

УДК 520.627

Многомодовый панорамный фотоспектрополяриметр высокого временного разрешения. Состояние и перспективы

В.Л. Плохотниченко¹, 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. Гутаев^{1,2}, А.В. Солин⁵, А.А. Солин⁵, З.В. Любецкая⁶, А.П. Любецкий^{1,6}, В.В. Павлова⁶, С.С. Моисеев⁷, Д.А. Бадьин⁸, П.В. Плохотниченко⁹, В.Н. Черненко¹, А.С. Танашкин³

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия
rvl@sao.ru

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

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

⁴ SEICO, Институт физики, Академия наук Чехии, Прага, 18221, Чехия

⁵ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, 220030, Беларусь

⁶ ООО Инженерное бюро “ЦЕВЛАП”, Ростов-на-Дону, 344065, Россия

⁷ ИП Моисеев, Таганрог, 347900, Россия

⁸ Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”, Москва, 127030, Россия

⁹ Сервисный центр Rus Lcd, Ростов-на-Дону, 344000, Россия

Поступила в редакцию 2 октября 2023 г.

Аннотация. Описывается итоговый этап развития аппаратно-программного комплекса эксперимента МАНИЯ (многоканальный анализ наносекундных изменений яркости) для поиска и изучения переменности блеска астрофизических объектов с экстремально высоким временным разрешением. Основной прибор комплекса – панорамный фотоспектрополяриметр с дистанционно устанавливаемыми оптическими блоками, подающими световые потоки на фотоприемные устройства (ФПУ) с координатно-чувствительными детекторами фотонов (КЧД), отдельные кванты которых регистрируются хронометрическими устройствами с временным разрешением 30 нс и привязкой каждого кванта к всемирному времени. Приводятся некоторые результаты исследований, полученные в наблюдениях на 6-м телескопе САО РАН, а также планы дальнейшего развития аппаратных средств и их применения.

Ключевые слова: релятивистская астрофизика, оптические наблюдения, фотометрия, высокое временное разрешение, черные дыры, пульсары, вспыхивающие звезды, астрономические приборы

1 Введение

Работа, получившая название эксперимент МАНИЯ, была начата Викториём Фавловичем Шварцманом в 1971 году (Shvartsman, 1971). Она основана на методе поиска черных дыр по изучению статистики квантов, излучаемых мерцающими ореолами плазмы около них. Эта идея им же была развита для исследований с высоким временным разрешением других объектов рентгеновских источников, вспыхивающих звезд, оптических пульсаров, объектов без линий, гипотетических звезд-лазеров, сигналов внеземных цивилизаций.

Суть эксперимента заключается в регистрации потоков фотонов от исследуемых объектов с высокоточными измерениями времен прихода каждого кванта, а также его пространственных, поляризационных и энергетических характеристик с последующим анализом этих данных любыми мыслимыми методами. Для практического осуществления эксперимента МАНИЯ был создан набор базовых математических методов анализа быстрой переменности, разработаны устройства регистрации фотонных потоков на основе координатно-чувствительных детекторов, способы оцифровки и

хронометрирования получаемых отсчетов, а также созданы фотоспектрополяриметрические приборы, позволяющие изучать физические характеристики регистрируемых квантов. Эти компоненты, вместе со специализированным программным обеспечением (Plokhotnichenko et al., 2020a), и составили наблюдательный комплекс эксперимента МАНИЯ (Плехотниченко, 2020). Его главной особенностью является оперативная многофункциональность, позволяющая изменять его структуру в соответствии с задачами исследования и условиями наблюдений.

В конструкцию и матобеспечение комплекса, которые описаны в Plokhotnichenko et al. (2020a), внесены некоторые коррективы. В частности, модернизирована система управления – компьютер для работы с кинематикой прибора через com-порты установлен на его корпусе, что улучшило мобильность фотополариметра и упростило установку в фокусе телескопа. Обеспечена возможность выполнения непрерывной экспозиции на протяжении всей ночи наблюдений, что необходимо для поиска оптических компаньонов источников, обнаруженных в других диапазонах, например, быстрых радиовсплесков.

