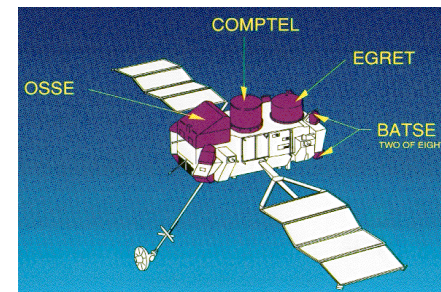
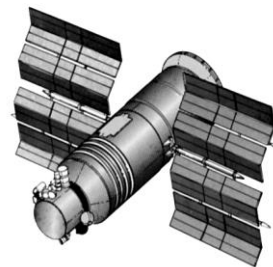
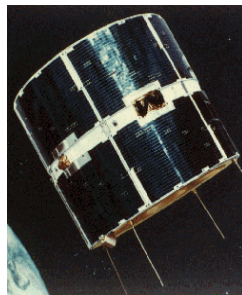
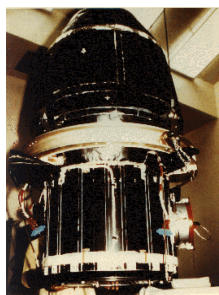
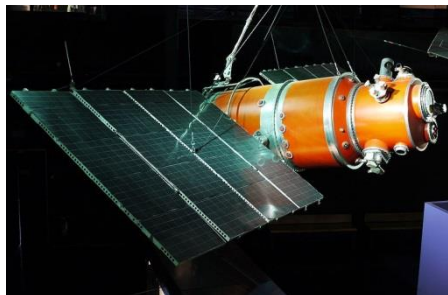


Образование  
пары



# Исследование гамма-излучения на космических аппаратах

Explorer-11 (США, 1961), OSO-3 (США, 1967-1968), Космос-208 (СССР, 1968)



## АННА-3

(Космос - 251, 264)

СССР

1968, 1969

200 МэВ – 1 ГэВ

## SAS-2

США

1972 – 1973

20 МэВ – 1 ГэВ

## COS-B

Европа

1975 – 1982

30 МэВ – 5 ГэВ

## ГАММА-1

СССР

1990 – 1992

30 МэВ – 5 ГэВ

## EGRET

(CGRO)

США

1991- 1998

30 МэВ - 30 ГэВ



# Прямые исследование гамма-излучения на действующих космических аппаратах



## **AGILE**

Италия  
с 2007 г.

100 МэВ – 50 ГэВ

## **Fermi-LAT**

США  
с 2008 г.

50 МэВ – 1000 ГэВ

## **CALET**

Япония  
с 2015 г.

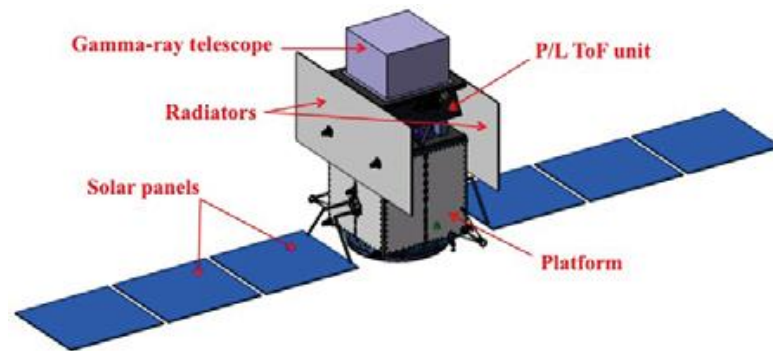
1 ГэВ – 10 ТэВ

## **DAMPE**

Китай  
с 2015 г.

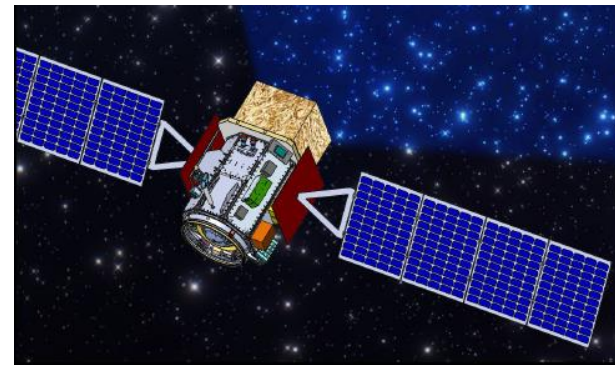
5 ГэВ – 10 ТэВ

# Планируемые исследования гамма-излучения до 10 ГэВ на космических аппаратах



**ASTROGAM**  
Европа

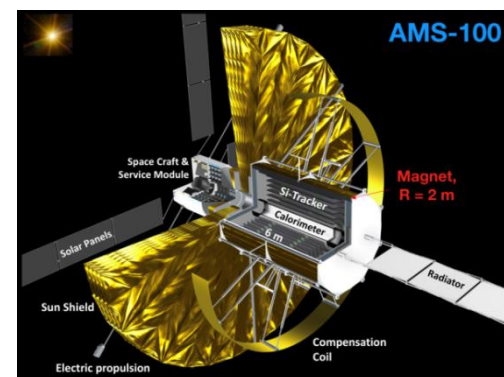
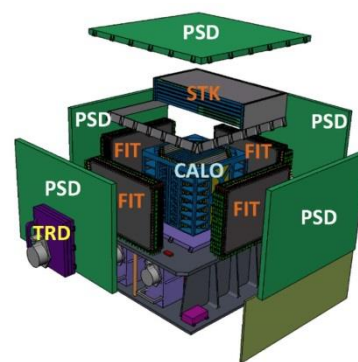
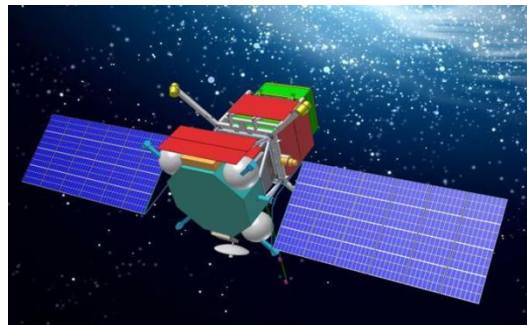
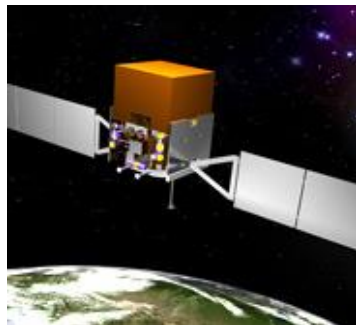
**0,3 МэВ – 3 ГэВ**



**AMEGO**  
США

**0,2 МэВ – 10 ГэВ**

# Планируемые исследования гамма-излучения более 10 ГэВ на космических аппаратах по сравнению с Fermi-LAT



**Fermi-LAT**

**США**

**с 2008 г.**

**100 МэВ – 300 ГэВ**

$\Delta\theta = \sim 0.1^\circ$

$\Delta E/E = \sim 10\%$

**8.5  $X_0$**

**ГАММА-400**

**Россия**

**~2030 г.**

**20 МэВ – ~1 ТэВ**

$\Delta\theta = \sim 0.01^\circ$

$\Delta E/E = \sim 2\%$

**18  $X_0$  (43 $X_0$ )**

**HERD**

**Китай**

**~2027 г.**

**1 ГэВ – 10 ТэВ**

$\Delta\theta = \sim 0.1^\circ$

$\Delta E/E = 1-2\%$

**55  $X_0$**

**AMS-100**

**Европа + США**

**~2039 г.**

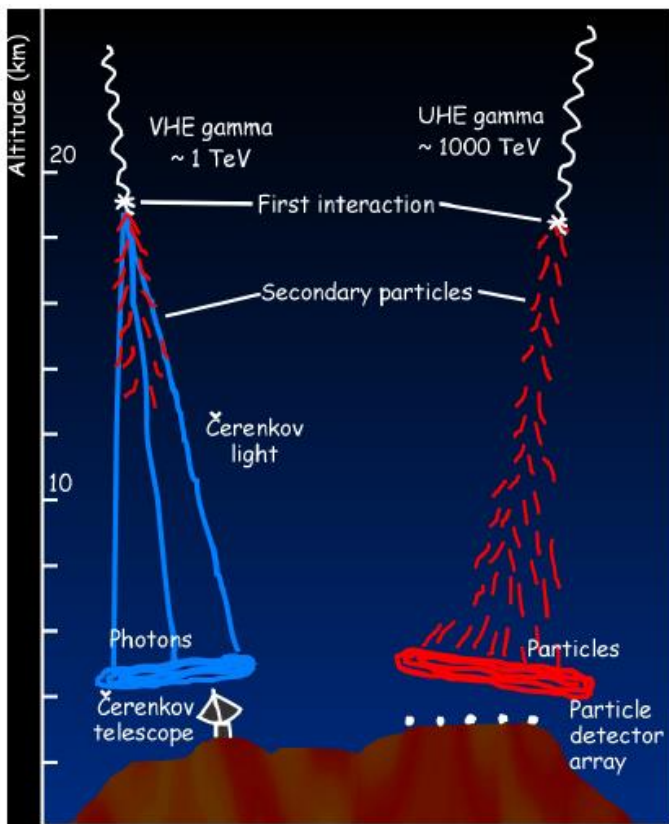
**1 ГэВ – 10 ТэВ**

$\Delta\theta = \sim 0.01^\circ$

$\Delta E/E = 1-2\%$

**70  $X_0$**

# Исследования гамма-излучения от дискретных источников в наземных экспериментах ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)



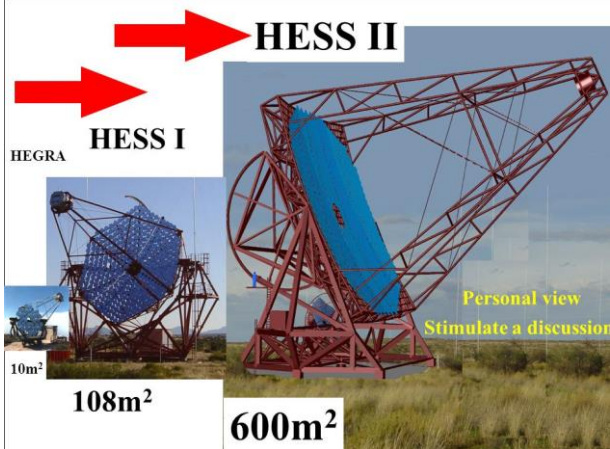
Регистрация черенковского излучения от заряженных частиц, образующихся от первичного гамма-кванта с энергией  $\sim 1$  ТэВ.

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

В 1955 г. на Памирской станции ФИАН под руководством А.Е. Чудакова впервые в мире была создана специальная установка, регистрирующая черенковское излучение в атмосфере от космических лучей. Метод заключался в регистрации вспышек от черенковского излучения, создаваемого в воздухе электронами «широких атмосферных ливней», образующихся при взаимодействии космических частиц с ядрами атомов воздуха.

## Основные наземные установки для измерения гамма-излучения сверхвысоких энергий $E_\gamma > 100$ ГэВ

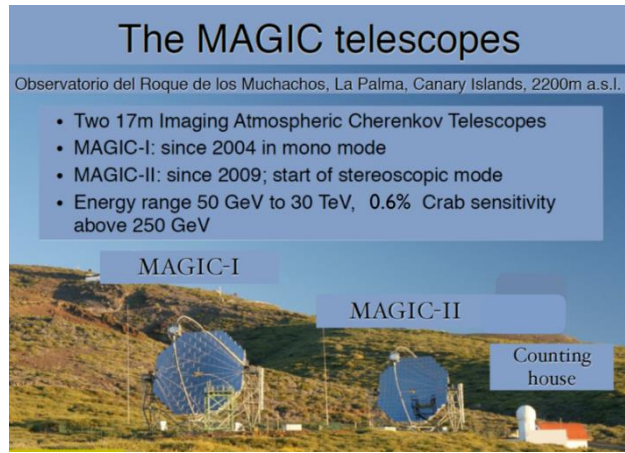
Название	Высота, км	Площадь, м <sup>2</sup>	Поле зрения	Начало работы	Порог, ГэВ	Расположение
H.E.S.S. - H.E.S.S.-II	1,8	4x107	5°	2003	100	Намибия
		1x615	3,6°	2012	30	
MAGIC - MAGIC-II	2,2	236	3,5°	2005	50	Канарские о-ва, Испания
		2x226		2009	50	
VERITAS	1,3	4x106	3,5°	2007	100	Аризона, США
HAWC	4,1	150x150	2 ср	2007	50	Мексика
LHAASO	4,3	10 <sup>6</sup>	1,5 ср	2016	100	Китай, Тибет
CTA (проект)		10 <sup>6</sup>	5°	2025	20	Испания, Чили



