

УДК 520.84/85:520.22; 524.7

## МЕТОДИКА ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СЛАБЫХ ОБЪЕКТОВ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ БТА

© 2012 В. Л. Афанасьев<sup>1</sup>, В. Р. Амирханян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 13 июня 2012 года; принята в печать 20 сентября 2012 года

Описывается методика спектрополяриметрических наблюдений с возможностью измерения параметров Стокса в одной из наблюдательных мод редуктора светосилы SCORPIO на 6-м телескопе САО РАН. Приводятся характеристики прибора в спектрополяриметрическом режиме наблюдений. Представлен алгоритм обработки данных наблюдений. Возможности использования спектрополяриметрического режима SCORPIO демонстрируются на примерах наблюдений различных астрономических объектов.

Ключевые слова: *галактики: ядра—галактики: балджи—галактики: звездные населения—галактики: эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

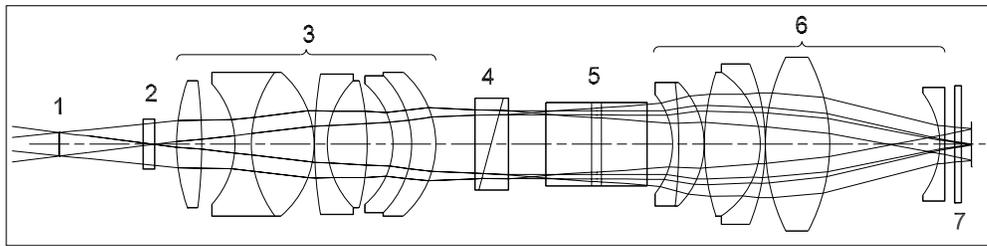
Классические методы поляриметрии и спектрополяриметрии, применяемые для наблюдений слабых объектов, основаны на применении двулучевых схем и счетчиков фотонов, что позволяет быстро переключать положения фазовых элементов, и тем самым подавлять атмосферные мерцания, являющиеся основной помехой при поляриметрических наблюдениях [1, 2].

Современные тенденции развития методов наблюдений слабых объектов, применяемых на крупных телескопах, основаны на использовании редукторов светосилы и малокадровых панорамных приемников (ПЗС). В частности, за последние годы редукторы светосилы дополняются поляриметрическими режимами наблюдений ([3–5]), что позволяет измерять поляризацию слабых объектов с умеренным и низким спектральным разрешением. Спектрополяриметрические данные важны для исследования физики таких объектов как активные ядра галактик, сверхновые, сильно замагниченные белые карлики и другие, и позволяют во многих случаях получать информацию о природе регистрируемого излучения, изучать их геометрические и магнитные характеристики.

На 6-метровом телескопе БТА с 2000 г. весьма успешно используется фокальный редуктор светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations), реализующий в первичном фокусе телескопа разнообразные режимы наблюдений —

полевая фотометрия в широко-, средне- и узкополосных фильтрах; панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо, спектроскопия с длинной щелью, многощелевая спектроскопия и спектрополяриметрия [6]. В последнем случае в качестве анализатора поляризации используется поворачиваемая пластина Савара, устанавливаемая за набором щелей (диафрагм). Описание методики наблюдений и обработки данных можно найти в [7]. С этим прибором были проведены измерения линейной и круговой поляризации в спектрах слабых квазаров и звезд [8, 9]. Основным недостатком методики наблюдений с применением пластины Савара является различный хроматизм для обыкновенного и необыкновенного лучей, что приводит к различию контуров спектральных линий, и малая высота щели — в описанном в [7] варианте наблюдений она составляет всего 9", что крайне затрудняет вычитание фона неба у протяженных объектов. Это обстоятельство (как впрочем и многие другие) инициировало разработку редуктора светосилы нового поколения БТА (SCORPIO-2), ориентированного на применения ПЗС-матрицы большого формата, и в котором значительно расширены возможности по сравнению с работающим на БТА вариантом SCORPIO (количество применяемых в приборе фильтров и решеток, быстрый ввод в пучок интерферометра Фабри-Перо, включение IFU-моды и т.д.).

Здесь мы представляем описание конструктивных особенностей поляриметрической моды



**Рис. 1.** Оптическая схема поляриметрической моды редуктора светосилы нового поколения SCORPIO-2: 1 — щель; 2 — фазовая пластина; 3 — коллиматор; 4 — призма Волластона; 5 — гризма; 6 — камера спектрографа; 7 — входное окно криостата ПЗС.

наблюдений в новом редукторе светосилы БТА SCORPIO-2. Так же описана методика наблюдений и алгоритмы обработки получаемых результатов.

## 2. СХЕМА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений поляризации регистрируемого сигнала была выбрана оптическая схема, состоящая из поворачиваемых фазовых пластин и неподвижного анализатора. Такой вариант позволяет унифицировать схему при переходе между измерениями линейной и круговой поляризации: фазовая пластина, сдвигающая фазу на  $\lambda/2$ , замещается пластиной со сдвигом  $\lambda/4$ . На Рис. 1 представлена оптическая схема SCORPIO в конфигурации режима поляриметрических и спектрополяриметрических наблюдений. Переход в режим поляриметрических измерений осуществляется вводом в оптический тракт прибора анализатора и прецизионного блока, содержащего фазовые пластины и дихроичный анализатор (поляририд), предназначенный для измерения линейной поляризации звездобразных и протяженных объектов в поле зрения диаметром  $6'$ .

В качестве анализаторов поляризации используются две призмы Волластона WOLL-1 и WOLL-2 и поляризационный дихроичный фильтр (POLAROID).

WOLL-1 представляет собой призму Волластона изготовленную из кристалла исландского шпата, который имеет восьмигранную форму размером  $55 \times 55$  мм и толщину 17 мм. Угол разведения обыкновенного и необыкновенного лучей составляет  $5^\circ$ , что соответствует рабочей высоте щели около  $2'$  на небесной сфере.

WOLL-2 представляет собой составной оптический элемент состоящий из четырех призм Волластона с попарной ориентацией оптических осей  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ . Все призмы изготовлены из кристалла исландского шпата, который имеет четырехгранную форму размером  $25 \times 25$  мм и толщину 10 мм. Угол разведения обыкновенного и

необыкновенного лучей составляет  $2^\circ 5'$ , и рабочая высота щели — около  $1'$  на небесной сфере.

Для ввода в оптический тракт прибора анализаторы смонтированы на вращающейся турели, дающей воспроизводимость установки не хуже  $0.1$ . Прецизионный блок содержит три фазовых поляризационных элемента — ахроматические  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$  пластинки диаметром 30 мм и дихроичный поляририд диаметром 70 мм, пропускающий излучение только в одной плоскости поляризации. Все три элемента установлены во вращающихся оправках и вводятся в пучок путем линейного перемещения. Механизм перемещения имеет четыре фиксированные позиции —  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ , Polaroid и Hole — и смонтирован на плоской плите. В блоке также установлены две турели фильтров на десять позиций для установки в пучок интерференционных фильтров. Блок содержит следующие элементы управления и контроля.

1) Шаговый двигатель вращения ходового винта каретки для смены фазовой пластины с фиксацией нуль-пункта и позиции. Воспроизводимость установки позиции не хуже 10 мкм.

2) Шаговый двигатель установки угла поворота фазовых элементов. Каждый фазовый элемент устанавливается в фиксированные позиции по углу поворота ( $\lambda/2$  пластина в  $0^\circ$ ,  $22^\circ 5'$ ,  $45^\circ$ ,  $67^\circ 5'$ ,  $\lambda/4$  пластина в  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , поляририд в  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) с механической фиксацией. Воспроизводимость установки угла поворота не хуже  $0.02$ . Индикация каждой позиции по углу поворота осуществляется при помощи датчиков Холла.

3) Шаговый двигатель механизма поворота турелей фильтров и фиксации позиции, для индикации каждой из десяти позиций используются датчики Холла.

Блок смонтирован на плоской пластине. С одной её стороны находится механизм перемещения фазовых элементов, а с другой — турели фильтров. Управление элементами осуществляется с помощью микропроцессора.

