

УДК 523.98; 520.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТРУКТУРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

Н.М. Фирстова, В.И. Поляков

THE LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE AS A TOOL FOR EXAMINING FINE-STRUCTURE OBJECTS ON THE SUN

N.M. Firstova, V.I. Polyakov

Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) создан для исследования солнечных образований с высоким пространственным и спектральным разрешением. В настоящее время основными объектами исследования являются солнечные вспышки.

Приводится описание оптической системы телескопа, спектрографа, дополнительных применяемых приборов и регистрирующих CCD-камер, а также методов наблюдения. Методы исследования на БСВТ – спектральный, спектрополяризметрический и фильтровый – позволяют получать ценную информацию о физических параметрах в исследуемых образованиях.

Представлены примеры исследования инструментальной поляризации телескопа с помощью крупногабаритных поляроида и фазовой четверть-волновой пластинки. Приводятся основные результаты исследования ударной линейной поляризации в солнечных вспышках.

The Large Solar Vacuum Telescope (LSVT) has been specifically engineered for high spatial and spectral resolution studies of solar objects. Solar flares are currently the main object to be examined.

We provide a description of the optical system used in the telescope, the spectrograph, complementary devices and imaging CCD-cameras, as well as of the relevant observation techniques. The research methods used with the LSVT – the spectral and spectral-polarimetric techniques and filtering – are capable of yielding valuable information regarding the physical parameters in the objects under scrutiny.

Examples are given of using a large-sized polaroid and phase quarter-wave plates to inspect the telescope's instrumental polarization. We list the major findings from studying the impact linear polarization in solar flares.

Введение

Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ), установленный в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН – самый большой вакуумный телескоп в России, предназначенный для исследования атмосферы Солнца в оптическом и ИК-диапазонах (рис. 1). БСВТ обладает уникальными оптическими характеристиками, позволяющими исследовать физические процессы в атмосфере Солнца с высоким пространственным, временным и спектральным разрешением.

Существует определенное число задач, выполнение которых выдвигает требования к телескопу,

связанные с получением высокого пространственного разрешения. Например, как формируются и поддерживаются основные теневые и полутеневые структуры солнечных пятен? Что вызывает потоки Эвершеда в полутени пятен на фотосферном уровне и потоки с обратным направлением на хромосферном уровне? Существует ли какая-нибудь связь между точками тени, яркими мостами и конвекцией? Для решения этих и многих других задач, например, для исследования солнечных вспышек, бомб Эллермана, процесса возникновения спокойных волокон нужны наблюдения в H α и других спектральных линиях с пространственным разрешением 1".

Недавние прогрессивные наземные наблюдения показали, что солнечное магнитное поле состоит из ансамбля тонкоструктурных ($\approx 0.1''$ – $0.2''$) магнитных полей вдобавок к солнечным пятнам и порам. Детальные особенности солнечных магнитных полей остаются, однако, неизвестными из-за ограничения пространственного разрешения и точности измерений.

Обоснование требований к современным солнечным наземным телескопам было опубликовано в [1, 2], идея создания на Байкале инструмента с теоретическим разрешением $0.2''$ была предложена член-корреспондентом АН СССР Степановым В.Е. еще в 70-х гг. [3]. При создании телескопа были также выдвинуты требования высокого спектрального разрешения и спектро-поляризметрической оснащенности.

Основные характеристики телескопа

БСВТ является зеркально-линзовой системой. Полярный гелиостат с плоским зеркалом диаметром 1 м установлен на вертикальной колонне высотой 25 м. Гелиостат направляет свет вдоль полярной оси на



Рис. 1. Большой солнечный вакуумный телескоп.

двухлинзовый объектив диаметром 760 мм и фокусным расстоянием 40 м, расположенный в верхнем торце вакуумной трубы телескопа. Труба телескопа помещена в защитный футляр и наклонена под углом 52° к горизонту. Для устранения влияния флуктуаций плотности воздуха на качество изображения в телескопе создается вакуум [4].

