ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-10-25-33

Manuscript received 12 July 2026;
Accepted 24 September 2026

Бестугин Александр Роальдович,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,
fresguap@mail.ru

Куркова Ольга Петровна,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,
aljaskaolga@mail.ru

Ключевые слова: *космические излучения гамма-всплесков, послесвечение гамма-всплесков, рентгеновский телескоп, вероятность обнаружения излучения, эффективная площадь, поле зрения, фокусное расстояние, оптика "Lobster Eye", микроканальная пластина*

Обоснована целесообразность и перспективность использования при создании бортового рентгеновского телескопа для наблюдения за космическими явлениями послесвечения гамма-всплесков оптики "Lobster Eye" в геометрии Энджела. Представлены: математическая модель вероятности обнаружения рентгеновского излучения в зависимости от геометрических параметров микроканала оптики "Lobster Eye" в геометрии Энджела; результаты теоретических исследований в виде выявленных основных закономерностей влияния геометрических параметров оптики "Lobster Eye" на функциональные характеристики рентгеновского телескопа; показаны и обоснованы ограничения, которые необходимо учитывать, а также противоречия, которые необходимо компенсировать путем решения задач оптимизации в процессе создания рентгеновского телескопа, а также результаты анализа влияния возможных отклонений от идеальной геометрии оптической системы на искажение изображения (аберрации), получаемого в фокальной плоскости рентгеновского телескопа. Полученные результаты могут служить в качестве научно-технического задела для дальнейшего развития научного направления, предложенного к рассмотрению в данной статье.

Информация об авторах:
Бестугин Александр Роальдович, *доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия*
Куркова Ольга Петровна, *доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия*

Для цитирования:
Бестугин А.Р., Куркова О.П. Влияние геометрии микроканальных пластин оптической системы на функциональные возможности рентгеновского телескопа для космического мониторинга послесвечения гамма-всплесков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №10. С. 25-33.

For citation:
A. R. Bestugin, O. P. Kurkova, "Influence of the geometry of microchannel plates optical system on the functional capabilities X-ray telescope for space monitoring of the afterglow of gamma-ray bursts", *T-Comm*, 2026, vol. 20, no.10, pp. 25-33. (*in Russian*)

Введение

Излучения гамма-всплесков (GRB – *gamma-ray bursts*) и последующее послесвечение, направленные в сторону нашей планеты из далеких галактик, могут оказывать влияние на разрушение озонового слоя, изменение климата, функционирование технических систем, что представляет определенную опасность для жизни людей на Земле. В связи с этим необходим постоянный мониторинг этих космических явлений. Кроме этого, изучение этих космических объектов способствует расширению наших познаний о процессах, происходящих в далеких галактиках, зарождении и развитии нашей галактики. Поэтому мониторинг GRB и последующего послесвечения необходим и имеет большое научное и практическое значение.

GRB – это масштабный космический выброс энергии, энергетические пики которого составляют 50 – 500 кэВ. Для мониторинга GRB используются специальные инструменты, располагаемые как на поверхности Земли, так устанавливаемые на борту космических аппаратов, работающих на околоземной орбите – специальные рентгеновские телескопы. Различные типы используемых рентгеновских телескопов строятся на различных принципах функционирования и имеют различные функциональные возможности. Для получения более точной и достоверной информации необходимо постоянное совершенствование их конструкций. При этом обеспечение инструментами мониторинга такого явления как излучение послесвечения, характеризующегося мягким диапазоном рентгеновских лучей (0,2-10 кэВ), впервые зафиксированное в 1997 году детектором рентгеновских лучей на борту космического аппарата «BeppoSAX», является относительно новой и наиболее сложной задачей.

Описание объекта исследований и постановка задачи исследований

Послесвечение GRB является особым космическим объектом, для мониторинга которого необходимо создание и использование специального оборудования с особыми возможностями. Основными функциональными техническими характеристиками рентгеновского телескопа для наблюдения послесвечения GRB являются:

- диапазон энергий (0,2-10 кэВ),
- поле зрения,
- фокусное расстояние,
- эффективная площадь,
- угловое разрешение,
- энергетическое разрешение,
- временное разрешение,
- чувствительность.

Из них в качестве наиболее приоритетных можно выделить:

- эффективная площадь,
- поле зрения,
- фокусное расстояние,
- угловое разрешение.

В связи с тенденцией в развитии космической техники последних десятилетий, направленной на использование для космических исследований малых космических аппаратов, к аппаратуре для мониторинга послесвечения GRB также предъявляются требования по минимизации масса-габаритных характеристик и энергопотребления. Прежде всего, именно этот факт делает неприемлемым применение на малых космических аппаратах рентгеновских телескопов на базе традиционно используемой оптической схемы многослойных зеркал Вольтера.

Конструкция рентгеновского телескопа для мониторинга послесвечения GRB, как и рентгеновских телескопов другого назначения, должна состоять из следующих основных составных частей: оптический модуль, камера на основе детектора (ПЗС-матрицы), блок обработки данных, корпусная конструкция и системы охлаждения. Оптическая система является важнейшей частью телескопа.

Учитывая перечисленные выше требования, наиболее оптимальным вариантом построения конструктивного исполнения оптической системы рентгеновского телескопа может являться вариант на базе оптики «Lobster Eye» в геометрии Энджела, предложенной британо-американским астрофизиком Джеймсом Роджером Прайор Энджелом в 1979 году и существенно отличающейся от ранее в 1975 году разработанной в Институте Макса Планка оптической схемы «Lobster Eye» В. Шмидта. Оптика «Lobster Eye» – это один из вариантов скользящей оптики. Отличие оптики «Lobster Eye» в геометрии Энджела состоит в том, что в оптической схеме В. Шмидта используются две группы тонких плоских отражателей, расположенные перпендикулярно друг к другу, а оптика «Lobster Eye» в геометрии Энджела используется одна отражательная пластина с квадратными микроканалами.

Отсюда и различия в схемах отражения и принципах формирования фокуса оптических систем. В геометрии Шмидта рентгеновские лучи отражаются от разных пластин одной группы под разными углами и фокусируются в линию. Лучи, отраженные от двух групп – в две перпендикулярные линии. Максимальная яркость достигается в точке пересечения линий. В геометрии Энджела рентгеновское излучение, попадающее в микроканалы, фокусируется за счёт отражения от их стенок. Фокус представляет собой яркое пятно с более слабым крестом и менее интенсивным диффузным фоном, что позволяет улавливать мягкое рентгеновское излучение от 0,2 кэВ до 10 кэВ, характерное для послесвечения.

Такое решение позволяет создавать небольшие и легкие оптические модули. Однако данная геометрия пока не нашла широкого применения при создании рентгеновского оборудования в силу наличия до настоящего времени ряда конструктивных и технологических сложностей и неопределенностей.

Характеристики рентгеновского телескопа на основе оптики «Lobster Eye» в геометрии Энджела во многом определяются характеристиками непосредственно микроканалов (их геометрией и отражательной способностью) и геометрией массива микроканалов линзы «Lobster Eye».

Целью исследований, результаты которых частично представлены в настоящей статье, являлось выявление взаимозависимости между геометрическими параметрами микроканальных пластин и функциональными возможностями рентгеновского телескопа, а также выявление факторов, ограничивающих технические характеристики оптической системы «Lobster Eye» в геометрии Энджела.

Полученные результаты исследований

В процессе исследований в качестве геометрических параметров линз «Lobster Eye» рассматривались:

– размеры микроканала (размер ширины стенки по внутренней поверхности и его длина);

– радиус сферического основания, предназначенного для установки массива микроканальных пластин.

В качестве основной функциональной возможности рентгеновского телескопа была принята эффективная площадь сбора излучения в фокальной плоскости.

Исследования взаимосвязей между геометрическими параметрами микроканальных пластин и функциональными возможностями рентгеновского телескопа осуществлялись путем математического моделирования.

Для выявления зависимости эффективной площади рентгеновского телескопа от геометрических размеров микроканала, необходимо было, прежде всего, рассмотреть и проанализировать эффективность обнаружения излучения за счет процессов отражения в одном микроканале. Для этого была разработана математическая модель, описывающая процессы отражения в микроканале.

Процессы отражения в микроканале оптической системы «Lobster Eye» в геометрии Энджела можно описать следующим образом.

Луч потока фотонов гамма-излучения, проходя через квадратный микроканал пластины, отражается от ортогональных стенок канала и изменяет направление движения. При этом, в зависимости от того, сколько раз лучи отражаются от стенок канала их можно подразделить на три категории, как показано на рис. 1:

- прямой луч,
- первично отраженный луч,
- вторично отраженный луч.

Прямой луч не участвует не участвует в процессе отражений и проходя через канал направляется прямо в детектор.

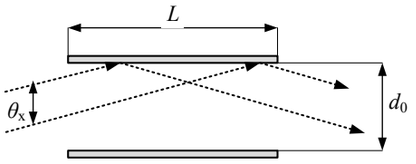
Первично отраженный луч один раз отражается либо от стенки канала, расположенных по координате «*x*», либо от стенки канала, расположенных по координате «*y*».

Вторично отраженный луч может отражаться от стенок канала, расположенных как по координате «*x*» и «*y*».

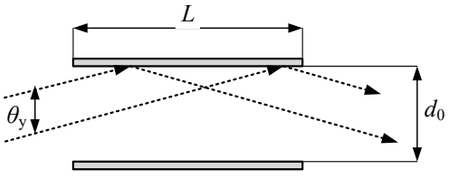
Первично отраженный луч фокусируется на горизонтальной и вертикальной линиях поперечной фокальной плоскости.

Вторично отраженный луч фокусируется на центре фокальной плоскости, образуя центр яркого пятна.

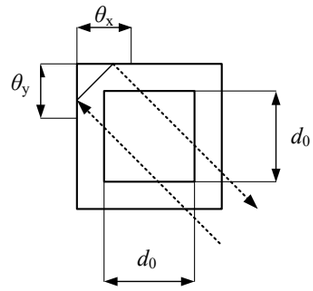
Таким образом, линза в геометрии Энджела генерирует крестообразную функцию рассеяния.



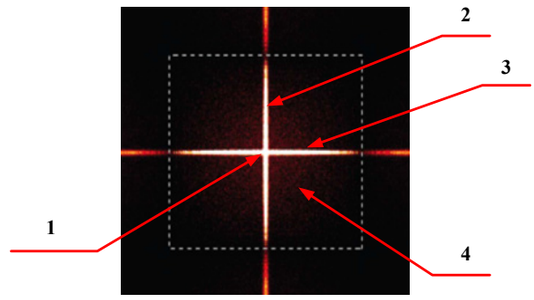
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Схема отражения луча потока фотонов от стенок квадратного микроканала и структура фокусного изображения: а) отражение первично луча от стенки канала, расположенной по координате «*x*»; б) отражение первично луча от стенки канала, расположенной по координате «*y*»; в) отражение вторично луча от стенки канала, расположенных по координатам «*x*» и «*y*»; г) структура фокусного изображения, формируемого различными категориями лучей (1 – вторично отраженный луч; 2 и 3 – первично отраженные лучи; 4 – прямой луч, не участвующий в процессе отражений и формирующий фон)

Исходя из рассмотренного выше принцип работы линзы «Lobster Eye» в геометрии Энджела, можно заключить, что эффективная площадь телескопа будет зависеть от эффективной области, как каждой линзы «Lobster Eye», участвующей в процессе отражения лучей, так и от эффективной области комплекса линз, сформированного на сферическом основании. Эффективная область линзы, в свою очередь, связана с геометрическими параметрами микроканала, что и было представлено в виде математической модели.

При разработке математической модели были введены понятия неких эффективных размеров сторон микроканала, обозначив их d_x и d_y. Они были представлены, как:

$$d_x = \left\{ \begin{array}{l} L\theta_x \\ 2d_0 - L\theta_x \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\langle \begin{array}{l} при \ldots . \theta_x < \dfrac{d_0}{L} \\ при \ldots . \theta_x \geq \dfrac{d_0}{L} \end{array} \right\rangle \quad (1)$$

$$d_y = \left\{ \begin{array}{l} L\theta_y \\ 2d_0 - L\theta_y \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\langle \begin{array}{l} при \ldots . \theta_x < \dfrac{d_0}{L} \\ при \ldots . \theta_x \geq \dfrac{d_0}{L} \end{array} \right\rangle \quad (2)$$

где d_x и d_y – ширина сторон микроканала; L – длина микроканала по центральной оси; θ_x и θ_y – угол скольжения.

Далее для определения эффективной площади сбора излучения в фокальной плоскости линзы, прежде всего необходимо было определить условия того, что отраженные лучи попадут и будут отражаться в фокальной плоскости, т.е. вероятность обнаружения излучения в фокальной плоскости.

Это было предложено представить через понятие вероятности:

$$p_x = \frac{d_x}{d_0} \tag{3}$$

$$p_y = \frac{d_y}{d_0} \tag{4}$$

Подставив в выражения (3 и 4) значения d_x и d_y из выражений (1 и 2) и обозначив соотношение $d_0/L=t$, получили:

$$p_x = \begin{Bmatrix} \frac{\theta_x}{t} \\ 2-\frac{\theta_x}{t} \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_x < t \\ \text{при....} t \le \theta_x \le 2t \end{matrix} \right\rangle \tag{5}$$

$$p_y = \begin{Bmatrix} \frac{\theta_y}{t} \\ 2-\frac{\theta_y}{t} \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_y < t \\ \text{при....} t \le \theta_y \le 2t \end{matrix} \right\rangle \tag{6}$$

Это дало возможность для каждой категории отраженных лучей определить вероятность обнаружения лучей в фокальной плоскости при соблюдении определенных условий по соотношению длины сторон (d_0) и осевой длины (L) микроканала:

η_b – для прямых лучей;

η_x и η_y – для первично отраженных лучей;

η_{xy} – для вторично отраженных лучей.

Ниже представлена математическая модель (7-10), описывающая взаимосвязи между вероятностью обнаружения и соотношением ширины сторон (d_0) и осевой длины (L) микроканала.

$$\eta_b = (1-p_x)(1-p_y) \tag{7}$$

когда:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_x}{t}-\frac{\theta_y}{t}+1 \\ \frac{\theta_x}{t}+\frac{\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-1 \\ \frac{\theta_x}{t}+\frac{\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-1 \\ \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_x}{t}-\frac{\theta_y}{t}+1 \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_x \le t, \theta_y < t \\ \text{при....} \theta_x \le t, t \le \theta_y \le 2t \\ \text{при....} t \le \theta_x \le 2t, \theta_y < t \\ \text{при....} t \le \theta_x \le 2t, t \le \theta_y \le 2t \end{matrix} \right\rangle$$

$$\eta_x = (1-p_x)p_y \tag{8}$$

когда:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \\ \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_x}{t}-\frac{\theta_y}{t}+2 \\ \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_y}{t} \\ \frac{2\theta_x}{t}+\frac{2\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-2 \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_x \le t, \theta_y < t \\ \text{при....} \theta_x \le t, t \le \theta_y \le 2t \\ \text{при....} t < \theta_x \le 2t, \theta_y < t \\ \text{при....} t < \theta_x \le 2t, t \le \theta_y \le 2t \end{matrix} \right\rangle$$

$$\eta_y = (1-p_y)p_x \tag{9}$$

когда:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\theta_x}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \\ \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_x}{t}-\frac{\theta_y}{t}+2 \\ \frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\frac{\theta_x}{t} \\ \frac{2\theta_x}{t}+\frac{2\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2}-2 \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_y \le t, \theta_x < t \\ \text{при....} \theta_y \le t, t \le \theta_x \le 2t \\ \text{при....} t < \theta_y \le 2t, \theta_x < t \\ \text{при....} t < \theta_x \le 2t, t \le \theta_y \le 2t \end{matrix} \right\rangle$$

$$\eta_{xy} = p_y p_x \tag{10}$$

когда:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \\ \frac{2\theta_x}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \\ \frac{2\theta_y}{t}-\frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \\ 4-\frac{2\theta_x}{t}-\frac{2\theta_y}{t}+\frac{\theta_x\theta_y}{t^2} \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \left\langle \begin{matrix} \text{при....} \theta_y \le t, \theta_x < t \\ \text{при....} \theta_y \le t, t \le \theta_x \le 2t \\ \text{при....} t < \theta_y \le 2t, \theta_x < t \\ \text{при....} t < \theta_x \le 2t, t \le \theta_y \le 2t \end{matrix} \right\rangle$$

Как видно из выражений (7-10), для каждой категории отраженных лучей влияние соотношения d_0 и L микроканала вероятность обнаружения имеет свой характер. На рис. 2 представлены расчетные значения полученных зависимостей вероятногсти обнаружения от соотношения осевой длины (L) и длины сторон (d_0) микроканала для всех трех категорий отраженных лучей.

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, для вторично отраженного луча, который формирует центральное яркое пятно, максимальная вероятность достигается при соотношении L/d_0 = 55. При этом же соотношении L/d_0 вероятность для первично отраженного луча будет несколько падать. Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным является соотношение L/d_0 от 50 до 55.

Учитывая то, что характеристикой телескопа является эффективная площадь (отношение потока, сфокусированного в фокальной плоскости, к падающему потоку на единицу площади), далее необходимо от параметров вероятности перейти именно к этому показателю. Это можно сделать следующим образом.

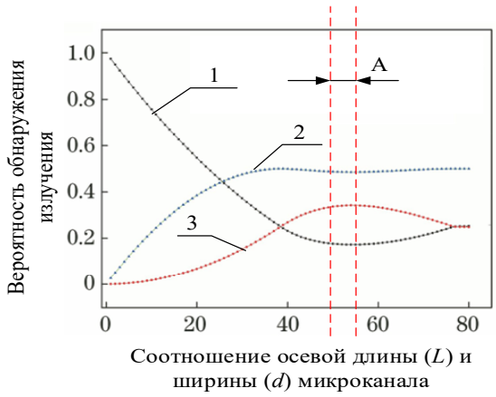


Рис. 2. Расчетная зависимость вероятности обнаружения рентгеновского излучения от соотношения осевой длины (L) и длины сторон (d_0) микроканала: 1 – для прямого излучения; 2 – для первично отраженных лучей; 3 – для вторично отраженных лучей; диапазон «А» - диапазон оптимального соотношения (L/d)

Используя формулу Френеля для коэффициента отражения, для оптики «Lobster Eye» можно записать:

$$K = \frac{(\theta - A)^2 + B^2}{(\theta + A)^2 + B^2} \cdot \left[-\left(\frac{4\pi\sigma \sin\theta}{\lambda}\right)^2 \right] \quad (11)$$

где K – коэффициент отражения луча от стенки микроканала; θ – угол падения луча; σ – шероховатость внутренней стенки; λ – длина рентгеновской волны.

Значения составляющих «A» и «B» в данном случае представляют собой соотношения, учитывающие коэффициенты возможных поглощений (β) и поляризации (δ) и могут быть представлены как:

$$A = \sqrt{\frac{\left\{\left[\theta^2 - (2\delta)^2\right]^2 + (2\beta)^2\right\}^{1/2} + \theta^2 - (2\delta)^2}{2}}, \quad (12)$$

$$B = \sqrt{\frac{\left\{\left[\theta^2 - (2\delta)^2\right]^2 + (2\beta)^2\right\}^{1/2} - \theta^2 + (2\delta)^2}{2}} \quad (13)$$

где β – коэффициент поглощения, δ – коэффициент поляризации.

Коэффициент поляризации в рентгеновской оптике – это дифференциальная характеристика поляризации, которая используется для описания дифракции рентгеновского излучения – отношение коэффициентов отражения в данной точке кривой отражения для двух взаимно-перпендикулярных состояний поляризации рентгеновского пучка.

Поляризационные эффекты в рентгеновском диапазоне связаны с двумя физическими факторами: дифракция рентгеновских лучей и анизотропия рентгеновской восприимчивости атомов в кристаллах (что также приводит к возникновению дополнительных дифракционных рефлексов).

Коэффициенты поглощения (β) и поляризации (δ) определяются как:

$$\delta = \frac{r_e \lambda^2 P_e f_1}{2\pi} = \frac{e^2 \lambda^2 P_e f_1}{2\pi m_e c^2} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{r_e \lambda^2 P f_2}{2\pi} = \frac{e^2 \lambda^2 P_e f_2}{2\pi m_e c^2} \quad (15)$$

где r_e – классический радиус электрона; P – атомная плотность материала отражающей поверхности; P_e – число (концентрация) свободных электронов в единице объёма среды; m_e – масса покоя электрона; e – заряд электрона; c – скорость света в вакууме; f_1 и f_2 – атомные коэффициенты рассеяния.

Тогда вероятность обнаружения можно представить с учетом коэффициентов отражения соответствующих сторон микроканала:

$$\eta_{xy}(\theta_x, \theta_y) = p_x \cdot p_y \cdot K(\theta_x) \cdot K(\theta_y) \quad (16)$$

Соответственно, эффективная площадь (A_{eff}) будет определяться выражением:

$$A_{eff} = \int_0^{2(d_0/L)} \int_0^{2(d_0/L)} \eta_{xy}(\theta_x, \theta_y) d\theta_x d\theta_y \quad (17)$$

Кроме оптимального нахождения оптимального соотношения L/d_0 модель, состоящая из выражений (7-10), позволяет при более детальном моделировании процесса отражения определить соотношение лучей первичного и вторичного отражения в микроканале.

Однако рассматривать только один микроканал является недостаточным, так как линза «Lobster Eye» в геометрии Энджела будет состоять из множества микроканалов, количество которых может составлять до (2-2,5)x10^6 единиц при размере одной микроканальной пластины, например, 40 ммх40 мм и ширине микроканала 20 мкм. Кроме этого линзы, представляющие собой микроканальные пластины, в соответствии с конструкцией оптической системы должны быть смонтированы на сферическом основании, образуя сферический оптический массив. Поэтому далее необходимо рассмотреть принцип функционирования и проанализировать параметры оптического массива «Lobster Eye» в геометрии Энджела.

Оптический массив «Lobster Eye» в геометрии Энджела, состоящий из множества микроканалов, формируется так, что оси всех микроканалов направлены к одному центру сферы радиусом R. На рис. 3 схематически показано как рентгеновское излучение от разных положений источников на небе, проходя через микроканальные пластины, расположенные на сферическом основании с определенным радиусом R, последовательно отражаясь от стенок микроканалов, концентрируются фокусируясь в разных местах фокальной поверхности радиусом $R/2$. Картина формирования фокуса массива, получаемого за счет отраженных лучей, будет формироваться также, как было рассмотрено ранее – в зависимости от категории этих лучей.

Тогда геометрическое угловое разрешение оптической системы $\Delta\theta_g$ можно оценить, как отношение размера канала d к фокусному расстоянию F (F=R/2):

$$\Delta\theta_g = \frac{2d}{R} \quad (18)$$

Поле зрения оптической системы (FoV) с (N×N) каналами будет определяться диапазоном углов, который формируется всеми каналами.

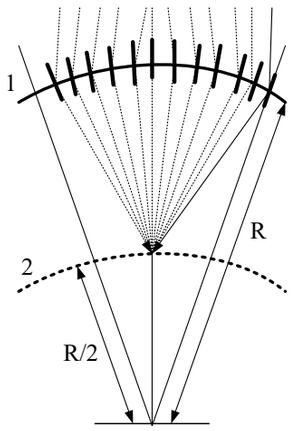


Рис. 3. Схема оптической системы «Lobster Eye» в геометрии Энджела: 1 – рентгеновские зеркальные ячейки, установленные на изогнутой сферической поверхности с радиусом R; 2 – фокальная поверхность на фокусном расстоянии R/2

В этом случае поле зрения можно представить, как:

$$FoV \approx N \cdot \left(2d / R\right) = N \cdot \Delta\theta_g \tag{19}$$

Как видно размер поля зрения зависит только от угловых размеров сферической оптики и от детектора, который в рамках настоящих исследований не рассматривался и его характеристики не учитывались. Однако, надо иметь в виду, что размерность детектора может существенно ограничивать поле зрения оптической системы.

Если пучок лучей падает на линзу массива «Lobster Eye» в геометрии Энджела, то апертура – размер (диаметр) оптического компонента системы, будет ограничена квадратом со стороной, равной $2R\theta_c$, где θ_c – критический угол скользящего отражения.

В этом случае самая большая достижимая эффективная площадь будет равна:

$$A_{\text{eff}}^{\max} = 4\left(R\theta_c\right)^2 \tag{20}$$

Для рентгеновского излучения критический угол скользящего отражения составляет:

$$\Delta\theta_C \approx E^{-1}\rho^{1/2} \tag{21}$$

где E – энергия фотона излучения (кэВ), ρ – плотность материала отражающей поверхности (г/см^3).

Критический угол скользящего отражения (критический угол полного внешнего отражения) в рентгеновском телескопе – это угол скольжения, ниже которого возникает полное внешнее отражение рентгеновского излучения от границы «вакуум/зеркало». При этом в рентгеновском диапазоне оптически менее плотной средой является не вакуум, а материал отражающей поверхности.

Именно исходя из условий выражения (21) для изготовления микроканальных пластин рекомендуется использовать материал, обладающий высокой плотностью, или наносить на отражающие поверхности микроканалов покрытия из материала с высокой плотностью.

Критический угол скользящего отражения влияет на качество изображения, так как определяет минимальный размер пятна, на которое могут быть сфокусированы рентгеновские лучи**.** Если не учитывать критический угол, то размер сфокусированного пятна будет ограничен, что приведёт к размытости изображения.

Критический угол для рентгеновского излучения можно рассчитать с использованием закона Снеллиуса, описывающего преломление луча на границе раздела двух сред, при переходе из вакуума в вещество отражающей поверхности. Закон Снеллиуса справедлив и при скользящем падении рентгеновского излучения. При очень малых углах скольжения значения преломлённого луча оказываются мнимыми, то есть излучение не входит в среду, а полностью отражается. Это явление называется полным внешним отражением.

Известно, что для длины волны рентгеновского излучения в районе ≈ 0,1 нм (≈ 10 кэВ) величина критического угла скользящего отражения составляет ≈ (0,2°–0,6°).

Чтобы получить максимально эффективное поле зрения, требуется, чтобы значение критическиго угла скользящего отражения θ_c удовлетворяло условию:

$$\theta_c \approx \left(\frac{180}{\pi}\right)\left(2^{3/2}+1\right)\frac{d}{L} \tag{22}$$

Таким образом, видно, что эффективная площадь кроме плотности и шероховатости отражающей поверхности, будет изменяться и в зависимости от энергетического показателя самого гамма-излучения.

Из выражений (18-22) можно сделать вывод об основных зависимостях между геометрическими параметрами микроканальных пластин и функциональными характеристиками рентгеновского телескопа.

Поле зрения оптической системы зависит от количества каналов в оптическом массиве (N) и соотношения между шириной отражающей поверхности (стенки) микроканала (d) и радиусом сферической поверхности оптического массива (R). Поле зрения оптической системы можно увеличить за счет увеличения количества микроканалов в массиве или увеличивая ширину микроканалов (d).

Эффективная площадь оптической системы зависит от радиуса сферической поверхности оптического массива и соотношения между шириной отражающей поверхности (стенки) микроканала (d) и длиной микроканала (L). Эффективную площадь оптической системы можно увеличить, если увеличить радиуса сферической поверхности оптического массива (R), или увеличив ширину отражающей поверхности (стенки) микроканала (d), или уменьшить длину микроканала (L), то есть толщину микроканальной пластины.

Угловое разрешение оптической системы взаимосвязано и зависит от радиуса сферической поверхности оптического массива (R), фокусного расстояния (F) и шириной отражающей поверхности (стенки) микроканала (d). Увеличение ширины микроканала (d) увеличивает геометрический угол разрешения ($\Delta\theta_g$). Увеличение радиуса отражающей поверхности оптического массива (R) позволяет увеличить фокусное расстояние (F), но при этом геометрический угол разрешения ($\Delta\theta_g$) будет уменьшаться.

Таким образом, анализ параметрических взаимосвязей позволил выявит определенные противоречия – улучшая одну характеристику, мы можем неизбежно снизить другую характеристику. Противоречия, требующие разрешения при

оптимизации геометрических параметров оптической системы «Lobster Eye», представлены в таблице 1.

Таблица 1

Противоречия, требующие разрешения при оптимизации геометрических параметров оптической системы «Lobster Eye»

Характеристика оптической системы «Lobster Eye»	Изменение геометрического параметра, направленное на увеличение характеристики системы
Поле зрения	$N\uparrow; d\uparrow; R\downarrow; d/L\uparrow$
Эффективная площадь	$R\uparrow; d\uparrow; L\downarrow; \rho\uparrow; \lambda\updownarrow$
Угловое разрешение	$R\downarrow; d\uparrow$

Поэтому при проектировании рентгеновской оптики «Lobster Eye» в геометрии Энджела с квадратными микроканалами, как и других оптических систем, необходимо вводить и учитывать определенные ограничения, несмотря на то что они могут ограничивать и характеристики самой этой оптики. Одним из таких ограничений является, как было показано ранее, является соотношение $L/d \approx$ (50-55) или $d/L \approx$ (0,018-0,020). Таким образом, для улучшения функциональных характеристик оптической системы варьировать геометрическими параметрами микроканалов мы можем в весьма ограниченном диапазоне.

Кроме этого, при выявлении указанных выше зависимостей принимался во внимание параметр углового разрешения оптической системы как номинальное угловое разрешение исходя из геометрии построения системы и ее оптического массива – параметр геометрического углового разрешения ($\Delta\theta_g$). Однако фактическое угловое разрешение будут отличаться и другие взаимосвязанные с ним параметрические характеристики под влиянием различных факторов, прежде всего, от возможных и неизбежных отклонений от идеальной геометрии оптической системы.

Отклонения от идеальной геометрии оптической системы приведут к отклонениям отражаемых и фокусируемых лучей от идеального направления, что, в свою очередь, приведет к искажению изображения (аберрации), получаемого в фокальной плоскости.

В случае микроканальной оптической системы «Lobster Eye» в геометрии Энджела можно выявить три основных вида аберраций:

– геометрическая ($\Delta\theta_G$),
– сф рическая ($\Delta\theta_S$),
– ди ракционная ($\Delta\theta_D$).

Все три аберрации можно представить в виде угловых отклонений, измеряемых в угловых секундах.

Причиной сферической аберрации может являться искажение формы микроканального массива, например, при в следствии механических напряжений при закреплении микроканальных пластин на основании или термических напряжений в процессе эксплуатации.

Причиной геометрической аберрации могут являться отклонения размеров микроканалов, например, отклонения, возникающие непосредственно в процессе производства микроканальных пластин.

Из выражений (18-22) можно представить геометрическую ($\Delta\theta_G$) и сферическую ($\Delta\theta_S$) аберрации как:

$$\Delta\theta_G = \frac{d}{F}, \quad (23)$$

$$\Delta\theta_S = 4\sqrt{2}\left(\frac{d}{L}\right)^3 \quad (24)$$

Дифракционная аберрация ($\Delta\theta_D$) может возникать в следствие наличия шероховатости на отражающих поверхностях микроканалов. Микронеровности поверхности образуют микрорельеф, на котором может и происходить дифракция излучения. Уровень проявления дифракции зависит от соотношения размеров препятствий с длиной волны излучения. Наиболее дифракция проявляется, когда размер препятствий (в данном случае шероховатость) соизмерим с длиной волны. Если размер препятствия значительно меньше длины волны, то взаимодействие излучения с ним не происходит. Дифракционную аберрацию можно представить, как:

$$\Delta\theta_D = \frac{2\lambda}{d} \quad (25)$$

где λ – длина волны (нм).

Гамма-излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение. Значение длины волны зависит от энергии излучения. Для излучения 1кэВ длина волны $\lambda\leq$1,0 нм, для излучения 10 кэВ длина волны $\lambda\leq$0,1 нм, в области от 1 кэВ до100 кэВ длина волны гамма-излучения составляет от 1 нм до 0,01 нм. Таким образом, можно предположить, что шероховатость отражающих поверхностей микроканалов не должна превышать 1,0 нм.

Если принять, что отношение $L/d \approx$50, то сферическая аберрация будет составлять $\Delta\theta_S=9''$.

Если принять, что $\Delta\theta_S$ отсутствует и учитывая, что $d=(2\lambda F)^{1/2}$, можно предположить, что максимального углового разрешения можно достигнуть, если размеры микроканалов выбраны так, что

$$\Delta\theta_G = \Delta\theta_D = \left(\frac{2\lambda}{F}\right)^{1/2} \quad (26)$$

Исходя из того, что оптимальное соотношение $L/d \approx$50, для сбора излучения с энергией фотонов 1 кэВ (λ=1,0 нм) номинальное фокусное расстояние должно составлять 1 м.

Тогда при энергии излучения 1 кэВ (λ=1,0 нм) и фокусном расстоянии системы F=1м получим, что $\Delta\theta_D= \Delta\theta_G=10''$.

Если сферическая аберрация будет присутствовать, то необходимо объединить все три аберрации следующим образом:

$$\Delta\theta_i = (\Delta\theta_G{}^2 + \Delta\theta_D{}^2 + \Delta\theta_S{}^2)^{1/2} \quad (27)$$

Тогда при F=1 м и энергии излучения 1 кэВ получим, что $\Delta\theta_i=17''$.

Пользуясь уравнениями (23-27) можно определить, как будут изменяться аберрации при изменении фокусного расстояния или энергии гамма-излучения. Например, ориентировочный расчет показал, что если фокусное расстояние (F) сократить от 1 м до 0,3 м, то $\Delta\theta_D=\Delta\theta_G$ возрастают до $19''$, а $\Delta\theta_i$ возрастает до $\Delta\theta_i=28''$

Заключение

Результаты проведенных исследований, которые частично были представлены в настоящей статье, показали, что использование оптики типа «Lobster Eye» в геометрии Энджела является весьма перспективным направлением при создании бортовых приборных комплексов для космического наблюдения за явлениями GRB.

Кроме этого, благодаря ряду своих преимуществ, оптические структуры «Lobster Eye» в геометрии Энджела могут найти свое применение при создании других видов приборного оптического оборудования не только космического, но и наземного назначения.

Проведенные исследования позволили установить основные закономерности влияния геометрических параметров микроканальных пластин на выходные функциональные параметры оптических систем на базе оптики типа «Lobster Eye» в геометрии Энджела, выявить ограничения, которые необходимо учитывать в процессе проектирования, а также противоречия, которые необходимо компенсировать путем решения задач оптимизации.

Полученные результаты могут служить в качестве научно-технического задела для дальнейшего развития данного перспективного направления, которое безусловно требует продолжения теоретических и экспериментальных исследований в части методологического обеспечения как проектно-конструкторских, так и технологических разработок по созданию оптических систем с применением оптики «Lobster Eye» в геометрии Энджела.

Литература

1. *Gotza D., Osborneb J., Cordiera B., Paula J. et al.* The Microchannel X-ray Telescope for the Gamma-Ray Burst mission SVOM. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/263811689 (дата обращения 11.12.2025).
2. *Ouyang M., Fu Y., Zhou J., He W., Yang L., Han Y., Wang C.* Comprehensive understanding of the focal property of lobster-eye optics // Applied optics. 2020. Vol. 14(59). P. 4263-4270.
3. *Barbour S., Erwin A.* Comparison of focal properties of square-channel and meridional lobster-eye lenses // Journal of the Optical Society of America A. 2014. Vol. 12(31). P. 2584-2592.
4. *Лидер В.В.* Фокусирующая оптика скользящего падения для рентгеновских телескопов // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 8-36.
5. *Кожевников В., Конунникова О., Гончаров О.* Формирование состава рабочих поверхностей каналов микроканальных пластин, изготовленных с использованием стекловолоконных технологий // Химическая физика и мезоскопия. 2008. №3(10). С. 370-375.
6. *Chapman H., Nugent K. and Wilkins S.* X-ray focusing using square channel-capillary arrays// Review of scientific instruments. 1991. Vol. 62(6). P. 1542-1561.
7. *Fraser G. W., Lees J. E., Pearson J. F., Sims M. R., Roxburgh K.* X-ray focusing using microchannel plates. [Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV Optics] // Hoover, R. B., ed., Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference. Jan. 1992. Series 1546. P. 41-52.
8. *Gotz D., Adami C., Basa S., Beckmann V., Burwitz V. et al.* Microchannel x-ray telescope on board the svom satellite. ArXiv e-prints. 2015.
9. *Barcons X. et al.* Athena: the X-ray observatory to study the hot and energetic Universe // Journal of Physics: Conference. 2015. Series 610.
10. Официальный сайт космической миссии «SVOM». [Электронный ресурс]. URL: https://www.svom.eu/ (дата обращения 15.10.2025).

INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF MICROCHANNEL PLATES OPTICAL SYSTEM ON THE FUNCTIONAL CAPABILITIES X-RAY TELESCOPE FOR SPACE MONITORING OF THE AFTERGLOW OF GAMMA-RAY BURSTS

Alexander R. Bestugin, *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia,* ***fresguap@mail.ru***
Olga P. Kurkova, *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia,* ***aljaskaolga@mail.ru***

Abstract
The feasibility and potential of using the Lobster Eye optics in Angel geometry in the development of an onboard X-ray telescope for observing cosmic phenomena using the afterglow of gamma-ray bursts are substantiated. The following are presented: a mathematical model of the probability of detecting X-ray radiation depending on the geometric parameters of the Lobster Eye optics microchannel in Angel geometry; the results of theoretical studies in the form of identified main patterns of the influence of the geometric parameters of the Lobster Eye optics on the functional characteristics of the X-ray telescope; limitations that must be taken into account, as well as contradictions that must be compensated for by solving optimization problems in the process of creating an X-ray telescope, are shown and substantiated, as well as the results of an analysis of the influence of possible deviations from the ideal geometry of the optical system on image distortion (aberrations) obtained in the focal plane of the X-ray telescope. The obtained results can serve as a scientific and technical reserve for the further development of the scientific direction proposed for consideration in this article.

Keywords: *Cosmic radiation from gamma-ray bursts, gamma-ray burst afterglow, X-ray telescope, radiation detection probability, effective area, field of view, focal length, Lobster Eye optics, microchannel plate.*

References

[1] D. Gotza, J. Osborneb, B. Cordiera, J. Paula et al. The Microchannel X-ray Telescope for the Gamma-Ray Burst mission SVOM. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/263811689 (accessed 11.12.2025).
[2] M. Ouyang, Y. Fu, J. Zhou, W. He, L. Yang, Y. Han, C. Wang, "Comprehensive understanding of the focal property of lobster-eye optics," *Applied optics*, 2020, vol. 14(59), pp. 4263-4270.
[3] S. Barbour, A. Erwin, "Comparison of focal properties of square-channel and meridional lobster-eye lenses," *Journal of the Optical Society of America A*," 2014, vol. 12(31), pp. 2584-2592.
[4] V.V. Lider, "Grazing-incidence focusing optics for X-ray telescopes," *Experimental instruments and technology*, 2022, no. 2, pp. 8-36.
[5] V. Kozhevnikov, O. Konunnikova, O. Goncharov, "Formation of the composition of the working surfaces of microchannel plates manufactured using fiberglass technologies," *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2008, no. 3(10), pp. 370-375.
[6] H. Chapman, K. Nugent, S. Wilkins, "X-ray focusing using square channel-capillary arrays," *Review of scientific instruments*, 1991, vol. 62(6), pp1542-1561.
[7] G.W. Fraser, J.E. Lees, J.F. Pearson, M.R. Sims, K. Roxburgh, "X-ray focusing using microchannel plates. Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV Optics," *Hoover, R.B., Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, Jan. 1992, Series 1546, pp. 41-52.
[8] D. Gotz, C. Adami, S. Basa, V. Beckmann, V. Burwitz et al., "Microchannel x-ray telescope on board the svom satellite," ArXiv e-prints , 2015.
[9] X. Barcons et al., "Athena: the X-ray observatory to study the hot and energetic Universe," *Journal of Physics: Conference*, 2015, Series 610.
[10] Official website of the SVOM space mission. Available at: URL: https://www.svom.eu/ (accessed 15.10.2025).

Information about authors:
Alexander R. Bestugin, *holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia*
Olga P. Kurkova, *holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia*