

2.11. ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

д.ф.-м.н. В. Н. Дудинов, к.ф.-м.н. В. С. Цветкова, В. Г. Вакулик, д.ф.-м.н. А. А. Минаков

От планет – к звездам ...

Датой рождения этого сравнительно молодого отдела можно считать, по-видимому, 1973 г., хотя формально статус отдела группа, руководимая ныне доктором физ.-мат. наук В. Н. Дудиновым, получила значительно позже, в то время как истоки тематики отдела относятся еще к началу 60-х годов. Шли годы, менялись объекты исследования, менялись методы и аппаратные средства, неизменным оставалось одно – стремление получить информацию о пространственной структуре объекта с предельно высоким разрешением. Как часто говорит руководитель отдела, мы всегда стремились увидеть на небе то, чего еще никто не видел...

В 1950 – 1960 г.г. в наблюдательной астрономии чрезвычайно возрос интерес к методам получения высокоинформативных изображений астрономических объектов при наблюдениях сквозь атмосферу. К этому времени стало понятно, что основным препятствием к получению высококачественных изображений является земная атмосфера, искажающая фронт световой волны от объекта, в результате чего увеличение диаметра телескопа приводит только к возрастанию собираемого светового потока, при этом разрешающая способность не увеличивается. К началу 70-х годов были изучены основные параметры земной атмосферы как среды, ответственной за искажения изображений астрономических объектов, и появились идеи, указывающие пути преодоления так называемого атмосферного предела разрешения.

Но в конце 60-х годов реализация этих идей была еще в будущем. А тогда были бурные дискуссии, стихийные семинары, на которые собирались не только сотрудники Астрономической обсерватории ХГУ, но и выпускники университета, работавшие в других учреждениях. Своим человеком в обсерватории стал сотрудник ИРЭ АН УССР Ю. В. Корниенко, выпускник радиофизического факультета В. А. Петров, ныне доцент ХИРЭ, и многие другие. Обсуждались самые разные темы – от эффекта Мессбауэра до поиска внеземных цивилизаций. Наиболее часто затрагиваемой темой было то, что вначале в иностранной литературе, а потом и в русскоязычной, получило название «проблемы видения сквозь турбулентную атмосферу». Успехи теории информации, достижения в области фильтрации радиотехнических сигналов, квантовой электроники, наконец, начало эры крупных телескопов и светоприемников нового поколения, поставивших проблему видения сквозь турбулентную атмосферу в ряд первоочередных задач наблюдательной астрономии, – все это создало стимулы и предпосылки для развития новых методов, позволяющих преодолеть атмосферный предел разрешения при наземных наблюдениях.

В мае 1970 г. должно было произойти довольно редкое астрономическое явление – прохождение Меркурия по диску Солнца. Здесь уместно пояснить, что наземные наблюдения Меркурия затруднены вследствие его близости к Солнцу, – вспомним известное изречение «счастлив астроном, увидевший Меркурий».

В ходе бурных дискуссий с участием сотрудников обсерватории Л. А. Акимова и В. Н. Дудинова и сотрудника ИРЭ Ю. В. Корниенко, длившихся зачастую далеко за полночь, родилась идея использовать это явление для уточнения размеров и формы диска Меркурия, применив методику измерения спектров мощности изображений с помощью когерентной оптики. К этому времени в одном из павильонов обсерватории уже была собрана первая когерентно-оптическая установка с гелий-неоновым лазером в качестве источника когерентного света. По первоначальному замыслу она предназначалась для работы по автоматизации анализа космических снимков лунной поверхности, выполнявшейся по заказу Института космических исследований АН СССР.

Поясним кратко, в чем состояла суть идеи наблюдения прохождения Меркурия. Предполагалось получить на нескольких инструментах огромное количество (несколько сотен тысяч) короткоэкспозиционных изображений диска Меркурия на фоне поверхности Солнца. Затем предполагалось использовать свойство тонкой сферической линзы при когерентном освещении формировать в фокальной плоскости преобразование Фурье от распределения амплитуд на ее апертуре. Меняя кадры с изображением объекта на входе устройства, можно было накапливать их Фурье-образы, получая в итоге оценку спектра мощности серии изображений. При этом использовался тот факт, что спектры мощности нечувствительны к случайным смещениям изображений, вызванным атмосферной турбулентностью, которые при длительных экспозициях вносят основной вклад в снижение разрешения полученного снимка. Кроме того, и из практики астрономических наблюдений, и из теоретических работ было известно, что в спектре мощности серии короткоэкспозиционных изображений содержится больше информации о тонкой пространственной структуре объекта, нежели в Фурье-

