

МГУ им. М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра астрофизики и звёздной астрономии

Методическое пособие к задаче специального астрономического практикума
для студентов 4 курса физического факультета, обучающихся по программе
«МС_АСТРОНОМИЯ»
(специальность 03.05.01 «Астрономия»)

Задача N4

Макет астрономического спектрографа низкого разрешения

Составители:

Д. Лашин, А.А. Токовинин, А.В.Засов

Москва, 2019

Макет астрономического спектрографа низкого разрешения

Введение

При получении спектров астрономических объектов, как правило, очень слабых, стремятся, с одной стороны, добиться как можно более высокого спектрального разрешения, а с другой - уловить как можно больше света от источника и свести к минимуму потери света в спектрографе. Доля светового потока звезды, которая проходит через спектрограф называется его эффективностью. Отношение длины волны к элементу спектрального разрешения $R = \lambda/\delta\lambda$ называется разрешающей силой спектрографа. На практике обычно находят оптимальное соотношение между эффективностью и спектральным разрешением. Но при любом соотношении между ними требуется выполнение условия, по которому спектральное разрешение должно быть согласовано с линейным разрешением приемника излучения (фотопластинки, ЭОПа или ПЗС-матрицы).

Цель задачи - познакомиться с принципом работы и расчета спектрографов, предназначенных для астрономических наблюдений с телескопом, и в первую очередь - для наблюдений звезд.

Элементы теории

Рассмотрим, от каких параметров спектрографа и как зависит спектральное разрешение телескопа.

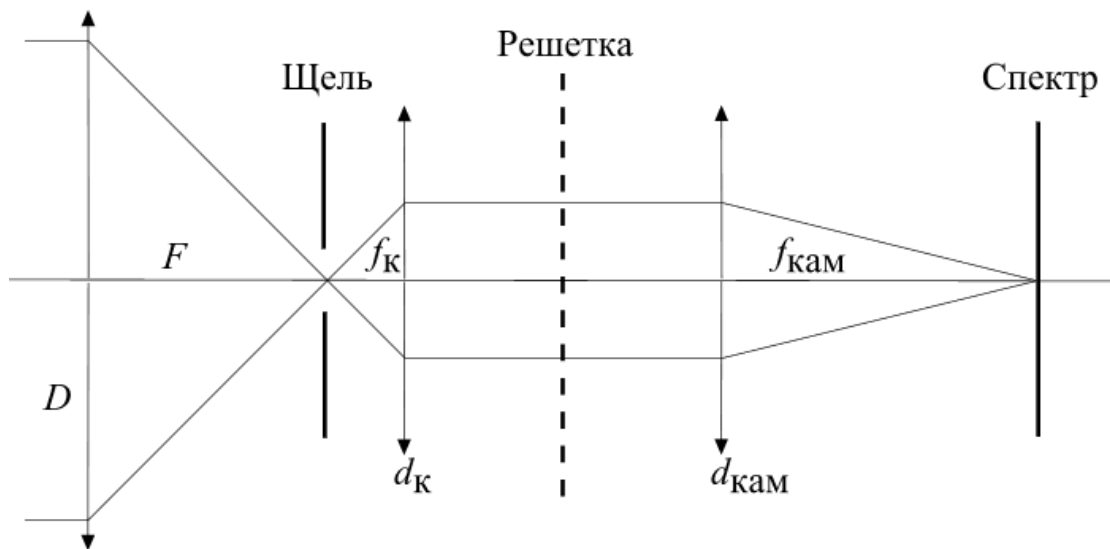


Рис 1. Принципиальная схема астрономического спектрографа.

На рис. 1 схематически представлены основные элементы спектрографа, щель которого располагается в фокальной плоскости объектива: D - диаметр объектива, F - его фокусное расстояние, d_k и f_k - диаметр и фокусное расстояние коллиматора, d_{cam} и f_{cam} - диаметр и фокусное расстояние объектива камеры ($d_k = d_{cam}$).

