

УДК 520.66; 520.44; 520.627

МНОГОМОДОВЫЙ ПАНОРАМНЫЙ ФОТОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2021 В. Л. Плохотниченко^{1*}, Г. М. Бескин^{1,2**}, В. Г. де-Бур³,
С. В. Карпов^{1,2,4***}, С. В. Моисеев¹, В. С. Шергин¹, Е. П. Городовой¹,
А. Г. Гутаев¹, А. В. Солин⁵, А. А. Солин⁵, З. В. Любецкая⁶, А. П. Любецкий⁶,
В. В. Павлова⁶, С. С. Моисеев⁷, Д. А. Бадьин^{8,9}, П. В. Плохотниченко¹⁰

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021 Россия

⁴ Институт физики Чешской академии наук, Прага, 18200 Республика Чехия

⁵ Институт ядерных проблем Беларускаго государственного университета, Минск, 220006 Республика Беларусь

⁶ ООО «Инженерное бюро «ЦЕВЛАП», Ростов-на-Дону, 344065 Россия

⁷ ИП Моисеев, Таганрог, 347900 Россия

⁸ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

⁹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, 127030 Россия

¹⁰ Сервисный центр Rus Lcd, Ростов-на-Дону, 344000 Россия

Поступила в редакцию 19 августа 2021 года; после доработки 5 октября 2021 года; принята к публикации 5 октября 2021 года

Описывается новый этап развития аппаратурно-программного комплекса эксперимента МАНИЯ для поиска и изучения переменности блеска астрофизических объектов с временным разрешением 10^{-6} с. В панорамном фотоспектрополяриметре используются дистанционно устанавливаемые оптические блоки — цветоделительные модули, позволяющие проводить наблюдения в пяти модах: максимально прозрачной, многополосной, фотополяриметрической, спектральной и спектрополяриметрической. Два фотоприемных устройства (ФПУ) на основе координатно-чувствительных детекторов (КЧД) с катодами S-20 и GaAs, с умножением фотоэлектронов микроканальными пластинами (МКП) и регистрацией коллекторами, имеющими от 4 до 16 элементов, а также EMCCD-камера позволяют регистрировать световые потоки от объектов и звезд сравнения в поле размером до $1'$ в нескольких цветовых полосах в спектральном режиме с низким разрешением и при этом измерять линейную поляризацию в трех параметрах Стокса. Система регистрации накапливает наблюдательные данные — потоки оцифрованных фотоотчетов от обоих ФПУ с временным разрешением $1\mu\text{с}$, а EMCCD камера — видеоряды с субсекундным разрешением синхронно с приемом на одном ФПУ квантов ультрафиолетового диапазона с микросекундным разрешением. Приводятся некоторые результаты исследований, полученные в наблюдениях на 6-м телескопе САО РАН.

Ключевые слова: *инструменты: детекторы, фотометры, поляриметры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения целого ряда астрофизических задач, к которым относятся изучение временной эволюции периодов вращения радиопульсаров, поиск

и исследование быстрых оптических транзиентов, поиск одиночных черных дыр, изучение быстрой переменности рентгеновских двойных и т.п., требуется применение методов высокого временного разрешения, позволяющих регистрировать отдельные фотоны и получать по потокам детектируемых квантов максимум спектральной, фотометрической

*E-mail: pv1@sao.ru

**E-mail: beskin@sao.ru

***E-mail: karpov@sao.ru

и поляризационной информации о наблюдаемых объектах.

На наш взгляд, по совокупности качеств наилучшим для поиска и исследования слабых объектов на коротких временах на протяжении последнего десятилетия является координатно-чувствительный детектор (КЧД, или PSD — Position Sensitive Detector) высокого временного разрешения. На основе КЧД в САО РАН были разработаны фотоприемные устройства (ФПУ) (Beskin et al. 2008; 1999, de-Bur et al. 2008a, de Bur et al. 2019, Debur et al. 2003; 2009, Plokhotnichenko et al. 1999; 2020b; 2018), позволяющие в памяти компьютера накапливать длительные непрерывные записи потоков фотонов с высоким временем разрешения прихода каждого фотона вместе с координатами его попадания в детекторы. Запись панорамно-временной информации о регистрируемых фотонах позволяет перенести акцент с разработки электронных средств анализа данных в виртуальную область, на создание программных средств, восполняющих недостающие функции наблюдательной аппаратуры, что может осуществляться более гибко, более рафинировано, в интерактивном режиме, когда требуется уточнять параметры обработки временных рядов по ранее проведенным итерациям. В тех случаях, когда приходится выбирать между высоким временным разрешением и чувствительностью, применяется быстрая EMCCD-камера^{1,2} с использованием наработанных в мировой практике средств анализа данных.

Чувствительные Si ФЭУ (Vocharov et al. 2017, Klemm et al. 2007) для решения наших задач не подходят. Это одноканальные приемники, которые, несмотря на большое количество первичных или физических пикселов, имеют высокий темновой шум, что ограничивает возможности изучения вариаций потоков света на уровне этого шума или более слабых. На их базе трудно построить многофункциональные приборы, сочетающие фотометрические, спектральные и поляризационные режимы наблюдений. По этим причинам совершенствование мультимодового панорамного фотоспектрополяриметра (Multi-mode Panoramic PhotoPolarimeter, MPPP) было продолжено. Оно заключалось в обеспечении возможности дистанционной работы с выбором оптимальных режимов и в расширении количества одновременно анализируемых пучков — цветовых и поляризационных — с применением двух ФПУ на основе КЧД для ультрафиолетово-синих и зелено-красных лучей, выдающих потоки отсчетов для общей системы

хронометрической регистрации. Была также установлена EMCCD-камера с *BVR*-фильтрами для наблюдений в фотополяриметрическом режиме на субсекундных временах. Прибор был оснащен специально разработанным средством дистанционной установки в коллимированном оптическом пучке выбранного цветоделительного модуля из заранее собранных стопкой в виде «этажерки» и перемещающихся как целое внутри «лифтовой шахты» MPPP. Были доработаны состав и конструкции самих оптических блоков в соответствии с уточненными требованиями к оптимизации проводимых наблюдений. Обеспечено получение потоков квантов от исследуемого объекта в четырех плоскостях поляризации с помощью двойной призмы Волластона (Oliva 1997) и вычисление на основе этих измерений трех параметров Стокса. Динамический диапазон прибора был расширен с целью исследования как слабых источников, так и чрезмерно ярких (для детекторов) с помощью следующих подходов:

- 1) для слабых эффектов максимальная чувствительность прибора достигается в «прозрачном» режиме с разделением пучков света дихроичного зеркала с помощью двух фотоприемных устройств — ФПУ — на *UB*- и *VR*-компоненты либо без применения фильтров, либо с использованием EMCCD-камеры как в фильтрах, так и без них;
- 2) для избыточно ярких (для детекторов) объектов увеличение допустимых интенсивностей принимаемых потоков квантов обеспечивается расширением площадей участков катодов КЧД, на которые они попадают, использованием поляризационной призмы, призмы Аббе или спектральной решетки, выбором ширины щели, а при необходимости ослабления потока квантов примерно до 1/30 применяются сетчатые шторки (дырчатые маски, экраны).

MPPP с адаптером светосилы, укорачивающим фокусное расстояние со 180 м до 24 м, и при использовании поворотного стола фирмы «STANDA»³ может устанавливаться во вторичном фокусе телескопа Н1.

2. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА

При создании MPPP были использованы некоторые узлы 6-канального фотометра (Neizvestnyj et al. 1997). Общий вид прибора приведен на рис. 1. Здесь и далее по тексту «синим» называем ФПУ, в котором установлен КЧД с катодом S20 для коротковолновой части световых потоков (de Bur

¹EMCCD camera, Princeton Instruments, MAX System, Version 1.A, March 10, (2005).

²<https://andor.oxinst.com/>

³http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=624

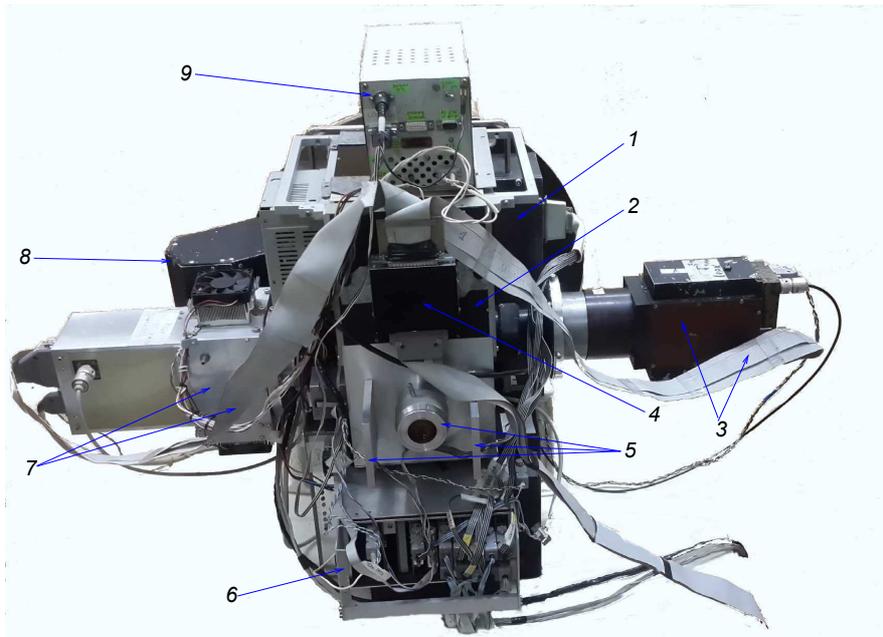


Рис. 1. Общий вид фотоспектрополяриметра с тыла: 1 — фокальная платформа с фланцем для установки на телескопе; 2 — функциональный блок; 3 — «синее» ФПУ и его информационный кабель; 4 — смеситель стохастических сигналов; 5 — объектив для EMCCD-камеры и стойки для ее монтажа; 6 — контроллер управления подвижными узлами MPPP; 7 — «красное» ФПУ и его информационный кабель; 8 — кожух, закрывающий TVCCD-камеру подсмotra; 9 — источник питания Пельтье-холодильника «красного» ФПУ с контроллером управления температурой.

et al. 2019, Debur et al. 2003, Plokhotnichenko et al. 2003), а «красным» — ФПУ, имеющее КЧД с GaAs-катодом для работы в длинноволновой части (Beskin et al. 2008, de-Bur et al. 2008a, Debur et al. 2009, Plokhotnichenko et al. 2020b; 2018).

В выбранной оптической схеме MPPP (рис. 2) цветные и спектральные пучки разводятся перпендикулярно направлению плоскости раскладки поляризованных пучков двойной призмой Волластона (Giro and Pernechele 2001, Oliva 1997). Движение щелевого узла, перископа и узла подсмotra выполняется в этой же плоскости.