Солнечное изображение после прохождения света через нижнее окно используется в гидрирующей системе. Имеется два небольших боковых стеклянных окна с двух сторон трубы. Одно из них используется для освещения спектрографа, а также узкополосного фильтра, установленного на оптической скамье. Второе окно было предусмотрительно сделано для выполнения других наблюдений или наладочных работ. В частности, в настоящее время оно используется для исследований по разработке адаптивной оптической системы регистрации спектров. Использование телескопа в белом свете и с помощью ИПФ началось в 1980 г. Вся оптика была выполнена в ИСЗФ [5]. Результаты исследования оптики телескопа и краткое описание спектрографа БСВТ представлено в [6].

Основные параметры телескопа

Высота башни	25 м
Диаметр зеркала сидеростата	1 м
Диаметр главного объекта	760 мм
Эквивалентное фокусное расстояние	40 000 мм
Поле зрения	32 угл. мин
Диаметр изображения Солнца	380 мм
Теоретическое пространственное разрешение	0.2 угл. сек
Спектральное разрешение	0.007 Å

Характеристики телескопа и используемый для наблюдений комплекс спектрофотометрической и поляриметрической аппаратуры позволяет получать данные мирового уровня.

Спектрограф БСВТ

Функциональность любого телескопа многократно увеличивается при оснащении его спектрографом. Спектрограф позволяет решать задачи, связанные с химическим составом солнечной атмосферы, скоростью движения вещества; по наблюдениям спектральных линий строятся модели солнечной атмосферы. Кроме того, установленная на базе спектрографа поляризационная оптика дает возможность исследовать структуру и эволюцию магнитного поля – главного источника всех событий, происходящих в солнечной атмосфере.

В комплексе телескоп–спектрограф последний является звеном, выдающим «продукцию». Отсюда вытекает первое требование к спектрографу: он не должен ухудшать то пространственное разрешение, которое дает телескоп. Второе важное требование основано на приведенном выше перечне задач, решаемых с помощью спектрографа тем успешнее, чем выше спектральное разрешение.

Основным элементом спектрографа является дифракционная решетка размером $200 \times 300 \text{ мм}^2$ с 600 штрихов в мм. Чтобы не ухудшить разре-

ние телескопа, светосила спектрографа должна была равняться светосиле телескопа. Выбранная схема Эберта и заданная светосила $1/53$, обеспечивающая малые углы пучков на зеркалах и решетке, привели к тому, что aberrации в спектрографе оказались незначительными, что и подтвердил расчет размера aberrационного пятна. Фокус камерного зеркала был выбран равным 9.5 м, чтобы изображение Солнца не виньетировалось дифракционной решеткой. Однако, поскольку при малых углах на зеркалах влияние aberrаций существенно уменьшается, для двух камерных зеркал фокус был выбран равным 14 м [7]. Кроме того, спектрограф оснащен анализаторами линейной и круговой поляризации.

Габаритные размеры спектрографа

$D_1=283.5 \text{ мм}$	$f_1=9.5 \text{ м}$	$\alpha_1=1^\circ 39'$	$Q=3^\circ$
$D_2=598 \text{ мм}$	$f_2=14 \text{ м}$	$\alpha_2=1^\circ 31'$	
$D_3=603 \text{ мм}$	$f_3=14 \text{ м}$		

Здесь D и f – диаметр и фокусное расстояние зеркал, индексы 1 относятся к коллиматору, индексы 2 и 3 – к камерным зеркалам; α – углы между падающим и отраженным лучами на зеркалах, Q – то же на решетке.

Обычно у физиков вызывают удивление как размер спектрографа, так и то, что составные элементы его не заключены в трубу. Так, нобелевский лауреат Жорес Алферов, посетивший БСВТ, сказал: «Я первый раз в жизни нахожусь внутри спектрографа».

Расчеты aberrаций проведены в предположении, что спектральные наблюдения будут проводиться фотографически. Вследствие этого размер aberrационного пятна был определен в крайней точке спектрограммы, т. е. на расстоянии от центра щели по высоте на 15 мм и по ширине на 90 мм. Согласно расчетам, теоретическое пространственное разрешение комплекса телескоп–спектрограф составляет $0.2''$ – $0.3''$.

