

# Поляриметрия и спектрополяриметрия звезд. Приборы и методы

В.Г.Клочкова, В.Е.Панчук, В.П.Романенко, И.Д.Найденов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 4.10.2001; принята к печати 1.09.2004.

Дано краткое описание избранных схем спектрополяриметров, разработанных для телескопов разных диаметров с целью исследования параметров поляризации излучения звезд. Сформулирована программа развития приборов и методов для спектрополяриметрии звезд на телескопах САО.

**Ключевые слова:** методы наблюдений, поляриметрия

**POLARIMETRY AND SPECTROPOLARIMETRY OF STARS. DEVICES AND METHODS, by V.G. Klochkova, V.E. Panchuk, V.P. Romanenko, I.D. Naidenov.**

A brief description is given of selected spectropolarimeters designed for telescopes of different diameters to study star light polarization. A program of development of stellar spectropolarimetry technique for the telescopes of SAO RAS is formulated.

**Key words:** methods: observational – techniques: polarimetric

## 1. Введение

Поляризация излучения космических источников дает информацию о физических характеристиках источников: величине и геометрии магнитных полей, химическом составе, форме, размерах, концентрации и ориентации рассеивающих излучение частиц, степени однородности поверхностной яркости астрономического объекта. Поляризация может возникать или в самом источнике, или (и) в среде между источником и наблюдателем. В случае точечных источников поляризация излучения может оказаться единственным поставщиком информации о внутренней (пространственно неразрешенной) структуре объекта. Исследование поляризации является важнейшим тестом для определения механизма генерации излучения в космических условиях: рассеяние на мелких частицах (от электронов до пылинок), синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитных полях.

Магнитные поля управляют движением вещества в Галактике. Величина космических магнитных полей изменяется в широких пределах: от  $10^{-6}$  Гс в межзвездной среде до  $10^{12}$  Гс и более в магнитосферах пульсаров. Магнитные поля в межгалактической среде напряженностью  $10^{-9}$  Гс влияют на поведение вещества вблизи галактик не меньше, чем поля нейтронных звезд напряженно-

стью  $10^{12}$  Гс на движение окружающей плазмы.

При измерениях круговой и линейной поляризации в спектрах звезд могут быть обнаружены разнообразные проявления магнитных полей, присутствующих в среде, где формируются основные свойства регистрируемого излучения, т.е. в звездной атмосфере и околозвездной оболочке. Из вышесказанного следует, что аппаратура, ориентированная на исследования поляризации астрофизических объектов, должна обладать широким диапазоном чувствительности и спектрального разрешения.

На телескопах САО РАН определенное место занимают поляриметрические и спектрополяриметрические наблюдения. По мере смены поколений светоприемников совершенствуется и техника анализа поляризационных свойств излучения. Разработка эффективных спектрографов позволяет предусмотреть новые варианты спектрополяриметрических наблюдений. Именно таким путем идет разработка приборов и методов спектрополяриметрии во всем мире. Целью данного обзора является освещение основных тенденций в развитии приборов и методов спектрополяриметрии звезд и оценка перспектив использования их в условиях САО. Разумеется, мы не претендуем на полноту упоминания всех реализованных методов и на исчерпывающее перечисление возможных путей раз-

вития. Прежде чем перейти к описанию различных спектрополяриметрических систем, напомним некоторые основные принципы спектрополяриметрии.

## 2. Приборы и методы для анализа поляризованного излучения

Простейшим устройством для анализа поляризованного излучения является пленочный или кристаллический поляроид. В астрономической практике такие анализаторы используются только для калибровки. При фотографической регистрации наибольшее распространение получили двухлучевые анализаторы, позволяющие регистрировать обыкновенный и необыкновенный пучки одновременно. Применение простейших двухлучевых анализаторов приводит как к дефокусировке одного из изображений, так и к разным интенсивностям, что обусловлено различием пропускания обыкновенного и необыкновенного лучей оптическими элементами спектрального прибора. Наиболее простым способом решения этой проблемы является применение двух одинаковых пластинок кальцита, оси которых повернуты на  $90^\circ$  относительно друг друга. Двухлучевые анализаторы, разводящие пучки на большой угол (призма Глена-Фуко и ее модификации, призма Глена-Томпсона, куб с тонкопленочной диагональной плоскостью и т.п.), использовались, в основном, в поляриметрах с фотоумножителями. В подобных схемах применялись и другие типы анализаторов — призмы Рошона, Сенармона, Волластона.

При анализе круговой поляризации используются устройства, превращающие циркулярно поляризованное излучение в линейно поляризованное. Для этого на пути луча ставят пластинки, сдвигающие фазу на  $\pi/2$ . При определенной ориентации пластинки относительно кристалла можно пространственно разделить два поляризованных луча.

Применение полуволновой пластинки обеспечивает смену направления круговой поляризации, а также изменяет позиционный угол линейно поляризованного излучения. Если сдвиг фазы слабо зависит от длины волны, то фазосдвигающий элемент называют ахроматическим. Наиболее удачным ахроматическим устройством является ромб Френеля, где полные внутренние отражения обеспечивают сдвиг фаз  $\pi/2$ . Выходной ромб возвращает пучок на оптическую ось (Кизель и др., 1964). Недостатком устройства является большая оптическая толщина. Другой более распространенный способ состоит в комбинировании свойств положительного и отрицательного кристаллов. Та-

кие фазосдвигающие элементы работают в широком диапазоне углов падения. Усовершенствование ахроматических фазосдвигающих элементов происходило путем увеличения числа кристаллических компонент (Панхаратнам, 1955). Остаточная «неахроматичность» может учитываться при помощи специальной методики наблюдений.

При поляриметрических исследованиях астрофизических объектов точность измерений ограничивается нестабильностью аппаратуры и атмосферы. Для уменьшения их влияния в эпоху применения одно- и двухканальных систем развивались модуляционные методы. Это разновидность дифференциального метода, при котором поток модулируется с большой частотой и при этом поочередно измеряются интенсивности двух ортогонально поляризованных лучей. Принцип действия модуляторов основан на электрооптическом эффекте Керра: кристаллы в электрическом поле из одноосных становятся двуосными, причем новая ось перпендикулярна вектору поля. Кристалл с поверхностью, перпендикулярной оптической оси, покрыт сеткой проволочных или полупрозрачных электродов. При подаче напряжения в несколько киловольт такой элемент может работать как четвертьволновая пластинка на длине волны, зависящей от прилагаемого напряжения. Недостатки такой конструкции (ячейка Покеля) — высокое напряжение, низкое пропускание, нагрев при высоких частотах, работа только в параллельных пучках, различная глубина модуляции на различных длинах волн. Перечисленные недостатки в основном преодолены в пьезооптических (фотоэластических) модуляторах, принцип работы которых основан на формировании стоячей волны путем возбуждения акустических колебаний в плавленом кварце.

Точность измерения поляризации излучения астрономических объектов ограничена также инструментальной поляризацией (яркие объекты) и статистикой фотоотчетов (слабые объекты). При наблюдениях на телескопе основным источником инструментальной поляризации телескопа являются плоские зеркала с металлическими покрытиями, при отражении от которых возникает сдвиг фазы, зависящий от угла падения. Коэффициенты отражения для ортогонально поляризованных компонент различны, поэтому отражение вносит инструментальную эллиптическую поляризацию. Защитные диэлектрические покрытия на зеркалах также могут дать инструментальную поляризацию. Часть этой линейной поляризации может трансформироваться в эллиптическую при последующих отражениях на зеркалах тракта куде. Изменения с длиной волны слабы, поэтому, казалось бы, могут игнорироваться при измерениях эффек-

та Зеемана по отдельной линии. Однако это приводит к уменьшению величины расщепления  $\sigma$ -компонент. Такое “снижение контраста” является функцией углов падения на плоские зеркала и длины волны, поэтому можно сделать вывод, что точность измерения магнитных полей в фокусе куде принципиально ограничена. Методы измерения и учета поляризации на зеркалах фокуса куде можно найти в работах Кларке (1973) и Борра (1976).