Прибор состоит из двух составных компонентов, транспортируемых и устанавливаемых раздельно: фокальной платформы и функционального блока с перемещаемыми внутри оптически модулями и посадочными узлами для ФПУ и EMCCD-камеры. На фронтальной поверхности посадочного фланца закреплена не показанная на рис. 2 резьбовая втулка для установки адаптера светосилы, используемого при наблюдениях во вторичном фокусе БТА.

2.1. Фокальная платформа

Фокальная платформа служит для монтажа прибора на телескопе и крепления функционального блока (см. рис. 3). Она включает в себя:

- зеркально-щелевой узел для обеспечения совмещенных в одном приборе функций фотометрии и спектроскопии;
- подсмотр звездного поля, состоящий из объектива переброса и TVCCD-матрицы;
- коллимирующий объектив;
- устройство калибровки детекторов на плоское поле в $UBVR$ -полосах;
- перископ.

2.1.1. Зеркально-щелевой узел

Зеркально-щелевой узел изготовлен для реализации фотополариметрической и спектрополариметрической мод. Он обеспечивает переброс наблюдаемого поля в систему подсмotra для размещения изображения выбранного объекта в нужное место щели, отмечаемое на экране навигационной программы подсмotra, и после раскрытия щели объект оказывается на оси коллиматора. Кроме использования в спектральной моде в классическом варианте щелью можно ограничивать участок поля, содержащий наблюдаемый объект, для уменьшения общего фонового излучения неба и для исключения наложения фонов, прилегающих к изображениям звезды, при изучении поляризации. Щель ограничивается по длине шторкой с соответствующими прорезями, размещаемой в желобе между краями ее створок. Она видна на фоне ночного неба при достаточно длительной экспозиции, накапливаемой

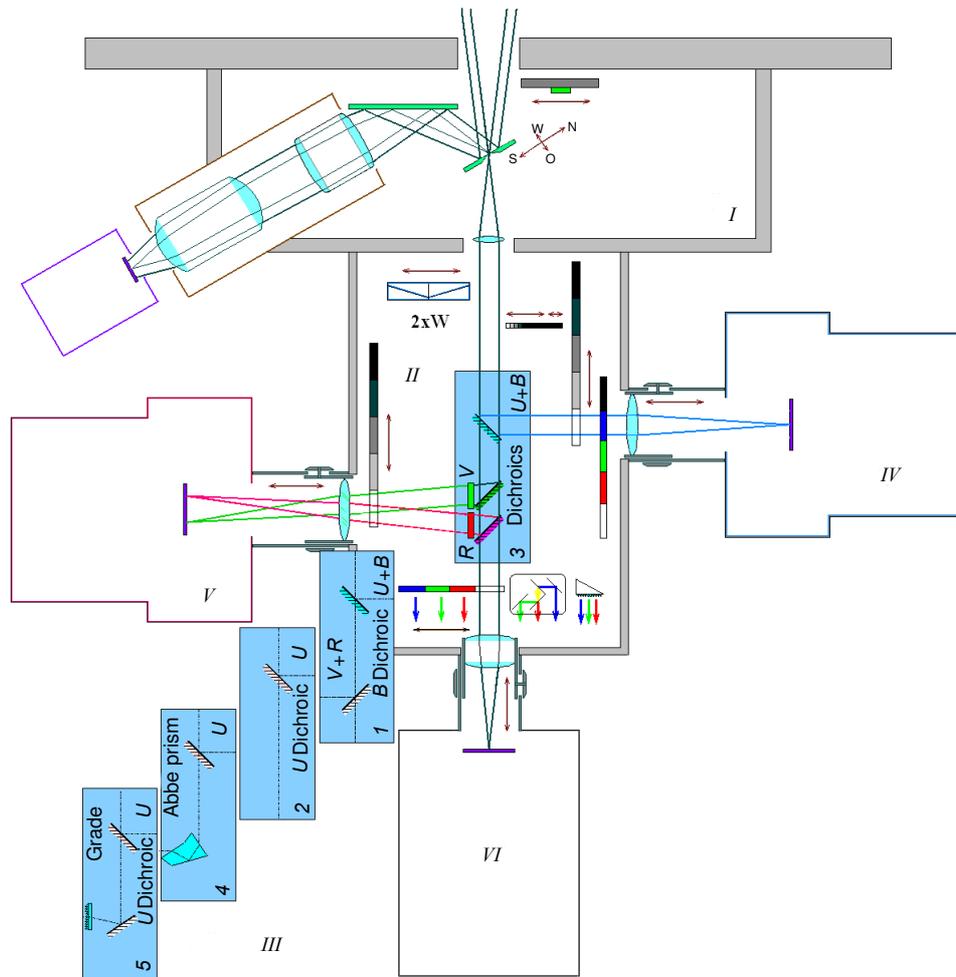


Рис. 2. Оптическая схема MPPP: *I* — фокальная платформа с зеркально-щелевым узлом и подсмотром рабочего поля, *II* — функциональный блок с «лифтовой шахтой», *III* — «этажерка» набора цветоделительных модулей, в которой *1* — «прозрачный модуль», *2* — модуль EMCCD-камеры, *3* — многополосный модуль (установлен в рабочем положении), *4* — спектральный модуль с призмой Аббе, *5* — спектральный модуль с дифракционной решеткой (см. раздел 2.2.2), *IV* — КЧД1, *V* — КЧД2, *VI* — EMCCD, *2xW* — двойная призма Волластона. В «лифтовой шахте» размещается узел фильтров для EMCCD-камеры.

на матрице камеры подсмотра (примерно 10 с), что облегчает наведение телескопа на объект.

Щель расположена под углом 30° к фокальной плоскости и раздвигается на ширину от 0 до 1.2 мм ($10''$ в масштабе первичного фокуса БТА). Имеет квадратное (в проекции на фокальную плоскость телескопа) окно 10×10 мм, где на кронштейне установлена ультрафиолетово-прозрачная линза поля ($D = 9$ мм, $F = 50$ мм, стекло ЛК-8) для работы в широком поле. При наблюдениях в поляризационной моде линза уводится в сторону, и щель вместе с находящейся за ней шторкой с прорезью шириной 1 мм образуют апертурную диафрагму высотой около $10''$ и шириной до величины максимального раздвижения створок $10''$. При некоторых других режимах работы оказывается полезной длинная щель, образованная створками на

всем диаметре захватываемого коллиматором поля. Установка любого из этих вариантов выполняется сдвигом щелевого узла вдоль направления щели в положения: *короткая щель*, *длинная щель* и *широкое поле* путем сдвига щелевого узла вдоль линии смыкания створок. Размер наблюдаемого поля с короткой щелью может достигать $10'' \times 10''$, при работе с длинной щелью — $10'' \times 40''$, а в широкопольном варианте — $60''$.

Зеркальные створки щелевого узла, позволяющие выполнять эти функции, по совету В. Л. Афанасьева изготовлены из рессорной стали, а ее отражающие поверхности алюминированы.

2.1.2. Подсмотр рабочего поля

Для обеспечения эффективной и безопасной для ФПУ работы в фотополяриметре имеется система

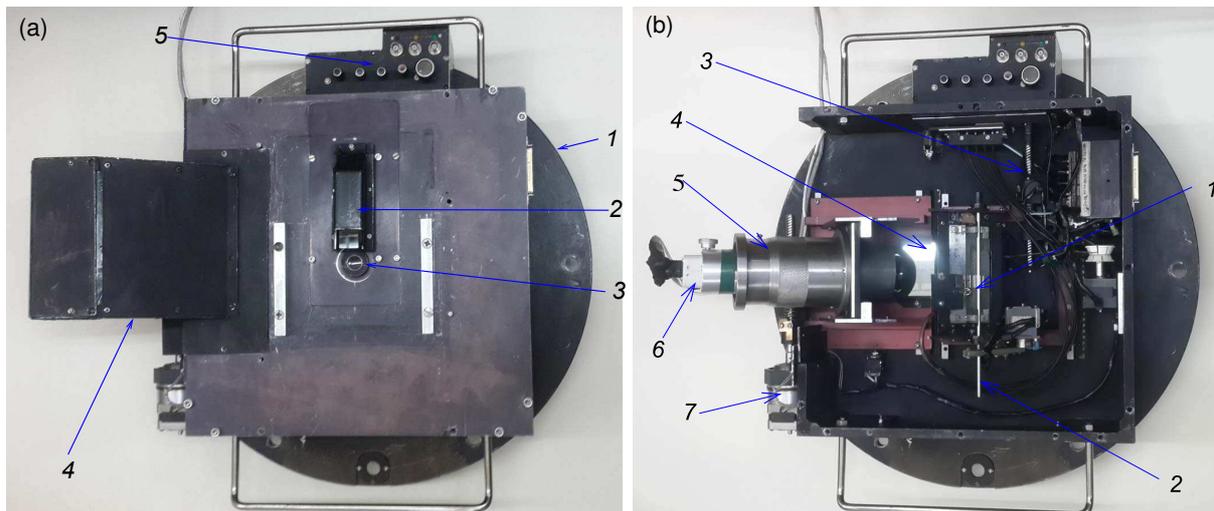


Рис. 3. (а) фокальная платформа с установленной задней стенкой и блоком перископа в ней: 1 — фланец; 2 — перископ; 3 — коллимирующий объектив; 4 — кожух камеры подсмотра рабочего поля; 5 — верньеры регулировки засветки «плоского поля». В таком виде платформа монтируется в фокусе телескопа, после чего на ней устанавливается «лифтовая шахта» с оптическими блоками. (б) фокальная платформа, вид изнутри: 1 — зеркально-щелевой узел с линзой поля; 2 — вал с лысками для раздвижения створок щели; 3 — привод перемещения узла; 4 — зеркало излома лучей подсмотра звездного поля; 5 — объектив подсмотра; 6 — TVCCD-камера подсмотра, двигатель привода подсмотра; 7 — двигатель перемещения узла подсмотра.

подсмотра рабочего (звездного) поля, позволяющая уточнять наведение оптической оси телескопа и узлов фотополяриметра на исследуемый объект, звезду сравнения и звезды гидирования. Объектив подсмотра укорачивает фокусное расстояние телескопа примерно в 2.5 раза для получения более оптимального размера изображений звезд на пикселях матрицы регистрирующей TVCCD-камеры (она относится к классу 1/3 дюйма). При этом апертура телескопа увеличивается до $V = 1.6$, и формируется рабочее поле зрения размером примерно $2'3 \times 3'5$ небесной сферы.

Камера подсмотра собрана в фирме VideoScan⁴ на основе TV CCD-матрицы Sony TC5101 формата 576×760 пикселей, обеспечивающей возможность управления длительностью экспозиции на матрице до 1000 с, а также допускающей установку уровня отсечки темнового тока и коэффициента усиления сигнала до его оцифровки граббером. Она позволяет достигать предельной (паспортной) чувствительности на уровне квантовой эффективности (до 30%). Подсмотр может перемещаться вдоль щели на расстояние до 40 мм ($7'$) от оптической оси, что в совокупности с тангенциальным движением поворотного стола телескопа обеспечивает возможность гидирования по удаленным от оси звездам. При использовании матрицы с быстрым считыванием предполагается получать временные ряды кадров от полей звезд сравнения

⁴www.videoscan.ru

и учитывать фотометрические особенности неба на субсекундных временах, а также выполнять микрогидирование (деконволюцию), синхронно компенсируя обнаруженные сдвиги гидировочной звезды в рабочих полях обоих ФПУ.

Для удобства наведения используется навигационная программа, накладывающая экваториальную координатную сетку на видимое в подсмотр поле.

2.1.3. Коллиматор

Коллиматором является просветленная двухлинзовая ультрафиолетово-прозрачная ахроматическая склейка $D = 15$ мм, $F = 50$ мм из стекол Ф-1 и ЛК-8. Он выполняет построение расходящегося после фокальной плоскости пучка света центрального объекта в параллельный, как того требуют используемые оптические схемы анализатора поляризации и цветоделительных модулей. Монтаж коллиматора допускает фокусировку и фронтальное перемещение для выбора наилучшей юстировки и положения на оптической оси. Рабочее поле размером $1'$ обеспечивается фокальной линзой поля, находящейся в зеркально-щелевом узле.

2.1.4. Калибровочное устройство

В ходе подготовки к наблюдениям необходимо проверять сохранность оптической конструкции и системы регистрации после транспортировки прибора и его установки на телескоп, а также проводить запись потоков квантов, имитирующих засветку от фона неба, так называемое «плоское»

поле. Для этого внутри фокальной платформы имеется откидывающаяся внутрь шторка, показанная в блоке 1 на рис. 2, закрывающая входное окно во время транспортировки и используемая при оперативном тестировании вне лаборатории. На ее тыльной стороне закреплен круглый белый экран, видимый со стороны коллиматора в таком же телесном угле, как и главное зеркало. При получении тестовых засветок экран освещается через жгут оптических волокон светодиодами, включаемыми дистанционно. С помощью этого калибровочного устройства можно формировать потоки фотонов, обеспечивающие в нужном цвете равномерную засветку всех чувствительных поверхностей детекторов или участков, ограниченных раскрытием щели и ее длины заслонкой с поперечной прорезью (см. подраздел 2.1.1), что позволяет вне лаборатории оценить по одной координате фокусировку звездобразных объектов. Эта шторка выполняет также предохранительные функции: благодаря возвратной пружине она закрывается при обесточивании прибора, при аномальном повышении скорости счета фотонов или при появлении другого сигнала тревоги, например, остановки телескопа во время экспозиции.

2.1.5. Перископ

Для обеспечения возможности калибровки по звезде сравнения в МРРР установлен перископ, позволяющий наводить дополнительный канал регистрации на удаленную от оси телескопа звезду и размещать получаемые изображения в заданных местах ФПУ и ЕМССD-камеры. Световой вход перископа может перемещаться радиально вдоль щели и тангенциально вместе с движением всего фотометра на поворотном столе телескопа, а выходящий пучок света проходит через установленные на оси оптические компоненты, за исключением анализатора поляризации, аналогично осевому пучку. Фотоны, получаемые от перископа, регистрируются в общем потоке данных и распознаются при обработке по их расположениям на детекторах.

На рис. 4 показана оптическая схема перископа, состоящего из призмной склейки с полным внутренним отражением на трех гранях, подвижного светоотвода, представляющего собой склейку призм полного внутреннего отражения на двух гранях с коллимирующим объективом на выходе, и клиноподобного компенсатора для установки положения луча. Коллиматор, используемый в светоотводе, идентичен осевому. При перемещении светоотвода вдоль щели усеченный конец конусообразной бленды (на рис. 4 не показан) утапливается в желобе между скошенными краями тыльной стороны створок, почти касаясь их поверхностей при движении. Бленда отсекает участок изображения размером примерно 2×1.1 мм ($18'' \times 10''$) в

фокальной плоскости телескопа. При наведении на звезду сравнения перископ перемещается в диапазоне $2' - 7'$ от оптической оси телескопа.

2.1.6. Работа фокальной платформы

При работе МРРР свет от звезды или другого источника и окружающей его области фокусируется телескопом в плоскости, проходящей через линию смыкания створок щели и перпендикулярной оптической оси прибора. Свет, отраженный от створок щели, отражается также от зеркала излома луча и проходит через объектив переброса изображения фокальной плоскости в TVCCD-камеру подсмотра поля. При разомкнутых створках щели или при сдвиге щелевого узла для установки на оптическую ось линзы поля центральная часть светового пучка попадает в коллиматор, сфокусированный на эту же плоскость, затем идет параллельным пучком в функциональный блок с оптическими модулями внутри и попадает на фотоприемные устройства и ЕМССD-камеру.

2.2. Функциональный блок

Функциональный блок представляет собой короб «лифтовой шахты» с профилированными направляющими для движения связки оптических цветоделительных модулей в виде «этажерки» (см. рис. 5), обеспечивая выбор режима наблюдений. По бокам короба установлены фокусирующие тубусы с фланцами для крепления ФПУ, содержащие коллективные объективы, описанные ниже в подразделе 2.2.3. На тыльной стороне короба установлены объектив для формирования изображений на матрице ЕМССD-камеры и стойки для ее крепления. Также на коробе закреплены дистанционно регулируемые источники питания обоих ФПУ, Пельтье-холодильника и контроллер управления кинематикой МРРР.

2.2.1. Поляризационный узел

Первым по ходу пучка в функциональном блоке размещен вводимый в него анализатор поляризации — комбинация сдвоенного оптического клина, разводящего пары поляризованных пучков, и двойной призмы Волластона за ним (см. рис. 2). Перед ними установлена шторка затвора с перфорированным краем для возможности постепенного открытия пучков и оперативного контроля интенсивности потока.

Поляризация измеряется в параллельном осевом пучке вводимой в него сдвоенной призмой Волластона (Oliva 1997), в которой одна половина площади сечения пучка проходит через один линейный поляризатор, а вторая — через другой, и таким образом осуществляется одновременное измерение поляризации в плоскостях 0° , -90° , -45° , -135° .

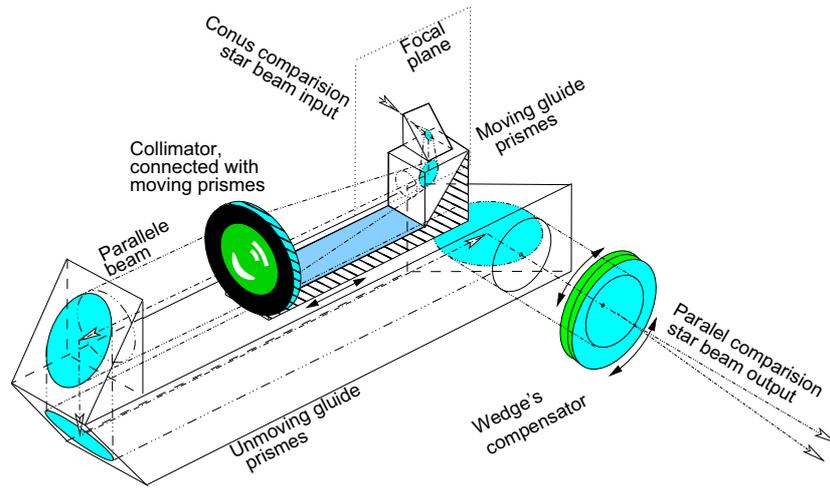


Рис. 4. Оптическая схема перископа.

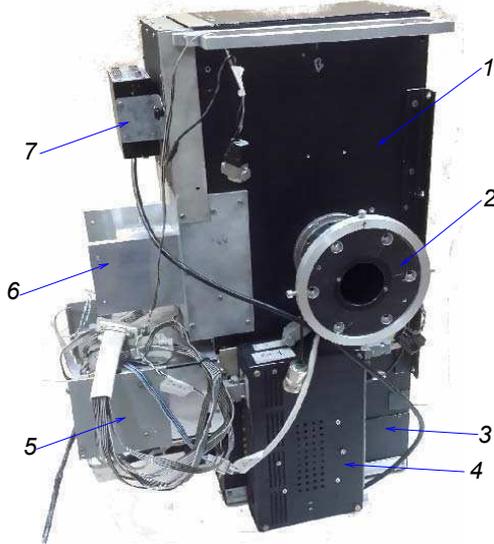


Рис. 5. Вид функционального блока со стороны «синего» канала: 1 — корпус; 2 — фланец для установки ФПУ с S20-КЧД; 3 — вспомогательный отсек узла коммутации сигнальных проводов и размещения оптических элементов для автономного тестирования прибора; 4 — источник питания S20-КЧД; 5 — контроллер кинематики узлов; 6 — место установки EMCCD-камеры; 7 — смеситель стохастических сигналов.

Эта призма разводит поляризованные пучки перпендикулярно вертикальной плоскости, содержащей оси камер, и обеспечивает размещение на детекторах поляризованных линеек спектров или изображений в цветowych полосах с интервалом 10". Деление пучка границей склейки призм на два компонента и пропускание их через обе призмы позволяет выполнять измерение трёх параметров Стокса одновременно.

Математическое описание значений норми-

рованных параметров Стокса, вычисляемых по потокам квантов, регистрируемых фотометрополяриметром от исследуемых объектов, можно выразить следующими формулами (Shurkliff 1962):

$$\begin{aligned}
 I &= E(0^\circ) + E(90^\circ), \\
 Q &= E(0^\circ) - E(90^\circ), \\
 I' &= E(45^\circ) + E(135^\circ), \\
 U &= E(45^\circ) - E(135^\circ),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $E(0^\circ)$, $E(90^\circ)$ — интенсивности потоков квантов от исследуемого объекта, зарегистрированных в двух взаимно перпендикулярных направлениях вектора поляризации одного из лучей анализатора, $E(45^\circ)$, $E(135^\circ)$ — такие же интенсивности, измеренные во втором луче. Общую интенсивность потока регистрации квантов можно рассматривать как $I_\Sigma = I + I'$.

Принцип одновременного определения трех параметров Стокса с делением интегрального потока на две части используется в поляриметре (Giro and Pernicelli 2001), построенном на такой двойной призме Волластона, откуда была заимствована эта идея.

На рис. 6 показаны фактические углы плоскостей поляризации для пучков от радиолюминисцентного излучателя (РЛИ) с различными длинами волн, обеспечиваемые этой призмой. Фактические значения углов в МРРР составляют $45^\circ 34'$, $133^\circ 86'$, $88^\circ 45'$ и $0^\circ 53'$.

2.2.2. Блок цветоделителей

После узла поляризации коллимированный пучок излучения или его четыре поляризационные компоненты проходят через один из сменных цветоделительных модулей, по которым свет направляется в сторону «синего» и «красного» ФПУ или

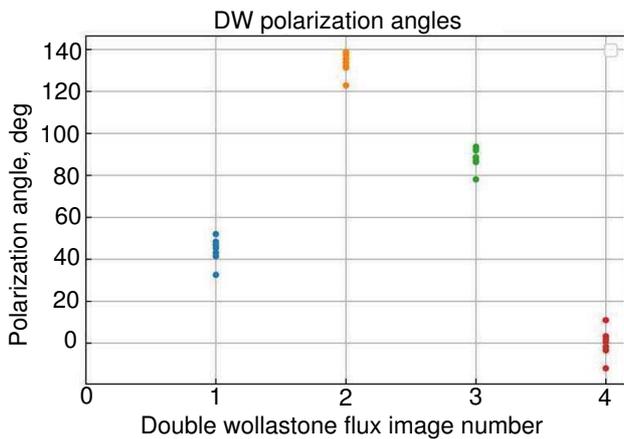


Рис. 6. Углы плоскостей поляризации. По вертикалям показаны разбросы величин углов для разных длин волн, излучаемых РЛИ, имеющимся в лабораторной турели.

с отводом ультрафиолетовой компоненты на «синее» ФПУ идет вдоль оптической оси прибора на ЕМСССД-камеру, проходя блок фильтров по пути. Выбранная оптическая схема позволяет разносить пучки по поляризации перпендикулярно цветовым полосам или дисперсиям спектров.

Цветоделительные модули собраны единым блоком в виде «этажерки» (рис. 7) с упорными подшипниками для движения между профилированными направляющими. Положением блока можно управлять дистанционно для установки на оптической оси прибора одного из пяти модулей, среди которых:

- 1) «прозрачный» модуль, обеспечивающий двухполосовый режим с делением светового потока дихроичным зеркалом на UB - и VR -компоненты на границе 5200 \AA , поступающие на соответствующие им «синее» и «красное» ФПУ;
- 2) модуль ЕМСССД-камеры, который отражает U -полосу на границе 3600 \AA дихроичным зеркалом для регистрации потока фотонов «синим» ФПУ, а проходящий свет может корректироваться набором фильтров и записывается в виде временного ряда из последовательности кадров с временным разрешением до 0.1 с в ЕМСССД-камере;
- 3) многополосный модуль, направляющий полосы U и B (короче 5200 \AA) на «синее» ФПУ, а полосы V и R — на «красное». Отраженный синий пучок далее может попадать на «синее» ФПУ без дополнительной фильтрации или же доформировываться фильтрами U или B . Далее длинноволновый пучок попадает на «красное» ФПУ, проходя через второе дихроичное зеркало, отражающее излучение короче

6000 \AA , а еще более длинноволновое излучение отражается от сплошного зеркала. В этих пучках цветовые полосы дополнительно формируются стеклянными $UBVR$ -фильтрами, рассчитанными С. И. Неизвестным на базе цветных оптических стекол (ГОСТ 9411-74) (Plokhotnichenko et al. 2009a);

- 4) спектральный модуль с призмой Аббе, в котором U -полоса на границе 3600 \AA отражается на «синее» ФПУ, а из прошедшего потока формируется спектр длиной 5 мм в диапазоне $4000\text{--}8000 \text{ \AA}$ (при ширине щели диагонального зеркала 0.1 мм реализуется спектральное разрешение примерно 240 \AA/элемент), который проецируется на «красное» ФПУ;
- 5) спектральный модуль, в котором UB -полосы выделяются на границе 5000 \AA B -дихроичным зеркалом и отводятся в «синий» канал, а прозрачная решетка (300 штрихов/мм) формирует спектр длиной около 20 мм в диапазоне $5000\text{--}8000 \text{ \AA}$ (при минимальной ширине щели 0.1 мм разрешение 60 \AA/элемент) на «красном» ФПУ.

В модуль № 2 предполагается добавить призму и блок дихроичных зеркал, места для которых обозначены на рис. 2 вблизи тубуса ЕМСССД-камеры в едином подвижном узле с фильтрами.

Тестовые изображения точечного источника представлены на рис. 8.

Предусмотрена установка ЕМСССД-камеры на место любого из ФПУ с соответствующей заменой объективов. В этой конфигурации проводились наблюдения переменности поляризованного излучения блазара 0716+714 в оптическом диапазоне (Vuchkova et al. 2020).

При использовании МРРР в фокусе Н1 БТА применяется редуктор светосилы, укорачивающий фокусное расстояние телескопа со 180 м до 24 м и монтируемый в резьбовом гнезде на наружной поверхности фланца фокальной платформы.

2.2.3. Рабочие камеры

Для каждого из получаемых пучков в МРРР имеются рабочие камеры, в которых установлены объективы (см. рис. 9), строящие из коллимированных пучков на обоих ФПУ и ЕМСССД разложенные по поляризациям изображения наблюдаемого объекта и звезды сравнения в различных фотометрических полосах, а на «красном» ФПУ — низкодисперсные изображения их спектров. Этими объективами являются простые двояковыпуклые линзы ($D = 50 \text{ мм}$, $F = 100 \text{ мм}$), рассчитанные на минимизацию искажений при фокусировке параллельных пучков. Для «синего» КЧД используется



Рис. 7. «Этажерка» с цветоделительными модулями. Слева вид со стороны «синего» канала. Модули снизу вверх: «прозрачный», EMCCD-камера, фотометрический, призма Аббе, спектральная решетка. Справа — со стороны «красного».

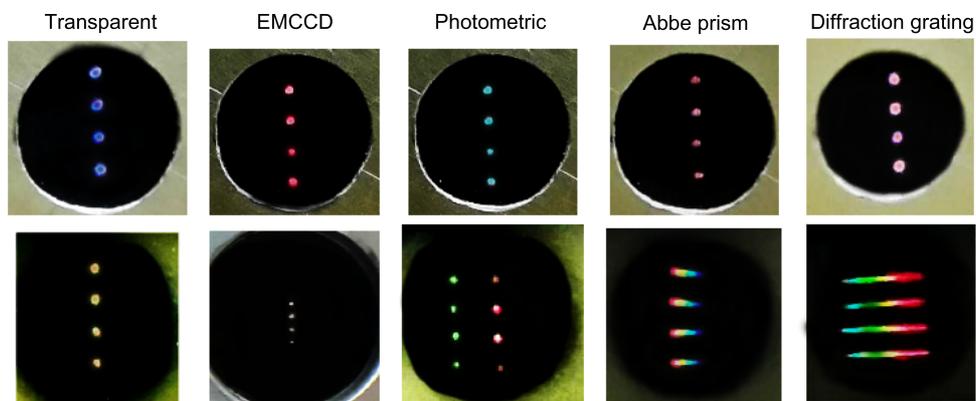


Рис. 8. Изображения поляризованных пучков на матовых стеклах, установленных в тубусах посадочных фланцев. Верхний ряд — потоки, идущие в «синий» канал, нижний — в «красный». Во второй колонке изображение пучков в U -полосе для «синего» КЧД и в оставшемся интегральном свете для EMCCD.

линза из стекла ЛК-8, прозрачная в ближнем ультрафиолете. Приемлемое качество изображения на КЧД обеспечивается тем, что пучки света, формирующие эти изображения, имеют схождения крайних лучей ко вторичному фокусу, соответствующему числовой апертуре $A = 1/8$, в которой простая

линза работает удовлетворительно. Хроматическая aberrация уменьшена разделением по цвету световых пучков, идущих в разные камеры. Масштаб изображения первичного фокуса на катодах КЧД увеличен в два раза по сравнению с изображением в первичном фокусе телескопа с целью уменьшения

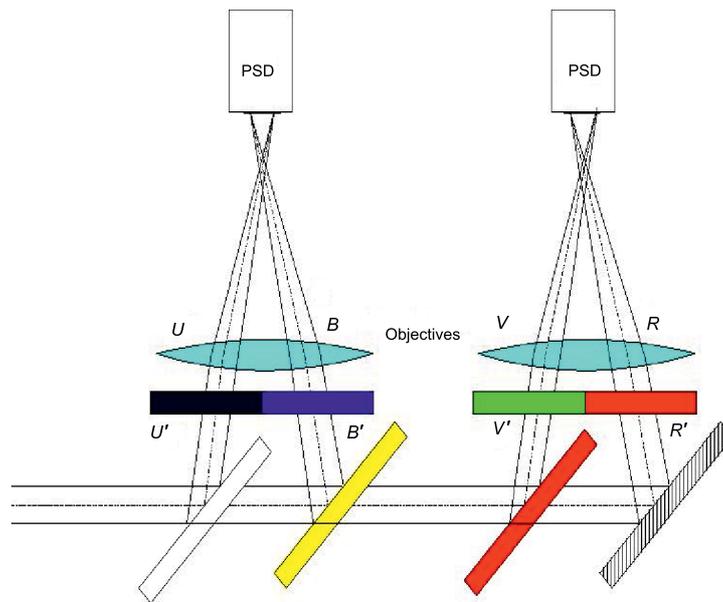


Рис. 9. Объективы в многолучевой схеме МРРР: каждый объектив используется для формирования на фотокатоде изображений объектов в двух спектральных диапазонах.

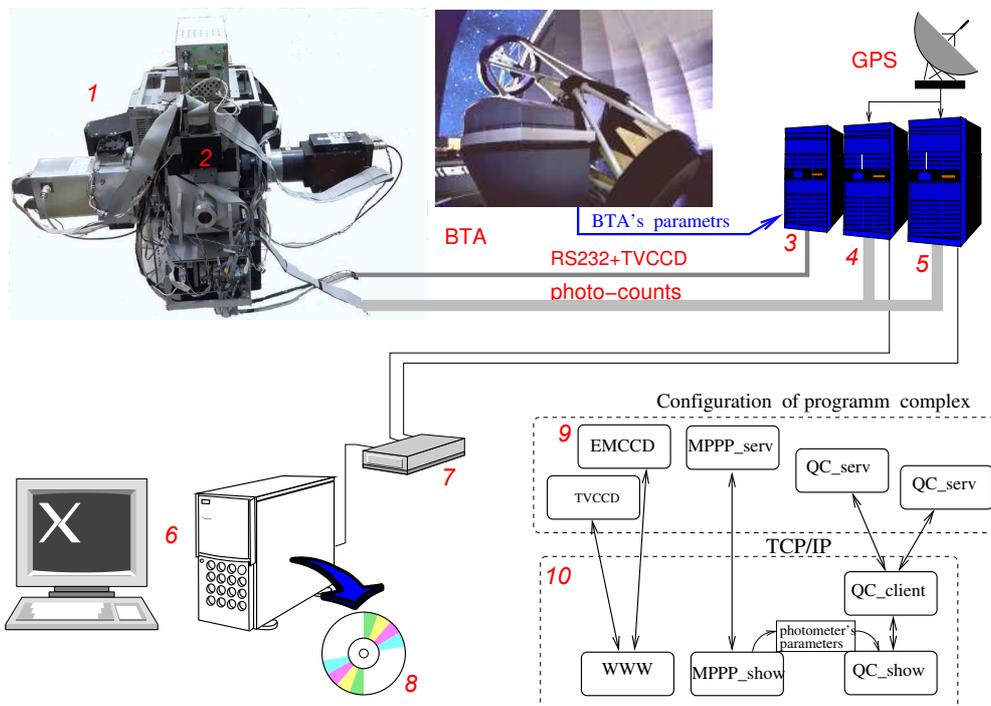


Рис. 10. Схема наблюдательного комплекса: 1 — многомодовый панорамный фотоспектрополяриметр (МРРР); 2 — мультиплексор потока данных, передающий в одном потоке отсчеты двух детекторов; 3 — компьютер TV-подзора и управления кинематикой; 4, 5 — компьютеры системы сбора данных на основе «Квантохронов 4-48»; 6 — компьютер управления; 7 — сетевой переключатель выделенной линии; 8 — накопленные данные; 9 — компоненты аппаратных компьютеров; 10 — программные модули интерфейсных компьютеров, на которых производится и накопление данных.

плотности нагрузки МКП потоками эмитированных электронов.

Для EMCCD-камеры используется кинопроекторный объектив PO-109, ($D = 45$ мм,

$F = 50$ мм). Масштаб изображения на матрице EMCCD-камеры совпадает с таковым в первичном фокусе телескопа, и тем самым в отсчетах пикселей с изображением безлунного неба, регистрируемого

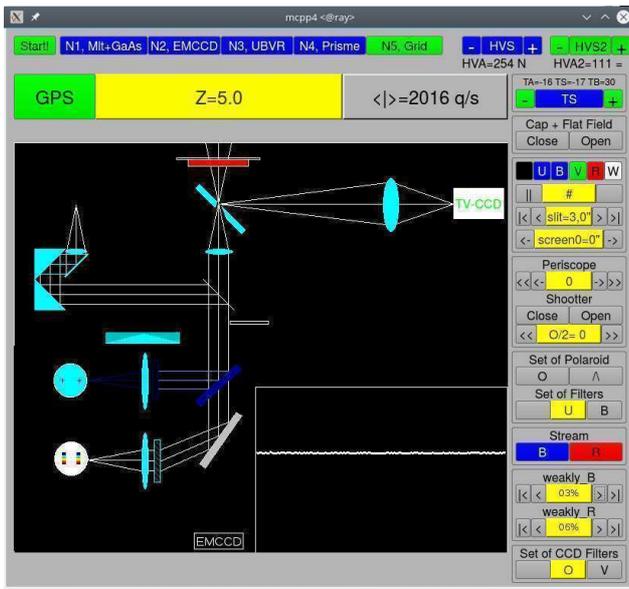


Рис. 11. Вид экрана программы управления во время тестовых работ. Оптическая схема изображается в соответствии с реально установленным цветоделительным модулем. Показан режим работы с решеткой и потоком от источника тестовых засветок. Установлен блок (с дифракционной решеткой), и в пучок, ответвляемый на «синий» КЧД дихроичным зеркалом U , введен фильтр U . Перископ находится в парковом положении. Крышка прибора закрыта. Включена красная тестовая подсветка диска, расположенного на ней. GPS-сервер времени подключен. Телескоп в положении, близком к зениту, $Z = 5^\circ 0'$. Поток (I) = 2016 отсчетов/с. Включено высокое напряжение «красного» КЧД. Его реальная температура в текущую секунду -16°C , заданная -17°C , температура вблизи прибора 30°C . Пельтье-холодильник включен на охлаждение. Щелевой узел установлен в положение «ЩЕЛЬ», раскрытие створок $3''$, затвор открыт, поляриод убран. Установлены пропускания шторок: 3% для «синего» и 6% для «красного» каналов. Канал для EMCCD-камеры неактивен, фильтр в нем убран.

на БТА в интегральном свете при длительностях кадров 0.1 с, обеспечен уровень, примерно равный шуму считывания. Отсюда следует, что 0.1 с — это минимальная экспозиция, при которой с EMCCD-камерой еще могут наблюдаться слабые точечные объекты.

В корпусе «лифтовой шахты» в параллельных пучках перед объективами рабочих камер установлены ослабители света в виде металлических шторок с семью встроенными квадратными окнами со стороной 50 мм. Первое и последнее окно являются полностью закрытым и открытым соответственно, остальные пять представляют собой диафрагмы, состоящие из равномерно расположенных отверстий диаметрами 0.5, 0.7, 1.0, 1.4, 2.0 мм. В конечном итоге шторки обеспечивают набор пропусканий (при их смещениях на 50 мм) 0%, 3%,

6%, 12%, 25%, 50% или 100%. Они используются при выборе режимов работы каналов во избежание перегрузки детекторов.

В пучок «синего» ФПУ можно вводить фильтры U или V или оставлять его открытым.

2.3. Фотоприемные устройства

В качестве приемников света в MPPP используются координатно-чувствительные детекторы на основе фотоэлектронных умножителей ФЭУ, с катодами S20 и GaAs и микроканальных пластин (МКП) с квадрантными (см. (de Bur et al. 2019, Debur et al. 2003, Plokhotnichenko et al. 2003)) и 16-анодными коллекторами (Beskin et al. 2008, de-Bur et al. 2008a, Debur et al. 2009, Plokhotnichenko et al. 2020b; 2018), созданные в САО РАН. Для работы на субсекундных временах в качестве детектора используется камера Neo CMOS компании Andor⁵ с размером поля 16.6×14 мм, скоростью считывания до 10 кадров/с и шумом считывания $1.4 e^-$ при размере пикселя 6.5 микрон. Объединение пикселей в группы, применение так называемого биннинга в самой камере позволяет улучшить соответствие пространственного разрешения матрицы размеру изображений звезд в рабочем поле и тем самым поднять соотношение S/N считывания. Наблюдательные данные — потоки фотоотсчетов, оцифрованные с помощью хронометрического граббера стохастических отсчетов, построенного на базе двух устройств «Квантохрон 4-48» (Plokhotnichenko et al. 2009b), записываются в долговременной памяти системы регистрации.

3. СТРУКТУРА НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Наблюдательный комплекс MPPP состоит из двух компонентов: собственно фотополариметра и компьютерного блока с программным обеспечением, которое, в свою очередь, включает аппаратные и интерфейсные программы, работающие на семи компьютерах.

- Аппаратные компьютеры управляют исполнительными узлами MPPP и принимают информацию от ФПУ (компьютеры 3, 4, 5) в блоке 9 на схеме конфигурации на рис. 10. К ним же относятся и компьютеры, получающие кадры от TVCCD- и EMCCD-камер.
- Интерфейсные компьютеры используются для управления работой с помощью графических средств. Они по локальной сети принимают от аппаратных компьютеров полученную ими техническую информацию, видеоряды с

⁵<https://andor.oxinst.com/>

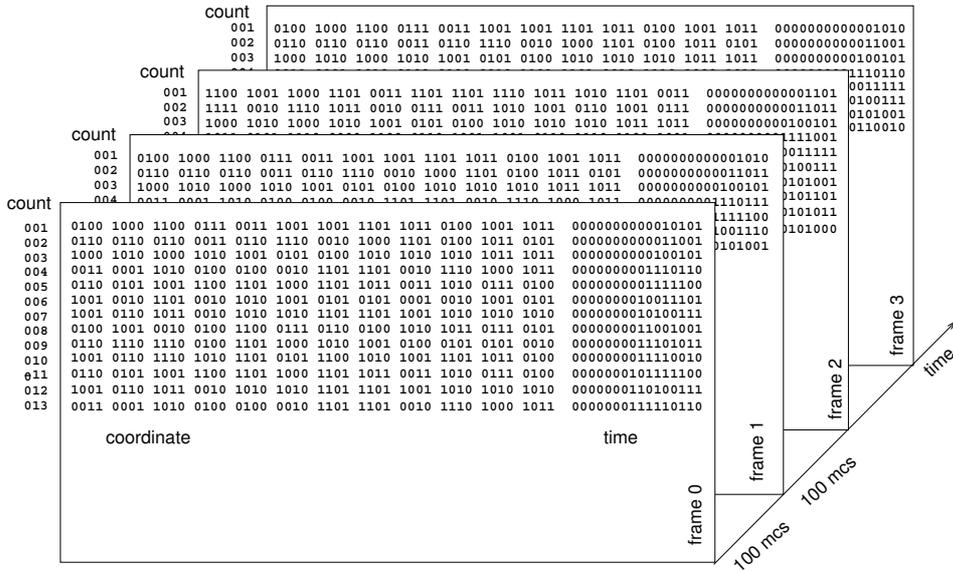


Рис. 12. Образец принимаемых данных — фотонные листы.

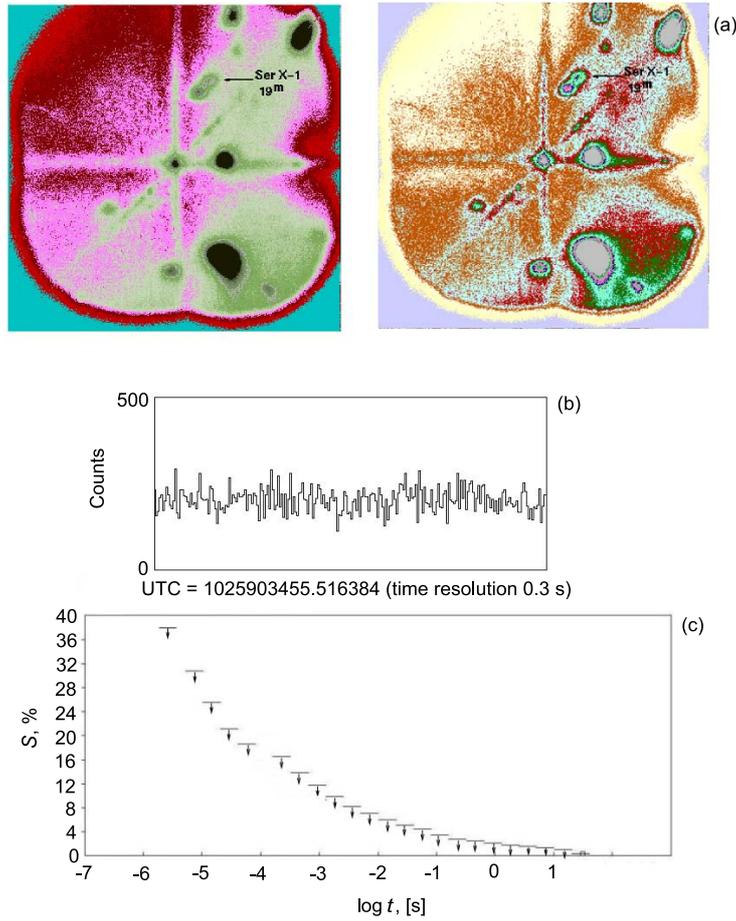


Рис. 13. (а) результаты синхронных с рентгеновскими оптических наблюдений Ser X-1. Фрагмент кривой блеска источника с секундным разрешением (б) и верхние пределы на мощность переменной компоненты излучения при времени накопления 3 минуты (с).