Намибия



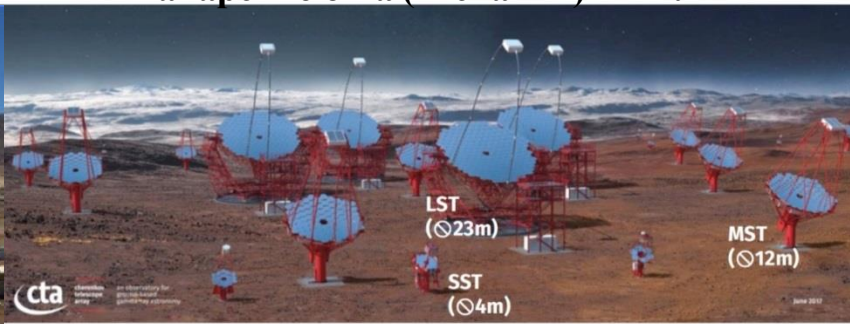
Мексика



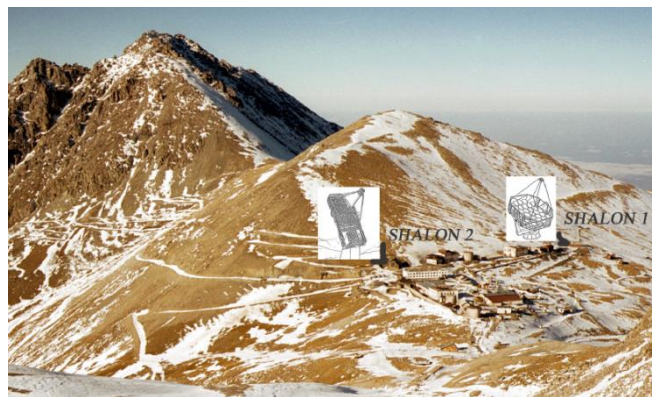
Канарские о-ва, Испания

ЛНААСО, Китай, Тибет

Cherenkov Telescope Array  
Канарские о-ва (Испания) + Чили

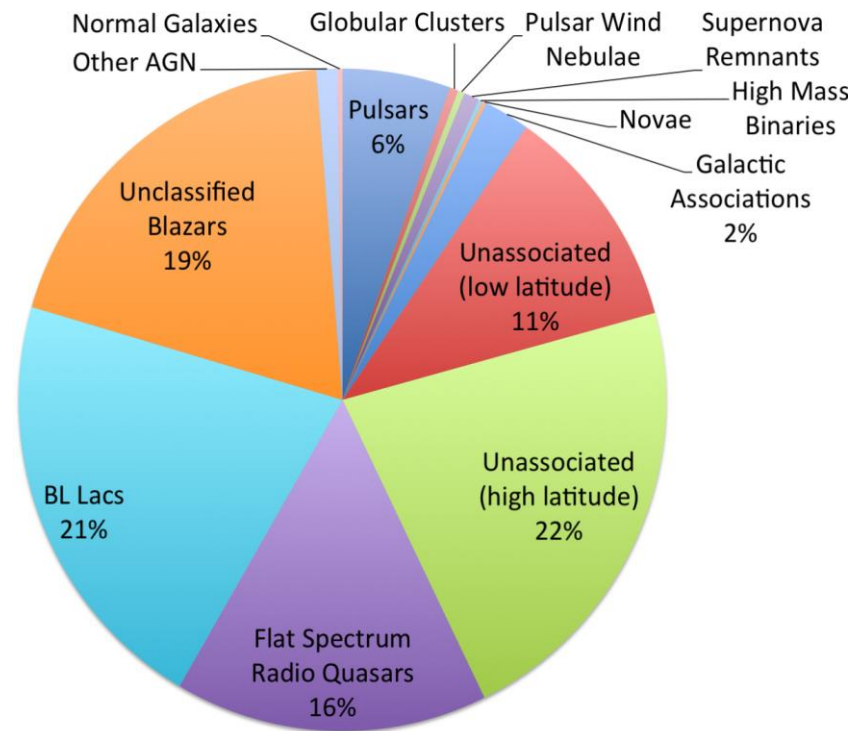


ТАИГА, Россия,  
Тунка, вблизи  
Байкала



SHALON,  
Казахстан,  
Тянь-Шань,  
3338 м

# Результаты гамма-исследований от Fermi-LAT



**4FGL**,  $E_\gamma = 50 \text{ МэВ} - 1000 \text{ ГэВ}$

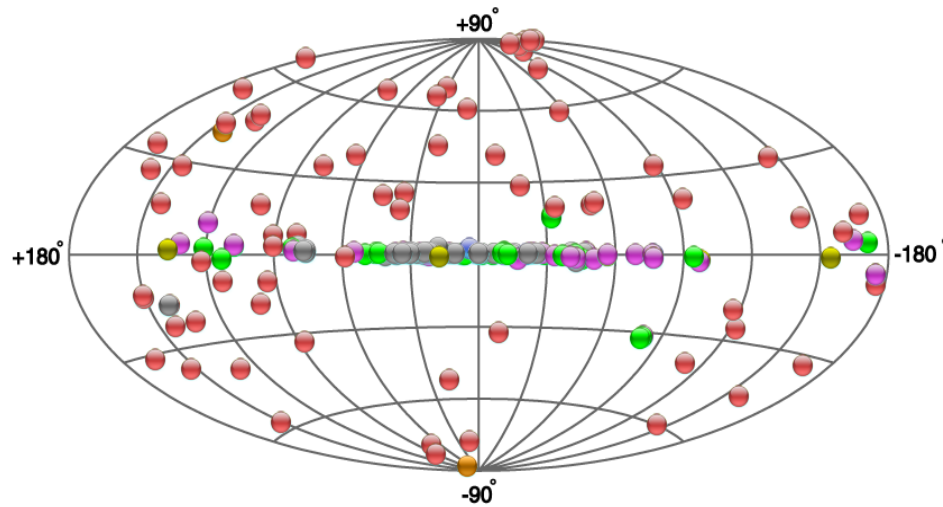
6658 гамма-источников

2157 (34%) неидентифицированы

(Astrophysical Journal Supplement Series, 260:53 (24pp), 2022)

**Угловое разрешение  $\sim 0.1^\circ$  ( $E_\gamma > 10 \text{ ГэВ}$ ) и энергетическое разрешение  $\sim 10\%$  ( $E_\gamma > 10 \text{ ГэВ}$ ) Fermi-LAT  
недостаточно для идентификации многих гамма-источников**

# Результаты исследований гамма-излучения от наземных гамма-телескопов

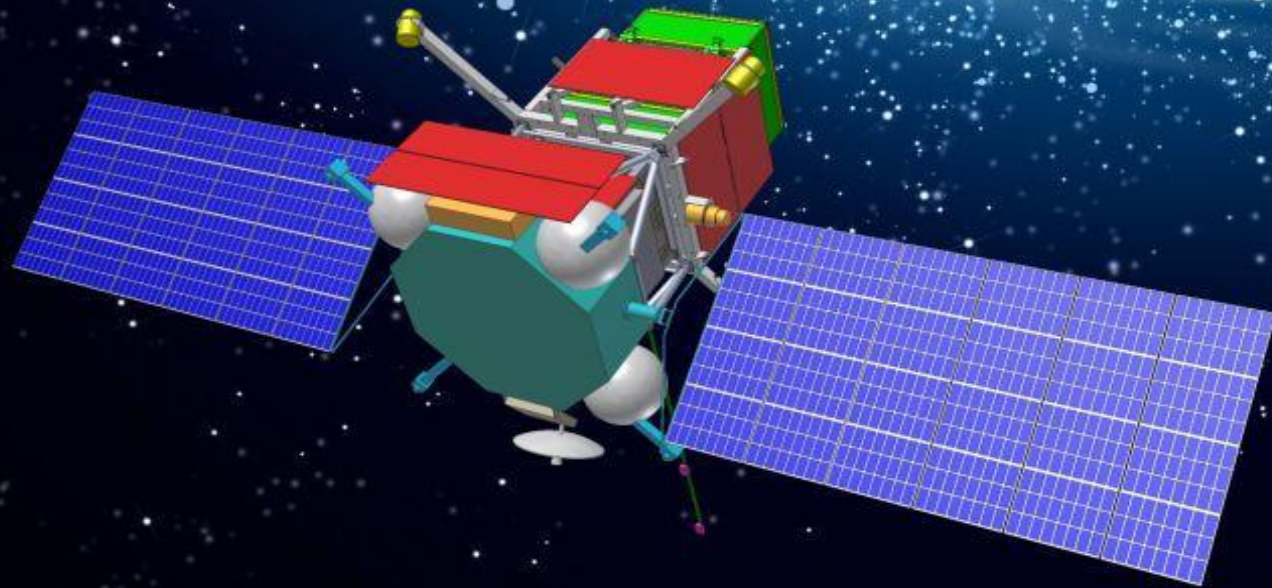


Распределение (в галактических координатах) **~250 дискретных источников (250/6658 ~ 4% от источников Fermi-LAT)** для энергий более 100 ГэВ по данным каталога источников TeVCat (<http://tevcat.uchicago.edu/>), гамма-излучение от которых зарегистрировано наземными установками H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, HAWC, LHAASO

**Угловое ( $\sim 0,1^\circ$ ,  $E_\gamma \sim 100$  ГэВ) и энергетическое (10-15%,  $E_\gamma \sim 100$  ГэВ) разрешения наземных телескопов недостаточно для идентификации многих гамма-источников**



# ΓΑΜΜΑ-400

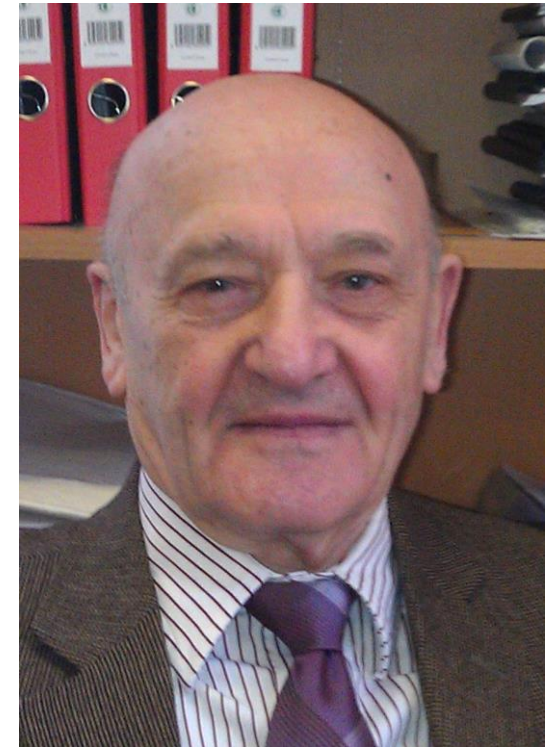




**В.Л. Гинзбург**



**Л.В. Курносова**



**А.М. Гальпер**

Основателями проекта «ГАММА-400» были академик В.Л. Гинзбург и профессор ФИАН Л.В. Курносова. С 2009 г. научным руководителем ГАММА-400 стал профессор МИФИ А.М. Гальпер.

**Первые материалы по ГАММА-400 были представлены:  
Proc. 20<sup>th</sup> ICRC (Moscow, 1987) и  
Space Science Reviews, 49, 215 (1988)**

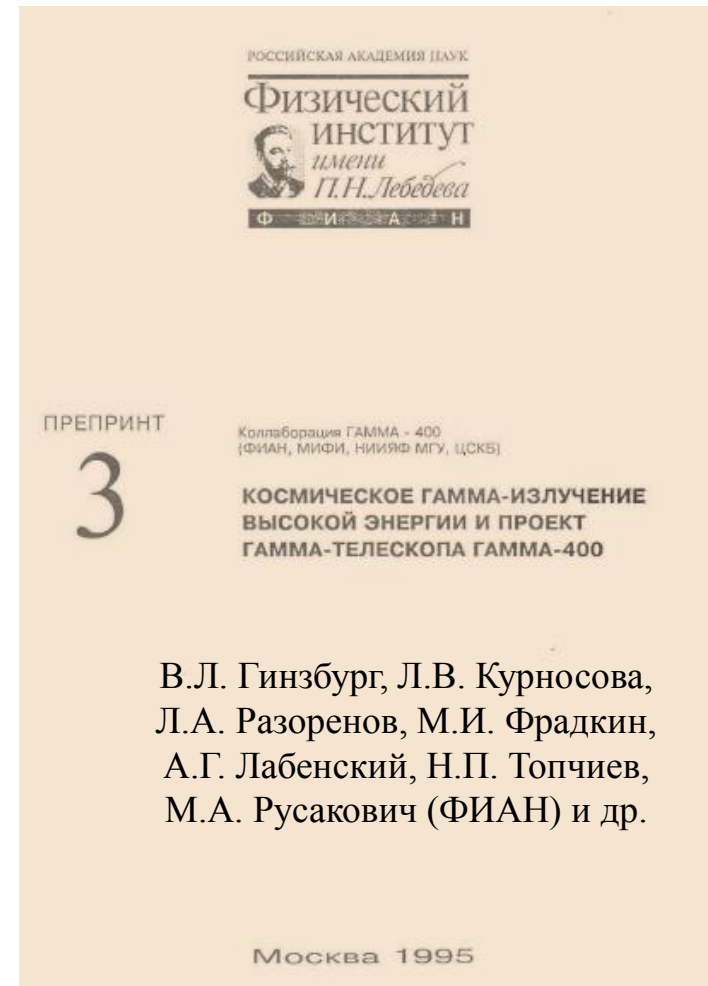
**SOME TASKS OF OBSERVATIONAL GAMMA-RAY  
ASTRONOMY IN THE ENERGY RANGE 5–400 GeV**

V. A. DOGIEL, M. I. FRADKIN, L. V. KURNOSOVA, L. A. RAZORENOV,  
M. A. RUSAKOVICH, and N. P. TOPCHIEV

*P. N. Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences of the USSR, Leninsky pr., 53,  
117924, Moscow, U.S.S.R.*

(Received 1 June, 1988)

**Abstract.** Brief discussion of the necessity to carry out gamma-ray observations in the uninvestigated energy range 5–400 GeV by instrument on the board of space vehicle is given. One of the possible versions of such gamma-telescope is described and some estimations of the possible statistics are made.



В.Л. Гинзбург, Л.В. Курносова,  
Л.А. Разоренов, М.И. Фрадкин,  
А.Г. Лабенский, Н.П. Топчиев,  
М.А. Русакович (ФИАН) и др.

**ГАММА-400 – Гамма-Астрономическая Многофункциональная Модульная  
Аппаратура; 400 – первоначальная верхняя граница энергетического диапазона**

С 1999 г. проводились НИР по договорам с Роскосмосом, а с 2009 г. ОКР.

**В соответствии с Федеральными космическими программами РФ на 2009-2015 гг. и 2016-2025 гг. создается космический комплекс «ГАММА-400», включающий космическую обсерваторию для исследования гамма-излучения в диапазоне высоких энергий**

32. Создание космического комплекса, включающего космическую обсерваторию для исследований гамма-излучения в диапазоне высоких энергий (ОКР "Гамма-400").

Заказчик: федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук"

космический комплекс "Гамма-400", включающий космическую обсерваторию с высоким угловым и энергетическим разрешением, обеспечивающий получение данных для определения природы "темной материи" во Вселенной, развития теории процессов в активных астрофизических объектах, происхождения высокоэнергичных космических лучей и физики элементарных частиц

срок активного существования космического аппарата - не менее 7 лет

Запуск космической обсерватории намечен на ~2030 г.

