

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 N7

ДИФРАКЦИОННЫЙ СПЕКТРОГРАФ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЛИНИЙ ДНЕВНОГО СВЕТА

Составитель:

А.В.Засов, С.А.Коробкин

Москва, 2019

ДИФРАКЦИОННЫЙ СПЕКТРОГРАФ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЛИНИЙ ДНЕВНОГО СВЕТА

Цель задачи:

Разобраться в устройстве спектрографа и во взаимосогласованности параметров его отдельных элементов. Экспериментально оценить спектральное разрешение спектрографа по наблюдениям спектра рассеянного солнечного света.

Работа спектрографа

В настоящее время в астрономических наблюдениях широко применяются дифракционные спектрографы с ПЗС-приемниками излучения. Целью задачи является ознакомление с работой подобных приборов на примере спектрографа для наблюдения линий дневного неба с ПЗС-линейкой, изготовленного в ГАИШ МГУ. На рис.5.7 приведена схема спектрографа.

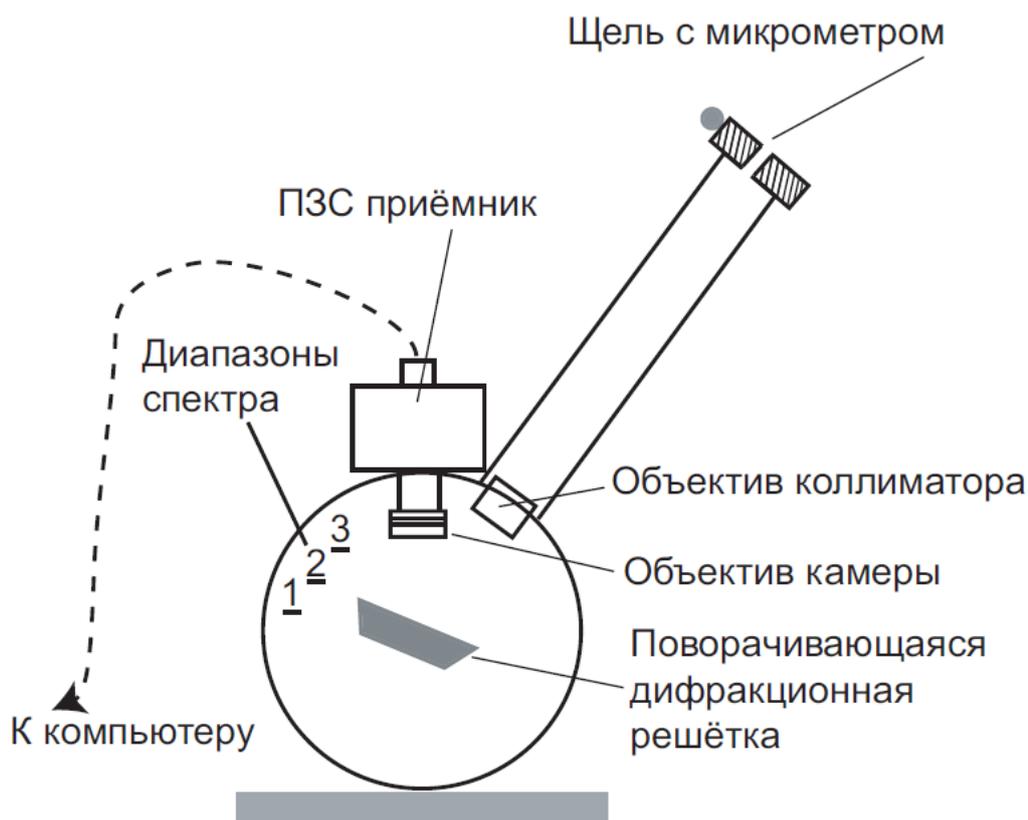


Рис. 5.7. Схема спектрографа

Щель шириной b находится в фокусе объектива коллиматора (фокусное расстояние $f_{col} = 36$ см, $d_{col} = 3.6$ см). Ширина щели изменяется микрометром. Одно малое деление на головке микрометра соответствует 0.001 мм. Диспергирующим элементом служит отражательная дифракционная решетка с частотой штрихов $n = 1200$ штрихов/мм. Работа ведется в первом порядке спектра. Отраженный от решетки свет поступает в объектив камеры (фокусное расстояние $f_{cam} = 13$ см, $d_{cam} = 3.6$ см), который строит изображение спектра на неохлаждаемой ПЗС-линейке. Решетка может поворачиваться вокруг

вертикальной оси, что позволяет проецировать различные участки спектра на ПЗС-приемник. Фиксированным положениям 2 и 3 решетки (см. рис.5.7) примерно соответствуют диапазоны спектра в области линий D1 и D2 натрия и молекулярной линии O₂ соответственно.

ПЗС-линейка содержит около 2770 рабочих элементов (пикселей). Размер одного пикселя вдоль направления дисперсии $d_p = 13 \mu\text{m}$. Приемник сопряжен с компьютером через плату контроллера, вставленную в ISA слот в материнской плате.

Получаемые изображения спектров нуждаются в предварительной обработке, т.к. ПЗС-приемник обладает темновым током, шумом считывания (т.н. bias) и неравномерностью чувствительности от пикселя к пикселю. Все эти факторы должны быть учтены при получении спектров.

Линейка обслуживается программной оболочкой SP-30. Программа позволяет:

- регулировать длительность экспозиции и задавать режим работы ПЗС линейки,
- автоматически учитывать влияние темнового тока,
- выводить полученные спектры на дисплей,
- проводить калибровку спектров,
- производить простейшие операции с полученными спектрами (вычитание, сложение, арифметические операции с константами),
- сохранять полученные спектры на жесткий диск/загружать ранее записанные спектры.

Краткое описание программы приводится в Приложении 1.

Калибровка спектра осуществляется с помощью эталонного спектра неоновой лампы.

Выбор ширины щели.

Одной из основных характеристик спектрографа является спектральное разрешение $R = \lambda/\delta\lambda$. Размер монохроматического изображения щели спектрографа на приемнике (линейке) b_1 не должен сильно отличаться от размера элемента приемника (пикселя), т.е. должно выполняться условие $b_1 \approx d_p$. В свою очередь

$$b_1 = b \cdot (f_{cam}/f_{col})$$

Учитывая, что угловая дисперсия дифракционной решетки равна

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = n \cdot m \cdot \sec\varphi$$

где m - порядок спектра, n - число штрихов на см, $\varphi \approx 45^\circ$ - угол отклонения (см. [1]), можно получить формулу для спектрального разрешения, соответствующего ширине щели b :

$$\Delta\lambda = \frac{b}{f_{col} \cdot n \cdot m \cdot \sec\varphi} = \frac{b_1}{f_{cam} \cdot n \cdot m \cdot \sec\varphi} \quad (5.4)$$

При уменьшении ширины щели b спектральное разрешение возрастает (дельта λ уменьшается), но при некотором значении b начинают проявляться незаметные при широкой щели эффекты дифракции на оптике, что не позволяет получить сколь угодно резких изображений линии.

Максимально возможная разрешающая сила спектрографа

$$R_{max} = d_{col} \cdot m \cdot n \cdot \sec\varphi \quad (5.5)$$

достигается при ширине щели, примерно равной

$$b_n = f_{col} \frac{\lambda}{d_{col}}$$

Эта ширина называется нормальной шириной щели. Однако, в астрономии нормальная ширина щели используется редко, поскольку сквозь нее проходит мало света. Она приемлема только при наблюдениях ярких протяженных объектов, например, Солнца. Далее рекомендуется дочитать описание задачи до конца, решить типовую

задачу, и затем выполнить предложенные задания.

Типовая задача.

Оцените для видимого спектрального диапазона нормальную ширину щели спектрографа и найдите спектральное разрешение, соответствующее размеру пикселя.

Упражнение 1

Ознакомление с прибором и программой управления

- 1) Ознакомиться со схемой прибора, сопоставить основные узлы спектрографа с его оптической схемой.
- 2) Расположить источник света с эмиссионным спектром (неоновую лампу), используемый в задаче, перед щелью, и при снятой с прибора ПЗС-линейке рассмотреть глазом его спектр. Поворачивая барабан щели, отметить и записать отсчет, при котором щель полностью перекрывает свет (пропадает спектр). Этот отсчет, соответствующий положению закрытой щели, может не совпадать с нулем отчета барабана. Обратить внимание на изменения в спектре при изменении ширины щели.
- 3) Ознакомиться с описанием программы записи спектра SP-30 (см. Приложение 1) и, следуя ей, получить пробную запись.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ!!!