2 Наблюдательный комплекс

Аппаратурной основой комплекса является многомодовый панорамный фотометр-полариметр (multi-mode panoramic photometer-polarimeter – MPPP), функционирующий вариант которого описан в работе Plokhotnichenko et al. (2021), а оптическая схема приведена на рис. 1а. Он состоит из: фокальной платформы (I) с зеркально-щелевым узлом подзора рабочего поля и входной линзой коллиматора излучения исследуемого участка неба; узла оптических блоков (II) с анализатором линейной поляризации на входе оптического пучка в виде двойной призмы Волластона (Oliva, 1997); устройства (III) дистанционной установки пяти оптических блоков в рабочее положение; двух фотоприемных устройств (IV, V) на основе КЧД (Debur et al., 2003; Plokhotnichenko et al., 2020b) для работы в “синем” и “красном” каналах с хронометрической системой регистрации (см. след. раздел), накапливающих массивы кодов, соответствующих зарегистрированным квантам с временным разрешением 30 нс; EMCCD-камеры (VI), позволяющей принимать до 10 кадров/с.

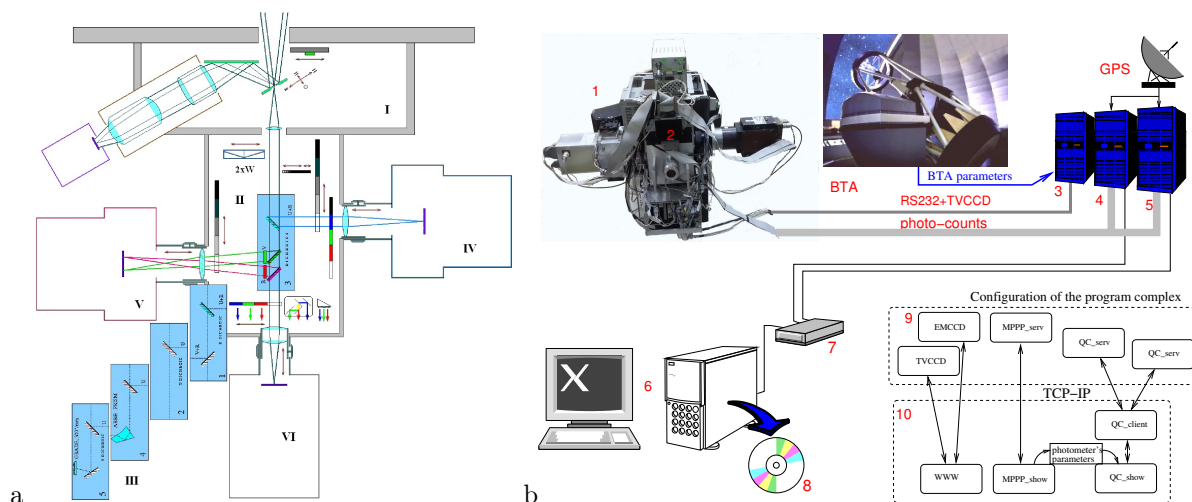


Рис. 1. а) блок-схема MPPP; б) структура наблюдательного комплекса, где: 1 – MPPP; 2 – мультиплексор потоков данных от двух ФПУ, формирующий из них единую последовательность; 3 – компьютер TV подзора и управления кинематикой; 4, 5 – компьютеры приема данных с хронометрического граббера “Квантохрон 4–48”; 6 – компьютер управления; 7 – сетевой переключатель выделенной линии; 8 – накопленные данные; 9 – компоненты аппаратных компьютеров; 10 – программные модули интерфейсных компьютеров

Структура комплекса приведена на рис. 1б. Иллюстрация работы показана на рис. 2.

Управление прибором осуществляется с помощью графического интерфейса в виде его стилизованной оптической схемы с подвижными элементами.