После ввода в действие спектрографа было проведено исследование его реальных спектральных характеристик, зависящих как от качества элементов спектрографа, так и от точности его выставления. С этой целью был получен инструментальный контур спектрографа по тонкой структуре зеленой линии 5460.7 Å ртутной лампы СМР1 и по линии 6328 Å гелий-неонового лазера ЛГН-207В. В результате этого исследования определено реальное разрешение спектрографа R_c . Критерием хорошего качества спектрографа является соотношение

$$R_c/R_p = 0.7,$$

где R_p – теоретическое разрешение решетки. Проведенные наблюдения дают $R_c/R_p=0.715 \pm 0.060$. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение того, что спектрограф удовлетворяет требованиям получения высокого спектрального разрешения [8].

Чтобы исключить влияние постороннего света и возникновение бликов, дающих рассеянный свет, стены и потолок спектрографа покрашены в черный цвет, а при работе спектрограф плотно закрывается.

В результате на БСВТ была создана спектральная и спектрополяриметрическая система наблюдений

солнечных тонкоструктурных образований. Далее представлены основные параметры спектрографа для спектрополяриметрических наблюдений, например солнечных вспышек:

- размер щели спектрографа – $30'' \times 0.35''$;
- предел разрешения спектрографа – $0.028 \text{ \AA}$ для I порядка и $0.006 \text{ \AA}$ для V порядка;
- дисперсия – $0.56 \text{ \AA/мм}$;
- поляризационная оптика – ромбоид и $\lambda/2$ фазовая пластинка;
- детектор – Princeton Instruments TEK 512×512;
- размер пиксела – $0.17''$ и $0.01959 \text{ \AA}$;
- время экспозиции – 0.1 с .

Типичное временное разрешение (интервал времени между получением кадров с Q ($\lambda/2=0^\circ$) и U ($\lambda/2=22.5^\circ$) параметрами Стокса) – $6\text{--}10 \text{ с}$.

Использование интерференционно-поляризационного фильтра

Для исследования Солнца чрезвычайно важно осуществлять двумерную спектроскопию, т. е. измерять как профили линий в каждой точке области, так и динамику целиком всей области. На БСВТ в 2002 г. был установлен интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) для регистрации со щели спектрографа монохроматических изображений в линии H α с одновременной регистрацией спектра. Первичное изображение Солнца диаметром 380 мм строится на входной щели спектрографа. Участок изображения Солнца направляется зеркальными щечками щели в оптическую систему, которая содержит перестраивающие объективы и ИПФ. Монохроматическое изображение Солнца в линии H α вместе с изображением входной щели строится на ПЗС-камере. Расположение установки с ИПФ приведено на рис. 2.

Получаемые изображения, с одной стороны, ускорили и сделали более качественной фиксацию положения солнечного объекта на щели, а с другой – открыли возможности для более успешного совмещения данных наблюдений, получаемых на БСВТ, с данными других инструментов, в том числе полученных с космических аппаратов.

На рис. 3 представлены два изображения вспышки 30 июля 2005 г., полученные в отраженном свете от зеркальной щели с интервалом 2 мин.

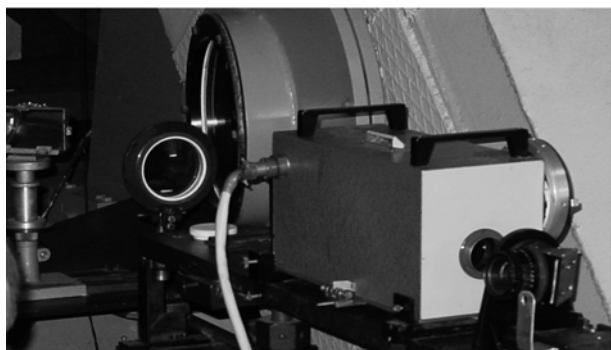


Рис. 2. ИПФ, установленный на оптической скамье.

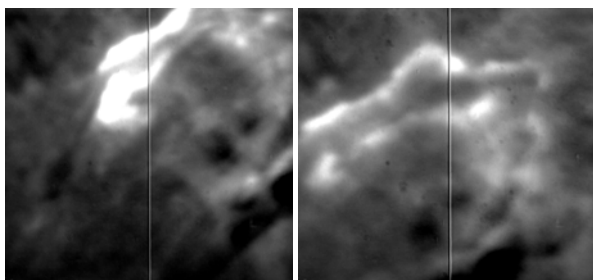


Рис. 3. Изображения в линии H α вспышки 30 июля 2005 г.

Модернизация телескопа

В наблюдениях с высоким пространственным и спектральным разрешением всегда ощущается недостаток фотонов. Первоначально наблюдения на БСВТ проводились фотографически с использованием фотопластинок. Из-за слабой освещенности спектра экспозиции составляли секунды. Большие экспозиции, как известно, ведут к замыыванию тонких деталей, что уменьшает возможность достижения высокого пространственного разрешения. Как и во всем астрономическом сообществе, на БСВТ со временем перешли к современным методам регистрации и обработки изображений с цифровыми двумерными приемниками. Использование ПЗС-камер, по крайней мере, на порядок величины уменьшило экспозицию.

С 1998 г. на БСВТ начались наблюдения с помощью матрицы CCD Princeton Instruments 512×512. Экспозиция при этом уменьшилась с $1\text{--}3$ до 0.1 с . Наряду с положительным эффектом, выявился и недостаток использования ПЗС-камеры. Матрица имеет окно размером $12 \times 12 \text{ мм}^2$, а поскольку двухфокусная схема спектрографа приводит к увеличению изображения, высота спектра на матрице не превышала $50''$ дуги. Это заставило нас поменять местами коллиматор и камерное зеркало, т. е. перейти от варианта работы на увеличение к варианту уменьшения изображения Солнца в камерной части. В этом случае высота спектра на матрице составляет $87''$. Даже при работе с поляризационной оптикой высота спектров в обыкновенном и необыкновенном лучах составляет $\sim 30''$.

В 2008 г. для спектрополяриметрических наблюдений была установлена CCD-камера FliGrab 2048×2048. Ее размер $D=8 \text{ см}$ позволил, наконец, использовать второе камерное зеркало для работы в двух спектральных областях и в двух разных порядках. В частности, выполнены одновременные наблюдения в линиях H α и NaI, H α и MgI, H α и H β . Таким образом, стало возможным одновременно получать четыре спектра: два спектра в двух разных порядках и длинах волн, каждый из которых при использовании поляризационной оптики разлагается на обыкновенный и необыкновенный лучи. На рис. 4, 5 показаны примеры таких спектров.

Параллельно с наблюдениями спектров при помощи матрицы FliGrab используется имеющаяся ранее матрица Princeton Instruments для регистрации

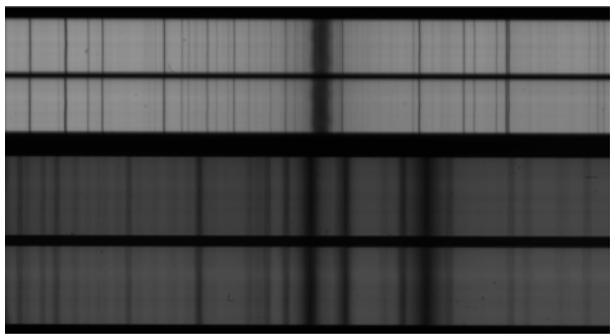


Рис. 4. Два верхних спектра в области $H\alpha$ (II порядок) и два нижних – в области $Mg\ I$ (II порядок), полученные одновременно 30 июня 2008 г.

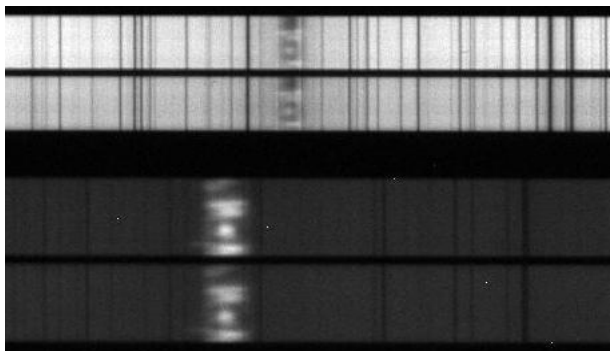


Рис. 5. Два верхних спектра в области $H\beta$ (III порядок) и два нижних – в области $H\alpha$ (II порядок), экспонированные одновременно за лимбом Солнца в протуберанце.

через ИПФ изображения Солнца в отраженном свете от щели спектрографа.