НИКОГДА, НИ ПРИ КАКИХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ,
не начинать вводить спектр или вводить темновой ток
ПРИ ОТКРЫТОЙ БОКОВОЙ КРЫШКЕ
или **СНЯТОМ БЛОКЕ ПЗС-ЛИНЕЙКИ.**

Подобные действия приведут к необратимому выходу из строя ПЗС-линейки.

Несколько практических указаний

Положение регулятора наклона решетки, установленное в начале выполнения упражнений, не следует менять в процессе выполнения всех последующих заданий.

Суммарное время накопления сигнала равно $T_{\text{цикл}} * N_{\text{цикл}}$. Минимальные значения $T_{\text{цикл}}=85\text{мс}$, а $N_{\text{цикл}}=10$.

Темновой снимок должен быть получен с тем же временем накопления, что и все последующие снимки. При изменении $T_{\text{цикл}}$ и (или) $N_{\text{цикл}}$ необходимо заново вводить темновой снимок, ибо экспозиция с $T=90$ и $N=200$ не эквивалентна экспозиции с $T=200$ и $N=90$.

Не забывать, что форма непрерывного спектра на экране может плохо отражать действительную форму спектра из-за хода чувствительности линейки с длиной волны.

4) С включенной неоновой лампой накопить сигнал и записать ее спектр. Проверить правильность фокусировки прибора в указанном преподавателем спектральном диапазоне. Полуширина тонких линий неона на половине максимума линии должна составлять 1-2 пикселя. Полная ширина на 10 процентах интенсивности может достигать 6-7 пикселей.

Не следует производить фокусировку прибора самостоятельно

Упражнение 2

Калибровка прибора по спектральным линиям неона

- 1) Сделать темновую запись с закрытой крышкой. Убедиться, что опция "учет темнового тока" включена. Установить перед щелью неоновую лампу. Сделать экспозицию при ширине щели в 3-4 раза превосходящей нормальную. Максимальную интенсивность самой яркой линии разделить на количество единичных экспозиций $N_{\text{цикл}}$. В случае, если число превосходит 3500, следует уменьшить время единичной экспозиции $T_{\text{цикл}}$. Подобрать количество экспозиций $N_{\text{цикл}}$ так, чтобы интенсивности ярких линий были не менее 50 тыс. единиц и не более 1000К единиц. При этом шумовая дорожка темнового

тока должна быть порядка 500 единиц. По окончании экспозиции на экране появится спектр, исправленный за темновой сигнал.

2) Отождествить линии неона, используя таблицы и фотографии спектра неона. Выбрать 5 линий в различных местах отображаемой области спектра.

3) Удалить старые реперные линии.

4) Ввести длины волн (в ангстремах) выбранных линий.

5) Прокалибровать спектр ("ПАРАМ"/ "КАЛИБРОВКА"). После этой операции горизонтальная ось становится прокалиброванной по длинам волн. Выбрать в меню "ОПЦИИ"/ "ШКАЛА X - ДЛИНЫ ВОЛН", при этом ось X получается оцифрованной в ангстремах.

Упражнение 3

Определение разрешающей силы спектрографа и оптимальной ширины щели

1) По ширинам узких линий на половине интенсивности определить спектральное разрешение спектрографа (в ангстремах), считая, что собственная ширина линий меньше предельного разрешения. Сравнить с теоретическими значениями спектрального разрешения, соответствующими размеру пикселей и используемой ширине щели.

2) Выбрать достаточно яркую линию в спектре неона. "Растянуть" линию вдоль оси X как можно больше, используя стрелки-прокрутки, находящиеся под экраном со спектром. Изменяя ширину щели спектрографа, получить ряд спектров, включающих выбранную линию. Для каждой экспозиции записать ширину щели, полуширину линии (в пикселях или ангстремах) и интенсивность линии в максимуме. По полученным данным построить зависимости полуширины и максимальной интенсивности линии от ширины щели. Сделать вывод об оптимальной ширине щели, при которой реализуется высокая разрешающая способность спектрографа.

Упражнение 4

Измерение кривой пропускания светофильтра.

1) Установить перед спектрографом лампу накаливания

2) Получить несколько спектров лампы с широко открытой щелью.

3) Просуммировать их через буфер.

4) Разделить результат на количество суммированных снимков.

5) Полученный усредненный снимок лампы записать в файл.

6) Расположив светофильтр перед щелью сделать несколько снимков спектра лампы через фильтр.

7) Усреднить их аналогичным образом, записать в файл.

8) Спектр лампы загрузить в буфер. Разделить спектр лампы через фильтр на спектр лампы без фильтра. Отсчеты полученной кривой вдоль вертикальной оси приводятся в умноженном на 10000 виде (т.е. реальное значение отношения интенсивностей = отсчет/10000). Записать кривую пропускания в файл. По полученной кривой пропускания фильтра определить положение максимума и соответствующее ему пропускание.

Упражнение 5

Отождествление линий в спектре дневного неба

1) Установить ширину щели, близкую к нормальной. Заново сделать темновую экспозицию, затем кадр со спектром неба. Изменить время экспозиции, если интенсивность спектра слишком низкая (ниже 50000 единиц). В спектре дневного неба хорошо видны линии солнечного спектра, а также атмосферные линии молекулярного кислорода и молекул воды.

2) Отождествить линии солнечного спектра, находящиеся в выбранном спектральном диапазоне. Найти длины волн, соответствующие максимальной интенсивности линий. Определить их ширину на половине интенсивности, сравнить с найденной ранее разрешающей способностью инструмента.

3) Распечатать спектр и отметить на распечатке, каким элементам линии принадлежат.

4) Для дублетов линий определить расстояние между линиями (в ангстремах) и сопоставить с табличными значениями.

Примечание. При низкой яркости неба во время выполнения задачи по усмотрению преподавателя студенту может быть предложена имеющаяся запись спектра, полученная ранее на этом же спектрографе.

Примеры контрольных вопросов

1. Каким узлом данного прибора определяется его максимально возможное спектральное разрешение?

2. Как связаны между собой ширина щели и ширина изображения монохроматической линии на детекторе (ПЗС линейке).

3. Нарисовать схему астрономического спектрографа вместе с питающей оптикой (объективом телескопа). Как согласуются между собой оптические параметры различных элементов этой системы.

Приложение

Описание программы SP-30

Программа по обслуживанию ПЗС-линейки представляет собой прообраз более сложных программных оболочек для обслуживания ПЗС-матриц, таких как ST-6, ST-8 и т.п.

Программа работает под операционной системой MS-DOS. Находится она в директории SP30 на диске C:. Запускаемый файл sp30ks.exe (русскоязычная версия). Предоставляется также sp30k1.exe - англоязычная версия.

!!! Перед началом работы желательно создать поддиректорию (например, 031898), чтобы записывать все полученные результаты.

ОПЦИИ

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ЗАПУСК - Если этот пункт помечен, это позволяет непрерывно, без остановки, получать кадры со спектром и выводить на дисплей. Длительность экспозиций определяется в пункте ПАРАМ (см. ниже).

ВИД СПЕКТРА - Позволяет строить спектр на экране Точками, Линиями, в виде гистограммы.

АВТОМ. ШКАЛА Y - Масштаб оси Y определяется автоматически, в зависимости от максимального и минимального значения отсчета спектра.

ШКАЛА Y - ДЛИНЫ ВОЛН - Если этот пункт помечен, то отсчет по оси X ведется в Ангстремах согласно последней проделанной калибровке спектра. Имеет смысл помечать этот пункт после проведения калибровки по спектру неона.

УЧЕТ ТЕМНОВО О ФОНА - Если этот пункт помечен, то темновой фон (накопленный через пункт "СПЕКТРЫ / ВВЕСТИ ТЕМНОВОЙ ФОН") автоматически вычитается из изображения.

СПЕКТРЫ

ВВЕСТИ СПЕКТР - Начало экспозиции. При этом в верхнем правом углу загорается надпись "НАКОПЛЕНИЕ". После окончания экспозиции спектр выводится на экран.

Надпись пропадает.

ВВЕСТИ ТЕМНОВОЙ ФОН - Начало введения темнового фона. Не забудьте при этом закрыть крышкой щель спектрографа. При этом в верхнем правом углу загорается надпись "НАКОПЛЕНИЕ". После окончания экспозиции надпись пропадает. При этом изображение на экран не выводится. Для просмотра темнового фона необходимо отменить **УЧЕТ ТЕМНОВОГО ФОНА** (см. выше), и затем выбрать **ВВЕСТИ СПЕКТР**. Темновой фон будет показан на экране по окончании экспозиции.

НОВАЯ СТРАНИЦА - Новая страница в памяти для спектра.

ИЗМЕНИТЬ НОМЕР - Переход к предварительно сохраненной спектральной странице с другим номером.

ЗАГРУЗИТЬ СТРАНИЦУ - Загрузить спектр с диска.

СОХРАНИТЬ СТРАНИЦУ - Сохранить спектр на диске.

ПЕЧАТЬ - Печать на принтер.

СЕРИЯ - Серийная съемка. В данной задаче не используется.

ПАРАМ - Установка параметров экспозиции. Тцикл - Длительность одного цикла накопления, в mse (не рекомендуется выбирать много больше 500 mse, т.к. это приводит к увеличению шума при считывании накопленной информации с линейки). Количество экспозиций указанной выше длительности (обычно 10-100)

КАЛИБРОВКА - Запуск процедуры калибровки после того, как введены длины волн реперов. В результате получается шкала X, выраженная в длинах волн.

ВКЛ/ВЫКЛ РЕПЕРЫ - Показывает/Скрывает реперные линии.

ДОБАВИТЬ РЕПЕР - Навестись мышкой (вертикальной штриховой линией) на выбранную линию. Для более точного наведения используйте стрелки-прокрутки, расположенные под экраном с изображением спектра. Затем сделать два щелчка левой

клавишей мыши (далее 2LM) на нее же. Появится приглашение "Вставить репер". В открывшемся меню ввести длину волны линии в Ангстремах. Кликнуть 1LM "Выполнить". Репер вставлен.

УДАЛИТЬ РЕПЕР - Для этого войти в "ПАРАМЕТРЫ"/ "Вкл./Выкл. РЕПЕРЫ". На экране появятся ранее установленные реперы, обозначенные зелеными линиями. Навестись на одну из линий. Для точного наведения используйте стрелки-прокрутки, расположенные под изображением спектра. С помощью них можно "растянуть" спектр в нужном участке, отмеченном вертикальной линией-курсором. Сделать 2LM на реперную линию. В появившемся меню выбрать "УДАЛИТЬ ВСЕ". Останутся только линии, обозначающие границы диапазона.

!!! Если после Включения реперы не появились, значит, они уже были удалены. Не нужно пытаться их удалить еще раз.

ОПЕРАЦИИ

Арифметические операции с изображением. Сглаживание (с параметром сглаживания в пикселях). Зеркальный поворот по оси X.

БУФЕР

ОЧИСТКА БУФЕРА. Арифметические операции между текущим спектром на данной странице и тем, который спасен в буфере командой СПЕКТР— > БУФЕР . ФАЙЛ — > БУФЕР и СТРАНИЦА — > БУФЕР -помещение в буфер файла с диска или одной из 5 страниц со спектрами, которые могут храниться в памяти во время работы программы.

Пример усреднения 2-х спектров:

- 1) Очистить буфер ("БУФЕР"/ "ОЧИСТИТЬ БУФЕР")
- 2) Кадр со спектром скопировать в буфер ("БУФЕР"/ "СПЕКТР — > БУФЕР").
- 3) Снять (или загрузить с диска) второй спектр
- 4) Просуммировать два спектра ("Буфер"/ "СПЕКТР + БУФЕР ")
- 5) Разделить результат на 2 ("ОПЕРАЦИИ"/ "/" КОНСТ."и Константа = 2).

ВЫХОД

Выход с сохранением данной страницы спектра или без него.

Над изображением спектра показано точное положение курсора (вертикальной линии) по оси X в пикселях. После калибровки оно также приводится и в длинах волн. Туда же выводится интенсивность спектра в данном пикселе. Слева и снизу от основного экрана со спектром находятся стрелки-прокрутки, с помощью которых можно Растянуть/Сжать спектр вдоль осей X или Y. При наведении курсора (вертикальной черты) на линию ее положение фиксируется, и при растяжении-сжатии по оси X положение линии на экране не изменяется. Это помогает навестись на центр линии или на репер более точно. В верхнем правом углу находится значок-стрелка. При 1LM на нее открывается дополнительный, второй независимый экран для вывода спектра. Спектр выводится в активный в данный момент экран. Экран активируется мышью, 1LM.

ЛИТЕРАТУРА

- (1) Д.Я.Мартынов, Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1977, с.123 - 139.