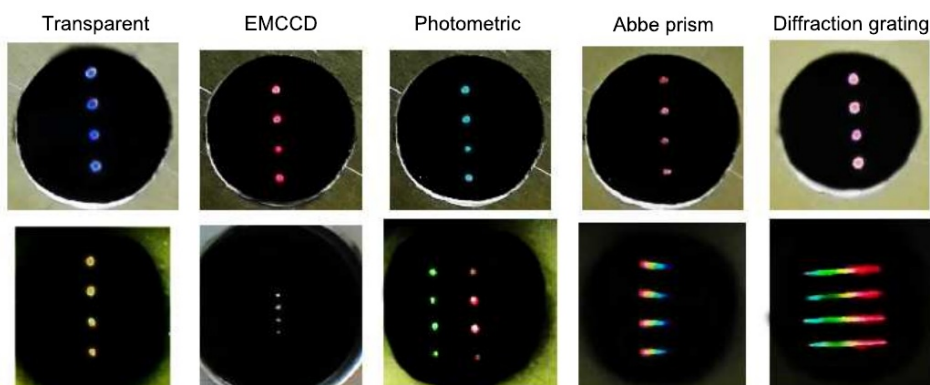


Рис. 2. Изображения поляризованных пучков на матовых стеклах, установленных вместо фотоприемников. Верхний ряд – “синий” канал, нижний ряд – “красный”

3 Детекторы потоков фотонов и их хронометрия

В качестве фотоприемников используются электронно-вакуумные КЧД, в которых электроны, выбитые из катода приходящими квантами света, ускоряются в сильном электростатическом поле и умножаются за счет вторичной электронной эмиссии на микроканальных пластинах (МКП). Лавины электронов попадают на элементы анода, затем полученные импульсы тока попадают в зарядочувствительные усилители, измеряются аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и регистрируются хронометрическими устройствами для хранения и обработки. Мы используем КЧД для ультрафиолетово-синего диапазона с катодом S20 и квадрантным коллектором (Debur et al., 2003) и зелено-красного диапазона с GaAs катодом и 16-анодным коллектором (Plokhotnichenko et al., 2020b). Внешний вид и принципы измерений получаемых КЧД сигналов показаны на рис. 3 и 4. Квантовая эффективность – около 20 % у первого и 30 % у второго. Умножение электронных лавин составляет $\sim 10^6$ раз, что обуславливает долгую работоспособность устройств (уже порядка 20 лет) с одной стороны и достаточно хорошее пространственное разрешение, около $0''.2$, с другой. Предельные потоки, регистрируемые детекторами, – порядка $2 \cdot 10^6$ импульсов/с. Мертвое время составляет ~ 0.1 мкс.

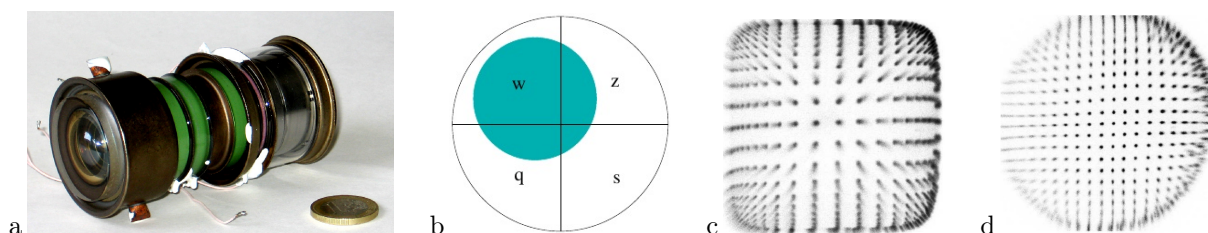


Рис. 3. а) КЧД с катодом S20; б) 4-элементный анод (квадрантный) с широкой лавиной электронов от одного фотоотсчета на них; в) поле светящихся точек, полученное прямым суммированием квантов в координатах их регистрации; д) поле после коррекции положения каждого фотона. Промежутки между точками составляют $3''$

