



# Статус проекта «ГАММА-400»

Научный руководитель проекта  
профессор А.М. Гальпер

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Учреждения Российской академии наук

Физического института

П.Н. Лебедева РАН

академик



*Г.А. Месяц* 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*

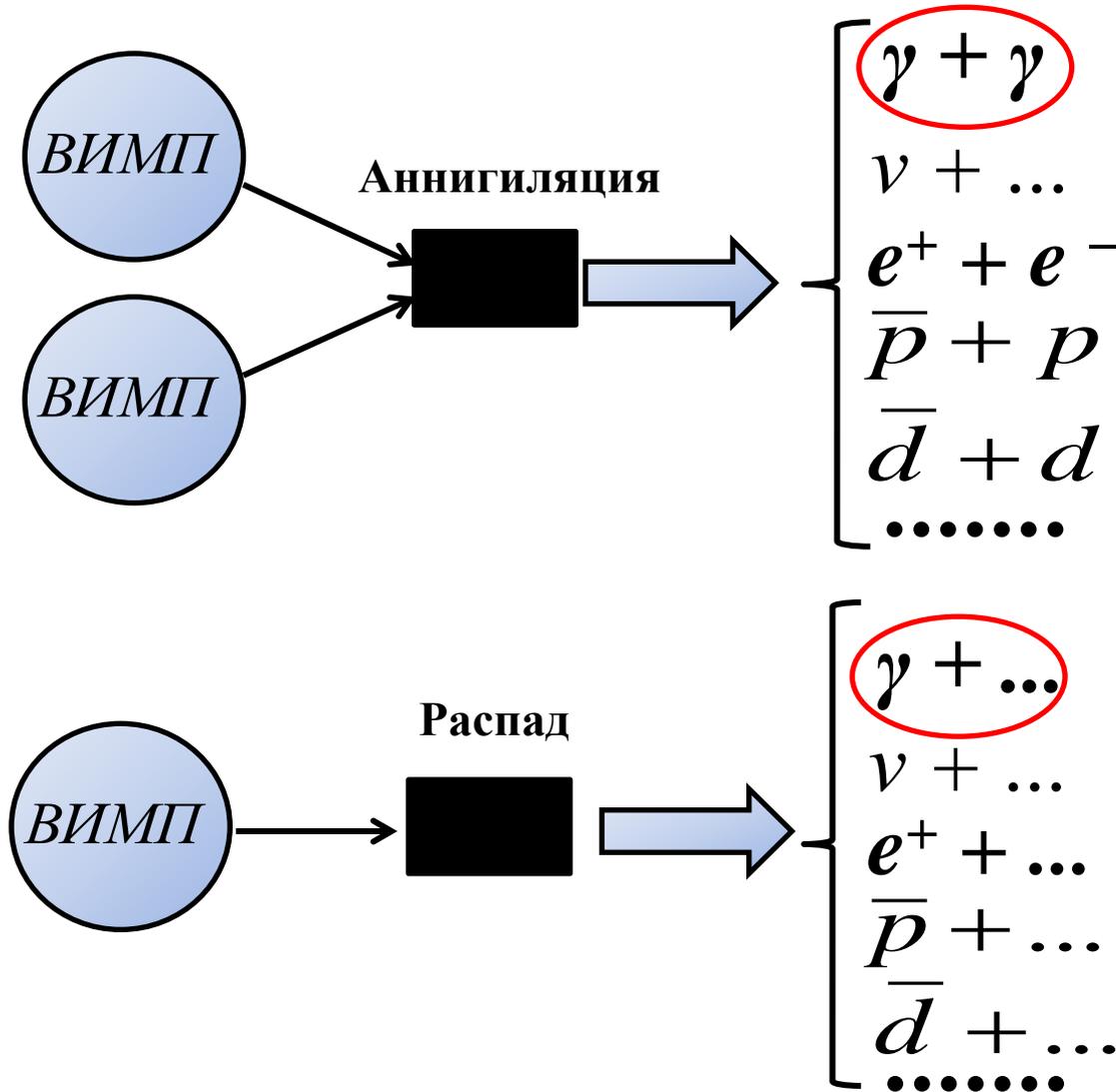
Гальпер А.М.

21 *мая* 2009 г.

Москва, 2009 г.

**Главной научной задачей проекта «ГАММА-400», определенной нобелевским лауреатом В.Л. Гинзбургом, является поиск особенностей (гамма-линий) в энергетическом спектре космического гамма-излучения высокой энергии от дискретных источников и диффузного излучения, что является наиболее эффективным методом решения проблемы природы темной материи.**

# Косвенные методы регистрации темной материи



# Модели распределения темной материи в Галактике

$$\text{NFW} : \rho_{\text{NFW}}(r) = \rho_s \frac{r_s}{r} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^{-2}$$

$$\text{Einasto} : \rho_{\text{Ein}}(r) = \rho_s \exp \left\{ -\frac{2}{\alpha} \left[ \left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1 \right] \right\}$$

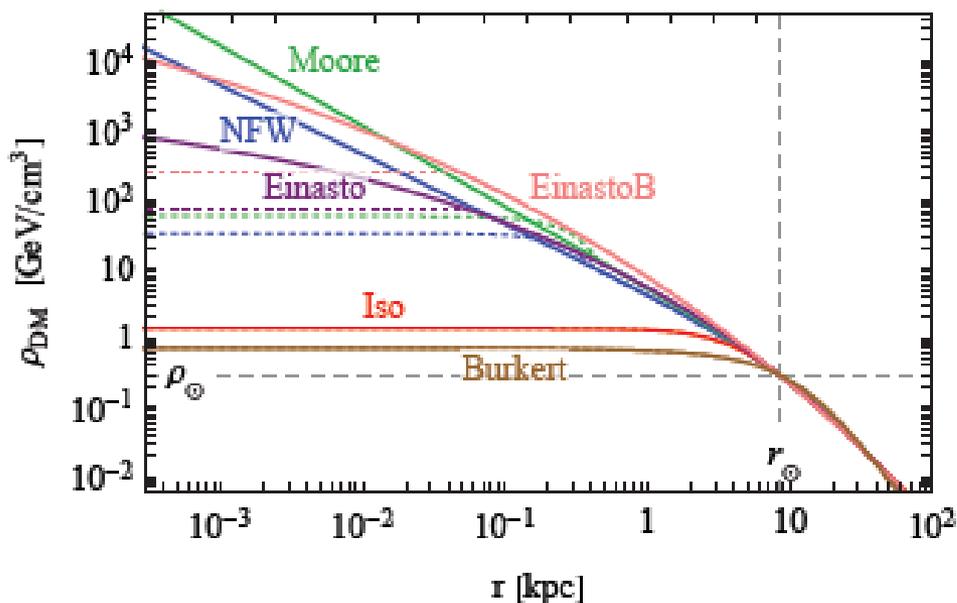
$$\text{Isothermal} : \rho_{\text{Iso}}(r) = \frac{\rho_s}{1 + (r/r_s)^2}$$

$$\text{Burkert} : \rho_{\text{Bur}}(r) = \frac{\rho_s}{(1 + r/r_s)(1 + (r/r_s)^2)}$$

$$\text{Moore} : \rho_{\text{Moo}}(r) = \rho_s \left(\frac{r_s}{r}\right)^{1.16} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^{-1.84}$$