Параметры коллиматора должны быть такими, чтобы пучок света, собранный телескопом, целиком проходил через коллиматор. От коллиматора параллельный пучок света падает на решетку. Засвечиваемая область дифракционной решетки будет иметь тот же размер, что и коллиматор, так что размер решетки d_d должен быть не меньше (обычно – равным) d_k . Таким образом, должны выполняться следующие соотношения:

$$\frac{F}{D} = \frac{f_k}{d_k}, \quad (1);$$

$$d_k = d_d. \quad (2);$$

Параметры объектива камеры

Фокусное расстояние объектива камеры должно быть таким, чтобы элемент изображения спектра в фокальной плоскости объектива, соответствующий спектральному разрешению $\delta\lambda$, был согласован с линейной разрешающей способностью δl приемника излучения:

$$\delta\lambda \frac{dl}{d\lambda} = \delta\lambda \cdot f_{cam} \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda} \approx \delta l, \quad (3)$$

где $dl/d\lambda$ и $d\varphi/d\lambda$ – линейная дисперсия спектра и угловая дисперсия решетки.

Диаметр объектива камеры должен быть не меньше d_d или d_k .

Ширина щели

Если выполняется условие (1), то количество света от звезды, попадающего в спектрограф, определяется только долей светового потока, проходящего через щель. При наблюдении протяженного источника, количество света, проходящего в спектрограф, пропорционально ширине щели, но в случае звезды зависимость от ширины щели более сложная. В любом случае, имеет место два противоположно действующих фактора: чем шире щель, тем, с одной стороны, больше света попадает в спектрограф, с другой стороны, ухудшается спектральная разрешающая способность.

Рассмотрим, от каких параметров зависит спектральное разрешение $\delta\lambda$ спектрографа.

Пусть мы исследуем монохроматическую линию в спектре, используя щель шириной b , и дифракционную решетку с частотой n штрихов на миллиметр. Из оптической схемы, приведенной на рисунке, видно, что по законам геометрической оптики монохроматическое изображение щели, создаваемое объективом камеры, будет в f_{cam}/f_k раз меньше ее ширины, т. е.

$$b' = b \cdot f_{cam} / f_k, \quad (4);$$

Величине b' соответствует спектральный интервал $\delta\lambda$ равный

$$\delta\lambda = b' \cdot d\lambda/dl = \frac{b'}{f_{cam} \left(\frac{d\varphi}{d\lambda}\right)} . \quad (5);$$

Угловая дисперсия решетки $d\varphi/d\lambda$ равна $m \cdot n$, где m - порядок спектра (обычно m равно 1 или 2). Из (4) и (5) следует выражение для максимально возможного спектрального разрешения спектрографа при данной ширине щели:

$$\delta\lambda = \frac{b}{f_k mn} , \quad (6);$$

Следовательно, во сколько раз мы уменьшаем ширину щели, во столько раз улучшается спектральное разрешение. Казалось бы, уменьшая ширину щели (и увеличивая при этом время экспозиции для компенсации световых потерь), можно достичь сколь угодно высокого спектрального разрешения. Но условие (6) справедливо только до тех пор, пока при построении изображений можно пользоваться формулами геометрической оптики. Если угол, под которым щель видна из центра коллиматора, меньше λ/d_k (ширина щели – меньше $f_k \lambda/d_k$), то дальнейшее уменьшение ширины щели не меняет размера изображения щели в фокусе камеры. Действительно, из-за дифракции света на краю оптических элементов минимальный размер изображения в фокальной плоскости объектива камеры примерно равен $f_{cam} \cdot \lambda/d_{cam}$, чему, согласно (4), соответствует

$$b_n = f_k \lambda/d_k . \quad (7)$$

Такая ширина щели, равная b_n , называется нормальной. Из (6) следует, что ширине b_n соответствует максимальное спектральное разрешение, которое может быть получено с помощью спектрографа:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda}{d_k mn} , \quad (8);$$