# **ГАММА-400**

В состав космической обсерватории входят:

**космическая платформа «Навигатор»**

(АО «НПО Лавочкина») и

**комплекс научной аппаратуры «ГАММА-400»**

(КНА «ГАММА-400»)

**КНА «ГАММА-400»**

(ведущая организация – **ФИАН**) включает:

**гамма-телескоп ГАММА-400**

(**ФИАН, НИЯУ МИФИ, НИИСИ РАН, АО «НПО Лавочкина»**).

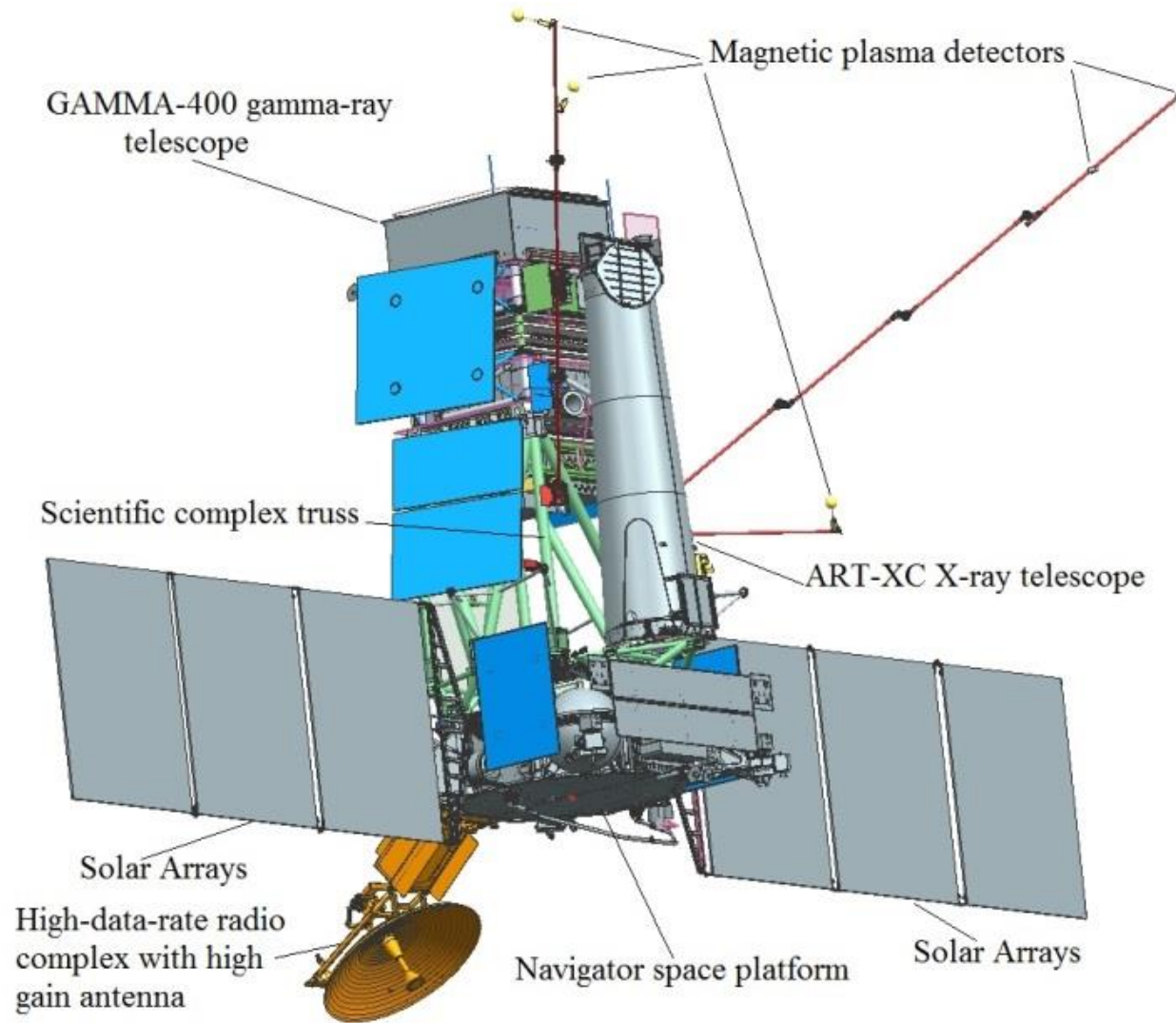
Дополнительно установлены:

-рентгеновский телескоп ART-XC (5-30 кэВ) (ИКИ РАН)

-магнитно-плазменные детекторы ПЛАЗМА-400 (спектрометр солнечного ветра, спектрометр энергичных частиц, магнитометр - ИКИ РАН)

В 2021 г. был выполнен этап «Разработка дополнения к эскизному проекту (ДЭП)» по контракту с Госкорпорацией «Роскосмос». Разработку выполняли: ФИАН (головная организация), НИЯУ МИФИ, ИКИ РАН, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, АО «НПО Лавочкина». Материалы ДЭП прошли успешную экспертизу в организациях Роскосмоса: АО «ЦНИИмаш», АО «Организация АГАТ», ФГУП «НПО «Техномаш», АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения», АО «Композит». Материалы ДЭП были рассмотрены комиссией Госкорпорации «Роскосмос» и сделан вывод, что **ДЭП считать выполненным и следует перейти на следующий этап – разработка рабочей конструкторской документации.**

# Облик КНА на платформе «Навигатор»



Гамма-телескоп ГАММА-400 и рентгеновский телескоп ART-XC расположены на ферме КНА соосно и с полями зрения  $\pm 45^\circ$  и  $\pm 0,2^\circ$ , соответственно. Конструкции приборов не затеняют друг друга.

# ОРБИТА КА «ГАММА-400» И РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Начальные параметры орбиты:

- апогей 300 000 км;
- перигей 500 км;
- наклонение  $51.4^\circ$ .



**Основной режим наблюдений:**

- длительные наблюдения (до 100 дней) Галактического центра и протяженных гамма-источников со сдвигом КА на  $1^\circ$  каждые сутки. Точность наведения «Навигатора» на источник -  $30''$ .

Под воздействием Солнца, Луны и Земли примерно через 6 месяцев орбита полностью выйдет из радиационных поясов и станет круговой с радиусом  $\sim 200\,000$  км.

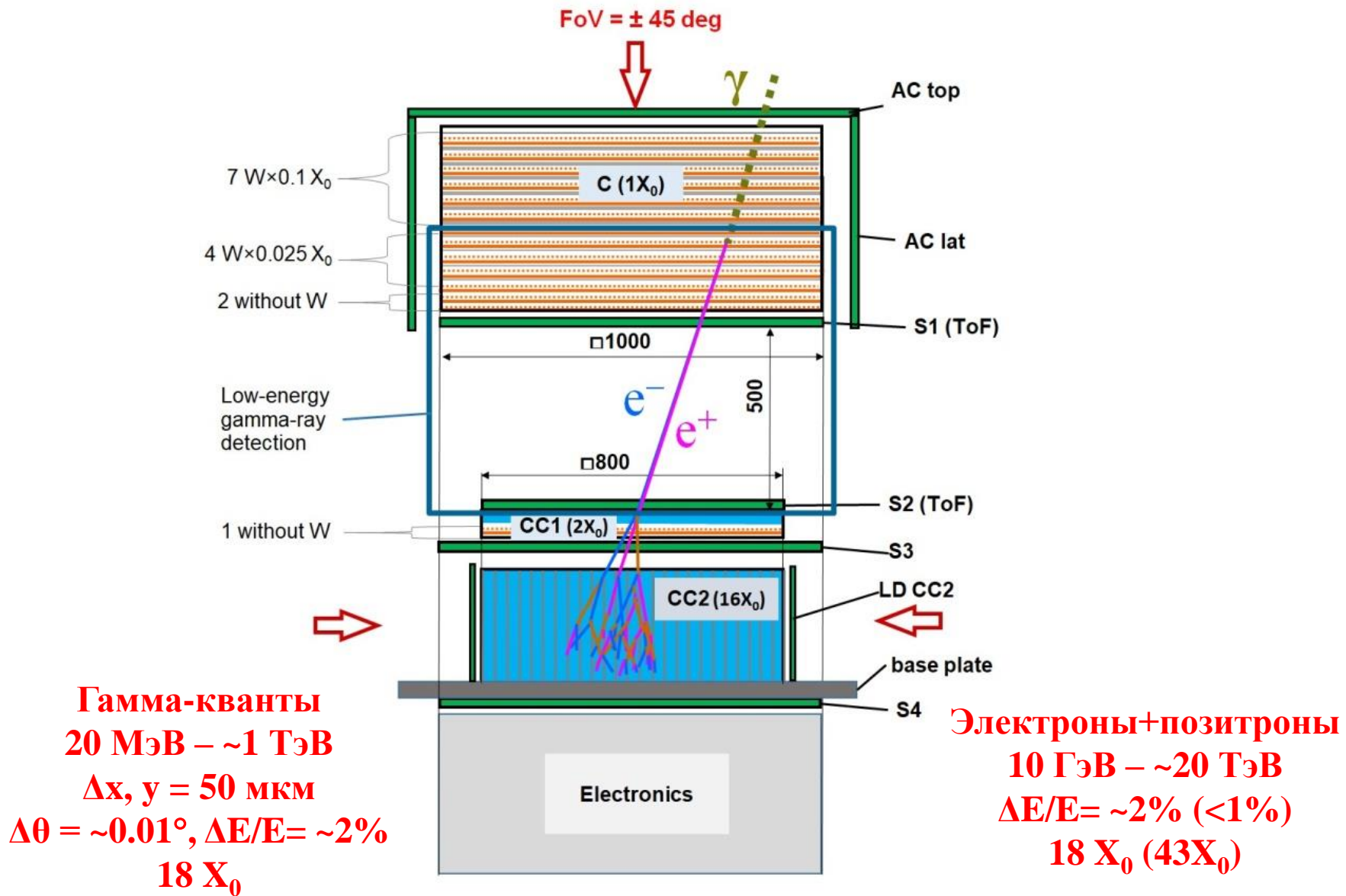
Таким образом орбита будет вне радиационных поясов и не будет затеняться Землей.





**В качестве наземной станции приема предлагается использовать радиоастрономический комплекс на базе радиотелескопа РТ-22 в Пушино (ФИАН).**

**В качестве запасной наземной станции приема информации рассматривается радиотелескоп РТ-22 Симеиз, Крым.**



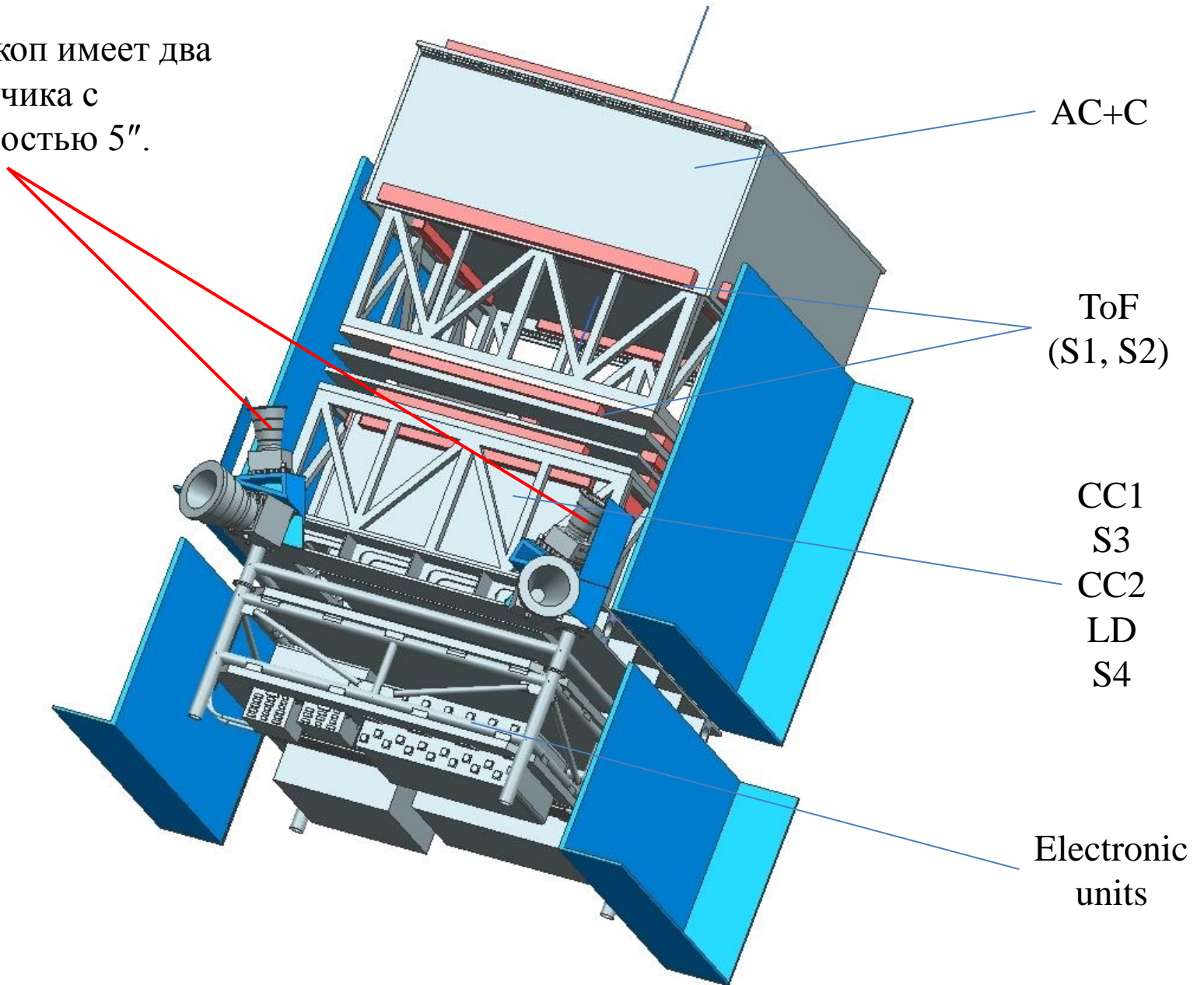
### Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400

AC, S1, S2, S3, S4, LD – сцинтилляционные пластиковые детекторы, C – SciFi сцинтилляционные фиберные детекторы, CC1 и CC2 – CsI(Tl) сцинтилляционные детекторы.