Angle from the GC [degrees]

10'' 30'' 1' 5' 10' 30' 1° 2° 5° 10° 20° 45°



DM halo	$\alpha$	$r_s$ [kpc]	$\rho_s$ [GeV/cm <sup>3</sup> ]
NFW	—	24.42	0.184
Einasto	0.17	28.44	0.033
EinastoB	0.11	35.24	0.021
Isothermal	—	4.38	1.387
Burkert	—	12.67	0.712
Moore	—	30.28	0.105

# Методы регистрации частиц темной материи

## Прямые методы

Регистрация взаимодействия слабовзаимодействующих массивных частиц с обычным веществом.

Рождение частиц темной материи на ускорителях

## Косвенные методы

Регистрация продуктов аннигиляции WIMP

$$B_{kk} + B_{kk} \rightarrow \underline{\gamma} + \gamma, \nu + \nu, e^+ + e^- \dots$$

$$\chi + \chi \rightarrow b\bar{b}, t\bar{t}, \tau \tau^-, Z^0 Z^0, Z^0 \gamma, W^+ W^-, HH \rightarrow$$

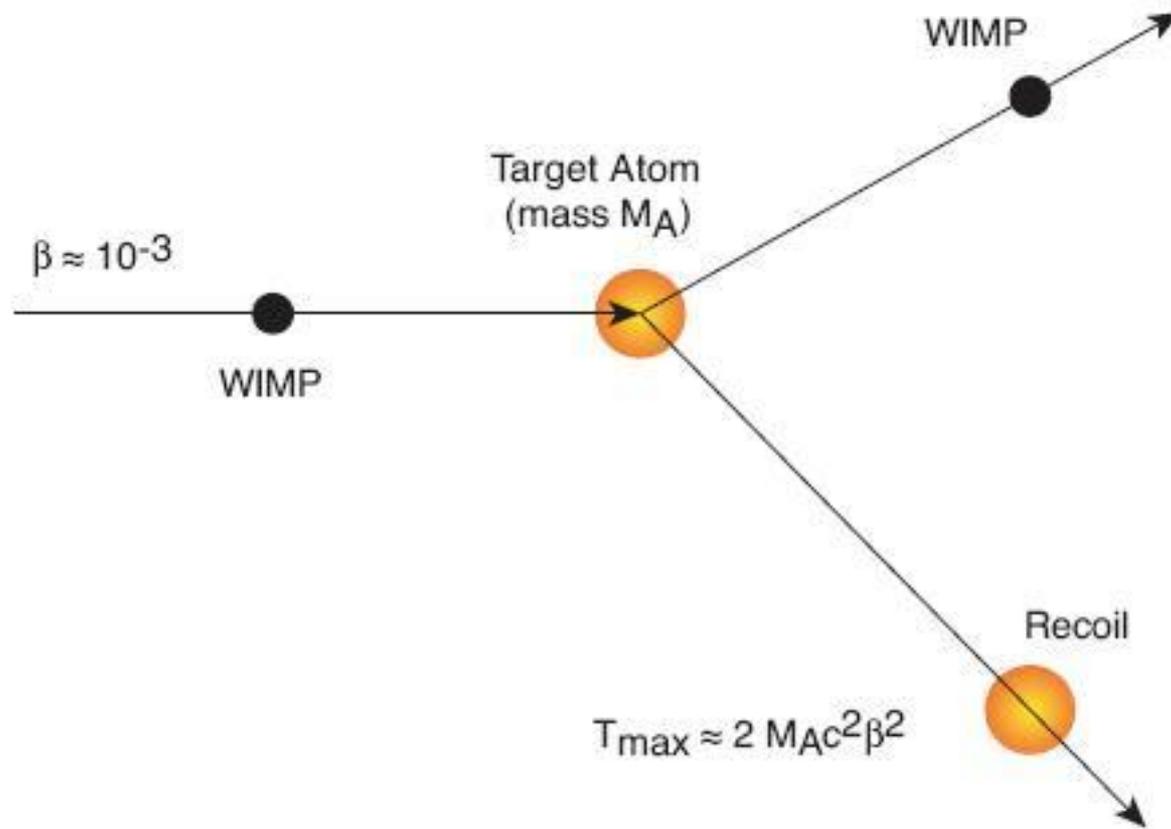
$$\rightarrow \gamma + \dots, \nu + \dots, e^\pm + \dots, p\bar{p} + \dots, d\bar{d} + \dots$$

