

## К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ ТЕЛЕСКОПА И СПЕКТРОМЕТРА

Ф. А. МУСАЕВ, В. Е. ПАНЧУК

*Рассмотрены некоторые технические решения, позволяющие минимизировать потери света при спектроскопических и спектрополяриметрических наблюдениях.*

*Some technical decisions allowed to minimize the light losses in spectroscopic and spectropolarimetric observations are considered.*

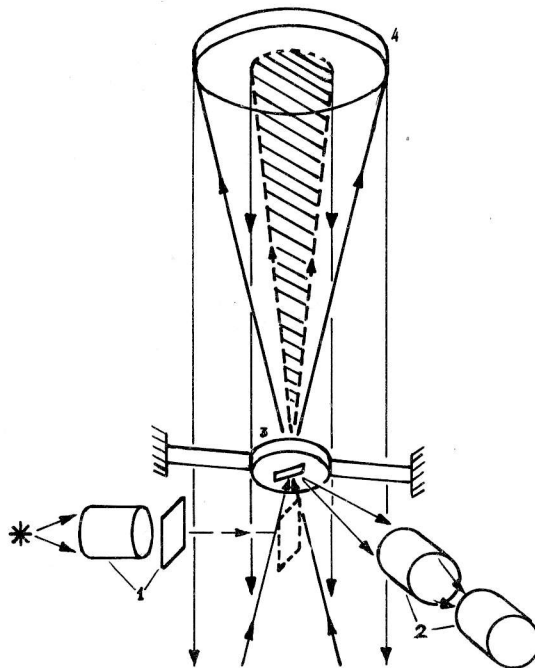
В работе Ключковой и Панчука (1991) высказано мнение, что создание классического щелевого спектрографа для первичного фокуса БТА неперспективно. Справедливость высказанных при этом соображений косвенно подтверждается отсутствием аналогичных разработок на зарубежных телескопах. Однако потребность в щелевых спектрополяриметрических методах сохраняется и подтверждается попытками реконструкции спектрографа первичного фокуса БТА в светосильный спектрополяриметр. Кроме этого, задача минимизации инструментальной поляризации и снижения потерь света представляет самостоятельный интерес. В порядке дискуссии ниже рассмотрим некоторые нетривиальные решения.

Известно, что преимущества использования спектральной аппаратуры в первичном фокусе состоят в минимизации потерь на оптике телескопа и в минимизации потерь на входной щели спектрографа. Кроме этого, в первичном фокусе большого телескопа предпочтительней размещать поляриметрическую аппаратуру. Преимущества фокусов Кудэ и Нэсмита состоят в возможности размещения спектральной аппаратуры с большим диаметром коллимированного пучка и с достаточным набором камер разной светосилы. С этой точки зрения свойства спектральных приборов, размещаемых в фокусе Кассегрена, занимают промежуточное место. Рассмотрим решение, в значительной мере позволяющее объединить достоинства этих вариантов размещения спектральной аппаратуры.

На рис. 1 приведен вариант экономичного сочетания телескопа с коллиматором спектрометра. Щелевая часть и коллиматор спектрометра устанавливаются в первичном фокусе телескопа. Щелевая часть может быть оформлена в виде отражающего диска, закрепленного на растяжках, в центре диска находится прямоугольная диафрагма с размерами, соответствующими требуемому спектральному разрешению и высоте спектра. Диск слегка наклонен с тем, чтобы обеспечить телевизионный подсмотр щели, а диаметр диска не должен превышать диаметр тени кабины (или узла) первичного фокуса в коллимированном пучке. Этому условию должны удовлетворять и габариты поляриметрических узлов, устанавливаемых сразу за щелевой частью. Рядом со щелевой

частью должна быть установлена оптика эталонных источников света. На телескопе с небольшим диаметром зеркала узлы подзора шели и искусственной звезды могут быть размещены вне апертуры главного зеркала. В частности, узел искусственной звезды может быть размещен под главным зеркалом, после кассегреновского отверстия.

Рис.1. Схема модуля коллиматора, размещенного в первичном фокусе. Обозначения: 1 - оптика искусственной звезды; 2 - ТВ-подзор шели; 3 - шель, 4 - зеркало коллиматора.



Схемы вывода коллимированного пучка даны на рис.2. Для предотвращения засветки коллиматора пучками, идущими мимо щелевой части, стенки коллиматора удлинены вниз и выполняют функцию бленды. Коллимированный пучок отражается от диагонального зеркала БТА и попадает в отверстие оси "Z". В фокусе Нэсмита располагается остальная часть спектрометра - дифракционная решетка и камера со светоприемником. Для 2-м телескопа схема выглядит еще проще (рис.2б). В этом случае можно получить наиболее экономичный вариант спектрометра, совмещая функции дифракционной прозрачной решетки с функциями коррекционной пластины Шмидта (Ричардсон, 1981). Технологически это возможно: прозрачная реплика наносится на плоскую сторону коррекционной пластины.

На рис.3 приведен вариант работы с коллимированным пучком в двухлучевом спектрометре. Для создания схемы такого спектрометра, каждая из ветвей которого оптимизирована для работы в одном из спектральных диапазонов, установлен светоделитель. Дифракционная решетка, работающая в красном диапазоне, представляет собой прозрачную реплику, нанесенную на плоскую часть коррекционной пластины Шмидта. Дифракционная решетка синего диапазона работает на отражение, поэтому ее необходимо совмещать с асферической поверхностью пластины Шмидта.

На рис. 4 приведен вариант двухлучевого эшелле-спектрометра. Первая грань порядкоразводящей призмы синей ветви снабжена дихроичным покрытием и служит светоделителем. Разведение спектральных порядков красной ветви выполняется прозрачной репликой, нанесенной на плоскую поверхность пластины Шмидта.

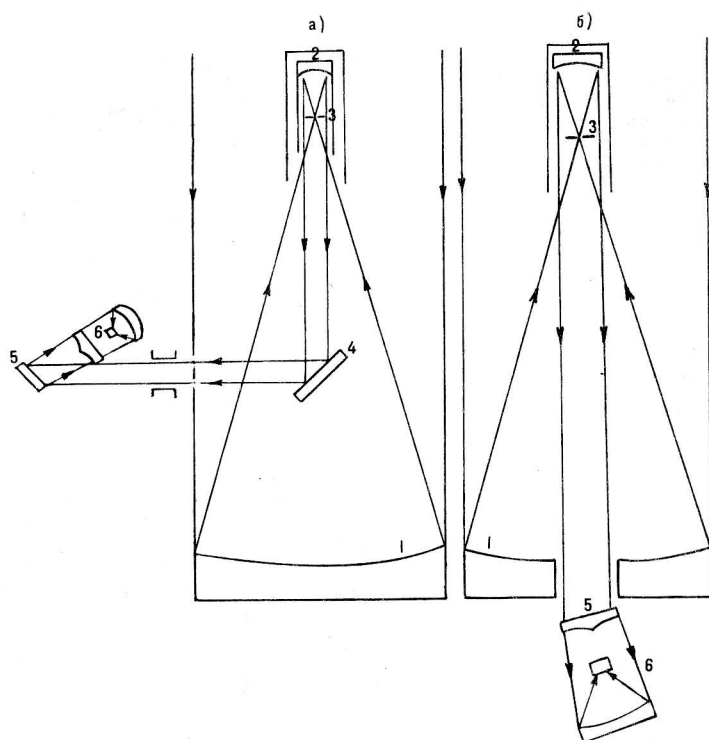
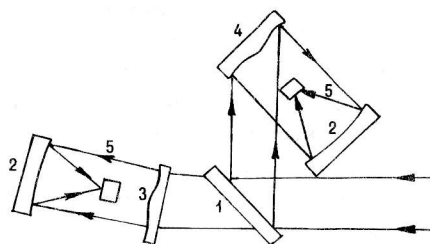