Прием наблюдательных данных – оцифрованных фотоимпульсов от КЧД – выполняется разработанным нами хронометрическим граббером “Квантохрон 4–48” (Plokhotnichenko et al., 2009), устанавливаемым в слот PCI шины компьютера (см. рис. 5). Сопряжение с PCI-контроллером шины осуществляется с буферизацией данных в памяти устройства, которая организована по принципу FIFO (first in, first out), то есть в виде простой беспriorитетной очереди. Синхронизация по GPS/ГЛОНАС имеет точность 100 ns. В реальном времени выполняется фиксация отсчетов от детекторов координат и времени прихода каждого кванта в виде нониусного отсчета после очередного тактового импульса в репере синхросигналов навигационной системы и записывается в оперативной памяти компьютеров. Отсчеты от детекторов сливаются в единый поток смесителем стохастических

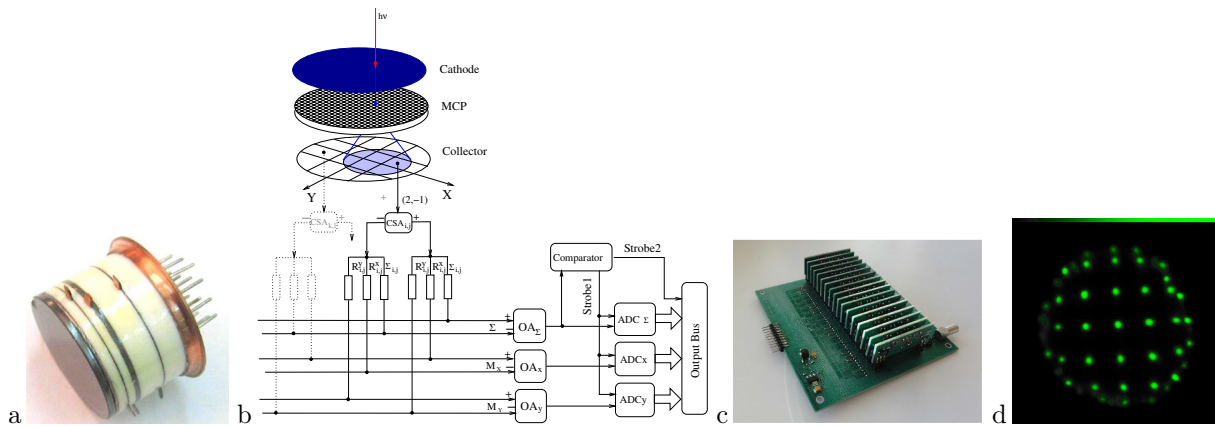


Рис. 4. а) внешний вид 16-анодного КЧД с GaAs катодом; б) функциональная схема аналоговой кодировки зарядов, регистрируемых коллектором как суммы зарядов лавин и их моментов по осям; в) набор 16 усилителей на плате кодировки; д) минутное поле детектора. Расстояния между точками равны $12''$