спектре одного изображения, полученного с экспозицией, эквивалентной суммарной экспозиции серии. Далее при обработке полученных спектров мощности предполагалось воспользоваться довольно мощной априорной информацией о характере объекта, а именно – идеально «черный» диск на идеально светлом фоне плюс априори абсолютно резкий край диска.

Проектом удалось заинтересовать академика А. Я. Усикова, занимавшего тогда пост директора ИРЭ АН УССР. Благодаря его поддержке и энтузиазму в реализацию проекта было вовлечено много людей в нескольких обсерваториях Союза. В Харькове на 70-см телескопе АЗТ-8 наблюдали сотрудники обсерватории Л. А. Акимов и О. М. Стародубцева. В ГАО АН УССР для наблюдений на 40-см горизонтальном солнечном телескопе поехали В. Н. Дудинов, А. Д. Егоров (АО ХГУ) и Ю. В. Корниенко (ИРЭ АН УССР). В Ташкент выехал В. Н. Уваров (ИРЭ). В итоге было отснято несколько километров киноплёнки, проявление которой оказалось отдельной проблемой, занявшей немало времени.

Можно понять нетерпение участников скорее подвергнуть отснятый материал обработке на когерентно-оптической установке. Однако уже первые попытки показали, что существующая установка, собранная «на скорую руку», несовершенна и нуждается в более аккуратном исполнении. В частности, оказалось, что подложка фотоплёнки содержит фазовые неоднородности, спектр Фурье которых искажает и полностью маскирует спектр обрабатываемого изображения. Стала понятной необходимость размещения плёнки в специальной кювете с иммерсионной жидкостью. Возникла проблема поиска подходящей иммерсионной жидкости и размещения в ней механизма протяжки плёнки. Наконец, стало понятно, что общепринятые требования к чистоте полировки оптических поверхностей и качеству стекла следует существенно повысить.

В итоге, как это часто бывает, когда нет возможности воспользоваться опытом предшественников, простой на первый взгляд замысел оказался сложной разработкой, сложной и в научном, и в инженерном плане.

Понятно, что такой оборот дела поставил молодых энтузиастов перед необходимостью как-то решить финансовую сторону дела. Астрономическая обсерватория ХГУ была мало-мощной организацией, поэтому пришлось снова обратиться к академику А. Я. Усикову, одной из характерных черт которого была способность с юношеским задором и энтузиазмом увлекаться новыми научными идеями. Он обещал оказать максимальную поддержку и предложил объединенной группе сотрудников ИРЭ и Астрономической обсерватории развернуть работы в помещении ИРЭ. В самом начале в нее вошли Ю. В. Корниенко, В. Н. Дудинов и В. С. Цветкова.

Здесь следует сделать небольшое отступление и напомнить, что это было время, когда продуктивность существовавших тогда электронных вычислительных машин (ЭВМ) значительно отставала от требований времени. Бытовало мнение, что их возможности, в частности быстродействие, приближаются к своему естественному пределу, обусловленному конечностью времени распространения электрических сигналов. Пессимизм относительно перспективности электронных вычислительных машин хорошо иллюстрирует приводимая ниже цитата, взятая из сборника статей зарубежных авторов «Оптическая обработка информации», переведенного на русский язык в 1966 г.: «Успехи в области оптических квантовых генераторов и волоконной оптики позволяют приступить к созданию «чисто оптических» цифровых вычислительных машин, быстродействие которых будет в десять – сто раз выше, чем у лучших современных электронных машин».

Если прибавить к этому отсутствие в то время цифровых матричных светоприемников и связанные с этим серьезные проблемы ввода информации в ЭВМ, становятся понятными и интерес к оптическим вычислительным устройствам, и возлагаемые на них надежды.

Возвращаясь к истории «операции Меркурий», отметим одно весьма существенное обстоятельство, носившее приметы того времени и определившее ее дальнейшее развитие. Несмотря на довольно плохое информационное обеспечение науки, характерное для того времени, было известно, что на западе интенсивно ведутся работы по развитию оптических методов и средств обработки информации. Было известно, что разработки когерентных оптических процессоров, предназначенных для обработки в реальном времени радиолокационных сигналов, ведутся еще с начала 50-х годов рядом крупнейших лабораторий и фирм США по контрактам с оборонными ведомствами. Известно было также, что на оптические когерентные процессоры на Западе возлагаются большие надежды по обра-

ботке больших массивов информации, поставляемых аэрофотосъемкой и искусственными спутниками Земли. Понятно, что по соображениям секретности технические подробности этих разработок в общедоступную научную литературу не поступали. Поэтому, когда в 1970 году в ИРЭ были развернуты работы по созданию когерентно-оптического процессора, пришлось все начинать «с чистого листа». Не было возможности опереться на существующие аналоги, на опыт предшествующих работ, не были известны подводные камни... Но одновременно была свобода от стереотипов мышления, неизбежно возникающих на проторенных научных дорогах. Как бы там ни было, к концу 1972 г. на 4 этаже нового здания ИРЭ АН УССР на ул. Академика Проскуры уже располагался уникальный когерентно-оптический процессор, предназначенный для обработки изображений и обладающий огромной по тем временам информационной пропускной способностью и низким уровнем когерентного шума.

Когда в 1974 г. вышла на русском языке монография К. Престона «Coherent optical computers», в которой были подробно описаны наиболее серьезные американские разработки, стало ясно, что отсутствие информации и ограниченность средств, как ни парадоксально, сослужили хорошую службу. Американские ученые пошли по пути создания дорогих многокомпонентных оптических объективов – и получили в итоге низкую точность вычислений, вызванную неприемлемо высоким уровнем когерентного шума. В харьковском процессоре когерентный шум был сведен к минимуму за счет существенного (в 8-10 раз и более) уменьшения числа оптических поверхностей – основных источников шума в когерентных процессорах. Это достигалось исключительно оригинальным решением оптической схемы процессора и конструкции его оптических элементов, которые выполняли одновременно две функции – иммерсионной кюветы и Фурье-преобразующего элемента. К тому же использование простейших сферических поверхностей с низкой светосилой существенно удешевляло устройство по сравнению с западными аналогами.

Как уже отмечалось выше, в 60-е годы существовала острая необходимость в оперативной обработке материалов космической и аэрофотосъемки. Возможности использовать для этого ЭВМ были ограничены отсутствием устройств считывания информации с первичных носителей и ввода ее в ЭВМ. Соответствующие организации готовы были платить большие деньги за выполнение их заказов, и естественно, возможности харьковского когерентно-оптического процессора не могли не привлечь их внимания. Однако известность и признание пришли не сразу. Вспоминается первый «выход в свет» на семинаре в Государственном оптическом институте в Ленинграде в конце 1972 г. В то время у них уже велись аналогичные работы, но благодаря лучшей информированности о состоянии дел на Западе (и лучшей финансовой обеспеченности), их сотрудники пошли по пути, проторенному западными учеными: многокомпонентные оптические элементы со сложными специально рассчитанными поверхностями, та же оптическая схема и, как следствие, – неприемлемо высокий уровень собственного шума процессора и высокая стоимость. Доклад В. Н. Дудинова о параметрах харьковского процессора вызвал вначале недоверие, затем растерянность. Потом начали спрашивать, разбираться... В конце концов оценили.

Вот как случилось, что первоначальный замысел «операции Меркурий» вылился, по сути, в крупную инженерно-техническую разработку, в ходе которой несколько сместился и центр тяжести научных интересов группы. Этому способствовал и тот факт, что к моменту завершения харьковского когерентно-оптического процессора актуальность работы по измерению размеров и формы диска Меркурия заметно снизилась благодаря успешной американской космической миссии к этой планете. К тому же простая на первый взгляд методика утонула во множестве мелких, но достаточно неприятных технических проблем, из-за которых было решено отложить завершение «операции Меркурий».