Регистрация продуктов распада WIMP

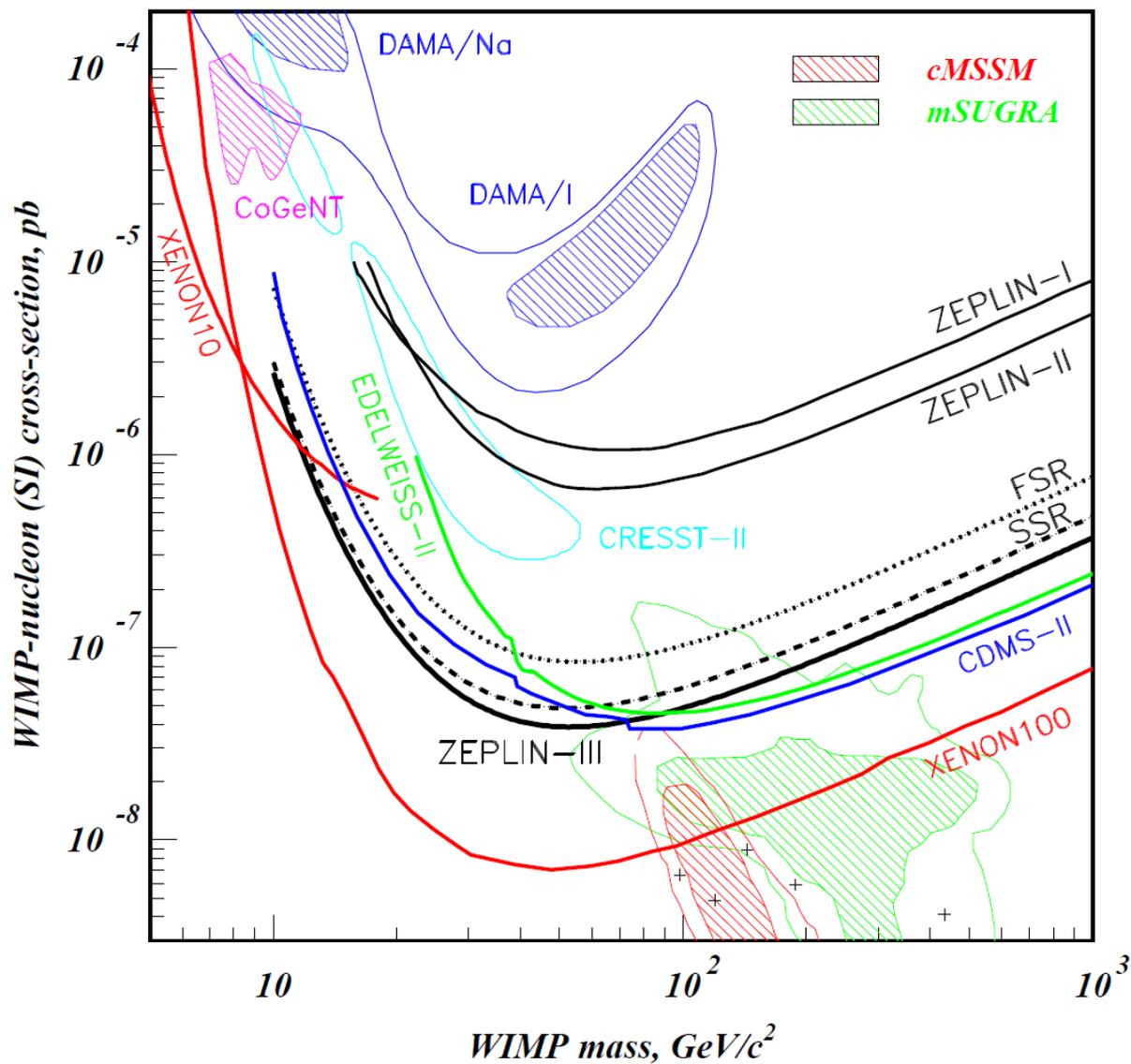
$$B_{kk} \rightarrow l^+ l^-; Z^0 Z^0; W^+ W^-$$

$$\chi \rightarrow l^+ l^- \nu; Z^0 \nu; W^\pm l^\pm$$

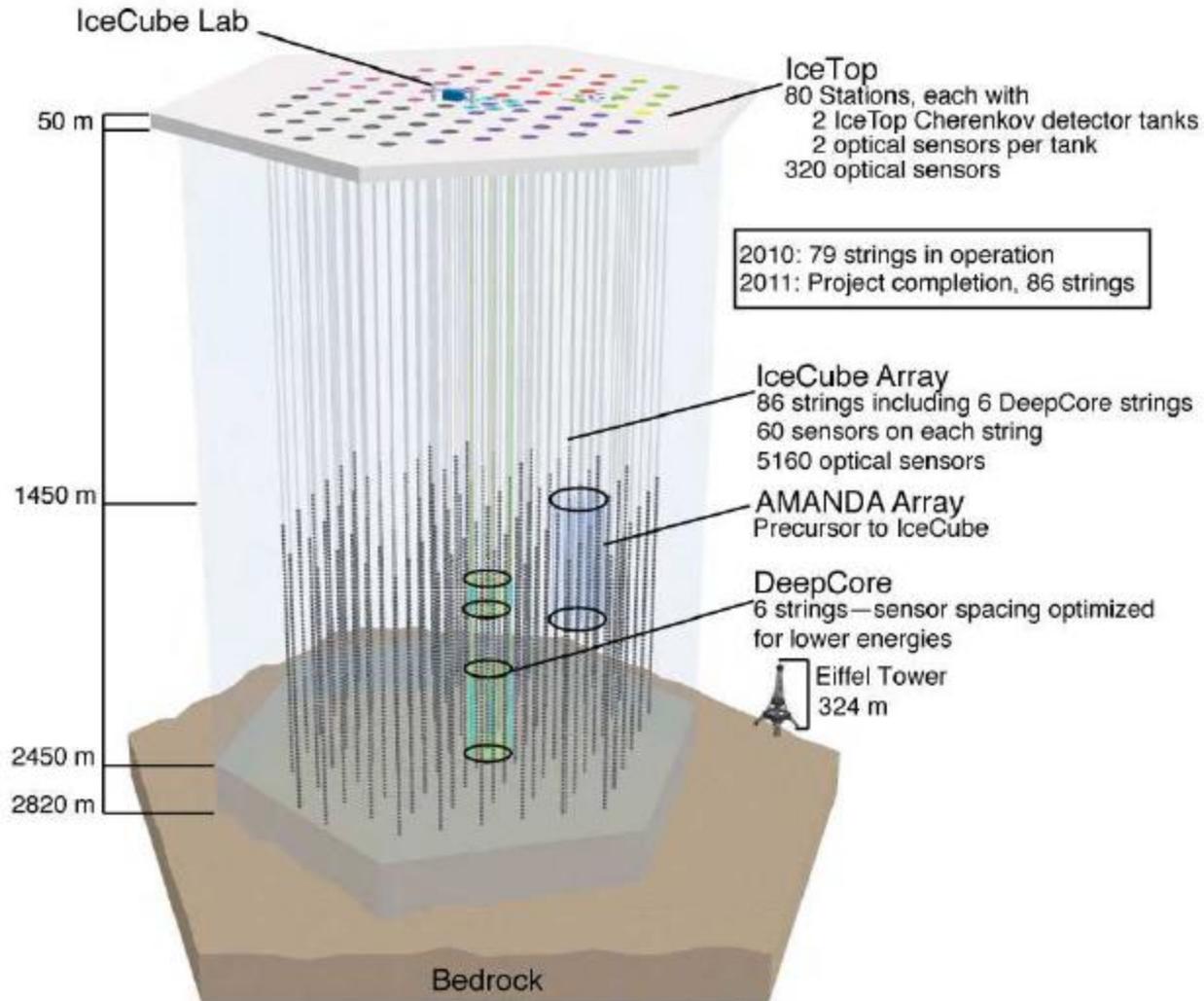
# Принцип регистрации частиц темной материи при упругих столкновениях с веществом детекторов в подземных установках



# Ограничение сечения взаимодействия – массы по данным подземных экспериментов



# Схема нейтринного эксперимента IceCube



# Эксперименты, получившие указания на существование частиц «тёмной» материи

Эксперимент	Комментарий
DAMA/LIBRA годовая модуляция	Нет объяснения; нет подтверждения другими экспериментами
CoGeNT избыток событий и годовая модуляция	Противоречит другим данным
EGRET избыток гамма-квантов с энергией $\sim$ ГэВ	Не подтверждено FERMI
INTEGRAL линия 511 кэВ от области центра Галактики	Не обладает сферической симметрией – асимметрия, характерная для диска (?)
PAMELA: отношение потоков антипротонов и протонов	Эффект может быть связан с аннигиляцией тёмной материи или взаимодействием космических лучей
PAMELA: аномальное отношение космических позитронов/электронов	Эффект может быть вызван темной материей или пульсарами – не указывает однозначно на темную материю
FERMI позитроны+электроны	
ATIC позитроны+электроны	
FERMI избыток гамма-излучения в направлении центра Галактики	Нет объяснения; возможно это астрофизический эффект. Нет комментария от коллаборации FERMI
WMAP радио “haze”	Соответствует “FERMI bubbles” – возможно вызван потоками, исходящими из центра Галактики

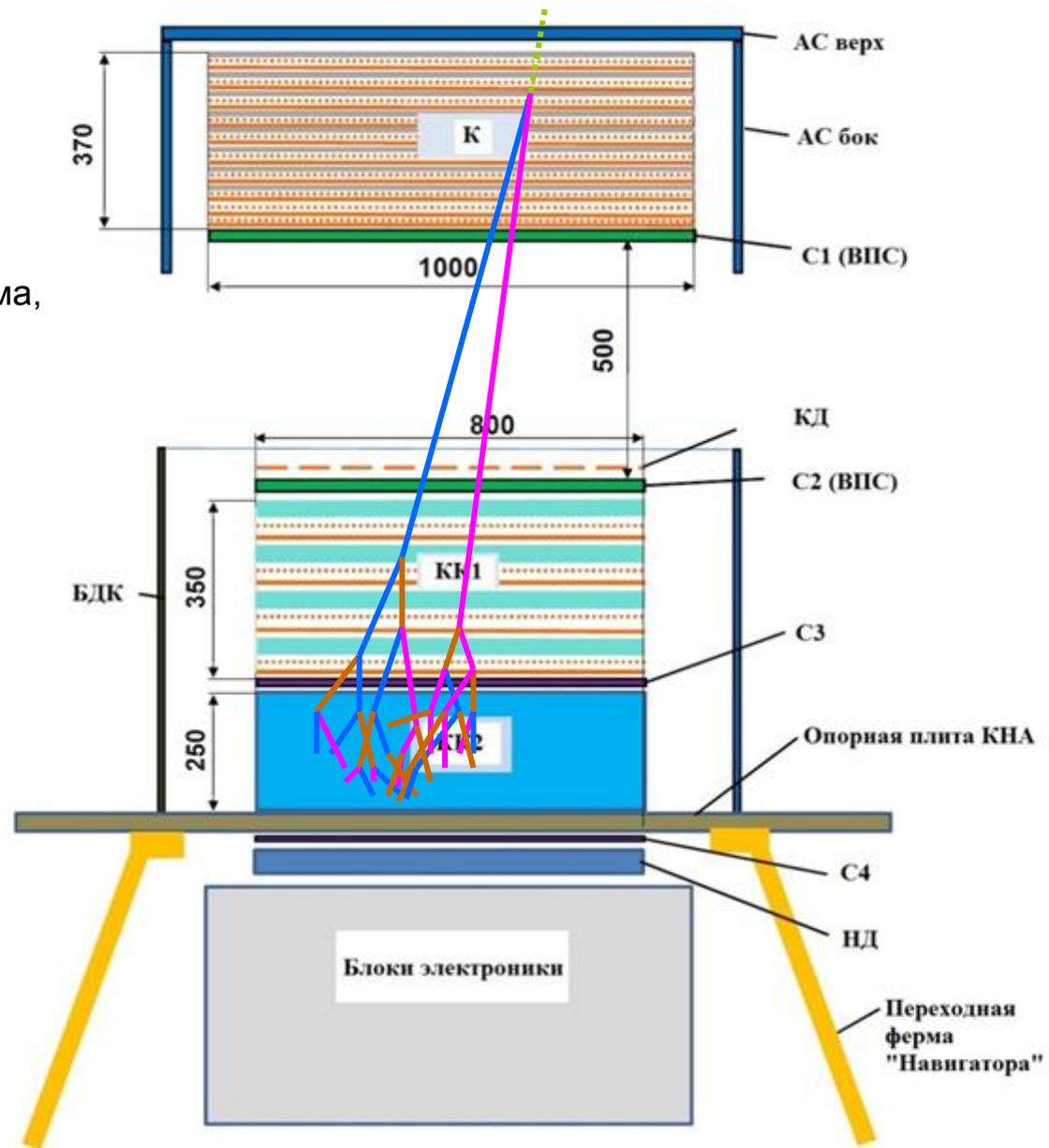
Для решения главной научной задачи в рамках ДЭП разработан проект прецизионного гамма-телескопа «ГАММА-400» с угловым и энергетическим разрешениями, существенно превосходящими действующие и проектируемые наземные и космические гамма-телескопы, в том числе, гамма-телескоп Fermi-LAT.

# Научная кооперация

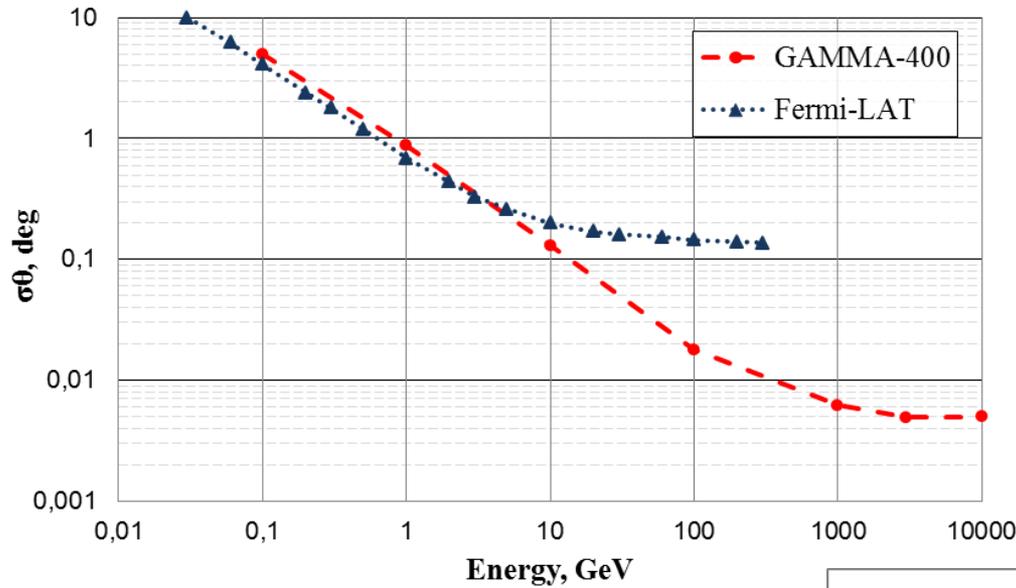
Российские научные организации	Зарубежные научные организации
ФИАН - головной	INFN (Италия)
НИЯУ МИФИ	INAF (Италия)
НИИЭМ	GSFC (США)
НИИСИ РАН	Stanford University (США)
СПб ФТИ	КГУ (Украина)
ИКИ РАН	КРАО (Украина)
ИФВЭ	ИКИ (Украина)
ИЗМИРАН	
НИИМВ	

# Физическая схема гамма-телескопа «ГАММА-400»

АС - антисовпадательная система,  
К - конвертер-трекер,  
ВПС - времяпролетная система,  
КД - координатный детектор,  
КК1, КК2 - координатно-чувствительный калориметр,  
НД - нейтронный детектор,  
С3, С4 - сцинтилляционные детекторы калориметра;  
БДК - боковые детекторы калориметра

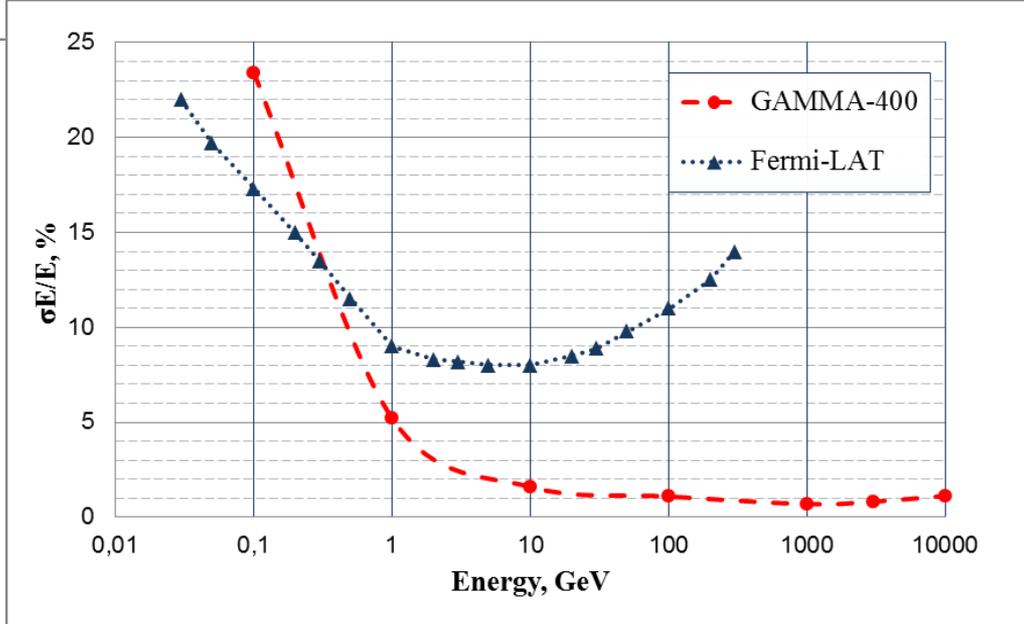


# Результаты Монте-Карло моделирования гамма-телескопа



Зависимость углового разрешения ГАММА-400 и Fermi-LAT от энергии.

Зависимость энергетического разрешения ГАММА-400 и Fermi-LAT от энергии.



# Характеристики гамма-телескопа ГАММА-400

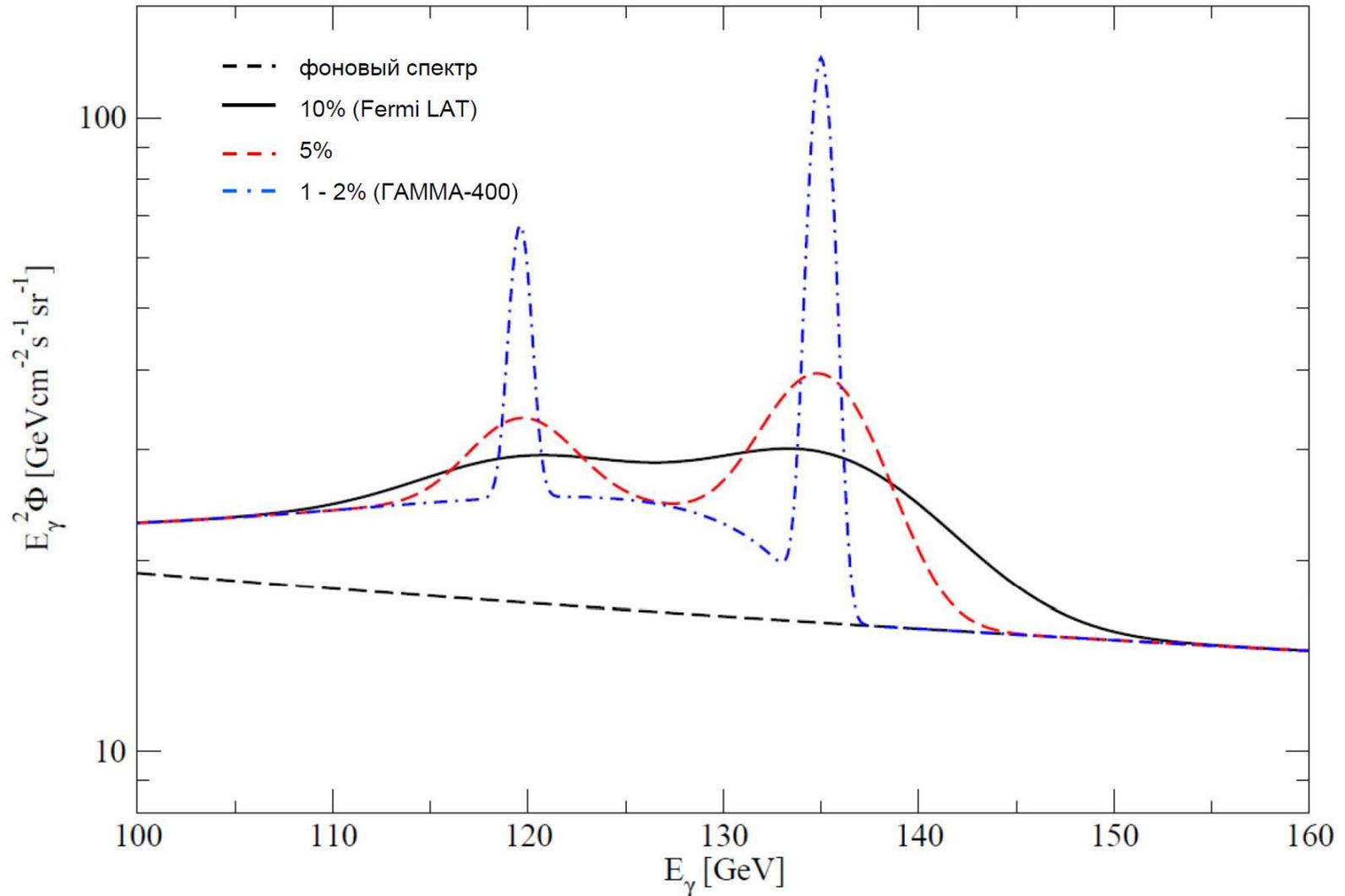
*(ГАММА-400 оптимизирован для регистрации гамма-излучения и поиска особенностей, связанных с частицами темной материи, при энергии 100 ГэВ и способен регистрировать события в диапазоне энергий от 100 МэВ до 10000 ГэВ)*

Диапазон энергий	0,1–10000 ГэВ
Угловое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~0,02°
Энергетическое разрешение ( $E_\gamma > 100$ ГэВ)	~1-2%
Чувствительная площадь	0,64 м <sup>2</sup>
Вес	2600 кг
Энергопотребление	2000 Вт
Объем передаваемой информации	100 Гбайт/сутки
Регистрируемые частицы	гамма–кванты, электроны, позитроны, протоны, ядра

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

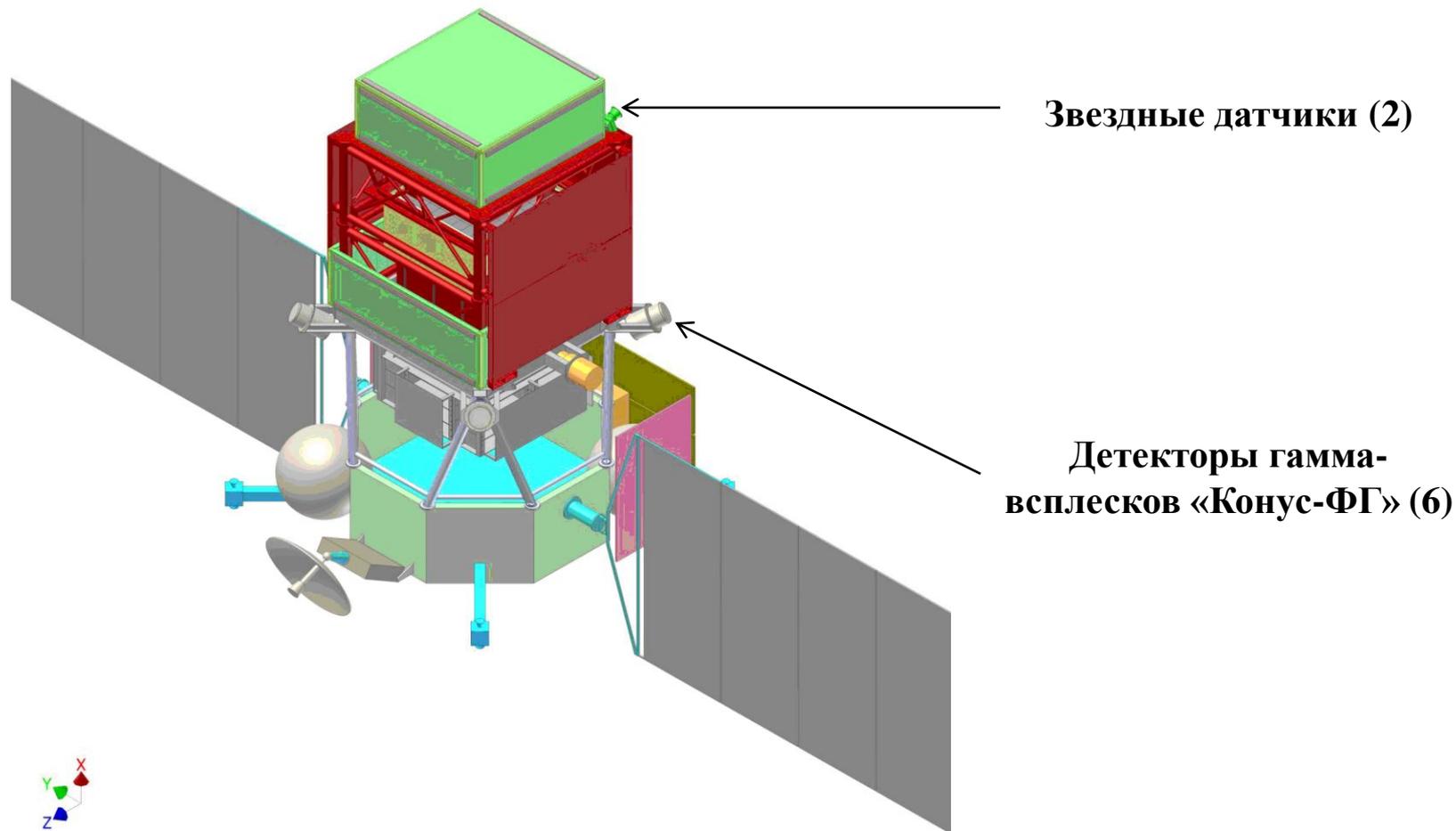
	КОСМИЧЕСКИЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ				НАЗЕМНЫЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ			
	EGRET	AGILE	Fermi-LAT	ГАММА-А-400	Н.Е.S.S.-II	MAGIC-II	VERITAS	СТА
	США	Италия	США	<b>Россия</b>	Намибия	Испания, Канары	США, Аризона	
Годы работы	1991-2000	2007-	2008-	2018	2012-	2009-	2007-	2018
Диапазон энергий, ГэВ	0,03-30	0,03-50	0,02-300	<b>0,1-10000</b>	> 30	> 50	> 50	> 20
Эффективная площадь, м <sup>2</sup>	0,2	0,1	0,8	0,4	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
Угловое разрешение (E <sub>γ</sub> > 100 ГэВ)	0,2° (E <sub>γ</sub> ~ 0,5 ГэВ)	0,1° (E <sub>γ</sub> ~ 1 ГэВ)	0,2°	<b>&lt;0,02°</b>	0,07°	0,07° (E <sub>γ</sub> = 300 ГэВ)	0,1°	0,1° (E <sub>γ</sub> = 100 ГэВ) 0,03° (E <sub>γ</sub> = 10 ТэВ)
Энергетическое разрешение (E <sub>γ</sub> > 100 ГэВ)	15% (E <sub>γ</sub> ~ 0,5 ГэВ)	50% (E <sub>γ</sub> ~ 1 ГэВ)	10%	<b>1-2%</b>	15%	20% (E <sub>γ</sub> = 100 ГэВ) 15% (E <sub>γ</sub> = 1 ТэВ)	15%	20% (E <sub>γ</sub> = 100 ГэВ) 5% (E <sub>γ</sub> = 10 ТэВ)

# Что дает улучшение энергетического разрешения



Bergström L., arXiv:1208.6082 (2012).

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ КНА «ГАММА-400» НА ПЛАТФОРМЕ «НАВИГАТОР»



Разработку космического аппарата и платформы «Навигатор»  
осуществляет НПО им. С.А. Лавочкина

# СХЕМА ВЫВЕДЕНИЯ ГАММА-400

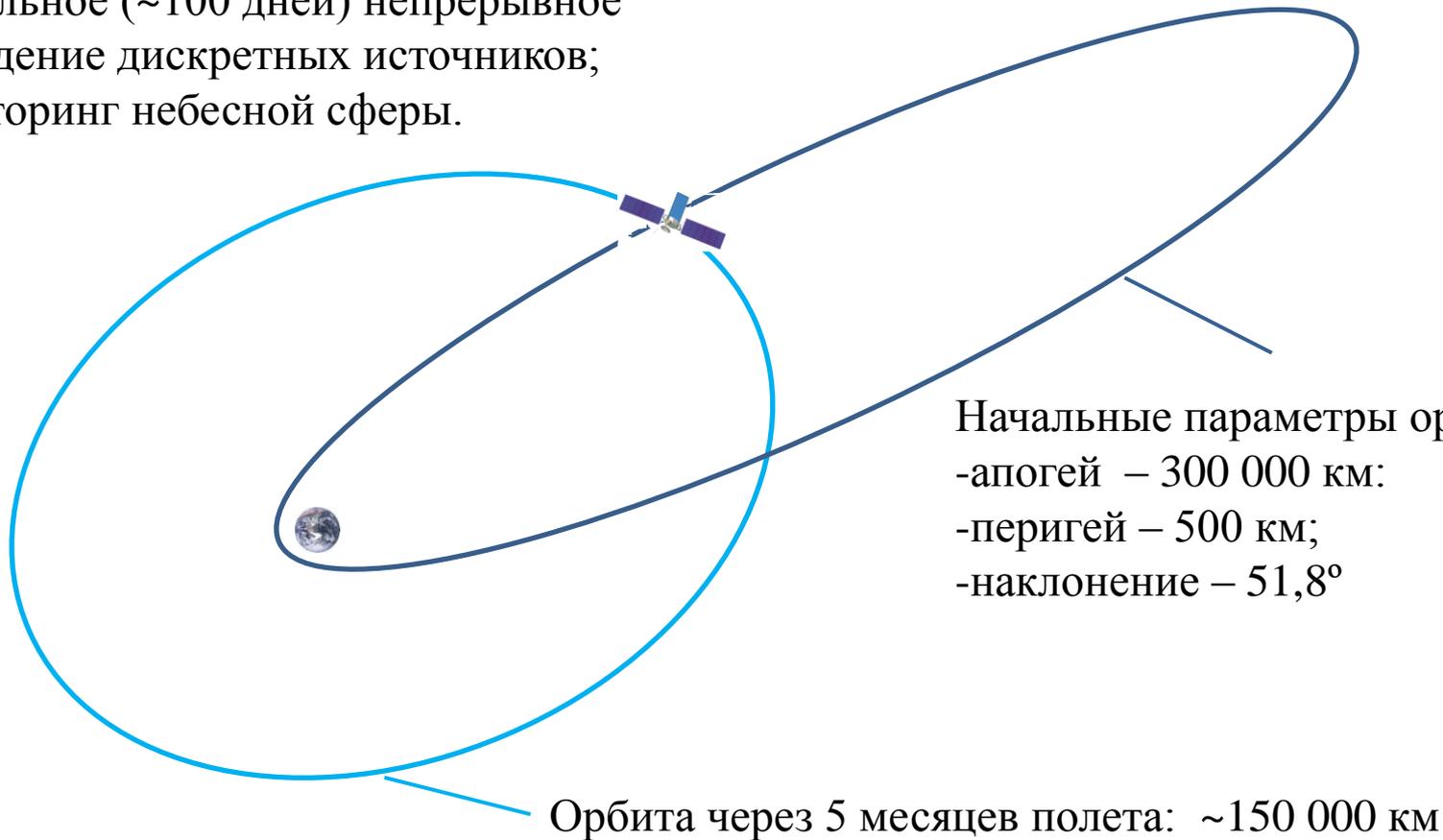


**Планируемая дата запуска КА «ГАММА-400» – 2018 г.**

# РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТЫ ПОЛЕТА ГАММА-400

Режимы наблюдений:

- длительное (~100 дней) непрерывное наблюдение дискретных источников;
- мониторинг небесной сферы.



# Исследование дискретных источников высокоэнергичного гамма-излучения, в том числе гамма-линий от темной материи

Эффективность наблюдения (отношение сигнала к фону) дискретных источников гамма-телескопом «ГАММА-400» почти в 100 раз выше, чем Fermi-LAT. При этом точность определения энергии гамма-квантов в 5 раз выше.

Набор статистики гамма-телескопом «ГАММА-400» происходит в 3 раза быстрее, чем Fermi-LAT. При этом может проводиться детальный анализ переменности светимости источника.

Table 5. LAT 2FGL Source Classes

Description	Identified		Associated	
	Designator	Number	Designator	Number
Pulsar, identified by pulsations	PSR	83	...	...
Pulsar, no pulsations seen in LAT yet	...	...	psr	25
Pulsar wind nebula	PWN	3	pwn	0
Supernova remnant	SNR	6	snr	4
Supernova remnant / Pulsar wind nebula	...	...	†	58
Globular cluster	GLC	0	glc	11
High-mass binary	HMB	4	hmb	0
Nova	NOV	1	nov	0
BL Lac type of blazar	BZB	7	bzb	428
FSRQ type of blazar	BZQ	17	bzq	353
Non-blazar active galaxy	AGN	1	agn	10
Radio galaxy	RDG	2	rdg	10
Seyfert galaxy	SEY	1	sey	5
Active galaxy of uncertain type	AGU	0	agu	257
Normal galaxy (or part)	GAL	2	gal	4
Starburst galaxy	SBG	0	sbg	4
Class uncertain	...	...	...	1
Unassociated	...	...	...	576
Total	...	127	...	1746

Table 1. Extended sources used in the 2FGL analysis

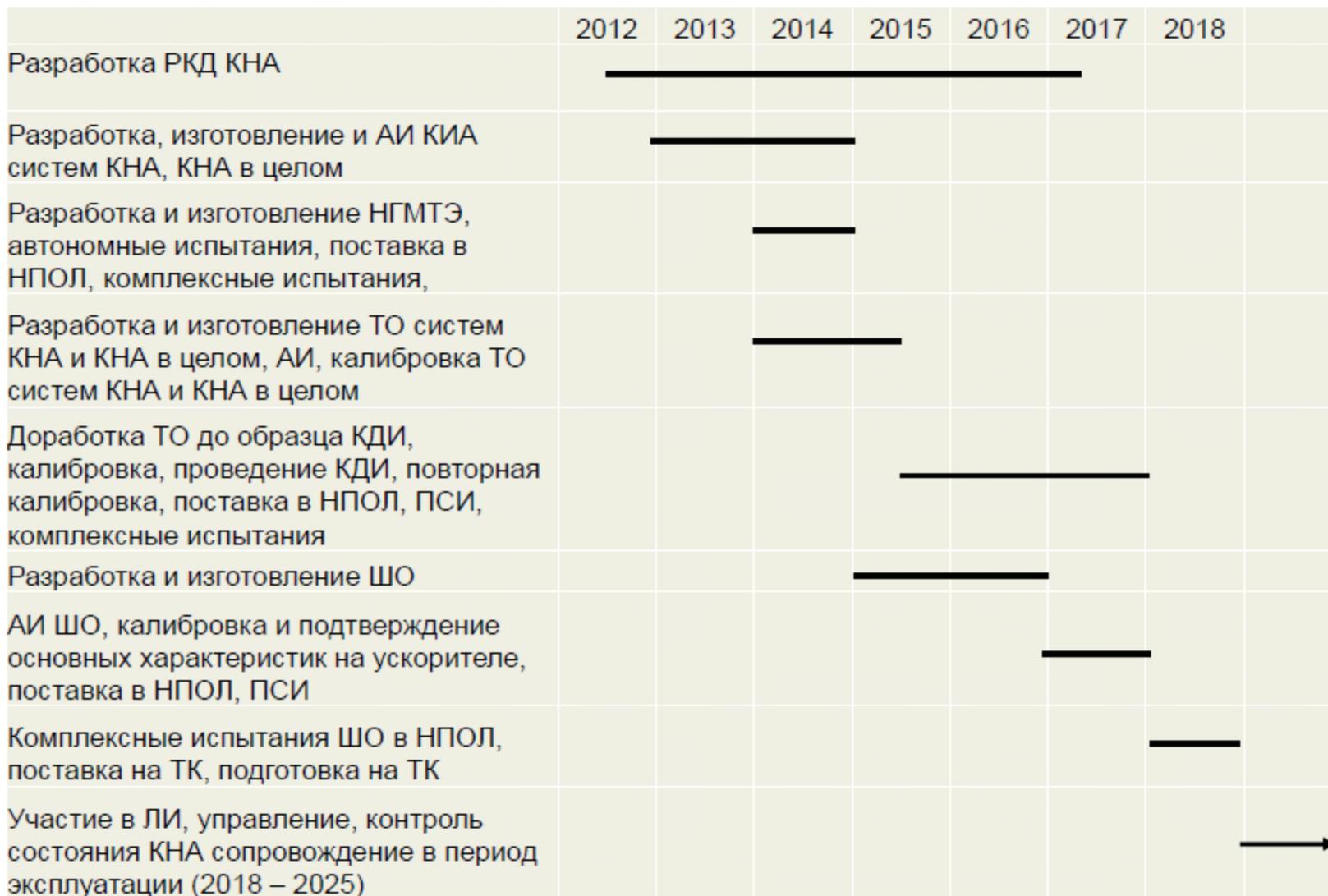
2FGL Name	Extended Source	Spatial Form	Spectral Form	Reference
2FGL J0059.0–7242e	SMC	2D Gaussian	Exp Cutoff PL	Abdo et al. (2010e)
2FGL J0526.6–6825e	LMC	2D Gaussian <sup>a</sup>	Exp Cutoff PL	Abdo et al. (2010q)
2FGL J0617.2+2234e	IC 443	2D Gaussian	Log Parabola	Abdo et al. (2010p)
2FGL J0833.1–4511e	Vela X	Disk	Power Law	Abdo et al. (2010l)
2FGL J1324.0–4330e	Centaurus A (lobes)	Contour Map	Power Law	Abdo et al. (2010f)
2FGL J1514.0–5915e	MSH 15–52	Disk	Power Law	Abdo et al. (2010d)
2FGL J1801.3–2326e	W28	Disk	Log Parabola	Abdo et al. (2010k)
2FGL J1805.6–2136e	W30	Disk	Log Parabola	...
2FGL J1824.5–1351e	HESS J1825–137	2D Gaussian	Power Law	Grondin et al. (2011a)
2FGL J1855.9+0121e	W44	Ring	Log Parabola	Abdo et al. (2010o)
2FGL J1923.2+1408e	W51C	Disk	Log Parabola	Abdo et al. (2009b)
2FGL J2051.0+3040e	Cygnus Loop	Ring	Exp Cutoff PL	...

По данным каталога дискретных источников для энергий более нескольких ТэВ составлена таблица, в которой представлены дискретные источники, гамма-излучение от которых зарегистрировано наземными гамма-телескопами, и число гамма-квантов, которое сможет зарегистрировать ГАММА-400 (эффективная площадь 4000 см<sup>2</sup>) за 100 дней наблюдения источника.

Наименование	Установка	Спектр. индекс	Интегр. поток F(> 100 ГэВ), 10 <sup>-9</sup> см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	Ожидаемое число квантов N(> 100 ГэВ) за 100 дней
<a href="#">1ES 1011+496</a>	MAGIC	4,0	67,7	2336,7
<a href="#">1ES 1218+304</a>	MAGIC	3,0	4,09	141,3
<a href="#">1ES 1959+650</a>	MAGIC	2,78	5,805	200,7
<a href="#">1ES 2344+514</a>	MAGIC	3,3	1,67	57,7
<a href="#">3C 279</a>	MAGIC	4,11	219,0	7566,7
<a href="#">BL Lac</a>	MAGIC	3,64	3,18	110,0
<a href="#">Crab</a>	H.E.S.S., MAGIC	2,48	11,7	403,3
<a href="#">MAGIC J0616+225</a>	MAGIC, VERITAS	3,1	0,605	20,9
<a href="#">Mkn 180</a>	MAGIC	3,25	3,60	124,3
<a href="#">Mkn 421</a>	H.E.S.S., MAGIC	3,2	6,05	209,0
<a href="#">Mkn 501</a>	MAGIC	2,28	10,7	370,0
<a href="#">PG 1553+113</a>	H.E.S.S., MAGIC	4,01	204,0	7066,7
<a href="#">PKS 2155-304</a>	H.E.S.S., MAGIC	3,53	69,0	2386,7
<a href="#">RX J0852.0-4622</a>	H.E.S.S.	2,2	0,331	11,4
<a href="#">RX J1713.7-3946</a>	H.E.S.S.	2,84	0,618	21,4
<a href="#">W Com</a>	VERITAS	3,8	4,570	158,0



## План дальнейших работ по КНА «ГАММА-400» согласно Генеральному графику, согласованный с соисполнителями



Благодарю за  
внимание