Альтазимутальная монтировка телескопа имеет некоторые преимущества перед экваториальной, т.к. позволяет учесть инструментальную поляризацию путем сравнения наблюдений, выполненных до и после меридиана (подобно тому, как это делается на полноповоротных радиотелескопах). Большинство поляриметров разработано для фокусов Кассегрена, где инструментальная поляризация незначительна (определяется, в основном, неоднородностями покрытий зеркал). Для устранения такой инструментальной поляризации при создании системы поляриметрических стандартов использовались небольшие кассегреновские телескопы специальной конструкции, где зеркала можно было разворачивать вместе с трубой вокруг главной оптической оси.

### 3. Одно- и двухканальные поляриметрические приборы

История спектрополяриметров начинается с технических решений, ориентированных на применение одно- или двухканальных светоприемников. Хилтнер (1951) показал, что шумы, создаваемые земной атмосферой, когерентны для ортогонально поляризованных компонент. Это обстоятельство лежит в основе двухлучевых схем — при измерении отношения двух сигналов компенсируются изменения прозрачности и эффекты мерцания. Использование ФЭУ обеспечило достаточное временное разрешение, например для поиска магнитных полей у быстровращающихся белых карликов. Необходимость выполнения частых дифференциальных измерений, т.е. обеспечения быстрого сдвига фазы, привела к использованию электрооптических модуляторов, разработанных ранее для солнечного магнитографа (Бэбкок, 1953). Базовой моделью двухканального поляриметра мы считаем магнитомер Энжела и Ландстрита (1970), разработанный для поиска эффекта Зеемана в водородной линии  $H_\gamma$  в спектрах белых карликов. Электрооптический модулятор и призма Волластона работают в коллимированном пучке, интерференционные фильтры (полоса пропускания  $30 \text{ \AA}$ ) располагаются в пучках, расходящихся после призмы. Далее установлены линзы Фабри и ФЭУ. Изме-

ние знака напряжения, подаваемого на модулятор, приводит к тому, что вдоль оси призмы Волластона оказывается линейно поляризованным излучение то правой, то левой круговой поляризации. Изменение наклона фильтров позволяет перестраивать их полосы пропускания на соседние фрагменты профиля линии. Такая схема применялась впоследствии при поисках поверхностных магнитных полей у ярких звезд (Ландстрит и др., 1975) на телескопах разных диаметров: 0.6-м Columbia Univ., 1-м KPNO, 1.2-м Univ. Western Ontario, 1.5-м MtWilson, 2.1-м McDonald с фильтрами, имеющими полосы пропускания  $\Delta\lambda 1,5$  и  $\Delta\lambda 20 \text{ \AA}$ . Был предпринят поиск поверхностных магнитных полей для звезд ярче 5-й величины до склонений выше  $-20^\circ$  (Борра и Ландстрит, 1980). Стандартная ошибка измерения поля в 300 Гс достигалась за час накопления сигнала на 1.2-м телескопе от звезды 5-й величины. Для сравнения заметим, что на более крупных телескопах ошибка такого же порядка получена по фотографическим зеемановским спектрам только для звезд с узкими линиями (Престон, 1969).

В конце 60-х годов методы солнечной магнитографии (Бэбкок, 1953) были внедрены для наблюдений в фокусе куде 2.6-м телескопа в Крымской астрофизической обсерватории (Северный, 1970). Перед входной щелью спектрографа устанавливались электрооптический модулятор (130 Гц) и поляриод. Посредством ФЭУ, установленного после движущейся выходной щели (обратная линейная дисперсия  $1.5 \text{ \AA}/\text{мм}$ , шаг перемещения щели  $0.2 \text{ \AA}$ ), измерялась разность интенсивностей между лево- и правополяризованными компонентами линии. Борра и Ландстрит (1973) развили метод, разработанный Северным (1970), дополнив поляриметр компенсатором инструментальной поляризации Бабинэ-Солейля и применяя в качестве поляризатора призму Глена-Томпсона. На 2.5-м телескопе при длительных накоплениях для звезд 2-й и 7-й величины была достигнута точность 3 и 30 Гс соответственно.

Двухканальный узкополосный сканирующий поляриметр, разработанный в обсерватории Glasgow University, использовался на телескопах диаметром 0.51, 0.91 и 2.5 м (Кларке и МакЛин, 1975). Прибор, основу которого составляли вращающаяся полуволновая пластинка и призма Фостера, был ориентирован на измерения линейной поляризации, а для измерения круговой поляризации перед полуволновой пластинкой вводилась четвертьволновая с разворотом осей на  $45^\circ$  относительно осей поляризатора. Интерференционные фильтры с полосой пропускания  $\Delta\lambda 50, 25, 10$  и  $2.5 \text{ \AA}$  устанавливались в коллимированном пучке. Сканирование по длине волны выполнялось наклоном фильтра к

оси пучка.

Одноканальный спектрополяриметр, предназначенный для измерения линейной и круговой поляризации, разработан в 70-е годы в Эдинбургской обсерватории (Вольстенкрофт и др., 1983). В приборе использовался фотоэластический модулятор, представляющий собой пластинку из плавленого кварца, обеспечивающий сдвиг фазы с частотой 50 кГц. Для измерения линейной поляризации перед модулятором поочередно вводились две четвертьволновые пластинки, при измерении круговой поляризации они удалялись. За модулятором установлен анализатор, оси которого могли занимать два положения, различающиеся на  $90^\circ$ , оба положения отстоят на  $45^\circ$  от оси сжатия модулятора. Прибор может разворачиваться как целое по позиционному углу. Поляриметр спроектирован на базе спектрометра, который представляет собой скрещенную схему Черни-Тернера, сканирование осуществлялось поворотом плоской дифракционной решетки. На выходе перед ФЭУ установлена двухлинзовая система Фабри. Диапазон спектральных разрешений от  $5 \text{ \AA}$  до  $400 \text{ \AA}$  обеспечивается тремя сменными решетками и сменными входными диафрагмами разных диаметров.

Удачное сочетание двухканальной системы счета со спектрополяриметром высокого разрешения осуществили Борра и Воган (1977). Основным элементом спектрополяриметра являлся электрооптический модулятор (ЭОМ), который при подаче электрического напряжения работал как четвертьволновая пластинка, т.е. преобразовывал циркулярно поляризованный свет в линейно поляризованный. Призма Глена-Томпсона является линейным поляризатором и пропускает в спектрометр свет определенной поляризации. Оси призмы ориентированы под углом  $45^\circ$  по отношению к “быстрой” и “медленной” осям ЭОМа. Переключение знака напряжения на ЭОМ с определенной частотой приводит к тому, что в спектрометр попадает излучение то с левой, то с правой круговой поляризацией. Для устранения влияния дрейфов чувствительности, прозрачности, качества изображений частота переключения ЭОМа составляла 1000 Гц. При наблюдениях в фокусе куде следует учитывать, что из-за отражения на плоских зеркалах появляется дополнительный сдвиг фаз и дополнительная поляризация. Для звезд в интервале склонений от  $-10^\circ$  до  $+50^\circ$  инструментальная линейная поляризация в фокусе куде 2.5-м телескопа изменялась от 2 до 8%. Она может быть существенно уменьшена применением компенсатора инструментальной поляризации. Например, Борра и Воган (1977) установили перед ЭОМом компенсатор Бабинэ-Солейля, работающий в пучке F/30. Для увеличения светосилы сканера на его выходе

(F/19) перед одним из ФЭУ устанавливался перестраиваемый эталон Фабри-Перо (Воган и Зирич, 1968), второй ФЭУ регистрировал поток в двух фиксированных полосах (каждая шириной  $25 \text{ \AA}$ ), расположенных по обе стороны от сканируемого участка.

Эффективными спектральными приборами, сочетающими одноканальный светоприемник (ФЭУ) и принцип мультиплексности (Фелжетт, 1955), стали корреляционные спектрометры с многощелевой маской (см., например, Гриффин и Ганн, 1974). На базе одного из таких корреляционных измерителей лучевых скоростей (МакКлюр и др., 1980) был создан многощелевой фотоэлектрический магнитометр (Борра и др., 1981). Кристалл электрооптического модулятора с частотой модуляции 100 Гц, установленный после призмы Глена-Томпсона, работает как переключаемая четвертьволновая пластинка. Сначала спектрометр используется в режиме измерителя лучевых скоростей с целью уточнения положения маски. Затем для набора последовательных положений маски выполняются поляриметрические измерения. Используемый телескоп (1.2-м) был оптимизирован ранее для спектроскопических наблюдений в фокусе куде (Ричардсон и др., 1971). В частности, применены сменные плоские зеркала с диэлектрическими покрытиями. Все покрытия, разработанные для синего диапазона спектра, оказались несовместимыми с задачей спектрополяриметрии, тогда как зеркала с серебряными покрытиями показали низкую инструментальную поляризацию.

Конструкция “водородного” магнитометра 6-метрового телескопа (Штоль и др., 1985) развивает метод, предложенный Энжелом и Ландстригом (1970). Вместо интерференционных фильтров, выделяющих участки крыльев линий водорода, использован серийный дифракционный спектрограф с зеркально-линзовой, а затем линзовой камерой (в обоих случаях широкощельность получилась менее единицы). Прибор был ориентирован, в основном, на измерения круговой поляризации в крыльях водородных линий. Модификация прибора позволяла проводить одновременные измерения в крыльях двух водородных линий. С 1988 года прибор использовался и для измерения линейной поляризации. Затем была предложена оригинальная схема сочетания поляриметрического анализатора с полихроматором (Штоль, 1991), но эпоха применения ФЭУ на крупных и средних телескопах уже закончилась.

Переходным между одно-, двух- и многоканальными системами стал 33-канальный спектрофотометр Оука (1969), разработанный для кассегреновского фокуса 5-м телескопа. На входе спек-

трофотометра располагалась двойная диафрагма, отверстия которой перекрывались поочередно (“объект плюс небо” и “небо”), регистрация соответствующих спектров на линейку ФЭУ выполнялась поочередно. Переделка спектрофотометра в спектрополяриметр выполнена следующим образом (Энжел и др., 1972). Пучок F/16 коллимировался отрицательной линзой, расположенной над ячейкой электрооптического модулятора. Над двойной диафрагмой спектрофотометра устанавливалась призма Глена-Томпсона с ориентацией осей, составляющих угол  $45^\circ$  относительно осей ячейки. Вместо переключения двух диафрагм каждые 10 мсек переключался модулятор, и на линейку фотоумножителей поочередно подавались компоненты спектра левой и правой круговой поляризации.

#### 4. Многоканальные системы низкого и среднего разрешения

Внедрение многоканальных электронных полупроводниковых светоприемников в астрофизическую практику качественно преобразило спектрофотометрическое оборудование. От систем, где сканирование спектра выполнялось механически, посредством движения одного из элементов спектрометра (поворот решетки, движение выходной щели или маски щелей, колебание прозрачной пластинки за входной щелью, поворот интерференционных фильтров и т.п.), астрономы перешли к спектрографам, где на линейке светочувствительных элементов одновременно регистрировался большой диапазон длин волн. Дополнительно был реализован и выигрыш в широкощельности. Если спектрофотометры с ФЭУ имели широкощельность около 1, то применение новых светоприемников с небольшим размером элемента разрешения привело к внедрению схем с уменьшением масштаба на входе светоприемника. Таким образом, переход на многоканальные системы, кроме очевидного выигрыша в числе одновременно регистрируемых элементов спектра и перехода на шумы другой природы, обеспечил и выигрыш по потоку. Это, в сочетании с ростом чувствительности светоприемников, позволило разработать новый класс приборов — многоканальные спектрополяриметры. Однако для возможности регистрации в узком спектральном интервале (по сравнению с фильтровым поляриметром) необходимо было принять дополнительные меры для повышения точности поляриметрии, в результате в 70-е годы получили распространение модуляционные многоканальные методы. Технику этого периода охарактеризуем на нескольких примерах.

Примером последовательного сочетания модуляционной техники с многоэлементным светоприемником может служить развитие Ликского спектрополяриметра. Вначале основу прибора составил сканер Робинсона-Уомплера (Робинсон, Уомплер, 1972), где в качестве светоприемника использовалась диссекторная система с усилителем яркости, позволяющая одновременно регистрировать на двух линейках спектр объекта и фона. Первый шаг в преобразовании сканера в спектрополяриметр выполнил Нордсик (1974), установив после щели кристаллооптические фильтры (последовательно: кварц толщиной  $d_1 = 1$  мм, кварц толщиной  $d_2 = 3$  мм, поляриод). Сдвиг фазы выбран большим,  $\tau \gg 2\pi$ , но не настолько, чтобы  $\sin \tau$  и  $\cos \tau$  существенно изменялись в пределах элемента разрешения сканера ( $7 \text{ \AA}$ ). В этом случае параметры Стокса Q и V могут быть определены методом Фурье-анализа из выражения для интенсивности излучения, прошедшего через вторую фазовую пластинку и поляриод:

$$I'(\lambda) = [I(\lambda) + Q(\lambda) \cos \tau_2(\lambda) - V(\lambda) \sin \tau_2(\lambda)]/2,$$

где  $\tau_2(\lambda) = 2\pi \cdot \Delta n \cdot d_2/\lambda$ .

Если ввести первую фазосдвигающую пластинку толщиной  $d_1$ , то интенсивность после такого трехэлементного фильтра равна

$$I'(\lambda) = [I(\lambda) + Q(\lambda) \cos \tau_2(\lambda) + U \sin \tau_2(\lambda) \sin \tau_1(\lambda) - V \sin \tau_2(\lambda) \cos \tau_1(\lambda)]/2.$$

Отношение толщин  $d_1/d_2$  выдержано с точностью до 0.002, так что соотношение частот  $\tau_2 - \tau_1$ ,  $\tau_2 + \tau_1$  составляет 2:3:4, что позволило упростить вычисления преобразований Фурье и работать в режиме on-line с ЭВМ PDP-8. Пленочный поляриод мог быть заменен поляризационной призмой, это на 20% увеличивало квантовую эффективность поляриметра. На ширину аппаратной функции сканера в режиме поляриметра влияет следующее:

- действие кварцевых пластинок на сходящийся пучок F/17 приводит к сдвигам полос, формируемым различными зонами пучка, на величину  $\pm 1 \text{ \AA}$ , независимо от толщины кварца;
- изменение температуры на  $4^\circ$  приводит к сдвигу полос на  $2 \text{ \AA}$ , что учитывается калибровкой по источникам с хорошо измеренной линейной поляризацией;
- квазипериод колебаний величины  $\sin \tau_2(\lambda)$  — от  $25 \text{ \AA}$  на  $3100 \text{ \AA}$  до  $175 \text{ \AA}$  на  $7500 \text{ \AA}$  (для линейной поляризации) и более медленные осцилляции  $\sin \tau_1(\lambda)$  — от  $75 \text{ \AA}$  в УФ до  $500 \text{ \AA}$  в красной области

(при наличии одновременно круговой и линейной поляризации).

Для снижения шумов и влияния линий регистрировался также спектр без поляриметрической насадки,  $I(\lambda)$ , и выполнялся фурье-анализ величины  $I'(\lambda)/I(\lambda)$ .

Сканер Робинсона-Уомплера и поляриметрическая приставка использовались вначале со спектрографом, неоптимальным для 3-м телескопа, поэтому вскоре был разработан специализированный спектрополяриметр (Миллер и др., 1980). Этот прибор стал одним из первых высокоавтоматизированных подвесных спектрографов (даже выбор одной из трех дифракционных решеток осуществлялся дистанционно). Поляриметрическое устройство, разработанное Нордсиком (1974), ни по спектральному разрешению, ни по световой эффективности не удовлетворяло требованиям задач спектрополяриметрии внегалактических объектов. Поэтому была разработана новая схема, повторяющая решения, проверенные на поляриметрах Энжела и Ландстрита (1970), Шмидта и др. (1978). Коллимирующая оптика и электрооптический модулятор (ячейка Покеля) располагались над двойным деккером (отверстия для объекта и фона), а сразу под ним помещалась пара ромбов Френеля (работающих как ахроматические четвертьволновые пластинки) и блок призм из кальцита, расщепляющих изображение деккеров. Напряжение  $\pm 2$  кВ подавалось через сетку проводников на электрооптический кристалл (дважды дейтерированный фосфат калия), каждую секунду происходила смена знака напряжения, кристалл работал как переключаемая четвертьволновая пластинка. При прохождении кристалла линейно поляризованное излучение становилось поляризованным по кругу (левая или правая поляризация — зависит от ориентации плоскости поляризации и кристаллических осей). После прохождения ромбов Френеля фазовый сдвиг между пучками равнялся  $\pi$  либо нулю, т.е. свет становился линейно поляризованным в ортогональных плоскостях. На фотокатоде регистрировались четыре строчки спектра (по две на “объект плюс небо” и “небо”). Вычислялся параметр линейной поляризации  $Q$ . Развернув спектрополяриметр как целое на  $45^\circ$ , получаем возможность измерить параметр  $U$ . Для измерения круговой поляризации в пучок вводится четвертьволновая пластинка. Частота смены строчек спектра ограничена сверху временем послесвечения экрана ЭОПа (Шмидт, 1979).

В качестве примера работ, выполненных с данным прибором, назовем спектрополяриметрию объекта Хэрига-Аро H-H24 (Шмидт и Миллер, 1979), где по характеру поляризации была лока-

лизована область формирования эмиссионных линий.

В многоканальном спектрополяриметре 3.9-метрового телескопа ААТ (МакЛин и др., 1984) использовался метод электрооптической модуляции в сочетании с двумерным счетчиком фотонов. Перед модулятором (работающим в параллельном пучке) располагаются две четвертьволновые пластинки (развернутые относительно друг друга на  $45^\circ$ ) и пленочный поляризатор (для целей калибровки). Блок кальцита расположен после щели спектрографа RGO. Инструментальная поляризация незначительна и точность ограничена только статистикой фотонов.

Для спектрографа среднего разрешения (СП-124) со счетчиком фотонов, установленного в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа (БТА), И.Найденным был разработан анализатор круговой поляризации, состоящий из двух последовательно установленных входных четвертьволновых пластинок, призмы Рошона, выходной четвертьволновой пластинки и клина, компенсирующего угол отклонения одного из лучей (Борисов и др., 1989).

Внедрение ПЗС привело к выигрышу в квантовой чувствительности (более чем в 7 раз в случае Ликского спектрополяриметра) и к увеличению времени считывания, поэтому от техники модуляции на относительно высоких частотах при одновременном считывании пришлось отказаться. Третья версия Ликского спектрополяриметра (Миллер и др., 1988) основана на использовании двух конфигураций спектрографа: “линзовая камера плюс гризма” для диапазона  $4000\text{--}8500 \text{ \AA}$  и “УФ-спектрограф с камерой Шмидта” для диапазона  $3000\text{--}11000 \text{ \AA}$ . Вначале в качестве модулятора использовалась ячейка Покеля, а ПЗС служила для промежуточного хранения модулированного сигнала. Последнее стало возможным благодаря развитию техники “сканирования со сдвигом”. Поэлементная чувствительность первых ПЗС заметно различалась, поэтому был предложен метод сдвига накопленного заряда синхронно со сдвигом изображения на матрице (Маккей, 1982). С тех пор метод широко применяется при сканировании неба неподвижными телескопами. Трехфазные ПЗС позволяют переключать направление сдвига накопленного заряда. Схема работы матрицы ПЗС с модулятором поляризации такова: изображение регистрируется одной и той же группой соседних строк матрицы, затем накопленный заряд сдвигается вверх или вниз. При возвращении к прежнему состоянию модулятора ранее накопленный заряд возвращается в зону накопления. Результатом являются две строчки спектра, накопленные при разных состояниях модулятора. Вли-

яние неоднородности элементов матрицы в таком режиме исключается. В Ликском спектрополяриметре переключение модулятора и соответствующие накопления сигналов осуществлялись с интервалом от 200 миллисекунд до нескольких секунд. Применение сканирования со сдвигом выявило ограничивающие факторы: без поступления светового сигнала даже при сдвигах сильно возрастал темновой сигнал, а наличие ловушек заряда в зоне сканирования приводило к искажению накопленного сигнала. Был сделан вывод, что указанные эффекты делают метод сдвига изображений непригодным для высокоточных работ.

Применение первых ПЗС показало высокую фотометрическую повторяемость калибровок. Так как необходимость модуляции с высокой частотой была поставлена под сомнение, то изменился метод наблюдений на Ликском спектрополяриметре. Накопление сигнала (с последующим считыванием) при неизменном состоянии модулятора проводилось в режиме медленной модуляции (переключение фазы один раз в несколько минут). Но когда ячейка выдерживалась несколько минут при постоянном потенциале, ее оптическое пропускание заметно снижалось. Развитием метода медленной модуляции явился полный отказ от модулирующей ячейки, заменяемой вращением спектрополяриметра вокруг оптической оси телескопа (т.е. изменением позиционного угла). Кристалл кальцита, расположенный после щели, дает два перпендикулярно поляризованных монохроматических изображения щели, регистрируемых одновременно. Четырех экспозиций, сделанных при позиционных углах спектрополяриметра, последовательно различающихся на  $45^\circ$ , достаточно для измерения линейной поляризации. Недостаток метода состоит в снижении точности определения параметров Стокса из-за гнуптия инструмента (один и тот же элемент спектра, регистрируемый при разных ориентациях спектрографа и анализатора поляризации, попадает на разные элементы ПЗС, имеющие различную чувствительность).

Следующим шагом в развитии методов медленной модуляции стало применение вращающихся волновых пластинок. Полуволновая ахроматическая пластинка, размещенная перед щелью, состоит из набора тонких полимерных пленок, заключенных между двумя кварцевыми защитными стеклами. "Быстрые" оси каждой пленки развернуты относительно друг друга так, что итоговый сдвиг в полволны выполняется для диапазона 3200–7200 Å с точностью до нескольких процентов. При постоянной величине позиционного угла спектрополяриметра и осей расположенного после щели кристалла кальцита выполняются четыре экспозиции при разной ориентации оси по-

луволновой пластинки ( $0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ$ ). Модифицированный таким образом Ликский спектрополяриметр использовался, в основном, для измерения линейной поляризации.

Гудрич (1991) разработал ахроматическую поляризационную оптику для касегреновских спектрографов 2.7-метрового телескопа МакДональд и 5-метрового телескопа Хэйла. Используется сверхахроматическая полуволновая пластинка и модифицированная призма Глэна-Тэйлора. Воздушный промежуток, ориентация осей и величины углов призмы выбраны так, что необыкновенный луч проходит воздушный промежуток между компонентами призмы и распространяется вдоль оси падения света, тогда как обыкновенный луч после двукратного полного внутреннего отражения в призме выходит из призмы параллельно оси.

Необходимость поиска слабонамагниченных ( $B_e < 1$  МГс) белых карликов заставила перейти от использования эффекта фотосферного дихроизма при измерениях круговой поляризации в континууме (Кэмп и др., 1970; Энжел и др., 1981) к использованию линейного (Энжел и др., 1981) и квадратичного (Престон, 1970) зеemanовского расщепления. Для выполнения обзора белых карликов с эффективными полями  $1 \text{ МГс} > B_e > 10 \text{ кГс}$  в обсерватории Steward (Шмидт и др., 1992) был создан спектрополяриметр, пригодный для работы на телескопах средних диаметров. Малый диаметр коллимированного пучка (25 мм) позволил разместить призму Волластона после коллиматора F/9. Фазосдвигающие полуволновая или четвертьволновая пластинки вводятся поочередно после щели, имеется возможность их вращать. Дифракционные решетки 1200 и 600 штр/мм в сочетании с объективом  $F = 50 \text{ мм}$  позволяют работать с разрешением 7 и 13 Å соответственно. Вес криостата и контроллера матрицы ПЗС составляет значительную часть общего веса прибора (50 кг). Магнитное поле обнаруживалось по S-образному профилю параметра круговой поляризации  $V$  в области линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ .

Для спектрографа LRIS 10-метрового телескопа Гудрич и др. (1995) применили модификацию призмы Глэна-Тэйлора, компенсирующую рассогласование положений фокуса для обыкновенного и необыкновенного лучей (напомним, что коллиматор LRIS не имеет приспособлений для фокусировки).

Для исследования межзвездной и околозвездной поляризации Кавабата и др. (1999) разработали спектрополяриметр HBS с низким разрешением ( $R = 40\text{--}200$ ). Прибор, используемый на 0.9-м (F/18) телескопе обсерватории Dodaira, состоит из двух частей. Первая представляет собой классический поляриметр (турель диафрагм, кол-

лимирующая линза, вращающаяся полуволновая пластинка, призма Волластона, четвертьволновая пластинка, выходная ахроматическая линза). Вторая часть содержит детали спектрографа (щель, зеркальный коллиматор, дифракционная решетка 300 штр/мм, линзовая камера). На матрице ПЗС регистрируются 4 строки спектра (по две от объекта и фона неба). Кроме источников спектра, блок калибровки содержит призму Глена-Тэйлора. Наблюдения выполняются при четырех последовательных положениях оси полуволновой пластинки (от 0 до  $67.5^\circ$ ). Наблюдения на HBS представляют пример оптимизированного подхода к спектрополяриметрии на малых телескопах.

Часть программ спектрополяриметрии с высоким спектральным разрешением, выполняемых в САО на 6-м телескопе, нуждается в поддержке спектрополяриметрическими методами среднего разрешения. С этой целью в лаборатории спектроскопии звезд завершается изготовление спектрополяриметра умеренного разрешения для фокуса Кассегрена 1-м телескопа САО. Прибор позволит измерять линейную поляризацию в диапазоне 3900–9000 Å со спектральным разрешением  $R = 700\text{--}2800$ .

## 5. Многоканальные системы высокого разрешения

Сектрополяриметры высокого разрешения ориентированы на исследования поляризационных эффектов в пределах узких спектральных интервалов, в частности в профилях линий. Пионером здесь является Бэбкок (1947), впервые измеривший весной 1946 года зеемановское расщепление линий со спектрографом фокуса куде с узкополосной четвертьволновой слюдяной пластинкой и кристаллом исландского шпата. Через 10 лет число исследованных таким образом звезд превысило три сотни (Бэбкок, 1958). В то же время началось создание ахроматических фазосдвигающих пластинок (Панхаратнам, 1955). Для звезд с узкими линиями точность измерения эффекта Зеемана определялась, в основном, числом измеренных магниточувствительных линий. В конце 60-х было показано, что в задаче поиска магнитных полей большой и средней напряженности можно ограничиться оценкой поля по разделенным зеемановским компонентам или по уширению магниточувствительных линий, т.е. регистрировать спектры с обратной линейной дисперсией 3–5 Å/мм, не используя спектрополяриметрические устройства (Престон, 1971). Оказалось, однако, что по разделенным зеемановским компонентам величина эффективного магнитного поля существенно отлича-

лась от оценок, полученных методом измерения неразделенных компонент (Бэбкок, 1960).

В САО РАН более 25-ти лет изучаются магнитные поля звезд, для чего используется Основной звездный спектрограф 6-м телескопа. Перед его щелью установлен ахроматический анализатор круговой поляризации, в котором сдвиг фаз обеспечивается отражением от поверхностей ромбов Френеля (Найденов и Чунтонов, 1976а). Этот анализатор был ориентирован на фотографическую регистрацию спектров. Для обеспечения равенства почернений и возвращения расщепленного пучка на оптическую ось установлен второй ромб Френеля, превращающий линейно поляризованное излучение (после прохождения кристалла исландского шпата) в циркулярно поляризованное.

В настоящее время стремление увеличить число одновременно регистрируемых магниточувствительных линий, сохраняя при этом высокое спектральное разрешение, заставило обратиться к разработке поляриметрических приспособлений для эшелле-спектрографов. Первая попытка сочетания анализатора круговой поляризации с касегреновским эшелле-спектрометром (Андерсон и др., 1976) продемонстрировала перспективность метода и послужила основанием применения анализатора круговой поляризации на касегреновском эшелле-спектрографе 4-метрового телескопа KPNO (Андерсон и Нордсик, 1978). В этом инструменте использована схема, разработанная еще Бэбкоком: две  $\sigma$ -компоненты линии, поляризованные по кругу, трансформируются четвертьволновой пластинкой в линейно поляризованный свет, выходящий из фазосдвигающей пластинки под углом  $\pm 45^\circ$  к ее “быстрой” оси. Затем пластинка кальцита обеспечивает пространственное разнесение этих компонент. Не имея возможности вносить серьезные изменения в эшелле-спектрограф общего пользования, Андерсон и Нордсик (1978) разместили четвертьволновую пластинку на предщелевой турели, а пластинку кальцита — на послещелевой. Для работы с ретикумом требовалось более широкое разнесение компонент, чем в случае фотографических работ. В этом случае использовалась другая пластинка кальцита (толщиной 43 мм). Дефокусировка за счет разного оптического пути компонент поляризованного излучения была незначительна в случае фотографической регистрации с помощью ЭОПа и заметна при работе с ретикумом.

Фогт и др. (1980) существенно улучшили методику получения зеемановских спектров в фокусе куде. В предщелевой части последовательно расположены компенсатор Бабинэ-Солейля и ахроматическая четвертьволновая пластинка, склеенная с блоком кальцита. Сдвиг фазы, возникающий на



плоских зеркалах тракта куде, является функцией часового угла, склонения, длины волны, поэтому механизм компенсатора инструментальной поляризации снабжен шаговым двигателем, управляемым от ЭВМ.

Матис и Стенфло (1986) адаптировали касегреновский эшелле-спектрограф (CASPEC) 3.6-м телескопа ESO для одновременной регистрации параметров Стокса I и V в диапазоне  $1000 \text{ \AA}$  с разрешением  $R = 20000$ . Это позволило использовать “приближение многих линий”, развитое для диагностики тонкой структуры магнитного поля Солнца (Соланки и Стенфло 1984, 1985; Стенфло и др., 1984). Зеemanовский анализатор, состоящий из четвертьволновой пластинки и призмы Волластона (разводящей пучки на  $1^\circ$ ), размещался непосредственно после щели, а проходящее через эти элементы излучение коллимировалось линзами.

Часто системы высокого разрешения расположены в фокусе куде или Нэсмита. При попытке использовать такие приборы в качестве спектрополяриметров в обоих случаях возникает необходимость учета инструментальной поляризации на плоских зеркалах телескопов. Решить эту задачу пытаются разными способами, остановившись на некоторых технических подходах.

Еще Бэбкок (1962) использовал компенсаторы инструментальной поляризации, возникающей на трех и пяти зеркалах фокуса куде телескопа Хэйла. Упомянем эксперименты Кларке (1973), Борра (1976), Фогта и др. (1980). Пилле и Альмейда (1991) предложили двухзеркальную схему телескопа с фокусом куде, свободную от инструментальной поляризации. Эффект достигается размещением полуволновой пластинки между двумя идентичными плоскими зеркалами. Показано, что для вакуумного солнечного телескопа (схема Грегори-Куде) инструментальная поляризация может быть скомпенсирована с точностью до 0.2 %.

На эшелле-спектрографах фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа SAO для спектрополяриметрии с высоким разрешением используются полуволновые и четвертьволновые ахроматические пластинки в сочетании с ахроматическим анализатором круговой поляризации (Найденов и Панчук, 1996).

Одним из методов исключения инструментальной поляризации на зеркалах фокусов Нэсмита и куде является применение схемы “анализатор поляризации – оптические волокна – спектрограф”. Приведем несколько примеров соединения анализатора поляризации со спектрографом. Задача зеeman-доплеровского картирования быстровращающихся звезд требует отношения сигнал/шум  $>1000$ , высокого спектрального разре-

шения ( $R > 40000$ ), относительно коротких экспозиций и низкой инструментальной поляризации. Идеальной является комбинация касегреновского эшелле-спектрографа с телескопом 4-метрового класса, но такие телескопы труднодоступны для задач мониторинга. Семель и др. (1993) продемонстрировали пути решения этой проблемы на трех телескопах. На 1.93-м телескопе ОНР в 1986–1989 гг. использовался спектрограф ISIS (Феленбок и Гьерин, 1988). В итоге Семель и др. (1993) пришли к выводу, что метод оптоволоконного соединения спектрополяриметра и спектрографа эффективен, но для картирования звезд с узкими линиями в спектрах телескопа с таким диаметром зеркала недостаточно. На ААТ в 1989–1990 гг. использовался спектрограф RGO в фокусе Кассегрена (разрешение  $R = 40000$  с щелью  $0.6''$ ). На CFHT (наблюдения 1990 г.) конструкция была дополнена двойным резателем изображений типа Боуэна-Вальравена, установленным на выходе оптоволоконной и состоящим из двух микропризм, плоскопараллельной пластинки и основной призмы.

С целью выполнения координированных наблюдений на однотипных, разнесенных по долготе спектрографах, в конце 80-х был разработан относительно недорогой эшелле-спектрограф  $\text{MuSiCoS}$  (Бодра и Бем, 1992), конструкция которого допускала установку на разных телескопах 2-м класса (три прибора были установлены на 2-м телескопе TBL обсерватории Пик дю Миди, 2.5-м телескопе INT обсерватории Ла Пальма и 1.9-м телескопе Южно-Африканской обсерватории). Изображение звезды перебрасывалось из касегреновского фокуса на щель спектрографа при помощи оптического волокна. Исследования пекулярных звезд выявили потребность дооснастить  $\text{MuSiCoS}$  поляриметрическими приспособлениями (Донати и др., 1999). Конструкция касегреновского адаптера предусматривает работу с разными относительными отверстиями, за основу принята нетипичная для фокуса Кассегрена величина  $F/25$  (особенность TBL). После входной апертуры устанавливается дублет, согласующий относительное отверстие фокуса Кассегрена с указанной величиной. Затем последовательно установлены турель с пленочными поляроидами и турель с полуволновой и четвертьволновой суперахроматическими (диапазон  $3900\text{--}8700 \text{ \AA}$ ) пластинками. Полуволновая и четвертьволновая пластинки могут разворачиваться на фиксированные углы  $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$  и  $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ . Практика показала, что разворот поляриметрической головки как целого на углы  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  является более предпочтительной процедурой, чем вращение полуволновой пластинки. После фазосдвигающих элементов размещена пластинка Савара, состоящая из двух скрещен-

ных блоков кальцита. Она разводит пучки на расстоянии, равное минимальному расстоянию между двумя оптическими волокнами. Перед оптическими волокнами размещен фокальный редуктор, формирующий пучок  $F/2.5$ . Общая эффективность спектрополяриметра составляет 0.8% в максимуме чувствительности ПЗС. Для выявления вариаций поляризации в пределах профиля линии использован метод формирования “усредненного поляризационного свойства” (Донати, Камерон, 1997).

Спектрополяриметр университета Западного Онтарио (Эверсберг и др., 1998) разработан для касегреновских фокусов ( $F/8$ ) телескопов средних и больших диаметров. Спектрополяриметр является комбинацией работающих в параллельном пучке двух вращающихся четвертьволновых пластинок и фиксированной призмы Волластона, с последующим вводом ( $F/4$ ) обыкновенного и необыкновенного пучков в оптоволоконную линию, выход которой согласован линзами с целевым спектрографом ( $F/8$ ). Четвертьволновые пластинки обеспечивают идеальный сдвиг только для двух длин волн. Для калибровки ориентации этих пластинок используется призма Глена-Тэйлора, обеспечивающая 100%-ную линейную поляризацию во всем диапазоне работы спектрополяриметра.

Итак, для телескопов класса 2–4 м проблема оптоволоконного соединения анализатора и спектрографа решена. Применение оптоволоконных спектрополяриметрических методов высокого разрешения на более крупных телескопах сдерживается проблемой широкощельности. Проиллюстрируем это на примере БТА. Предположим, что в первичном фокусе ( $F/4$ ) за входной диафрагмой сначала формируется параллельный пучок, а после прохождения поляризационной оптики уже раздвоенный пучок проецируется ( $F/2.5$ ) на пару оптических волокон с диаметром ядра 0.15 мм, при этом волокнами отбирается по 2" в каждом изображении звезды. Выход пары оптических волокон расположен на входе в коллиматор ( $F/2.5$ ) эшелле-спектрографа, причем необходимой особенностью оптоволоконного спектрографа является отсутствие центрального экранирования. Предположим, что используется камера  $F/2$  (более светосильные камеры непригодны из-за PSF, нестабильной по полю), тогда в фокальной плоскости размер элемента разрешения составит 0.12 мм. Это означает, что для согласования с элементом разрешения светоприемника на выходе оптических волокон необходимо использовать двойной резатель изображения, по три среза на каждое волокно, т.е. один эшелле-порядок будет повторен 6 раз (по три раза в каждой поляризации). Проекция каждого среза составит 0.04 мм, и для реали-

зации разрешения  $R = 50000$  с эшелле  $R2$  потребуется камера с фокусным расстоянием не менее  $F = 480$  мм, т.е. диаметр коллимированного пучка составит 240 мм, а длина заштрихованной части эшелле — около полуметра. Так как число одновременно регистрируемых эшелле-порядков ограничено применением резателя, то для одновременной регистрации большого числа магниточувствительных линий желательно иметь камеру с достаточно большим полем (ориентированным на светоприемник форматом  $2048 \times 2048$  элементов). Изготовление линзовой камеры с такими характеристиками является весьма сложным и дорогостоящим делом.

Если в ряде задач спектрополяриметрии величина требуемого спектрального разрешения такова, что ее можно обеспечить компактным спектрополяриметром первичного фокуса БТА, то такое решение представляется оптимальным. В качестве примера приведем опыт реконструкции эшелле-спектрографа первичного фокуса PFES (Панчук и др., 1998), в результате которой был получен прибор для измерения линейной поляризации с величиной спектрального разрешения  $R = 13000$  (Панчук и др., 2001б).

## 6. Спектрополяриметрия с интерферометром Фабри-Перо

Известны преимущества эталона Фабри-Перо перед дифракционным спектрографом (более высокое значение произведения светосилы  $L$  на спектральное разрешение  $R$ ). Поэтому еще в эпоху одноэлементных светоприемников появились первые спектральные системы, в которых высокое значение ( $L \times R$ ) сочеталось с основным достоинством дифракционного спектрографа — пространственным разнесением излучения с различными длинами волн. При одноканальной регистрации процесс перестройки эталона, размещенного на входе спектрометра, должен сопровождаться согласованным движением выходной щели вдоль спектра. Этот метод, практически опробованный Гиком и Уилкоком (1957), был применен затем на 2.5-м (Воган и Мюнч, 1966) и 5-м (Зирин, 1967) телескопах. На 6-м телескопе для поиска и измерения слабых продольных магнитных полей использовался фотоэлектрический магнитометр с перестраиваемым эталоном Фабри-Перо (Глаголевский и др., 1979). В приборе использована схема интерферометрического контроля изменения давления газа между пластинами эталона (Найденев и Чунтонов, 1976б).

Для регистрации двухмерной картины солнечных магнитных полей был создан перестра-

иваемый двухлучепреломляющий интерферометр Фабри-Перо (Рамсей и Смарт, 1966). Перед эталоном размещалась четвертьволновая пластинка, преобразующая циркулярно поляризованные компоненты излучения в линейно поляризованные. Между пластинами эталона устанавливалась слюдяная пластинка, толщина которой определяла фазовый сдвиг между ортогонально поляризованными спектрами. Вращение четвертьволновой пластинки меняет знак круговой поляризации, но не модулирует неполяризованный или линейно поляризованный свет. В солнечном магнитографе эталон настраивался на крыло магниточувствительной абсорбционной линии, поэтому поляризационная оптика может быть неахроматической. Разность последовательных двухмерных распределений интенсивности, зарегистрированных в крыле линии при различных положениях оси фазосдвигающей пластинки, представляет карту распределения продольной компоненты магнитного поля и в первом приближении не зависит от доплеровских сдвигов.

При спектрополяриметрии точечных объектов многоэлементными светоприемниками возможно одновременно регистрировать несколько порядков эталона. Внедрение высокочувствительных двухмерных многоэлементных приемников расширило возможности сочетания эталона Фабри-Перо со спектрографом высокого разрешения, в частности уже есть пример одновременной регистрации нескольких сотен порядков эталона (Панчук, 2000). В качестве развития метода дважды скрещенной дисперсии интересно рассмотреть вариант сочетания интерферометра Фабри-Перо и анализатора круговой поляризации. На рис.1 приведен фрагмент эшелле-спектра звезды, зарегистрированного нами на нэсмитовском эшелле-спектрографе (НЭС) 6-м телескопа (Панчук и др., 1999), в предцелевой части которого были последовательно установлены анализатор круговой поляризации и эталон Фабри-Перо. В такой схеме излучение, разделенное на право- и левовращающиеся компоненты, проходит через эталон и попадает на двойную входную щель спектрографа. В этом случае эшелле-спектрограф служит лишь для пространственного разнесения интерференционных порядков эталона. Сравнение интенсивностей ортогональных компонент излучения в порядках, попадающих на крылья магниточувствительных линий, может выявить различие профилей, обусловленное эффектом Зеемана. Этот прием фиксирования (а также сканирования) длин волн может оказаться полезным для развития дифракционных спектрополяриметров, подверженных позиционным нестабильностям, или же ограниченных в классе дифракционных приборов по

инварианту  $L \times R$ .

## 7. Выводы

Выше показано, что по мере роста требований к точности измерений поляризации спектрополяриметрические наблюдения звезд “дрейфуют” в сторону все более крупных телескопов, охватывая измерения всех параметров Стокса. Дальнейшее применение приборов и методов для спектрополяриметрических исследований звезд на телескопах САО мы связываем со следующими направлениями:

- разработка методов компенсации (учета) поляризации на плоском зеркале БТА,
- разработка метода компенсации вращения поля в фокусе Нэсмита, не вносящего переменную инструментальную поляризацию,
- разработка спектрополяриметра высокого разрешения для первичного фокуса БТА,
- поиск технических решений оптоволоконного соединения анализатора поляризации в первичном фокусе БТА со спектрографом, в котором отсутствует центральное экранирование пучка,
- разработка спектрополяриметра умеренного разрешения для фокуса Кассегрена 1-м телескопа,
- поиск возможностей сочетания поляризационной оптики с эталоном Фабри-Перо на эшелле-спектрографах БТА.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке ГНТП “Астрономия” (проекты 1.4.1.1 и 2.1.5.5), РФФИ (проект 99-02-18339) и Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF), проект RP1-2264.

## Список литературы

- Андерсон и др. (Anderson C.M., Hartmann L.W., Bopp V.W.), 1976, *ApJ*, **204**, L51
- Андерсон и Нордсик (Anderson C.M., Nordsieck K.H.), 1978, in: “High resolution spectrometry”, Proc. of the 4th Coll. on Astrophysics, Trieste, July 3-7, 1978, ed. by M. Hack, 536
- Бодра и Бем (Baudrand J., Böhm T.), 1992, *A&A*, **259**, 711
- Борисов Н.В., Копылов И.М., Найденов И.Д., *Сообщения САО*, 1989, вып.60, 102
- Борра (Borra E.F.), 1976, *PASP*, **88**, 548
- Борра и Воган (Borra E.F., Vaughan A.H.), 1977, *ApJ*, **216**, 462
- Борра и Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1973, *ApJ*, **185**, L139
- Борра и Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1980, *ApJS*, **42**, 421

- Борра и др. (Borra E.F., Fletcher J.M., Poesckert R.), 1981, *ApJ*, **247**, 569
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1947, *ApJ*, **105**, 105
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1953, *ApJ*, **118**, 387
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1958, *ApJS*, **3**, 141
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1960, *ApJ*, **132**, 521
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1962, in: "Astronomical techniques", ed. by W.A.Hiltner, Univ. of Chicago Press
- Воган и Зирин (Vaughan A.H.Jr., Zirin H.), 1968, *ApJ*, **152**, 123
- Воган и Мюнч (Vaughan A.H.Jr., Münch G.), 1966, *AJ*, **71**, 184
- Вольстенкрофт и др. (Wolstencroft R.D., Cormack W.A., Campbell J.W., Smith R.J.), 1983, *MNRAS*, **205**, 23
- Гик и Уилкок (Geake J.E., Wilcock W.L.), 1957, *MNRAS*, **117**, 380
- Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденов И.Д., Романюк И.И., Рядченко В.П., Борисенко А.Н., Драбек С.В., 1979, *Сообщения САО*, вып.25, 5
- Гриффин и Ганн (Griffin R.F., Gunn J.E.), 1974, *ApJ*, **191**, 545
- Гудрич (Goodrich R.W.), 1991, *PASP*, **103**, 1314
- Гудрич и др. (Goodrich R.W., Cohen M.H., Putney A.), 1995, *PASP*, **107**, 179
- Донати и Камерон (Donati J.-F., Cameron A.C.), 1997, *MNRAS*, **291**, 1
- Донати и др. (Donati J.-F., Catala C., Wade G.A., Gallou G., Delaigue G., Rabou P.), 1999, *A&AS*, **134**, 149
- Жиран (Girard A.), 1960, *Optica Acta*, **7**, N1, 81
- Зирин (Zirin H.), 1967, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **5**, 139
- Кавабата и др. (Kawabata K.S., Okazaki A., Akitava H., Hirakata N., Hirata R., Ikeda Y., Kondon M., Masuda S., Seki M.), 1999, *PASP*, **111**, 898
- Кемп и др. (Kemp J.C., Swedlund J.B., Landstreet J.D., Angel J.R.F.), 1970, *ApJ*, **161**, L77
- Кизель В.А., Красилов Ю.И., Шамраев В.Н., 1964, *Оптика и спектроскопия*, **17**, 461
- Кларке (Clarke D.), 1973, *A&A*, **24**, 165
- Кларке и МакЛин (Clarke D., McLean I.S.), 1975, *MNRAS*, **172**, 545
- Ландстрит и др. (Landstreet J.D., Borra E.F., Angel J. R. F., Illing R.M.E.), 1975, *ApJ*, **201**, 624
- Маккей (MacKay C.D.), 1982, *SPIE*, **331**, 146
- МакКлюр и др. (McClure R.D., Fletcher J.M., Nemecek J.M.), 1980, *ApJ*, **238**, L35
- МакЛин и др. (McLean I.S., Heathcote S.R., Paterson M.J., Fordham J., Shortridge K.), 1984, *MNRAS*, **209**, 655
- Матисс м Стенфло (Mathys G., Stenflo J.O.), 1986, *A&A*, **168**, 184
- Миллер и др. (Miller J.S., Robinson L.B., Schmidt G.D.), 1980, *PASP*, **92**, 702
- Миллер и др. (Miller J.S., Robinson L.B., Goodrich R.W.), 1988, in: *Proc. 9th Santa Cruz Summer Workshop, "Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy"*, ed. L.B.Robinson (NY; Springer), 157
- Найденов И.Д., Чунтонов Г.А., 1976а, *Сообщения САО*, вып.16, 63
- Найденов И.Д., Чунтонов Г.А., 1976б, *Астрофиз. ис- след.* (Изв. САО), **8**, 139
- Найденов и Панчук (Najdenov I.D., Panchuk V.E.), 1996, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **41**, 143
- Нордсик (Nordsieck K.H.), 1974, *PASP*, **86**, 324
- Оук (Oke J. B.), 1969, *PASP*, **81**, 11
- Панхаратнам (Pancharatnam S.), 1955, *Proc. Indian Acad. Sci.*, A41, 137
- Панчук В.Е., Препринт САО, N144, 2000
- Панчук и др. (Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., Ivanchik A.V., Ermakov S.V., Murzin V.A.), 1998, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **44**, 132
- Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., 1999, *Препринт САО*, N135
- Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., Романенко В.П., Ермаков С.В., Юшкин М.В., 2001а, *Препринт САО*, N160
- Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Романенко В.П., Найденов И.Д., Ермаков С.В., 2001б, *Препринт САО*, N159
- Пилле и Альмейда (Pillet V.M., Almeida J.S.), 1991, *A&A*, **252**, 861
- Престон (Preston G.W.), 1969, *ApJ*, **158**, 243
- Престон (Preston G.W.), 1970, *ApJ*, **160**, L143
- Престон (Preston G.W.), 1971, *ApJ*, **164**, 309
- Рамсей и Смарт (Ramsey J.V., Smartt R.N.), 1966, *Appl. Opt.*, **5**, 1341
- Ричардсон и др. (Richardson E.H., Brealey G.A., Dancey R.), 1971, *Publ. Dom. Ap. Obs. Victoria*, **14**, No.1
- Робинсон и Умплер (Robinson L.B., Wampler E.J.), 1972, *PASP*, **84**, 161
- Северный (Severny A.), 1970, *ApJ*, **159**, L73
- Семель (Semel M.), 1987, *A&A*, **178**, 257
- Семель и др. (Semel M., Donati J.-F., Rees D.E.), 1993, *A&A*, **278**, 231
- Серковски (Serkowski K.), 1972, *PASP*, **84**, 649
- Соланки и Стенфло (Solanki S.K., Stenflo J.O.), 1984, *A&A*, **140**, 185
- Соланки и Стенфло (Solanki S.K., Stenflo J.O.), 1985, *A&A*, **148**, 123
- Стенфло и др. (Stenflo J.O., Harvey J.W., Brault J.W., Solanki S.K.), 1984, *A&A*, **131**, 333
- Тарасов К.Н., 1968, *Спектральные приборы, "Машиностроение"*, Л.
- Феленбок и Гьерин (Felenbok P., Guerin J.), 1988, in: "The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics", G.Cayrel de Strobel and M.Spite (eds.), 31
- Фелджетт (Felgett P.B.), 1955, *Optica Acta*, **2**, 9
- Фогт и др. (Vogt S.S., Tull R.G., Kelton P.W.), 1980, *ApJ*, **236**, 308
- Хилтнер (Hiltner W.A.), 1951, *Observatory*, **71**, 234
- Шмидт (Schmidt G.D.), 1979, *PASP*, **91**, 399
- Шмидт и Миллер (Schmidt G.D., Miller J.S.), 1979, *ApJ*, **234**, L191
- Шмидт и др. (Schmidt G.D., Angel J.R.P., Beaver E.A.), 1978, *ApJ*, **219**, 477
- Шмидт и др. (Schmidt G.D., Stockman H.S., Smith P.S.), 1992, *ApJ*, **398**, L57
- Штоль В.Г., 1991, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **33**, 176
- Штоль В.Г., Бычков В.Д., Викульев Н.А., Георгиев О.Ю., Глаголевский Ю.В., Драбек С.В., Найденов

- И.Д., Романюк И.И., 1985, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **19**, 66
- Энджел и Ландстрит (Angel J. R. P., Landstreet J.D.), 1970, *ApJ*, **160**, L147
- Эверсберг и др. (Eversberg T., Moffat A.F.J., Debruyne M., Rice J.B., Piskunov N., Bastien P., Wehlau W.H., Chesneau O.), 1998, *PASP*, **110**, 1356
- Энджел и др. (Angel J. R. P., Landstreet J.D., Oke J.B.), 1972, *ApJ*, **171**, L11
- Энджел и др. (Angel J. R. P., Borra E.F., Landstreet J.D.), 1981, *ApJS*, **45**, 457