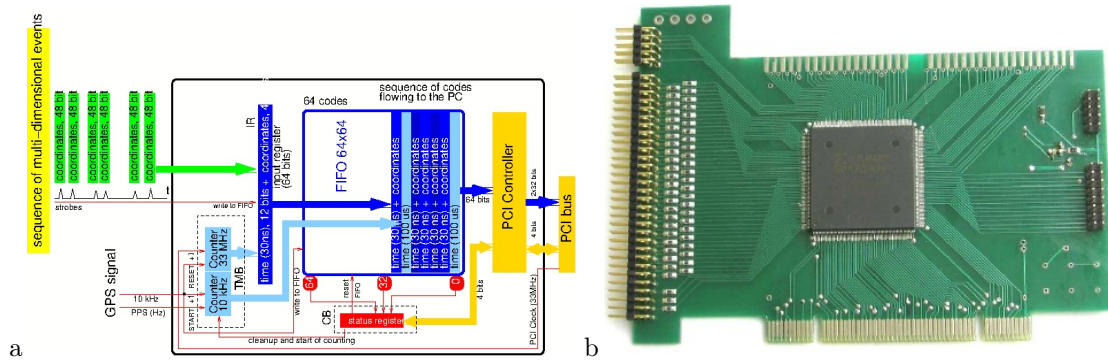


Рис. 5. а) функциональная схема хронометрического граббера; б) его PCI-плата

сигналов, в котором они получают признаки своего места происхождения. Массивы данных, занесенные в память одного из компьютеров приема в течение секунды с запретом всех прерываний его одноядерного процессора, в следующую секунду передаются по протоколу TCP/IP в компьютер накопления, а непрерывность получения данных в это время обеспечивается работой такого же устройства в другом компьютере приема, формируя режим Flip-Flor. А за счет организации работы с данными неразрывность суммарной экспозиции может сохраняться на любой ее длительности, для которой достаточно объема дисковой памяти компьютера накопления. Поток отсчетов, регистрируемый без потерь, составляет более $5 \cdot 10^5$ оцифрованных отсчетов/с. Управление сбором данных осуществляется с помощью интуитивно понятного графического интерфейса, позволяющего оперативно просматривать интенсивности потоков в виде кривых блеска как от выбранных площадок, так и со всех чувствительных поверхностей детекторов. Результатом работы системы сбора являются так называемые фотонные листы, строки которых содержат времена регистрации квантов, координаты их попадания на катод детектора, а также признак детектора, на котором был зарегистрирован данный квант. Статистические свойства накапливаемых отсчетов от засветки постоянной интенсивности соответствуют математически ожидаемым.

4 Программное обеспечение

Программное обеспечение включает в себя средства получения и анализа временных рядов. Оно позволяет: принимать от детекторов оцифрованные потоки квантов – фотонные листы в виде отсчетов времени, координат, поляризационных и энергетических характеристик квантов света; анализировать накопленные изображения, компенсировать дрожания с помощью программного микрогиди-

рования и выполнять фотометрию протяженных и точечных объектов; строить и анализировать кривые блеска, выполнять сглаживание, вычислять невязки, делать свертки и Фурье-анализ; анализировать стохастические сигналы, выполнять дисперсионный анализ и изучать статистику интервалов между отсчетами; анализировать периодические сигналы, барицентрировать временные ряды (исправлять за эффекты Доплера), выполнять поиск периодов, делать свертки с периодами при учете их наблюдаемых первых производных, анализировать и компенсировать фазовые сдвиги. Описание алгоритмов настоящего этапа развития программного обеспечения приводится в работе Карпов (2007).

5 Некоторые результаты

5.1 Поиск черных дыр

Метод заключается в исследовании распределений интервалов между квантами по длительности у объектов-кандидатов в изолированные черные дыры, отобранных по совокупности их пекулярных характеристик. Проводился поиск различий этих распределений на малых временах у исследуемых источников и стандартных звезд, которые являлись бы свидетельством генерации вблизи горизонта событий черной дыры микросекундных вспышек излучения в аккрецирующей плазме. На рис. 6 приводится результат подобного исследования кандидата в возможные черные дыры микролинзы с массой в несколько солнечных МАСНО-1999-BLG-22. В этом случае также не была зарегистрирована сверхбыстрая переменность излучения этого объекта (Бескин, 2012).

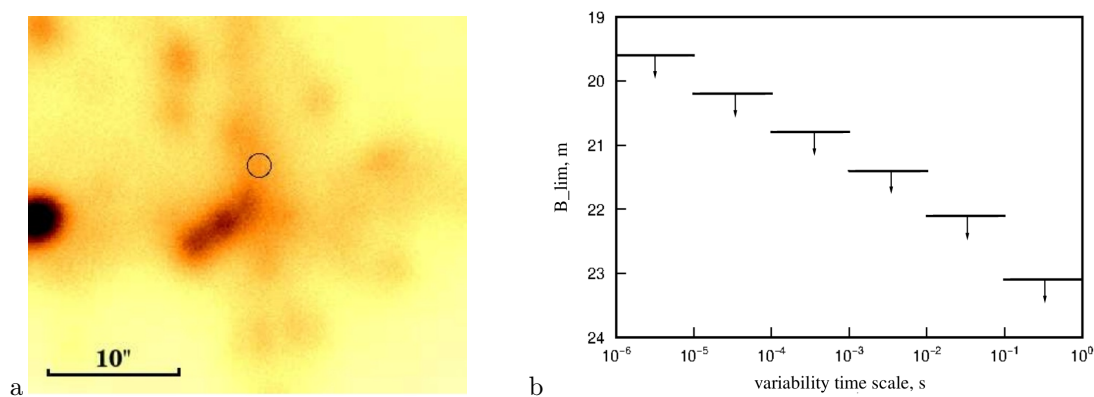


Рис. 6. а) изображение окрестностей объекта, кандидата в черные дыры МАСНО-1999-BLG-22, полученное с помощью КЧД на БТА. Экспозиция – 1 час. Область локализации объекта отмечена черным кружком. б) уровень переменности излучения области локализации объекта, полученный путем интегрирования его спектра мощности

