

УДК 520.35

ЭШЕЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОЙ ДИСПЕРСИИ ДЛЯ
ФОКУСА КУДЭ КРУПНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

А. Б. Домбровская*, Г. Г. Парицкая*

Рассматриваются варианты конструкции спектрометра высокого разрешения, основанного на применении крупногабаритной решетки эшеле.

Construction varieties of the high resolution spectrometer, based on the use of large echelle grating, are considered.

В 1960-70-е г. спектрографы фокуса кудэ, производимые зарубежными фирмами и в нашей стране, работали с эшелеттами, и в качестве светоприемника использовалась фотопластинка. Спектрографы были громоздкие и дорогостоящие, так как для получения высокой дисперсии и разрешения требовались 7-10 м коллиматоры и 2-3 м камеры, поэтому спектрографы размещались в шахтах-колодцах. Однако получить разрешение выше, чем 0.2-0.3 Å и дисперсию 2-3 Å/мм не удавалось.

Появление эшельных дифракционных решеток в 80-е г. стало поворотным пунктом в развитии астроспектроскопии высокого разрешения. Именно в астроспектроскопии проявляются преимущества применения эшельных решеток. Они позволяют получить:

1) более высокое (в 2-3 раза) теоретическое разрешение при той же проникающей силе за 1 час и при умеренном числе штрихов, благодаря работе в высоких порядках, что позволяет обеспечить одной эшельной решеткой достаточно широкий спектральный диапазон;

2) в 6-7 раз более высокую дисперсию (0.1 Å/мм), благодаря большим углам блеска эшельных решеток, что позволяет значительно сократить размеры астроспектрографов, а, следовательно, отпадает необходимость в строительстве глубоких шахт-колодцев и значительно удешевляется стоимость спектрографов.

Критерием эффективности астроспектрографов является разрешающая сила $\lambda/\delta\lambda$, равная

$$\lambda/\delta\lambda = \frac{C}{D} \cdot \frac{\lambda}{\Delta\omega} \cdot \frac{d\beta}{d\lambda},$$

где D и C - диаметры, соответственно, телескопа и коллиматора спектрографа.

Для крупных телескопов с диаметром зеркала 1.5 м турбулентный кружок рассеяния, соответствующий 1 угл. сек. дуги, составляет 0.24 мм. Для таких

* Ленинградское оптико-механическое объединение

телескопов теоретическая разрешающая сила $\lambda/\delta\lambda = 2 \cdot 10^5$ при линейной дисперсии $0.1 \text{ \AA}/\text{мм}$.

При работе с решеткой-эшелле происходит уменьшение свободного спектрального интервала и, чтобы охватить весь необходимый спектральный диапазон, используют несколько, обычно 10–20, высоких порядков интерференции. Чтобы порядки не накладывались друг на друга, астроспектрометры с эшелельными решетками строятся по схеме скрещенной дисперсии, где в качестве второго диспергирующего элемента применяются решетки-эшелетты с малой дисперсией, направление которой перпендикулярно направлению дисперсии основной эшелельной решетки, причем вместо длинного узкого спектра в виде одной строчки получают прямоугольник, состоящий из 15–20 строк, находящихся друг под другом, что позволяет применять современные многоканальные панорамные фотоэлектронные приемники (электронно-оптические преобразователи с ретиконами, диссекторы, ПЭС-матрицы).

Объекты и задачи исследования определяют оптическую схему кудэ эшелельного спектрометра (КЭСа). Наиболее узкие линии наблюдаются в спектрах красных гигантов и сверхгигантов. Полуширина этих линий $\delta\lambda$ порядка 0.07 \AA и, так как для построения контура линий достаточно иметь на этой полуширине четыре точки, практическое разрешение КЭС должно быть порядка 0.02 \AA при общей ширине контура линии 2 \AA (одновременно регистрируемый спектральный диапазон). Искажение контуров линий поглощения из-за зеемановского расщепления, исследование пульсации звездных атмосфер и осевого вращения звезд, изучение полос поглощения молекул газов требуют такого же разрешения. С другой стороны, измерение химического состава звезд по интенсивности линий атомов и молекул требуют более грубого разрешения порядка 0.06 \AA и на порядок большего спектрального диапазона – 20 \AA .

