

УДК 520.2, 520.16

Роуландовский спектрограф в проекте космического телескопа Т–170М

В.Ю. Теребиж

98409 Крым, Научный, Украина; terebizh@crao.crimea.ua
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Крымская астрофизическая обсерватория

Поступила в редакцию 20 марта 2006г.

Аннотация. Представлены результаты расчетов оптической схемы спектрографа с высокой целью (Long-Slit Spectrograph, LSS) для телескопа Т–170М, который предполагается установить на борту космического аппарата СПЕКТР–УФ. Входная щель LSS расположена в $10'$ от оптической оси телескопа, ширина щели составляет $1''$ (82.4 мкм), ее высота – $75''$ (6.2 мм). Спектрограф предназначен для наблюдений в диапазоне длин волн $1150–3000 \text{ \AA}$ со спектральным разрешением $\mathcal{R}_* \simeq 2000–4000$ для звездообразных объектов и $\mathcal{R} \simeq 2000–3000$ – для протяженных объектов. Пространственное разрешение LSS изменяется от $0''.35$ в центре щели до $0''.75$ на ее краях. Спектрограф рассчитан согласно модифицированной схеме Роуланда с вогнутой тороидальной дифракционной решеткой и единственным отражением света между входной апертурой и приемником света. Приблизительные размеры приемника – $10 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$, его ожидаемое разрешение составляет $20–25$ мкм.

ROWLAND SPECTROGRAPH IN THE T–170M SPACE TELESCOPE PROJECT,
by V. Yu. Terebizh. The optical design and performance of the Long-Slit Spectrograph (LSS) for the space telescope T–170M is described. The telescope is assumed to be placed on the SPECTRUM–UV space vehicle. The rectangle entrance slit of the LSS of size $1'' \times 75''$ ($82.4 \mu\text{m} \times 6.2 \text{ mm}$) is mounted at the angular distance $10'$ off the telescope optical axis. The spectrograph is intended for observations in the $1150–3000 \text{ \AA}$ waveband with spectral resolution $\mathcal{R}_* \simeq 2000–4000$ for the star-like objects, and $\mathcal{R} \simeq 2000–3000$ – for the spread objects. Space resolution of the LSS varies from $0''.35$ at the center of the slit up to $0''.75$ at its edges. The optical layout of the spectrograph is based on the modified Rowland circle design with a concave toroidal diffraction grating and only one reflection of light in between the entrance and exit apertures. The detector approximate size is $10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, its expected resolution is $20–25 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: Телескопы, астрономическая оптика

1 Введение

Телескоп Т–170М диаметром 1.7 м предназначен для исследования астрономических объектов в ультрафиолетовом диапазоне спектра с длиной волны $\lambda \geq 1150 \text{ \AA}$ с борта космического аппарата СПЕКТР–УФ. Сопутствующий комплекс научных приборов включает в себя спектрограф высокого

разрешения (см. описание HIRDES, 2001), спектрограф с высокой щелью, спектрополяриметр (Кучеров и др., 1997; Ефимов, 2004) и камеру поля (Теребиж, 1995). Научная проблематика проекта обсуждается в сборнике под редакцией Шустова и Вибе (2001), оптическая схема телескопа рассчитана автором (Теребиж, 2002).

Первые расчеты спектрографов умеренного и низкого разрешения для ультрафиолетового диапазона в рамках проекта СПЕКТР–УФ были выполнены в начале 1990-х годов (Налетто и др., 1992; Теребиж, 1994; Гершберг, 1996; Гершберг и др., 1996). Эти расчеты носили разведочный характер; они показали, в частности, неприемлемость схемы Джонсона–Онака и перспективность использования дифракционных решеток с тороидальным профилем поверхности в схемах Пашена–Рунге и Роуланда. Для создания реалистического проекта спектрографа с высокой щелью (Long-Slit Spectrograph, LSS) понадобилось расширить рамки исследования, в частности:

- Согласовать оптическую схему LSS с оптической схемой телескопа. Это требует размещения входной щели спектрографа на искривленной фокальной поверхности в 10 угловых минутах от оптической оси телескопа, надлежащей ориентации прибора и расчета оптической схемы спектрографа с учетом aberrаций внесосевых изображений объектов, создаваемых телескопом на входной щели LSS.
- Обеспечить требуемое качество спектра для объектов, расположенных не только в центре входной щели, но и на достаточно большом удалении от центра, т.е. рассчитать собственно спектрограф с высокой щелью.
- Моделировать равномерное освещение щели по ее ширине, что позволит выяснить спектральное разрешение при наблюдениях протяженных объектов.
- Изучить возможность создания оптических схем с минимальным количеством каналов и движущихся элементов. Принимая во внимание то обстоятельство, что спектрограф предполагается разместить на космической платформе, преимущества такого решения представляются очевидными.
- Согласовать разрешение оптической схемы спектрографа с характеристиками современных приемников света: их габаритами, размерами пикселей и спектральной чувствительностью.
- Выяснить допуски на положения и физические параметры элементов LSS.

Эти задачи были предметом расчетов¹, подробное описание которых дано в нашем отчете по проекту (Теребиж, 2005). После обсуждения сравнительных характеристик различных версий LSS в Крымской астрофизической обсерватории и в Институте астрономии РАН было решено остановиться на простой двухмодовой схеме, один канал которой оптимизирован для спектрального диапазона 1150 – 1775 ÅÅ (Far Ultraviolet, FUV), а другой – для диапазона 1750 – 3000 ÅÅ (Near Ultraviolet, NUV). Описание этой схемы приводится в настоящей статье. Общие характеристики предлагаемого спектрографа для удобства суммированы в таблице 1.

2 Оптическая схема телескопа T–170M

Телескоп представляет собой апланат Ричи–Кретьена с относительным фокусным расстоянием $\phi \equiv F/D = 10.0$. Напомним, что в схеме Ричи–Кретьена остаются неисправленными астигматизм и кривизна поля третьего порядка. Как следствие, оптическая система обладает двумя фокальными поверхностями: тангенциальной (ее называют также меридиональной) и сагиттальной. На фокальных поверхностях, в данном случае вогнутых в ту же сторону, что и поверхность главного зеркала, внесосевые изображения звезд вытянуты во взаимно перпендикулярных направлениях. Между тангенциальной и сагиттальной поверхностями расположена медиальная поверхность, на которой изображения имеют примерно круговую форму (circles of least confusion). Разумеется, округлый вид звездных изображений на медиальной поверхности отнюдь не означает уменьшения влияния астигматизма в связанных с нею навесных приборах, в частности, спектрографе: при дальнейшем расхождении световых лучей астигматизм проявляется в полной мере.

¹ Использовалась оптическая программа ZEMAX (ZEMAX Development Corporation, U.S.A.)