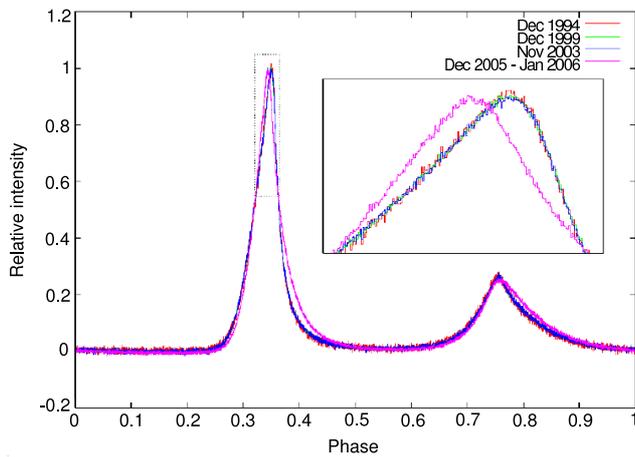


Рис. 14. Изменение формы главного импульса пульсара в Крабовидной Туманности (PSR B0531+21). Вверху — сфазированные кривые блеска по данным 1994, 1999, 2003 и 2005–2006 годов, приведенные к одинаковой амплитуде пульсов.

ССD-камер и потоки фотоотсчетов от ФПУ, выдают на экраны компьютеров изображение оптической схемы вместе с интерфейсами управления ею, изображения рабочих полей, а также вспомогательные графики, показывающие процесс накопления и некоторые статистические характеристики накопленных потоков. Управление МРРР и накопление данных обеспечиваются одним компьютером, Web-интерфейс — другим. Они относятся к блоку 10 на схеме конфигурации.

Схема связей между вышеперечисленными семью компьютерами приведена на рис. 10. Не показаны автономные компьютеры для работы с матрицами.

Компьютеры находятся в локальной сети САО РАН. Кроме того, компьютеры 4, 5, 6 дополнительно включены и в образованную сетевым коммутатором 7 собственную сеть, в которой передаются большие объемы данных без выхода в общий трафик.

Программные компоненты расположены в компьютерах в двух местах: одно находится непосредственно около точки сбора информации в фокусе телескопа, второе может быть на большом удалении в пределах локальной сети. Связь между ними осуществляется с помощью интерфейса транспортного уровня TCP IP (Transport Control Protocol) (Chan 1997). При этом серверными назначены процессы, работающие на компьютерах, взаимодействующих с аппаратурой, а клиентскими — на машинах управления и сбора данных, имеющих графические интерфейсы наблюдателя. Все серверные машины подключены своими удаленными терминалами к машинам наблюдателя для

запуска необходимых процессов и получения технической информации о них.

Серверный компьютер МРРР каждую секунду опрашивает счетчик фотоотсчетов от ФПУ, интерфейс сервис системы управления на предмет состояния телескопа, подключение GPS-сервера времени, а также уровни высоких напряжений для ФПУ. Этот же компьютер поддерживает температуру в ФПУ GaAs КЧД вблизи заданной. Получаемая информация записывается в журнал работы МРРР. Кроме того, он выполняет контрольные функции: если телескоп вошел в «мертвую» зону вблизи зенита, то закрывается затвор МРРР. При повышении скорости поступления фотоотсчетов до опасного уровня снимаются высокие напряжения с ФПУ.

Для управления TVCCD-матрицей и EMCCD-камерой используются web-браузеры.

Движением всех исполнительных механизмов и состоянием электронных устройств наблюдатель управляет только дистанционно — командами, передаваемым через блок управления с помощью графического интерфейса (см. рис. 11). Ручная установка узлов не предусмотрена.

В процессе наблюдений мультиплексированный поток оцифрованных координатных фотоотсчетов от обоих ФПУ секундными фреймами принимается в режиме «flip-flop» двумя идентичными компьютерами с установленными в их PCI-шинах платами скоростной хронометрии и регистрации многомерных стохастических процессов «Квантохрон 4-48» (Plokhotnichenko et al. 2009b), которые встраивают их в равномерную последовательность кодов синхрометок Мирового времени, получаемых от GPS-сервера с частотой 10 КГц. К каждому фотоотсчету добавляется нониусный отсчет времени его получения, измеренного от (после) ближайшего синхроимпульса с дискретностью 30 нс. Эта смесь потоков цифровых кодов накапливается в интерфейсном компьютере и непрерывными рядами записывается в долговременной памяти на протяжении сколь угодно длительных экспозиций, ограниченных только емкостью дисковых накопителей в компьютере, в виде так называемых фотонных листов (см. рис. 12), позволяющих проводить предельно полный анализ данных после проведения наблюдений.

Для привязки к Мировому времени используются синхроимпульсы PPS (1 Гц) и 10 кГц от GPS-сервера времени. В момент наблюдений его антенна устанавливается всегда над кабиной первичного фокуса БТА независимо от местоположения МРРР. Размещение под куполом телескопа предохраняет ее от повреждений во время грозы. Точность привязки, обеспечиваемая сервером времени, равна 100 нс, дискретность нониусных отсчетов 30 нс.

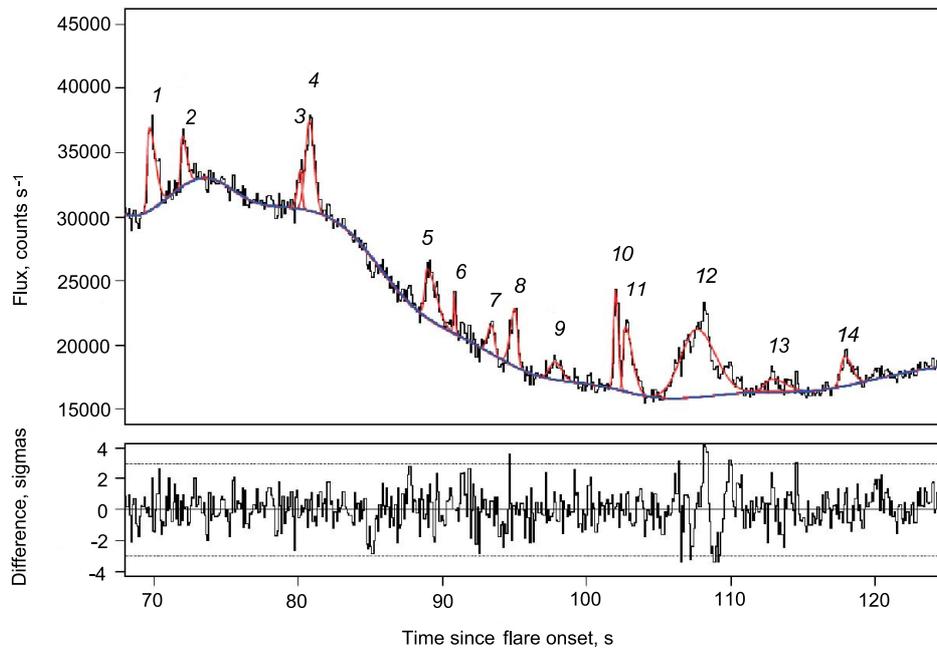


Рис. 15. Фрагмент кривой блеска гигантской вспышки с субсекундными спайками (помечены номерами).

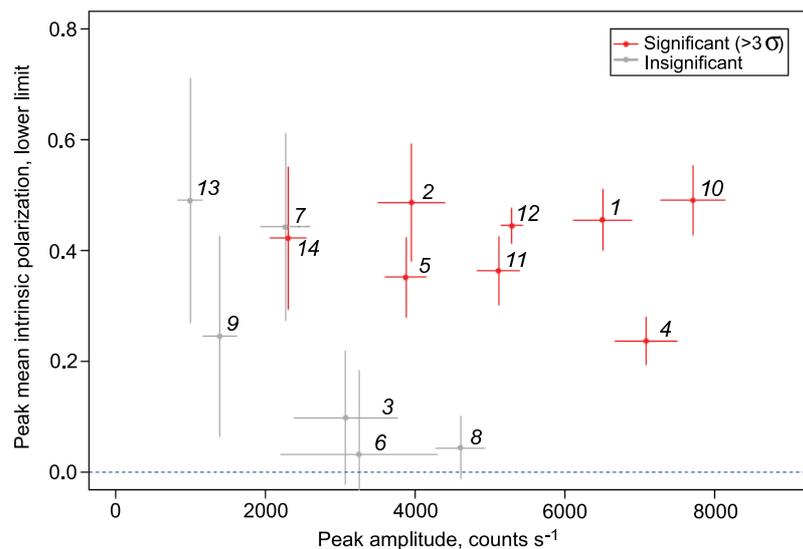


Рис. 16. Нижние пределы степени линейной поляризации спайков.

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдательные данные сохраняются в форматах, соответствующих типам кодов, выдаваемых каждым ФПУ. Они распознаются при обработке и при формировании фотонных листов наблюдательных данных, доступных различным программам обработки, а также передаваемых внешним заявителям. Фотонный лист представляет собой отсчеты времени регистрации квантов и их координаты, как показано на рис. 12.

Использование фотонного листа, хранящего ин-

формацию о всех зарегистрированных фотонах с их пространственными, энергетическими и поляризационными характеристиками, дает возможность проводить стандартные процедуры анализа астрономических изображений (фотометрию и астрометрию) и изучать последовательности моментов регистрации фотонов. Анализируя распределение интервалов между квантами, можно искать переменную компоненту излучения на микросекундных временах (Plokhotnichenko 1983; 2020). В настоящее время в САО РАН фотонные листы анали-

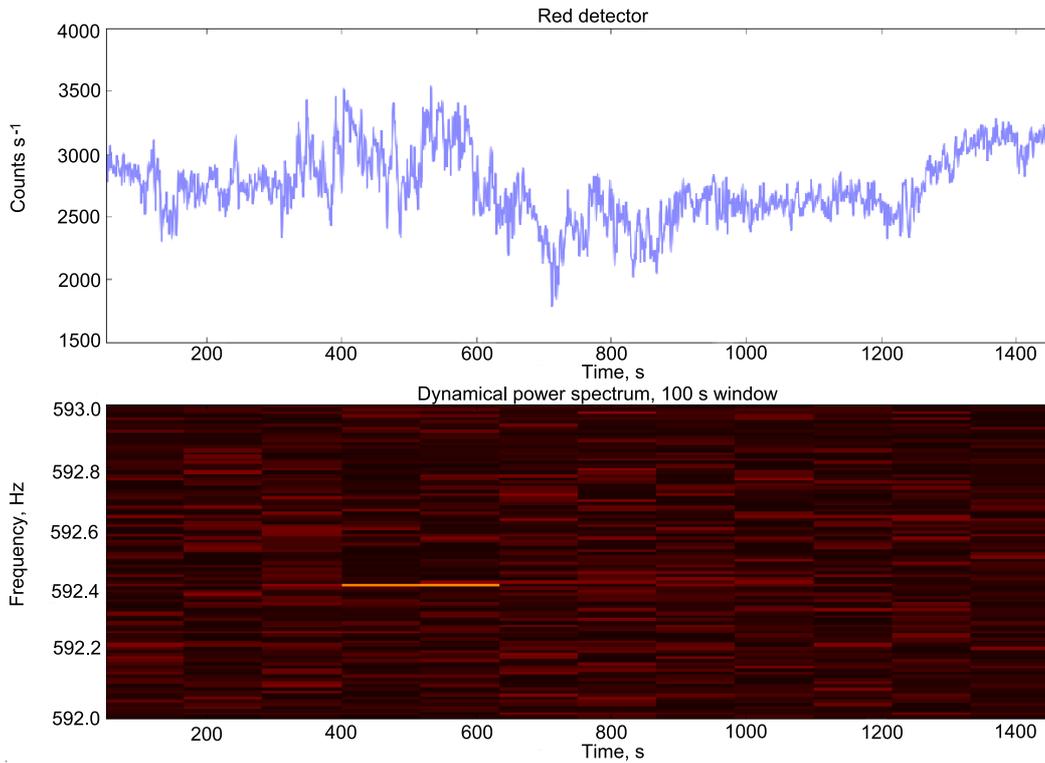


Рис. 17. Кривая блеска с секундным окном и динамический спектр мощности кривой блеска с окном 100 мкс в одном из интервалов наблюдения миллисекундного пульсара PSR J1023+0038, где значительно выделяется высокоамплитудная деталь на частоте вращения нейтронной звезды.

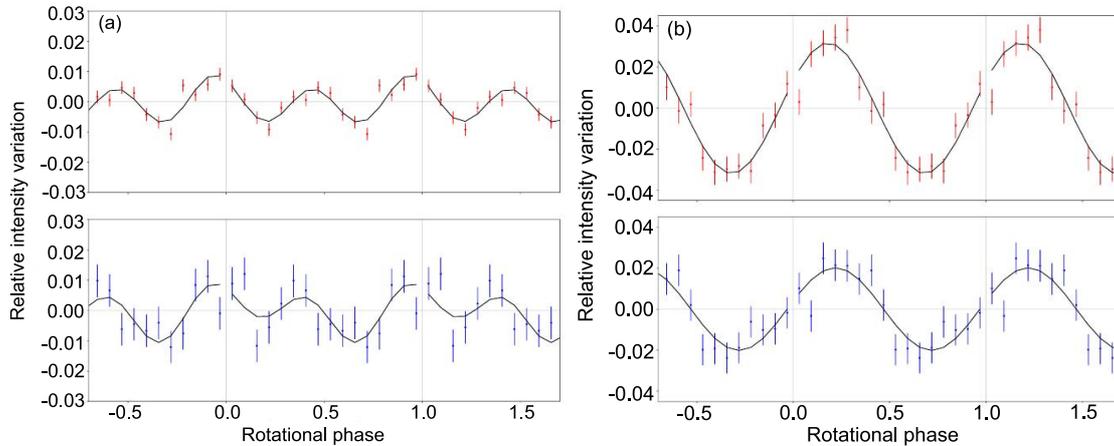


Рис. 18. Относительные вариации интенсивности излучения в «красном» и «синем» каналах при свертке с периодом пульсара PSR J1023+0038 после орбитальной коррекции: (a) — профиль импульса для всей совокупности фотонных листов, за исключением таковых в 400-секундном интервале; (b) — профиль импульса в «уникальном» интервале.

зируются с помощью новой версии программного обеспечения (Кагров 2007), позволяющего:

- анализировать накопленные изображения, компенсировать дрожания с помощью программного микрогидирования и выполнять фотометрию протяженных и точечных объектов;
- строить и анализировать кривые блеска, вы-

полнять сглаживание, вычислять невязки, делать свертки и Фурье-анализ;

- анализировать стохастические сигналы, выполнять дисперсионный анализ и анализировать статистику интервалов между отсчетами;
- анализировать периодические сигналы, делать барицентрирование, выполнять поиск периодов, свертку с учетом первой и второй произ-

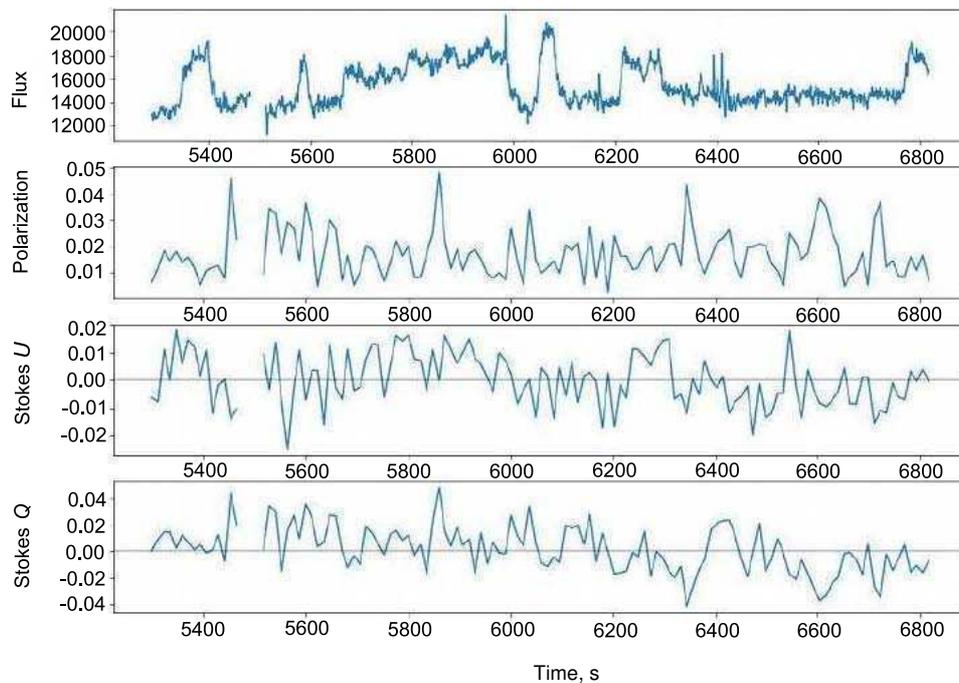


Рис. 19. Пример измерения поляризации излучения PSR J1023+0038 (три параметра Стокса). Величина поляризации не превышает 5%.

водных, анализировать и компенсировать «фазовые сдвиги».

5. НАБЛЮДЕНИЯ С МРРР И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве иллюстраций приводим некоторые результаты наблюдений.

5.1. Синхронные наблюдения *Seg X-1*

Применение КЧД позволяет уверенно проводить наблюдения, синхронизованные с исследованиями в других диапазонах. Летом 2002 г. на 6-м телескопе с помощью МРРР было проведено несколько циклов наблюдений рентгеновских двойных систем. Они проходили одновременно с мониторингом этих объектов на орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE (The Rossi X-ray Timing Explorer). Для исследования были отобраны те системы, усредненная рентгеновская светимость которых позволяет реализовать достаточную точность при измерениях рентгеновского потока (1–10%) при временах экспозиции вплоть до 10 000 с. Особенно сложными являются оптические исследования рентгеновского барстера *Seg X-1*, так как на расстоянии $1'$ от него расположена звезда на 1^m более яркая. Тем не менее хорошее пространственное разрешение панорамного фотополяриметра (около $0''3$) и отличные

погодные условия (качество изображений было не хуже $1''$) позволили разделить излучение *Seg X-1* и звезды-соседки (см. рис. 13). Обычный фотометр с диафрагмами не дает возможности решить такую задачу.

Наблюдения проводились либо в фильтре *B*, либо в специальном фильтре *F*, объединяющем *U*- и *B*-полосы. Общее время экспозиции для *Seg X-1* составило 3.5 часа, для входившего в программу наблюдений объекта X1957+11 — 7 часов. Анализ данных, алгоритмы которого описаны в (Plokhotnichenko 1983; 2020), показал отсутствие флуктуаций блеска на уровне 10–20% с характерными временами 0.1–5 с. Такого рода вспышки могли быть связаны с термоядерными взрывами в плазме, накопившейся на поверхности нейтронной звезды (Beskin 2012).

5.2. Обнаружение изменения профиля импульсов пульсара в Крабовидной Туманности

В наблюдениях декабря 2005 г. — января 2006 г. было обнаружено существенное изменение формы главного импульса пульсара в Крабовидной Туманности (PSR B0531+21): он стал более симметричным (рис. 14) и в течение месяца вернулся в прежнее состояние (Karrov et al. 2007a; b).

Запись больших временных рядов из потоков фотонов в привязке к UTC открывает возможности

проведения скрупулезных исследований стабильности формы пульсов на большой шкале времени (Karpov 2007).

5.3. Обнаружение синхротронного излучения микровспышек у вспыхивающих звезд

В максимуме гигантской вспышки звезды UV Cet 28 декабря 2008 г. (Beskin et al. 2017a; c) были зарегистрированы субсекундные микровспышки (спайки) (см. рис. 15).

Поскольку на этот момент фотополариметр МРРР в качестве поляризатора использовалась одиночная призма Волластона, определялись лишь два параметра Стокса, то есть устанавливалась нижняя граница степени линейной поляризации (рис. 16).

Полученный результат является прямым доказательством синхротронного происхождения спайков. На основании этого вывода были оценены параметры пучков ультрарелятивистских электронов, генерирующих излучение в спайках — их Лоренц-факторы превышают 600 при минимальных энергиях в их спектре 20–30 кэВ, магнитные поля имеют напряженность около 1 кГс, а показатели степенного спектра электронов лежат в диапазоне 1.6–2.8. Таким образом, впервые обнаружены свидетельства ускорения электронов во вспышках звезд типа UV Cet до энергий в несколько сотен МэВ (Beskin et al. 2017a; c).

5.4. Обнаружение периодического излучения миллисекундного пульсара

Наблюдения переходного миллисекундного пульсара PSR J1023+0038 только в фотометрической моде с предельным временным разрешением 1 мкс проводились 14 и 15 ноября 2017 г. Использовались два КЧД с фотокатодами GaAs («красный») и S20 («синий»), которые синхронно регистрировали длинноволновую и коротковолновую части потока излучения объекта, разделенные дихроичным зеркалом. Общая длительность наблюдений составила около трех часов. Наблюдательные данные последовательности кодов зарегистрированных квантов с их координатами в рабочих полях детекторов сохранялись на архивных носителях с дискретностью 30 нс и точностью привязки к UTC 100 нс, а затем обрабатывались с помощью алгоритмов, описанных в (Karpov 2007).

Накопленные моменты прихода квантов (изначально сохраняемые в шкале времени UTC) были приведены к барицентру Солнечной системы (шкала TDB) с использованием эфемерид JPL и учетом орбитального движения в двойной системе, содержащей пульсар, согласно эфемеридам

из Ambrosino et al. (2017). Так как эпоха восходящего узла орбиты изменяется, проводилось ее уточнение путем оптимизации свертки кривой блеска с известным радиопериодом. С помощью предварительного анализа спектров мощности отдельных сегментов полученных кривых блеска (использовалось быстрое преобразование Фурье кривых блеска, построенных с временным разрешением 100 мкс) мы выделили единственный интервал длительностью 400 с (см. рис. 17), на котором присутствует значимая особенность на частоте, близкой к частоте вращения нейтронной звезды, определенной по радио- и рентгеновским данным (Beskin et al. 2019a; 2018a, Karpov et al. 2019a).

После коррекции за орбитальный период была проведена свертка данных во всем интервале наблюдений, а также в его отдельных частях. Сильные пульсации обнаруживаются в «уникальном» интервале, который был выделен по спектру мощности. Амплитуда пульсаций при этом оказывается около 1–2% как в «красном», так и в «синем» каналах, и форма пульса практически синусоидальная (см. рис. 18) (Beskin et al. 2019a; 2018a, Karpov et al. 2019a), в отличие от особенностей пульсаций, обнаруженных ранее (Ambrosino et al. 2017), а также нами в длительной экспозиции за пределами «уникального» интервала. Их амплитуда составляла около 0.5% при двухпиковой форме профиля.

Вариации блеска PSR J1023+0038 на фоне атмосферной переменности и пределы на поляризацию его излучения, измеренные с помощью двойной призмы Волластона, приведены на рис. 19.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан, оптимизирован за годы почти двадцатилетней практики на БТА и продолжает совершенствоваться многомодовый панорамный фотоспектрополяриметр МРРР для исследования быстрой переменности астрофизических объектов в диапазоне от субсекунд до микросекунд (Karpov and Beskin 2007, Plokhotnichenko et al. 2008a; 2003; 2009a; 2020a). Он позволяет проводить измерения трех параметров Стокса в различных цветовых диапазонах на временах до 1 мкс. За весь период эксплуатации прибор показал свою эффективность в решении задач астрономии высокого временного разрешения (de Bur et al. 2008a, Plokhotnichenko et al. 2008a), в получении значимой научной информации об объектах различной природы, при исследованиях которых другие методы малопригодны. На нем выполняются наблюдения по целому ряду программ БТА и были получены значимые астрофизические результаты. В частности, обнаружено изменение

формы главного импульса пульсара в Крабовидной Туманности (Karpov et al. 2007b). В ходе регулярно проводимых наблюдений вспыхивающих звезд у красного карлика UV Ceti найдена поляризация микровспышек на фоне гигантской вспышки (Beskin et al. 2017a), обнаружено однопиковое и двухпиковое периодическое излучение миллисекундного пульсара PSF J1023+0038 (Beskin et al. 2019a; 2018a, Karpov et al. 2019a). Развиваемые наблюдательные методы находятся в русле интересов астрофизиков к исследованию компактных объектов и быстро протекающих явлений и опираются на новые возможности, предоставляемые наукоемкой промышленностью, создающей детекторы фотонов со все более высокой эффективностью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С. И. Неизвестного, участвовавшего в создании аппаратуры и в наблюдениях, своих коллег за вклад в изготовление элементов приборов, ценные замечания и предложения В. Е. Панчука, Е. И. Перепелицина, Ю. Мамаева, В. Н. Черненкова. Мы помним помощь ушедших от нас В. Л. Афанасьева и Г. А. Чунтонова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Она была поддержана INTAS (грант № 04-78-7366), РФФИ (грант № 04-02-17555), фондом поддержки научных программ Президиума Российской академии наук. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России). Работа поддержана Европейским структурным и инвестиционным фондом и чешским Министерством образования, молодежи и спорта (проект CoGraDS CZ.02.1.01/0.0/0.0/15 003/0000437) и Федеральной программой повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) Федерального университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Ambrosino, A. Papitto, L. Stella, et al., *Nature Astronomy* **1**, 854 (2017).
2. G. Beskin, V. de-Bur, S. Karpov, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7021**, 702120 (2008).
3. G. Beskin, S. Karpov, V. Plokhhotnichenko, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **34**, e010 (2017a).
4. G. Beskin, S. Karpov, V. Plokhhotnichenko, et al., *ASP Conf. Ser.* **510**, 303 (2017c).
5. G. Beskin, S. Karpov, V. Plokhhotnichenko, et al., in *Proc. Int. Conf. on The Multi-Messenger Astronomy: Gamma-Ray Bursts, Search for Electromagnetic Counterparts to Neutrino Events and Gravitational Waves, Nizhnij Arkhyz, Terskol, Russia, 2018*, Ed. by V. V. Vlasyuk, et al. (SNEG, Pyatigorsk, 2019a), pp. 37–43.
6. G. M. Beskin, Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 2012).
7. G. M. Beskin, V. G. Debur, and V. L. Plokhhotnichenko, in *Proc. Colloq. on Physics of Neutron Stars, St.Petersburg, Russia, 1999* (St.Petersburg, 1999).
8. G. M. Beskin, S. V. Karpov, V. L. Plokhhotnichenko, et al., in *Proc. Int. Conf. on SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy, Nizhnij Arkhyz, Terskol, Russia, 2017*, Ed. by V. V. Sokolov, et al. (Moscow, 2018a), pp. 24–31.
9. Y. I. Bocharov, V. A. Butusov, et al., *Pribory i tehnika eksperimenta* **6**, 23 (2017) [in Russian].
10. V. S. Bychkova, N. S. Kardashev, K. L. Maslennikov, et al., *Astronomy Reports* **64** (6), 533 (2020).
11. T. Chan, *Sistemnoe programmirovanie na C++ dlya UNIX* (Kiev, BHV, 1997).
12. V. de-Bur, A. Terekhov, S. Kosolobov, et al., *AIP Conf. Ser.* **984**, pp. 186–193 (2008a).
13. V. G. de Bur, V. L. Plokhhotnichenko, S. V. Moiseev, et al., *Scientific-Technical Report No. 339*, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2019).
14. V. Debur, T. Arkhipova, G. Beskin, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **513** (1–2), 127 (2003).
15. V. G. Debur, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (4), 386 (2009).
16. E. Giro and C. Pernechele, *Padova and Asiago Observatories* **18** (2001).
17. S. Karpov and G. Beskin, *IAU Symp.*, No. 238, pp. 391–392 (2007).
18. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, et al., *arXiv e-prints arXiv:0709.2580* (2007a).
19. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **308** (1–4), 595 (2007b).
20. S. Karpov, G. Beskin, V. Plokhhotnichenko, et al., *Astronomische Nachrichten* **340** (7), 607 (2019a).
21. S. V. Karpov, PhD Thesis, (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 2007).
22. S. Klemin, Y. Kuznecov, and et al., *ELEKTRONIKA: Nauka, Tehnologiya, Biznes* **8**, 80 (2007). [in Russian].

23. S. I. Neizvestnyj, N. A. Vikulev, A. V. Zhuravkov, et al., Report-1996, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 1997), pp. 25–26 (1997).
24. E. Oliva, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 589 (1997).
25. V. Plokhhotnichenko, G. Beskin, V. de-Bur, and S. Karpov, *AIP Conf. Ser.* **984**, pp. 194–201 (2008a).
26. V. Plokhhotnichenko, G. Beskin, V. Debur, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **513** (1-2), 167 (2003).
27. V. L. Plokhhotnichenko, *Soobsh. Spec. astrofiz. observatorii*, No. 38, 29 (1983).
28. V. L. Plokhhotnichenko, Doctoral Dissertation in Technical Sciences, (Inst. Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, 2020).
29. V. L. Plokhhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Bur, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (3), 308 (2009a).
30. V. L. Plokhhotnichenko, G. M. Beskin, and V. G. Debur, in *Proc. Vseross. Conf. on Astrofizika na rubezhe vekov, Pushchino, Russia, 1999* (1999).
31. V. L. Plokhhotnichenko, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (Spec. Astrophys. Obs. of RAS, Nizhnij Arkhyz, 2020a), pp. 108–114.
32. V. L. Plokhhotnichenko, G. M. Beskin, S. V. Karpov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (1), 59 (2020b).
33. V. L. Plokhhotnichenko, V. G. de Bur, S. V. Moiseev, et al., Scientific-Technical Report No. 337, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 2018).
34. V. L. Plokhhotnichenko, A. V. Solin, and T. A. G., *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 59 (2009b).
35. W. A. Shurkliff, *Polarized light*, (Harvard Univ. Press, Cambridge, 1962).

High Temporal Resolution Multi-Mode Panoramic Photospectropolarimeter

V. L. Plokhhotnichenko¹, G. M. Beskin^{1,2}, V. G. de Boer³, S. V. Karpov^{1,2,4}, S. V. Moiseev¹, V. S. Shergin¹, E. P. Gorodovoy¹, A. G. Gutaev¹, A. V. Solin⁵, A. A. Solin⁵, Z. V. Lyubetskaya⁵, A. P. Lyubetsky⁵, V. V. Pavlova⁶, S. S. Moiseev⁷, D. A. Badin^{8,9}, and P. V. Plokhhotnichenko¹⁰

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

³Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021, St. Petersburg, Russia

⁴CEICO, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18200 Czech Republic

⁵Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, 220006 Belarus

⁶Limited liability company “Engineering Bureau “CEVLAP”, Rostov-on-Don, 344065 Russia

⁷Moiseev Individual Enterprise, Taganrog, 347900 Russia

⁸Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

⁹Federal State Unitary Enterprise “N. L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automation”, Moscow, 127030 Russia

¹⁰Service Centre Rus Ltd, Rostov-on-Don, 344000 Russia

The paper describes a new stage in the development of the hardware–software complex of the MANIA experiment to search for and study the brightness variability of astrophysical objects with a temporal resolution of 10^{-6} s. The panoramic photospectropolarimeter uses the remotely mounted optical units—the color separation modules which allow one to carry out observations in five modes: the most transparent, multi-band, photo-polarimetric, spectroscopic, and spectro-polarimetric. Two photodetectors (PDs) based on position sensitive detectors (PSDs) with the S-20 and GaAs cathodes, the multiplication of photocurrents with microchannel plates (MCPs), and detection using collectors with the number of elements from 4 up to 16 and an EMCCD camera allow one to detect light fluxes from objects and reference stars in a field of view of up to $1'$ in several color bands in the low resolution spectroscopic mode, and at the same time to measure the linear polarization in three Stokes parameters. The detection system accumulates the observed data: the digitized photocount fluxes from both PDs with a temporal resolution of $1 \mu\text{s}$; while the EMCCD camera accumulates video sequences with a subsecond resolution simultaneously with the reception of ultraviolet quanta with a microsecond resolution on a single PD. We present some research results obtained in observations with the 6-m SAO RAS telescope.

Keywords: *instrumentation: detectors, photometers, polarimeters*