Однако в 1972 году о ней пришлось вспомнить, но уже в совершенно другом аспекте. Кто-то из сотрудников ИРЭ увидел статью французского астронома А. Лабейри, вышедшую еще в 1970 г., в которой был предложен так называемый метод спекл-интерферометрии, реализующий в условиях наземных наблюдений дифракционный предел разрешения крупных телескопов. Достаточно было беглого взгляда на эту статью, чтобы узнать в предложенном А. Лабейри методе идею, лежащую в основе замысла по измерению параметров диска Меркурия. Авторам «операции Меркурий» не хватило самой малости – показать, что при коротких экспозициях (0,01 секунды и меньше) изображение астрономического объекта содержит информацию вплоть до дифракционного предела разрешения используемого телескопа. В этой первой работе А. Лабейри даже методика обработки исходных снимков была такой же, как предполагалось при выполнении «операции Меркурий», – спектр

мощности серии изображений получался с помощью когерентно-оптического спектроанализатора.

Можно представить себе чувства тогдашних участников этих событий. Появилось естественное желание как минимум повторить работу Лабейри. Было понятно, что есть возможность выполнить измерения спектров мощности на более высоком уровне, так как в то время уже был готов спектроанализатор, который по своим параметрам превосходил тот, который использовал Лабейри, – это было ясно из приводимых в его статье изображений спектров мощности. Однако простые расчеты показали, что нет возможности получить соответствующий наблюдательный материал, – нет надлежащих светоприемников, нет телескопов достаточно большого диаметра. Советский 6-метровый телескоп тогда еще не был введен в эксплуатацию. Пришлось работу по спекл-интерферометрии звезд отложить до лучших времен. Прошло несколько лет, прежде чем это стало возможно, но об этом – чуть позже.

А пока пришлось заняться обработкой изображений более близких объектов. В 1972 г. советский космический аппарат «Марс-3» передал на Землю первые изображения поверхности Марса, полученные с помощью оптико-механического сканера. Качество изображений было низким как по чисто техническим причинам, так и вследствие низкого контраста поверхности из-за разыгравшейся в это время на Марсе глобальной пылевой бури. Полученные изображения были предоставлены для обработки в несколько организаций. Сотрудниками ИРЭ АН УССР и Астрономической обсерватории В. Н. Дудиновым, В. С. Цветковой и В. А. Кришталем была проведена огромная и весьма трудоемкая работа по «спасению» почти безнадежно испорченных снимков участков поверхности Марса. Результаты работы нашей группы среди попыток других коллективов были представлены в 1973 г. на конференции в Киеве, где они получили высокую оценку заказчика – Научно-исследовательского института приборостроения Министерства общего машиностроения (НИИП МОМ), разработчика оптико-механических сканеров. В результате с НИИП была достигнута договоренность о заключении хоздоговора на обработку материалов следующих космических миссий к красной планете, которые планировались в ближайшие годы.

Появилось приличное финансирование, которое позволило перенести работы по когерентно-оптической обработке космических изображений на загородную наблюдательную станцию Астрономической обсерватории. Целесообразность такого шага была обусловлена тем, что на новом месте когерентно-оптический процессор можно было расположить в цокольном этаже лабораторного корпуса, где он был полностью изолирован от техногенных источников вибраций и где можно было существенно уменьшить турбулентность воздуха на пути распространения пучка когерентного света.

К концу 1973 г. первый действующий макет когерентно-оптического процессора АО ХГУ был собран. В 1974 – 1978 г.г. проводилось его совершенствование и исследование, и одновременно выполнялись различные работы, связанные с обработкой изображений по заказам различных организаций. В эти годы далеко не всегда удавалось выбрать тематику хоздоговорных работ, которая была бы максимально близка к научным интересам группы (а это была все та же проблема видения сквозь турбулентную атмосферу), но особенно перебирать не приходилось. Чтобы оставаться на должном уровне, нужны были большие средства на оборудование, материалы, возникла необходимость в довольно многочисленном обслуживающем персонале, потребовались дополнительные научные кадры. Тематика хоздоговорных работ в эти первые годы была весьма широкой – от медицины (обработка рентгенограмм) и криминалистики (автоматизация дактилоскопических исследований) до обработки космических и аэрокосмических изображений. Из наиболее интересных законченных исследований отметим создание на базе процессора когерентно-оптического коррелятора – устройства для отождествления заданных деталей на фоне сложных сцен (Дудинов и др., 1977, Дудинов и Жилкин, 1978), разработку методики измерения спектров мощности оптических изображений (Александров и др., 1976, Дудинов и др., 1979), разработку методики линейной фильтрации и ее выполнение при решении широкого круга задач обработки оптических изображений, от обработки изображений астрономических объектов и повышения дешифрируемости космических и аэрофотоизображений поверхности Земли (Дудинов и др., 1974, Дудинов и др., 1977 а,б, Дудинов и Цветкова, 1981, Цветкова и Черный, 1984) до обработки наземных изображений искусственных спутников Земли. Результаты работ по восстановлению изображений ИСЗ по соображениям секретности, естественно, в открытой печати представлены никогда не были. Приведем одно из «несекретных» изображений объектов ближнего космоса (орбитальный комплекс «Мир-

Атлантис»), обработанное в 1995 г. по методике, разработанной В. Г. Вакуликом (рис. 2.11.1).

Хотелось бы также упомянуть работу по изучению статистики волнения моря, выполненную ныне покойным В. А. Кришталем по заказу очень закрытого предприятия. Цель работы – выяснить возможность обнаружения следов подводных лодок по вносимым ими возмущениям в характер волнения морской поверхности. Головной заказчик от результатов работы был в восторге. Результатом явилась успешная защита кандидатской диссертации одним из представителей Заказчика и создание у них точной копии нашего процессора. Кстати, годом или двумя раньше полный аналог нашего процессора был установлен в ЦКБ «Спектр» (Москва). Что же касается защиты диссертаций по нашей тематике, то наблюдается забавный баланс: наши сотрудники защитили две кандидатские диссертации и одну докторскую, и столько же диссертаций (и такого же ранга) защитили на материалах наших отчетов наши заказчики.

Отдельно отметим огромную работу по фильтрации панорам Марса, полученных в феврале 1974 г. советскими АМС «Марс-4» и «Марс-5». (Дудинов и др., 1980). Снимки, переданные на Землю по каналам связи, содержали различные помехи, которые снижали научную ценность результатов этой космической миссии, затрудняя морфологический анализ изображений поверхности красной планеты. С поставленной Заказчиком (НИИП МОМ) задачей, состоящей в устранении помех и повышении дешифрируемости полученных изображений, наша группа успешно справилась. Одновременно с нами повышением качества панорам поверхности Марса занималось несколько других групп – в Институте проблем передачи информации (Москва), в ГАО АН УССР (Киев) и в ИРЭ АН УССР. В этих институтах применялись уже цифровые методы обработки, эффективность которых в начале 70-х годов начала стремительно расти. Результаты «спасательных работ» по повышению дешифрируемости панорамных изображений красной планеты, выполненные всеми перечисленными коллективами, представлены в сборнике «Поверхность Марса», опубликованном в 1980 г. издательством «Наука» (Дудинов и др., 1980). На рис. 2.11.2 приведен фрагмент панорамного изображения поверхности Марса до обработки (а) и после устранения случайных и периодических помех (b).

До 1975 г. с когерентно-оптическим процессором АО ХГУ наиболее активно работали под руководством В. Н. Дудинова сотрудники НИЧ университета В. А. Криштал, Л. Ф. Шпилинский, А. Н. Гуренко, В. С. Цветкова, Н. П. Стадникова, выполнившие большую работу по созданию, наладке и исследованию (Дудинов и др., 1974, 1976а,б, 1977а,б). В 1975 г. были приняты на работу в качестве научных сотрудников выпускники кафедры астрономии ХГУ В. Г. Черный и С. Г. Кузьменков, и с тех пор, вплоть до окончания эпохи перестройки и начала развала экономики, наш научный коллектив пополнялся в основном за счет выпускников кафедры астрономии. В 1978 г. был зачислен на работу В. В. Коничек, в 1980 г. – В. Г. Вакулик, в 1983 г. – А. П. Железняк и в 1986 г. – Е. А. Плужник. Первым боевым крещением для В. В. Коничека и В. Г. Вакулика была спекл-интерферометрия, ей посвящены их дипломные работы. А. П. Железняк выполнил отличную дипломную работу по измерению коэффициента корреляции мгновенных изображений компонентов двойных звезд с помощью когерентного коррелятора. В 1977 г. к нам из радиофизического факультета университета перешел к.ф.-м.н. В. Д. Бахтин, а в 1980 г. наш коллектив пополнился талантливым инженером И. Е. Синельниковым, благодаря которому существенно расширились наши возможности по изготовлению приборов. Повторимся, что финансирование велось почти исключительно за счет большого объема хозяйственных работ, поэтому новые люди зачислялись в штат научно-исследовательской части (НИЧ) университета.

