

ФОКУСИРУЮЩАЯ ОПТИКА СКОЛЬЗЯЩЕГО ПАДЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ.

В.В.Лидер

Содержание

- 1. Введение**
- 2. Рентгеновское зеркало скользящего падения.**
- 3. Фокусирующая рентгеновская оптика скользящего падения.**
 - 3.1. Оптика Киркпатрика-Баеза.
 - 3.2. Оптика Вольтера.
 - 3.3. Микропористая оптика.
- 4. Основные характеристики рентгеновских телескопов скользящего падения.**
- 5. Использование оптики Вольтера в рентгеновских телескопах.**
 - 5.1. Оптимизация рентгеновской оптики телескопа скользящего падения.
 - 5.2. Производство зеркал.
- 6. Использование оптики Киркпатрика-Баеза в рентгеновских телескопах.**
- 7. Использование оптики «глаза лобстера» в рентгеновских телескопах.**
- 8. Заключение. Выводы и перспективы.**
- Список литературы.**

1. Введение

В рентгеновском диапазоне (т.е. в диапазоне энергий фотонов от $\sim 0,1$ до 100 кэВ) излучает много классов объектов Вселенной – от межзвездной среды и гелиосферы, от обычных звезд, белых карликов, нейтронных звезд, до черных дыр в нашей Галактике и в ядрах огромного количества других галактик, и межгалактической среды скоплений галактик.

Элементарные процессы, приводящие к появлению рентгеновских квантов, можно разделить на две группы – тепловые и нетепловые. Тепловое излучение с энергией $E < 10$ кэВ, соответствующее мягкому рентгеновскому излучению, вызвано нагретой до температур $10^7 - 10^8$ К плазмой, при этом в энергию квантов переходит энергия теплового движения электронов. Диапазон явлений включает в себя: звездные вспышки, особенно от области образования звезд, изменение интенсивности и спектра двойных нейтронных звезд и черных дыр, поведение которых проверяет законы общей теории относительности, активность, возникающая в окрестностях сверхмассивных

черных дыр, взрывы сверхновых и рентгеновское излучение компонентов гамма- всплесков и их послесвечения.

Нетепловое излучение (жесткое рентгеновское и гамма- излучение с $E > 10$ кэВ) возникает, когда заряженные частицы приобретают энергию не за счет высокой температуры плазмы, а ускоряются до релятивистских энергий. Источником нетеплового рентгеновского излучения могут быть ударные волны в остатках вспышек сверхновых звезд, релятивистские струи из ядер активных галактик и квазаров, пульсары, горячие короны аккреционных дисков в двойных звездах, аннигиляция антивещества, свечение межзвездной среды под воздействием космических лучей высоких энергий и другие «бурные» процессы нашей Вселенной.

Земная атмосфера представляет собой непреодолимое препятствие на пути рентгеновских лучей, поэтому астрофизические исследования непосредственно в этом диапазоне энергий проводятся с бортов космических аппаратов. Орбитальные рентгеновские оптические системы играют заметную роль в астрономии, космологии и в позиционировании астрофизики как передового рубежа фундаментальной физики. Возраст, размер и форма Вселенной исследуются с помощью рентгеновских телескопов, что позволяет сделать выводы о прошлой и будущей траектории ее существования [1].

В отличие от видимого света, рентгеновскими лучами трудно управлять, используя явление преломления, потому что показатели преломления большинства материалов при рентгеновских энергиях очень близки к единице; это означает, что рентгеновские лучи не испытывают значительного отклонения при пересечении границы между двумя материалами. Однако для мягкого рентгеновского излучения возможно эффективное рентгеновское полное внешнее отражение от хорошо отполированной поверхности в геометрии скользящего падения.

Целью обзора является описание фокусирующей оптики мягкого рентгеновского излучения, используемой на современных орбитальных обсерваториях. Фокусирующей оптики жесткого рентгеновского и гамма-излучения будет посвящен отдельный обзор.

2. Рентгеновское зеркало скользящего падения.

Любой вид фокусировки при отражении рентгеновских лучей можно осуществить лишь с помощью изогнутой отражающей поверхности. При падении, близком к нормальному для формирования изображения точечного объекта хорошего качества на оптической оси может быть использовано вогнутое сферическое зеркало. Но при переходе к скользящему падению, когда объект удаляется от оптической оси, ситуация меняется и аберрации возрастают. Аберрации (сферическая, кома, астигматизм, кривизна фокальной поверхности) приводят к искажению изображения точки в некоторую фигуру рассеяния, что снижает четкость изображения и нарушает подобие изображения предмета [2].

По аналогии с оптикой видимого света, для которой существует полное внутреннее отражение при переходе из более плотной в оптически менее плотную среду, для рентгеновского излучения при отражении от границы «вакуум/зеркало» существует полное внешнее отражение в пределах диапазона углов скольжения $\theta \ 0 \div \theta_c$ (θ_c – критический угол полного внешнего отражения), т.е. рентгеновский пучок «вытесняется» из зеркала, практически полностью отражаясь от границы раздела. Если поглощением можно пренебречь, то величина критического угла θ_c для фокусирующего элемента скользящего падения дается формулой:

$$\theta_c \approx (2\delta)^{1/2} \approx \lambda(r_e N Z \rho / \pi A)^{1/2} \quad (1)$$

Здесь δ – декремент коэффициента преломления n ($n = 1 - \delta$), N_0 – число Авогадро, r_e – классический радиус электрона, Z и A – соответственно атомное число и вес, а ρ – плотность материала зеркала. Для тяжелых элементов с $Z/A \approx 0,5$:

$$\theta_c(\text{рад}) \approx 1,6 \cdot 10^{-2} \lambda \rho^{1/2}, \quad (2)$$

где ρ (г/см³) – плотность материала зеркала, λ (нм) – длина волны РЛ.

Из этого уравнения видно, что критический угол всегда очень мал (менее нескольких градусов: для золота и $E = 1$ кэВ, $\theta_c = 4$ град) и увеличивается с увеличением плотности отражающего материала, что объясняет, почему более плотные материалы (Au, Ir, Pt) обычно используются в качестве отражающего покрытия рентгеновских зеркал.

Однако эффективность сферического и цилиндрического зеркал будет определяться в основном величинами аберраций [3].

Полностью устранить сферическую аберрацию можно, используя параболическое (эллиптическое) зеркало [4]. Однако при этом от изгиба фокальной поверхности, приводящей к уменьшению поля зрения, избавиться невозможно. Методы улучшения качества изображения включают создание отражающих поверхностей с малыми отклонениями от параболической формы, дающих возможность уменьшить деформацию фокальной плоскости за счет небольшого увеличения сферической аберрации. Подробные расчеты показывают, что оптимальный отражатель должен иметь поверхность третьего [4] или четвертого [5] порядка. Но кома не может быть исправлена при отражении рентгеновских лучей от одной поверхности какой-либо формы. Кроме того, по мере того, как форма поверхности становится все более сложной, допуски точности ее изготовления становятся все более строгими, и создать такие зеркала значительно труднее. По этим причинам в реальных системах скользящего падения для уменьшения аберраций используются комбинации зеркал.

3. Фокусирующая рентгеновская оптика скользящего падения

Составные системы, в которых рентгеновское излучение отражается от двух и более сферических или асферических поверхностей, делятся на два типа. К первому типу, известному под названием системы Киркпатрика - Баеза (КБ), относятся отражатели, меридиальные плоскости которых взаимно

перпендикулярны (скрещены). Во втором типе, известном под названием системы Вольтера, используются комбинации коаксиальных и конфокальных конических сечений [2].

Существует также фокусирующая оптика, основанная на отражении рентгеновских лучей от системы плоских (не изогнутых) поверхностей. К такой оптики относится оптика «глаза лобстера») [6].

3.1. Оптика Киркпатрика-Баеза.

Хорошо известно, что астигматизм в системе зеркального отражения полностью устраняется оптикой с скрещенными зеркалами, в которой каждое зеркало исправляет астигматизм другого. Поскольку простым способом коррекции сферической аберрации является использование асферических зеркал [7], наиболее перспективной зеркальной системой скользящего падения для рентгеновской фокусировки следует считать систему скрещенных асферических зеркал в конфигурации Киркпатрика-Баеза (К-Б) [8, 9].

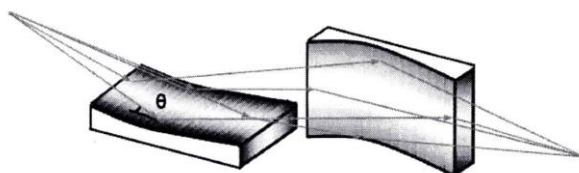


Рис.1. Схема классической оптической системы К-Б (θ – угол скольжения).

Отражающие поверхности зеркал могут иметь форму параболического цилиндра в случае коллимирующей оптики или эллиптического цилиндра для фокусирующей оптики. Простейшая фокусирующая система К-Б показана на рис.1. Она состоит из двух цилиндрических зеркал с одинаковыми радиусами кривизны и формирует действительное точечное изображение точечного объекта, следовательно, действительное протяженное изображение протяженного объекта. Таким образом, она исправляет астигматизм, но не аберрацию кома.

3.2. Оптика Вольтера.

Оптика, свободная от комы, может быть получена, если во всех точках отражающей поверхности выполняется условие синусов Аббе [10]. Условие Аббе требует, чтобы отношение синусов углов между оптической осью и лучом до (α_0) и после отражения (α_i) оставалось постоянным ($\sin \alpha_0 / \sin \alpha_i = \text{const}$), но это условие не соблюдается при однократном отражении от зеркала, так как по мере увеличения (уменьшения) угла α_0 угол α_i уменьшается (увеличивается) при любой форме отражающей поверхности [2]. Решение этой проблемы возникло в 1952 году, когда Вольтер показал, что условие Аббе может быть приблизительно удовлетворено при двойном

последовательном отражении рентгеновских лучей от двух зеркал различной кривизны [11]. Он проанализировал зеркала, поверхности которых являются поверхностями вращения, т. е. параболоидами, гиперболоидами и эллипсоидами и показал, что для достижения неискаженного абберациями изображения в расширенном поле зрения рентгеновские лучи должны испытать два последовательных отражения от комбинации поверхностей «параболоид-гиперболоид» или «параболоид-эллипсоид», расположенных в коаксиальной и конфокальной геометрии. С помощью последовательных отражений от двух участков таких поверхностей могут быть получены изображения очень высокого качества. Вольтер предложил три типа фокусирующих систем, которые стали известны как системы Вольтера I, II и III. В системе Вольтера I оба отражения происходят на внутренних поверхностях зеркал (рис. 2а), в то время как в системе Вольтера II первое отражение происходит на внутренней, а второе – на внешней поверхности (рис. 2б), а в системе Вольтера III наоборот: первое отражение – на внешней поверхности, а второе – на внутренней (рис. 2в). В каждом из трех типов системы Вольтера зеркала расположены в коаксиальной конфигурации и имеют общий фокус. Основное различие между тремя типами – отношение длины фокуса к общей длине системы, т. е. в минимальной физической длине телескопа. В таких системах полностью отсутствуют астигматизм и сферическая абберация. Можно также показать, что условие синусов Аббе выполняется с достаточно хорошей точностью.

По сравнению с типами II и III, система Вольтера I – единственная конструкция, в которой оба зеркала обеспечивают конвергенцию рентгеновских лучей. Двойное отражение также имеет преимущество уменьшения фокусного расстояния в два раза, что является важным требованием для оптики, которая предназначена для работы в космосе. Две другие конфигурации удовлетворяют условиям Аббе (Вольтер II и III), но они не используются для космических приложений, поскольку их фокусное расстояние больше, чем у Вольтера I с такой же апертурой. Кроме того, абберации, зависящие от угла отклонения луча от оптической оси, больше в конструкции Вольтера II, чем конструкции Вольтера I. Поэтому в телескопах для рентгеновской астрономии используется схема Вольтера I [12].

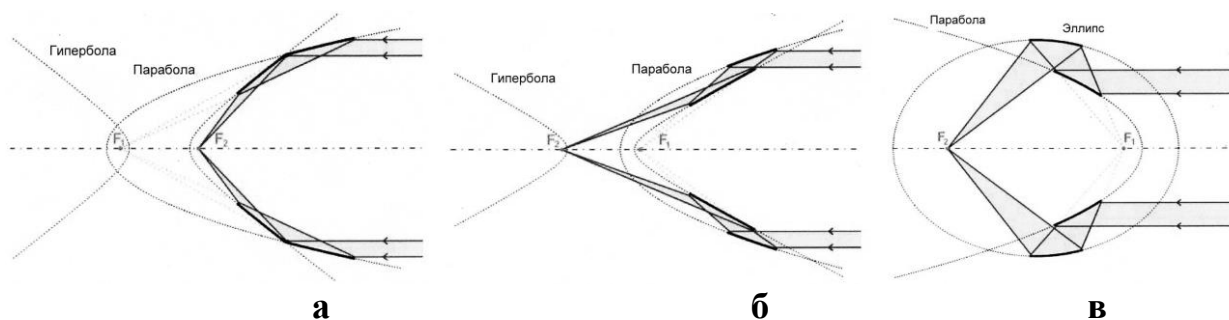


Рис.2. Ход лучей в фокусирующих оптических системах Вольтера I (а), II (б) и III (в).

3.3. Микропористая оптика.

Основная идея микропористой оптики – изготовление конструкции из тонких сквозных отверстий и использование их боковых стенок в качестве рентгеновских зеркал. Микропористая оптика содержит большое количество плотно упакованных отражающих оптических поверхностей, что требуется для эффективной рентгеновской оптики скользящего падения. Помимо обеспечения простого коллимирующего действия из-за поглощения сильно расходящихся лучей стенками канала, структуры типа микроканальных пластин способны обеспечивать фокусировку, возникающую из-за отражения рентгеновских лучей от внутренних стенок канала. Фокусировкой в принципе можно управлять механическим изгибом или деформацией микроканальных пластин, а также за счет соответствующей формы стенок канала; она мало чувствительна к юстировке устройства и длине волны излучения [13 – 16].

В области рентгеновской астрономии исследователи проявили особый интерес к созданию устройств на основе микроканальной пластины, когда она изогнута в сферу и использование каналов квадратного профиля может стать эквивалентом так называемой оптики «глаза лобстера» [17].

В случае, если массив изогнут в сферическую поверхность, оптика не имеет предпочтительной оси и поэтому способна одинаково хорошо фокусировать излучение со всех направлений [18].

4. Основные характеристики рентгеновских телескопов скользящего падения.

Свойства телескопа скользящего падения описываются его областью сбора, эффективностью, угловым разрешением, чувствительностью и полем зрения. Поле зрения (FoV – field of view) – это область наблюдаемого неба, которая видна в любой данный момент. В случае оптических инструментов или датчиков это телесный угол (угловое пространство), в котором детектор чувствителен к электромагнитному излучению.

Площадь сбора – геометрическая проекция поверхности входного отверстия. Для зеркала скользящего падения собирающая геометрическая область является проекцией параболы на плоскость апертуры. Эффективность – это произведение коэффициента отражения первичного и вторичного (в случае двухзеркальной системы) зеркал, усредненное по присутствующим скользящим углам скольжения. Отражательная способность сильно зависит от длины волны, так же, как и эффективность. Эффективная площадь $A_{эфф}$ определяется как отношение потока сфокусированного в фокальной плоскости зеркала к падающему на зеркало потоку на единицу площади. Для зеркала с двойным отражением эффективная площадь будет зависеть от квадрата отражательной способности зеркала [19]:

$$A_{эфф}(E) \approx 8\pi f L \theta^2 R(E)^2, \quad (3)$$

где f – фокусное расстояние, L – длина зеркала, $R(E)$ – коэффициент отражения зеркала при энергии рентгеновского излучения E .

Угловое разрешение астрономических рентгеновских телескопов [20] есть способность разделять отдельные источники в заселенных полях. Чтобы описать угловое разрешение, используются один или несколько различных терминов. Функция рассеяния точки (PSF – point spread function) полностью описывает изображение точечного источника как функцию энергии фотона и направления относительно оптической оси [21]. Она может иметь сложную форму. Для слабых источников рентгеновского излучения FWHM (полная ширина на половине максимума) не является репрезентативной для разрешающей способности зеркала. Для фокусирующих рентгеновских телескопов стандартной метрикой для определения углового разрешения является диаметр половинной мощности (HPD), которая также называется «шириной половинной энергии» (HEW). Это угловой диаметр изображения точечного источника, который содержит половину потока фотонов (при данной энергии), сфокусированного телескопом. Эта величина выражает не только ширину функции рассеяния точки (которая редко бывает гауссовой), но и количество энергии, собранной в окрестностях фокуса. В частности, для данной зеркальной поверхности функция рассеяния точки может быть преобразована в HEW-функцию (и наоборот) с помощью аналитической обработки [22].

Чувствительность фокусирующей оптики определяется как минимальный обнаруживаемый поток S . Он ограничен фоновым шумом B , определяемым как количество фоновых импульсов в единицу времени для каждого диапазона энергии на единицу площади детектора. Для фокусирующей оптики с эффективной площадью $A_{эфф}$, которая фокусирует поток S на часть ϵ площади детектора A_d , чувствительность равна [19]:

$$S = (\sigma / A_{эфф} \eta_E) (2B\epsilon A_d / \Delta t \Delta E)^{1/2}; \quad (4)$$

где σ – доверительный интервал, η_E – квантовая эффективность детектора для энергии фотонов E , Δt – время сбора данных, ΔE – энергетическая полоса детектора. Уравнение (4) показывает, что высокая чувствительность достигается не только за счет уменьшения фона, достижения больших эффективных областей (большие $A_{эфф}$), но также благодаря хорошей фокусировке (маленькое ϵ), то есть небольшому значению HPD (HEW) [21].

5. Использование оптики Вольтера в рентгеновских телескопах.

Телескопы для рентгеновской астрономии обычно строят в геометрии Вольтера I, обеспечивающей, по крайней мере, теоретически, идеальные изображения источника, лежащего на оптической оси. Но из-за удаленности большинства астрономических объектов интенсивность излучения на входе рентгеновского телескопа, как правило, чрезвычайно мала. Так как угол скольжения θ должен быть меньше критического угла $\theta_c(E)$, эффективная площадь одиночного зеркала, как следует из формулы (3), очень мала. Для увеличения эффективной площади телескопа используются несколько

коаксиальных и конфокальных зеркал с уменьшающимися радиусами («зеркальные оболочки»), вложенные друг в друга наподобие русской матрешки, причем угол скольжения уменьшается от внешней оболочки к внутренней (рис. 3) [21, 23, 24].

Эффективность вложения определяется толщиной корпуса оболочки, минимальным радиальным расстоянием между оболочками, необходимым для интеграции и юстировки [25].

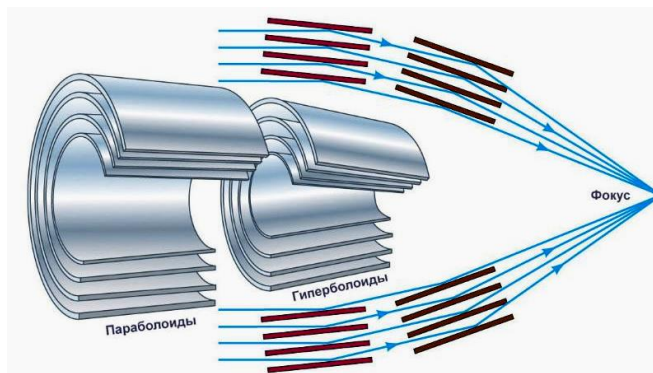


Рис. 3. Ход рентгеновских лучей в многослойном зеркале Вольтера I. При фокусировке лучи последовательно отражаются от параболической и гиперболической поверхностей каждой зеркальной оболочки.

5.1. Оптимизация рентгеновской оптики телескопа скользящего падения

Во многом история рентгеновской астрономии – это история развития улучшенной рентгеновской оптики. «Улучшение» означает улучшение в одном или нескольких из трех параметров телескопов: более высокое угловое разрешение, большая эффективная площадь и меньшая масса. Любое значительное улучшение в одной или нескольких из этих трех метрик обычно позволяет совершить квантовый скачок в эффективности рентгеновских обсерваторий.

Ограничение аберраций.

Классический рентгеновский телескоп скользящего падения Вольтера I состоит из параболического первичного зеркала и конфокального гиперболического вторичного зеркала. Этот дизайн демонстрирует стигматическое изображение на оси, но страдает от комы, астигматизма, искривления фокальной плоскости и аберраций высшего порядка [26 – 28].

Несмотря на теоретически идеальные изображения на оси, качество изображения быстро деградирует вдали от оптической оси из-за кривизны фокальной поверхности, ограничивающей возможности проведения съемок рентгеновского неба. Были предложены простые рецепты для улучшения качества изображения по всему полю зрения. Самый простой способ состоит в небольшой расфокусировке оптической системы [29]. Другой (и лучший) подход состоит в изгибе/наклоне детектора так, чтобы он следовал изогнутой

фокальной поверхности. Такая конфигурация детектора использовалась для семи ПЗС-матриц МОП-камеры: центральная ПЗС-матрица находилась в фокусе на оптической оси, в то время как внешние шесть ступенек были смещены в направлении зеркала на 4,5 мм, чтобы примерно следовать кривизне фокальной поверхности [30].

Эти простые рецепты, однако, обеспечивают лишь незначительные улучшения. Для того чтобы разумно улучшить внеосевой отклик рентгеновского телескопа, следует воздействовать непосредственно на конструкцию зеркала. Например, абберацию кома можно полностью устранить в модифицированной системе Вольтера I, скомпоновав две коаксиальные поверхности таким образом, чтобы в точности выполнить условие синусов Аббе. Эта задача впервые была рассмотрена Шварцшильдом в 1905 году для геометрии нормального падения [31]. Вольтер [32] применил этот метод к системам скользящего падения и рассмотрел малые отклонения от формы поверхностей второго порядка. Параметры дизайна были получены впервые в 1972 году в работе [33]. Обобщенный параметрический код для телескопов Вольтера-Шварцшильда (В-Ш) был получен автором работы [27].

Существуют подходы, не основанные на параболоиде и гиперболоиде, которые приносят в жертву идеальное изображение на оси для лучшего, более однородного, внеосевого изображения. Они могут быть более подходящими для визуализации протяженных объектов. Нарий [34, 35] предложил идею телескопа, состоящего из двух гиперболоидных поверхностей (см. также [36]), который обеспечивает хорошие характеристики в поле зрения в несколько угловых минут.

Для увеличения эффективного поля зрения зеркальные оболочки могут быть изготовлены с полиномиальным профилем [37, 38]. Полиномиальные зеркальные профили обычно описываются полиномами четвертого (или третьего) порядка, и возможна их оптимизация [39 – 41].

Тем не менее, при использовании «классической» и усовершенствованных схем Вольтера I, зеркала являются дорогостоящими и трудными в изготовлении. Петре и Серлемитсос [42] предложили коническую конфигурацию Вольтера I. Они аппроксимировали параболу и гиперболу двойным конусом. Это решение может значительно снизить стоимость и сложность изготовления зеркал и, таким образом, геометрическая площадь сбора может быть увеличена путем добавления большего количества вложенных зеркальных оболочек. Однако самая серьезная проблема конического приближения – ухудшение углового разрешения [43].

Для наблюдений, которые требуют не высокого разрешения, а большую эффективную площадь, можно принять коническую геометрию Вольтера I с большим количеством вложенных зеркальных оболочек.

Учитывая баланс между эффективной площадью и угловым разрешением, а также время и деньги, потраченные на рентгеновский телескоп, авторы работы [44] представили три рентгеновских конструкции телескопа на

основе геометрии Вольтера I, в которых используется одна коническая поверхность. Авторы пришли к выводу, что оптика, состоящая из конической и гиперболоидальной поверхности характеризуется лучшей эффективностью фокусировки. Эта структура действительно имела значительно улучшенное угловое разрешение, но ее было довольно сложно и дорого изготовить по сравнению с двухконусной структурой. Чтобы сбалансировать эффективность и сложность изготовления рентгеновского телескопа, авторы разработали коническую геометрию Вольтера I с вторым зеркалом, состоящим из двух секций. Было показано, что при разделении зеркала на две секции вдоль оптической оси «коническая ошибка» может быть уменьшена на 50%, что означает улучшение углового разрешения (HPD) на 50% [45].