Для улучшения качества наблюдений были предприняты усилия, чтобы поднять на более высокий уровень возможности инструмента. Были проведены испытания нового электронного терморегулятора, с помощью которого можно не только выравнивать температуру центр–край вакуумного окна БСВТ, но и устанавливать заданный перепад температур для коррекции волнового фронта объектива.

Инструментальная поляризация

При исследовании поляризационных свойств солнечной плазмы источником существенных ошибок является инструментальная поляризация. Большинство больших наземных солнечных телескопов, как и БСВТ, используют питающую оптику с наклонными, зависящими от времени углами отражения, которые вносят зависящие от времени изменения инструментальной поляризации.

Прежде чем определять временные зависимости инструментальной поляризации, нужно получить поляризационную матрицу телескопа для определенного положения зеркала. Удобнее это сделать, когда создаваемая пучком света плоскость Солнце–зеркало–труба совпадает с вертикалью. В работе [9] часть поляризационной матрицы была получена. Для выполнения измерений поляризационных свойств крупногабаритной оптики БСВТ необходимы дихроический пленочный поляризатор и четвертьволновая фазовая пластинка, которые покрывали бы всю апертуру телескопа. Эту работу следует рассматривать только как методическую, поскольку она была неполной по

двум причинам. Во-первых, там не были представлены элементы четвертого столбца, вычисляемого по результатам вращения перед главным зеркалом фазовой $\lambda/4$ -пластинки, из-за отсутствия у нас этой пластинки. Во-вторых, поляризатор, который вращали перед главным зеркалом, имел диаметр 300 мм, т. е. также не покрывал все зеркало.

В настоящее время оптическая промышленность изготавливает пленочные поляризаторы размером не более 300 мм. Было принято решение вместо монолитного поляризатора разработать «матричный» поляризатор, состоящий из набора однородных прямоугольных поляризаторов. Этот поляризатор устанавливается перед следящим зеркалом телескопа. Пятнадцать поляризаторов, уложенные в прямоугольную матрицу, полностью перекрывают входную апертуру телескопа.

При измерениях наблюдатель поворачивает матрицу-поляризатор и снимает отсчеты по лимбу на кольце. Четвертьволновая фазовая пластинка необходима для определения всех коэффициентов матрицы телескопа. Она собирается из полос полипропиленовой пленки, отобранной по двойному преломлению из рулонного материала, и закрепляется в пальцах.

Методика измерений полной матрицы поляризации телескопа заключается в следующем. Перед главным зеркалом устанавливается крупногабаритный поляризатор, перекрывающий всю апертуру телескопа. При каждом положении поляроида экспонируются две полосы спектра, расщепленные призмой Волластона. В зависимости от того, какие элементы матрицы телескопа нужно было получить, экспонировался солнечный спектр при вращении либо поляризатора, либо матрицы через 45° . Само устройство показано на рис. 6.

Интенсивность каждой полосы спектра измеряется по области спектра, свободной от спектральных линий. Регистрация спектров в обыкновенном и необыкновенном лучах производится при положениях поляроида $0, 45, 90, 135^\circ$. В каждом положении поляроида регистрируются спектры для двух положений установленной перед щелью спектрографа фазовой пластинки $\lambda/2$ (0 и 22.5°) и одного положения пластинки $\lambda/4$ (45°). По измеренным таким образом 12 значениям интенсивностей спектров определяются

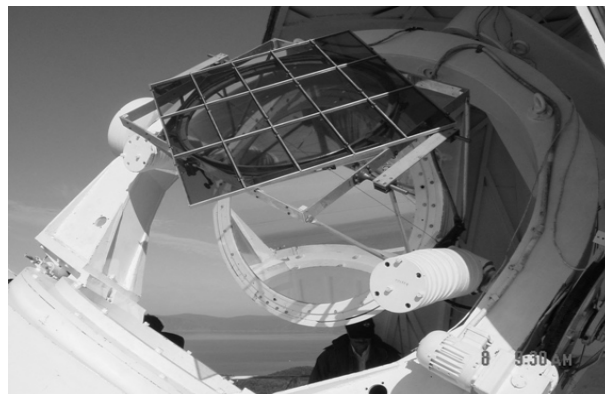


Рис. 6. Сидеростат с установленными перед ним крупногабаритными поляризатором и четвертьволновой пластиной.

12 элементов поляризационной матрицы телескопа, зависящих от линейной инструментальной поляризации.