Таким образом, спектрограф с нормальной щелью обладает максимально возможной разрешающей силой

$$R_{max} = \lambda/\delta\lambda = d_k mn . \quad (9);$$

Заметим, что $d_k \cdot n$ равно N , т.е. полному числу освещенных штрихов решетки, так как от каждой точки щели на решетку падает параллельный пучок света $d_k = d_d$. Это означает, что разрешающая сила спектрографа никогда не превышает произведения числа штрихов на порядок интерференции и достигает этой величины только при нормальной ширине щели.

В астрономической практике нормальная ширина щели обычно используется лишь при наблюдениях Солнца. При наблюдении звезд большая часть света не пройдет через «нормальную» щель и будет потеряна. Ширина щели выбирается из условия, чтобы в нее

«проваливалось» изображение звезды в фокальной плоскости телескопа, поэтому реальное спектральное разрешение спектрографа оказывается значительно хуже «дифракционного».

Предположим сначала, что объектив телескопа создает изображение дифракционного качества. Тогда размер изображения звезды в фокусе телескопа, в пределах которого будет заключено основное количество энергии звезды, составит примерно $F\lambda/D$. Поскольку $F/D = f_k/d_d$, то этот минимальный размер как раз равен нормальной ширине щели b_n , так что в этом случае можно полностью использовать возможности спектрографа: его разрешающая сила будет близка к R_{\max} . Однако на практике размер звезды в фокусе телескопа значительно больше дифракционного и определяется размером турбулентного диска, обычно превышающим 1". Если угловой размер изображения равен β , то устанавливают ширину щели, равную βF . При этом разрешающая сила спектрографа равна (см. (6))

$$R = (\lambda f_k m n) / \beta F.$$

В современных астрономических спектрографах часто применяют объемные голографические решетки, работающие в первом порядке. Такие решетки рассчитываются под определенную «центральную» длину волны λ_0 и в небольшом спектральном диапазоне ($\sim 1000 \text{ \AA}$) имеют эффективность до 90%. При этом решетка должна стоять к входному пучку под так называемым углом блеска φ_0 , который для голографической решетки вычисляется по формуле;

$$\sin(2\varphi_0) = \lambda_0 / b,$$

где b – период штрихов решетки. Максимальная эффективность работы решетки достигается именно если она стоит под углом φ_0 , при повороте решетки светопропускание ее сильно снижается и свет переходит в нулевой порядок. Спектрограф может быть спроектирован с изломом в районе решетки на угол $2\varphi_0$, но обычно для работы в «прямой» схеме (рис. 1) применяют, так называемую, *гризму* – комбинацию двух призм и голографической решетки (см. рис. 2)

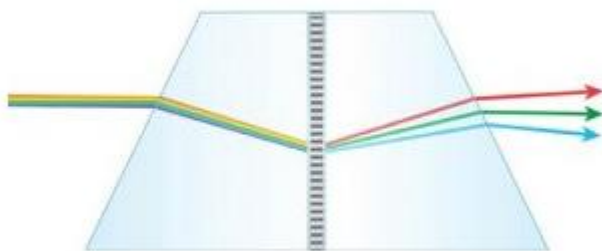
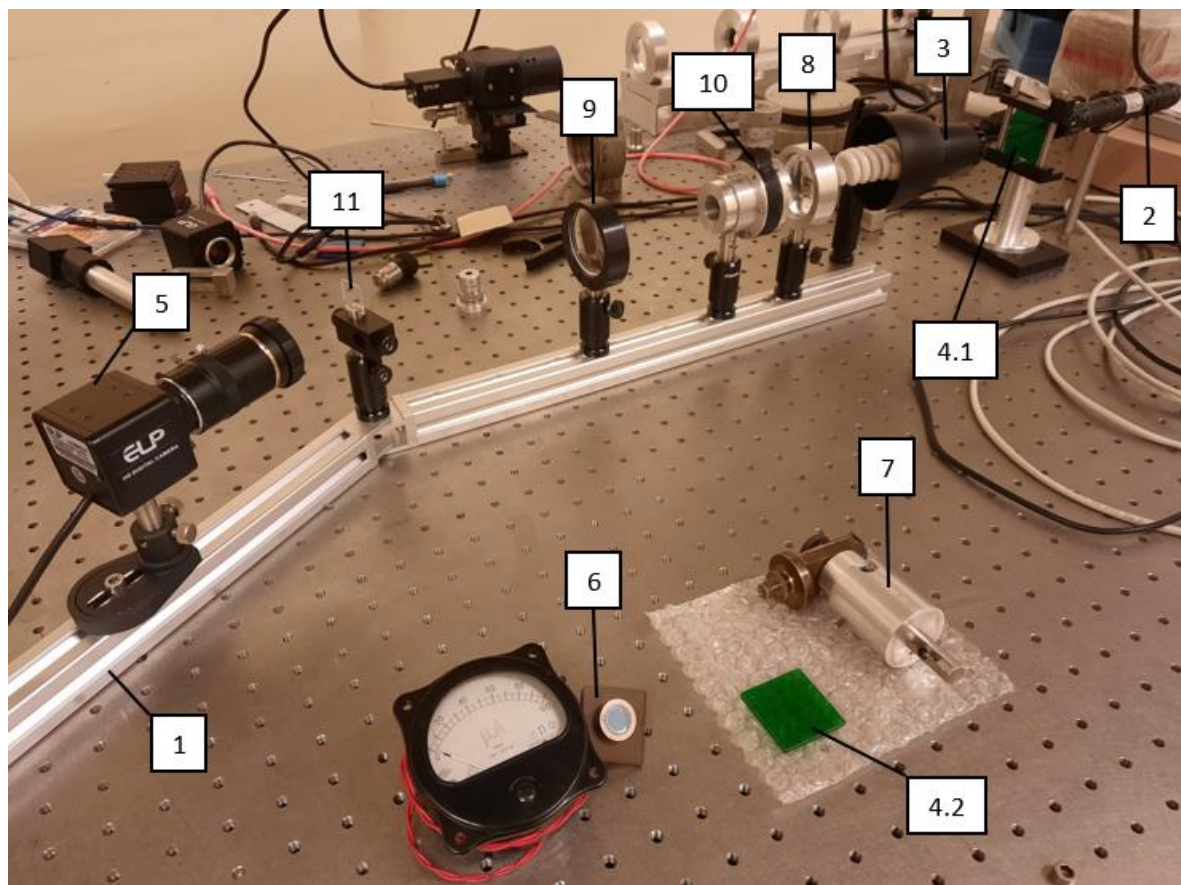


Рис. 2. Гризма прямого прохождения. С помощью дополнительных клиньев стекла достигается выход центральной длины волны в первом порядке параллельно входному лучу.

Порядок выполнения работы

Лабораторная установка содержит следующие детали: 1- рельс с подвижной частью и креплениями для элементов установки, 2 - лазер, 3 - лампа, 4.1 и 4.2 - светофильтры, 5 - камера, 6 - приемник света (фотодиод) и микроамперметр, 7 - микрометр, 8 - линза-"объектив телескопа" ($f = 5$ см, диаметр 5 см), 9 - линза-коллиматор ($f = 15$ см, диаметр 5 см), 10 - щель, 11 - дифракционная решетка (500 штр/мм).



Экспериментальная установка

Задача состоит из нескольких упражнений.

1. Наблюдение дифракции на щели.

а) Включить лазер и установить щель так, чтобы пятно от лазера было по центру. Поставить микрометр за щелью и получить в нем изображение дифракции на щели (смотреть в микрометр только через светофильтр 4.2).

б) Поставить перед щелью линзу и отрегулировать ее высоту так, чтобы пятно от лазера снова попадало в микрометр. Получить дифракционную картину для "расфокусированной" линзы, затем - для сфокусированной на щели, сравнить 3 полученные картины и объяснить их различие.

с) Вставить в отверстие за щелью фотодиод, построить график зависимости пропущенного потока от ширины щели и (при обработке результатов) определить по графику нормальную ширину щели d .

2. Полная сборка и юстировка спектрометра.

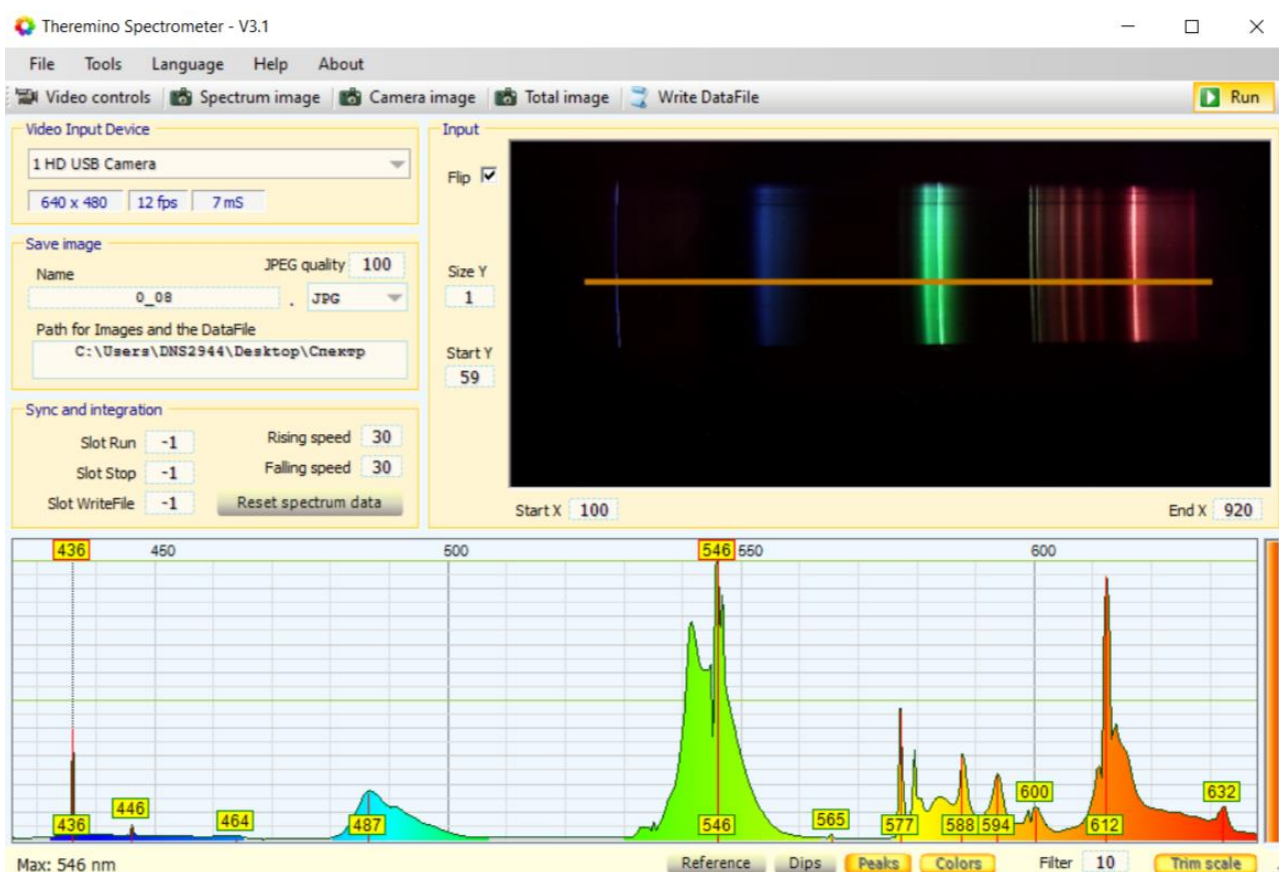
а) Переставить микрометр в следующее крепление слева. На место, где был микрометр, поставить линзу и снова добиться попадания луча в микрометр.

б) Убрать микрометр и подобрать высоту камеры так, чтобы пятно от лазера было в центре крышки объектива. Закрепить камеру в этом положении.

в) Поставить решетку так, чтобы пятно от лазера приходилось примерно на ее центр.

д) Выключить лазер.

3. Получение спектров и определение длины волны лазера.



Интерфейс программы

а) Установить и включить лампу, открыть камеру, запустить программу *Theremino Spectrometer – v3.1*, открыть щель пошире. Поворачивая подвижную часть рельса на себя, добиться появления спектра в кадре и отрегулировать угол поворота так, чтобы все линии спектра были видны. Сфокусировать камеру и уменьшить ширину щели так, чтобы линии стали четкими, но не становились слишком тусклыми (оптимальную яркость можно подобрать в программе по столбику справа от графика спектра: он должен быть почти полностью

закрашен. Если закрашен целиком – кадр может быть пересвечен.). Затем, поворачивая решетку, подобрать угол, при котором яркость спектра будет максимальной и при необходимости еще раз сфокусировать камеру.

b) Установить $Size Y = 1$ и подобрать такое значение $Start Y$, для которого полоска, вдоль которой измеряется интенсивность, проходила бы по наиболее четкой и незасвеченной части спектра. $Start X$ и $End X$ выбрать так, чтобы полоска с обеих сторон слегка отступала от краев спектра, причем с красного - побольше (это пригодится для пункта 8). Воспользовавшись кнопкой Trim scale, совместить ползунки с пиками, соответствующими длинам волн 436 нм и 546 нм (как показано на рисунке).

c) Сохранить данные, нажав Write DataFile. По полученным данным и известным длинам волн линий ртути построить (при обработке результатов) зависимость длины волны от координаты выбранных линий - дисперсионную кривую спектрометра.

d) Убрать лампу и включить лазер. Получить и сохранить его спектр в откалиброванной ранее шкале. По пику на спектре определить λ лазера (нужно совместить с пятном от лазера полосу, вдоль которой измеряется спектр, изменяя значение $Start Y$). После изменения значения $Start Y$ желательно снова откалибровать шкалу, а уже после этого снимать спектр лазера.

e) По полученной длине волны, нормальной ширине щели из первого упражнения и другим (известным) параметрам установки вычислить спектральное разрешение $\delta\lambda$.

Результаты

В итоге должны быть получены следующие результаты:

- Объяснение изменения картины дифракции на щели (упр. 1);
- График зависимости пропущенного потока от ширины щели (упр. 1);
- Оценка величины нормальной ширины щели (упр.1);
- Спектр лампы (упр. 3);
- Оценка длины волны лазера (упр. 3);
- Дисперсионная кривая спектрометра (упр. 3);
- Оценка спектрального разрешения прибора (упр. 3).

Примеры контрольных вопросов

- Как связаны между собой ширина щели и ширина линии на выходе спектрографа?
- Какой физический смысл имеет понятие нормальной ширины щели?
- Какой вид имеет распределение яркости в фокусе камеры при размере щели большей, меньшей, или равной нормальной?
- Если при наблюдениях Солнца ширину щели сделать существенно большей нормальной, что будет теряться при этом?

- Как качество изображения влияет на спектральное разрешение спектра звезды?
- Что такое гризма?

Литература

Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1977

Дервиз Т.Е. Астрономические спектрографы.

Курс астрофизики и звездной астрономии под ред. А.А.Михайлова. Том 1, Гл. 17.