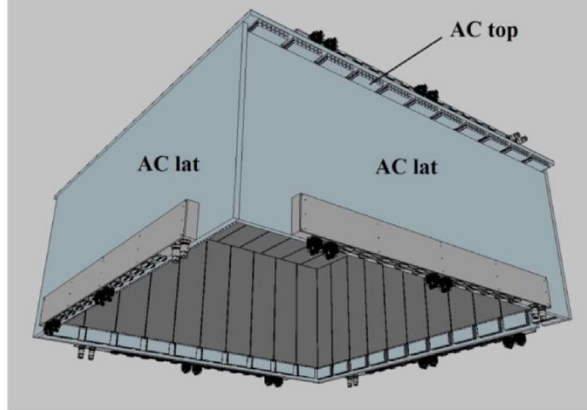
Все детекторные системы разрабатываются в России и в н/вр отработаны.

# Облик гамма-телескопа ГАММА-400

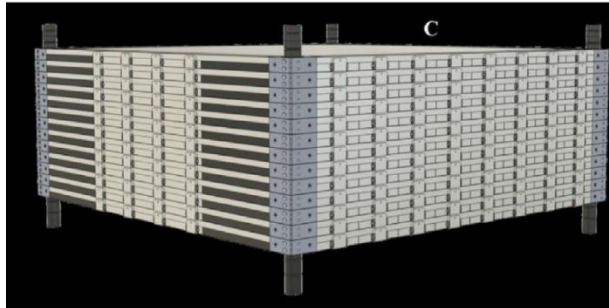
Гамма-телескоп имеет два звездных датчика с угловой точностью 5".



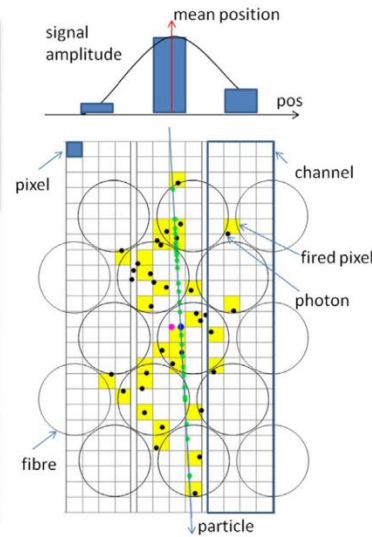
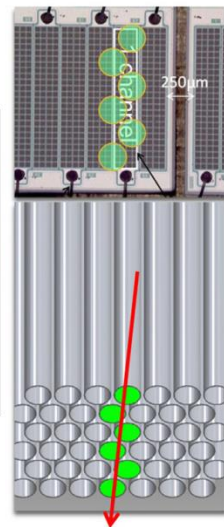
# Детекторные системы гамма-телескопа ГАММА-400: ACtop, AClat (a); C (b, c); S1(ToF), S2(ToF) (d); S3, S4 (e)



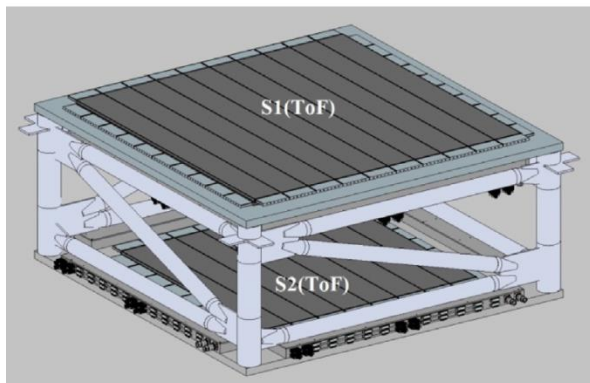
(a)



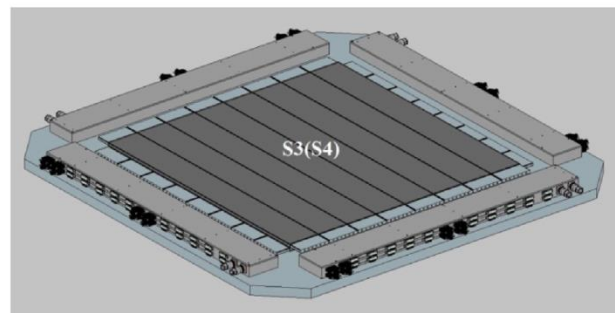
(b)



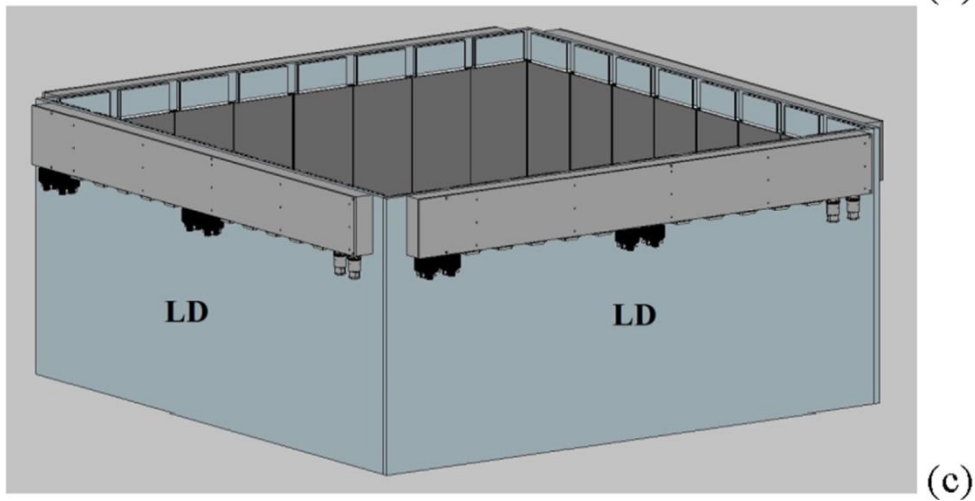
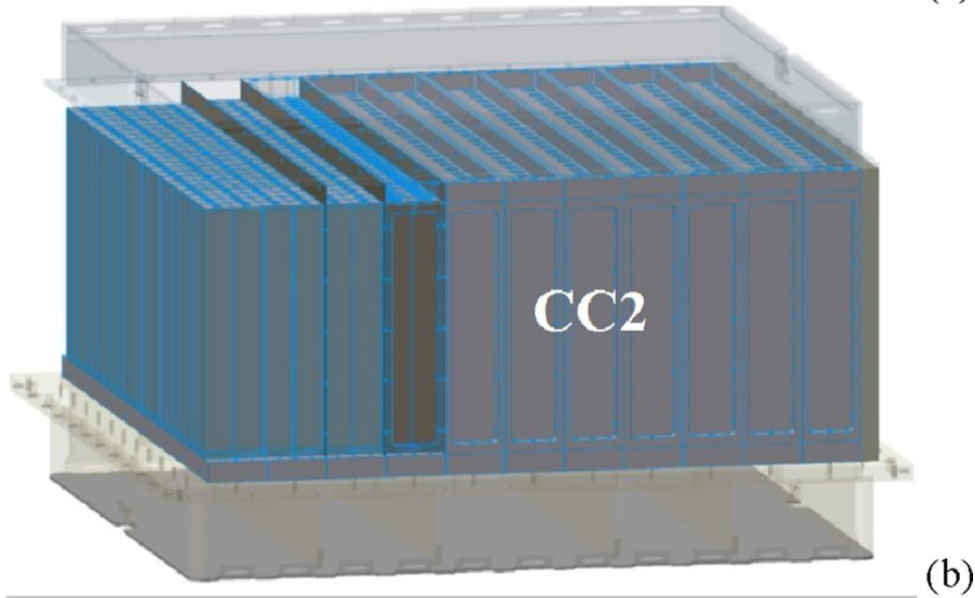
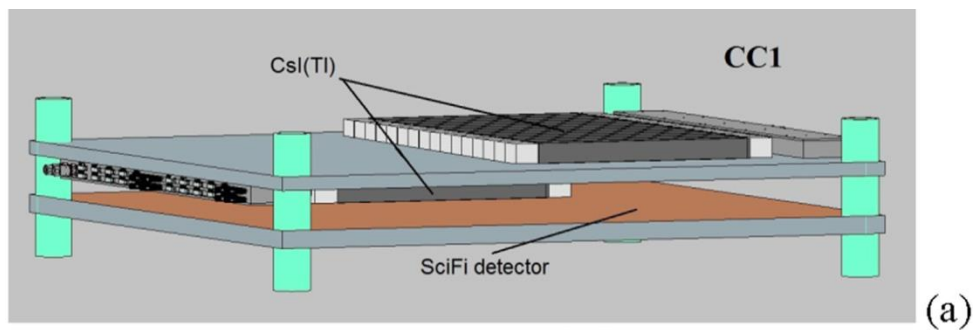
(c)



(d)

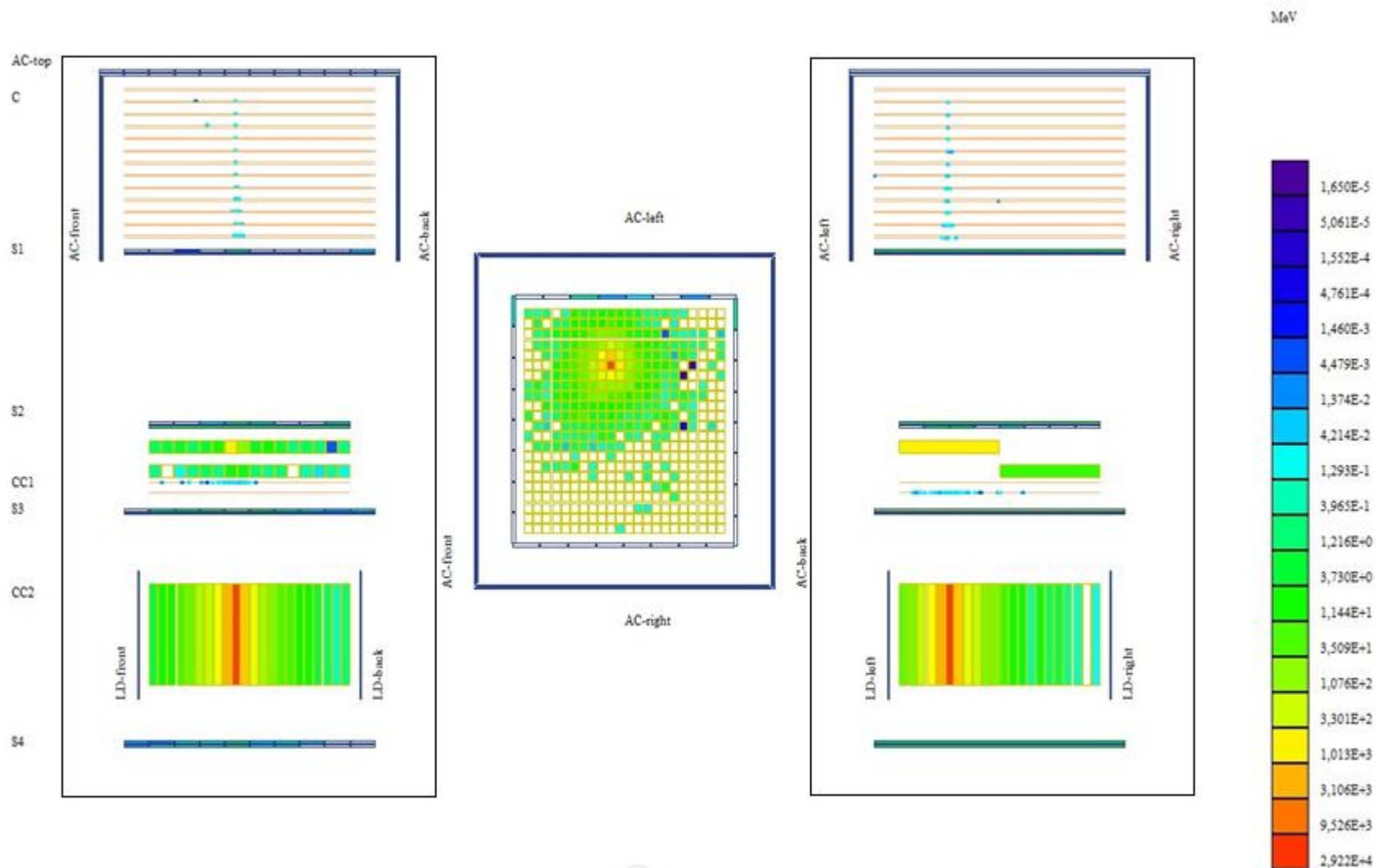


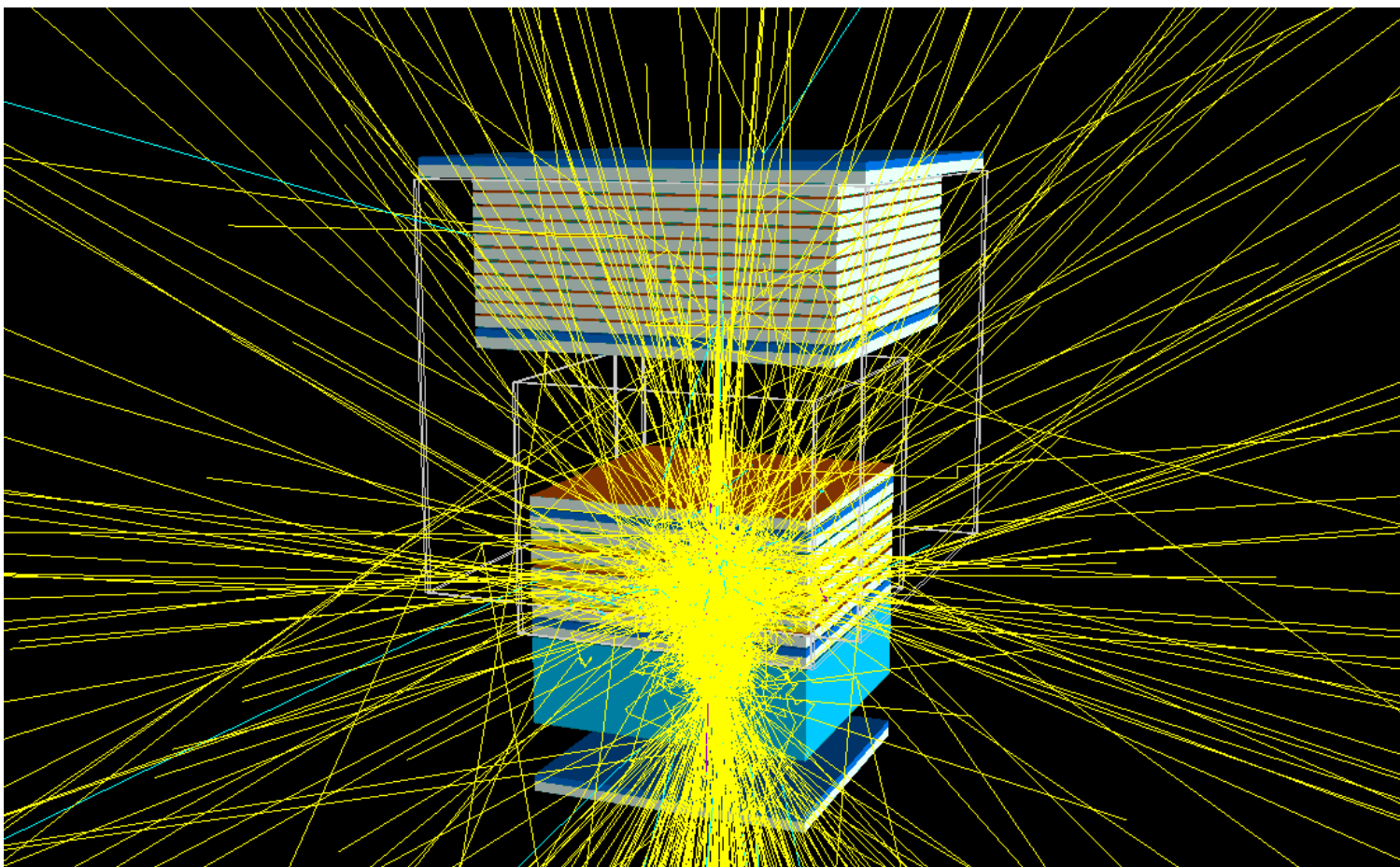
(e)



**Детекторные системы  
гамма-телескопа ГАММА-400:  
CC1 (a), CC2 (b), LD (c)**

# Симуляция регистрации 50-ГэВ гамма-кванта



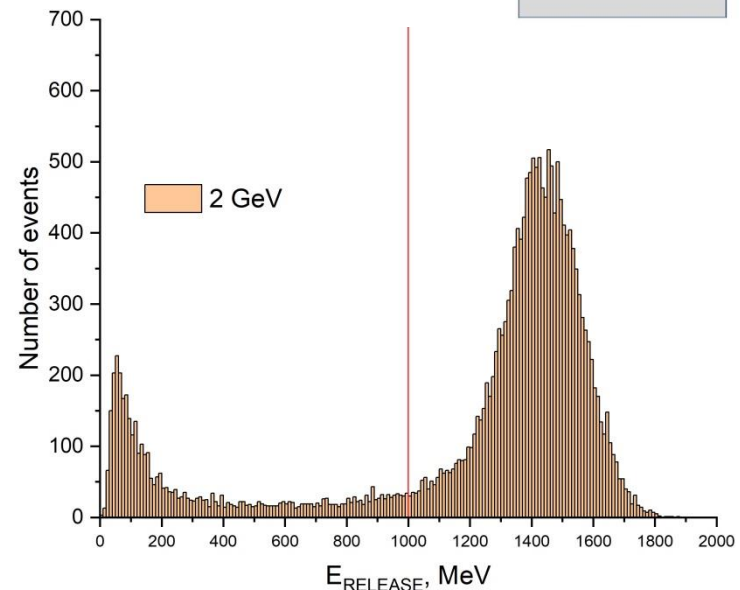
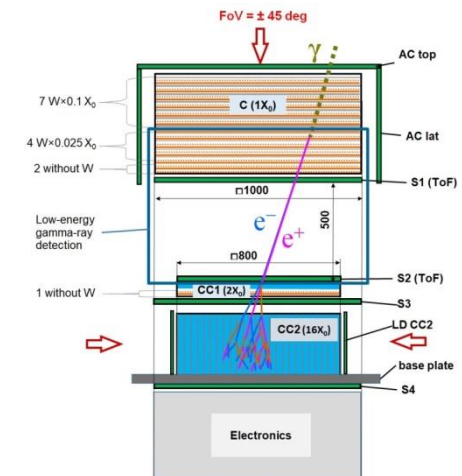
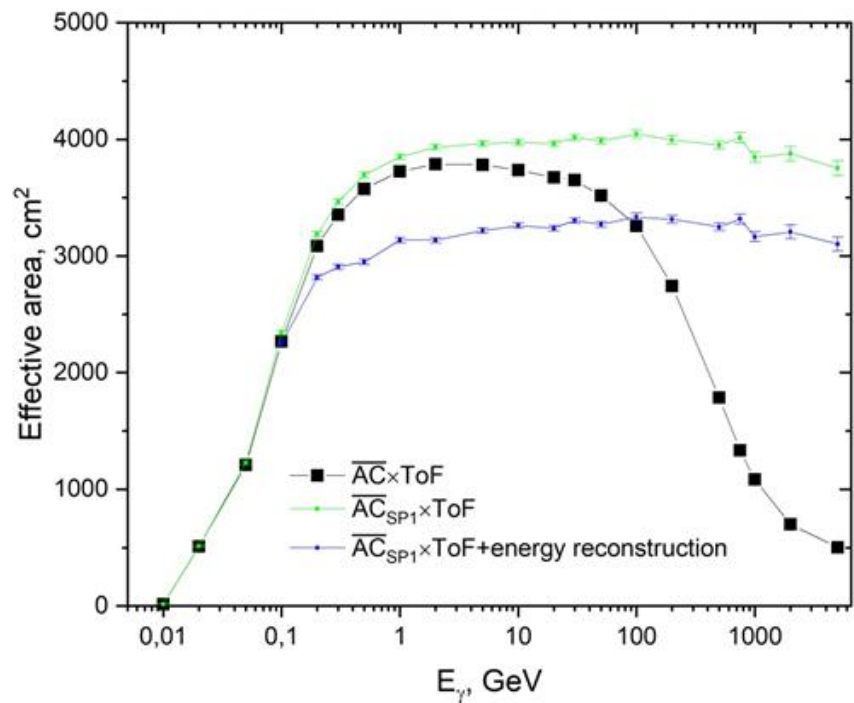


**Взаимодействие гамма-кванта ( $E_\gamma = 100$  ГэВ) с веществом гамма-телескопа ГАММА-400 с образованием частиц «обратного тока». Для устранения «обратного тока» используются методы сегментирования и времени пролета.**

Основной триггер:  $\overline{AC_{SP1}} \times ToF$

$$\overline{AC_{SP1}} = \overline{AC(\text{same position strip})} \mid [\text{timeAC} > \text{timeS1}]$$

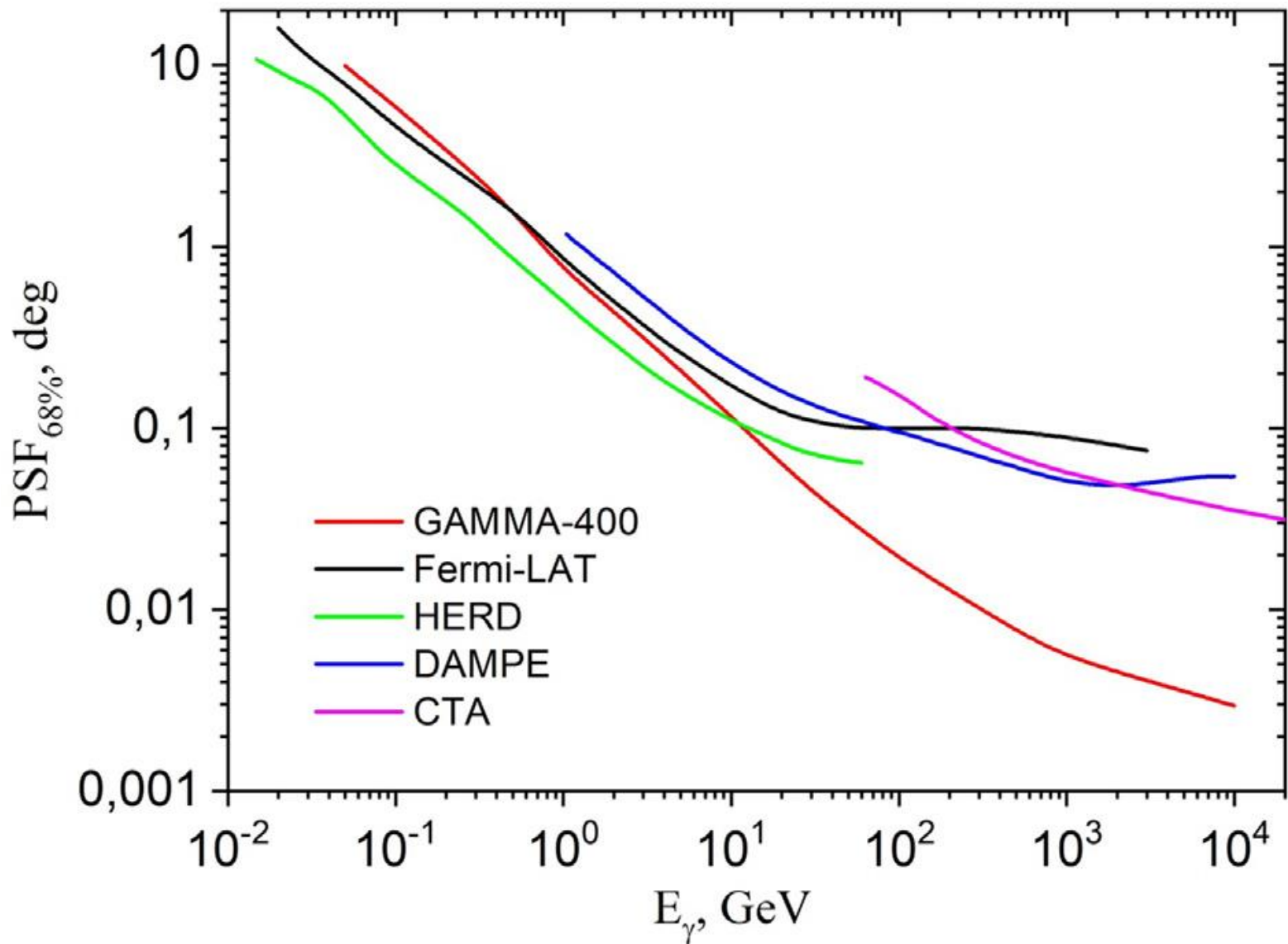
$$ToF = S1 \times S2 \times [\text{timeS1} < \text{timeS2}]$$



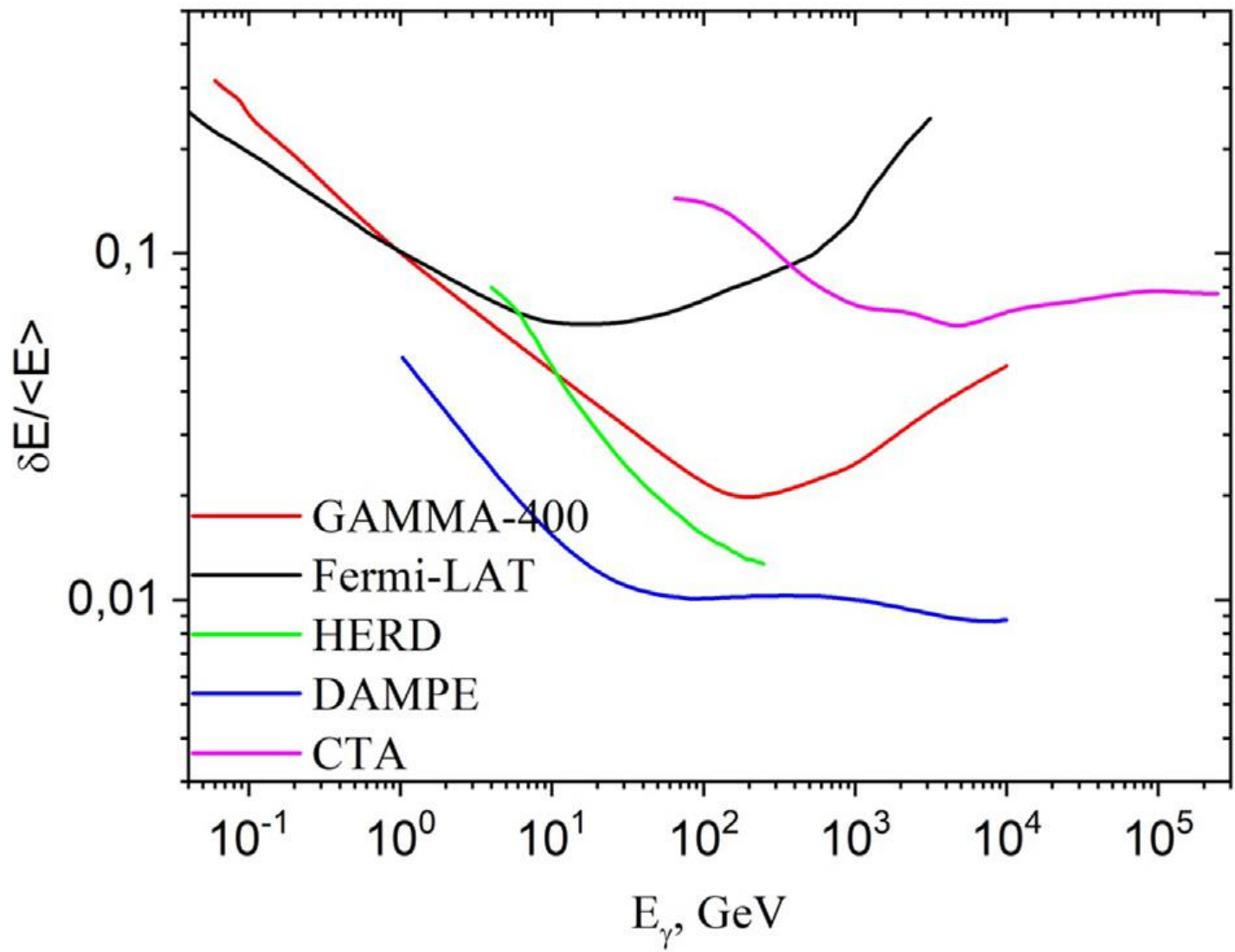
**Зависимость эффективной площади от энергии.**