В эти годы спрос на наши работы среди потенциальных заказчиков был весьма велик, и поэтому у нас всегда была возможность выбирать хозяйственную тематику таким образом, чтобы одновременно удовлетворять свои научные интересы. В 1977 г. появилась возможность начать спекл-интерферометрию звезд на советском 6-метровом телескопе. В этом деле огромную моральную поддержку нам оказал академик С. Я. Брауде, который, в сущности, инициировал работу. В то время он активно занимался созданием Радиоастрономического института АН УССР и рассматривал возможность включения нашего коллектива в состав института. Его в особенности привлекли возможности когерентно-оптического процессора для обработки сигналов декаметровых телескопов с целью использования их в режиме интерферометра. В силу ряда причин сотрудничество в этом направлении дальше общих обсуждений не пошло, но вот для наших работ по спекл-интерферометрии С. Я. Брауде может по праву считаться крестным отцом. Первая наша работа по спекл-интерферометрии

звезд на БТА была представлена им в Докладах Академии наук УССР в 1979 г. (Дудинов и др., 1979). Были выполнены измерения угловых диаметров звезд-гигантов α Ori и α Boo, которые составили, соответственно, $0,043'' \pm 0,004''$ и $0,018'' \pm 0,004''$ на эффективной длине волны 660 микрон (Дудинов и др., 1980, Dudinov et al., 1982). До наших работ существовало три измерения диаметров этих звезд, выполненных методом спекл-интерферометрии в более коротковолновом диапазоне. Несмотря на использование зарубежными коллегами современных светоприемников и цифровой методики обработки (у нас спекл-изображения регистрировались непосредственно на фотопленку и обработка велась на когерентно-оптическом процессоре), наши результаты по точности им нисколько не уступали.

С тех пор спекл-интерферометрические наблюдения на 6-метровом телескопе велись регулярно: два раза в год мы посылали заявки на наблюдательное время и почти всегда его получали. С марта 1979 года наблюдения велись со спекл-камерой, включающей усилитель яркости УМ-92 с магнитной фокусировкой, а в 1981 году в нашем распоряжении появился трехкамерный ЭОП с фокусирующей системой на постоянных магнитах. Все работы велись совместно с сотрудниками Специальной Астрофизической обсерватории В. С. Рыловым и В. Н. Ерохиным. От нашей группы в наблюдениях и обработке участвовали В. Н. Дудинов, С. Г. Кузьменков, В. В. Коничек, В. С. Цветкова. В течение 1977 – 1981 г.г. были получены километры аэрофотопленки со спекл-изображениями звезд-гигантов и тесных двойных и кратных звездных систем, обработка которых выполнялась на когерентно-оптическом спектроанализаторе и была закончена только в 1984 – 1985 г.г. (Дудинов и др., 1986, Кузьменков, 1986). Причина столь низкого темпа обработки – в ее чрезвычайной громоздкости: проявление первичных снимков со строгим соблюдением фотометрического режима, изготовление позитивных копий – также с соблюдением необходимого режима проявления, затем размещение позитивной копии в иммерсионной кювете на входе спектроанализатора (обычно порядка 300 кадров) и, наконец, накопление квадратов спектров на фотопластинке в выходной плоскости спектроанализатора (снова-таки с тщательной фотометрической калибровкой). На рис. 2.11.3 приведено характерное спекл-изображение опорной (неразрешаемой) звезды, полученное на 6-м телескопе БТА, а на рис. 2.11.4 a,b – примеры спектров мощности спекл-изображений двойных звезд ADS175 AB (расстояние между компонентами $0,147''$) (a) и 26 Aug, расстояние $0,082''$ (b).