Таблица 1. Общие характеристики спектрографа с высокой щелью

Удаление входной щели от оптической оси	10' (49.5 мм)
Входная апертура	Прямоугольная
Ширина	1" (82.4 мкм)
Высота	75" (6.2 мм)
Покрытие оптических поверхностей	Al + MgF ₂
Спектральный диапазон	
Далекий ультрафиолет (FUV)	1150 – 1775 Å
Близкий ультрафиолет (NUV)	1750 – 3000 Å
Оптическая схема каждого из двух каналов LSS	Модифицированная схема Роуланда с одним отражением между входной апертурой и детектором света
Диспергирующие элементы	Вогнутые тороидальные решетки
Радиусы кривизны	R ₁ и R ₂ ~ 1 м
Световой диаметр	110 мм
Плотность штрихов	
FUV	1300 штрихов/мм
NUV	750 штрихов/мм
Форма фокальной поверхности	Сфера радиусом ~ 1 м
Спектральное разрешение \mathcal{R}_* для звезд	
FUV	2600 – 4000
NUV	2000 – 3400
Спектральное разрешение $\mathcal{R} \equiv \lambda/\delta\lambda$ для протяженных объектов	
FUV	2000 – 3000
NUV	1500 – 2700
Пространственное разрешение вдоль щели	0'.35 – 0'.75
Световые размеры приемника света	
FUV	6.3 мм × 85.2 мм
NUV	6.3 мм × 98.2 мм
Ожидаемое разрешение приемника света	20 – 25 мкм
Приближенные световые габариты оптических каналов	1050 × 250 × 110 мм

Сводка параметров телескопа Т-170М, необходимых для воссоздания оптической схемы всей системы, дается в таблице 2, содержащей также характеристики поверхностей астигматических изображений. Обратим внимание, что на расстоянии 10' от оптической оси телескопа, где расположена входная щель LSS, линейное расстояние между двумя крайними астигматическими поверхностями составляет примерно 0.60 мм; в этом интервале и следует искать оптимальное положение входной щели LSS.

3 Требования к спектрографу

Задачи, перечисленные во Введении, нуждаются в более подробном обсуждении и уточнении. Это касается, в частности, изучаемого спектрального диапазона, пространственного и спектрального разрешений, а также приемников света.

3.1 Спектральный диапазон

Первоначально планировалось довести коротковолновую границу изучаемого в спектрографах диапазона примерно до 1020 Å, однако это представляется нереальным ввиду резкого падения

Таблица 2. Параметры оптической схемы телескопа T-170M

Тип оптической системы	Апланат Ричи–Кретьена
Положение апертурной диафрагмы	Оправа главного зеркала
Диаметр апертуры	1700 мм
Эквивалентное фокусное расстояние	17.0 м
Масштаб изображений на медиальной фокальной поверхности	82.4 мкм в угловой секунде (4.95 мм в угловой минуте)
Угловой диаметр поля зрения $2w$	0°50
Спектральный диапазон	$\lambda \geq 1150 \text{ \AA}$
Радиус кривизны при вершине главного зеркала	-7820.0 мм
Квадрат эксцентриситета главного зеркала	1.029508
Радиус кривизны при вершине вторичного зеркала	-2214.761 мм
Квадрат эксцентриситета вторичного зеркала	2.848076
Расстояние между вершинами зеркал	3057.317 мм
Вынос фокальной поверхности за вершину главного зеркала	650.0 мм
Диаметр выходного зрачка телескопа	452.35 мм
Удаление выходного зрачка от фокальной поверхности	-4523.52 мм
Радиус кривизны тангенциальной поверхности	-727.29 мм
Радиус кривизны медиальной поверхности	-882.53 мм
Радиус кривизны сагиттальной поверхности	-1126.28 мм
Расстояние между крайними астигматическими поверхностями для полевого угла $10'$	0.60 мм

коэффициента отражения света слоем $Al + MgF_2$ – предполагаемым покрытием зеркальных поверхностей телескопа и дифракционных решеток.

Данные об отражательной способности слоев $Al + MgF_2$ различной толщины, представленные в фундаментальном исследовании Мэддена (1963), удовлетворительно согласуются с результатами современных измерений (см., например, Кучнер, 2004). Согласно этим данным, уже два зеркала телескопа снижают коэффициент пропускания света на длине волны 1020 \AA примерно до 4%; при последующем отражении света дифракционной решеткой коэффициент пропускания системы станет меньше 1%. Соответствующий эффективный диаметр системы на длине волны 1020 \AA составляет лишь около 15 см. Это значение еще далее уменьшится, если принять во внимание реальный квантовый выход приемника света. Только при $\lambda > 1150 \text{ \AA}$ максимально возможное значение эффективного диаметра достигает приемлемого уровня порядка 75 см. Поэтому в качестве коротковолновой границы изучаемого спектра разумно принять 1150 \AA . Заметим, что это же значение было выбрано в качестве нижней границы изучаемого диапазона в космическом спектрографе COS (Cosmic Origins Spectrograph) проекта NASA для исследования ультрафиолетовой области спектра (Грин, 2000).

Поскольку чувствительность современных детекторов света в обсуждаемом диапазоне спектра заметно меняется с длиной волны, обычно спектральный диапазон подразделяют на несколько участков и применяют разные детекторы света. Такое подразделение принято и в данном случае. Граничные длины волн между участками FUV и NUV выбраны указанным в таблице 1 образом с той целью, чтобы облегчить сравнение с характеристиками других проектов спектральных наблюдений в ультрафиолетовой области.

Принятые в наших расчетах значения длины волны даются ниже для каждой из рассматриваемых схем. Эти значения соответствуют т.н. *конфигурациям* оптической схемы спектрографа. Оптимизация каждой схемы проводилась одновременно для всех длин волн с приданием разных весов выбранным участкам спектра.

3.2 Пространственное и спектральное разрешения

Согласно «Техническому заданию на разработку телескопа Т-170» (1998), входные щели спектрографов HIRDES и LSS расположены на угловом расстоянии $10'$ от оптической оси телескопа. В линейной мере удаление щели от оси составляет 49.5 мм. В наших расчетах оптическая ось телескопа считается направленной вдоль оси Z декартовой системы координат. Элементы каждого из каналов LSS размещены в меридиональной плоскости YZ телескопа; при этом щель направлена перпендикулярно плоскости YZ , то есть в направлении XZ (см., например, рис. 2).

Таблица 3. Удаление звездных изображений от центра щели

Угловые секунды	Градусы	Миллиметры
0	0	0
$\pm 15''$	$\pm 0^{\circ}004167$	± 1.24
$\pm 25''$	$\pm 0^{\circ}006944$	± 2.06
$\pm 37''.5$	$\pm 0^{\circ}010417$	± 3.09

Полная высота щели LSS составляет $75''$ (6.2 мм), так что ее крайние точки отстоят от центра щели на $37''.5$. В таблице 3 даны значения углового расстояния изображения звезды от центра щели, принятые при расчетах. Для удобства сравнения с графическими данными программы ZEMAX мы приводим также значения, выраженные в долях градуса.

Ширина входной щели спектрографа определена «Техническим заданием» в $1''$ (82.42 мкм). Изображения звезд, расположенных вдоль щели, показаны на рисунке 1. Можно считать, что диаметр всех изображений составляет 31 мкм, чему в угловой мере отвечает $0''.37$. Поскольку система стабилизации телескопа должна обеспечить сохранение его ориентации за типичное время экспозиции в пределах $0'.1$ (три стандартных отклонения), размытое вследствие дрожания телескопа изображение будет иметь близкий диаметр – около $0''.38$. Если по какой-либо причине изображения звезд будут значительно больше расчетных, их можно рассматривать как протяженные объекты.

В обсуждаемых ниже схемах движению вдоль спектра отвечает направление Y выбранной системы координат, а движению поперек спектра (по высоте щели) пространственная координата X (см. рисунки 2 и 7). Пространственное разрешение δX вычисляется, исходя из величины среднеквадратического диаметра монохроматического изображения звезды в направлении X . Спектральное разрешение для точечных объектов $\mathfrak{R}_* \equiv \lambda/\delta\lambda_*$, где $\delta\lambda_*$ определяется как произведение обратной линейной дисперсии K ($\text{\AA}/\text{мм}$) в спектре на среднеквадратический диаметр D_{rms} монохроматического изображения звезды в направлении Y (мм). Для протяженных объектов спектральное разрешение $\mathfrak{R}(\lambda) \equiv \lambda/\delta\lambda$ оценивается, исходя из ширины $\delta\lambda$ монохроматической проекции всей щели на детекторе, выраженной в длинах волн. При этом предполагается, что щель освещена равномерно по всей ее ширине.

Вообще говоря, получаемая в результате расчетов оптическая схема спектрографа слегка изменяется в зависимости от того, какой относительный вес придается разрешениям вдоль и поперек спектра. Описываемые далее схемы соответствуют заданию одинакового веса спектральной и пространственной разрешающей силы. Выбор весов нетрудно уточнить впоследствии при обсуждении преобладающих научных задач.

Расчеты выполнялись при различных положениях входной щели между двумя астигматическими поверхностями (см. табл. 2). Результаты отличаются незначительно; оптимальное положение щели недалеко отстоит от медиальной поверхности, которой и отвечают приводимые ниже данные.

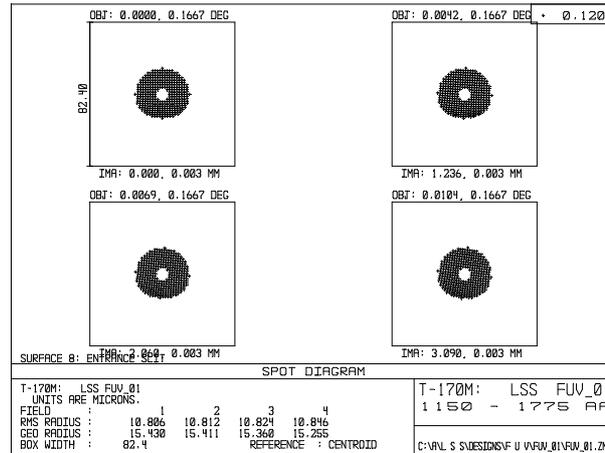


Рис. 1. Изображения звезд вдоль щели спектрографа, расположенной на медиальной поверхности. Сторона квадрата равна $82.4 \text{ мкм} \approx 1''$. Вверху квадратов указаны угловые координаты звезд (градусы), внизу – линейные координаты изображений на щели в миллиметрах (см. таблицу 3).

3.3 Приемники излучения

Характеристики приемников излучения несколько изменяются за время подготовки и выполнения проекта, однако не настолько значительно, чтобы нельзя было указать диапазоны их вероятных значений. В этой связи полезно кратко остановиться на характеристиках детекторов, применявшихся в уже реализованных приборах и выбранных для разрабатываемых ныне проектов наблюдений в ультрафиолетовой области спектра.

Выше уже отмечалось, что для современных детекторов света характерна существенная неравномерность чувствительности в широком спектральном диапазоне, который нас интересует. Чтобы сохранить эффективность системы, обычно применяют разные типы приемников света, разделяя диапазон на две части вблизи длины волны 1775 \AA . Такой путь выбран, в частности, в проектах COS (Грин, 2000) и GALEX (Морисси и др., 2004). В первом спектрографе разделение диапазонов длин волн производится сменой дифракционных решеток и детекторов, во втором проекте разделителем спектра служит дихроичный фильтр диаметром 110 мм . Для достижения требуемой разрешающей силы каждый из поддиапазонов, выбранных в COS, разделяется на еще более узкие участки спектра.

В спектрографе FUSE, выведенном на орбиту в 1999 г., применяются два детектора с микроканальными пластинами на входе. Размеры каждого из детекторов составляют $10 \text{ мм} \times 88.5 \text{ мм}$ с 10-мм зазором между ними. Таким образом, эффективная длина детектора достигает почти 180 мм . Поверхность детекторов изогнута с радиусом кривизны 826 мм . При пикселах размерами $6 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$ разрешение примерно равно $25 \text{ мкм} \times 50 \text{ мкм}$. Впрочем, авторы проекта отмечают, что ввиду большого астигматизма выходного изображения поперек спектра «...пространственное разрешение отсутствует». В спектрографе COS для FUV-канала используются почти такие же детекторы света, однако разрешение улучшено до 25 мкм .

Описанные выше характеристики приемников, а также сведения, предоставляемые ведущим изготовителем приемников излучения в ультрафиолетовом диапазоне – фирмой *Photonis* – позволяют считать вероятной установку в LSS детекторов габаритами около $10 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$ при размере элементов разрешения порядка 20 мкм .

3.4 Сводка исходных требований

В таблице 4 суммированы результаты предыдущего обсуждения желаемых характеристик LSS. Напомним, что этот спектрограф задумывался как дополнение к спектрографу высокого ра-

зрения HIRDES ($\mathcal{R} \sim 50,000$), предназначенному для детального исследования звезд и ярких туманностей. LSS позволит изучать более слабые объекты, в частности, галактики с активными ядрами.

Таблица 4. Требования к LSS

Характеристика	Значение
Спектральное разрешение на длине волны 1500 Å при входной щели шириной 82 мкм (1'')	~ 2000
Полная высота щели	75'' (6.2 мм)
Длина спектрографа	Не более 1050 мм
Разделение спектра в соответствии с чувствительностью приемников света	1150 – 1775 ÅÅ (FUV) 1775 – 3000 ÅÅ (NUV)
Максимальные размеры приемника	10 мм × 100 мм
Размеры элемента разрешения приемника	~ 20 мкм

4 Предварительный анализ задачи

Во избежание недоразумений приведем сначала пояснения терминологического характера. В физической литературе расположение входной щели спектрографа и вогнутой дифракционной решетки на круге Роуанда принято называть схемой Пашена–Рунге, если угол дифракции для середины спектра отличен от нуля, и схемой Роуанда, если этот угол равен нулю, то есть середина спектра расположена на нормали к поверхности решетки (см., например, Соьер, 1951, §6.1, 6.2; Мальшев, 1979, §3.13). Таким образом, схема Роуанда является частным случаем схемы Пашена–Рунге. Второе замечание касается расположения элементов на круге Роуанда. Поскольку такое расположение оптимально лишь в рамках теории аберраций третьего порядка, в современных разработках спектрографов обычно применяются модифицированные схемы Роуанда, только в основных чертах следующие изначальному роуандовскому принципу. Наконец, заметим, что название *схема Роуанда* сейчас часто используют независимо от значения угла дифракции света и положения элементов; мы также будем следовать этой упрощенной терминологии.