При учете восстановления трека и энергии эффективная площадь снижается до 3200 см<sup>2</sup>



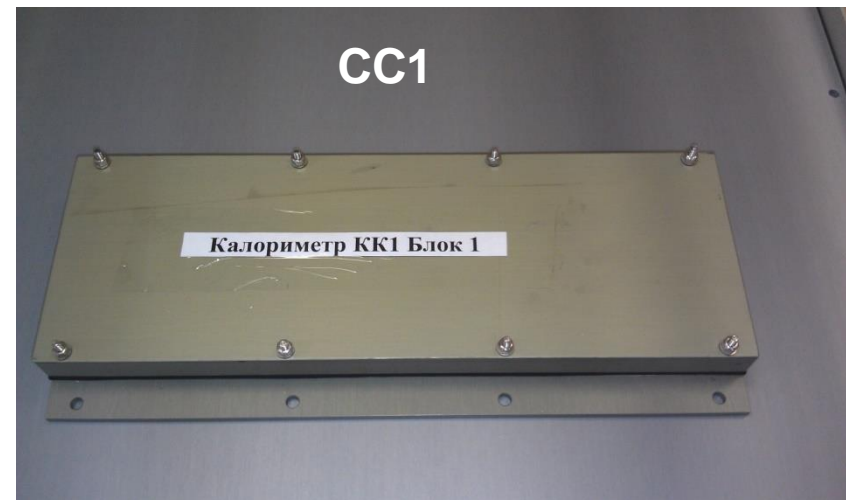
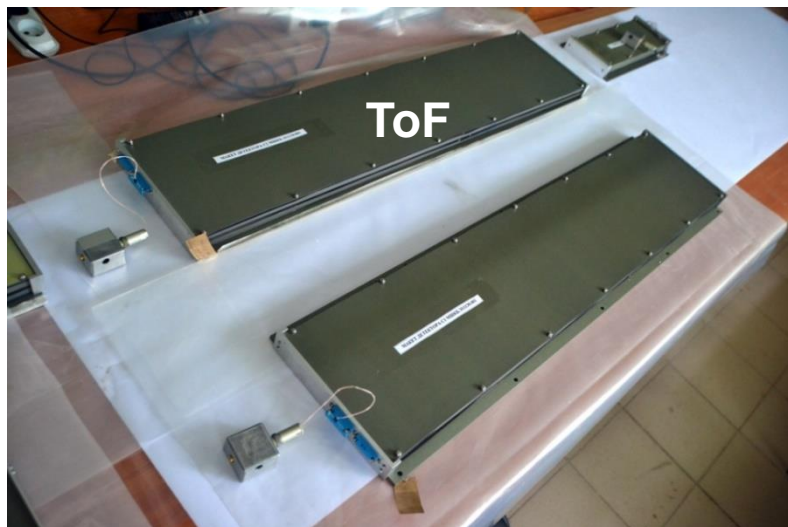
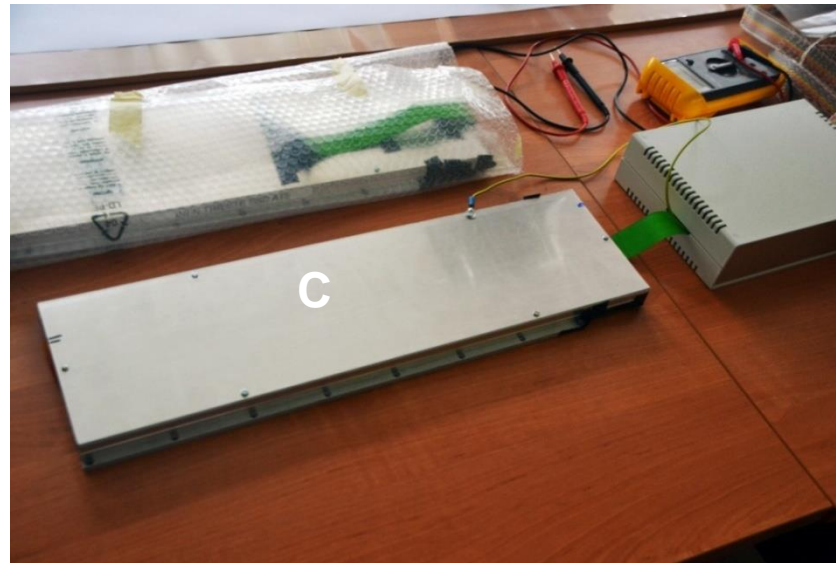
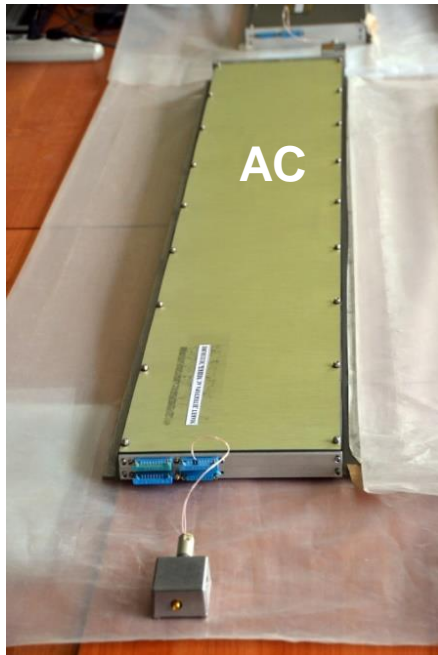


**Зависимость углового разрешения от энергии.**

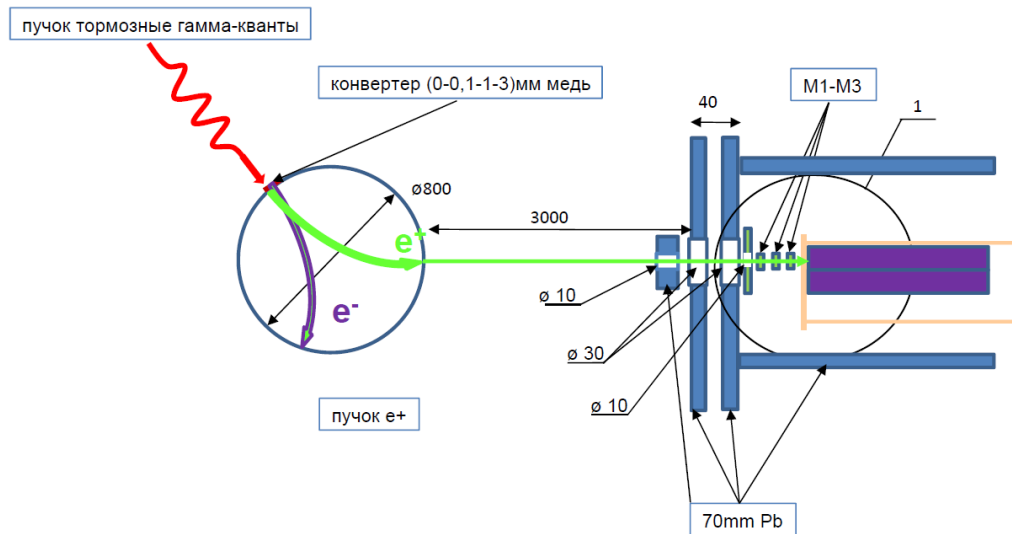


**Зависимость энергетического разрешения от энергии.**

# Макеты детекторных систем ГАММА-400



# Электронный синхротрон С-25Р ФИАН (г. Троицк) до 500 МэВ



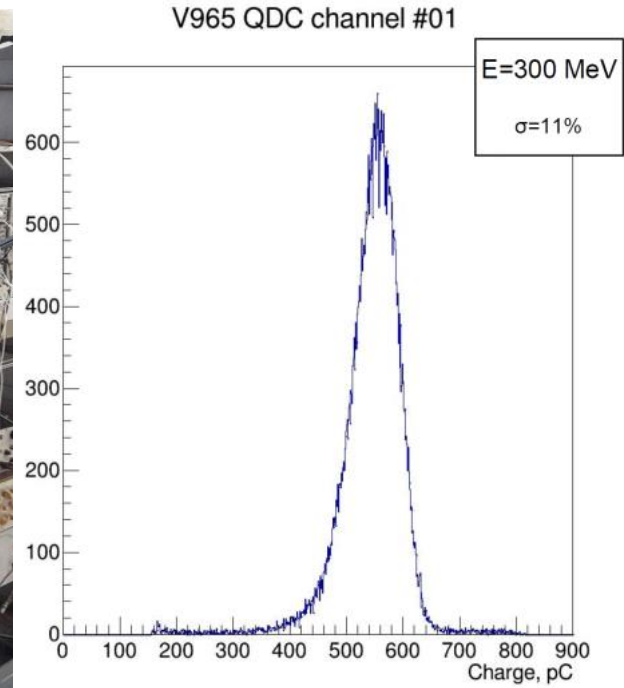
**Контрольно-измерительная аппаратура для калибровки на синхротроне С-25Р ФИАН (г. Троицк) на пучке позитронов в диапазоне энергий 200-300 МэВ**



**Калибровка макетов детекторов ГАММА-400 на синхротроне С-25Р ФИАН (г. Троицк) на пучке позитронов в диапазоне энергий 200-300 МэВ**



**Positron beam**



В результате испытаний на пучке позитронов с энергиями 200-300 МэВ на ускорителе С-25Р (ФИАН, Троицк) были получены следующие характеристики:

- эффективность регистрации заряженных частиц для АС – 0.9996;
  - временное разрешение АС – 200 пс;
  - коэффициент разделения частиц, летящих сверху-вниз от снизу-вверх, для ТоF – 1000;
  - временное разрешение ТоF – 200 пс;
- энергетическое разрешение калориметра СС2 – 11%





ФИАН



НИЯУ МИФИ

**Рабочие места по исследованию характеристик детекторных систем  
ГАММА-400 в ФИАН и НИЯУ МИФИ.**

**Основными научными задачами гамма-телескопа ГАММА-400, сохраняющими актуальность на сегодняшний день, являются:**

- 1) поиск особенностей в энергетических спектрах высокоэнергетического гамма-излучения до энергий  $\sim 1000$  ГэВ, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи, благодаря высокому энергетическому разрешению  $\sim 2\%$  ( $E_\gamma = 100$  ГэВ);
- 2) исследование дискретных источников гамма-излучения и их идентификация (по четвертому каталогу Fermi-LAT зарегистрировано гамма-излучение от  $\sim 6500$  источников,  $\sim 30\%$  из них не идентифицировано) за счет высокого углового разрешения  $\sim 0,01^\circ$  ( $E_\gamma = 100$  ГэВ);
- 3) детальное изучение пространственной структуры протяженных дискретных источников благодаря высокому угловому разрешению  $\sim 0,01^\circ$  ( $E_\gamma = 100$  ГэВ);
- 4) изучение переменности источника, в том числе регистрацию гамма-излучения миллисекундных пульсаров, для объяснения превышения гамма-излучения от центра Галактики за счет высокой точности синхронизации событий в несколько мкс (благодаря высоким временным разрешениям AC и ToF  $\sim 200$  пс);
- 5) поиск и исследование гамма-всплесков при регистрации гамма-излучения как сверху вниз по оси гамма-телескопа, так и с четырех боковых направлений;
- 6) проведение одновременных наблюдений дискретных источников гамма-излучения совместно с рентгеновскими телескопами, наземными средствами (с СТА и российской TAIGA), оптическими, радио- и нейтринными телескопами;
- 7) регистрация потоков электронов + позитронов КЛ с обоих направлений сверху вниз по оси гамма-телескопа до энергий в несколько ТэВ (при толщине калориметра  $18 X_0$ ) и с четырех боковых направлений до энергий  $\sim 20$  ТэВ (при толщине калориметра  $43 X_0$ ) и получить значительно лучшую статистику измерений.