Для определения элементов матрицы, влияющих на сигнал круговой поляризации, используют анализатор поляризации, состоящий из крупногабаритного поляризатора и четвертьволновой пластинки. Регистрацию спектров производят после поворота пластины с шагом 45° .

Наблюдения ударной поляризации во вспышках на БСВТ

Солнечные вспышки — это явление, охватывающее широкий диапазон электромагнитного спектра. Хотя на сегодняшний день вспышки представляются как высокоэнергетические процессы в короне, хромосферный отклик на перенос энергии во вспышку очень сложный, и энергия, излучаемая из нижней хромосферы, формирует существенную часть энергетического бюджета вспышки. Следовательно, нужно, чтобы хромосферные проявления и связанные с этим процессы были хорошо изучены.

Важной проблемой, связанной с возникновением солнечной вспышки, является изучение механизма нагрева хромосферы во время этого процесса, т. е. выяснение механизма передачи энергии в хромосферу из короны, где расположен источник энергии во время вспышки. Какую роль играют ускоренные частицы в хромосфере?

Исследование этого процесса наиболее эффективно и во всяком случае независимо можно проводить с использованием так называемой ударной линейной поляризации спектральных линий, вызванной бомбардировкой ускоренными энергичными частицами хромосферы во время вспышки. Спектрополяризметрические исследования водородной плазмы являются новым и весьма перспективным методом ее диагностики. Эта методика применялась для диагностики плазмы газового разряда, с недавнего времени она используется для диагностики водородной солнечной плазмы с целью объяснения механизмов возникновения хромосферных солнечных вспышек.

Такие исследования, кроме ИСЗФ, проводятся только на франко-итальянском телескопе THEMIS. В ИСЗФ имеется уникальная возможность исследования этого процесса благодаря БСВТ, обладающему высоким пространственным, временным и спектральным разрешением, разработанному в ИСЗФ спектрополяризметрическому методу и возможности одновременного получения фильтрограмм в линии $H\alpha$ и поляризационных спектрограмм.

На рис. 7 показаны спектрополярограммы двух вспышек, по которым проводились исследования ударной поляризации в солнечных вспышках.

При исследовании ударной линейной поляризации не происходит расщепления атомных уровней на подуровни, и, следовательно, не происходит расщепления спектральной линии на компоненты, как, например, при эффекте Зеемана. Ударная поляризация может быть обнаружена по различию центральных интенсивностей линии в ортогонально поляризованных полосках спектра. На рис. 8 показаны примеры положительного, отрицательного и нулевого значе-

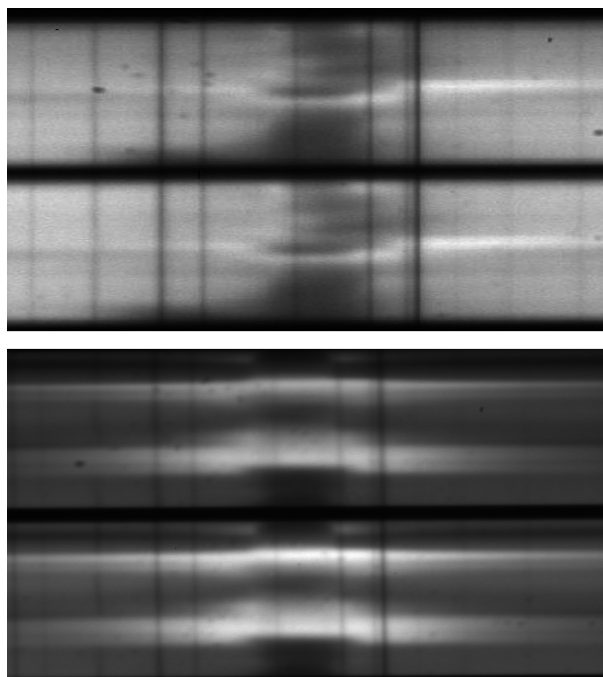


Рис. 7. Спектры двух солнечных вспышек в линии $H\alpha$, полученные в 2002 г.

ний параметра Стокса Q (нижняя часть рисунка). В верхней части рисунка дана интенсивность линии $H\alpha$ во время вспышки в обыкновенном (сплошная) и необыкновенном (штриховая линия) лучах.

На основе спектрополяризметрических наблюдений на БСВТ большого числа солнечных вспышек доказано существование ударной линейной поляризации во вспышках. Впервые обнаружена мелко-масштабная структура поляризации, свидетельствующая об изменении направления ударной линейной поляризации по пространству. Различие профилей параметров Стокса в разных участках вспышки позволяет оценить вид и энергию энергичных частиц, участвующих в нагреве хромосферы, а также в перспективе — глубину проникновения пучков частиц в хромосферные слои. Эти результаты свидетельствуют о существенной роли пучков энергичных частиц в нагреве хромосферы при бомбардировке ими солнечной атмосферы во время вспышки, что приводит к возникновению хромосферной вспышки. Следует отметить, что высокостепенное и временное разрешение наблюдательного материала, получаемого на БСВТ, важно при экспериментальном решении одной из центральных проблем солнечной физики — разогрева хромосферы во время солнечных вспышек.

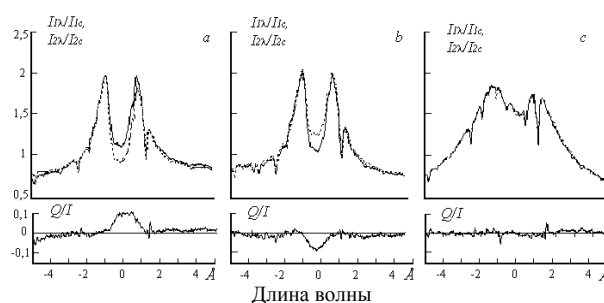


Рис. 8. Пример определения параметров Стокса из интенсивности линии $H\alpha$.

Заключение

Благодаря большим размерам реальное пространственное разрешение телескопа составляет $\approx 0.4''$ (теоретическое – $0.2''$), реальная разрешающая способность спектрографа в рабочих порядках – 200 000–600 000. На БСВТ проводятся спектральные, спектрополяриметрические, а также фильтровые наблюдения при регистрации изображения Солнца на зеркальной щели. Регистрация спектров и изображения Солнца через ИПФ производится с помощью двух ПЗС-камер.

Использование БСВТ для решения перспективных задач физики солнечной атмосферы тесно связано с улучшением техники наблюдений. В частности, совместно с сотрудниками Томского Института оптики атмосферы СО РАН на БСВТ проводятся работы по разработке адаптивной оптической системы регистрации спектров. В силу своей уникальности БСВТ является «полигоном» с точки зрения астроприборостроения. Так, на БСВТ исследуется роль нагрева оптических элементов под действием прямого солнечного пучка в процессе работы телескопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банин В.Г. Требования к современным солнечным наземным телескопам // Препринт 10–77. СибИЗМИР. Иркутск, 1977.
2. Банин В.Г. Солнечные телескопы // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1980. Вып. 52. С. 60–70.
3. Степанов В.Е., Банин В.Г., Круглов В.И. Экспериментальный макет Большого солнечного вакуумного телескопа (ЭМ БСВТ СибИЗМИР) // Новая техника в астрономии. 1979. Т. 6. С. 42–51.
4. Китов Ю.А., Григорьев В.М., Говорухин В.Я. Полярный сидеростат Большого солнечного вакуумного телескопа // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1980. Вып. 52. С. 76–81.
5. Домышев Г.Н., Клевцов Ю.А., Скоморовский В.И. и др. Изготовление и исследование объектива Большого Солнечного вакуумного телескопа // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1982. Вып. 60. Р. 212–231.
6. Skomorovsky V.I., Firstova N.M. The Large Solar Vacuum Telescope: The optical system and first result of observation // Solar Phys. 1996. V. 163. P. 9–22.
7. Фирстова Н.М. О выборе схемы спектрографа // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1980. Вып. 52. С. 122–127.
8. Фирстова Н.М., Губин А.В., Ланкевич Н.А. Спектрограф БСВТ: установка и исследование // Исследование по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1990. Вып. 91. С. 166–174.
9. Фирстова Н.М., Поляков В.И., Скоморовский В.И., Григорьев В.М. Исследование инструментальной линейной поляризации на БСВТ // Солнечно-земная физика. 2006. Вып. 9. С. 119–125.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск