Концепция орбитального комптоновского гамма-телескопа

Ю.А. Уваров[1], А.М. Быков[1], А.А. Лутовинов[2], Д.Д. Фредерикс[1], А.Л. Лысенко[1], Е.Е. Холупенко[1], А.М. Красильщиков[1], Г.И. Васильев[1], К.Д. Комлев[1], В.К. Еремин[1], Е.М. Вербицкая[1], И.В. Еремин[1], Н.Н. Фадеева[1], Ю.В. Тубольцев[1], А.А. Богданов[1], В.А. Арефьев[2], М.В. Бунтов[2], В.В. Левин[2], А.Ф. Июдин[3]

1. ФТИ им. А.Ф. Иоффе; 2. ИКИ РАН; 3. НИИЯФ МГУ

Аннотация

Астрофизические процессы, связанные с активным энерговыделением, часто сопровождаются интенсивным гамма-излучением. Большой интерес представляет мегаэлектронвольтный диапазон, на который приходится существенная доля излучения сверхновых звезд, пульсаров, источников гамма-всплесков и аккрецирующих черных дыр. Также на этот диапазон приходится излучение в гамма-линиях распада нестабильных изотопов и аннигиляции электрон-позитронных пар, позволяющее проводить спектроскопический анализ, важный для исследования процессов звездного нуклеосинтеза и ядерных взаимодействий космических лучей. Кроме того, наблюдения гамма-линий позволяет исследовать свойства сильно поглощенных компактных релятивистских звезд. Измерение спектров и поляризации гамма-излучения в непрерывном спектре важно для исследования механизмов излучения двойных звездных систем с компактными компаньонами и мощных транзиентных источников.

Регистрация гамма-квантов с необходимыми для наблюдений указанных астрофизических объектов угловым и энергетическим разрешением и чувствительностью связана с существенными трудностями из-за особенностей технологии детектирования квантов мегаэлектронвольтных энергий. В настоящее время чувствительность орбитальных детекторов в этом диапазоне на несколько порядков уступает чувствительности как рентгеновских телескопов, так и детекторов гамма-излучения гига- и тераэлектронвольтного диапазонов. Особенно слабо изучен диапазон энергий 0.3-10 МэВ, большинство данных в котором было получено обсерваториями CGRO/COMPTEL (1991-2000) [1] и INTEGRAL/SPI (2002-2025) [2].

В данной работе описывается концепция орбитального комптоновского гамма-телескопа в диапазонеэнергий 0.3--10 МэВ, основанного на современных технологиях кремниевых стриповых детекторов (Si-DSSD), позволяющих существенно улучшить чувствительность телескопа, проводить спектроскопические и поляриметрические измерения. Представлены результаты моделирования характеристик обсуждаемого гамма-телескопа [3] в полномасштабном, и в малоразмерном вариантах, проведено сравнение с характеристиками приборов завершенной миссии CGRO/COMPTEL (NASA) и планирующейся миссии COSI (NASA) [4].

Введение

В докладе обсуждается концепция комптоновского гамма-телескопа, работа которого основана на регистрации комптоновских рассеяний гамма-квантов. Такой выбор определяется тем, что в диапазоне энергий ~0.1-10 МэВ доминирующим процессом при прохождении гамма-кванта через вещество детектора является комптоновское рассеяние, на энергиях ниже — фотоэффект, а на энергиях выше — образование пар. Чувствительные элементы трекера телескопа предполагаются на основе кремниевых двусторонних стриповых детекторов. Для получения позиционной чувствительности сегментированный калориметр предполагается состоящим из отдельных сцинтилляторов CsI(Tl). Мы представляем результаты проведённого нами с помощью пакетов программ GEANT4 [5] и MEGALIB [6] моделирования характеристик телескопа для различных вариантов конструкции и набора параметров трекера, обсуждаем его возможности по сравнению с аналогами и подходящие для него научные задачи.

В таблице 1 перечислены рассматривавшиеся конфигурации детектора, три из которых схематически изображены на рисунке 1.

Таблица 1. Моделируемые конфигурации телескопа

вари-ант	трекер размеры, см число слоев	калориметр нижний, см целиком/ 1 кристалл	калориметр боковой, см целиком/ 1 кристалл
A	$60\times60\times50$	$60\times60\times8$	$60\times50\times2$
	100 слоев	$1.25\times1.25\times8$	$1.25\times1.25\times2$
A2	$60\times60\times50$	$60\times60\times8$	–
	100 слоев	$1.25\times1.25\times8$	–
B	$60\times60\times50$	$60\times60\times8$	$60\times50\times2$
	50 слоев	$1.25\times1.25\times8$	$1.25\times1.25\times2$
C	$10\times10\times20$	$10\times10\times2$	$10\times20\times2$
	40 слоев	$1.25\times1.25\times2$	$1.25\times1.25\times2$
C2	$10\times10\times20$	$10\times10\times2$	–
	40 слоев	$1.25\times1.25\times2$	–
D	$10\times10\times10$	$10\times10\times2$	$10\times10\times1$
	20 слоев	$1.25\times1.25\times2$	$1.25\times1.25\times1$

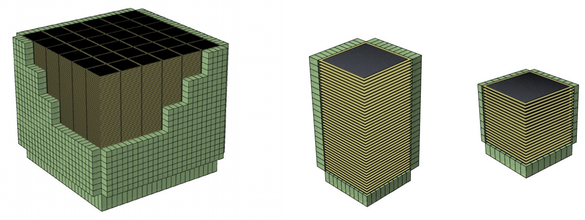


Рис. 1. Варианты конструкции детектора, слева направо для конфигураций телескопа A, C, D. Масштаб для конфигурации A уменьшен.

Энергетическое разрешение

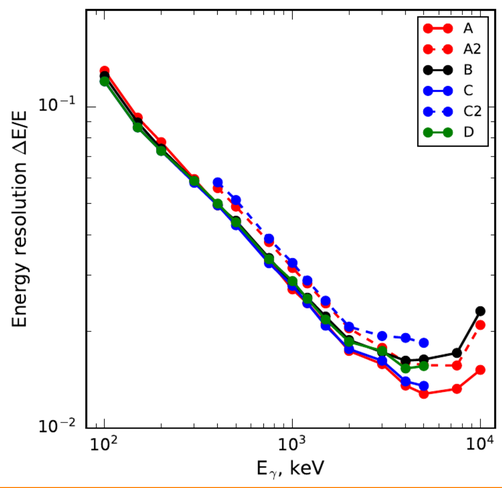


Рис. 2. Результаты расчетов энергетического разрешения (FWHM) для различных конфигураций телескопа.

Эффективная площадь

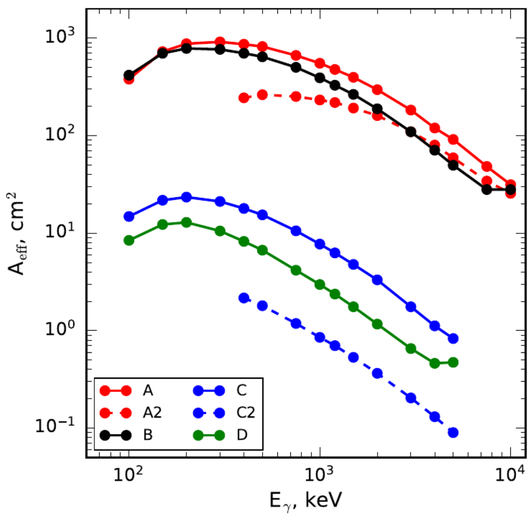


Рис. 3. Результаты расчетов эффективной площади при нормальном падении для различных конфигураций телескопа.

Конфигурации A2,C2 без боковых калориметров демонстрируют существенно меньшую эффективную площадь на энергиях ниже 10 МэВ (особенно ниже 2 МэВ), чем аналогичные конфигурации с боковыми калориметрами, что является следствием потери событий из-за ухода части рассеянных квантов через боковую поверхность.

Зависимость эффективной площади от угла падения кванта

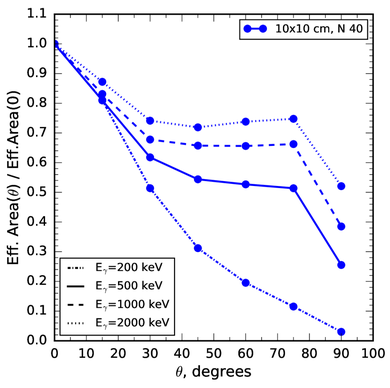
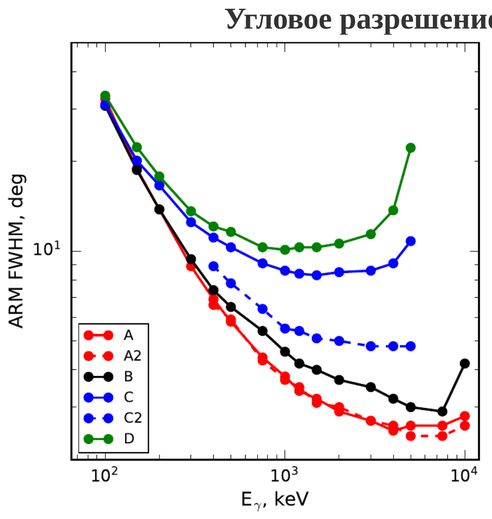


Рис. 4. Результаты расчета зависимости эффективной площади от угла падения гамма-кванта для конфигурации детектора C.

Чувствительность телескопа по полю зрения важна для задач картирования неба в линиях и континууме, а также поиска и исследования транзиентных источников гамма-излучения. В ходе работы была исследована зависимость эффективной площади и углового разрешения телескопа от зенитного угла - направления на точечный источник. Расчеты показывают, что для E_γ < 5 МэВ падение эффективной площади в два раза происходит при θ ~ 60°, что обеспечивает размер поля зрения (FWHM) ~π стер. (~25% небесной сферы).

Угловое разрешение (ARM)



Общепринятой мерой оценки угловой чувствительности для комптоновских телескопов является ARM (Angular Resolution Measure) – отклонение восстановленного конуса рассеяния падающего гамма-кванта в ближайшей, по отношению к известному направлению на источник, точке. В данной работе, оценка измеренной ширины распределения ARM проводилась после необходимой селекции по энергии, встроенными средствами пакета MEGALIB (утилита Mimrec), позволяющими фитировать статистическое распределение данной величины различными модельными функциями.

Рис. 5. Результаты расчетов углового разрешения для различных конфигураций телескопа.

Угловое разрешение по восстановленному изображению

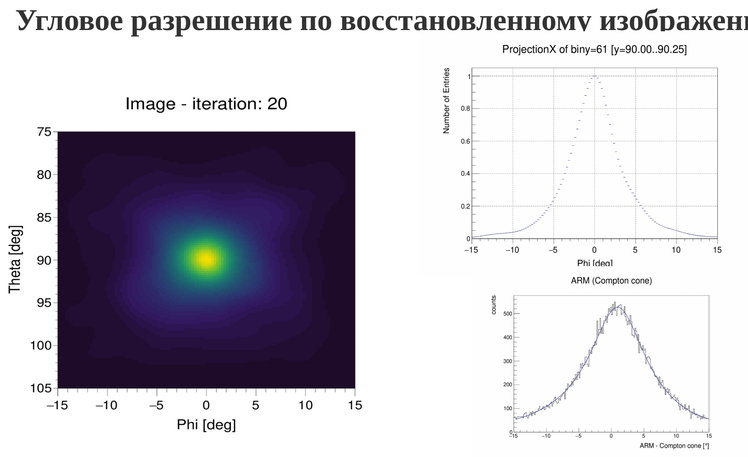


Рис. 6. Результаты расчета углового разрешения для конфигурации детектора C путём восстановления изображения (слева) точечного источника со спектром Крабовидной туманности (нормальное падение). Справа сверху: сечение изображения по углу θ, угловое разрешение FWHM=10.6°; справа снизу: распределение ARM, угловое разрешение FWHM=12.4°. Время экспозиции 10^5 секунд, энергия квантов в диапазоне 0.2-2 МэВ.

Моделирование с восстановлением изображения точечного источника со спектром Крабовидной туманности показывает, что оценка углового разрешения прибора по ширине ARM достаточно консервативно отражает ширину распределения относительной яркости восстановленного изображения точечного источника (PSF).

Зависимость углового разрешения (ARM) от ширины стрипа (от шага стрипов)

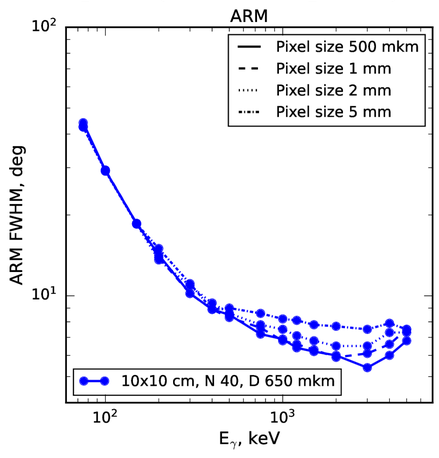


Рис. 7. Результаты расчетов углового разрешения телескопа от энергии в конфигурации C для различных значений ширин стрипов (размеров пикселей).

На Рисунке 7 приведены графики зависимости углового разрешения телескопа от энергии для различных значений ширины стрипов. Видно что в диапазоне 0.5-2 мм угловое разрешение оказывается сравнимым, а более широкие стрипы требуют меньшего числа каналов электроники. Поэтому при моделировании базовых конфигураций была выбрана ширина стрипа 2 мм.

Чувствительность

Чувствительность телескопа к потоку падающего излучения – основная характеристика, отвечающая за возможность решения сформулированных научных задач эксперимента. Пороговая чувствительность определяется эффективной площадью и угловым разрешением, характеризующим способность прибора выделять полезный сигнал источника относительно фонового излучения. Для оценок чувствительности использовалась аппроксимация спектра изотропного фонового излучения из работы Грубер и др. (1999)[7]. Также к существенным компонентам фона телескопа в его целевом энергетическом диапазоне относится фон заряженных частиц (протонов и альфа-частиц КЛ), практически полностью (>99.99%) подавляемый вето антисовпадательной защиты, а также гамма-альбедо атмосферы (в случае низкой околоземной орбиты) и приборный фон, вызванный активацией его материала, в первую очередь CsI, внутри контура защиты.

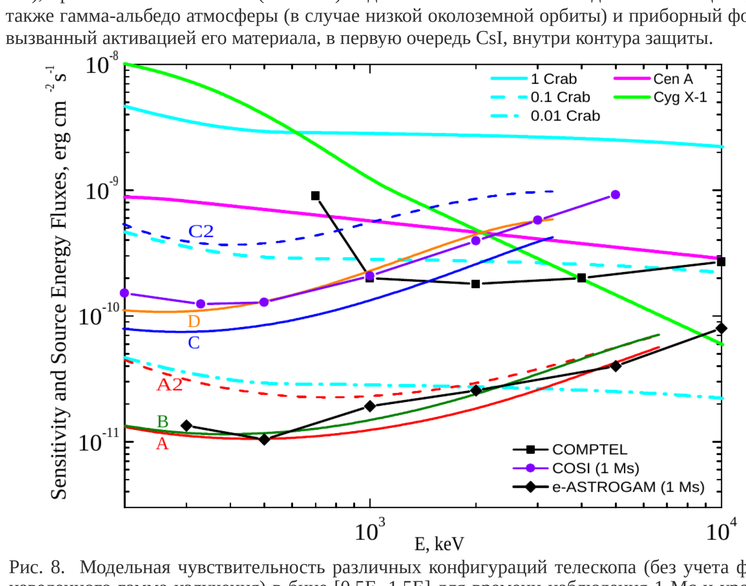


Рис. 8. Модельная чувствительность различных конфигураций телескопа (без учета фона наведенного гамма-излучения) в бине [0.5E, 1.5E] для времени наблюдения 1 Мс и уровня значимости 3σ. Кроме того, показана чувствительность CGRO/COMPTEL (Де Анжелис и др., 2021 [8], сплошная черная кривая с квадратами) для 9-ти летнего обзора неба, e-ASTROGAM (Де Анжелис и др., 2018 [9], сплошная черная кривая с ромбами) для времени наблюдения 1 Мс и COSI (Томсик и др. 2024 [4], сплошная фиолетовая кривая с кружками), также пересчитанная для времени наблюдения 1 Мс. Дополнительно приведены интегральные потоки энергии в диапазоне [0.5E, 1.5E] от различных космических источников гамма-излучения: Крабовидная туманность, Cen A, Cyg X-1.

На основании полученных графиков зависимости эффективной площади от энергии (Рис. 5) можно заключить, что для эффективных наблюдений в диапазоне энергий ≤ 3 МэВ в конструкцию телескопа обязательно должны входить калориметры (как нижний, так и боковые).

Чувствительность в линиях

Таблица 2. Чувствительность телескопа в естественных линиях

E_{line} (ΔE_{line}), кэВ	A фот/см^2/с	A2 фот/см^2/с	B фот/см^2/с	C фот/см^2/с	D фот/см^2/с	e-ASTROGAM фот/см^2/с
511 (1.6)	4.1×10^{-6}	1.1×10^{-5}	5.2×10^{-6}	4.1×10^{-5}	7.4×10^{-5}	4.1×10^{-6}
847 (35)	3.2×10^{-6}	8.1×10^{-6}	4.5×10^{-6}	4.9×10^{-5}	8.0×10^{-5}	3.5×10^{-6}
1157 (15)	2.1×10^{-6}	4.1×10^{-6}	3.2×10^{-6}	3.1×10^{-5}	6.2×10^{-5}	3.6×10^{-6}
1275 (20)	2.1×10^{-6}	4.1×10^{-6}	3.1×10^{-6}	2.9×10^{-5}	7.0×10^{-5}	3.8×10^{-6}
2223 (20)	1.9×10^{-6}	2.9×10^{-6}	2.5×10^{-6}	1.8×10^{-5}	9.1×10^{-5}	2.1×10^{-6}
4428 (100)	2.7×10^{-6}	4.0×10^{-6}	4.6×10^{-6}	6.7×10^{-5}	1.6×10^{-4}	1.7×10^{-6}

Таблица 2. Чувствительность в линиях для различных конфигураций детектора, а также для проекта e-ASTROGAM (по данным работы Де Анжелис и др. 2018 [9]) приведены для времени наблюдения 1 Мс. В скобках приведены естественные ширины линий.

Минимальная детектируемая поляризация

Комптоновский телескоп — естественный поляриметр по физическим принципам своей работы, поэтому была проведена оценка чувствительности рассматриваемого прибора к детектированию поляризованного гамма-излучения.

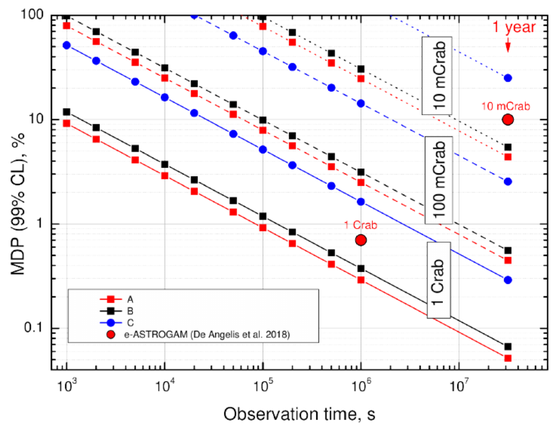


Рис. 9. Оценка минимальной детектируемой поляризации для различных конфигураций телескопа. Красными кружками показаны ожидаемые значения MDP телескопа eASTROGAM (Де Анжелис и др., 2018) для времени наблюдения 1 Мс и 1 год.

На рис. 9 представлены полученные зависимости MDP от времени экспозиции источника со спектром Крабовидной туманности и потоками 1, 0.1 и 0.01 Crab на уровне значимости 99% (4.29 σ).

Детектирование поляризации гамма-всплеска

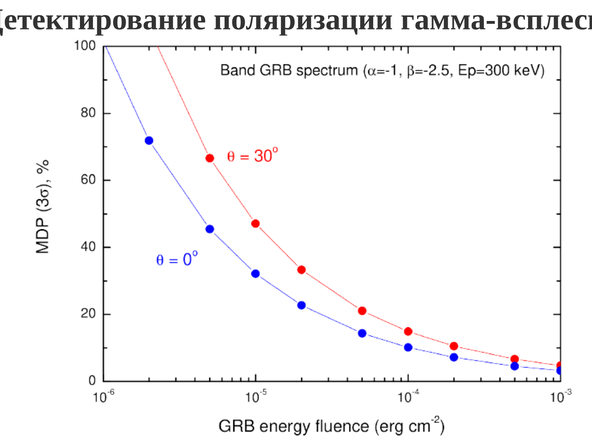


Рис. 10. Оценка минимальной детектируемой поляризации для типичного "длинного" гамма-всплеска в зависимости от его интенсивности. Конфигурация телескопа C.

Наблюдения линий в солнечных вспышках

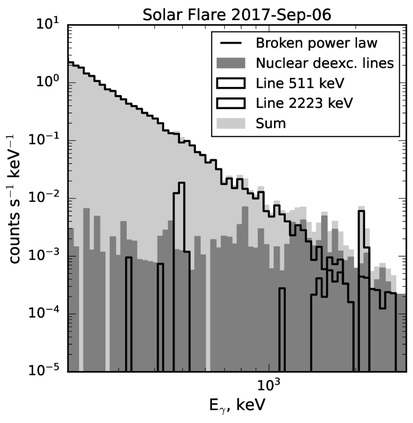


Рис. 11. Инструментальный спектр вспышки класса X 9.3 6 сентября 2017 г. [10], самой мощной вспышки прошлого, 24, цикла солнечной активности, какой бы её зарегистрировал телескоп в варианте C.

Спектр вспышек в гамма-диапазоне является суммой нескольких компонент:

1. Континуум от тормозного излучения ускоренных электронов.
2. Линии от ядерных реакций ускоренных протонов и др. ионов, основные линии:
2.1. характеристические линии снятия возбуждения ядер
2.2. линия 511 кэВ - результат аннигиляции позитрона, родившегося после распада положительного пиона pi+
2.3 линия 2.2 МэВ - линия захвата нейтрона протоном с образованием дейтерия.

В данной вспышке хорошо различима линия дейтерия 2.2 МэВ, линия 511 кэВ даёт превышение над континуумом тормозного излучения в 2.5 сигма.

Литература

1. CGRO webpage. - URL: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/
2. Intergral webpage. - URL: https://iki.cosmos.ru/research/missions/integral
3. Ю.А. Уваров, А.М. Быков, А.А. Лутовинов, Д.Д. Фредерикс, А.Л. Лысенко, Е.Е. Холупенко, А.М. Красильщиков, Г.И. Васильев и др., ПАЖ, том 52, No 1, с. 42 (2026).
4. Tomsick J. and Collaboration, The Compton Spectrometer and Imager // in 38th International Cosmic Ray Conference — 2024, Art. no. 745.
5. GEANT4 webpage. - URL: https://geant4.web.cern.ch/
Agostinelli S., GEANT4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A – 2003 - v. 506 - no. 3, - pp. 250–303.
6. MEGALIB webpage. - URL: https://megalibtoolkit.com/home.html
Zoglauer A., Andritschke R., and Schopper F., MEGAlib The Medium Energy Gamma-ray Astronomy Library // New Astronomy Reviews — 2006 - v. 50 - no. 7-8, - pp. 629-632.
7. Gruber D. E., Matteson J. L., Peterson L. E., and Jung G. V., The Spectrum of Diffuse Cosmic Hard X-Rays Measured with HEAO 1 // The Astrophysical Journal – 1999 - v. 520 - no. 1, - pp. 124–129.
8. A. de Angelis, V. Tatischeff, A. Argan, S. Brandt, A. Bulgarelli, A. Bykov, E. Costantini, R. Curado da Silva et al., Experimental Astronomy 51(3), 1225 (2021).
9. A. de Angelis, V. Tatischeff, I. A. Grenier, J. McEnery, M. Mallamaci, M. Tavani, U. Oberlack, L. Hanlon et al., Journal of High Energy Astrophysics 19, 1 (2018).
10. Lysenko A.L., Anfinogentov S.A., Svinkin D.S., Frederiks D.D., and Fleishman G.D., Gamma-Ray Emission from the Impulsive Phase of the 2017 September 6 X9.3 Flare // The Astrophysical Journal – 2019 - v. 877 - no. 2, - id 145.

Благодарности

Работа по формированию базы структурных элементов нового комптоновского гамма-телескопа выполнена Ю.А. Уваровым, А.А. Лутовиновым, Д.Д. Фредериксом, А.Л. Лысенко, Е.Е. Холупенко, В.А. Арефьевым, М.В. Бунтовым, В.В. Левиным при поддержке гранта Минобрнауки РФ 075-15-2024-647.