Наблюдения в режимах WOLL-1 и POLAROID проводятся в пакетном режиме, который позволяет сделать последовательность экспозиций с различными установками угла поворота фазовой пластины или поляроида. Меню установки последовательности переключений вызывается из программного интерфейса управления спектрографа SCORPIO-2. Количество циклов ничем, кроме длительности ночи, не ограничено. При установке в интерфейсе флажка “ $\lambda/2$ ” в сходящийся пучок водится фазовая пластина  $\lambda/2$ , которая последовательно в каждом цикле устанавливается в четыре позиции по углу —  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22^\circ 5'$  и  $67^\circ 5'$ . Установка “ $\lambda/4$ ” позволяет последовательно поворачивать введенную пластину  $\lambda/4$  в две позиции по углу  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Наконец, при установке “Polaroid”, дихроичный анализатор устанавливается в три угла  $+60^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-60^\circ$ . Установка флажка “ $\lambda/2 + \lambda/4$ ” позволяет проводить полный цикл переключений, необходимый для измерения всех четырех параметров Стокса. Длительность экспозиции, ее тип (`obj`, `flat`, `neon` и `eta`), а также параметры считывания ПЗС (область считывания и биннинг, усиление GAIN и скорость считывания RATE) устанавливаются в меню интерфейса управления накоплением спектрографа SCORPIO-2. Там же устанавливается число повторяющихся экспозиций при наблюдениях в режиме WOLL-2. При наблюдениях в режиме WOLL-2 в обязательном порядке в течение ночи необходимо проводить наблюдения стандартов нулевой поляризации для калибровки чувствительности всех четырех поляризационных каналов.

### 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА

Как известно, параметры поляризованной квазимонохроматической волны адекватно описываются компонентами 4-вектора Стокса (см., например, обзор [10]). Параметры Стокса —  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  — имеют размерность интенсивности или потока излучения и соответствуют разностям интенсивности излучения с различными формами поляризации. При этом  $I$  представляет собой интенсивность волны,  $Q$  и  $U$  характеризуют линейную поляризацию, а  $V$  — круговую поляризацию излучения. Полное определение параметров Стокса и их связь с параметрами соответствующих колебаний электромагнитного поля содержатся в работах [11–13]. В схемах с быстрым переключением фазовых элементов регистрируемая интенсивность модулируется, и измеряемый сигнал есть, по-существу, линейная комбинация произведений параметров на значения гармонических функций для различных углов. Определение параметров Стокса сводится к решению системы линейных уравнений. При этом, при достаточно большом

дроблении углов фазовых пластин в пределах полуокружности и большом числе повторений этой процедуры, точность определения параметров поляризации ограничивается только статистикой отсчетов [14].

При наблюдении слабых объектов приходится делать достаточно длинные экспозиции и нет возможности часто и подробно по углу переключать фазовые элементы. Нужно также иметь в виду, что в реальных условиях наблюдений всегда регистрируется суммарный сигнал от объекта и фона неба. При этом излучение фона часто бывает линейно поляризованным, особенно при большой фазе Луны или в сумерках, иногда эта поляризация может доходить до 20–30%. Для получения неискаженной информации о поляризации излучения исследуемого объекта необходимо вычесть фон неба, полученный при аналогичных положениях анализатора. Тем самым может быть учтена постоянная составляющая фона. Точное решение задачи о сложении поляризации при последовательном прохождении света через несколько частично поляризующих сред может быть получено путем перемножения матриц преобразования параметров Стокса для этих сред [11, 13]. Рассмотрим случай определения параметров линейной поляризации с вращающейся фазовой пластиной  $\lambda/2$  и поляризатором, который выделяет только одну проекцию (компоненту) электрического вектора. Компоненты вектора Стокса излучения, прошедшего через такую систему могут быть найдены из соотношений:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} M \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\lambda^2 - S_\lambda^2 & 2C_\lambda S_\lambda & 0 \\ 0 & 2C_\lambda S_\lambda & S_\lambda^2 - C_\lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} 1 & C & S & 0 \\ C & C^2 & CS & 0 \\ S & CS & S^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

есть матрица преобразования поляризатора. Здесь

$$C = \cos(2\varphi), \quad S = \sin(2\varphi), \\ C_\lambda = \cos(2\theta), \quad S_\lambda = \sin(2\theta),$$

где  $\varphi$  — направление оси пропускания поляризатора в произвольной системе координат, а  $\theta$  — направление оси наибольшей скорости фазовой

пластины. В общем случае эти направления не совпадают.

Перемножим матрицы и получим параметры Стокса на выходе системы:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I + CQ_\lambda + SU_\lambda \\ IC + C^2Q_\lambda + CSU_\lambda \\ IS + CSQ_\lambda + S^2U_\lambda \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$Q_\lambda = Q(C_\lambda^2 - S_\lambda^2) + 2UC_\lambda S_\lambda, \\ U_\lambda = Q(C_\lambda^2 - S_\lambda^2) + 2UC_\lambda S_\lambda.$$

Детектор регистрирует интенсивность

$$I' = \frac{1}{2} \{ I + C[Q(C_\lambda^2 - S_\lambda^2) + 2UC_\lambda S_\lambda] + S[2QC_\lambda S_\lambda - U(C_\lambda^2 - S_\lambda^2)] \}. \quad (4)$$

Для определения линейной поляризации (степени поляризации  $P$  и угла плоскости поляризации  $\phi$ ) нам необходимы два нормированных на полную интенсивность параметра Стокса  $Q$  и  $U$ , которые связаны с  $P$  и  $\phi$  известными соотношениями:

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad \phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (5)$$

В идеальном случае для определения параметров линейной поляризации необходимо три измерения. В реальности, для ослабления ошибок вносимых неидеальностью измерительной техники и атмосферными помехами, выполняется восемь измерений: для углов  $\theta$  равных  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22.5^\circ$  и  $67.5^\circ$ . При этом для каждого из перечисленных углов ориентации фазовой пластины выполняются измерения для двух углов поляризатора  $\varphi$  и  $\varphi + \pi/2$ .

В результате измерений в двух углах фазовой пластины ( $0^\circ$  и  $45^\circ$ ) при углах поляризатора  $\varphi$  и  $\varphi + \pi/2$  зафиксируем четыре интенсивности:

$$\begin{aligned} I'_{0,\varphi} &= \frac{1}{2}(I + CQ - SU), \\ I'_{0,\varphi+\pi/2} &= \frac{1}{2}(I - CQ + SU), \\ I'_{45,\varphi} &= \frac{1}{2}(I - CQ + SU), \\ I'_{45,\varphi+\pi/2} &= \frac{1}{2}(I + CQ - SU). \end{aligned} \quad (6)$$

Введем безразмерные величины

$$F_0 = \frac{I'_{0,\varphi} - I'_{0,\varphi+\pi/2}}{I'_{0,\varphi} + I'_{0,\varphi+\pi/2}} = \frac{Q \cos 2\varphi - U \sin 2\varphi}{I}, \\ F_{45} = \frac{I'_{45,\varphi} - I'_{45,\varphi+\pi/2}}{I'_{45,\varphi} + I'_{45,\varphi+\pi/2}} = \frac{U \sin 2\varphi - Q \cos 2\varphi}{I}. \quad (7)$$

Если фазовая пластина сдвигает фазы обыкновенной и необыкновенной волн точно на  $\lambda/2$  во всем диапазоне длин волн, а углы ориентации поляризатора и фазовой пластины абсолютно точны, то  $F_0 \equiv -F_{45}$ . Реально небольшие ошибки измерения интенсивности для данного набора углов приносят ошибки в вычислении  $F_0$  и  $F_{45}$  с противоположным знаком. Поэтому комбинация

$$F_0 - F_{45} = 2 \frac{Q \cos 2\varphi - U \sin 2\varphi}{I} \quad (8)$$

позволяет снизить влияние неидеальности оптических элементов системы и тем самым значимо повысить точность измерений.

Все вышеизложенное относится и к измерениям в углах  $22.5^\circ$  и  $67.5^\circ$  градусов, и по аналогии с выводом соотношений (5) и (6) можем записать

$$F_{22.5} - F_{67.5} = 2 \frac{Q \sin 2\varphi + U \cos 2\varphi}{I}. \quad (9)$$

Фактически, добавляя измерения в углах  $45^\circ$  и  $67.5^\circ$ , мы используем идеологию модуляции для снижения влияния ошибок оптического тракта на результаты измерений линейной поляризации. Если в качестве анализатора используется призма Волластона, то мы получаем одновременные измерения во взаимно перпендикулярных направлениях  $\varphi$  и  $\varphi + \pi/2$ , что эквивалентно применению двух поляризаторов.