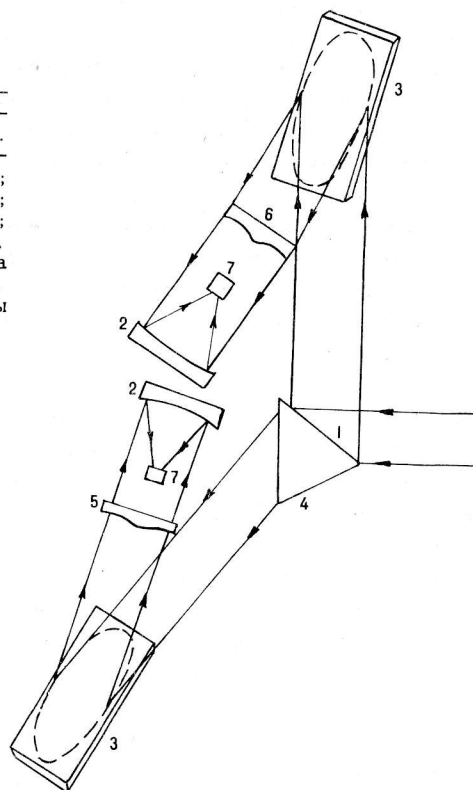
Рис. 2. Схема вывода коллимированного пучка из первичного фокуса большого телескопа. а) БТА; б) 2-м телескоп. Обозначения: 1 - главное зеркало; 2 - зеркало коллиматора; 3 - щелевая часть; 4 - диагональное зеркало БТА; 5 - дифракционная решетка; 6 - камера со светоприемником.

Рис. 3. Двухлучевая схема использования коллимированного пучка на платформе фокуса Нэсмита или Кассегрена. Обозначения: 1 - светоделитель; 2 - объективы камер Шмидта; 3 - коррекционная пластина Шмидта красной ветви спектрографа, совмещенная с прозрачной репликой; 4 - коррекционная пластина Шмидта синей ветви, отражающая реплика нанесена на асферическую поверхность; 5 - светоприемники, встроенные в камеры. Штрихи на обеих решетках ориентированы перпендикулярно плоскости рисунка.



Перейдем к перечислению достоинств и недостатков рассматриваемых схем.

Рис. 4. Двухлучевая эшелле-система использования коллимированного пучка на платформе фокуса Нэсмита или Кассегрена. Обозначения: 1 - светоделитель; 2 - объективы камер Шмидта; 3 - решетки эшелле; 4 - порядкоразводящая призма синей ветви; 5 - коррекционная пластина синей ветви; 6 - коррекционная пластина красной ветви, порядкоразводящая реплика нанесена на плоскую сторону, 7 - светоприемники. Штрихи на решетках эшелле параллельны плоскости рисунка.



По широкощельности схема размещения коллиматора в первичном фокусе не создает дополнительного выигрыша, основное ее достоинство состоит в минимуме оптических поверхностей. Другим преимуществом является отсутствие жестких габаритных ограничений, существующих в случае размещения всего спектрометра как в первичном фокусе, так и в фокусе Кассегрена. Это позволяет увеличивать диаметр коллимированного пучка, т.е. дает возможность реализовать относительно высокое спектральное разрешение. Если речь идет о средних размерах коллимированного пучка (диаметр 150 мм), то в схеме фокуса Нэсмита БТА до формирования коллимированного пучка свет претерпевает 3 отражения на оптике телескопа, одно отражение на ломающем зеркале и два отражения в кассегреновском коллиматоре (за основу взята схема эшелле-спектрометра Зебра с диаметром коллимированного пучка 130 мм; Гажур и др., 1990). Такое большое число отражений определяется габаритами платформы фокуса Нэсмита. Принимая коэффициент отражения алюминированного зеркала  $K=0.8$ , для этой схемы оценим потери:  $0.8^6=0.26$ , т.е. теряется 74% потока, перехватываемого 6-м апертурой. Для схемы на рис. 2а потери составят:  $0.8^3=0.51$ , т.е. теряется 49% потока. До создания коллимированного пучка в фокусе Кассегрена 2-м телескопа свет претерпевает 2 отражения на оптике телескопа, отражение на ломающем зеркале и 2 отражения на зеркалах коллиматора, при этом теряется 67% потока. Схема на рис. 2б приводит к потерям 36% перехватываемого апертурой потока. Таким образом, рассматриваемая схема приводит к экономии 25-30% собираемого телескопом света.

Третьим преимуществом является осевой коллиматор. Если сравнивать рис. 2а с оптической схемой светосильного спектрографа первичного фокуса СП-160 (Зандин и др., 1977), то приходим к выводу, что при равном числе отражающих поверхностей, формирующих коллимированный пучок, схема СП-160 характерна внеосевым коллиматором (1:4), что, как известно, создавало трудности при эксплуатации спектрографа.

Четвертым преимуществом является возможность развития двухлучевых схем (для первичного фокуса и фокуса Кассегрена построение оптимальных двухлучевых систем со значительным диаметром коллимированного пучка невозможно из-за габаритных ограничений).

Пятым преимуществом считаем возможность сочетания тех спектрополяриметрических методов, где принципиальна низкая инструментальная поляризация, с крупногабаритной спектральной аппаратурой. Здесь же можно упомянуть о возможности снизить затраты на те оптические узлы спектрополяриметра, стоимость которых связана с масштабом изображения на входной щели.

К недостаткам отнесем "полустационарность" предлагаемой схемы - на многопрограммных телескопах блок коллиматора должен быть съемным. Если ориентироваться на схему двухлучевого спектрометра, то приходим к выводу, что эффективность применения резателя изображения (Афанасьев и др., 1986) будет снижена из-за невозможности применения диэлектрических покрытий, высокоэффективных только в одном из спектральных диапазонов.

Здесь же рассмотрим ограничения, налагаемые схемой совмещения в одном оптическом элементе решетки и коррекционной пластины. Сначала рассмотрим случай прозрачной решетки, т.е. условия для красной ветви спектрометра (рис. 5а). Коррекционная пластина должна быть перпендикулярна оси камеры. Следовательно, угол падения света на решетку  $\alpha$  и угол блеска решетки  $\theta_B$  однозначно связаны. Из условия преломления света на границе "воздух/материал реплики" и условия перпендикулярности плоскости решетки к оси камеры получим

$$\sin(\beta + \theta_B) = n \sin \theta_B,$$

откуда  $\beta = \arcsin(n \sin \theta_B) - \theta_B$ .

Подставляя это выражение в формулу решетки

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta),$$

получим соотношение между длиной волны на оси камеры  $\lambda$  и углом падения  $\alpha$ :

$$\frac{m\lambda}{d} = \sin \alpha + \sin[\arcsin(n \sin \theta_B) - \theta_B].$$

Результаты вычислений для показателя преломления материала  $n=1.5$  и различных значений постоянной решетки  $d$  приведены на рис. 6. Кроме условия перпендикулярности решетки следует удовлетворить условию световой эффективности решетки:  $\alpha > \theta_B$ . Приходим к выводу, что в рассматриваемом диапазоне значений  $\theta_B$  условие  $\alpha > \theta_B$  выполняется. Варьируя в небольших пределах  $\theta_B$ , можно концентрировать свет в требуемом диапазоне длин волн.

Так как материал реплики не пропускает ультрафиолетовое излучение, в синей ветви спектрометра коррекционная пластина, совмещенная с решеткой, должна рабо-

тать на отражение (рис.5б). Здесь появляется дополнительное ограничение на угол  $\alpha$  - коллимированный пучок не должен задевать узел светоприемника (см. рис.3). Поэтому угол между осями камеры и коллиматора значительный, что снижает световую эффективность решетки и заставляет уходить на более высокие рабочие порядки ( $m=2-3$ ).

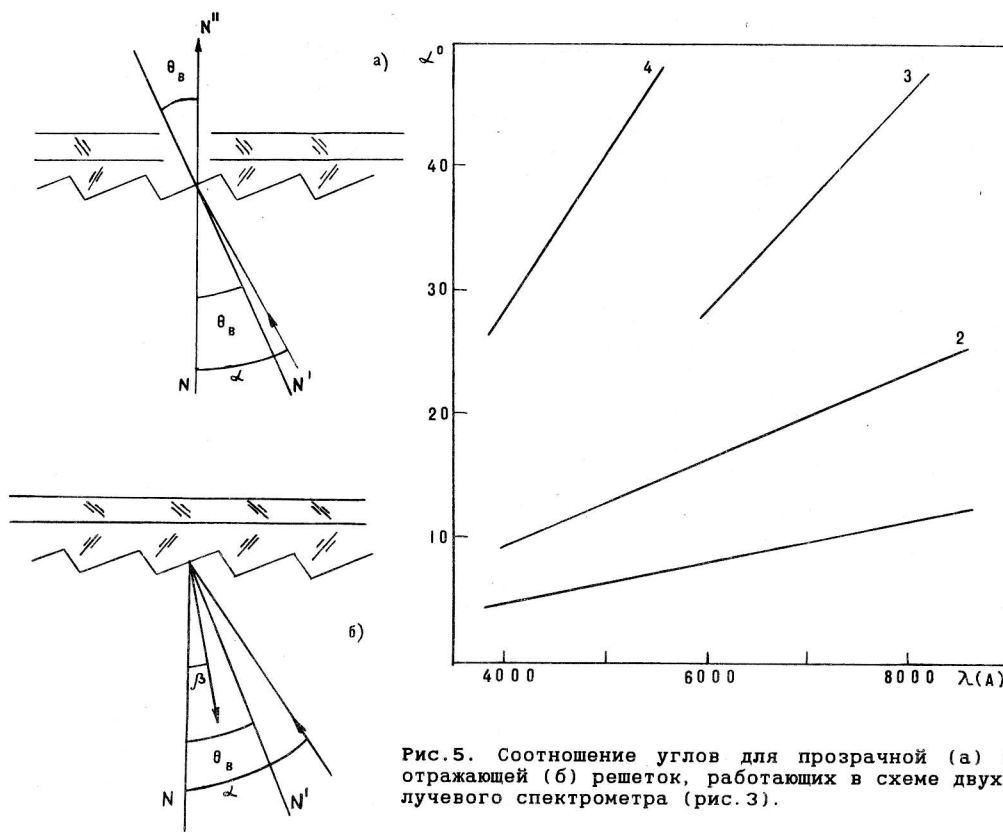


Рис.5. Соотношение углов для прозрачной (а) и отражающей (б) решеток, работающих в схеме двухлучевого спектрометра (рис.3).

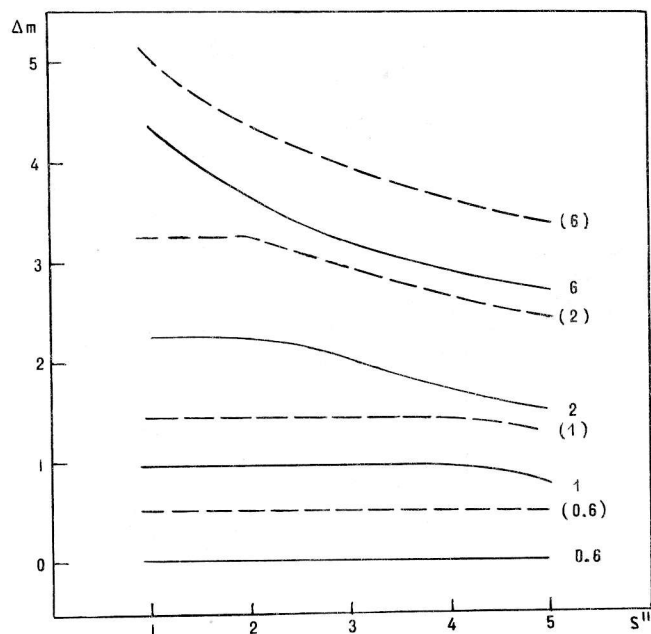
Рис.6. Зависимость длины волны в центре поля камеры от угла падения света на решетку, совмещенную с коррекционной пластиной. Обозначения: 1 - 300 штр/мм,  $\theta_B=4.3^\circ$ ,  $m=1$ ; 2 - 600 штр/мм,  $\theta_B=8.6^\circ$ ,  $m=1$ ; 3 - 600 штр/мм,  $\theta_B=24^\circ$ ,  $m=2$ ; 4 - 600 штр/мм,  $\theta_B=24^\circ$ ,  $m=3$ .

Оценки показали, что наиболее экономичным по световым потерям является вариант, когда смонтированная в кассегреневском отверстии камера Шмидта имеет прозрачную реплику, нанесенную на плоскую поверхность коррекционной пластины (рис.2б).

Теперь следует определить оптимальный диаметр телескопа, для которого выигрыш по потоку, обеспечиваемый применением данной схемы, сопоставим с потерями света на щели. Для простоты предположим, что в основу спектрометра взята камера Шмидта

$F=175$  мм из комплекта спектрографа UAGS (Гутке, 1969), а наблюдения выполняются в первом порядке прозрачной реплики 600 штр/мм. Светоприемник квадратный, со стороной 10 мм, что позволит работать без заметного бокового виньетирования с диаметром коллимированного пучка 115 мм, при этом светосила камеры составит 1:1.5. Ширину двух элементов разрешения примем 0.03 мм, это обеспечит спектральное разрешение не хуже 3А при обратной дисперсии 96 А/мм, т.е. одновременно регистрируется 960 А в красной области спектра. Ширину щели примем соответствующей двум элементам разрешения. Распределение яркости в турбулентном диске звездного изображения примем однородным. Выполним расчет для телескопов различного диаметра, используя значения светосилы в первичном фокусе и величину центрального экранирования, характерные для телескопов НП Карл-Цейсс-Йена (0.6, 1 и 2-м), и для 6-м телескопа. Результаты расчета приведены на рис. 7.

Рис. 7. Выигрыш  $\Delta m$ , обеспечиваемый применением телескопов разного диаметра для спектроскопии со средним спектральным разрешением, в зависимости от диаметра изображений  $s''$ . Диаметр телескопа (м) указан рядом с кривыми. Пунктиром обозначен выигрыш, обеспечиваемый применением приведенных на рис. 2 схем.



Из рис. 7 следует, что рассматриваемый вариант наблюдений на телескопах с диаметром до 1.5 м характеризуется отсутствием потерь на щели вплоть до  $s=4''$ . Применение новой схемы построения коллимированного пучка на 2-м телескопе выведет его на уровень 6-м телескопа, работающего при изображениях 3"-4". Естественно, что данные оценки справедливы и для наблюдений с более высоким спектральным разрешением во всех случаях, когда используется камера указанной светосилы. Для БТА диаметр коллимированного пучка ограничен диаметром отверстия в оси "Z" и не может превышать 150-160 мм. Для других рассматриваемых телескопов ограничения на диаметр коллимированного пучка определяются, главным образом, диаметром кассеновского отверстия.

Рассмотренная схема обладает минимальным числом поверхностей (1), расположенных перед поляризметрическими анализаторами, т.е. перспективна для выполнения обширного класса спектрополяризметрических исследований.

#### Литература

- Афанасьев В. Л., Гажур Э. Б., Панчук В. Е.: 1986, Авт. свидет. №1236325.
- Гажур Э. Б., Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1990, Письма в астрон. ж., 16, 484.
- Гутке Д.: 1969, Йенское обозрение, ярмарочный выпуск, 101.
- Зандин Н. Г., Колесников А. Е., Пейсахсон И. В., Лобачев М. В.: 1977, Оптико-механич. промышл., вып. 2, 34.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 33, 3.
- Ричардсон (Richardson E. H.): 1981. In "Instrumentation for astronomy with large optical telescopes", Proc. IAU Coll. No. 67, ed. C. M. Humphries, 129.

Поступила в редакцию  
15 февраля 1991 г.