Для обзорных исследований спектров звезд и планет необходимо разрешение $0.2\text{--}0.3 \text{ \AA}$ при одновременно регистрируемом спектральном диапазоне $2000 \text{ \AA} - 4000 \text{ \AA}$.

Для решения этих задач оптическая схема КЭС должна отличаться универсальностью. Предлагаемая схема состоит из трех каналов, позволяющих решать широкий круг задач, и отличается сравнительной компактностью. Первый канал (рис. 1а) построен по автоколлимационной схеме двойной дифракции со скрещенной дисперсией и с решеткой-эшелле в качестве основного диспергирующего элемента. Как показал расчет, горизонтальная схема расположения всех оптических элементов не может обеспечить требуемый спектральный диапазон из-за больших углов дифракции. Поэтому для первого канала была выбрана вертикальная схема, в которой центры всех оптических деталей, включая и центр светоприемника, находятся в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии решетки-эшелле. Кроме того, в вертикальной схеме меньше вероятность попадания рассеянного света на светоприемник. Свет от входной щели I (рис. 1а) попадает на сферическое

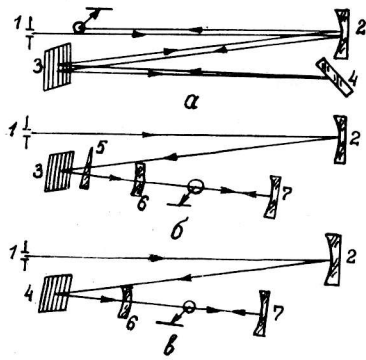


рис. 1

коллиматорное зеркало 2, затем на решетку-эшелю 3, которая раскладывает его в спектр с различными порядками, наложенными друг на друга. Плоская дифракционная решетка 4, дисперсия которой перпендикулярна к направлению дисперсии решетки-эшелю, в свою очередь, раскладывает спектр в виде строк, соответствующих разным порядкам и расположенных друг под другом. Участок одной из этих строк, попадая на решетку-эшелю 3 второй раз, растягивается ею в спектр с удвоенной дисперсией. Сферическое зеркало 2, которое работает в данном случае как камерное, строит изображение спектра в своей фокальной плоскости, где расположен светоприемник (рис.1а - плоскость изображения). Число штрихов решетки-эшелю 3 равняется 200, это обеспечивает ее работу в спектральном диапазоне от 3200 Å до 9000 Å. Большой угол блеска решетки 3, обеспечивающий необходимую высокую дисперсию, ограничивается виньетированием пучка у длинноволнового края строк. Так, например, при угле блеска $\gamma = 69^{\circ}16'$ виньетирование в инфракрасной области доходит до 22 %, при $\gamma = 65^{\circ}30'$ виньетирование в ИК области не превышает 7 %. Условие изоляции одной строки при повторном падении света на решетку-эшелю 3 обеспечивается числом штрихов 1800 для решетки 4. При этом рабочие порядки находятся в пределах от $k=10$ до $k=28$ и не превышают предел $k=40$, при котором начинают возникать нарушения из-за поляризации дифрагированного света. Так как относительное отверстие телескопов (АЗТ-22, ЗТА, БТА), которые могут работать с КЭС, в среднем равно 1/35, а длина штриха на решетке-эшелю не превышает 200 мм, то размер фокусного расстояния коллиматорно-камерного объектива должен быть 4800 мм. При выбранных параметрах оптических элементов первого канала весь спектральный диапазон получается в виде 19 строчек длиной от 116 Å в синей области до 433 Å в красной области, соответственно обратная линейная дисперсия изменяется от 0.074 Å/мм до 0.215 Å/мм. Однако на светоприемник одновременно попадает только часть строки, соответствующая линейному полю, которое ограничивается виньетированием пучка на решетке-эшелю и не превышает 40 мм. Поэтому одновременно регистрируемый диапазон получается от 3 Å в синей области до 8.5 Å в красной области. Чтобы устанавливать на приемник любую область рабочего спектрального диапазона, надо эшелю 3 поворачивать вокруг ее оси в пределах углов: $-5^{\circ}, +7^{\circ}$, а решетку 4, скрещенную с эшелю, поворачивать в пределах углов: $-17^{\circ}, +22^{\circ}$.

Аберрационный расчет оптической схемы 1-го канала проведен на ЭВМ по программе расчета хода лучей для систем с произвольным расположением оптических элементов. Оказалось, что кружок рассеяния для прямоугольного зрачка не превышает 0.03 мм, тогда как дифракционное изображение равно 0.04 мм. Итак качество изображения, даваемое 1-ым каналом, является дифракционным с полушириной 0.02 мм.

Размер входной щели 1 выбирается из следующих соображений: для телескопа с диаметром зеркала равным 1.5 м турбулентный кружок в 1" равен 0.26 мм, отсюда ширина щели 0.2 мм. Высота щели выбиралась из условия наблюдения протяженных объектов (планеты, межзвездная среда). Отсюда, считая максимальный размер планеты (например, Юпитера) равным 60", получаем для телескопа диаметром 1.5 м размер поля 16 мм. К этому следует добавить два спектра сравнения. Поэтому необходимая высота щели равна 25 мм. Как показал аберрационный расчет, в вертикальной схеме можно работать без наклона входной щели. Следовательно,

чтобы использовать полностью все практическое разрешение, выходную щель следует спроектировать на светоприемник с увеличением -0.1^X , чего проще всего достичь с помощью волоконно-оптического преобразователя - "фокона". С другой стороны, можно работать и без "фоконов", если позволяют размеры светоприемников. Например, при длинах волн короче 400-500 нм, где ПЭС-матрицы малочувствительны, можно работать с электронно-оптическими преобразователями диссекторами размерами до 40 мм.

Переход ко второму каналу (рис.1б) происходит путем наклона решетки-эшелю 3 на угол 6° по отношению к падающему пучку в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии решетки-эшелю. Решетка 4 выводится из пучка, для создания скрещенной дисперсии вводится призма Карпентера 5 и далее вводится зеркально-линзовая камера Ньютона-Максутова 6, 7. Свет от входной щели падает на коллиматорное зеркало 2 (как и в первом канале), затем проходит диспергирующий блок 3, 5 и, наконец, зеркально-линзовой камерой 6, 7 фокусируется на фотоэлектрический приемник. Призма Карпентера 5 представляет собой прозрачную дифракционную решетку, нанесенную на гипотенузную грань призмы. Как известно (Луер и др., 1979), призма Карпентера обеспечивает в два раза большее пропускание, чем обычная решетка и в то же время не изменяет хода лучей в оптической системе. Расчет преломляющего угла θ призмы Карпентера производился из величины угловой дисперсии, необходимой для разнесения строк по высоте щели в плоскости изображения. Угловая дисперсия $d\beta/d\lambda$ определяется из следующей формулы:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = (n-1) \frac{\operatorname{tg}\theta}{\lambda} \left[\left(\frac{\lambda}{d\lambda} \cdot \frac{dn}{n-1} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

где λ - длина волны прямого прохождения света;

n - показатель преломления призмы;

$d\lambda$ - спектральный интервал каждой строки спектра данного порядка, выделяемый эшелю;

dn - интервал изменения показателя преломления в пределах каждой строки.

Число штрихов решетки N , нарезанной на гипотенузной грани призмы с углом θ , определялось из условия прямого прохождения света для средней длины волны по формуле:

$$N = \frac{(n-1) \sin\theta}{\lambda}. \quad (2)$$

Чтобы увеличить на порядок одновременно регистрируемый спектральный диапазон по сравнению с I-м каналом, широкощельность (отношение фокуса коллиматора к фокусу камеры) была выбрана равной 5^X , что позволило получить одновременно регистрируемый диапазон от 0.07 Å до 0.13 Å. Зеркально-линзовая камера Ньютона 6, 7 имеет следующие характеристики: фокусное расстояние 960 м; относительное отверстие 1:7; поле зрения $2\beta = 3^\circ$; добавочное центральное экранирование 20 %; спектральный диапазон 3200 Å - 9000 Å. Этот спектральный диапазон разбит на два поддиапазона 3200 Å - 5000 Å и 5000 Å - 9000 Å, исходя из свойств светоприемников: для первого поддиапазона применяются

электронно-оптические преобразователи, состыкованные с ПЭС-матрицами, для красной и инфракрасной области применяются только ПЭС-матрицы. В первом диапазоне применяется призма Карпентера с преломляющим углом $\theta = 7^\circ 15'$ и числом штрихов на гипотенузной грани $N = 150$, для обеспечения требуемого расстояния между строчками в плоскости изображения. Во втором поддиапазоне характеристики призмы Карпентера таковы: $\theta = 2^\circ 37'$, $N = 50$.

В первом поддиапазоне в плоскости изображения получается 11 строчек, средняя длина волны меняется от 3250 \AA до 5059 \AA , расстояние между соседними строчками изменяется от 3.8 мм до 6 мм и обратная линейная дисперсия изменяется от 0.7 \AA/мм до 1.1 \AA/мм . Во втором поддиапазоне в плоскости изображения получается 9 строчек, средняя длина волны изменяется от 5055 \AA до 9099 \AA , расстояние между соседними строчками изменяется от 38 мм до 7 мм, обратная линейная дисперсия изменяется от 1.2 \AA/мм до 2.1 \AA/мм .

Если бы в качестве второго диспергирующего элемента для создания скрещенной дисперсии применялась обычная призма, то ее преломляющий угол α должен был быть порядка 60° , что исключает ее применение из-за большого поглощения. Аберрационный расчет, проведенный для камеры Ньютона 6,7 для бесконечно узкой щели по программе ОПАЛ, разработанной в ЛИТМО, показал, что полуширина спектральной линии не превышает 2 мкм для $\lambda = 3200 \text{ \AA}$ и 3 мкм для $\lambda = 9000 \text{ \AA}$.

Третий канал (рис. 1в) получается из 2-го канала простым выведением призмы Карпентера 5 и заменой решетки-эшелле 3 решеткой 4 из 1-го канала. Этот канал используется для проведения обзорных исследований спектров звезд и планет. Так, одновременно регистрируемый диапазон в области от 3200 \AA до 5000 \AA равен $285\text{--}270 \text{ \AA}$, при этом спектральное разрешение для щели 0.2 мм изменяется от 0.34 \AA до 0.32 \AA , а в области от 5000 \AA до 9000 \AA одновременно регистрируемый диапазон от 270 \AA до 200 \AA , а спектральное разрешение — от 0.32 \AA до 0.24 \AA .

Была проведена оценка проникающей силы спектрометра с телескопом БТА с диаметром зеркала 6 м.

Расчетное пропускание 1-го и второго каналов — соответственно 0.25 и 0.35.

При расчете использовались данные о проникающей силе, полученные на спектрометрах подобного типа с разрешением $0.03 \text{ \AA} - 0.2 \text{ \AA}$ в Ликской и Европейской Южной обсерваториях и обсерватории Мак-Дональда (Тулл, 1972; Миллер и др., 1980; Луер, 1979).

Квантовый выход ПЭС-матрицы был принят 80 %, квантовый выход ЭОПа — 10 %.

Проникающая сила с телескопом БТА за 1 час при применении в качестве приемника ПЭС-матрицы должна составить для первого канала 9.6^m при разрешении $0.01 \text{ \AA} - 0.04 \text{ \AA}$, а для второго канала 9.8^m при разрешении $0.04 \text{ \AA} - 0.1 \text{ \AA}$.

При этом для полного использования света от БТА при щели 0.2 мм необходимо применение "резателя изображения". Наиболее подходящим является "резатель типа зеркальной щели", предложенный сотрудниками САО (авторское свидетельство N 1236325 от 1986 г.), который при количестве разрезов, равных 7, использует 75% площади турбулентного кружка 2". С телескопами диаметром зеркала 1.5 — 2 м спектрометр может работать без потерь со щелью 0.2 мм без "резателя".

Описанный спектрометр отличается от других эшелельных спектрометров высокой дисперсии, работающих за рубежом, в два раза более высоким разрешением, а также наличием дополнительных каналов меньшего разрешения для обзорных работ. В обсерваториях Советского Союза таких спектрометров не имеется.

ЛИТЕРАТУРА

- Луер и др. (Luyer M. Le., Melnik J., Richter W.): 1979, ESO Messenger, No. 17, P. 27-29.
- Миллер и др. (Miller J. S., Robinson L. B., Schmidt G. D.): 1980, Publ.Astron. Soc. Pacif., No. 549, P. 702.
- Тулл (Tull R.): 1972, in: ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for large Telescopes, P. 259-274.

Поступила в редакцию
28 декабря 1989 г.