Окончательная обработка фотоснимков со спектрами мощности производилась уже в относительно комфортных кабинетных условиях с помощью микрофотометра. Всего было выполнено 42 измерения угловых разделений и позиционных углов для 28 двойных звезд, в том числе система ϕ Dra была впервые измерена методом спекл-интерферометрии, а система ADS 11149 была впервые идентифицирована как тройная. Итоги всей работы опубликованы в ряде публикаций, основные из которых указаны выше. Основным объемом работ был выполнен С. Г. Кузьменковым (в настоящее время – декан физического факультета Херсонского университета), который в 1986 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию по спекл-интерферометрии звезд на БТА. Несколько большие по объему и аналогичные по точности измерения были выполнены в эти же годы Мак-Алистером, который использовал существенно более удобные и совершенные матричные светоприемники, о которых тогда в Союзе можно было только мечтать.

К сожалению, несмотря на успешное развитие работ по спекл-интерферометрии, в силу ряда причин интенсивность наблюдений на БТА после 1981 г. снизилась. Во-первых, в CAO к этому времени сформировались группы с научными интересами, ориентированными на наблюдения весьма слабых объектов и привлекательными для зарубежных наблюдателей. Как следствие, возросло влияние сотрудников CAO на комитет по распределению времени на крупных телескопах Союза. Во-вторых, в CAO появилась конкурирующая группа, возглавляемая Ю. Ю. Балегой, которой удалось получить в свое распоряжение более современную зарубежную спекл-камеру, использующую светоприемник нового поколения. Наконец, новый усилитель яркости на постоянных магнитах, который появился в 1981 г., не оправдал возлагаемых на него надежд. Полученные с его помощью спекл-изображения имели неожиданно высокий уровень шума, что существенно затрудняло их обработку с помощью когерентно-оптического процессора, который эффективен только при выполнении линейной фильтрации. Уже для этой задачи возникла необходимость в применении цифровых методов обработки, которыми мы в то время не располагали, и поэтому было принято решение отложить обработку этих спекл-интерферограмм до лучших времен, которые, увы, так никогда и не наступили, по причинам как субъективного, так и объективного характера.

В силу названных выше обстоятельств, после 1982 г. получать наблюдательное время на БТА стало все труднее и труднее. Если раньше мы регулярно имели как минимум два наблюдательных сета в год, то после 1982 г. время выделялось далеко не каждый год. Разумеется, это было досадно, но одновременно создавало благоприятные условия для завершения обработки уже полученного материала и осмысливания ее результатов. Помимо чисто астрономического выхода (измерения угловых диаметров звезд-гигантов и позиционные измерения двойных и кратных звезд), наши работы по спекл-интерферометрии имели весьма полезный побочный продукт в виде исследований статистических свойств земной атмосферы как среды, искажающей наземные телескопические изображения. В конце 70-х – начале 80-х годов эта проблема приобрела чрезвычайную актуальность в связи с известной программой звездных войн и с разработкой и созданием (не у нас, а за рубежом) телескопов с адаптивной и активной оптикой. Было известно, что США интенсивно развивают средства для наземных наблюдений искусственных спутников Земли. Ходили слухи о фантастических успехах американцев в этом направлении. Естественно, Советский Союз не мог остаться в стороне. У нас также начали создаваться специальные комплексы для наблюдений ИСЗ. Так как при получении изображений ИСЗ можно было использовать только чрезвычайно короткие экспозиции, наш опыт по спекл-интерферометрии звезд оказался востребованным оборонными предприятиями страны. Сотрудничество оказалось взаимно выгодным: нам – вполне пристойное финансирование и астрономический выход, заказчикам – методика получения хороших изображений ИСЗ, ее обоснование и демонстрация возможностей на примере изображений астрономических объектов и в применении к реальным изображениям космических объектов.

Отработку методики получения высококачественных изображений ИСЗ было удобно проводить по малоразмерным объектам Солнечной системы – малым планетам и некоторым из больших планет, которые по своей поверхностной яркости и угловым размерам могут быть почти полными аналогами ИСЗ. Оставалась также актуальной спекл-интерферометрия двойных звезд на телескопах умеренного размера, которая, кроме чисто астрономического выхода, обеспечивала информацию о так называемой зоне изопланатизма искажений, вносимых атмосферой, по поводу размеров которой в те времена существовали заметные расхождения. Наш опыт спекл-интерферометрии на БТА позволял утверждать, что существующие оценки размеров области изопланатичности являются несколько пессимистическими. Между тем этот вопрос имел принципиальное значение для оценки перспектив развития методов видения сквозь турбулентную атмосферу. Было чрезвычайно важно проверить это при наблюдениях реальных объектов.

Для выполнения этих работ в 1983 г. был приобретен электронно-оптический преобразователь УМ-92, и силами сотрудников Астрономической обсерватории ХГУ В. Д. Бахтина, В. Г. Вакулика, А. П. Железняк, В. В. Коничека, И. Е. Синельникова и С. А. Степанова была создана спекл-интерферометрическая камера, с помощью которой были начаты на 70-см телескопе АЗТ-8 наблюдения широких звездных пар (Бахтин и др., 1987). Проведенные исследования показали, что метод спекл-интерферометрии можно успешно применять при наблюдениях двойных звезд с разделениями, по крайней мере, до 30", что существенно расширяло возможности этого метода и позволяло рассчитывать на точность измерений таких угловых разделений в несколько тысячных угловой секунды. Однако для достижения такой точности необходимо было существенно уменьшить погрешность измерения масштаба в фокальной плоскости светоприемника. Для устранения этого основного источника ошибок спекл-интерферометрии было разработано и изготовлено специальное устройство прецизионного определения масштаба (Бахтин и др., 1988).

В конце 1983 г. к нам обратились сотрудники Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР с предложением развернуть у них работы по спекл-интерферометрии двойных и кратных звезд в применении, в частности, к системам разлетающихся звезд типа Трапеции Ориона. Предложение показалось чрезвычайно интересным, и за работу с энтузиазмом взялись В. В. Коничек и В. Д. Бахтин. Уже в конце 1984 г. они установили на телескопе АЗТ-11 Абастуманской астрофизической обсерватории спекл-камеру с четырехкамерным электронно-оптическим преобразователем УМ-93 и выполнили первые наблюдения. К концу 1987 г. на телескопе АЗТ-11 был смонтирован комплекс аппаратуры для прецизионных измерений расстояний между компонентами широких звездных пар, включающий устройство прецизионного измерения масштаба, и выполнены его исследования. Можно было начинать регулярные наблюдения. Но в это время уже начался процесс

дезинтеграции Советского Союза. В 1988 г. в Грузии произошли первые беспорядки. Тем не менее, В. В. Коничек и В. Д. Бахтин пытались продолжать успешно начатую работу даже после Беловежских событий, когда к политическим беспорядкам добавился финансовый коллапс, нанеший невосполнимый урон науке во всех без исключения республиках бывшего Союза. Их последний визит в Грузию состоялся в 1993 г.

Но вернемся к 80-м годам, когда мы интенсивно занимались проблемой получения высококачественных изображений ИСЗ и когда хоздоговорных денег хватало и на обслуживание заказчиков, и на удовлетворение своих научных интересов. Как уже упоминалось, отработку методики получения изображений ИСЗ было удобно проводить по объектам Солнечной системы.

В 1981 – 1982 г.г. у нас установились тесные научные связи с группой С. Б. Новикова из Государственного астрономического института им. Штернберга, который в это время уже имел на горе Майданак в Узбекистане наблюдательную базу, оснащенную несколькими телескопами. Интенсивно велись работы по монтажу 1,5-м телескопа АЗТ-22, предназначенного именно для получения астрономических изображений высокого качества. Его оптика должна была иметь практически дифракционное разрешение, башня и купол были снабжены специальной системой терморегуляции и вентиляции для максимального снижения влияния на качество изображений подкупольного и околокупольного пространства.

В лице С. Б. Новикова и его сотрудников мы нашли единомышленников и соратников по проблеме, которая в равной степени волновала их и нас. Они знали, как обеспечивать максимально высокое качество при получении исходных изображений, и имели соответствующие инструменты. У нас было к этому времени чем регистрировать изображения (мы имели спекл-камеры на базе ЭОП) и был опыт и средства улучшения качества полученных изображений. Сотрудничество получилось взаимно выгодным и вылилось в ряд совместных исследований и совместных публикаций (Дудинов и др., 1987, 1989, Вакулик и др., 1989, Дудинов и др., 1990, Dudinov et al., 1990, Tsvetkova et al., 1991 a,b, Вакулик и др., 1990).

Наиболее интересная работа этого периода связана с наблюдениями астероида 4 Веста в оппозицию 1988 г. На 1-м телескопе, установленном на горе Майданак, с помощью спекл-камеры на базе трехкамерного ