

Российская Академия Наук

Физический
Институт



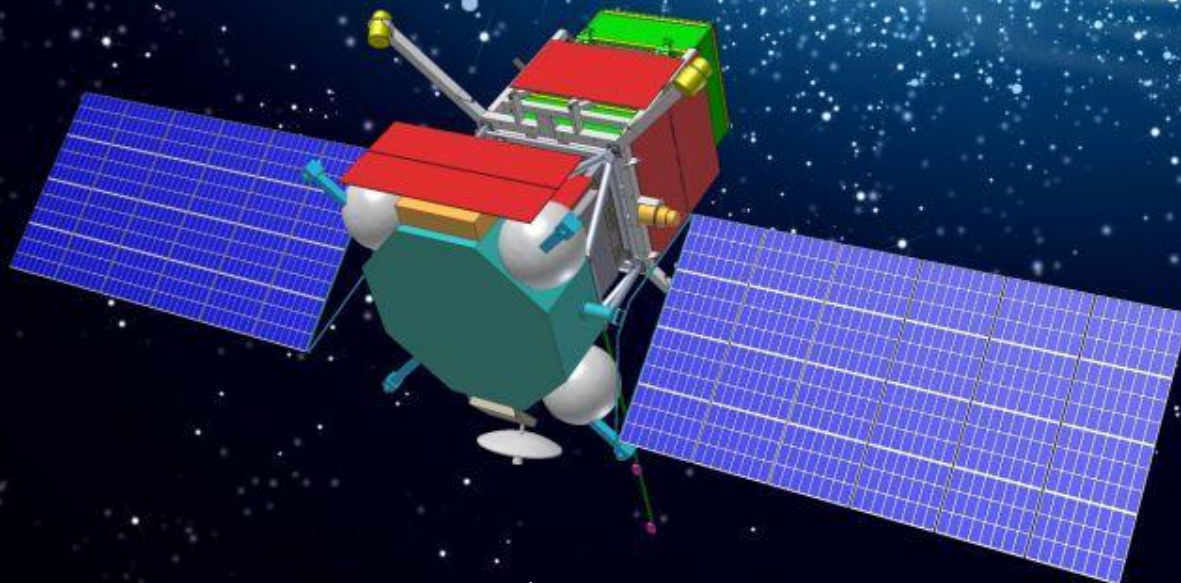
имени
П.Н. Лебедева

Ф И А Н

Эксперимент ГАММА-400: состояние и перспективы

Николай Топчиев

от имени коллаборации ГАММА-400



33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 11-15 августа 2014 г.

КОЛЛАБОРАЦИЯ ГАММА-400

А.М. Гальпер^{а, б}, В. Бонвичини^в, Н.П. Топчиев^а, О. Адриани^г, Р.Л. Аптекарь^д, И.В. Архангельская^б, А.И. Архангельский^б, Л. Бергстрем^е, Е. Берти^г, Г. Бигонгьяри^ж, С.Г. Бобков^з, Э.А. Богомолов^д, М. Боецио^в, М. Бонги^г, С. Бонеки^ж, С. Боттаи^г, К.А. Боярчук^и, А. Вакки^в, Е. Ваннучини^г, Г.И. Васильев^д, Г. Кастеллини^к, П.В. Каттанео^л, П. Кумани^в, Г.Л. Деденко^б, В.А. Догель^а, С. Де Донато^м, Б.И. Гнатык^о, М.С. Горбунов^з, Ю.В. Гусаков^а, Н. Зампа^в, В.Н. Зиракашвили^у, В.Г. Зверев^б, В.В. Кадилин^б, В.А. Каплин^б, А.А. Каплун^б, В.Е. Корепанов^п, Ж. Ларссон^и, А.А. Леонов^б, В.А. Логинов^б, Ф. Лонго^в, П. Маестро^ж, П.С. Маррокези^ж, В.В. Михайлов^б, Э. Моккьютти^в, А.А. Моисеев^п, Н. Мори^г, И.В. Москаленко^с, П.Ю. Наумов^б, П. Папини^г, П. Пикоцца^м, М. Пирс^м, А.В. Попов^з, Ф. Райд^и, А. Рапполди^л, С. Рикьярини^к, М.Ф. Рунцо^б, О.В. Сердин^з, Р. Спарволи^м, П. Спиллантини^г, С.И. Сучков^а, М. Тавани^г, А.А. Тараскин^б, А. Тиберио^г, Е.М. Тюрин^б, М.В. Уланов^д, Ч. Фуглесанг^и, М.Д. Хеймиц^б, Ю.Т. Юркин^б

- ^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- ^б Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
- ^в Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste and Physics Department of University of Trieste, Trieste, Italy
- ^г Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze and Physics Department of University of Florence, Firenze, Italy
- ^д Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
- ^е Stockholm University, Department of Physics; and the Oskar Klein Centre, AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden
- ^ж Department of Physical Sciences, Earth and Environment, University of Siena and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, Italy
- ^з Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
- ^и ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики», Истра
- ^к Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara - CNR and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze, Firenze, Italy
- ^л Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia, Pavia, Italy
- ^м Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma 2 and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy
- ^н KTH Royal Institute of Technology, Department of Physics; and the Oskar Klein Centre, AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden
- ^о Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
- ^п Lviv Center of Institute of Space Research, Lviv, Ukraine
- ^р CRESST/GSFC and University of Maryland, College Park, Maryland, USA
- ^с Hansen Experimental Physics Laboratory and Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, Stanford, USA
- ^т Istituto Nazionale di Astrofisica IASF and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy
- ^у Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк

Комплекс научной аппаратуры «ГАММА-400»

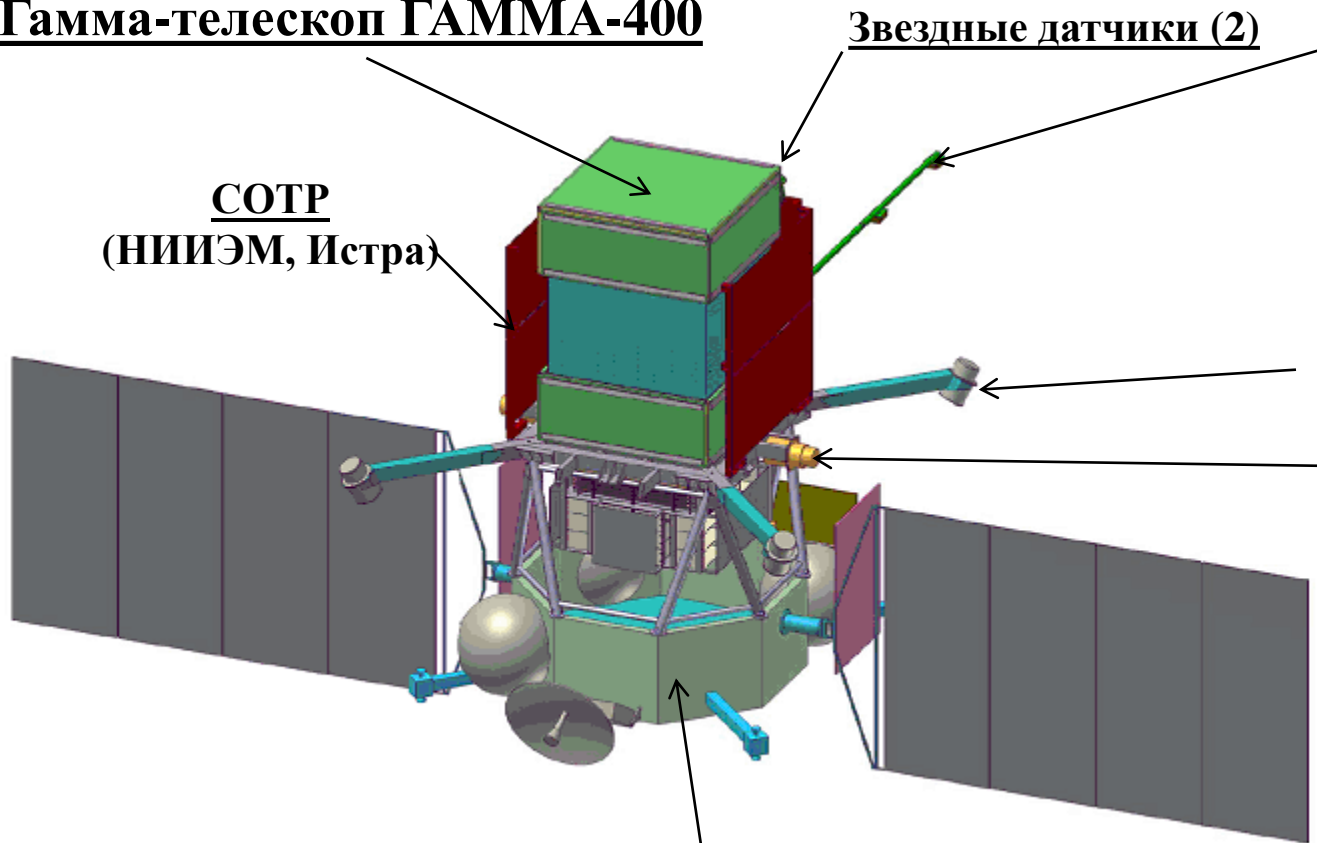
предназначен для:

- регистрации космического высокоэнергичного гамма-излучения;
- поиска особенностей в энергетических спектрах высокоэнергичного гамма-излучения от дискретных и протяженных источников и электрон-позитронной компоненты, которые могут быть связаны с частицами «темной материи»;
- регистрации высокоэнергичного гамма-излучения от переменных дискретных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках;
- поиска и исследования гамма-всплесков;
- регистрации высокоэнергичных ядер;
- регистрации высокоэнергетического гамма-излучения, потоков электронов и позитронов, ядер при солнечных вспышках.

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

ГАММА-400 оптимизирован для регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ с наилучшими параметрами: угловое разрешение $\sim 0.01^\circ$, энергетическое разрешение $\sim 1\%$, коэффициент режекции протонов $\sim 10^6$, но способен регистрировать потоки гамма-излучения и электронов + позитронов в энергетическом диапазоне от 100 МэВ до 10 ТэВ, а также потоки высокоэнергичных ядер. Эффективная площадь ГАММА-400 $\sim 4000 \text{ см}^2$ при $E_\gamma > 1 \text{ ГэВ}$, общая масса 4100 кг, потребление $\sim 2000 \text{ W}$, объем передаваемой информации 100 Гбайт/день. В состав КНА «ГАММА-400» кроме гамма-телескопа входят также два звездных датчика с точностью $5''$, два магнитометра, система регистрации гамма-всплесков КОНУС-ФГ.

Гамма-телескоп ГАММА-400



СОТР
(НИИЭМ, Истра)

Звездные датчики (2)

Магнитометры (2)

Система регистрации
гамма-всплесков
«КОНУС-ФГ» (6)
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

4 детектора направления

**2 спектрометрических
детектора**

Платформа «Навигатор»
(НПО им. С.А. Лавочкина)

**КНА «ГАММА-400» на
платформе «Навигатор»**

СХЕМА ВЫВЕДЕНИЯ ГАММА-400

СХЕМА ВЫВЕДЕНИЯ



Проект «ГАММА-400» включен в ФКП 2009-2015 и в разрабатываемую в настоящее время ФКП 2016-2025. Запуск ГАММА-400 планируется на 2021 г. с помощью РН «Протон-М» вместе с РБ «Бриз». Срок активного существования более 7 лет.

ОРБИТА ГАММА-400 И РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Начальные параметры орбиты:

- апогей 300 000 км;
- перигей 500 км;
- наклонение 51.4° .

Орбита не будет затеняться
Землей



Основные режимы наблюдений:
-длительные наблюдения (~100 дней)
Галактического центра и
протяженных гамма-источников;
-мониторинг небесной сферы.

Под воздействием Солнца, Луны и Земли примерно через 6 месяцев орбита полностью выйдет из радиационных поясов и станет круговой с радиусом ~200000 км.

Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400

Антисовпадательная система
(АС), МИФИ

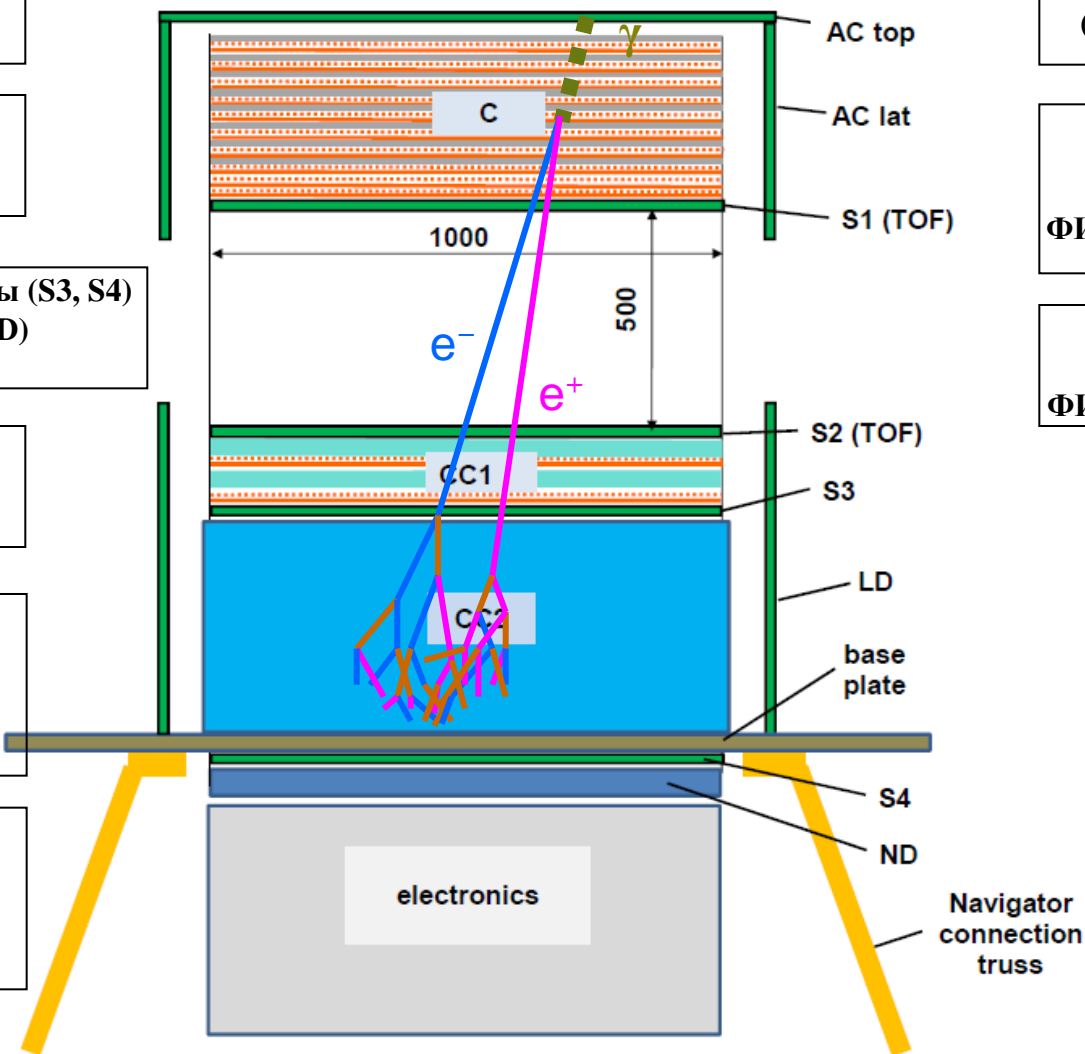
Времяпролетная система
(ToF), МИФИ

Сцинтилляционные детекторы (S3, S4)
Боковые детекторы (LD)
МИФИ

Нейтронный детектор
(ND),
МИФИ

Конструкция, СОТР,
электрический интерфейс
НИИЭМ, Истра

Система сбора
научной информации
НИИСИ РАН



Конвертер-трекер
(С), INFN (Италия)

Калориметр
(CC1),
ФИАН + INFN (Италия)

Калориметр
(CC2),
ФИАН + INFN (Италия)

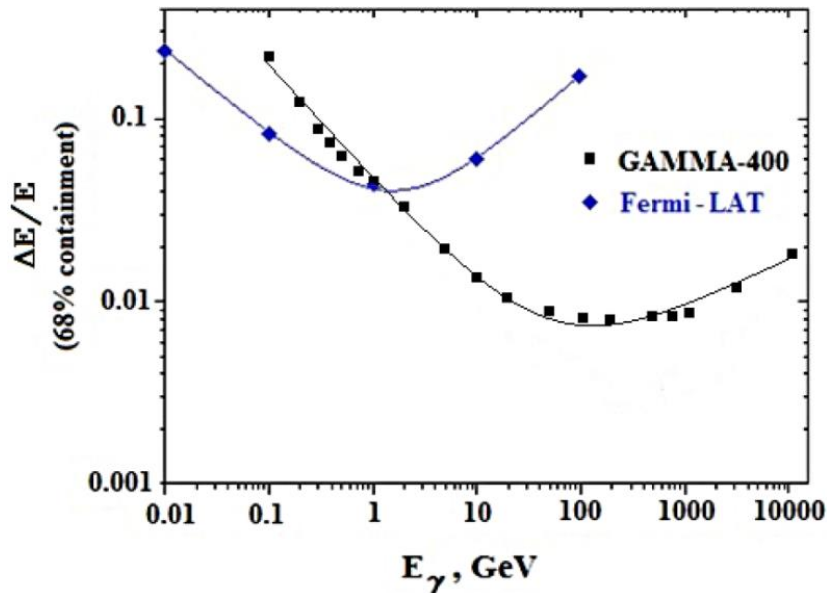
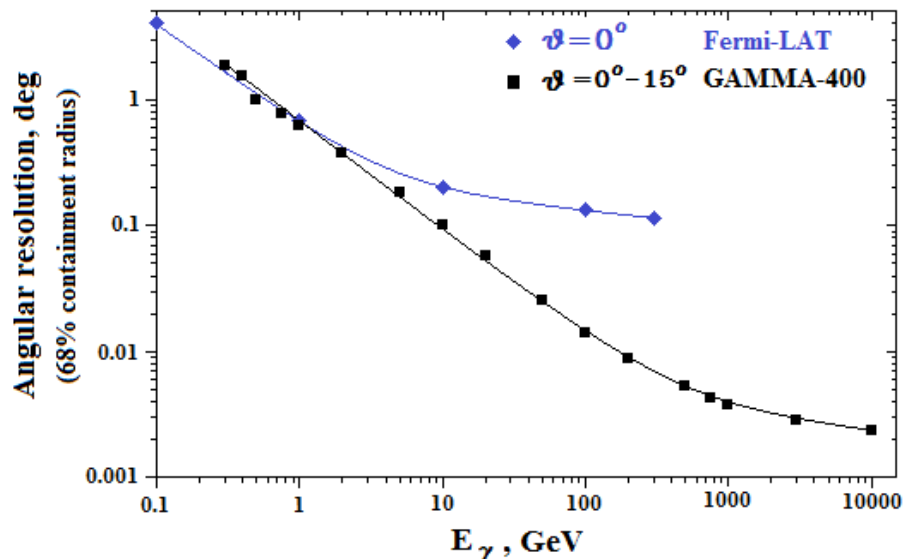
	ЭП (эскизный проект) 2009-2010 гг.	ДЭП (дополнение к эскизному проекту) 2011-2012 гг.	ТП (технический проект) 2013-2014 гг.
Диапазон энергий	30-1000 ГэВ	0,1-3000 ГэВ	0,1-3000 ГэВ
Угловое разрешение (при $E_\gamma > 100$ ГэВ)	0,2°	~0,01°	~0,01°
Энергетическое разрешение (при $E_\gamma > 10$ ГэВ)	~ 3%	~1%	~1%
Чувствительная площадь	0,44 м ²	0,64 м ²	1,0 м²
Вес	1700 кг	2600 кг	4100 кг
Энергопотребление	800 Вт	2000 Вт	2000 Вт
Объем передаваемой информации	500 Мбайт/сутки	100 Гбайт/сутки	100 Гбайт/сутки
Регистрируемые частицы	гамма-кванты, электроны, позитроны, протоны, ядра	гамма-кванты, электроны, позитроны, протоны, ядра	гамма-кванты, электроны, позитроны, протоны, ядра

Задачи технического проекта

- Проведение углубленного численного анализа физико-технических характеристик КНА «ГАММА-400»
- Разработка и изготовление макетов систем гамма-телескопа и макета КНА «ГАММА-400» в целом для экспериментальной проверки технических решений в лабораторных условиях

Расчеты характеристик ГАММА-400

Расчетные группы: ФИАН+МИФИ, ФТИ, INFN



Геометрический фактор $\Gamma \sim 0,5 \text{ м}^2\text{ср}$

Эффективная площадь $S_{\text{эф}} \sim 4000 \text{ см}^2$

E_e , ГэВ

Коэффициент
режекции

50

$(12.8 \pm 2) \times 10^5$

100

$(4.0 \pm 0.7) \times 10^5$

200

$(5.0 \pm 0.7) \times 10^5$

1000

$(4.1 \pm 0.7) \times 10^5$

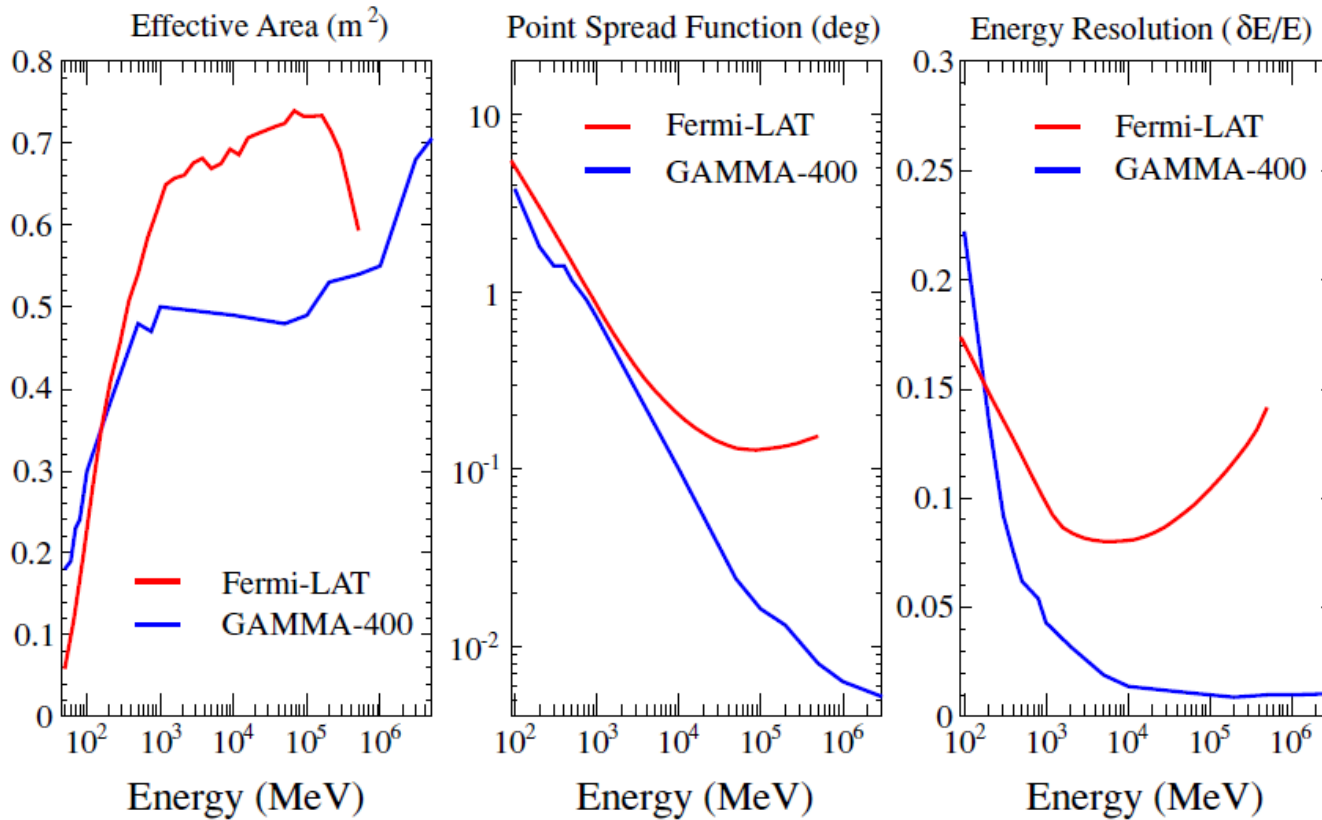


Figure 3. The effective area (*left panel*), the point spread function (PSF) (*middle panel*), and the energy resolution (*right panel*) are shown as a function of the gamma-ray energy (in unit of MeV). Both cases for the Fermi-LAT [103] and the GAMMA-400 telescopes [104] are shown in each figure as red and blue lines, respectively.



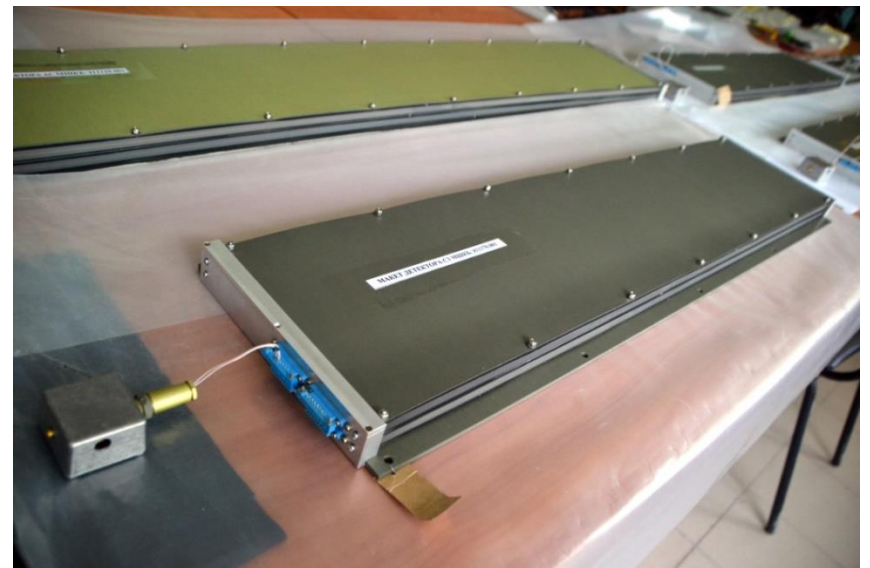
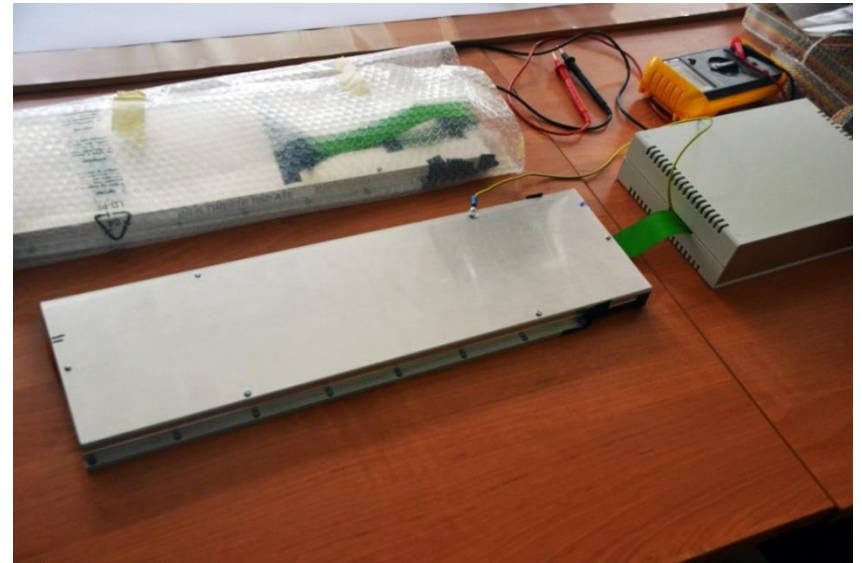
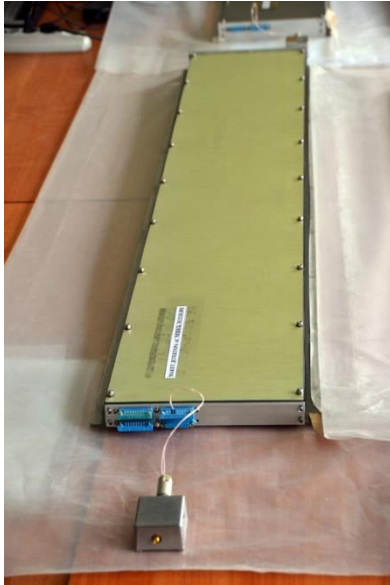
Wino dark matter and future dSph observations

Biplob Bhattacharjee,^a Masahiro Ibe,^{a,b} Koji Ichikawa,^a Shigeki Matsumoto^a and Kohei Nishiyama^a

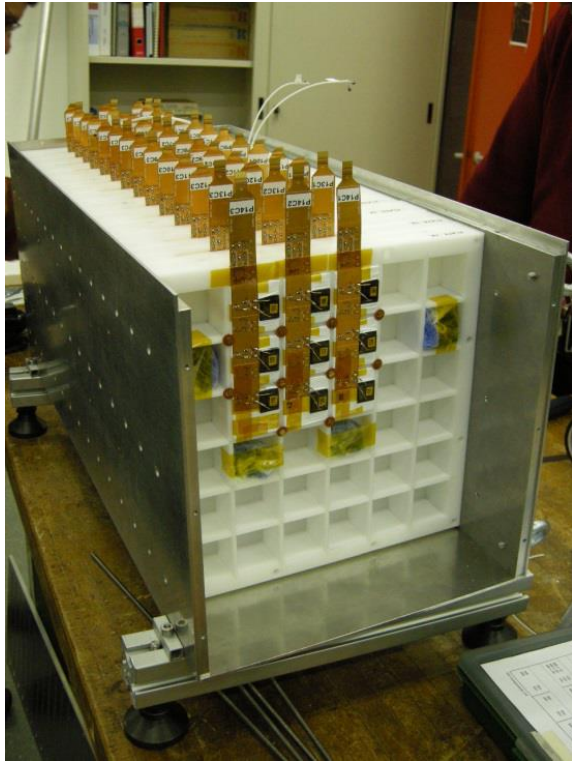
^aKavli IPMU (WPI), University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

^bICRR, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

Лабораторный макет «ГАММА-400» - 1



Лабораторный макет «ГАММА-400» - 2



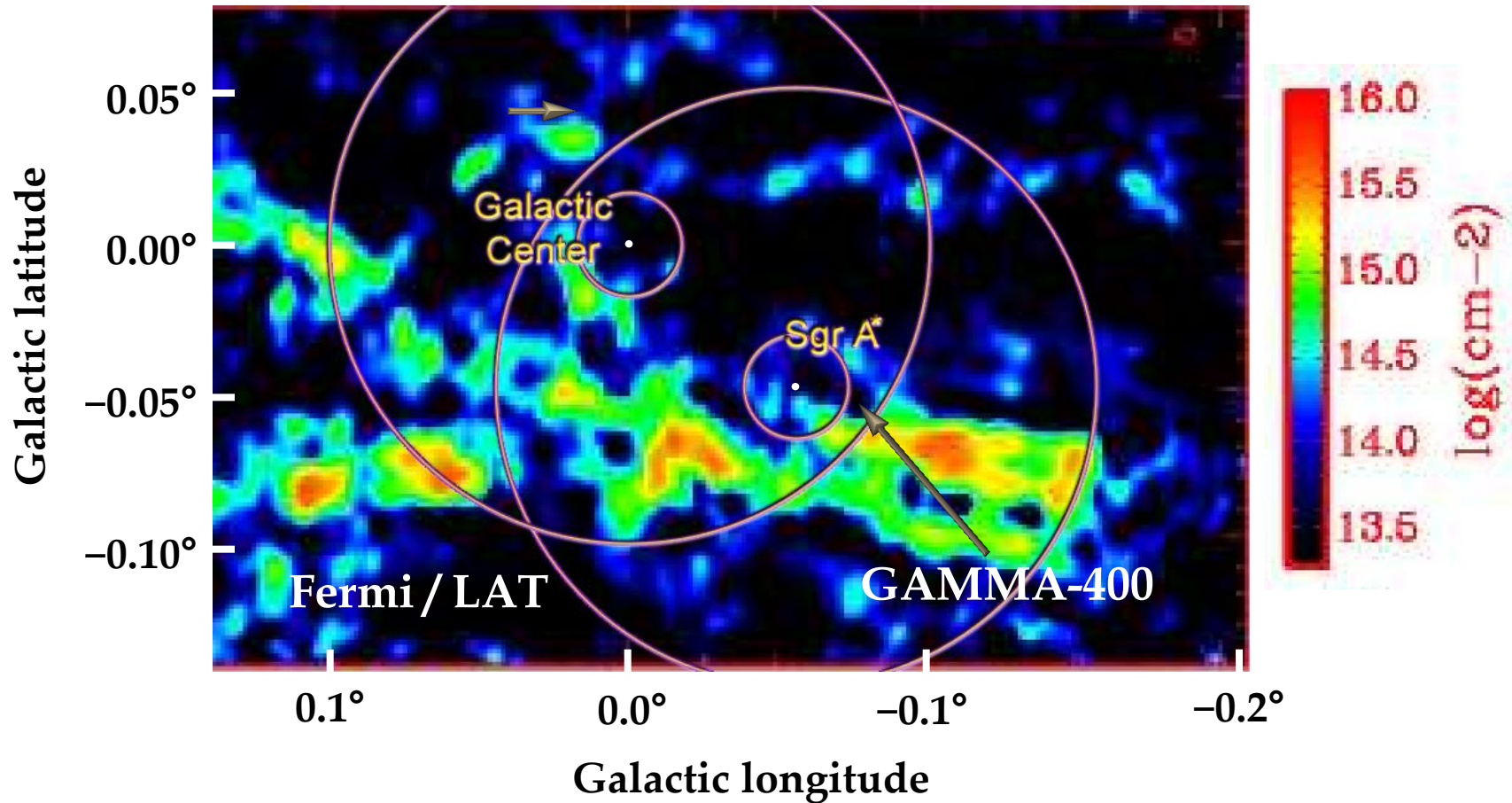
Лабораторный макет «ГАММА-400» - 3



Сравнение основных параметров ГАММА-400 и Fermi-LAT

	Fermi-LAT	ГАММА-400
Орбита	круговая, 565 км	высокоэллиптическая, 500-300000 км (без затенения Землей)
Энергетический диапазон	20 МэВ - 300 ГэВ	100 МэВ – 10 000 ГэВ
Эффективная площадь ($E_\gamma > 1$ ГэВ)	$\sim 8000 \text{ см}^2$	$\sim 4000 \text{ см}^2$
Коорд. детекторы	Si strips (шаг 0.23 мм)	Si strips (шаг 0.1 мм)
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 0.1^\circ$	$\sim 0.01^\circ$
Калориметр - толщина	CsI $\sim 8.5X_0$	CsI(Tl)+Si strips $\sim 25X_0$
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 10\%$	$\sim 1\%$
Коэффициент режекции	$\sim 10^4$	$\sim 5 \times 10^5$
Масса	2800 кг	4100 кг
Объем информации	15 Гбайт/день	100 Гбайт/день

Сравнение возможностей ГАММА-400 и Fermi по угловому разрешению



Background: Integrated intensity map of the NH₃ (1,1) emission (1.2652 cm wavelength) from [arXiv:1402.4531].

Circles: point spread functions for Fermi/LAT (outer: 0.1° or 15 pc) and GAMMA-400 (inner: 0.01° or 1.5 pc) at $E_\gamma \sim 100$ GeV.

Сравнение возможностей ГАММА-400 и Fermi по энергетическому разрешению

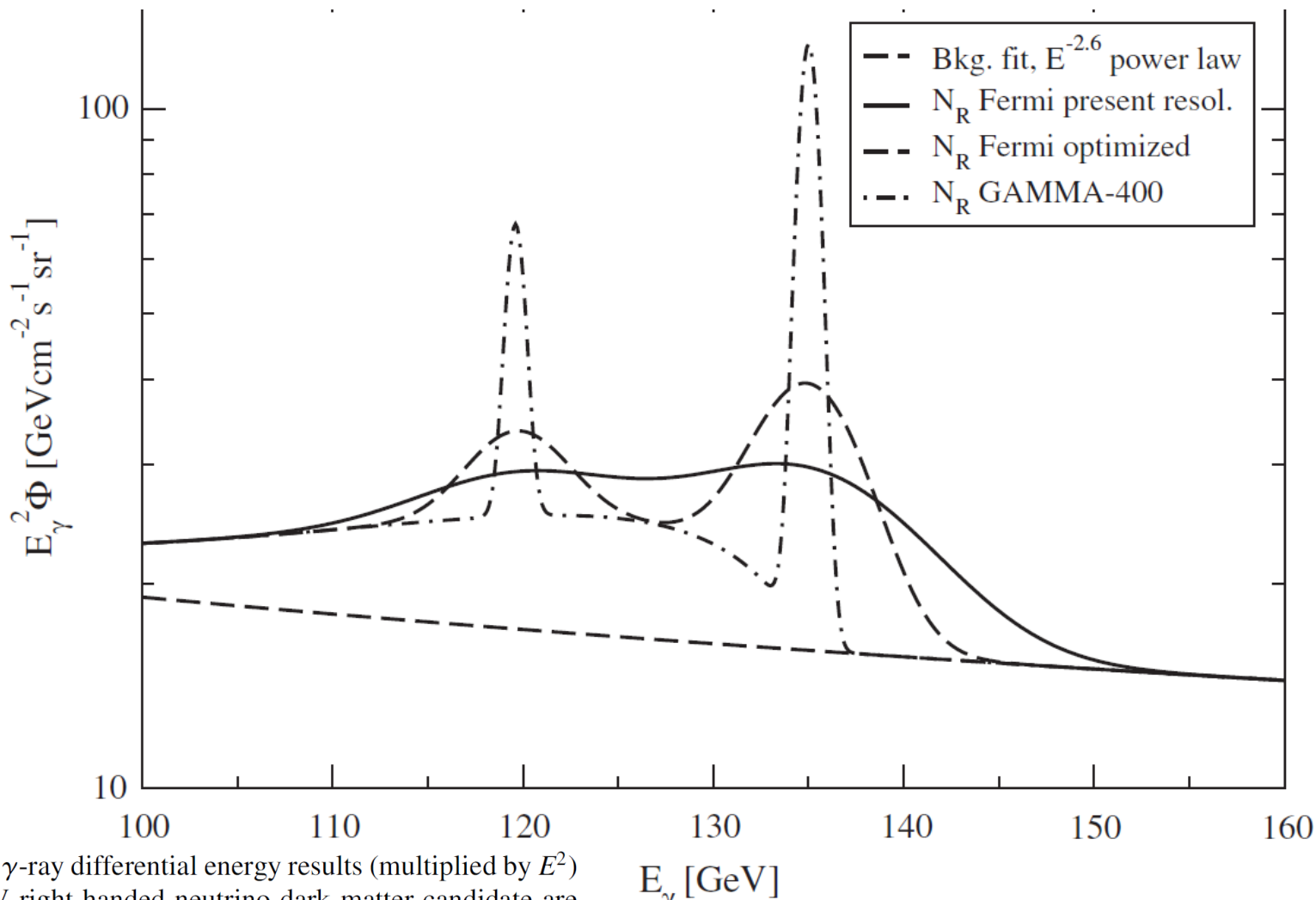


FIG. 3. The γ -ray differential energy results (multiplied by E^2) for a 135 GeV right-handed neutrino dark matter candidate are shown, with the present Fermi-LAT energy resolution $\Delta E/E = 10\%$ FWHM (solid line), with a factor of 2 improvement (dashed line) and with a future γ -ray instrument, 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 γ -ray background is also shown.

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

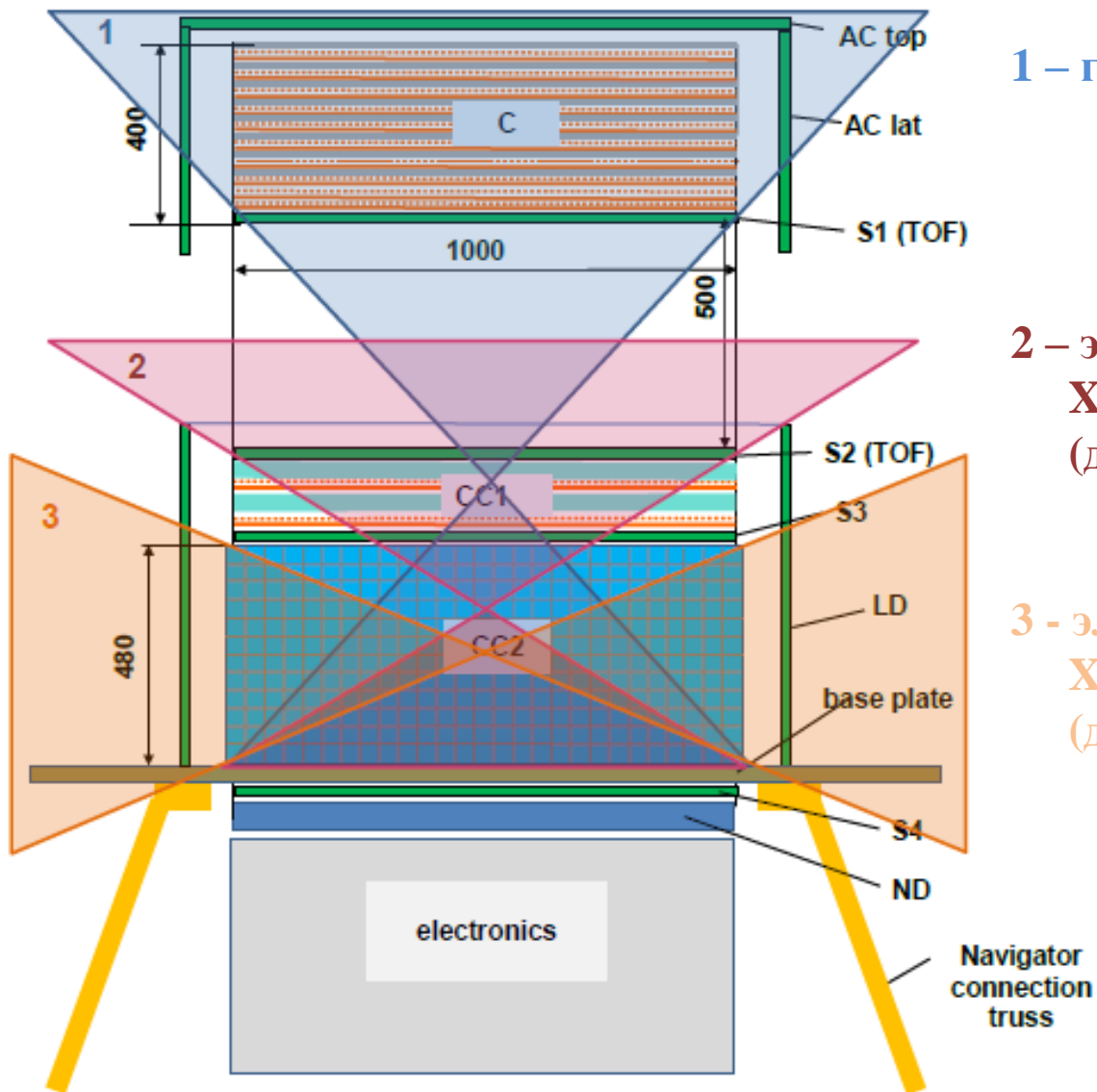
130 GeV fingerprint of right-handed neutrino dark matter

Lars Bergström*

Сравнительные характеристики работавших, существующих и планируемых космических и наземных Гамма-телескопов

	КОСМИЧЕСКИЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ					НАЗЕМНЫЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ			
	EGRET	AGILE	Fermi- LAT	CALET	ГАММА -400	Н.Е.S.S.- II	MAGIC- II	VERITAS	СТА
	США	Италия	США	Япония	Россия	Намибия	Испания, Канарские о-ва	США, Аризона	
Годы работы	1991-2000	2007-	2008-	2014	2021	2012-	2009-	2007-	2018
Диапазон энергий, ГэВ	0,03-30	0,03-50	0,02-300	10-10000	0,1- 10000	> 30	> 50	> 50	> 20
Эффективная площадь, м ²	0,2	0,1	0,8	0,1	0,4	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁶
Угловое разрешение (E _γ > 100 ГэВ)	0,2° (E _γ ~0,5 ГэВ)	0,1° (E _γ ~1 ГэВ)	0,1°	0,1°	~0,01°	0,07°	0,07° (E _γ = 300 ГэВ)	0,1°	0,1° (E _γ = 100 ГэВ) 0,03° (E _γ = 10 ТэВ)
Энергетическое разрешение (E _γ > 100 ГэВ)	15% (E _γ ~0,5 ГэВ)	50% (E _γ ~1 ГэВ)	10%	2%	~1%	15%	20% (E _γ = 100 ГэВ) 15% (E _γ = 1 ТэВ)	15%	20% (E _γ = 100 ГэВ) 5% (E _γ = 10 ТэВ)

Поля зрения ГАММА-400 для регистрации гамма-квантов, электронов + позитронов и ядер



1 – гамма-кванты

2 – электроны + позитроны и ядра
 $X_0 = 25$ р.д., $\lambda_0 = 1.2$ я.д.
(для вертикальных событий)

3 – электроны + позитроны и ядра
 $X_0 = 54$ р.д., $\lambda_0 = 2.5$ я.д.
(для боковых событий)

Ожидаемая статистика при регистрации электронов

Experiment	Duration	GF (m ² sr)	Calo $\sigma(E)/E$	Calo depth	e/p rejection factor	E>0.5 TeV	E>1 TeV	E>2 TeV	E>4 TeV
CALET	5 y	0.12	~2%	30 X ₀	10 ⁵	7982	1527	238	25
AMS02	10 y	0.5	~2%	16 X ₀	10 ³	66515	12726	1986	211
ATIC	30 d	0.25	~2%	18 X ₀	10 ⁴	273	52	8	1
FERMI	10 y	1.6 @ 300 GeV 0.6 @ 800 GeV	~15%	8.6 X ₀	10 ⁴	59864	6362	NA	NA
G400	10 y	3.9	~ 1%	25.4 X ₀	10 ⁵	518819	99266	15488	1647

Ожидаемая статистика при регистрации p и He

~knee



Experiment	Duration	GF (m ² sr)	Calo $\sigma(E)/E$	Calo depth	ϵ sel	E>0.1 PeV		E>0.5 PeV		E>1 PeV		E>2 PeV		E>4 PeV	
						p	He	p	He	p	He	p	He	p	He
CALET	5 y	0.12	~40%	30 X_0 1.3 λ_0	0.8	292	276	17	19	5	6	1	2	0	0
CREAM	180 d	0.43	~45%	20 X_0 1.2 λ_0	0.8	103	97	6	7	2	2	0	1	0	0
ATIC	30 d	0.25	~37%	18 X_0 1.6 λ_0	0.8	10	9	1	1	0	0	0	0	0	0
G400	10 y	3.9	~ 35%	25.4 X_0 1.2 λ_0	0.8	18951	17921	1123	1242	300	374	69	106	11	24

Ожидаемая статистика при регистрации ядер

~knee



Experiment	Duration	GF (m ² sr)	Calo σ(E)/E	Calo depth	ε sel	E>0.1 PeV		E>0.5 PeV		E>1 PeV		E>2 PeV		E> 4 PeV	
						³ Li to ⁹ F	¹⁰ Ne to ²⁴ Cr	³ Li to ⁹ F	¹⁰ Ne to ²⁴ Cr	³ Li to ⁹ F	¹⁰ Ne to ²⁴ Cr	³ Li to ⁹ F	¹⁰ Ne to ²⁴ Cr	³ Li to ⁹ F	¹⁰ Ne to ²⁴ Cr
CALET	5 y	0.12	~30%	30 X ₀ 1.3 λ ₀	0.8	136	140	9	10	3	3	1	1	0	0
CREAM	10 y	0.46	~45%	20 X ₀ 1.2 λ ₀	0.8	51	53	4	4	1	1	0	0	0	0
ATIC	30 d	0.25	~37%	18 X ₀ 1.6 λ ₀	0.8	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0
TRACER	30 d	5	-	TRD	0.8	93	96	6	7	2	2	1	1	0	0
G400	10 y	3.9	~40%	25.4 X ₀ 1.2 λ ₀	0.8	8830	9073	612	636	193	206	58	69	17	20

Заключение

- Проект ГАММА-400 представляет уникальную возможность провести измерения потоков гамма-излучения, электронов + позитронов, ядер с непревзойденной точностью. Запуск ГАММА-400 планируется примерно в 2021.
- ГАММА-400 обеспечит углубленные исследования в наиболее прорывных задачах, таких как:
 - поиск следов частиц темной материи в спектрах высокоэнергичного гамма-излучения и электронов;
 - происхождение космических лучей, их образование и ускорение до высоких энергий.