# Сравнение основных параметров ГАММА-400 и Fermi-LAT

	Fermi-LAT	ГАММА-400
Орбита	круговая, 565 км	высокоэллиптическая, 500-300000 км (без затенения Землей)
Режим работы	обзор неба (3 часа)	наблюдение (до 100 дней)
Экспозиция/время работы	1/8	<b>1</b>
Энергетический диапазон	50 МэВ - 1000 ГэВ	~20 МэВ – ~1000 ГэВ
Эффективная площадь ( $E_\gamma > 1$ ГэВ)	~9000 см <sup>2</sup>	~4000 см <sup>2</sup>
Координатные детекторы - съем информации	Si стрипы бинарный	SciFi <b>аналоговый</b>
ВПС	-	<b>ВПС (L = 50 см)</b>
Угловое разрешение	~0,1° ( $E_\gamma = 100$ ГэВ)	<b>~0,01° (<math>E_\gamma = 100</math> ГэВ)</b>
Калориметр - толщина	CsI(Tl) ~8,5X <sub>0</sub>	CsI(Tl)+SciFi <b>~18X<sub>0</sub> (43X<sub>0</sub>)</b>
Энергетическое разрешение	~10% ( $E_\gamma = 100$ ГэВ)	<b>~2% (<math>E_\gamma = 100</math> ГэВ)</b>
Объем информации	15 Гбайт/день	100 Гбайт/день

	Космические гамма-телескопы						Наземные установки
	Низкие энергии			Высокие энергии			
	ASTROGAM	AMEGO	Fermi-LAT	ГАММА-400	HERD	AMS-100	СТА
Страна	Европа	США	США	Россия	Китай	Европа +США	
Диапазон энергий, $\gamma$	0,3 МэВ – 3 ГэВ	0,2 МэВ - 10 ГэВ	50 МэВ – 1000 ГэВ	20 МэВ - 1000 ГэВ	0,5 ГэВ – 10 ТэВ	1 ГэВ – 10 ТэВ	> 50 ГэВ
Вид наблюдения	Сканирование	Сканирование	Сканирование	Источник	Сканирование	Сканирование	Сканирование
Орбита	Круговая, ~550 км	Круговая, ~550 км	Круговая, ~550 км	Высоко-апогейная, ~200 000 км	Круговая, ~400 км	L2, 1,5 млн. км	
Угловое разрешение	0,1°	1°	0,1°	~0,01°	0,1°	~0,01°	0,1°
Энергетическое разрешение	20%	10%	10%	~2%	1-2%	1-2%	15%

Характеристики разрабатываемых гамма-телескопов по сравнению с Fermi-LAT

# Сравнение возможностей Fermi-LAT и GAMMA-400 регистрировать гамма-линии от частиц темной материи

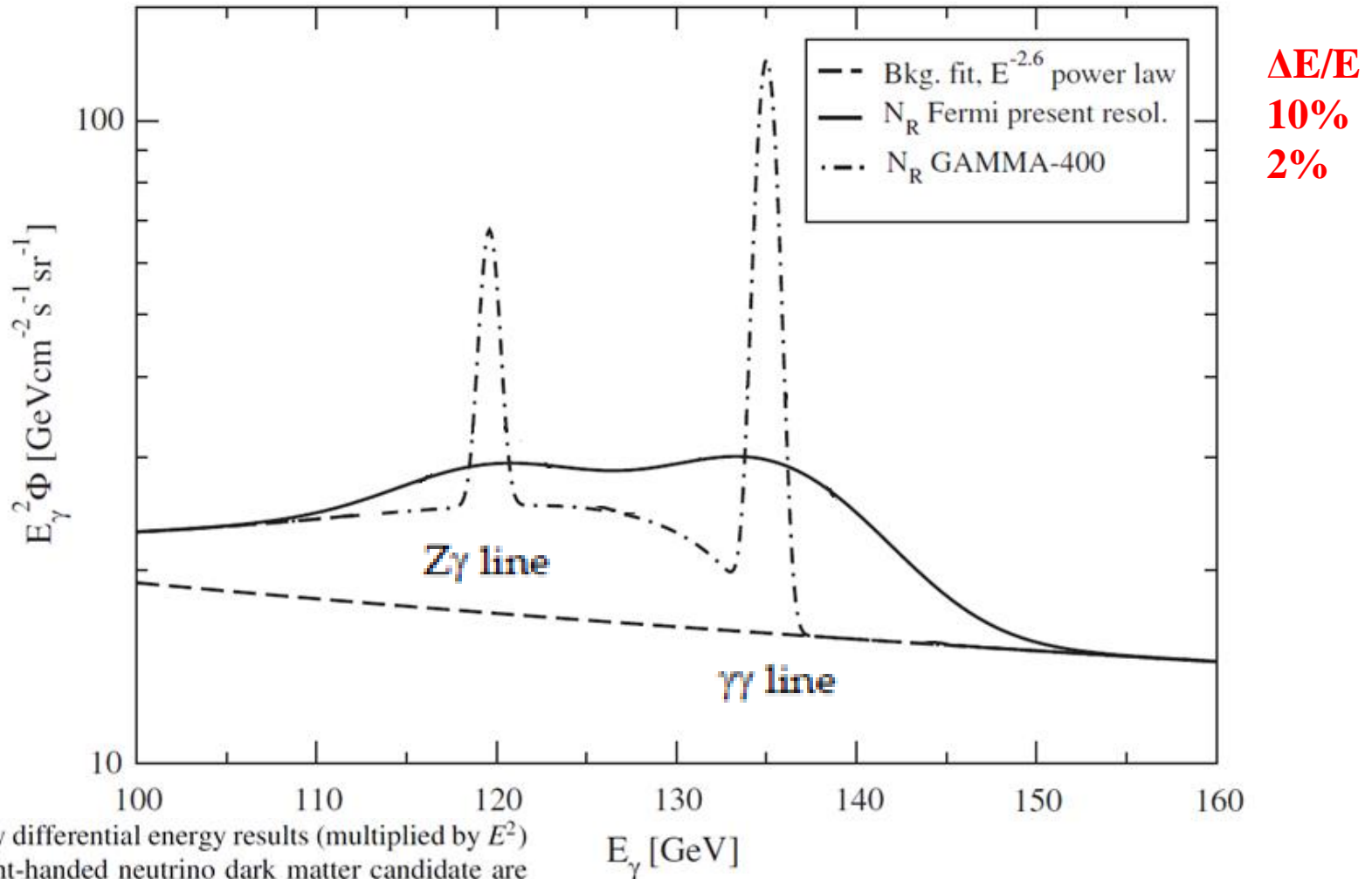


FIG. 3. The  $\gamma$ -ray differential energy results (multiplied by  $E^2$ ) for a 135 GeV right-handed neutrino dark matter candidate are shown, with the present Fermi-LAT energy resolution  $\Delta E/E = 10\%$  FWHM (solid line)

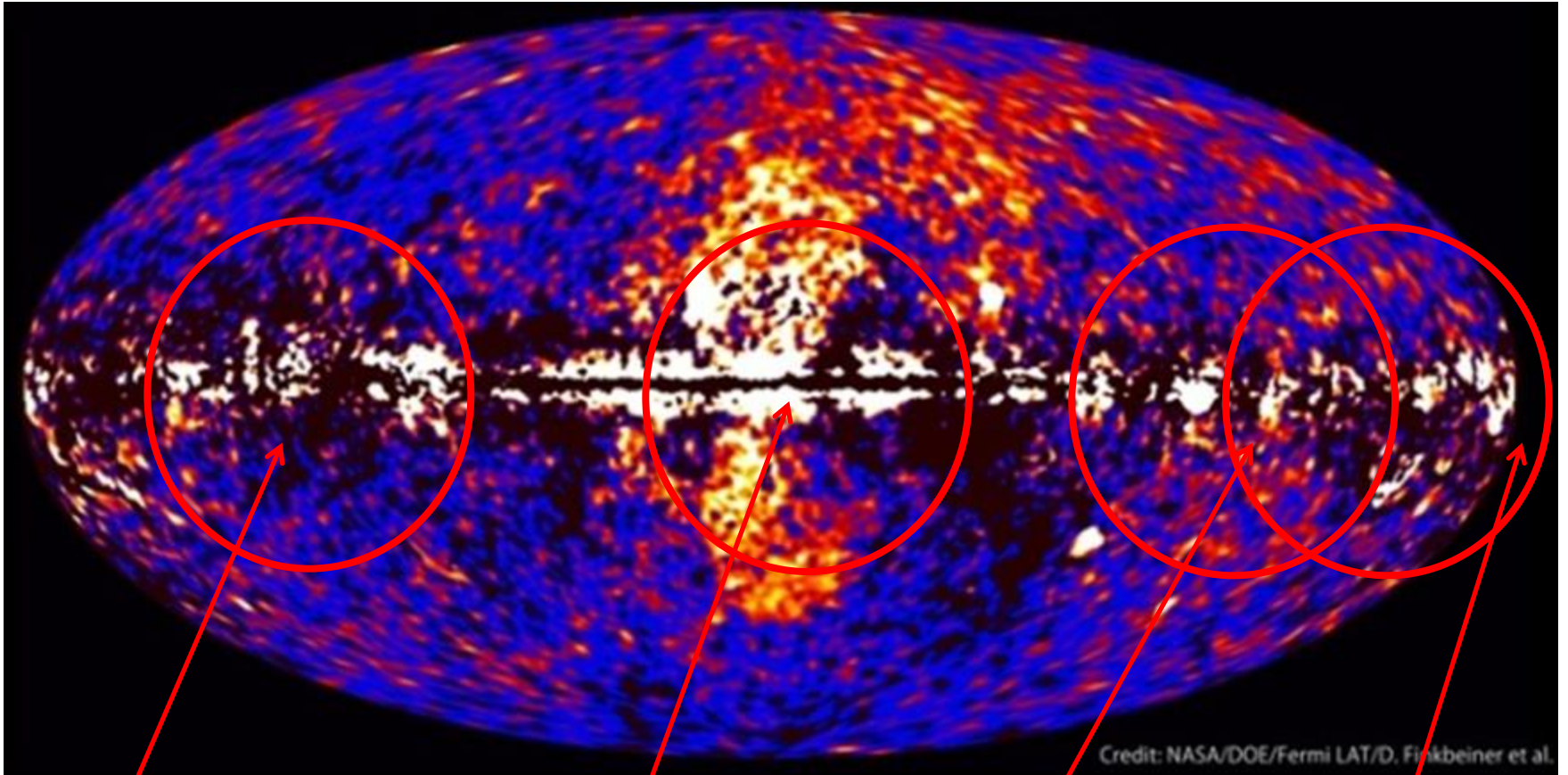
and with a future  $\gamma$ -ray instrument, such as GAMMA-400 [38] (dash-dotted line) with resolution at the one percent level. The extrapolated power-law  $\sim E^{-2.6}$  of the presently measured continuous  $\gamma$ -ray background is also shown.

PHYSICAL REVIEW D **86**, 103514 (2012)

**130 GeV fingerprint of right-handed neutrino dark matter**

Lars Bergström\*

Исследования гамма-излучения от Галактического центра, Галактической плоскости, областей Краб, Лебедь, Вела, Геминга и др. с апертурой  $\pm 45^\circ$



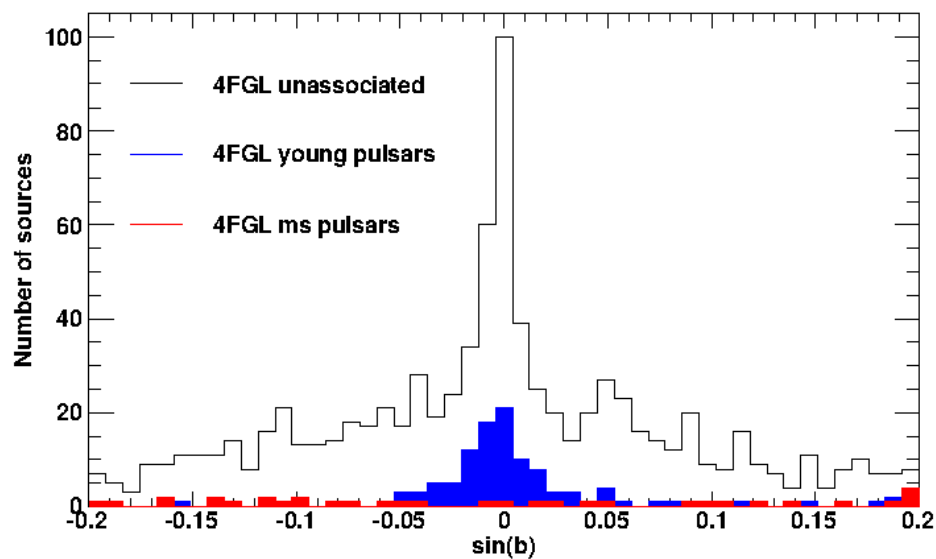
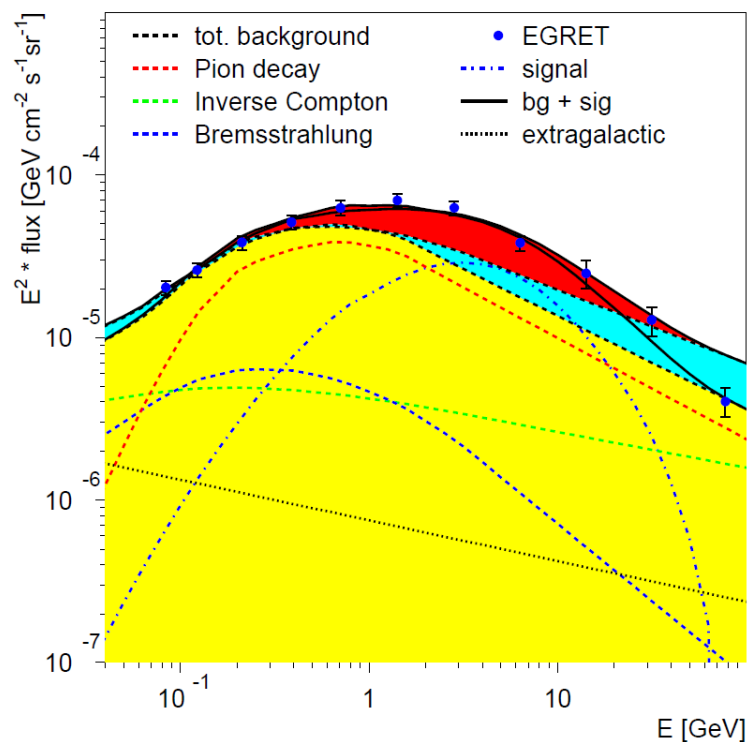
**Cygnus**