5.2 Исследования вспыхивающих звезд

Начиная с 1980-х годов было проведено несколько серий наблюдений. Подробное описание исследований см. в работах Бескин и др. (1988), Бескин (2012). Исследованы особенности тонкой структуры вспышек, показано отсутствие микросекундной переменности. У звезды UV Ceti обнаружены поляризованные вспышки субсекундной длительности, что доказывает предположение 1960-х годов о реализации синхротронного механизма генерации излучения во вспышках (некоторых!) красных карликов (Beskin et al., 2017).

5.3 Исследования пульсара в Крабовидной туманности

В 1980 году методом цифрового синхронного детектирования была получена сфазированная кривая блеска пульсара с лучшим в мире временным разрешением в 6 мкс (Beskin et al., 1983). В 1990-е годы были исследованы кривые блеска в полосах UBVR (Komarova et al., 1996). В прецизионных наблюдениях 2005–2006 гг. обнаружено кратковременное изменение формы главного пульса и нестабильность его профиля после очередного глитча (Karpov et al., 2007).

5.4 Наблюдения миллисекундного пульсара PSR J1023+0038

В октябре 2017 г. были проведены наблюдения миллисекундного пульсара в двойной системе, период вращения которого равен 1.69 мс. В ночь на 15.11.2017 наблюдалась вспышечная активность в системе и впервые был зарегистрирован переход за несколько минут от двухпиковой структуры к однопиковой структуре импульса пульсара и обратно (рис. 7а и б) (Tanashkin et al., 2022). При этом амплитуда однопиковых пульсаций была увеличена в несколько раз (рис. 7с).

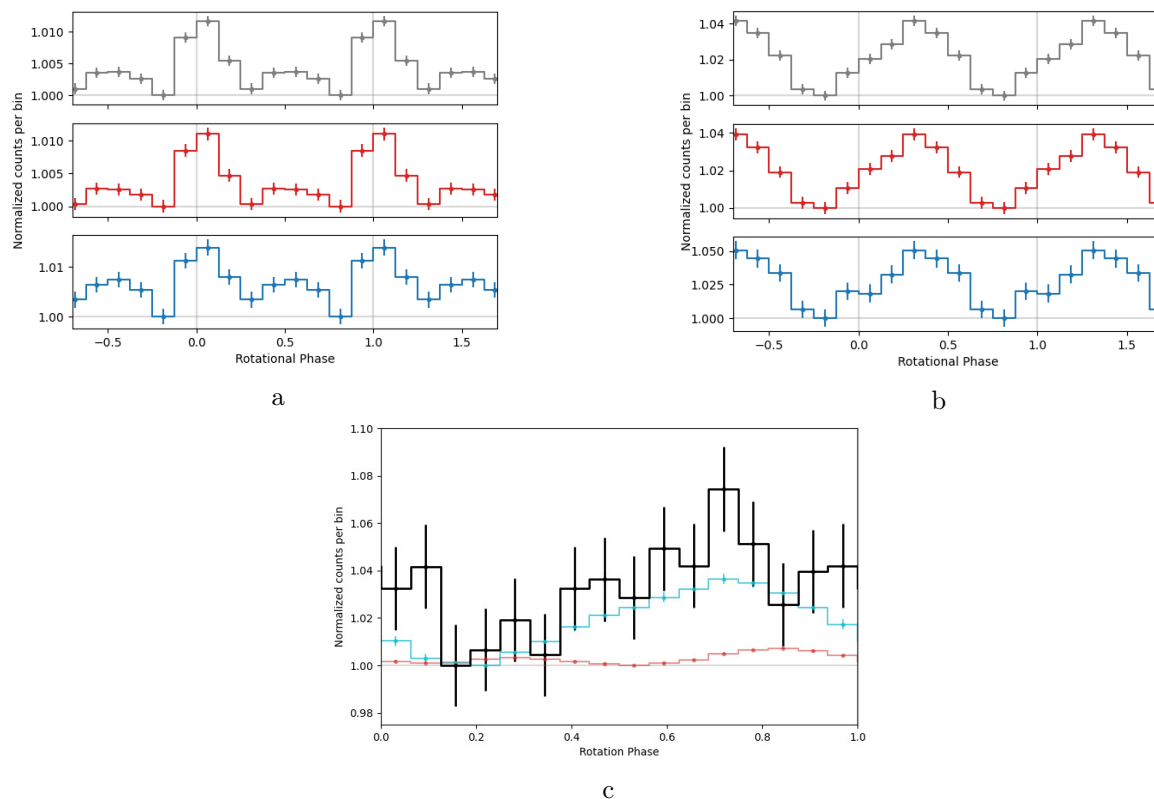


Рис. 7. а) типичные двухпиковые профили импульсов пульсара J1023+0038, наблюдаемые в большей части данных; б) профили импульса, полученные при сложении с периодом пульсара “уникального” 230-секундного интервала; в) кривая блеска 10-секундного интервала во время смены формы профиля импульса (черным), весь “уникальный” интервал (бирюзовым) и стандартный двухпиковый профиль (красным). Все профили приведены к единой начальной фазе

6 Заключение

Созданный наблюдательный комплекс позволяет эффективно решать задачи, поставленные Викторией Шварцманом, и естественным образом входит в рамки нового направления науки – астрофизики высокого временного разрешения (Phelan et al., 2008).

Комплекс концептуально завершен. Дело остается за улучшением количественных характеристик используемых оптических элементов, детекторов и системы регистрации.

В настоящее время ведутся работы по созданию КЧД нового поколения (большее рабочее поле и более высокий квантовый выход), создается новое устройство хронометрической регистрации, эскизный проект которого описан в работе Plokhotnichenko (2020). Оно будет пригодно для использования с любым современным компьютером, доступно к изготовлению небольшой серией, что откроет возможность установки на других телескопах, в том числе и для совместных синхронных наблюдений.

Благодарности. 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 № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003) и Федеральной программой повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета. Работа поддержана Европейским структурным и инвестиционным фондом, Министерством образования, молодежи и спорта Чешской Республики (проект CoGraDS CZ.02.1.01/0.0/0.0/15 003/0000437).