Дополнительные улучшения могут быть внесены не только изменением формы зеркала. В частности, улучшение оптического качества может быть достигнуто путем создания оболочек с переменной длиной, зависящей от их радиуса, что придает суммарной зеркальной сборке форму, подобную бабочке [39]. Это решение приводит к уменьшению общей эффективной площади по отношению к оболочкам с равной длиной, но позволяет сохранить одинаковую кривизну фокальной поверхности для разных оболочек с последующим улучшением качества изображения и чувствительности. Изображения, создаваемые разными зеркальными оболочками, не совмещены точно. В частности, различные оболочки фокусируют изображения, смещенные относительно друг друга; смещение увеличивается с отклонением от оптической оси. Это частая проблема рентгеновских телескопов, которая приводит к увеличению размытия изображения при больших отклонениях. Чтобы устранить этот эффект, оболочки первого и второго зеркальных блоков должны быть построены с измененными фокусными расстояниями и смещены относительно друг друга на небольшие расстояния [38, 39].

Коррекция формы

Для достижения высокой чувствительности улучшение углового разрешения – только одна из целей. Другая цель – реализация плотного вложения зеркальных оболочек для повышения эффективности сбора данных и, следовательно, обеспечения высокой геометрической пропускной способности, что требует небольшой толщины зеркальных оболочек t по сравнению с проецируемой осевой протяженностью зеркала. Однако уменьшение толщины зеркала делает оптику менее жесткой (жесткость $\sim t^3$). Это уменьшение жесткости делает зеркало более восприимчивым к случайным нагрузкам и искажениям, которые могут ухудшить его форму. Следовательно, изготовление и монтаж тонких легких элементов рентгеновской фокусирующей оптики с высоким угловым разрешением представляет собой значительную и уникальную техническую проблему для современной астрофизики [46].

Были разработаны различные методы для дальнейшего улучшения характеристик зеркал, уменьшения остаточных ошибок формы и напряжения, вызванного монтажом, в том числе: дифференциальное осаждение [47 – 49], коррекция формы с помощью ионного пучка [50, 51], дифференциальная ионная имплантация [52, 53]. Но ни один из этих альтернативных методов, вероятно, не сможет изменить эффективность зеркала на орбите. Кроме того, активные оптические технологии можно объединить с любым из перечисленных альтернативных подходов, просто добавив пьезоэлектрические приводы к тыльной поверхности зеркала [54].

По сути, есть две категории приводов, отличающихся способом приложения силы к зеркалу. Для юстировки или для воздействия на глобальные или локальные деформации зеркала можно использовать поверхностно-нормальные приводы (актуаторы), действующие как поршень (рис. 4). Поверхностно-касательные приводы в сочетании с подложкой зеркала действуют как биморф [55] для локальной деформации зеркала [56].

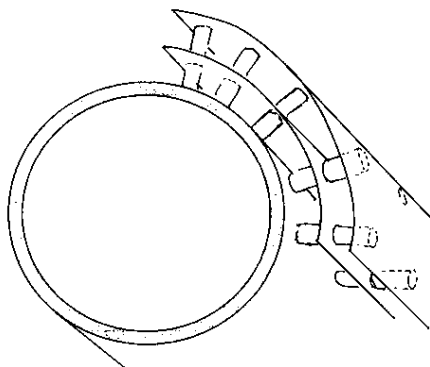


Рис. 4. Дискретные (поршневые) поверхностно-нормальные приводы для юстировки и коррекции формы зеркал скользящего падения, действующие радиально на последовательно вложенные оболочки [56].

Поверхностно-нормальные приводы работают за счет использования дискретных электроактивных поршней, смонтированных в виде грубой матрицы. Они подходят для юстировки и для исправления некоторых ошибок формы.

Активную оптику следует выбирать так, чтобы она не только улучшала зеркальную форму, но также могла быть включена в зеркальный модуль, не добавляя существенную толщину или структуру в зазоре между соседними вложенными зеркальными оболочками, которая будет перекрывать путь рентгеновских лучей. Поэтому, по-видимому, предпочтительнее использование поверхностно-касательных актуаторов, обладающих возможностью более гибкой коррекции формы зеркальных оболочек [57 – 63]. Эта система состоит из заземленного электрода, нанесенного на обратную (выпуклую) поверхность зеркала, тонкого (1–5 мкм) слоя пьезоэлектрического материала (например, цирконата-титаната свинца) и, наконец, массива электродов, нанесенных на пьезоматериал для формирования сетки пьезоэлементов. Путем дифференциального

расширения /сжатия пьезослоя (разделенного на множество дискретных «ячеек») можно ввести поправку на погрешность в форме зеркала. Эти погрешности, а также деформацию, вызванную изменением силы тяжести и температуры окружающей среды на орбите, можно будет исправить подачей оптимального набора напряжений на каждый зеркальный сегмент.

Альтернативу электроактивным материалам для создания биморфной деформации зеркала представляют магнитоактивные материалы [64 – 68]. Магнитный интеллектуальный материал может быть нанесен на зеркальную подложку и покрыт магнитно-твердым материалом. Форму зеркала можно контролировать, прилагая к зеркалу внешнее магнитное поле. Это заставляет магнитный материал расширяться или сжиматься, тем самым прикладывая магнитострикционное напряжение к зеркалу и изменяя его форму. Приложенное магнитное поле также намагничивает магнито-твердый нижний слой или подложку, которая сохраняет магнитное поле даже после того, как магнит удален; биморфная деформация сохраняется до тех пор, пока подслой или подложка остаются намагниченными. По сравнению с электроактивными приводами метод имеет преимущество: магнитное поле создается магнитом, не прикрепленным к зеркалу, что исключает этап осаждения электродов на обратной стороне зеркала, таким образом, уменьшает сложность производственного процесса.

Элиминация напряжений.

Среди химических элементов, обычно используемых в качестве отражающего покрытия рентгеновских зеркал (Au, Ir, Pt) иридий обладает наибольшей отражательной способностью во всем интервале энергий мягкого рентгеновского излучения [69]. Однако наблюдалось высокое напряжение покрытия зеркал, которое может вызвать деформацию зеркал, в некоторых случаях провоцируя его отслаивание от подложки. Были опробованы два способа компенсации напряжения. Один опирается на осаждение слоя диоксида кремния (SiO_2) с напряжением сжатия на тыльную поверхность подложки, а второй основан на идее сбалансировать напряжение сжатия в пленке иридия нанесением слоя хрома с напряжением растяжения под слой иридия [70, 71]. Преимущества и недостатки каждого из этих методов обсуждаются в работе [72].

Другая концепция, предложенная авторами работы [73], заключается в изменении напряжения между держателем образца и маской во время осаждения магнетронным распылением. Таким образом, возможно корректировать форму за счет синхронизации напряжения смещения с местоположением трансляционного держателя зеркала.

Недавно для кремниевых зеркальных подложек был разработан метод термического оксидного рисунка [74]. Поскольку размер оксидных рисунков на обратной стороне зеркала относительно большой (0,5 мм), метод имеет потенциал недорогого массового производства [75].

Ограничение рассеянного излучения.

В рентгеновском телескопе скользящего падения фотоны дважды отражаются от зеркальных поверхностей и фокусируются на фокальной плоскости. Однако не все фотоны отражаются дважды: часть из них подвергается только однократному отражению (на первом или втором зеркале), а некоторые могут вообще не отражаться и попадать прямо на фокальную плоскость. Однократно отраженные и неотраженные фотоны, приходящие с направлений вне поля зрения являются основным источником так называемого рассеянного света. Увеличивая интенсивность фона, рассеянный свет уменьшает чувствительность телескопа (формула (4)). В частности, рассеянный свет может являться основной причиной возникновения фоновых и фантомных изображений, особенно при наблюдении слабых источников рентгеновского излучения в окрестностях другого, более интенсивного источника [76].

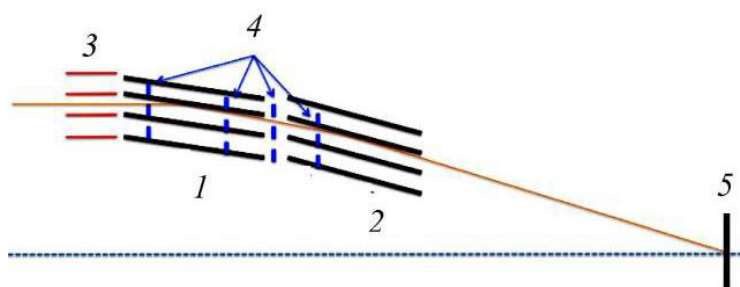


Рис. 5. Два типа перегородок для ограничения рассеянного излучения: цилиндрические перегородки 3 перед первичными зеркалами 1 и кольцевые апертуры 4, устанавливаемые между зеркальными оболочками (2 – вторичные зеркала, 5 – фокальная плоскость) [85].

Проблема рассеянного света достаточно хорошо изучена экспериментально и теоретически [76 – 85]. Показано, что в большинстве случаев для борьбы с рассеянным светом достаточно установить цилиндрический кольцевой предварительный коллиматор 3 перед зеркальным модулем и кольцевые перегородки 4 между зеркальными оболочками (рис. 5).

5.2. Производство зеркал.

Космические приложения требуют от рентгеновских зеркал выполнения ряда требований, которые могут поставить под угрозу оптические характеристики телескопа. В частности, они требуют соблюдения логики миссии, что накладывает сильные ограничения на массу зеркала: большая масса зеркала действительно неизбежна, когда требуется иметь большую площадь сбора, отличное угловое разрешение и хорошую термомеханическую стабильность зеркала.

Практическое производство рентгеновской оптики Вольтера I должно учитывать все эти требования, часто противоречащие друг другу. Для иллюстрации различных методов производства зеркал в **Таблицу** собраны

оптические характеристики некоторых рентгеновских телескопов, использующих оптику скользящего падения прошлых, современных и будущих научных миссий.

Таблица. Обзор основных характеристик реализованных и планируемых рентгеновских спутников.

Миссия	Год запуска	Метод изготовления	Оптика	HEW (")	$A_{\text{эфф}}$ (м ²) E = 1 кэВ	Материал подложки	Толщина подложки (мм)	Литературные ссылки
Einstein	1978	Прямая полировка	Вольтер I	~ 10	0.04	стекло	~ 20	[88]
EXOSAT	1981	Прямая полировка	Вольтер I	17,5	0,0038	Be		[89, 90]
ROSAT	1990	Прямая полировка	Вольтер I	< 5	0.10	Zerodur	16 – 25	[91]
Chandra	1999	Прямая полировка	Вольтер I	0.5	0.1	Zerodur	~ 25	[92 – 94]
XMM-Newton	1999	репликация	Вольтер I	15	0.15(×3)	Ni	0.5 – 1.1	[95, 96]
JET-X/Swift	2004	репликация	Вольтер I	18	0.011	Ni	0.6 – 1.1	[97, 98]
eROSITA	2017	репликация	Вольтер I	15	0.03(×7)	Ni	0.2 – 0.4	[99, 100]
SAX	1996	репликация	конусы	60	0.0123(×4)	Ni	0.2 – 0.4	[101, 102]
ASCA	1993	сегментация	конусы	200	0.041 (×4)	Al	0.125	[103, 104]
CAST	2003	репликация	Вольтер I	34.5	0,0008	Ni		[105]
Suzaku	2005	сегментация	конусы	114	0.04 (×4)	Al	0.152	[81, 106]
NeXT	2007	сегментация	конусы	1,7	0,04 *	Al	0,2	[107, 108]
FOXSI	2012	репликация	Вольтер I	25	0,1 **	Ni	0,25	[109]
AstroSat	2015	сегментация	конусы	60	0,0128	Al	0,2	[110, 111]
Hitomi	2016	сегментация	конусы	102	0.0562 (×2)	Al	0.15 – 0.31	[112, 113]
Constellation-X	2016	сегментация	Вольтер I	15	0,75	стекло	0,44	[114 – 116]
ART-XC	2019	репликация	Вольтер I	60	0,0455***	NiCo	0,25 – 0,35	[117, 118]
IXO	> 2020	сегментация	Вольтер I	5	3	стекло	0,4	[119, 120]
Arcus	2023	КПО	Вольтер I	13.9	0,045	Si	0.775	[121]
STAR-X	> 2020	мета-оболочка	В-Ш	4,1	0,30	Si		[122, 123]
AXIS	> 2020	сегментация	В-Ш	0,4	0,77	Si		[124]
ATHENA	2028	КПО	В-Ш	5	2.00	Si	0.17	[125, 126]
X-ray Surveyor	2030	сегментация	В-Ш активная	0.5	3	стекло		[48, 127]
SMART-X	подготовка	сегментация	Вольтер I активная	0.5	2,3	стекло	0,4	[60]
MiXO	подготовка	репликация	Вольтер I	30	0,0065 (×5)	NiCo+ Al ₂ O ₃	< 0,22	[128]
WFXT	подготовка	Прямая полировка	полином	≤ 5	0,92	кварц	1,5 – 2	[129]
Lynx	подготовка	сегментация		< 0.5	2	Si		[130 – 132]
Generation-X	подготовка	сегментация	Вольтер I активная	0.1	25	стекло	0,1 – 0,2	[115, 133]

* E = 6 кэВ; ** E = 10 кэВ; *** E = 8 кэВ.

Метод прямой полировки.

Для рентгеновских телескопов высокого разрешения функция рассеяния точки (HPD) состоит из компактной центральной части (ядра) (определяется ошибками юстировки, отклонениями формы поверхности от оптического предписания и абберациями) и расширенного ореола или крыльев (вызванных дифракционным рассеянием на микрошероховатостях поверхности и частицами на поверхности) [86]. Следовательно, минимизация крыльев HPD обычно является проблемой ограничения шероховатости

зеркала и контроля загрязнения частицами [87]. Таким образом, процессы минимизации крыльев в значительной степени отделены от процессов оптимизации ядра функция рассеяния точки [21], которые были рассмотрены выше.

Поэтому для достижения хорошего углового разрешения усилия исследователей были направлены на получение микрошероховатости, которая соответствует довольно строгим требованиям для зеркал, отражающих рентгеновское излучение в энергетической полосе от 0,1 до 10 кэВ. Эти усилия на определенном этапе завершились изготовлением телескопов для миссий *Einstein*, *ROSAT* и *Chandra*. Рентгеновские зеркала на этих трех обсерваториях имеют общие характеристики хорошего углового разрешения, небольших областей сбора фотонов и высоких производственных затрат. Небольшие области сбора фотонов обусловлены двумя причинами. Во-первых, процессы шлифовки и полировки позволяют изготовить только толстые зеркала, потому что полирующее напряжение ломает тонкие подложки и количество удаленного материала должно быть мало по сравнению с толщиной подложки, так чтобы создаваемое напряжение во время процесса полировки не привело к непредсказуемому изменению формы. Во-вторых, масса, которая может быть поднята ракетами и запущена в космос очень ограничена, исключая очень большое и тяжелое рентгеновское зеркало [6].

С помощью метода прямой полировки изготавливаются зеркала, которым сначала придают правильную форму подложки. Выбор материалов подложки (кварц для *Einstein* или Зеродур для *ROSAT* и *Chandra*) обусловлен их чрезвычайно низкими коэффициентами теплового расширения и их относительно небольшой плотностью. Гиперболоиды и параболоиды отдельно шлифуются и полируются на высокоточных станках: внутренние поверхности зеркал полируются путем притирки [134, 135] ультратонкими порошками оксида алюминия – процесс, который позволяет достичь среднеквадратичной микрошероховатости в несколько ангстрем. Затем на суперполированную поверхность наносится тонкий (1000 Å) отражающий слой (Au, Ni, Ir, Pt ...). Этот метод позволяет получить очень высокое угловое разрешение, например НРД *Chandra* (чьи зеркала имеют иридиевое покрытие) из-за малой шероховатости поверхности составляет всего 0,5", однако толщина оболочки зеркала большая (~ 25 мм) и количество оболочек, которые могут быть вложены друг в друга, ограничено четырьмя: это привело к малой эффективной площади [19].

Технологическая задача при изготовлении оптики для будущей миссии *WFXT* состоит в том, чтобы применить метод прямой полировки к зеркальным оболочкам на порядок меньшей толщины, что на порядок может увеличить эффективную площадь сбора. Выбранный подход основан на двух основных последовательных шагах: 1) кварцевые трубки, доступные на рынке, шлифуются до профиля конической формы; 2) полученные оболочки полируются до требуемых полиномиальных профилей с помощью специальной полировальной машины [129].

Метод гальванопластической репликации.

Увеличение эффективной площади сбора достигается путем плотного вложения многих зеркальных оболочек. Последние должны быть относительно тонкими, но достаточно жесткими, чтобы обеспечить механическую устойчивость и требуемое высокое угловое разрешение. Метод гальванопластической репликации основан на изготовлении полной оболочки и использует естественную жесткость замкнутой геометрии, поэтому может быть применим для изготовления рентгеновских зеркальных оболочек с очень тонкими стенками [97, 109, 117, 136 – 142].

Производство никелевых оболочек включает несколько этапов. Изначально изготавливаются оправки из алюминия двойной конической формы. Затем оправки покрываются никелем Kanigen (выбранным из-за его твердости, необходимой для хорошей полировки, высокой адгезии к алюминию и низкой пористости), шлифуются до точной формы и, наконец, суперполируются до шероховатости поверхности $< 0,4$ нм. Перед гальванопластикой слой золота толщиной 250 нм наносится на оправку и действует как разделительный агент, так и как отражающее покрытие. Каждая оправка помещается в электролитическую ванну, где слой никеля осаждается до толщины, зависящей от диаметра зеркальной оболочки. Отделение зеркала от оправки осуществляется за счет охлаждения последней, так как температурный коэффициент расширения алюминия примерно вдвое больше, чем у никеля. Поскольку прилипание (адгезия) золота к оправке плохая, но прочное на никеле, золото остается на оболочке. Внутренняя отражающая поверхность оболочки дублирует качественный рисунок наружной поверхности оправки.

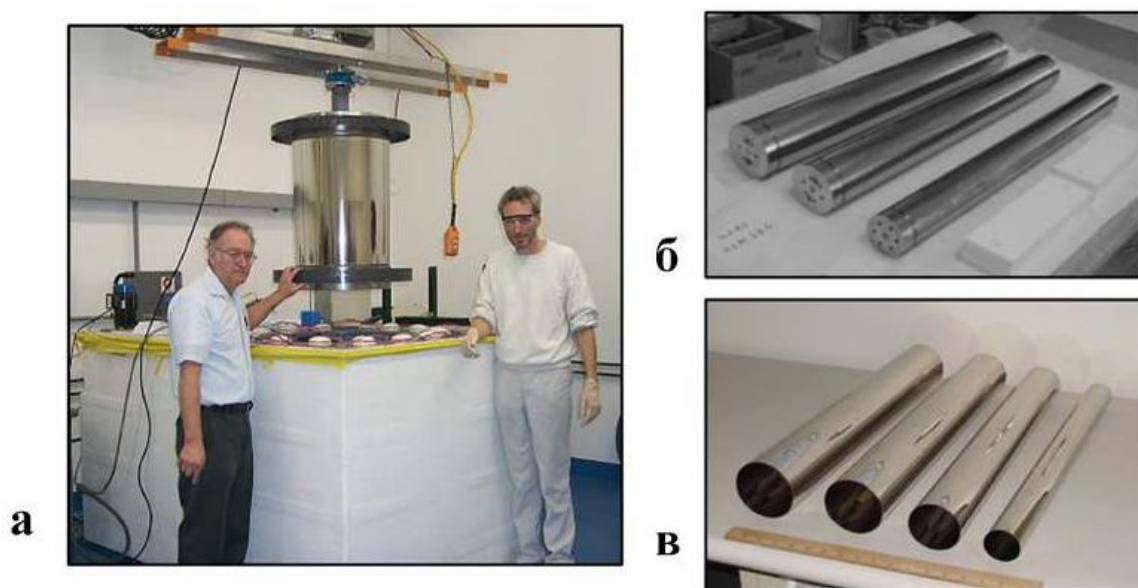


Рис. 6. (а) Изображение реплицированной оболочки, выходящей из ванны для гальванопластики, и фотографии (б) оправок и (в) оболочек диаметром от 40 до 48 мм и длиной около 600 мм [141].

Репликация имеет преимущество создания нескольких одинаковых оболочек от одной оправки. Это приводит к значительному снижению себестоимости, так как большая часть усилий и времени производства уходит на изготовление оправки и ее полировку. Второе преимущество метода – возможность сформировать зеркало с двумя секторами в одном пакете, упрощая процесс юстировки без ухудшения углового разрешения. С другой стороны, каждая оболочка требует «персональной» оправки (рис. 6).

Оболочки, полученные с помощью этого метода, тонкие (обычно от 0,2 мм до 1 мм). В любом случае, этот процесс репликации может достигать наилучшего углового разрешения 15 угловых секунд, как в случае оптики миссий *XMM-Newton* и *eROSITA* (см. Таблицу).

Тонкая оболочка Ni ($\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$) позволяет уменьшить общую массу более чем в пять раз по сравнению с рентгеновскими зеркалами *Chandra* (рис.7) и получить большую площадь сбора при том же объеме оптики.

В рентгеновском телескопе *ART-XC* [138] вместо Ni используется сплав NiCo (толщиной 250 мкм) в качестве подложки для дальнейшего уменьшения массы зеркала (рис. 7в). В дальнейшем был разработан новый подход, в котором объединялись технологии плазменного распыления и репликации для формирования металлокерамического гибрида рентгеновского зеркала [128]. В гибридном рентгеновском зеркале легкий керамический слой обеспечивает жесткость, что необходимо для поддержания общей формы рентгеновской оптики, в то время как слой NiCo поддерживает малую шероховатость поверхности. Учитывая свойства NiCo и керамического слоя, следует ожидать, что может быть получена небольшая рентгеновская зеркальная оболочка (диаметром 2–20 см), состоящая из 20 мкм NiCo + 200 мкм керамики. Заменяя слой NiCo ($\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$) легким Al_2O_3 ($\rho = 2,3\text{--}2,9 \text{ г/см}^3$), возможно еще большее уменьшение массы зеркала (рис.7г).

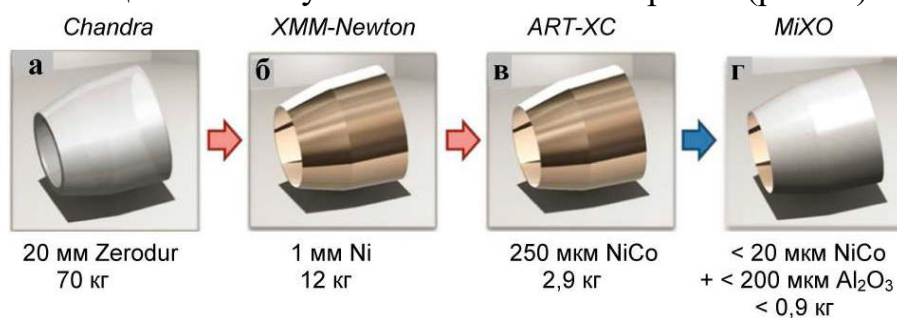


Рис. 7. Демонстрация достижений метода гальванопластической репликации, использованного при производстве зеркал для телескопов различных миссий. (а) подложка из шлифованного и полированного стекла, (б) никелевая оболочка, (в) тонкая оболочка NiCo, (г) гибридная металлокерамическая оболочка. Вес приведен для зеркального корпуса диаметром 70 см и длиной 60 см [128].

В дальнейшем зеркальные оболочки должны быть вложены друг в друга и съюстированы. Сборка должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать серьезные механические нагрузки при запуске ракеты. Чтобы

соответствовать строгим требованиям к разрешающей способности и нагрузке, оптические модули могут быть собраны с помощью зажимов, которые затем прикрепляются эпоксидной смолой к интерфейсам поддержки на передней панели [109] (рис.8а). Эти зажимы уменьшают эффект усадки эпоксидной смолы (которая может исказить зеркала). Зажимы корпуса охватывают звездообразные спицы («паук») таким образом, что любая усадка эпоксидной смолы действует на оболочку по окружности, а не радиально.

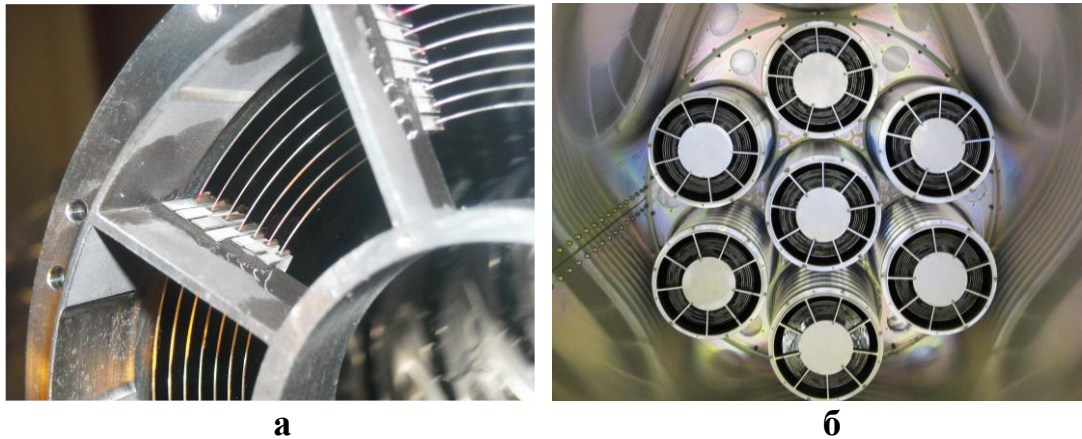


Рис. 8. (а) Крупный план части изображения «паука», показывающий зажимы, объединяющие семь зеркальных оболочек телескопа миссии *FOXSI* в единый модуль. (б) Вид на семь оптических модулей, установленных в измерительной трубе обсерватории *FOXSI* с целью семикратного увеличения области сбора. [109].

Основным недостатком метода является необходимость пропорционально большой инфраструктуры для изготовления оболочек большого диаметра, что делает процесс производства тяжелым и дорогим, если вообще технически возможным. В частности, процессы изготовления, обработки и интеграции больших и тонких оболочек (например, диаметром 1 м и толщиной менее 1 мм) трудны или почти невозможны [143]. Поэтому для увеличения эффективной площади в миссиях *XMM-Newton*, *eROSITA*, *SAX*, *MiXO*, *FOXSI* обсерватория состоит из нескольких телескопов с апертурой небольшого диаметра, объединенных в единый оптический модуль (рис. 8б).

Сегментированная эпоксидная репликация.

Сегментированные зеркала предлагают несколько преимуществ перед полными зеркальными оболочками. В силу своей модульности, сегментированный дизайн более способствует массовому производству. Модули внутри блока телескопа могут быть заменены без существенных осложнений, если модуль не работает или поврежден. Наконец, каждый отражатель физически меньше, и поэтому может быть тоньше и при этом сохранять свою конструкционную целостность. Этот подход имеет и то преимущество, что большие зеркальные сборки не требуют создания пропорционально большой инфраструктуры. Возможно, что еще более важно, из-за относительно небольшого размера сегментов зеркала,

сегментированный подход позволяет изготовить очень легкие зеркала и использовать имеющиеся в продаже оборудование, материалы и современные технологии массового производства, минимизировать график производства и его стоимость. При этом общая масса собранного зеркала может быть меньше, чем зеркало, собранное из полных оболочек [144, 145].

Процесс так называемой эпоксидной репликации впервые был предложен авторами работ [104, 146]. В нем тонкий отражающий слой (золота или платины) наносится на заранее приготовленную стеклянную оправку. Затем тонкий, ровный слой эпоксидной смолы наносится на предварительно отформованную алюминиевую подложку и/или оправку с покрытием. Алюминий был выбран потому, что имеет низкую плотность, оптимальный баланс между жесткостью и пластичностью, а также может быть получен в виде больших тонких рулонов или листов с глянцевой отделкой. Оправка и подложка контактируют в вакууме, а затем под атмосферным давлением. Как только эпоксидная смола застынет, сегмент зеркала отделяется от оправки. Таким образом, золотой/платиновый слой переносится на алюминиевую фольгу. Этот слой на внутренней стороне изогнутой фольги сохраняет гладкость оправки и становится рентгеновским отражателем. Сегмент обрезается до окончательной формы для установки в корпус зеркала; оправка очищается для повторного цикла репликации [144, 147, 148].

Эпоксидная репликация стала базовым подходом для изготовления зеркал из алюминиевой фольги (см. Таблицу). Первые зеркала с использованием эпоксидной репликации были построены для обсерватории миссии ASCA. Она состояла из четырех телескопов общим весом 39,3 кг, каждый диаметром 345 мм с фокусным расстоянием 3,5 м, содержащий 120 вложенных алюминиевых оболочек [149].

Сегментированная репликация оседания.

Тонкие стеклянные фольги успешно используются для создания сегментированного рентгеновского телескопа с большой эффективной площадью и хорошим угловым разрешением [150]. Тонкий и плоский лист стекла помещается над предварительно оптически отполированным шаблоном; затем применяется подходящий тепловой цикл. При достаточном нагреве стекло размягчается настолько, чтобы осесть на шаблон и адаптироваться к его форме. Когда система остыла до комнатной температуры, осевшая стеклянная оболочка извлекается из формы и покрывается соответствующим отражающим слоем [145, 151 – 156]. В зависимости от стороны формируемого зеркала, которая входит в контакт с шаблоном, возможны два подхода: прямой подход, в котором во время термического процесса оптическая поверхность зеркала соприкасается с шаблоном, и косвенный подход, в котором шаблон контактирует с обратной стороной зеркала [157]. Деформация стекла может проходить либо только под собственным весом (то есть, под действием силы тяжести) или может активно поддерживаться приложением дополнительных внешних сил. Последний случай является прямым подходом, характеризующимся

активным приложением давления. Такой подход обеспечивает полный контакт стекла с шаблоном, а также является причиной того, что стекло приобретает форму поверхности с необходимой микрошероховатостью [158].

Модульная компоновка зеркальных сегментов.

Будущая высокоэффективная оптика для рентгеновской астрономии неизбежно требует сборки большого количества тонких зеркал с использованием модульного подхода. Такой модульный телескоп может лучше соответствовать требованиям малой массы и эффективной площади. Недостаточно изготовить тонкие (0,2 – 0,5 мм) зеркальные сегменты настолько точно, насколько они соответствуют требованиям телескопа – необходимо установить их в корпус телескопа независимо друг от друга с минимальными деформациями.

В рентгеновских телескопах с высокой эффективной площадью сбора неизменно используется интеграция большого количества тонких зеркальных сегментов в очень компактной компоновке [21, 147]. Наиболее практичным подходом для очень больших рентгеновских телескопов является концентрическое «гнездо» тонких зеркальных сегментов, объединенных в модули, которые затем объединяются в большой телескоп (рис.9).

Оптические зеркальные элементы, будь то закрытые оболочки или зеркальные сегменты, прикреплены к опорной конструкции в отдельных точках. В большинстве случаев используется структура «паука», к которой крепится оптический зеркальный элемент. Эти монтажные интерфейсы локализованы и включают механическое зажатие или пятна клея. Возможности оптимизации условий юстировки и крепления зеркальных сегментов рассмотрена, например, в работах [159 – 163].

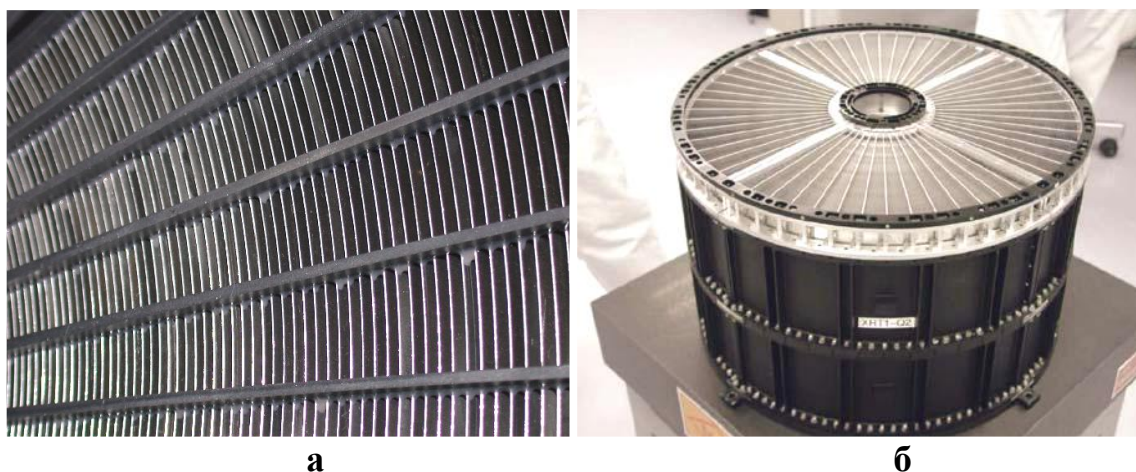


Рис. 9. (а) Участок входной апертуры зеркала, построенного по модульному принципу; среднее расстояние между оболочками составляет ~ 1 мм [147]. (б) Один из четырех зеркал обсерватории *Suzaku*, состоящий из четырех модулей. Диаметр апертуры составляет 40 см; высота равна 22 см. Зеркало состоит из 168 вложенных алюминиевых оболочек (по 42 в каждом модуле) и имеет массу 20 кг. [81].

Изготовление подложек из монокристаллического кремния открыло новую возможность получения рентгеновской оптики более высокого разрешения [143, 164 – 166]. Кремний был выбран в качестве материала для зеркальных сегментов, потому что имеет много преимуществ перед стеклом. Кремний намного жестче стекла (с модулем Юнга $\sim 130 - 190$ ГПа, по сравнению с модулем Юнга для стекла 72 ГПа). Кремний обладает превосходными термическими свойствами, такими как низкий коэффициент температурного расширения и теплопроводностью, которая на два порядка величины выше, чем у боросиликатного стекла. Низкий коэффициент температурного расширения кремния обеспечивает стабильность размеров зеркал для данного рабочего диапазона температуры, а хорошая теплопроводность важна для сохранения однородности температуры телескопа с множеством зеркальных сегментов.

Другое важное преимущество монокристаллического кремния состоит в том, что упорядоченная структура хорошо подходит для снятия напряжений после механической обработки. Это важное свойство позволяет использовать процесс механической обработки для точного изготовления зеркальной подложки [162]. Полный процесс изготовления монокристаллического кремниевого зеркала подробно описан в работе [167]. Процесс изготовления начинается с блока монокристаллического кремния, который шлифуется до конической поверхности, приближающейся к параболоидальной или гиперболоидальной оптической поверхности. Затем нарезанный сегмент протравливается в фтористоводородно-азотно-уксусном растворе для удаления любого повреждения кристаллической структуры, вызванного процессами резки и шлифовки. Этот сегмент конической формы полируется на цилиндрической полировальной машине в течение примерно 40 часов для достижения необходимой оптической формы и микрошероховатости. Затем сегмент покрывается слоем 10 нм иридия для повышения его отражательной способности [122, 162].

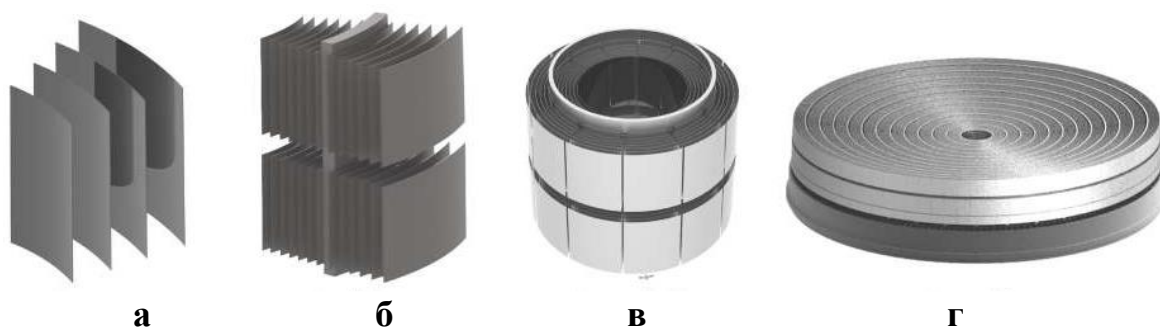


Рис. 10. Четыре этапа производства рентгеновского зеркала на примере сборки зеркала для обсерватории *Lynx*: предполагается изготовление 37 492 зеркальных кремниевых сегмента (а); они будут интегрированы в 611 зеркальных модулей (б), которые в свою очередь будут объединены в 12 мета-оболочек (в); 12 мета-оболочек будут интегрированы в полную сборку (г) [165, 166].

Большие зеркальные сборки, предусмотренные для будущих миссий, обычно делятся как радиально, так и азимутально на множество клиновидных модулей. Эта парадигма имеет то преимущество, что требует наличия множества идентичных модулей небольшого размера. Этапы модульной сборки рентгеновского зеркала показаны на рис.10.

Концепция радиальной мета-оболочки.

Для создания рентгеновских телескопов следующего поколения была разработана концепция радиальной мета-оболочки [85, 122, 168]. Мета-оболочка состоит из кольцевой центральной конструктивной оболочки, покрытой взаимосвязанными слоями зеркальных сегментов. Каждый сегмент зеркала, изготовленный из монокристаллического кремния, опирается на четыре опоры, которые притерты и отполированы до точной высоты (рис.11). Для юстировки используется важное математическое свойство рентгеновского зеркала: четыре соответствующим образом расположенные опоры однозначно определяют его местоположение и ориентацию. Как только желаемая высота опоры будет достигнута, опоры и зеркало склеиваются эпоксидной смолой. Наконец, применяется акустическая вибрация, чтобы установить зеркало в его естественную и релаксированную конфигурацию. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не образуется стопка тонких зеркал в десятки слоев. Окончательная конструкция состоит из нескольких собранных оболочек, съюстированных вместе для создания всей оптики рентгеновского телескопа (рис. 10в,г).

Парадигма мета-оболочки имеет преимущество в создании легкой и жесткой оптики с большой площадью сбора. Кроме того, мета-оболочка имеет осевую симметрию, что упрощает взаимную юстировку нескольких мета-оболочек при сборке зеркала.

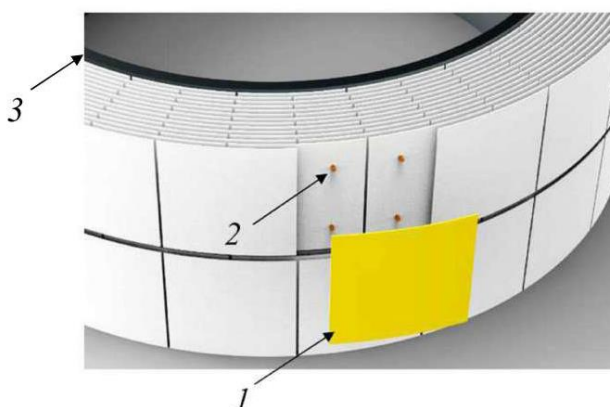


Рис. 11. Зеркальный сегмент (1), крепящийся на четырех стойках (2), завершающий сбор мета-оболочки с перекрывающимися слоями зеркальных сегментов, прикрепленных к центральной структурной оболочке 3 [122].

Однако из-за реакции растяжения на обратной стороне зеркального сегмента эпоксидная смола может вызвать его изгиб и искажение. Это приведет к деформации по всей поверхности сегмента, ухудшая разрешение

телескопа. В работе [170] предлагается изменение местной топографии сегмента для уменьшения искажения от напряжения склеивания: следует протравить канавку вокруг точки напряжения на сегменте. Канавка будет окружать область эпоксидного соединения и в основном ограничивать деформацию областью, окруженной канавкой.

Кремниевая пористая оптика

Было показано [23, 171 – 180], что кремниевая пористая оптика (КПО) может служить новой технологией для создания высоко эффективных рентгеновских телескопов. Важными особенностями КПО являются: модульность, малая масса, хорошее угловое разрешение, механическая прочность и хорошие возможности для массового производства. Процесс производства кремниевых пластин оптимизирован полупроводниковой промышленностью, что приводит к оптическим качествам, которые являются достаточными для высококачественной фокусировки рентгеновского излучения.

Форма поверхности зеркала, требуемая для оптики Вольтера I (или ее конического приближения), получается путем изгиба и укладки нескольких зеркал, как показано на рис.12. Полированные кремниевые пластины прямоугольной формой имеют две основные функциональные части: мембрану, действующую как зеркало, и ребра для соединения нескольких пластин (рис.12а), расстояние между которыми может быть уменьшено до 1 мм [180]. Одна стенка каждой поры используется в качестве рабочей (отражающей) поверхности, а боковые стенки придают конструкции особую жесткость. Для улучшения отражательной способности зеркал их рабочая поверхность покрывается металлической пленкой. Пластины эластично изгибаются и укладываются друг на друга, образуя зеркальный блок КПО. Важным моментом является то, что пластины соединены без какого-либо клея посредством гидрофильного связывания активированных поверхностей. Затем для того, чтобы получить конфигурацию Вольтера I, два блока КПО располагаются друг за другом, юстируются и соединяются в зеркальный модуль КПО (рис 12б). Апертура рентгеновского телескопа заполняется сотнями зеркальных модулей. Пример с ~ 1000 зеркальными модулями КПО, распределенными по 20 кольцам с радиусами от 0,25 до 1,5 м, приведен на рис. 12в. Из-за тонкостенных пор, заключенных в жесткую структуру, КПО компактна и очень легка.

Таким образом, может быть достигнута жесткость конструкции за счет монолитной пористой структуры оптических модулей, которые индивидуально съюстированы в оптический модуль, заменяя подход к установке отдельных оболочек, используемых в более традиционных рентгенооптических технологиях. Это позволяет толщине подложки быть значительно уменьшенной, что приведет к более плотной упаковке зеркальных оболочек и тем самым к увеличению эффективной поверхности сбора без ущерба для жесткости оптики и точности формы. По сравнению с

никелевой репликационной оболочкой технология КПО снижает массу рентгеновской оптики на порядок [175].

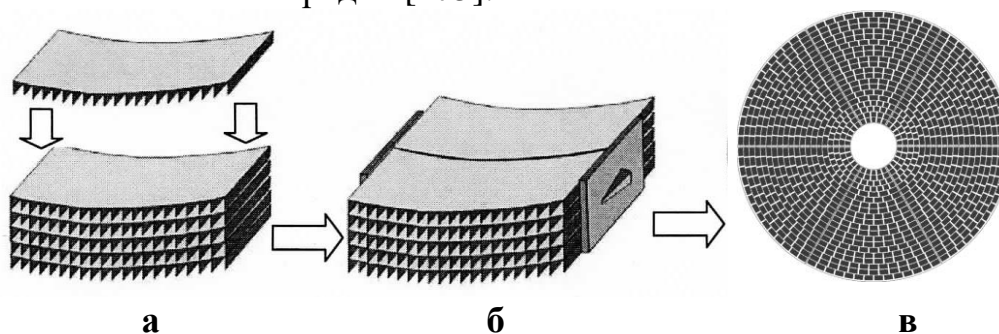


Рис.12. Иллюстрация технологии изготовления КПО. Несколько изогнутых зеркальных пластин с ребрами жесткости объединяются в зеркальные блоки (а); два блока КПО соединены скобами для формирования зеркального модуля [179] (б); конфигурация ячеек объектива телескопа, распределенных по 20 кольцам с радиусом от 0,25 до 1,5 м и предназначенных для размещения ~ 1000 зеркальных модулей КПО [23] (в).

Микроканальная оптика.

Как правило, трудно обеспечить легкость конструкции рентгеновской фокусирующей оптики и ее высокое угловое разрешение, так как требование высокой точности формы вообще означает необходимость использования жестких и тяжелых зеркал. Один из наиболее перспективных подходов для ликвидации подобного «антагонизма» – использование микроканальных пластин. Ширины отверстий в них настолько малы (20 – 100 мкм), что толщина подложки, т.е. длина зеркала, может быть небольшой, от сотен мкм до десятков мм. В результате оптика с микропорами может быть более чем в десять раз легче традиционного рентгеновского телескопа на основе полированных или реплицированных зеркал. Таким образом, микропористая оптика при условии улучшения ее углового разрешения может быть использована для телескопов малой массы с большой эффективной площадью [181].

Существует два типа микропористой оптики. Один из них – оптика с микроканальными пластинами из стекла (МКП). Она состоит из стекловолоконных трубок. Размер трубок от десятка до сотни мкм [13]. Угловое разрешение достигает нескольких угловых минут. Второй – это так называемые МЭМС (микро- электро- механические системы) – рентгеновская оптика с использованием анизотропного влажного травления пластин кремния с ориентацией поверхности (110) [182]. Поскольку они изготавливаются на основе литографии, доступны поры точной формы в масштабе 1 мкм. Этот тип микропористой оптики может быть самой легкой рентгеновской оптикой благодаря мелким порам большой плотности. Так как травление позволяет изготавливать ряд рентгеновских зеркал сразу за один процесс травления, технология отличается очень низкой стоимостью.

МКП [171, 183 – 186] изготавливается из полированных стеклоблоков, окруженных облицовочным стеклом с более низкой температурой плавления.

Блоки растягивают в тонкие волокна. Эти волокна объединяются в массив квадратного сечения, который снова вытягивается для формирования мультифибра. Для создания радиально упакованных МКП мультифибры расположены концентрическими кольцами и сплавлены при высоких температуре и давлении для образования жгута. Заготовки МКП толщиной несколько миллиметров нарезаются из жгута перед тем, как растворимое стекло сердцевины вытравливается кислотой, что приводит к желаемой структуре микропор квадратного сечения, в которой стенки пор образованы стеклом облицовки. МКП покрываются тонким слоем элемента с высоким Z (например, платиной, иридием и т. д.) для повышения эффективности. В зависимости от приложения, оптике может быть термически придана сферическая форма определенного радиуса. Использование геометрии радиальной упаковки каналов в двух МКП, изогнутых с необходимыми радиусами кривизны каждая, может сформировать коническое приближение оптики скользящего падения Вольтера I (рис.13). Такая оптика может обеспечить большую эффективную площадь при очень малой массе [183].

Реализация МКП предполагалась в программе полета миссии *VepiColombo* [187] и миссии *SVOM* [188]. Радиально упакованная оптика МКП миссии *SVOM* с квадратными порами размером 20 микрон в коническом приближении геометрии Вольтера I, отвечающая всем научным требованиям, может обеспечить эффективную площадь сбора около 50 см^2 и функцию рассеяния точки лучше, чем $3,7'$ (FWHM) на оптической оси. Фокусное расстояние составляет 1 м, что определяется радиусами кривизны 4 и 1,33 м передней и задней пластин тандемной пары МКП. Оптика диаметром 210 мм собрана из тандемных пар МКП, каждая из которых представляет собой сектор окружности. Тандемы расположены в три кольца с разной толщиной (2,2 мм внутренняя, 1,3 мм средняя и 0,9 мм внешняя), чтобы приблизиться к профилю идеальной толщины, которая увеличивает пропускную способность телескопа за счет максимальной вероятности однократного отражения в каждой МКП [188].

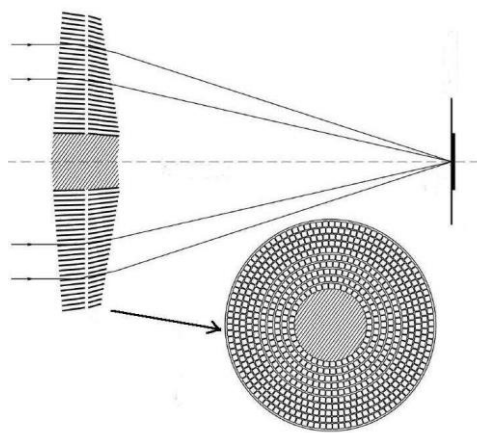


Рис. 13. Оптика Вольтера I или ее коническая аппроксимация может быть реализована с использованием большого количества прямоугольных пор, расположенных концентрическими кругами вокруг сердечника [171].

Микропористая оптика MEMS, изготовленная методом глубокого реактивного ионного травления или рентгеновской литографии, гальванопластики и литья (LIGA), страдает высокой шероховатостью боковых стенок микроканалов (10 – 30 нм). Для улучшения характеристик трехмерных микроструктур МЭМС в работе [189] было предложено комбинированное использование процессов сухого и анизотропного влажного травления [182] кремниевой микроканальной рентгеновской оптики: первый – для придания микроструктуре требуемой оптической формы, второй – для получения гладких стенок каналов.

Для уменьшения шероховатости стенок каналов авторы работы [190] рассмотрели метод водородного отжига. Обычно эта техника используется для уменьшения беспорядка и внутреннего напряжения в кремниевой пластине [191]. Применяя водородный отжиг при температуре 1000 – 1300° С, атомы кремния на поверхности спонтанно перемещаются, чтобы минимизировать поверхностный потенциал. Среднеквадратичная шероховатость поверхности после водородного отжига может быть чрезвычайно мала (порядка 0,1 нм).

В работах [192, 193] описывается процесс сверхточной полировки до шероховатости < 3 нм с использованием переменного магнитного поля. Основным фактором, определяющим успех полировки, является воздействие абразивных частиц на заготовку силой магнитного поля. Было обнаружено, что процесс в основном контролируется частотой колебаний и напряженностью магнитного поля.

Для изготовления оптики Вольтера I, очевидно, следует изогнуть микроканальную пластину в зеркальный блок и соединить две пластины с разным радиусом кривизны. Однако в случае кремниевой структуры упругая деформация затруднена из-за хрупкости и жесткости кремния. В этом случае возможно использовать технологию горячей пластической деформации кремния. Монокристаллическую кремниевую пластину можно пластически деформировать в трехмерную форму путем помещения пластины между вогнутым и выпуклым штампами при высокой температуре ($> 700^\circ \text{C}$) [194]. Теоретический предел углового разрешения этой новой рентгеновской оптики МЭМС D_h возникает в результате дифракции рентгеновских лучей внутри поры: $D_h \sim \lambda/d$ (d – размер поры) [190, 195].

6. Использование оптики Киркпатрика-Баеза в рентгеновских телескопах.

В качестве альтернативы инструментам на основе оптики Вольтера I, авторы работы [196] предложили несколько конфигураций телескопа К-В, которые могут найти применение для астрономических наблюдений, таких как съемки с высокой чувствительностью, фотометрия и некоторые виды спектроскопии, где не высокое угловое разрешение, а большая эффективная приемная площадь является наиболее важным фактором. В космосе оптика

К-Б впервые использовалась на ракетах на ранних стадиях рентгеновской астрономии [197].

Оптика К-В предлагает средства визуализации мягких рентгеновских лучей со скромным разрешением и полем зрения в несколько угловых минут, стоимость которого значительно ниже обычной конструкции Вольтера I. Такая недорогая система может быть полезна для специализированного наблюдения астрономических рентгеновских источников с орбиты в течение длительного времени.

Для астрофизических измерений с целью увеличения площади сбора, аналогично оптике Вольтера I используется сегментированная оптическая система К-Б, состоящая из двух скрещенных модулей, каждый из которых представляет собой стопку тонких параболических зеркал (рис.14).

О первой попытке создания астрономического модуля К-Б было сообщено в работе [198]. Авторы построили тестовый модуль К-Б, который состоял из 94 кремниевых пластин диаметром 150 мм и толщиной 0,72 мм.

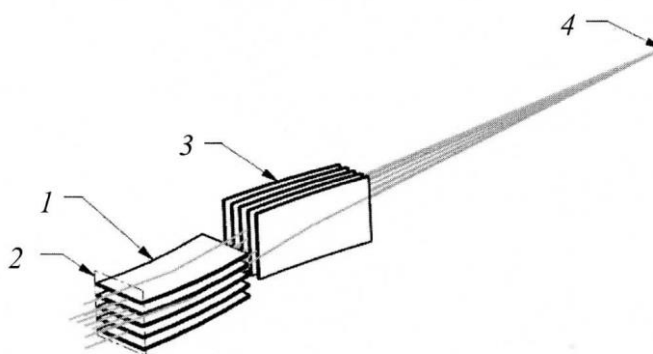


Рис.14. Принципиальная схема сегментированной оптической системы К-Б: 1, 3 – зеркальные модули; 2 – приемная поверхность системы КБ; 4 – фокус [199].

Рентгеновская оптика К-В представляет собой перспективную альтернативу широко используемой системе зеркал Вольтера I, в основном из-за менее дорогого производства (нет необходимости в дорогих оправках, возможно использование имеющихся в продаже деталей, таких как кремниевые пластины и т. д.).

Оптический модуль К-Б обеспечивает хороший компромисс между большой приемной апертурой, достаточно хорошим угловым разрешением, большим полем зрения, низкой стоимостью и легкостью изготовления. Основные преимущества геометрии К-Б состоят в том, что все отражатели идентичны и что каждый отражатель функционирует независимо. Проблема создания хорошего зеркала сводится к двум задачам: массовому производству тонких, легких и жестких пластин, а также формированию соответствующей параболической кривизны для каждой пластины [200]. Сегментация зеркальных поверхностей чрезвычайно важна не только для производства зеркальных пластин, но и для поддержания веса больших телескопов в разумных пределах [201], т.е. зеркальные сегменты модулей

К-Б должны быть тонкими и легкими [202]. Недавние успехи в создании кремниевых и стеклянных пластин [203, 204] делают сегментированную оптику К-Б перспективной для оснащения ею современных рентгеновских телескопов [199, 205, 206]. Изготовление компонентов оптики К-В представляют собой менее трудоемкую и менее дорогую альтернативу оптике Вольтера I [206, 207].

Активная рентгеновская оптика должна быть очень эффективной также в случае оптики К-Б. С помощью пьезоэлектрических контроллеров, действующих только в одном измерении, можно последовательно оптимизировать форму каждого зеркала. Первый и второй модули могут быть настроены независимо, а затем соединены с довольно мягкими допусками [208].

Телескоп КВ можно удобно разделить на модули практически любого размера. Для каждой половины телескопа необходима точность изготовления формы только в одном измерении. Юстировка двух ортогональных сечений не критична; поэтому она может быть сделана независимо, не испытывая много сложностей в процессе окончательной сборки. Для малых углов вне-осевое разрешение телескопа К-Б изменяется линейно с углом, тогда как для оптики Вольтера I оно изменяется как квадрат угла.

7. Использование оптики «глаза лобстера» в рентгеновских телескопах.

Мониторинг больших областей неба представляет особый интерес в рентгеновской астрономии из-за сильной изменчивости во времени большинства источников рентгеновского излучения. Ожидается, что широкопольные рентгеновские телескопы с фокусирующей оптикой станут важным инструментом в будущих проектах космической астрономии. Широкопольная рентгеновская оптика была предложена в 70-е годы Шмидтом [209] и Энджелом [210]. Эта оптика дает прекрасную возможность получить очень широкое поле зрения (1000 квадратных градусов и более), в то время как широко используемые классические зеркала скользящего падения Вольтера ограничены примерно 1° [17].

Двумерная система Шмидта похожа на оптику К-Б, но состоит не из двух ортогональных стопок изогнутых зеркальных фольг, а из стопок плоских фольг, расположенных веером по периметру двух цилиндров с радиусами R_1 , R_2 (рис.15а). Оптику Энджела можно рассматривать как особый случай системы Шмидта, где обе стопки лежат в том же положении, но имеют одинаковые радиусы $R_1 = R_2 = R$. В этом случае две стопки зеркал образуют квадратные поры (рис.15б).

Оптику Энджела принято называть оптикой «глаза лобстера». Дело в том, что глаза омаров и других ракообразных (креветок, раков и т. д.) устроены иначе, чем у большинства других животных: они не преломляют, а отражают падающий на них свет. То есть для фокусировки света на сетчатке глаза используются не линзы, каковыми являются хрусталики глаз высших

позвоночных, а множество крошечных каналов с отражающими внутренними стенками и почти идеально квадратного сечения, расположенных на сферической поверхности глаза лобстера. Такая система обладает чрезвычайно высокой светочувствительностью, практически недостижимой при использовании обычных линз [211].

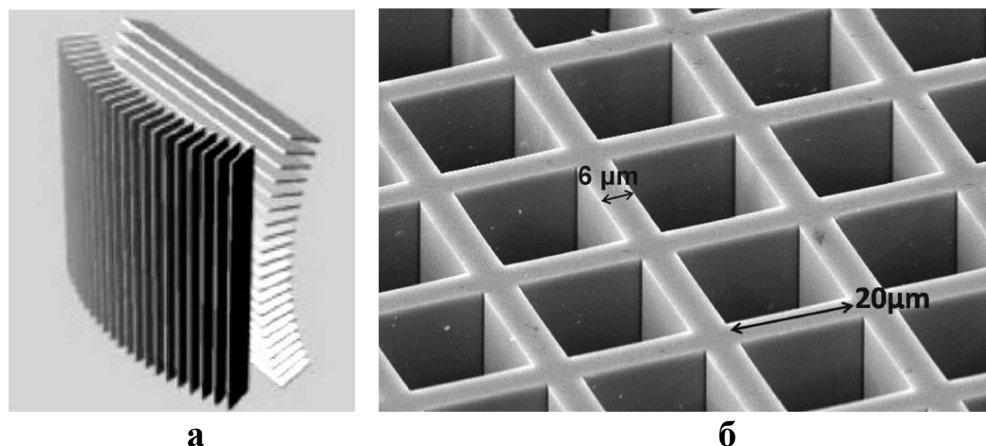


Рис.15. Принцип оптики глаза лобстера в расположении Шмидта (а). СЭМ-изображение микропор [187](б).

Особый интерес к оптике «глаза лобстера» в геометрии Энджела (ГЛЭ) проявили астрофизики [14, 16, 17, 212 – 216].

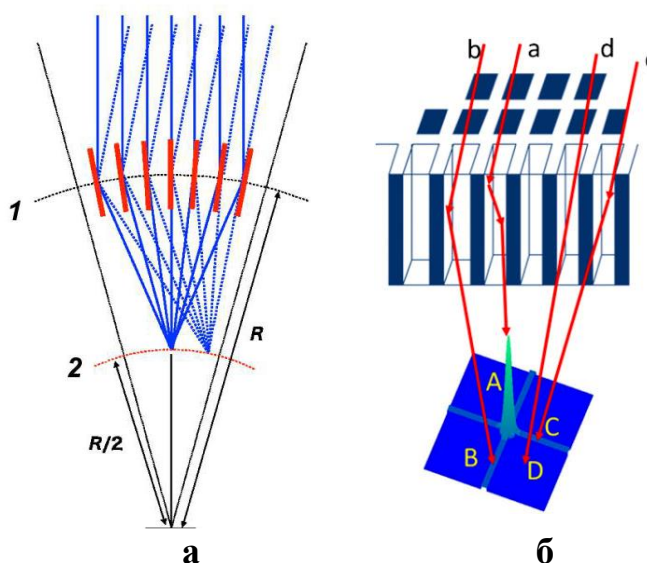


Рис. 16. Схема оптики ГЛЭ, показывающая рентгеновские зеркальные ячейки 1, установленные на изогнутой сферической поверхности с радиусом R и фокальную поверхность 2 на фокусном расстоянии $R/2$. Рентгеновское излучение от разных положений источников на небе фокусируются в разных местах фокальной поверхности [215](а). Формирование крестообразной функции рассеяния точки (PSF): лучи (а), отраженные от двух ортогональных стенок канала, образуют фокус, отраженные только от одной стенки (b и c) фокусируются в линию (B и C), проходящую через двумерный фокус, а лучи (d), не претерпевшие отражения, формируют фон (область D). [216] (б).

Зеркало ГЛЭ представляет собой микроканальную пластинку, расположенную на сфере с радиусом R (рис. 16а). Однако в отличие от рассмотренной выше оптики МКП и МЭМС, в которых фокус образуют однократно отраженные в каждой пластинке рентгеновские лучи, в оптике ГЛЭ фокус формируется лучами, последовательно отраженными от соседних (ортогональных) стенок канала. Эти лучи концентрируются на фокальной поверхности радиусом $R/2$. Линза ГЛЭ генерирует крестообразную функцию рассеяния точки (PSF) с ветвями, возникающими в результате отражений фотонов от одной стенки канала. В результате структура фокуса представляет собой яркое пятно с более слабым крестом и гораздо менее интенсивным диффузным фоном (рис. 16б).

Недостаток оптики ГЛЭ – необходимость в формирующих изображение детекторов большого размера, устанавливаемых на фокальной поверхности. Геометрическое угловое разрешение $\Delta\theta_g$ может оцениваться как отношение размера канала d к фокусному расстоянию F ($F = R/2$):

$$\Delta\theta_g = 2d/R. \quad (5)$$

Наконец, поле зрения FoV объектива с $N \times N$ каналами определяется диапазоном углов, который формируется всеми каналами [217]:

$$\text{FoV} \approx N(2d/R) = N\Delta\theta_g. \quad (6)$$

Размер поля зрения зависит только от угловых размеров сферической оптики и детектора. Если оптика и детектор покрывают полусферу, поле обзора – все небо. Поэтому такая оптика идеально подходит для очень широкого применения в астрономии, несмотря на низкую разрешающую способность.

Если параллельный пучок падает на линзу ГЛЭ, апертура ограничена квадратом со стороной, равной $2R\theta_c$. Поэтому самая большая достижимая эффективная область равна [217]

$$(A_{\text{эфф}})_{\text{max}} = 4(R\theta_c)^2. \quad (7)$$

Чтобы получить максимально эффективное поле зрения требуется $\theta_c \approx (180/\pi) (8^{1/2} + 1)d/L$ градусов (L – осевая длина канала), поэтому при использовании материала покрытия высокой плотности, такого как иридий, при энергии фотонов 1 кэВ оптимальное соотношение $L/d = 50$. Производятся микрокапиллярные пластинки со стандартными размерами пор обычно 20 или 40 мкм, так что толщина пластин находится в диапазоне 1 – 2 мм.

В работе [218] были выявлены все существенные aberrации, которые ограничивают характеристики оптики с квадратными порами микроканальных пластин, используемых в качестве рентгеновской оптики ГЛЭ. Существуют три собственные aberrации, связанные с геометрией ГЛЭ, которые ограничивают угловое разрешение. Сферическая aberrация дает угловое разрешение $\Delta\theta_s = 32^{1/2}(d/L)^3$, геометрический размер пор ограничивает угловое разрешение до $\Delta\theta_g = d/F$ и дифракция ограничивает угловое разрешение до $\Delta\theta_d = 2\lambda/d$. Использование оптимального отношения $L/d = 50$ дает предел сферической aberrации $\Delta\theta_s \approx 9''$. При отсутствии

внешних aberrаций будет получено максимальное угловое разрешение, если размер пор выбран таким, чтобы геометрические и дифракционные пределы были равны. В этом случае требуется $d = (2\lambda F)^{1/2}$, что дает $\Delta\theta_g = \Delta\theta_d = (2\lambda/F)^{1/2}$. При $E = 1$ кэВ, $F = 1$ м и $d = 50$ мкм $\Delta\theta_g = \Delta\theta_d = 10''$. Если объединить сферические, геометрические и дифракционные пределы, получим собственное угловое разрешение при 1 кэВ $(\Delta\theta_g^2 + \Delta\theta_d^2 + \Delta\theta_s^2)^{1/2} = \Delta\theta_i \approx 17''$. Повторяя этот расчет для $F = 0,3$ м и используя ту же самую величину L/d , получим оптимальный размер пор $d = 27$ мкм, $\Delta\theta_g = \Delta\theta_d = 19''$ и общий предел углового разрешения $\Delta\theta_i = 28''$.

Размер пор d доступных стеклянных микроканальных пластинок хорошо согласован с пределами оптимального углового разрешения геометрии ГЛЭ для рентгеновского телескопа в энергетическом диапазоне 0,1 – 10 кэВ. Они могут быть изготовлены с толщиной L в диапазоне 0,9 – 4 мм, что дает оптимальное значение $L/d \sim 50$ для эффективной рентгенографии в том же диапазоне энергии. При формировании изображений в узком поле зрения ($F > 1$ м), предел собственного углового разрешения составит 10 – 20'', а для более коротких фокусных расстояний, больше подходящих для приложений, требующих широкого поля зрения, предел будет находиться в диапазоне 20 – 30'' [218].

Однако угловое разрешение также в значительной степени зависит от производственных ошибок и внешних факторов. Поэтому ряд работ было посвящено оптимизации оптических характеристик линзы ГЛЭ [215 – 217, 219 – 221]. Например, авторами работы [219] были предложены способы оптимизации технологии подготовки и вытяжки стекла, контроля производственных процессов и метрологии, проведено усовершенствование процессов укладки волокон, травления сердцевины стекла и термоосаждения микроканальных пластин, а также методы покрытия стенок каналов отражающей пленкой. Для улучшения углового разрешения в работе [221] было рекомендовано применять терморегулирование оптики ГЛЭ.

Оптическая система ГЛЭ была использована в нескольких научных миссиях, нацеленных на мониторинг всего неба: *Lobster-ISS* [18], *AXIOM* [222], *STORM* [223, 224], *SMILE* [225], *SVOM* [226], *THESEUS* [227].

Миссия *THESEUS* была разработана для расширенного изучения пространства высокоэнергетических переходных явлений на протяжении всей космической истории. Его движущие научные цели направлены на поиск ответов на несколько фундаментальных вопросов современной космологии и астрофизики. Мягкий рентгеновский сканер SXI миссии, покрывающий энергетическую область 0,3 – 6 кэВ, состоит из набора четырех рентгеновских модулей оптики ГЛЭ с общим полем зрения 1 ср. с точностью определения местоположения источника 0,5–1'. Апертура оптики образована массивом из 8x8 микроканальных пластинок с квадратными порами площадью 40x40 мм² каждая (рис. 17). Микроканальные пластинки установлены на сферической рамке с радиусом кривизны 600 мм. Фокальная плоскость каждого модуля сканера представляет собой сферическую поверхность радиусом кривизны 600 мм, расположенную на расстоянии 300

мм (фокусное расстояние) от апертуры оптики. Детекторы для каждого модуля состоят из массива 2x2 широкоформатных детекторов, наклоненных таким образом, чтобы приблизиться к сферической фокальной поверхности. Размер каждой ПЗС-матрицы $81,2 \times 67,7 \text{ мм}^2$, размер пикселя 18 мкм, количество пикселей на ПЗС 4510×3758 .

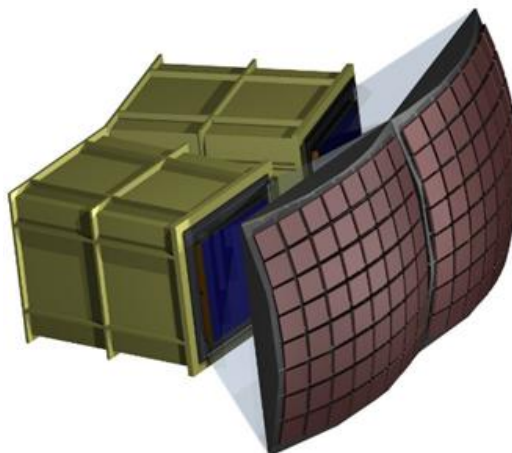


Рис. 17. Общий вид двух из четырех модулей оптики ГЛЭ сканера SXI миссии *THESEUS* [227] (см. текст).

Создание небольших и легких оптических модулей имеет решающее значение для развития малых спутников, предназначенных для мониторинга всего неба в режиме реального времени. Поэтому появилось большое количество работ (например, [228 – 236]), в которых рассматривается возможность использования оптики «глаза лобстера» в геометрии Шмидта (ГЛШ) в различных масштабах, включая размеры и фокусные расстояния, приемлемые для спутников нано- класса. Были разработаны, построены и испытаны линзы Шмидта, от очень маленьких ($3 \times 3 \text{ мм}^2$) до больших ($300 \times 300 \text{ мм}^2$) [228] (рис. 18).



Рис. 18. Изображение Солнца в видимом свете с помощью мини- объектива ГЛШ [229].

Оптика ГЛШ может обеспечить большое поле зрения, до 100 квадратных градусов. Но нано- размерный спутник, похоже, не сможет осуществлять мониторинг всего неба с приемлемой чувствительностью. Однако такой

спутник может быть наведен на конкретную область неба, содержащую большое количество источников [237].

Одним из таких малых спутников семейства CubeSat является *VZLUSAT-1*. Размер этого спутника составляет 100 мм x 100 мм x 230 мм. *VZLUSAT-1* оснащен 1-мерной оптикой ГЛШ, которая представляет собой упрощенную версию 2-мерной модели. Она состоит из 50 стеклянных фольг, которые покрыты золотом с обеих сторон для отражения рентгеновских лучей. Апертура составляет 29x19 мм², а фокусное расстояние 250 мм. Излучение собирается с поля зрения 3°, поэтому телескоп считается широкоугольным по сравнению с другими космическими телескопами. Кодированная маска в виде тонкого вольфрамового стержня расположена перед оптикой, чтобы локализовать положение наблюдаемого объекта во втором измерении [231, 232].

В отличие от *VZLUSAT-1* каждый подмодуль двумерной рентгеновской оптики ГЛШ системы *REX* состоит из 55 кусочков тонкой плоской стеклянной фольги (толщиной 0,34 мм), расположенных так, чтобы фокусное расстояние было около 1 метра. Внешние размеры модуля составляют примерно 80 x 80 x 170 мм [235].

Оптика ГЛШ для демонстратора CubeSat рассчитана на диапазон энергий от 500 эВ до 30 кэВ. Прибор предполагает ориентацию и стабилизацию в пространстве для наблюдения области неба 6°x6° с разрешением лучше 5 – 9'. Режим сканирования предназначен для мониторинга переходных процессов и эруптивных триггеров, таких как переходные процессы рентгеновского излучения, вспышки сверхновых и /или послесвечение вспышек гамма-излучения [236].

8. Заключение. Выводы и перспективы.

За последние три десятилетия оптика для фокусировки мягкого рентгеновского излучения, используемая в астрономии, добилась больших успехов: созданы широкоугольные инструменты на основе оптики «глаза лобстера» для мониторинга всего неба, а также телескопы Вольтера различных модификаций с хорошим угловым разрешением и большой эффективной площадью сбора данных.

В астрофизике существуют важные научные проблемы, которые можно решить только с помощью рентгеновских телескопов с микросекундным угловым разрешением. Угловое разрешение зависит от многих факторов: aberrаций, шероховатости поверхности зеркала, точности воспроизведения его формы и точности юстировки оптических узлов телескопа.

Аберрации могут быть лимитированы использованием модификаций схемы Вольтера I, например, геометрии Вольтера-Шварцшильда в будущих миссиях *STAR-X*, *AXIS*, *ATHENA*, *X-ray Surveyor*.

Одна из проблем, возникающих при создании будущих рентгеновских телескопов, заключается в ограничениях по весу ракет-носителей, используемых для выведения обсерватории на орбиту. Монолитная оптика,

обеспечивающая отличное угловое разрешение (0,5" для телескопа миссии *Chandra*) за счет высокого качества поверхности зеркала, тяжелая и поэтому может содержать ограниченное количество вложенных зеркальных оболочек, что лимитирует эффективную площадь телескопа. Конструкция оптической системы на основе тонких легких зеркальных оболочек (в телескопах миссий *XMM-Newton*, *Swift*, *eROSITA*, *SAX*, *CAST*, *FOXSI*, *ART-XC*, *MiXO*) подходит, в частности, для получения большой области сбора, потому что плотное вложение большого количества оболочек позволяет обнаруживать дальние и слабые источники рентгеновского излучения. Однако тонкие зеркальные корпуса более подвержены деформациям, и поэтому более высокая плотность вложенных оболочек всегда достигается за счет точности фокусировки. Аналогичные проблемы испытывают оптические системы, использующие, например, стеклянные зеркальные сегменты (оптика миссий *Constellation-X*, *IXO*, *X-ray Surveyor*, *SMART-X*, *Generation-X*). Поэтому коррекцию формы зеркал телескопов миссий *X-ray Surveyor*, *SMART-X* и *Generation-X* предполагается осуществлять с помощью активной рентгеновской оптики.

Использование кремниевых подложек в таких будущих миссиях, как *ATHENA*, *Arcus*, *STAR-X*, *Lynx* также считается перспективным для получения углового разрешения, которое определяется только дифракционными эффектами.

Изготовление, юстировка и установка зеркал для получения дифракционно ограниченных изображений представляет собой серьезную проблему. В частности, требуется согласование длин оптического пути в телескопе с точностью до долей длины волны. Даже если бы длины пути для всех оболочек в телескопе Вольтера I были согласованы, для того, чтобы все оболочки были конфокальными, углы скольжения должны быть порядка 1 мкрад. В отличие от конструкции Вольтера I, конструкция Вольтера II допускает большое фокусное расстояние, которое слабо зависит от угла скольжения. В качестве примера в работе [238] представлены две компактные конструкции телескопов скользящего падения геометрии Вольтера II с вложенными зеркальными оболочками для получения дифракционно ограниченных рентгеновских изображений: конструкция телескопа с угловым разрешением 0,014" и эффективной площадью 2,9 м² при энергии фотонов 5 кэВ, а также телескоп меньшего размера с разрешением 0,525" и эффективной площадью 645 см² при 1 кэВ.

Поскольку отношение фокусного расстояния к диаметру апертуры для рентгеновского телескопа с дифракционным ограничением чрезвычайно велико ($\sim 10^5$), вероятно, потребуется два космических аппарата, летящих строем на расстоянии сотен километров друг от друга, один из которых будет нести оптический модуль, а другой – детектор. Несмотря на то, что существует множество проблем для получения рентгеновских изображений с микросекундным угловым разрешением, не обнаружено никаких фундаментальных препятствий для его осуществления [238].

Таким образом, руководствуясь новейшими достижениями в области изготовления зеркал и метрологии, научное сообщество продвигается к заветной цели: получение легкой оптики с большой эффективной площадью сбора и угловым разрешением $< 0,1''$. Следует ожидать, что в этом движении оптика Киркпатрика-Баеза, занимая свою нишу в рентгеновской оптике скользящего падения, также примет активное участие.