**Galactic Center,  
Fermi Bubbles**

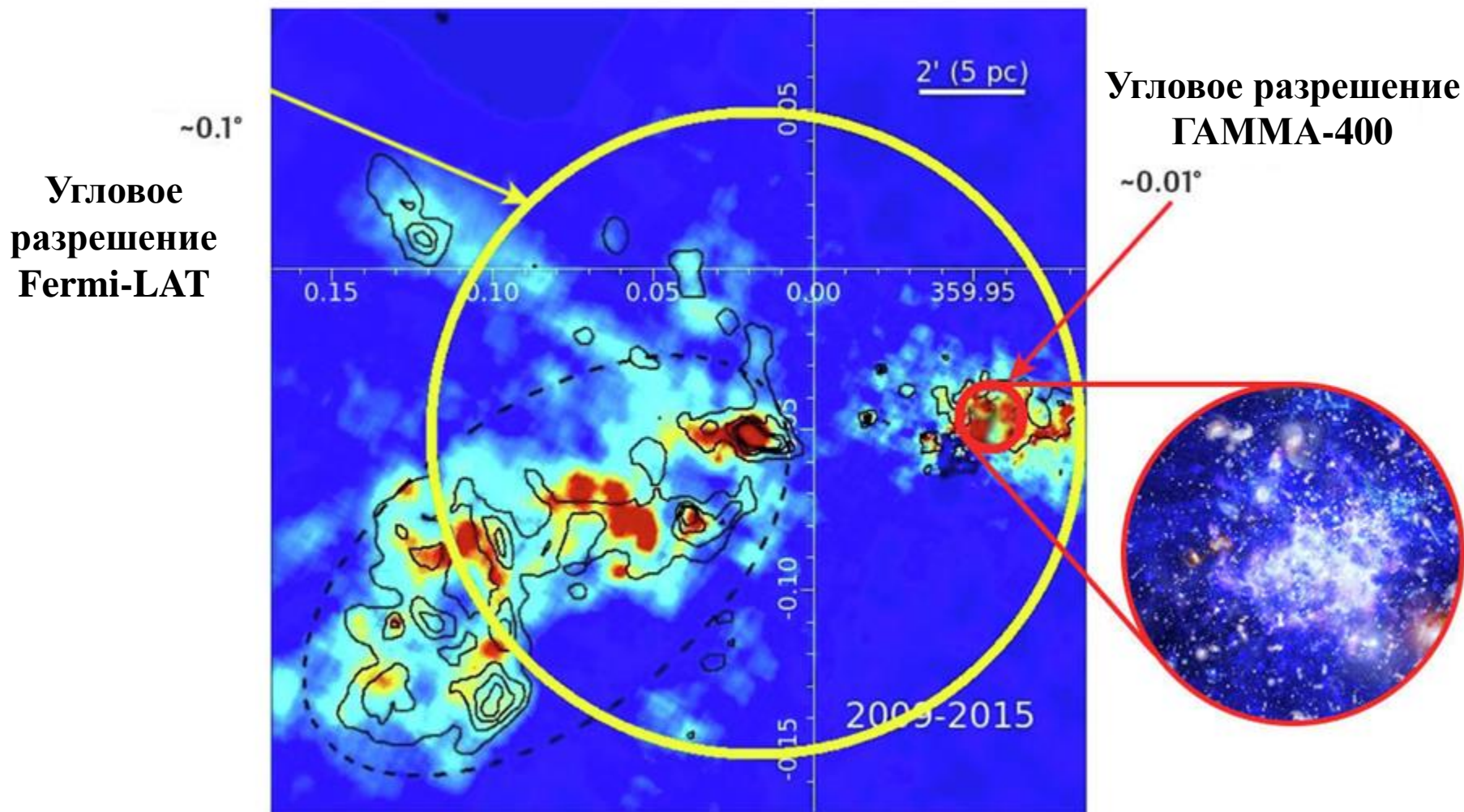
**Vela**

**Crab, Geminga**

По данным Fermi-LAT из 6658 дискретных источников 2157 источников не идентифицировано. Из рисунка видно, что их основная часть расположена в Галактической плоскости. Для их идентификации требуется высокое угловое разрешение – одна из задач ГАММА-400. Кроме того, по данным Fermi-LAT найдено около 80 протяженных источников. Их картографирование – задача для ГАММА-400. По данным EGRET и Fermi-LAT в Галактическом центре имеется избыток гамма-излучения, который может быть объяснен либо наличием темной материи, либо гамма-излучением от миллисекундных пульсаров – еще одна задача для ГАММА-400.



# Исследование Галактического центра и протяженных источников. Сравнение Fermi-LAT и ГАММА-400, используя рентгеновские наблюдения телескопа Chandra (США)





# Одновременные наблюдения в различных областях астрономии :

**-гравитационно-волновые**

LIGO

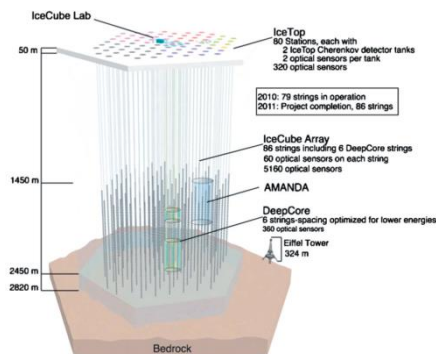
(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, США)



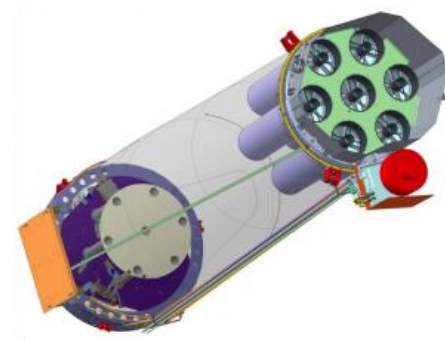
Virgo interferometer (Европа)



**-нейтринные (IceCube)**

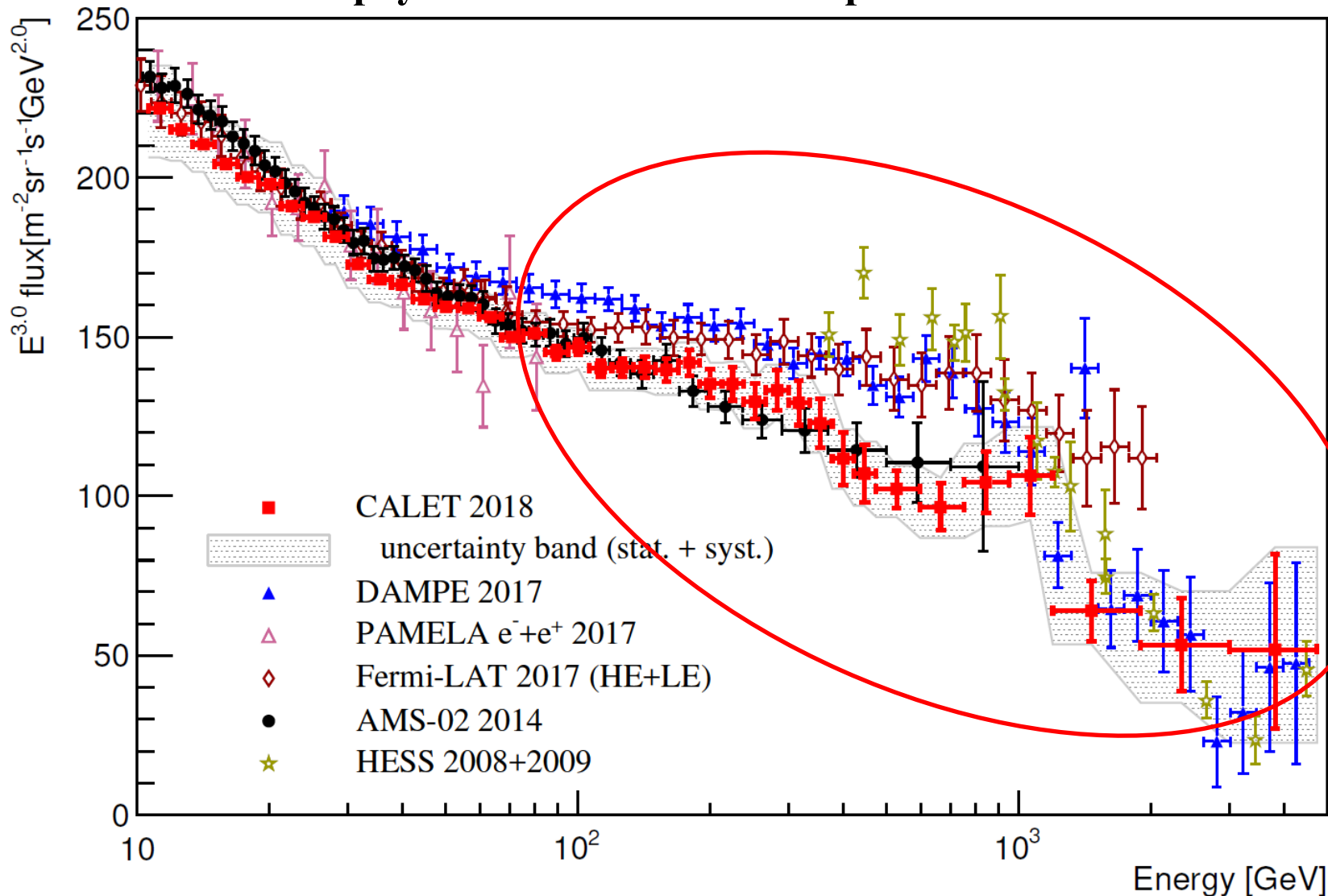


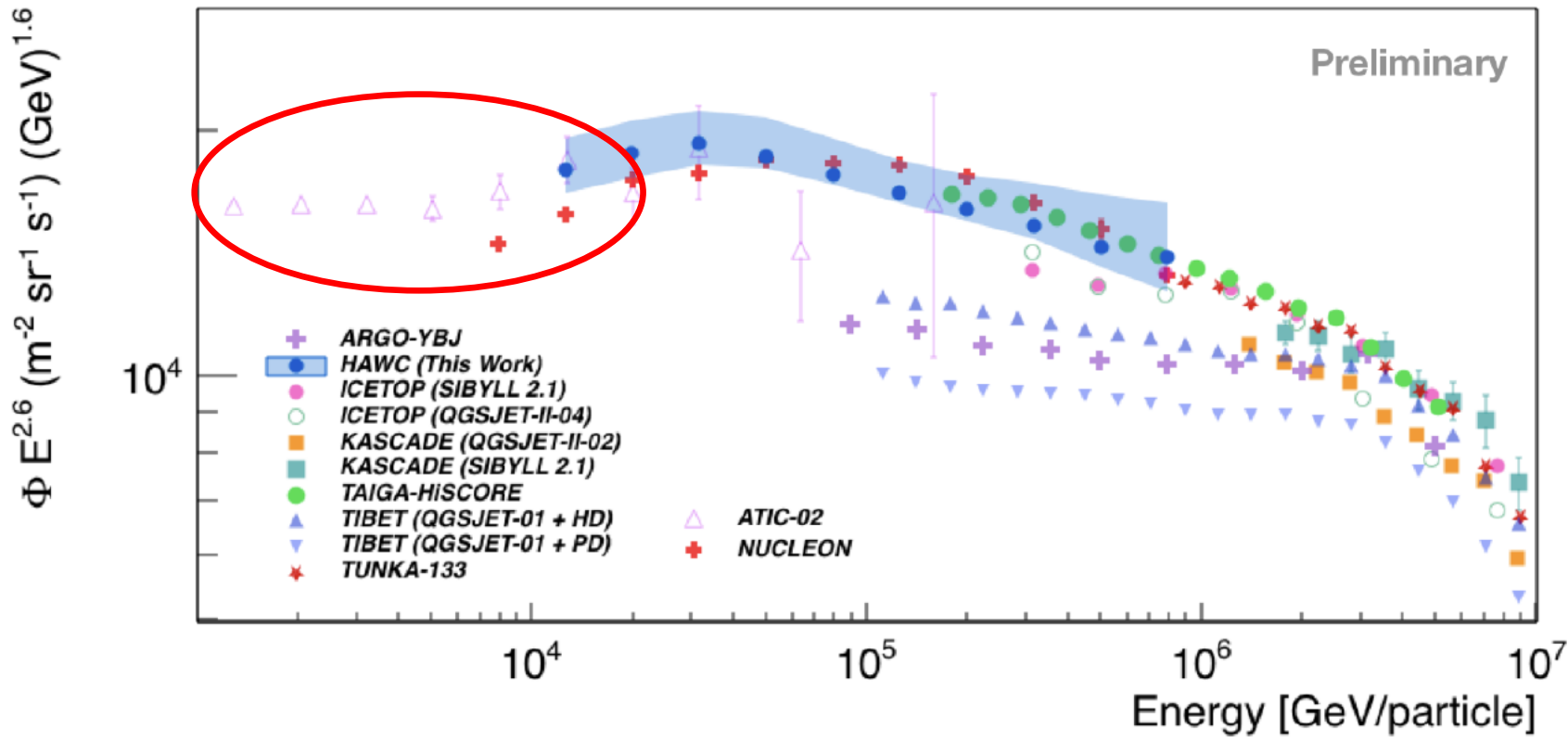
**-рентгеновские (ART-XC)**



**-космическая и наземная (СТА, TAIGA) гамма-астрономия**

**Измерение потоков электронов + позитронов в диапазоне 1 ГэВ – 20 ТэВ  
для уточнения спектров благодаря высокому энергетическому разрешению  
калориметра толщиной (18-43  $X_0$ ) при регистрации потоков  
сверху-вниз и с боковых направлений**





Спектр потоков электронов + позитронов по данным наземных установок  
 ArXiv: 2208.14245

Сравнение характеристик при регистрации электронов + позитронов для ГАММА-400 (сверху-вниз и для боковых направлений) с характеристиками Fermi-LAT, PAMELA, AMS-2, CALET, DAMPE, HERD

	GAMMA-400		Fermi-LAT	PAMELA	AMS-2	CALET	DAMPE	HERD
Aperture	top-down	4 sides	top-down	top-down	top-down	top-down	top-down	5 sides
Acceptance, m <sup>2</sup> sr	~0.3	~0.5	2.5	0.02	0.4	0.1	0.3	3
Proton rejection factor	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	>10 <sup>5</sup>
Calorimeter area, m <sup>2</sup>	0.7	4×0.24	0.85	0.06	0.42	0.1	0.36	5×0.4
Calorimeter thickness, X <sub>0</sub>	18	43	8.6	16	16	30	32	55

# Заключение

- Внеатмосферные и наземные астрофизические исследования по гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий позволяют получить чрезвычайно важную информацию: о физических условиях в дискретных астрофизических объектах, о свойствах межзвездного и межгалактического пространства, о природе темной материи.
- После Fermi-LAT запуск гамма-телескопа ГАММА-400 представляет уникальную возможность значительно улучшить данные о гамма-излучении высоких и сверхвысоких энергий, о потоках высокоэнергичных электронов и позитронов благодаря значительно лучшему угловому и энергетическому разрешению, большой площади, длительным непрерывным наблюдениям.
- Одновременное наблюдение источников гамма- и рентгеновским телескопами из космоса станет уникальным космическим экспериментом. Совместные наблюдения с наземными гамма-установками (СТА, TAIGA и др.), а также с гравитационно-волновыми (LIGO, Virgo) и нейтринными (IceCube) наземными экспериментами позволят существенно продвинуться в понимании происходящих в астрофизических источниках физических процессов.

Сайт ГАММА-400 - <http://gamma400.lebedev.ru/>