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

Литература

- Бескин Г.М., 2012. Исследование быстрой переменности релятивистских и нестационарных объектов (Дис. докт. физ.-матем. наук). Нижний Архыз. САО РАН. [Beskin G.M., 2012. Dr. Sci. in Physics and Mathematics thesis. Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.)].
- Бескин Г.М., Гершберг Р.Е., Неизвестный С.И., и др., 1988. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 79. С. 71–95. [Beskin G.M., Gershberg R.E., Neizvestnyj S.I., et al., 1988. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, v. 79, pp. 71–95 (In Russ.)].
- Карпов С.В., 2007. Наблюдательные проявления быстропеременных релятивистских объектов (Дис. канд. физ.-матем. наук). САО РАН. [Karpov S.V., 2007. Optical observations of fast variable objects (PhD thesis). Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.)].
- Плохотниченко В.Л., 2020. Аппаратура и методы для исследования оптической переменности астрофизических объектов с высоким временным разрешением (Дис. докт. техн. наук). Санкт-Петербург. ИПА РАН. [Plohotnichenko V.L., 2020. Dr. Sci. in Technical Sciences thesis. Inst. Applied Astronomy RAS, St. Petersburg. (In Russ.)].
- Beskin G., Karpov S., Plohotnichenko V., Stepanov A., Tsap Y., 2017. *Publ. Astron. Soc. Australia*, vol. 34, e010.
- Beskin G.M., Neizvestnyi S.I., Pimonov A.A., Plakhotnichenko V.L., Shvartsman V.F., 1983. *Soviet Astronomy Letters*, vol. 9, pp. 148–151.
- Debur V., Arkhipova T., Beskin G., et al., 2003. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, vol. 513, no. 1-2, pp. 127–131.
- Karpov S., Beskin G., Biryukov A., et al., 2007. *Astrophys. Space Sci.*, vol. 308, no. 1-4, pp. 595–599.
- Комарова В.Н., Бескин Г.М., Неустроев В.В., Плохотниченко В.Л., 1996. *Journal of The Korean Astronomical Society*, vol. 29, pp. 217–218.
- Oliva E., 1997. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 123, pp. 589–592.
- Phelan D., Ryan O., Shearer A. (Eds), 2008. *High Time Resolution Astrophysics: The Universe at Sub-Second Timescales*, American Institute of Physics Conference Series, vol. 984.
- Plohotnichenko V.L., 2020. *Astrophysical Bulletin*, vol. 75, no. 2, pp. 198–205.
- Plohotnichenko V.L., Beskin G.M., de Boer V.G., et al., 2021. *Astrophysical Bulletin*, vol. 76, no. 4, pp. 472–489.
- Plohotnichenko V.L., Beskin G.M., Karpov S.V., et al., 2020a. In Romanyuk I.I., Yakunin I.A., Valeev A.F., Kudryavtsev D.O. (Eds), *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*. pp. 108–114, doi:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_108.
- Plohotnichenko V.L., Beskin G.M., Karpov S.V., et al., 2020b. *Astrophysical Bulletin*, vol. 75, no. 1, pp. 59–68.
- Plohotnichenko V.L., Solin A.V., Tikhonov A.G., 2009. *Astrophysical Bulletin*, vol. 64, pp. 198–206.
- Shvartsman V.F., 1971. *Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 48, p. 479.
- Tanashkin A.S., Beskin G., Karpov S., et al., 2022. *Proc. Science*, vol. 425, p. 059.

High temporal resolution multimode panoramic photospectropolarimeter. State and prospects

*V.L. Plokhotnichenko*¹, *G.M. Beskin*^{1,2}, *V.G. De-Bur*³, *S.V. Karpov*^{1,2,4}, *C.B. Moiseev*¹, *V.S. Shergin*¹, *E.P. Gorodovoi*¹, *A.G. Gutaev*^{1,2}, *A.V. Solin*⁵, *A.A. Solin*⁵, *Z.V. Lyubetskaya*⁶, *A.P. Lyubetskii*^{1,6}, *V.V. Pavlova*⁶, *S.S. Moiseev*⁷, *D.A. Bad'in*⁸, *P.V. Plokhotnichenko*⁹, *V.N. Chernenkov*¹, *A.S. Tanashkin*³

¹ Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz 369167, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation pvl@sao.ru

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan 420008, Russian Federation

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

⁴ CEICO, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague 18221, Czech Republic

⁵ Institute for Nuclear Problems, Belorussian State University, Minsk 220030, Belarus

⁶ Engineering Bureau TSEVLAP, Rostov-on-Don 344065, Russia

⁷ Moiseev Individual Enterprise, Taganrog 347900, Russia

⁸ Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute, Moscow 127030, Russia

⁹ Service center Rus Lcd, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. We describe the final stage of developing the hardware and software complex of the MANIA experiment (multichannel analysis of nanosecond intensity alterations) to search for and study the light variations of astrophysical objects with extremely high temporal resolution. The main instrument of the complex is a panoramic photospectropolarimeter with remotely mounted optical blocks that feed light beams to the photo-receiving devices (PRD) with position-sensitive detectors (PSD), the individual quanta of which are registered by chronometric devices with a 30 ns cadence and with each quantum linked to universal time. We present some investigation results obtained through observations with the 6-meter telescope of SAO RAS, as well as plans of further hardware development and its application.

Key words: relativistic astrophysics, optical observations, photometry, high temporal resolution, black holes, pulsars, flare stars, astronomical instruments