Выше отмечалось, что изображения звезд на щели LSS отягчены аберрациями, прежде всего – астигматизмом. То обстоятельство, что астигматизм входного пучка играет заметную роль, нетрудно продемонстрировать, поместив спектрограф, оптимизированный для центра поля зрения, на расстояние 10' от оптической оси или передвинув оптимальный внеосевой спектрограф на оптическую ось телескопа. В обоих случаях схемы показывают плохие изображения. В этой связи возникает вопрос: в какой мере внеосевое расположение LSS влияет на спектральное разрешение? Применительно к данному случаю вопрос можно сузить до следующего: можно ли компенсировать входной астигматизм внеосевых изображений с помощью оптимально подобранной схемы спектрографа с тороидальной дифракционной решеткой? Соответствующий анализ (Теребиж, 2005), в детали которого мы не будем здесь входить, показывает, что ответ на этот вопрос положителен: астигматизм входного пучка можно практически полностью компенсировать в схеме Роуанда с тороидальной решеткой, вносящей астигматизм противоположного знака.

Помимо модифицированной схемы Роуанда для спектральных исследований в ультрафиолетовой области применяют и другие схемы спектрографов, особенно широко – прямую и обратную схемы Уодсворта (Wadsworth). Общее описание схем Уодсворта можно найти в работах Сейя и Намиока (1967) и Шрёдера (2000). Мы изучили ряд этих схем в связи с разработкой LSS. Их преимущество по сравнению с модифицированной схемой Роуанда заключается в компактности, однако качество изображений в схеме Роуанда выше. Это обстоятельство, а

также тот факт, что в спектрографе, выполненном по схеме Роуанда, используется минимальное количество отражений света – лишь одно, определили выбор в пользу схемы Роуанда. Вместе с тем нужно отметить, что крайняя простота этой схемы оставляет оптику мало возможностей для дальнейшего улучшения изображений; спектральное разрешение выше ~ 5000 достигается в ней заметным сужением спектрального диапазона и усложнением поверхностей дифракционной решетки и приемника света.

5 Канал FUV_01 для диапазона 1150 – 1775 Å

5.1 Оптическая схема спектрографа

Расчетные длины волн для канала FUV_01 указаны в таблице 5. Напомним, что оптимизация выполнялась *одновременно* для всей совокупности выбранных длин волн. Основные характеристики схемы приведены в таблице 6.

Таблица 5. Длины волн расчетных изображений звезд на щели

Номер конфигурации	Длина волны (Å)	
	FUV_01	NUV_01
1	1150	1750
2	1200	1800
3	1300	2000
4	1400	2200
5	1500	2400
6	1600	2600
7	1700	2800
8	1775	3000

На рисунке 2 показана оптическая схема телескопа вместе с каналом FUV_01. Как видно, схема включает в себя единственный оптический элемент – тороидальную дифракционную решетку.

В пределах ошибок измерения спектрограф не изменяет эквивалентного фокусного расстояния системы: $F_e = 17,000$ мм. Обратная линейная дисперсия K мало изменяется вдоль спектра, а именно, в пределах ± 0.0008 Å/мм от среднего значения 7.3662 Å/мм. Качество изображений для сферического и цилиндрического детекторов практически одинаково; для определенности мы выбрали сферическую поверхность.

Добавим, что средняя длина волны $\lambda_c = (\lambda_{\min} + \lambda_{\max})/2$ рассматриваемого спектрального диапазона проецируется на центр (вершину) приемника света. Угол поворота считается положительным, если поворот производится по часовой стрелке. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что угол дифракции θ_{2c} для средней длины волны отрицателен; это означает, что нормаль к поверхности решетки в ее вершине находится вне угла, составленного падающим на решетку лучом и дифрагированным лучом, отвечающим середине спектра (см. рис. 6 ниже).

5.2 Спектральное и пространственное разрешения

Рисунок 3 иллюстрирует качество изображений в спектрографе как вдоль направления дисперсии, так и по высоте щели. Представляет интерес полная сводка значений среднеквадратического диаметра D_{rms} монохроматических изображений звезды, соответствующая рисунку 3. Эти значения приведены в таблице 7; ее колонки отвечают длине волны в спектре (Å), а строки – высоте изображения звезды на входной щели (секунды дуги).

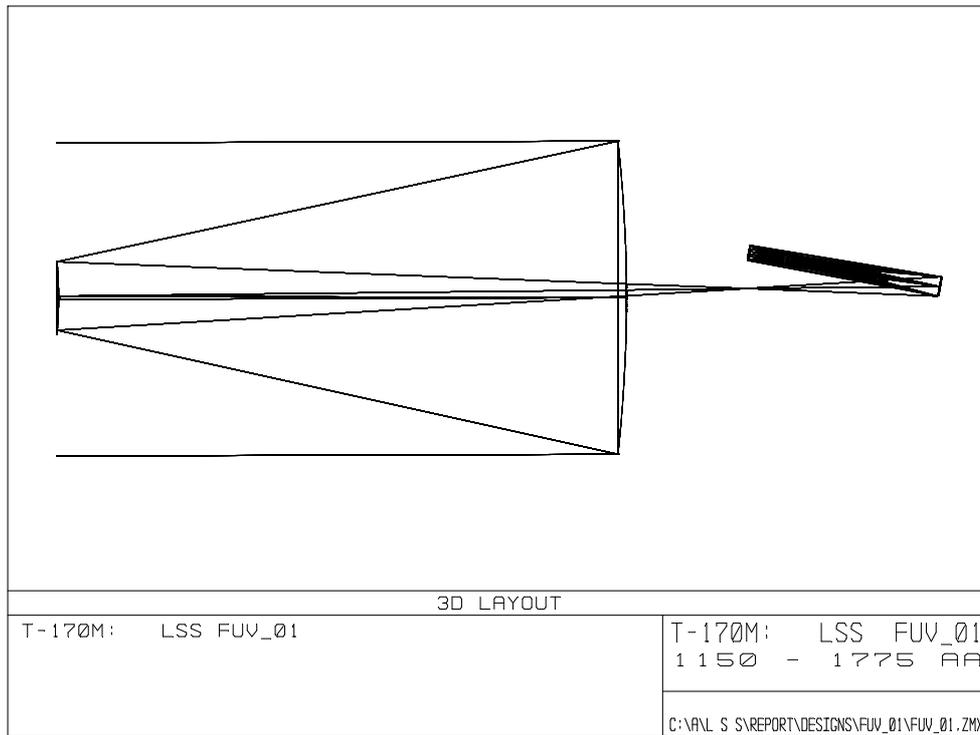


Рис. 2. Оптическая схема телескопа Т-170М и канала FUV_01. Ось Z совпадает с оптической осью телескопа, ось Y направлена вверх, ось X – перпендикулярно плоскости рисунка. Входной пучок света наклонен к оптической оси телескопа на 10°. Коротковолновой участок спектра расположен выше по оси Y.

^ **Таблица 6.** Основные параметры оптической схемы FUV_01

Спектральный диапазон канала FUV	1150 – 1775 Å
Порядок спектра	-1
Эквивалентное фокусное расстояние	17000 мм
Масштаб на детекторе	82.4 мкм/''
Меридиональный радиус кривизны решетки	-1050.0 мм
Сагиттальный радиус кривизны решетки	-1030.7 мм
Плотность штрихов решетки	1300 мм ⁻¹
Световой диаметр решетки	106.8 мм
Удаление решетки от щели	1036.39 мм
Угол падения центрального пучка на решетку θ_1	10° 8339
Угол дифракции θ_{2c} для средней длины волны $\lambda_c = 1462.5 \text{ Å}$	-0° 1239
Удаление детектора от решетки	1044.28 мм
Световые размеры детектора	6.3 мм × 85.2 мм
Радиус кривизны вогнутого сферического детектора	1029.6 мм
Углы поворота детектора	
вокруг оси X	-0° 0016
вокруг оси Y	0° 1691
Обратная линейная дисперсия в спектре	
на длине волны 1150 Å	7.3670 Å/мм
на длине волны 1775 Å	7.3659 Å/мм
средняя	7.3662 Å/мм

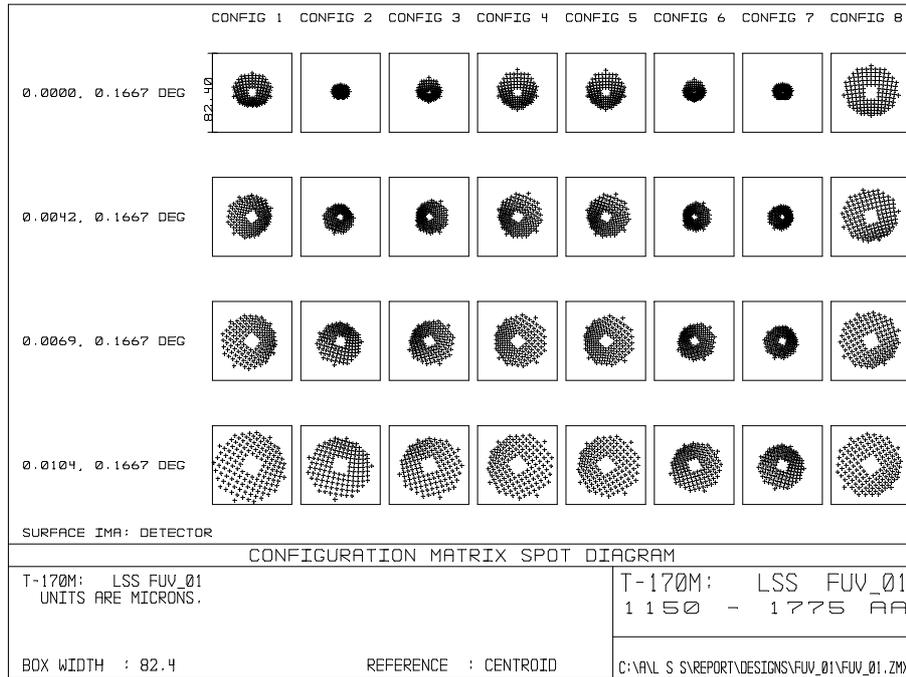


Рис. 3. Точечные диаграммы для канала FUV_01. По горизонтали показаны монохроматические изображения звезд для длин волн из диапазона 1150 – 1775 ÅÅ, указанных в табл. 5, по вертикали – изображения вдоль щели спектрографа согласно табл. 3. Сторона квадрата равна 82.4 мкм (1”).

Таблица 7. Канал FUV_01: среднеквадратический диаметр звездных изображений в спектре (мкм)

	1150	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1775
	(Å)							
0	27.0	10.4	16.4	28.4	27.8	14.6	12.4	40.0
15"	33.0	21.0	23.8	32.6	31.6	20.2	17.6	41.6
30"	41.4	32.4	33.2	39.2	37.6	27.4	24.4	44.4
37.5"	54.2	47.0	46.4	49.6	47.0	37.8	33.8	49.2

В центре щели диаметр изображения D_{rms} изменяется от 10.4 мкм до 40.0 мкм. Столь широкий диапазон обусловлен, прежде всего, характерной для схемы Роуланда зависимостью астигматизма от длины волны. При пикселах детектора размером 20 мкм можно принять, что элемент разрешения для звездообразных объектов составляет не более 60 мкм. Умножая эту величину на обратную дисперсию, 7.366 Å/мм, мы приходим к спектральной ширине элемента разрешения $\delta\lambda_* \simeq 0.44 \text{ Å}$ и разрешению для звездообразных объектов $R_* \simeq 2600 - 4000$.

Для оценки спектрального разрешения при наблюдениях протяженных объектов нужно осветить щель распределенным по координате Y источником света (как при смещении звезды поперек щели), а затем найти размеры монохроматических изображений участков щели на детекторе. Пример такого изображения показан на рисунке 4. В этом случае $\lambda = 1150 \text{ Å}$, размер изображения в пространственном направлении равен примерно 36 мкм $\simeq 0''.44$, а в направлении вдоль спектра – 85 мкм $\simeq 0.63 \text{ Å}$. Эти цифры и характеризуют, соответственно, пространственное и спектральное разрешения на длине волны 1150 Å. Аналогично находится разрешение для других длин волн.

Зависимость спектрального разрешения для протяженных источников света от длины волны

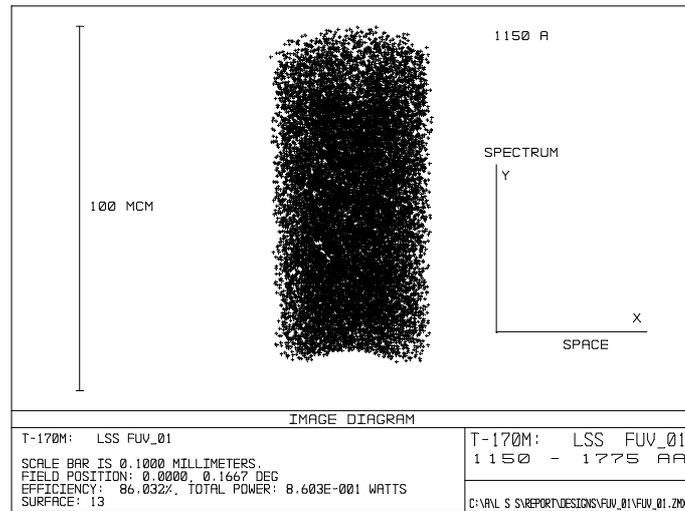


Рис. 4. Изображение центрального участка входной щели спектрографа шириной 82.4 мкм на детекторе при $\lambda = 1150 \text{ \AA}$. Показаны направления вдоль щели (X) и вдоль спектра (Y).

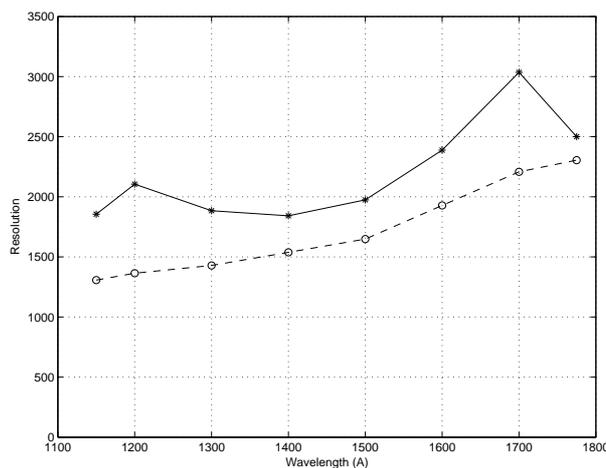


Рис. 5. Канал FUV_01: спектральное разрешение для протяженных объектов в центре щели (сплошная линия) и на краю щели (пунктир) в зависимости от длины волны.

показана на рисунке 5. Для центра щели в коротковолновом участке спектра, вплоть до 1500 \AA , величина $\mathcal{R} \simeq 2000$, а затем она возрастает до 2500–3000. На краю щели величина \mathcal{R} заключена в интервале 1300–2300.