Для измерения круговой поляризации в пучок вводится фазовая пластина  $\lambda/4$ , сдвигающая фазу на  $\pm 90^\circ$ . В этом случае параметры Стокса на выходе системы можно записать следующим образом:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} M \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\lambda^2 & C_\lambda S_\lambda & -S_\lambda \\ 0 & C_\lambda S_\lambda & S_\lambda^2 & C_\lambda \\ 0 & S_\lambda & -C_\lambda & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Измерения в двух углах фазовой пластины  $\varphi = 0^\circ$  и  $90^\circ$  для двух ориентаций поляризатора  $0^\circ$  и  $90^\circ$

дают четыре измерения интенсивности:

$$\begin{aligned} I'_{0,\varphi} &= \frac{1}{2}(I + CQ + SV), \\ I'_{0,\varphi+\pi/2} &= \frac{1}{2}(I - CQ + SV), \\ I'_{90,\varphi} &= \frac{1}{2}(I + CQ - SV), \\ I'_{90,\varphi+\pi/2} &= \frac{1}{2}(I - CQ - SV). \end{aligned} \quad (11)$$

Откуда следует соотношение

$$F_0 - F_{90} = 2 \frac{V \sin 2\varphi}{I}. \quad (12)$$

Из соотношений (7), (8) и (11) видно, что выставляя определенным образом углы максимальной скорости фазовых пластин относительно направления ортов обыкновенного  $\mathbf{o}$  и необыкновенного  $\mathbf{e}$  лучей в случае использования в качестве анализатора призмы Волластона, можно получить простые соотношения между комбинациями безразмерных величин  $F_j$  и параметрами Стокса. Очевидно, что направление максимальной скорости  $\lambda/2$ -пластины должно совпадать с ортом  $\mathbf{o}$ , а  $\lambda/4$ -пластину следует ориентировать под углом  $45^\circ$  к орту  $\mathbf{o}$ . Это обстоятельство будет использовано нами в дальнейшем при обработке поляриметрических данных. При реальных наблюдениях, когда наблюдаемая поляризация объекта искажена инструментальной поляризацией, атмосферой Земли и межзвездной средой, измеряемый нами вектор Стокса можно представить как результат векторного сложения истинного вектора Стокса с векторами инструментальной поляризации, деполаризации в атмосфере Земли и межзвездной среде [15]. Расчеты показывают [16, 17], что измеряемые параметры Стокса могут быть представлены как линейная комбинация параметров Стокса упомянутых выше векторов с точностью 0.025% при степени поляризации объекта не более 5%. При больших поляризациях (порядка 10%) ошибка может достигать 0.2%. Точные формулы целесообразно использовать только при анализе прецизионных наблюдений объектов с большой (более 10%) поляризацией. Инструментальная поляризация, вносимая телескопом и измерительным прибором, может быть учтена после специальных наблюдений неполяризованных стандартных звезд. Техника такого учета подробно описана в обзорах [11, 18].

#### 4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Методика обработки спектрополяриметрических данных различна для наблюдений объектов в трех режимах работы спектрографа SCORPIO:

- 1) наблюдения с одинарным анализатором Волластона (WOLL-1) и поворачиваемыми на фиксированные углы фазовыми пластинами со сдвигами фаз  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ ;
- 2) наблюдения с двойным анализатором Волластона (WOLL-2);
- 3) наблюдения с вращающимся дихроичным анализатором линейной поляризации (POLAROID).

Использование того или иного режима зависит от поставленной задачи и астроклиматических условий. Особенностью спектрополяриметрических наблюдений является то, что в достаточно узких спектральных интервалах матрица Мюллера, описывающая преобразования вектора Стокса в системе регистрации, всегда может быть приведена к диагональному виду, т. е. измеряемые величины параметров Стокса являются линейной комбинацией истинных параметров. Это обстоятельство и отличает спектрополяриметрические наблюдения от широкополосной фотометрии. В последнем случае внутри фотометрической полосы матрица Мюллера имеет треугольный вид, а значит, система имеет трудно учитываемую инструментальную поляризацию.

##### 4.1. Одинарный анализатор Волластона

В этом режиме анализатор Волластона, разделяющий пучок на обыкновенный  $\mathbf{o}$  и необыкновенный  $\mathbf{e}$  лучи на  $5^\circ$  ( $2'$  на небесной сфере), установлен в параллельном пучке. Лучи  $\mathbf{o}$  и  $\mathbf{e}$  являются проекциями входного вектора поляризации  $\mathbf{E}$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Анализатор установлен в спектрографе таким образом, что направление орта  $\mathbf{o}$  с точностью около  $0^\circ 05'$  совпадает с направлением щели спектрографа. Ахроматические фазовые пластины установлены вблизи фокальной плоскости БТА в расходящемся пучке. Такая схема установки фазовых пластин, реализованная в SCORPIO-2, в отличие зарубежных спектрографов FORS 8-м телескопа VLT ([3, 4]) и FOCAS 10-м телескопа SUBARU ([5]), не вносит заметной инструментальной поляризации по высоте щели (см. Рис. 2). Это связано с тем, что в FORS и FOCAS фазовые пластины установлены в параллельном пучке, и они имеют, как всякое устройство с многослойными покрытиями, зависимость сдвига фазы от угла падения, а значит, поскольку оба прибора являются телескопическими системами, зависимость сдвига фазы от положения объекта по высоте щели. Как отмечается в [19], вносимая при этом инструментальная поляризация может достигать величины 1.5–1.6% на расстоянии  $2'$  от центра щели.

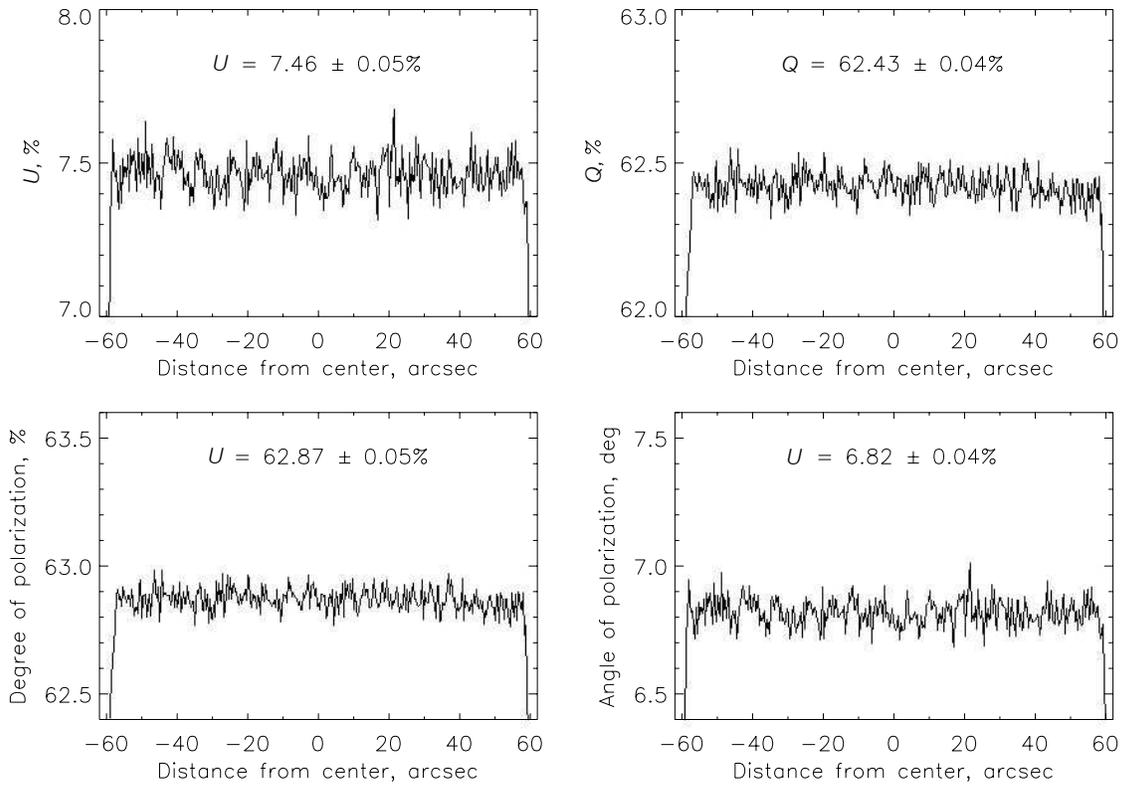


Рис. 2. Вариации параметров Стокса  $Q$  и  $U$ , степени поляризации и угла плоскости поляризации по наблюдениям засветки от утреннего неба.

При наблюдениях с одинарным анализатором Волластона мы регистрируем два спектра интенсивностью  $I_o(\lambda)$  и  $I_e(\lambda)$  (обыкновенный и необыкновенный соответственно). В общем случае ориентация главных осей анализатора  $\varphi$  и направления вектора максимальной скорости  $\theta$  фазовых пластин произвольны. Тогда, как следует из раздела 3, измеряемые с точностью до преобразования поворота значения нормированных на полную интенсивность  $I$  параметров Стокса  $U$  и  $Q$  будут находиться из соотношений:

$$\begin{aligned} Q' &= [R(\lambda)_{\theta=0^\circ} - R(\lambda)_{\theta=45^\circ}] / 2, \\ U' &= [R(\lambda)_{\theta=22.5^\circ} - R(\lambda)_{\theta=67.5^\circ}] / 2. \end{aligned} \quad (13)$$

где  $R(\lambda) = \left( \frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)} \right)$ ,  $\theta$  — угол поворота фазовой пластины  $\lambda/2$ , а истинные значения второго и третьего параметров Стокса находятся из преобразования поворота:

$$\begin{aligned} Q/I &= Q' \cos 2\varphi - U' \sin 2\varphi, \\ U/I &= Q' \sin 2\varphi + U' \cos 2\varphi. \end{aligned} \quad (14)$$

Степень линейной поляризации  $P$  определяется из соотношения (5), а наблюдаемый позиционный

угол плоскости поляризации  $PA$  вычисляется по формуле:

$$PA = PA_{\text{slit}} - \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} + PA_0. \quad (15)$$

Здесь  $PA_{\text{slit}}$  — позиционный угол главной оси анализатора Волластона, совпадающий с направлением щели, а  $PA_0$  — нуль-пункт зависимости позиционного угла щели от угла поворотного стола в ПФ БТА и параллактического угла объекта. Отметим, что знак минус в формуле обусловлен тем, что изображение на входе спектрографа зеркально относительно изображения на небесной сфере.

Для измерения круговой поляризации в пучок вводится пластина  $\lambda/4$ , которая сориентирована таким образом, что направление максимальной скорости составляет угол  $45^\circ$  с направлением главной оси анализатора Волластона. Пластина поворачивается на два фиксированных угла —  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . В этом случае величина круговой поляризации ( $V$ -параметр Стокса) находится из соотношения:

$$V/I = [R(\lambda)_{\theta=0^\circ} - R(\lambda)_{\theta=90^\circ}] / 2. \quad (16)$$

Такая методика измерений, как известно, позволяет исключить ошибки сдвига фазы фазовых пластин, но требует стабильной атмосферы. Реально при наблюдениях проводится несколько (больше

трех) циклов измерений, когда последовательно регистрируются спектры для пар углов (0°, 45°) и (22.5°, 67.5°) для пластины λ/2 и (0°, 90°) для пластины λ/4. Длительность экспозиции должна быть не менее чем в 3–4 раза больше времени считывания кадра ПЗС.

#### 4.2. Двойной анализатор Волластона

Двойной анализатор Волластона, идея которого впервые была предложена и реализована в [20] и развита в работе [21], представляет собой два анализатора Волластона установленных в выходном зрачке спектрографа. При этом один анализатор, имеющий направления осей поляризации 0° и 90°, освещается одной половиной выходного зрачка, а другой анализатор, с направлениями осей 45° и 135°, — другой половиной зрачка. Для разведения изображений от каждого анализатора применены два ахроматических клина. Таким образом, при этом способе регистрации мы получаем четыре спектра с интенсивностями  $I(\lambda)_0$ ,  $I(\lambda)_{90}$ ,  $I(\lambda)_{45}$ , и  $I(\lambda)_{135}$ . Тогда, с точностью до преобразования поворота, значения второго и третьего нормированных параметров Стокса  $Q$  и  $U$  будут определяться из соотношений:

$$\begin{aligned} Q' &= \frac{I(\lambda)_0 - I(\lambda)_{90}}{I(\lambda)_0 + I(\lambda)_{90}}, \\ U' &= \frac{I(\lambda)_{45} - I(\lambda)_{135}}{I(\lambda)_{45} + I(\lambda)_{135}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для измерения круговой поляризации в пучок вводится фазовая пластина λ/4 и тогда

$$\begin{aligned} V/I &= 0.5 \left( \frac{I(\lambda)_0 - I(\lambda)_{90}}{I(\lambda)_0 + I(\lambda)_{90}} \right) \\ &- 0.5 \left( \frac{I(\lambda)_{45} - I(\lambda)_{135}}{I(\lambda)_{45} + I(\lambda)_{135}} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Значения параметров Стокса  $U$  и  $Q$ , и позиционный угол плоскости поляризации  $PA$  вычисляются при этом с использованием соотношений (14) и (15), а степень поляризации  $P$  — по формуле (5).

Такой способ измерений, в отличие от предыдущего, дает одновременное измерение параметров Стокса  $Q$  и  $U$ , что важно при нестабильной атмосфере. Однако его недостатком является необходимость калибровки чувствительности четырех независимых поляризационных каналов по стандарту нулевой поляризации. Хотя калибровочные зависимости  $I(\lambda)_0/I(\lambda)_{90}$  и  $I(\lambda)_{45}/I(\lambda)_{135}$  являются постоянными для прибора, их, тем не менее, следует уточнять в каждую ночь наблюдений.

#### 4.3. Дихроичный анализатор поляризации

Установленный в спектрографе дихроичный анализатор поляризации (поляроид) предназначен для измерения линейной поляризации звездобразных и протяженных объектов в поле зрения диаметром 6'. Его также планируется использовать для двухмерной спектрополяриметрии после ввода в строй на спектрографе SCORPIO-2 режима интегральной полевой спектроскопии.

Анализатор может быть установлен в три фиксированных положения по углу — 0° и ±60°. Тогда, имея измеренные интенсивности в трех углах поляроида  $I(x, y)_{0^\circ}$ ,  $I(x, y)_{-60^\circ}$  и  $I(x, y)_{+60^\circ}$  мы можем вычислить, с точностью до преобразования поворота, параметры Стокса  $Q'$  и  $U'$  в каждой точке изображения с координатами  $(x, y)$ :

$$\begin{aligned} Q'(x, y) &= \frac{2I(x, y)_0 - I(x, y)_{-60} + I(x, y)_{+60}}{I(x, y)_0 + I(x, y)_{-60} + I(x, y)_{+60}}, \\ U'(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I(x, y)_{+60} - I(x, y)_{-60}}{I(x, y)_0 + I(x, y)_{-60} + I(x, y)_{+60}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Значения параметров Стокса  $Q$  и  $U$ , степень линейной поляризации  $P$  и позиционный угол плоскости поляризации  $PA$  вычисляются при этом по соотношениям (14), (5) и (15) соответственно. Такой способ измерений был предложен Фесенковым, однако из трех наблюдаемых значений интенсивности им вычислялись только степень поляризации и угол поворота плоскости поляризации ([22]). Так же, как и в случае с одинарным Волластоном, этот метод измерений зависит от состояния атмосферы.

#### 4.4. Формирование исходного куба данных

Общая проблема при обработке поляриметрических наблюдений заключается в том, что т.к. мы сравниваем разностные величины в каждой точке изображения, то любые, даже весьма малые отличия между изображениями, полученными при различных углах фазовых пластин или поляроида, которые вносятся на различных этапах обработки, ухудшают точность измерения поляризации. Это же относится и к чистке космических частиц различными методами сглаживания — эти алгоритмы, как правило, смещают статистические оценки, а следовательно вносят в конечный результат эффекты деполяризации.

Из-за большого объема разнообразных изображений — полученных при различных углах фазовых пластин, имеющих различные признаки (**obj**, **flat**, **bias**, **neon**, **dark**, **etalon**) и типы наблюдаемого объекта (исследуемый объект, стандарт нулевой поляризации, стандарт ненулевой поляризации) — необходима унификация входных данных

для программы обработки с минимальной возможностью вмешательства астронома. С этой целью программа обработки на первом этапе анализирует FITS-шапки входного массива изображений и формирует следующие данные:

1)  $\text{obj}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \text{pol}, \text{exp})$  — 4-мерный куб исходных данных, где  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  координаты точки в изображении,  $\text{pol}$  — идентификатор фазовой пластины и ее угла:

$$\begin{aligned} \text{pol} = 0 &\rightarrow \lambda/2 (0^\circ), & \text{pol} = 1 &\rightarrow \lambda/2 (45^\circ), \\ \text{pol} = 2 &\rightarrow \lambda/2 (22^\circ 5'), & \text{pol} = 3 &\rightarrow \lambda/2 (67^\circ 5'), \\ \text{pol} = 4 &\rightarrow \lambda/4 (0^\circ), & \text{pol} = 5 &\rightarrow \lambda/4 (90^\circ), \\ \text{pol} = 6 &\rightarrow \text{поляроид} (0^\circ), \\ \text{pol} = 7 &\rightarrow \text{поляроид} (+60^\circ), \\ \text{pol} = 8 &\rightarrow \text{поляроид} (-60^\circ); \end{aligned}$$

$\text{exp}$  — идентификатор, определяющий тип объекта и номер экспозиции;

2)  $\text{bias}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  — робастная оценка электрического нуля системы регистрации;

3)  $\text{neon}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \text{pol})$  — изображение линейчатого спектра для калибровки шкалы длин волн;

4)  $\text{flat}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \text{pol})$  — изображение спектров лампы непрерывного излучения для калибровки пропускания.

Последующие этапы обработки предполагают построение модели масштабных искажений, редукцию данных за эти искажения и неоднородность чувствительности, вычитание фона неба, калибровку шкалы длин волн, экстракцию из изображений спектров (или интегральных потоков от объектов при фотометрии в полях) и, наконец, вычисление параметров Стокса. Чистка космических частиц производится на конечном этапе обработки путем робастных оценок параметров.

#### 4.5. Исправление масштабных искажений

Получаемые в режиме 2D-спектрополяриметрии изображения сильно искажены по различным причинам:

1) искривление спектральных линий по высоте щели, обусловленное изменением меридионального увеличения используемых в спектрографе диспергирующих элементов — объемных фазовых голографических решеток в комбинации с призмами;

2) хроматизм анализаторов Волластона, приводящий к зависящей от длины волны величине разведения спектров обыкновенного и необыкновенного лучей, что увеличивает кривизну ниток спектра по сравнению с обычной спектроскопией;

3) дисторсия оптики камеры спектрографа и сферохроматические aberrации высоких порядков, также приводящие к геометрическим искажениям.

Величина геометрических искажений в нашем случае может достигать величины 10–15% при наблюдениях в широком спектральном диапазоне. Учитывая, что при точных измерениях ошибки параметров Стокса не должны превышать 0.1%, результирующая нелинейность данных в спектрах по координатам должна быть не более 0.1 px, что для используемой нами ПЗС (формат  $2068 \times 4632$  px) соответствует относительной величине около 0.005%. Для получения столь высоких точностей следует тщательно калибровать масштабные искажения и применять точные алгоритмы преобразования координат.

В качестве модели геометрических преобразований мы используем геометрическое полиномиальное преобразование степени  $N$ , в котором получающееся множество значений интенсивности определено следующими соотношениями:

$$I[x, y] = I'[x', y'] = I'[a(x, y), b(x, y)], \quad (20)$$

где  $I[x, y]$  есть интенсивность в точке с координатами  $(x, y)$  в неискаженном изображении, которой соответствует измеренная интенсивность  $I'[x', y']$  в точке искаженного изображения с координатами  $(x', y')$ . Функции  $a(x, y)$  и  $b(x, y)$  являются полиномами  $N$ -й степени, чьи коэффициенты  $K_{x_{i,j}}$  и  $K_{y_{i,j}}$  определяют пространственное преобразование:

$$x' = a(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N K_{x_{i,j}} x^j y^i \quad (21)$$

$$y' = b(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N K_{y_{i,j}} x^j y^i. \quad (22)$$

От точности определения коэффициентов  $K_{x_{i,j}}$  и  $K_{y_{i,j}}$  зависит точность построения модели геометрических искажений. В дальнейшем мы полагаем, что степень полинома, ответственного за наши искажения, не выше трех, а полученные координаты узлов являются точными, чтобы использовать при геометрическом преобразовании сплайн-интерполяцию. Следует также отметить, что точность построения геометрической модели определяет качество вычитания спектра ночного неба, что важно для поляризационных наблюдениях слабых объектов.

Модель искажений строится в следующей последовательности.

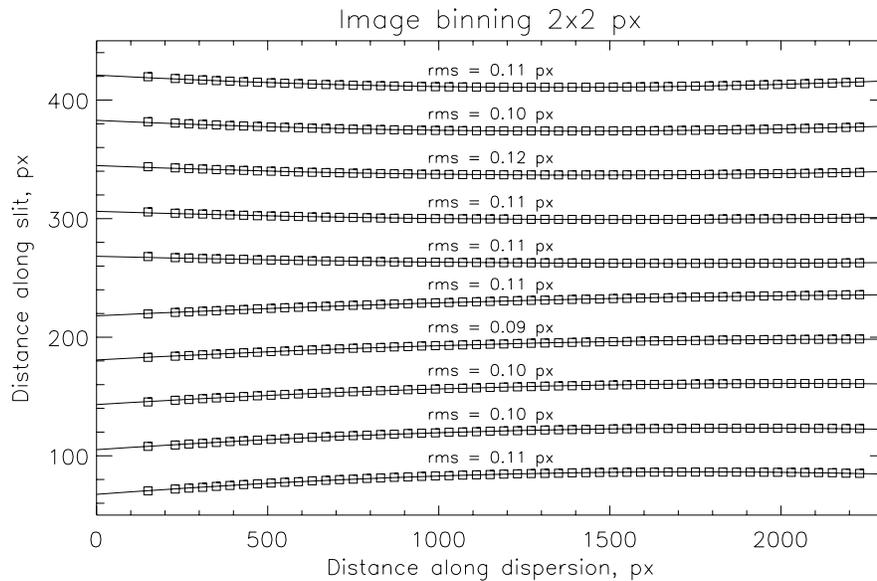


Рис. 3. Траектории ниточных спектров эталона для одинарного анализатора Волластона.

1) Сначала по анализу ниточных спектров эталона (это изображение спектра лампы непрерывного спектра при установленной перед щелью маске) определяется кривизна линий ниток, которые мы в дальнейшем называем траекториями спектров. Для одинарного анализатора Волластона используется 5-точечная маска перед щелью, а для двойного — 3-точечная. На Рис. 3 показан пример построения траекторий для изображения эталона, полученного с одинарным анализатором Волластона. Положение узлов определяется из анализа сечений спектров поперек дисперсии. Позиции полученных точек аппроксимируются полиномом третьей степени, что дает истинную форму траекторий.

2) Затем полученные траектории накладываются на двумерное изображение спектра сравнения, для определения положения спектральных линий в точках пересечения их с траекториями. Из всего массива полученных пересечений определяются точки, совпадающие по длине волны (с точностью до кривизны линии по высоте щели) для каждой нитки. По ним для каждой линии строится модель кривизны по высоте щели с использованием полинома третьего порядка. Пример выделения спектральных линий и аппроксимация их кривизны полиномами третьей степени показан на Рис. 4. При этом для каждой выделенной линии строится свой полином.

3) Наконец на финальном этапе полученные коэффициенты полиномов, определяющих кривизну линий и траекторий, аппроксимируются по длине волны полиномами второй степени, и по результатам аппроксимации этих коэффициентов строятся

сглаженные искривленные линии и нитки спектров. Далее вычисляются точки пересечения  $(x', y')$  траекторий линий. Истинными (неискаженными) координатами  $(x, y)$  при этом считаются координаты линий по  $x$  и координаты траектории в центре изображения по  $y$ . Полученные таким образом точные координаты узлов используются для определения коэффициентов двухмерного полинома, определяемых из выражений (21) и (22). На краях формата спектра узлы экстраполируются в соответствии с аппроксимацией кривизны линий и траекторий. Результат построения узлов сетки геометрической модели в изображении показан на Рис. 5.

Далее все исходные изображения (`obj`, `flat`, `neon`) исправляются за геометрические искажения с использованием процедуры `WARP_TRI`, производится исправление за неоднородность чувствительности (процедура `flat-field`) и вычитается фон неба. Реальная точность исправления геометрических искажений, как показали наши многочисленные тесты, не менее 0.2 px, что соответствует 3 мкм в плоскости светоприемника. Примеры изображений на различных этапах обработки данных, полученных с одинарным анализатором Волластона, показаны на Рис. 6.

Калибровка шкалы длин волн производится стандартным образом — автоматическое отождествление линий, двумерная аппроксимация дисперсионной кривой полиномом третьего порядка, квадратичное сглаживание коэффициентов полинома по высоте щели, линейаризация изображений.

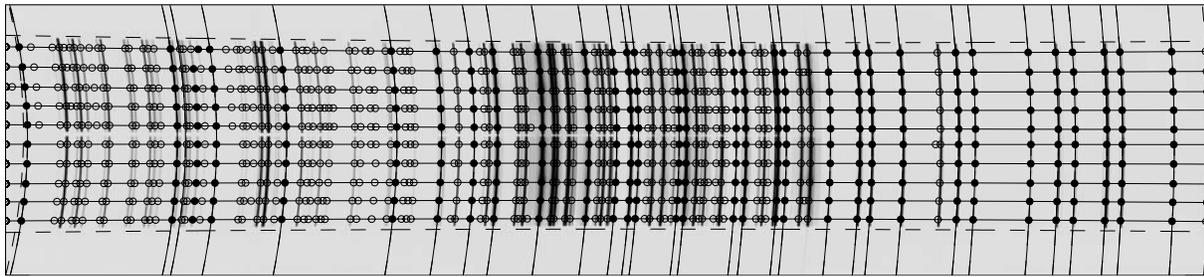


Рис. 4. Аппроксимация кривизны линий спектра сравнения полиномами третьей степени для одиночного анализатора Волластона.

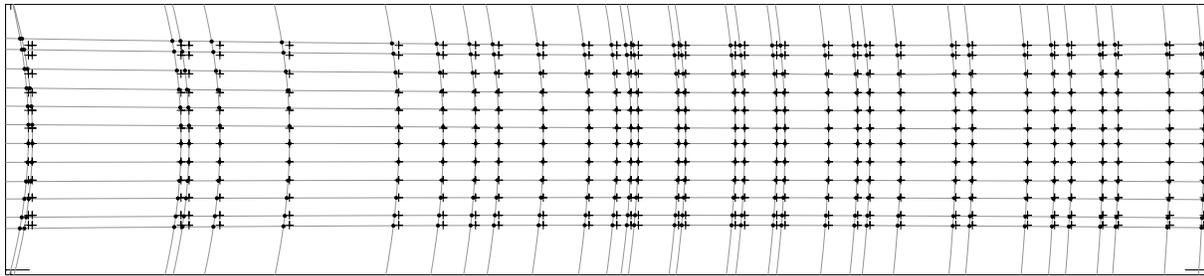


Рис. 5. Узлы сетки геометрической модели искажений. Крестики — неискаженное изображение, точки — искаженное.

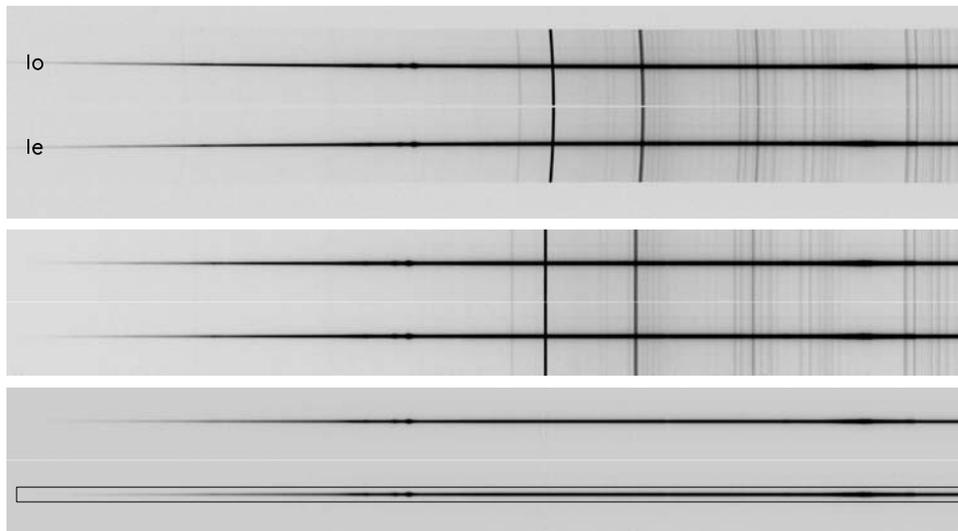


Рис. 6. Обработка изображений с одинарным анализатором Волластона: сверху — исходный спектр; посередине — спектр, исправленный за геометрические искажения; внизу — спектр после вычитания фона неба.

#### 4.6. Экстракция спектров и вычисление параметров Стокса

Точность вычисления параметров Стокса, кроме аккуратности геометрических преобразований, зависит от того, каким образом определяются безразмерные величины  $R(\lambda)$ , входящие в соотношения (13), (16), (17) и (18). В случае наблюдений протяженных объектов в указанных соотношениях фигурируют величины интенсивности обыкновенного и необыкновенного лучей  $I_o(x, y)$  и  $I_e(x, y)$ , по

которым вычисляются параметры Стокса в каждой точке изображения. Среднее значение параметров Стокса для каждой позиции вдоль щели (с точностью до размера изображения) вычисляется робастными методами с использованием в качестве взвешивающей функции профиля изображений звезд на входе спектрополяриметра. Однако в случае звездообразных объектов следует применять методы, аналогичные методам апертурной фотометрии [23], которые позволяют не только оптимальным (с точки зрения максимального отноше-

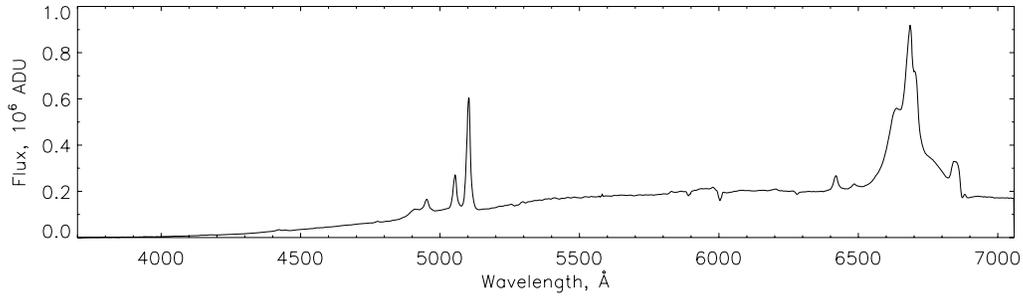


Рис. 7. Спектр ядра галактики Маркарян 6, экстрагированный из изображения на Рис. 6.

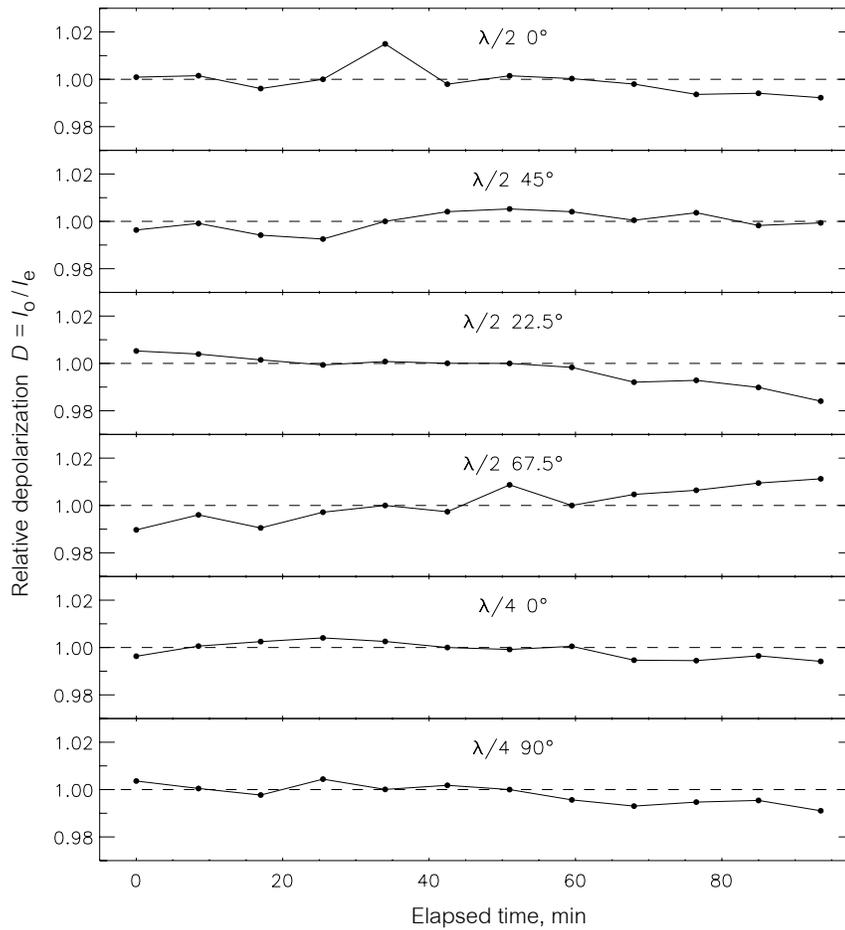


Рис. 8. Изменение нормированных на медианное значение коэффициентов деполаризации  $D = I_o/I_e$  для последовательных 60 с экспозиций с интервалом 100 с при наблюдениях с одинарным анализатором Волластона.

ния сигнал/шум) образом экстрагировать спектр объекта из изображения, и не вносить фиктивной инструментальной поляризации. При этом эффективно подавляются импульсные помехи в изображении, обусловленные, в основном, космическими

частицами. Пример экстракции спектра показан на Рис. 7.

Как правило, для оптимальной экстракции спектров используется аппроксимация профиля звезды вдоль щели (по  $y$ -координате) согласно модели Моффата [24]:

$$\text{PSF}(y) = a_0 + \frac{a_1}{(u+1)^{a_6}}, \quad (23)$$

где  $u = \left(\frac{y - a_4}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y - a_4}{a_2}\right)^2$ . В более сложных случаях профиль аппроксимируется комбинацией функций Гаусса.

#### 4.7. Контроль состояния атмосферы

Одной из самых серьезных причин, ограничивающих точность поляризационных наземных наблюдений, является влияние атмосферы Земли. Простое изменение прозрачности в случае двухлучевой схемы измерения поляризации мало влияет на точность измерений нормированных параметров Стокса. Однако, вариация параметров переноса излучения в атмосфере приводит к изменению коэффициента деполаризации  $D = I_o/I_e$  в различных экспозициях, что иллюстрируется на Рис. 8. Основная причина деполаризации — это селективное рассеяние на микрочастицах, размер которых меньше длины волны наблюдаемого излучения (рэлеевское рассеяние, величина которого пропорциональна  $\lambda^{-4}$ ) и неселективное рассеяние на аэрозолях [25]. В случае наблюдений в месте установки БТА, где в атмосфере преобладает рассеяние на аэрозолях [26], можно ожидать, что эффекты деполаризации будут слабо зависеть от длины волны. Причем характерные времена быстрых изменений деполаризации в атмосфере сравнимы со временем заморозки и составляют, в зависимости от состояния атмосферы во время наблюдений, величину 10–30 мс. Обычно для подавления эффектов деполаризации (которые называют эффектами мерцаний) используются схемы с быстрой модуляцией или переключением поляризационных каналов. В спектрополяриметрии это возможно лишь с применением кристаллов KDP и только для ярких объектов, поскольку такие схемы имеют крайне низкое пропускание.

На Рис. 9 показано влияние деполаризации в атмосфере Земли в изменении зависимости параметров Стокса  $U$  и  $Q$  от длины волны  $\lambda$  базара S5 0716+71 с синхротронным механизмом излучения. Нужно отметить, что представленные на Рис. 9 спектры модулированы по длине волны, чего не должно быть — синхротронное излучение дает гладкие зависимости величин параметров Стокса от длины волны. Если интерпретировать изменение величины деполаризации во время наблюдений (см. Рис. 8) как изменение пропускания спектрографа для обыкновенного и необыкновенного лучей, то в выражении (13) вместо  $\left(\frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)}\right)_k$

следует использовать  $\left(\frac{D_k I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{D_k I_o(\lambda) + I_e(\lambda)}\right)_k$ , где  $k$  — номер соответствующей экспозиции, а коэффициенты деполаризации  $D_k$  взяты из наблюдаемых отклонений относительно среднего (Рис. 8). Результат вычисления параметров Стокса с исправленной таким образом атмосферной деполаризацией показан на Рис. 10.

Как видно из Рис. 10, результат превосходит самые смелые ожидания — модуляция спектров  $U$  и  $Q$  полностью устранена, а статистическая ошибка измерений уменьшилась в 2.5 раза и соответствует ожидаемой для статистики Пуассона! Это прямо указывает на то, что найденная нами методика исправления эффектов деполаризации в атмосфере Земли, обусловленных мерцаниями, верна. Конечно, следует иметь в виду, что, во-первых, это применимо для объектов, у которых времена внутренней (присущей объекту) переменности больше полного времени экспозиции, а во-вторых, такая методика не учитывает средней величины деполаризации в атмосфере. Однако она (средняя деполаризация) может быть определена по наблюдениям стандартов поляризации до и после объекта на тех же зенитных расстояниях.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для тестовых наблюдений линейной поляризации мы использовали звезды — стандарты поляризации из списков, опубликованных в работах [27, 28]. Наблюдения проводились в двух поляризационных режимах — WOLL-1 и WOLL-2. По возможности каждую ночь наблюдений снимались стандарты нулевой поляризации для контроля инструментальной поляризации и стандарты ненулевой поляризации для уточнения нуля-пункта угла плоскости поляризации. Спектры получены в диапазоне 3700–8300 Å со спектральным разрешением около 12 Å с объемной фазовой голографической решеткой VPHG940@600. После проведения редуций, последовательность которых описана в предыдущем разделе, для каждой звезды были получены нормированные вектора Стокса  $Q(\lambda)$  и  $U(\lambda)$ . Робастные оценки значений параметров Стокса в фотометрической V-полосе сделаны с учетом стандартной кривой  $V(\lambda)$ . Далее, с использованием соотношений (5) и (15), вычислены средние значения наблюдаемой поляризации  $P_{\text{obs}}$  и угла плоскости поляризации  $PA_{\text{obs}}$  в фотометрической полосе V, которые приведены в Таблице 1. Там же приведены истинные значения  $P_{\text{tab}}$  и  $PA_{\text{tab}}$ , взятые из работ [27] и [28].

Оценки, сделанные в ночи с нестабильной атмосферой (циррусы), помечены в таблице звездочкой. Оценки поляризации стандартных звезд

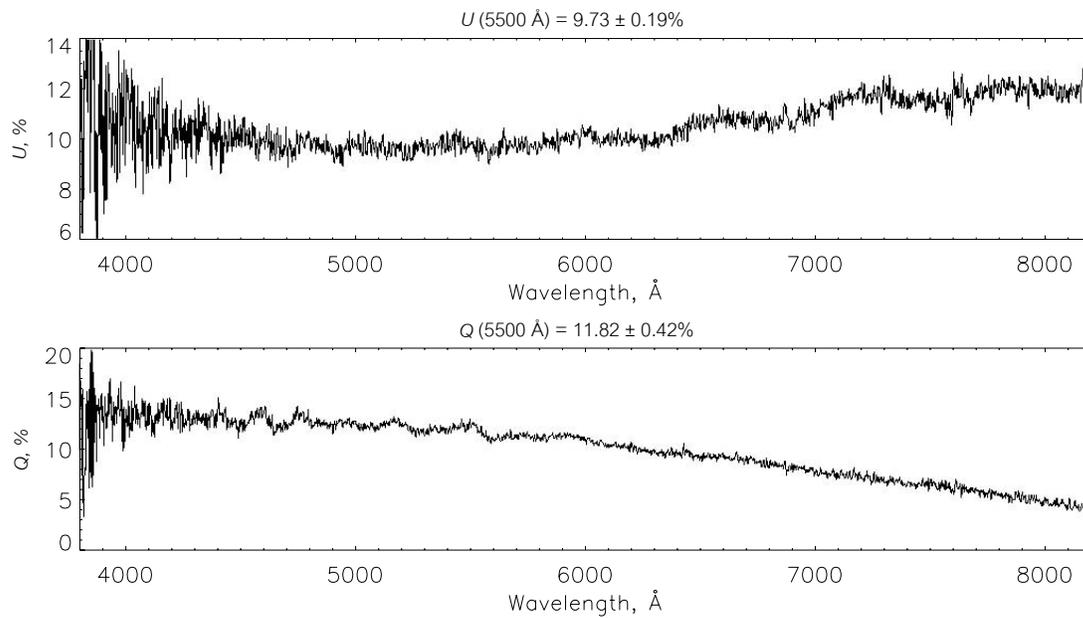


Рис. 9. Влияние эффектов деполяризации на зависимость параметров Стокса от длины волны для блазара S5 0716+71.

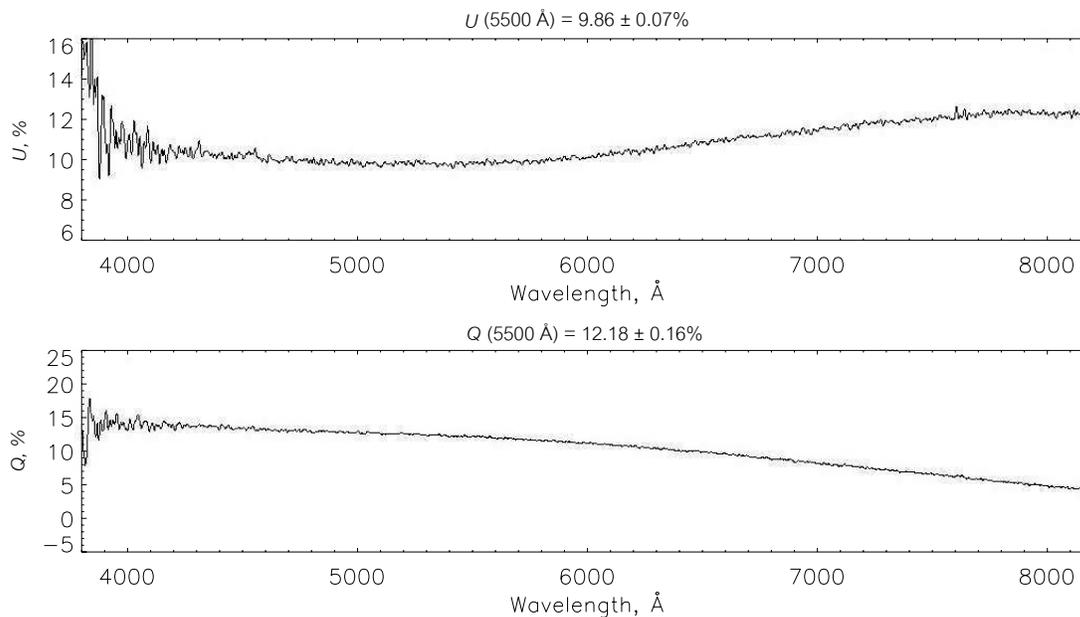


Рис. 10. Зависимость параметров Стокса от длины волны для блазара S5 0716+71 после исправления эффектов деполяризации в атмосфере Земли.

показали отсутствие в пределах ошибок (порядка 0.1%) значимой линейной инструментальной поляризации. Как видно из таблицы, качество данных, которые получены нами, самое различное. В ночи с хорошей прозрачностью реальная точность измерения линейной поляризации достигает величины 0.05% при наблюдениях с использованием поляроида WOLL-1.

В тех случаях, когда прозрачность была не

очень хорошей, а величина деполяризации достигала 2–3%, наблюдения проводились только с двойным Волластоном (WOLL-2), который давал точность измерения около 0.2%, что хорошо иллюстрируется данными Таблицы 2, где приведены измерения стандартов поляризации с WOLL-2.

**Таблица 1.** Сравнение измеренных параметров линейной поляризации для WOLL-1

Звезда	$P_{\text{obs}}$ , %	$P_{\text{tab}}$ , %	$PA_{\text{obs}}$ , deg	$PA_{\text{tab}}$ , deg
BD +58°2272	$5.52 \pm 0.07$	$5.49 \pm 0.02$	$58.4 \pm 0.7$	$59.3 \pm 0.1$
HD 14433	$3.65 \pm 0.07$	$3.77 \pm 0.01$	$113.7 \pm 0.5$	$112.9 \pm 0.3$
BD +59°385	$6.76 \pm 0.06$	$6.70 \pm 0.02$	$96.5 \pm 0.8$	$98.1 \pm 0.1$
Hiltner 960	$5.70 \pm 0.13$	$5.66 \pm 0.02$	$56.3 \pm 0.6$	$54.5 \pm 0.2$
Hiltner 960	$5.86 \pm 0.14$	$5.66 \pm 0.02$	$53.5 \pm 0.3$	$54.5 \pm 0.2$
HD 7927*	$3.02 \pm 0.07$	$3.30 \pm 0.03$	$90.8 \pm 0.8$	$91.1 \pm 0.2$
HD 204827*	$5.15 \pm 0.14$	$5.32 \pm 0.01$	$57.7 \pm 0.8$	$58.7 \pm 0.8$
BD +64°106*	$5.18 \pm 0.10$	$5.69 \pm 0.04$	$94.8 \pm 0.9$	$96.6 \pm 0.2$

**Таблица 2.** Сравнение измеренных параметров линейной поляризации для WOLL-2

Star	$P_{\text{obs}}$ , %	$P_{\text{tab}}$ , %	$PA_{\text{obs}}$ , deg	$PA_{\text{tab}}$ , deg
HD 15597	$4.50 \pm 0.27$	$4.38 \pm 0.03$	$102.9 \pm 1.7$	$103.2 \pm 0.3$
HD 15597*	$4.13 \pm 0.33$	$4.38 \pm 0.03$	$100.1 \pm 2.6$	$103.2 \pm 0.3$
HD 154445*	$3.14 \pm 0.24$	$3.67 \pm 0.05$	$84.1 \pm 5.1$	$88.6 \pm 0.7$
HD 161056	$4.02 \pm 0.19$	$4.00 \pm 0.01$	$66.2 \pm 1.4$	$66.3 \pm 0.3$
VI Cyg-12	$8.97 \pm 0.07$	$8.95 \pm 0.09$	$115.2 \pm 1.2$	$115.0 \pm 0.3$
Hiltner 960	$5.76 \pm 0.14$	$5.66 \pm 0.02$	$53.5 \pm 1.5$	$54.8 \pm 0.2$
HD 204827*	$5.11 \pm 0.19$	$5.34 \pm 0.02$	$58.1 \pm 1.3$	$58.7 \pm 0.8$

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных тестовых наблюдений и их анализа следует, что предложенная методика позволяет получать реальные значения поляризации и достаточно надежно оценить их ошибки. Особо отметим, что методика, при всех сложностях выполнения поляриметрических измерений, позволяет проводить измерения линейной и круговой поляризации в достаточно сложных погодных условиях. Наблюдения протяженных объектов в нашем случае не отягощены наличием переменной инструментальной поляризации вдоль щели. Это делает нашу методику особенно перспективной для исследований слабых звездообразных и протяженных объектов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н. В. Борисову за помощь в приобретении поляризационных элементов и полезные замечания. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.740.11.0800,

16.552.11.7028, 16.518.11.7073) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-02-00857-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Piirola, *Astronom. and Astrophys.* **27**, 383 (1973).
2. Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов, *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* **54**, 99 (1972).
3. I. Appenzeller, K. Fricke, W. Furtig, et al., *The Messenger* **94**, 1 (1998).
4. L. Fossati, S. Bagnulo, E. Mason, and E. Landi Degl'Innocenti, *ASP Conf. Ser.* **999**, 342 (2007).
5. K. S. Kawabata et al., *Proc. SPIE* **4841**, 1219 (2003).
6. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.*, **31**, 194 (2005).
7. В. Л. Афанасьев, Э. Б. Гажур, С. Р. Желенков, А. В. Моисеев, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.* **58**, 90 (2005).
8. V. L. Afanasiev, N. V. Borisov, Yu. N. Gnedin, et al., *Astron. Lett.*, **37**, 302, (2011).
9. V. L. Afanasiev, N. V. Borisov, Yu. N. Gnedin, et al., in *Proc. Int. Conf. on Physics of Magnetic Stars* (SAO RAS, Nizhny Arkhyz, 2007), p. 238.
10. Г. В. Розенберг, *Успехи физ. наук* **56**, 78 (1955).

11. K. Serkowski in *Proc IAU Colloq. 23 on Planets, Stars and Nebulae: Studied with Photopolarimetry*, (Univ. of Arisona Press, Tucson, 1974), p. 135.
12. S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer* (Clarendon Press, Oxford, 1950).
13. W. A. Shurkliff, *Polarized Light* (Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass, 1962).
14. J. Tinbergen, *Astronom. and Astrophys.* **23**, 25 (1973).
15. W. Tripp, *Zeitschrift für Astrophysik*, **41**, 84 (1956).
16. N. M. Shakhovskoy, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (MGU, Moskov, 1965).
17. N. M. Shakhovskoy, in *Methods of variable stars investigation*, Ed. by V. A. Nikonov (Nauka, Moscow, 1971), p. 199.
18. M. F. McCarthy, *Ricerche Astronomiche Specola Vaticana* **10**, 1 (1980).
19. L. Fossati, S. Bagnulo, E. Mason, and E. Landi Degl'Innocenti, *ASP Conf. Ser.* **364**, 503 (2007).
20. E. H. Geyer, K. Jockers, N. N. Kiselev, and G. P. Chernova, *Astrophys. and Space Science* **239**, 259 (1996).
21. E. Oliva, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 589 (1997).
22. В. А. Домбровский, *Вестник ЛГУ* **19**, 153 (1957).
23. P. Stetson, J. Hesser, and T. Smecker-Hane, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **110**, 553 (1998).
24. A. F. J. Moffat, *Astronom. and Astrophys.* **455**, 3 (1969).
25. Б. Б. Чен, Л. Г. Свездлик, *Вестник КРСУ* **5**, 21 (2003).
26. Т. А. Карташева, Н. М. Чунакова, *Известия САО* **10**, 44 (1978).
27. J.-Ch. Hsu and M. Breger, *Astrophys. J.* **262**, 732 (1982).
28. D. A. Turnshek et al., *Astronom. J.* **99**, 1243 (1990).

## Technique of Polarimetric Observations of Faint Objects at the BTA

V.L. Afanasiev, V.R. Amirkhanyan

We describe the technique of spectropolarimetric observations allowing for the measurements of the Stokes parameters in one of the observational modes of the SCORPIO focal reducer at the 6-m BTA telescope of the SAO RAS. The characteristics of the instrument in the spectropolarimetric mode of observations are given. We present the algorithm of observational data reduction. The capabilities of the SCORPIO spectropolarimetric mode are demonstrated on the examples of observations of various astronomical objects.

Keywords: *galaxies: nuclei—galaxies: bulges—galaxies: stellar content—galaxies: evolution*