Пространственное разрешение для центра щели в FUV-канале спектрографа лишь на длинноволновой границе $\lambda = 1775 \text{ \AA}$ хуже $0''.5$ – оно равно там $0''.63$. Среднее значение пространственного разрешения составляет $0''.35$, что отвечает размыванию *звездного* изображения в спектрографе (см. рис. 3). Для крайнего по высоте щели положения протяженного источника света пространственное разрешение слабо зависит от длины волны и в среднем составляет $0''.73$.

Проведенное выше рассмотрение касалось изображений, обеспечиваемых самим спектрографом. Оценим теперь ухудшение спектрального разрешения, обусловленное конечностью размеров пикселей детектора. В первом приближении можно считать, что размеры монохроматических изображений щели возрастают на величину размера пикселей. Полагая средний размер

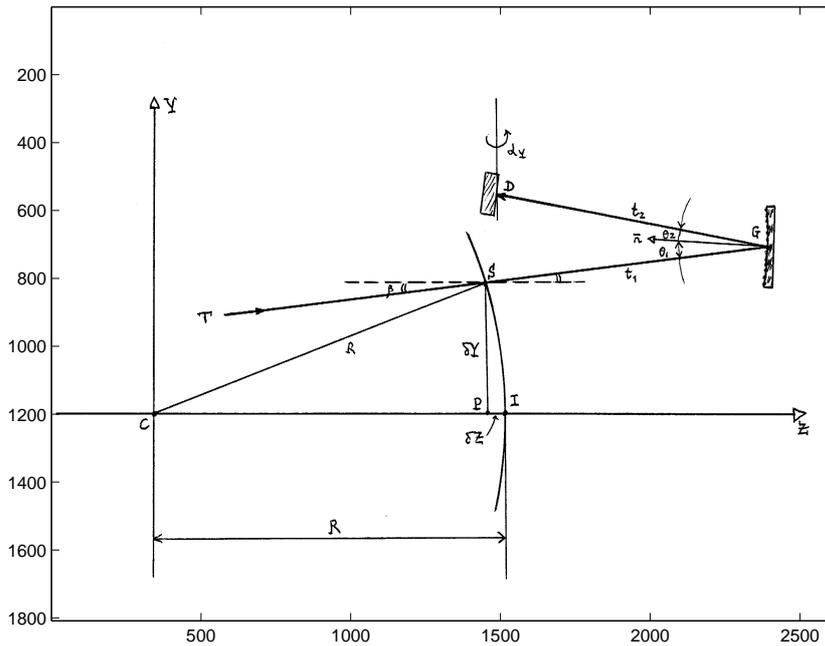


Рис. 6. Расположение элементов одного из каналов спектрографа в меридиональной плоскости YZ телескопа. CZ – оптическая ось телескопа, S – входная щель, G – дифракционная решетка, D – вершина приемника света, TSG – осевой луч пучка света, падающего на спектрограф

изображения центрального участка щели в направлении дисперсии равным 90 мкм, можно ожидать ухудшения разрешения примерно на 22% при пикселях размером 20 мкм и на 11% – при вдвое меньших пикселях. Ожидаемое ухудшение пространственного разрешения вследствие конечности пикселей аналогично указанному выше для направления вдоль спектра.

5.3 Расположение элементов

Мы уже отмечали, что вершины (*вертексы*) элементов каждого из рассматриваемых здесь каналов спектрографа расположены в фиксированной для данного канала плоскости. При расчетах в качестве этой плоскости удобно выбрать меридиональную плоскость YZ телескопа (см. рисунок 1); фактически переходы между каналами FUV_01 и NUV_01 спектрографа осуществляется единовременной сменой дифракционной решетки и детектора.

Таблица 8. Пространственное расположение элементов канала FUV_01

Параметр	Значение	Параметр	Значение
R	882.53 мм	t_2	1044.28 мм
δY	49.45 мм	θ_1	$10^\circ 8339$
δZ	1.39 мм	θ_{2c}	$-0^\circ 1239$
β	$0^\circ 626$	α_X	$0^\circ 0016$
t_1	1036.39 мм	α_Y	$0^\circ 1691$

Размещение элементов в произвольном канале LSS схематически представлено на рисунке 6. В качестве исходной точки принимается I – положение параксиального фокуса на оптической оси телескопа (согласно «Техническому заданию», он удален от вершины главного зеркала на 650.0 мм). Точка C – центр кривизны медиальной фокальной поверхности IS; в первом приближении ее можно считать сферой радиуса R. Положение середины щели спектрографа S задается на фокальной поверхности длинами δZ и δY отрезков PI и PS, соответственно. Пучок света от телескопа, падающий на щель, наклонен к оптической оси на угол β . Отрезки SG и GD, обозначенные посредством t_1 и t_2 , последовательно соединяют середину щели, вершину решетки и вершину (центр) поверхности приемника света. Штрихи решетки направлены вдоль оси X, то есть перпендикулярно плоскости чертежа. Для окончательного задания положений решетки и приемника нужно указать углы θ_1 и θ_{2c} между нормалью к поверхности решетки \mathbf{n} и направлениями на центр щели и вершину приемника света (смысл отрицательного значения θ_{2c} обсуждается в разделе 5.1). Наконец, возможны небольшие повороты приемника вокруг осей X и Y; направление второго из этих поворотов указано на рис. 6.

Значения параметров, нужных для описания пространственного положения элементов FUV_01, даны в таблице 8. Расстояние SD между центром щели и вершиной детектора равно 194.340 мм. Для того чтобы оценить глубину схемы, то есть ее протяженность в направлении X, напомним, что длина щели составляет 6.2 мм, световой диаметр решетки равен 106.8 мм, а световые размеры приемника составляют 6.3 мм \times 85.2 мм.

6 Канал NUV_01 для диапазона 1750 – 3000 Å

Рассматриваемый в данном разделе канал спектрографа NUV_01 во многих отношениях аналогичен каналу FUV_01, описанному в предыдущем разделе. По этой причине мы даем здесь сокращенное описание.

6.1 Оптическая схема

При расчетах были выбраны 8 значений длины волны (см. таблицу 5), для которых производилась одновременная оптимизация оптической схемы.

Оптическая схема канала приведена на рисунке 7. В данном случае эквивалентное фокусное расстояние системы телескоп плюс спектрограф немного отличается от такового для телескопа: $F_e = 17,175$ мм. Обратная линейная дисперсия K изменяется вдоль спектра в пределах $+0.0053$ Å/мм -0.0011 Å/мм от среднего значения 12.7400 Å/мм. Качество изображений для сферического и цилиндрического детекторов практически одинаково; для определенности мы выбрали сферическую поверхность. В таблице 9 представлены основные параметры канала NUV_01.

6.2 Спектральное и пространственное разрешения

Качество изображений в спектрографе вдоль направления дисперсии и вдоль щели иллюстрируется рисунком 8. Таблица 10 содержит значения среднеквадратического диаметра D_{rms} монохроматических изображений звезды, соответствующие рисунку 8; ее колонки отвечают длине волны в спектре (Å), а строки – высоте изображения звезды на входной щели (секунды дуги).

В центре щели линейный диаметр изображения D_{rms} изменяется от 7.2 до 54.7 мкм. При пикселах детектора размером 20 мкм можно принять, что элемент разрешения для звездообразных объектов составляет не более 70 мкм. Умножая эту величину на обратную линейную дисперсию – 12.74 Å/мм, мы приходим к ширине элемента разрешения $\delta\lambda_* \simeq 0.89$ Å и спектральному разрешению для звездообразных объектов $\mathcal{R}_* \simeq 2000 - 3400$.

Как указывалось выше, для оценки спектрального разрешения при наблюдениях протяженных объектов щель освещается распределенным по координате Y источником света (см. пример на

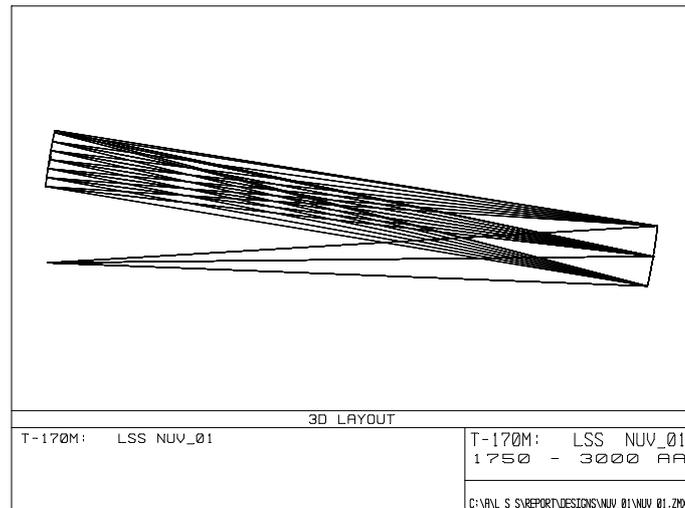


Рис. 7. Оптическая схема канала NUV_01. Коротковолновый участок спектра расположен выше.

Таблица 9. Основные параметры оптической схемы NUV_01

Спектральный диапазон канала NUV	1750 – 3000 Å
Порядок спектра	– 1
Эквивалентное фокусное расстояние	17175 мм
Масштаб на детекторе	83.27 мкм/''
Меридиональный радиус кривизны решетки	–1050.0 мм
Сагиттальный радиус кривизны решетки	–1033.0 мм
Плотность штрихов решетки	750 мм ⁻¹
Световой диаметр решетки	106.4 мм
Удаление решетки от щели	1036.39 мм
Угол падения θ_1 центрального пучка на решетку	10° 08' 47"
Угол дифракции θ_{2c} для средней длины волны $\lambda_c = 2375.0$ Å	– 0° 17' 31"
Удаление детектора от решетки	1046.59 мм
Световые размеры детектора	6.3 мм × 98.2 мм
Радиус кривизны вогнутого сферического детектора	1035.8 мм
Углы поворота детектора	
вокруг оси X	0° 00' 17"
вокруг оси Y	0° 16' 53"
Обратная линейная дисперсия в спектре	
на длине волны 1750 Å	12.7453 Å/мм
на длине волны 3000 Å	12.7389 Å/мм
средняя	12.7400 Å/мм

рис. 4). Зависимость спектрального разрешения для протяженных источников света от длины волны показана на рисунке 9. Для центра щели в коротковолновом участке спектра, вплоть до 2400 Å, величина $\mathfrak{R} \simeq 1500$, а затем она возрастает примерно до 2500. На краях щели разрешение ниже примерно в 1.5 раза.

В центре щели среднее значение пространственного разрешения в канале NUV_01 составляет 0''35, как и для канала FUV_01. Среднее значение пространственного разрешения на краях щели равно 0''58.

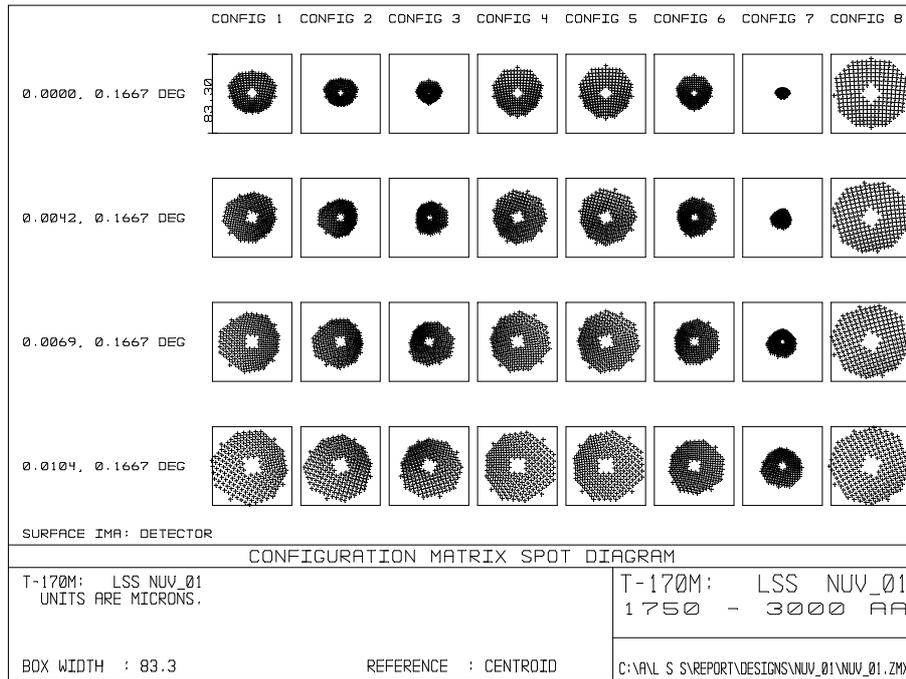


Рис. 8. Точечные диаграммы для канала NUV_01. По горизонтали показаны монохроматические изображения звезд для длин волн из диапазона 1750–3000 Å, указанных в табл. 5, по вертикали – изображения вдоль щели спектрографа согласно табл. 3. Сторона квадрата равна 83.3 мкм (~1").

Таблица 10. Канал NUV_01: среднеквадратический диаметр звездных изображений в спектре (мкм)

	1750	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
0	33.5	21.8	16.0	35.6	38.5	24.5	7.2	54.7
15"	38.1	28.2	23.2	38.9	41.1	27.7	13.5	55.6
30"	45.1	36.9	32.2	44.1	45.3	32.7	20.2	57.0
37.5"	56.4	49.7	44.9	52.9	52.6	40.6	29.3	59.6

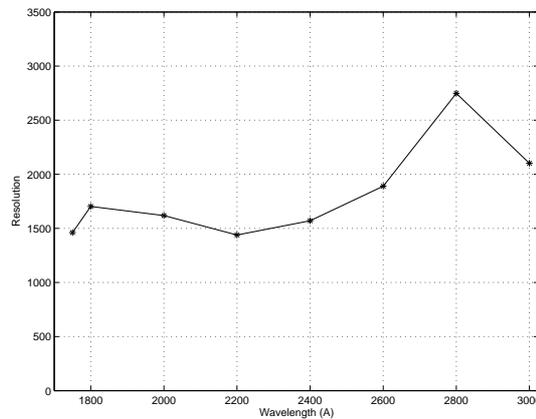


Рис. 9. Канал NUV_01: спектральное разрешение для протяженных объектов в центре щели в зависимости от длины волны.

6.3 Расположение элементов

Описание здесь совершенно аналогично данному нами в разделе 5.3. Значения параметров, задающих пространственное положение элементов канала NUV_01, указаны в таблице 11 (см. также рис. 6). Естественно, значения R , δY , δZ и β – общие для обеих мод LSS, совпадение же значений t_1 обусловлено нашим выбором (оптимальные значения расстояний оказались близкими).

Таблица 11. Пространственное расположение элементов канала NUV_01

Параметр	Значение	Параметр	Значение
R	882.53 мм	t_2	1046.59 мм
δY	49.45 мм	θ_1	10°0847
δZ	1.39 мм	θ_{2c}	-0°1731
β	0°626	α_X	-0°0017
t_1	1036.39 мм	α_Y	0°1653

Расстояние SD между центром щели и вершиной детектора равно 180.231 мм (рис. 6). Напомним, что длина щели составляет 6.2 мм, световой диаметр решетки равен 106.4 мм, а световые размеры приемника составляют 6.3 мм × 98.2 мм.

Таблица 12. Стабильность геометрических параметров спектрографа в течение времени экспозиции

Параметр	Допуск
Координаты середины щели спектрографа δY , δZ	±0.05 мм
Расстояние от щели до решетки t_1	±0.05 мм
Расстояние от решетки до приемника t_2	±0.05 мм
X-координата решетки	±0.1 мм
Y-координата решетки	±0.01 мм
Z-координата решетки	±0.05 мм
Угол θ_1 , задающий направление нормали к решетке	±0°0005 (~2'')
Углы α_X и α_Y , задающие ориентацию приемника	±0°1

7 Допуски

Для обоих каналов спектрографа LSS допуски примерно одинаковы, а потому не будем разделять обсуждение.

Совокупность параметров, определяющих данную моду спектрографа, включает в себя геометрические параметры, перечисленные в таблицах 8 и 11, а также физические характеристики дифракционной решетки: меридиональный R_1 и сагиттальный R_2 радиусы кривизны, плотность системы штрихов N . Очевидно, параметры R_1 , R_2 и N могут заметно отличаться от тех значений, которые были указаны выше при описании каналов FUV_01 и NUV_01. Если радиусы кривизны отличаются от номиналов на величину порядка нескольких миллиметров, а плотность штрихов – в

пределах 50 штрихов/мм, то приведенные здесь схемы нуждаются лишь в легкой корректировке. В случае более существенных отличий нужно оптимизировать схемы заново, причем качество изображений останется близким к прежнему качеству. То же относится к отличиям геометрических параметров при сборке приборов.

Допуски становятся жесткими, если рассматривается стабильность прибора в течение времени экспозиции: допустимые смещения спектра на детекторе за это время не должны превышать 10–15 мкм. Исходя из этих значений, были вычислены допуски, представленные в таблице 12.

Важность стабилизации положения решетки подтверждается опытом наблюдений со спектрографом FUSE (Сэхноу, 2002). Эффект “spectral motion”, связанный с тепловым смещением дифракционной решетки, достигал на FUSE 15 пикселей “peak-to-peak”, что существенно снизило разрешение спектрографа.

8 Заключительные замечания

Представленная здесь схема LSS была выбрана, исходя из совокупности условий, включающей в себя не только требования оптического характера, но и соображения, связанные с надежностью прибора, его стабильностью, стоимостью и пр. Поскольку спектральное разрешение $R \sim 50,000$ должно обеспечиваться в проекте «СПЕКТР–УФ» эшелным спектрографом HIRDES, желательно, чтобы спектрограф с высокой щелью был по возможности прост и надежен. Этих целей и достигают представленные схемы. Более полное описание оптических схем, в том числе и альтернативных описанным выше, приводится в нашем отчете (Теребиж, 2005).

Настоящая работа выполнена при содействии В.В. Бирюкова. Автор признателен ему и Р.Е. Гершбергу за стимулирующие обсуждения и полезные замечания.

Литература

- Гершберг Р.Е.// «К расчету спектрометров с вогнутыми дифракционными решетками». I. Известия Крымской астрофиз. обс. 1996. Т. 93. С. 166–180.
- Гершберг Р.Е., Рачковский Д.Н., Теребиж А.В.// «К расчету спектрометров с вогнутыми дифракционными решетками». II. Известия Крымской астрофиз. обс. 1996. Т. 93. С. 181–194.
- Грин (J.C. Green).// “The Cosmic Origins Spectrograph”. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 4013, 352, 2000.
- Ефимов (Yu.S. Efimov).// “Invitation to Spectropolarimetry.” Photopolarimetry in Remote Sensing, G. Videen et al. (eds.), 455–478, 2004.
- Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я.// *Спектроскопия вакуумного ультрафиолета*. М: Наука. 1967.
- Кучеров и др. (V.A. Kuchеров, Yu.S. Ivanov, Yu.S. Efimov, A.V. Berdyugin, N.M. Shakhovskoy)// “Ultraviolet low-resolution spectropolarimeter for the space mission SPECTRUM–UV (UVSPEPOL project).” *Космічна наука і технологія*, т. 3, № 5/6, 3–27, 1997.
- Кучнер (M.J. Kuchner), ed.// “General Astrophysics and Comparative Planetology with the Terrestrial Planet Finder Missions.” Based on a workshop held at Princeton University 14–15 April 2004.
- Мальшев В.И.// *Введение в экспериментальную спектроскопию*. М: Наука. 1979.
- Морисси и др. (P. Morrissey, D. Schiminovich, T.A. Barlow, et. al.)// ArXiv: astro-ph/0411310v1 11 Nov 2004.
- Мэдден (R.P. Madden).// *Phys. Thin Films* 1, 123–186, 1963.
- Налетто и др. (G. Naletto, C. Pernechele, G. Tondello)// “Extreme Ultraviolet and Vacuum Ultraviolet Spectrometer for SUV.” SUV Draft, Rev. 3.1. 1992.
- Сейа, Намиока (M. Seya, T. Namioka).// *Sci. Light* 16, 158, 1967.
- Сойер (R.A. Sawyer).// *Experimental Spectroscopy*, New York. 1951. Пер.: *Экспериментальная спектроскопия*, М: ИЛ. 1953.
- Сэхноу (D. Sahnou), ed.// “The FUSE Instrument and Data Handbook.” Vers. 2.1. 2002.

- Теребиж В.Ю.// «О качестве изображений в спектрографах с тороидальными вогнутыми дифракционными решетками». Отчет по проекту СПЕКТР-УФ. 1994.
- Теребиж В.Ю.// «Камера поля телескопа телескопа Т-170». Отчет по проекту СПЕКТР-УФ. 1995.
- Теребиж В.Ю.// «Оптическая схема телескопа Т-170М». Отчет по проекту СПЕКТР-УФ. 2002.
- Теребиж В.Ю.// «Оптическая схема спектрографа с высокой щелью». Отчет по проекту СПЕКТР-УФ. 2005.
- Техническое задание на ОКР «Оптическая система космического телескопа Т-170». 1998.
- HIRDES// “Phase A Study. Final Report.” Jena-Optronik, HIRDES-FR-DJO-001. 2001.
- Шрёдер (D.J. Schroeder).// *Astronomical Optics*. Academic Press. 2000.
- Шустов Б.М., Вибе Д.Э. (ред.)// *Ультрафиолетовая Вселенная*. М: ГЕОС. 2001.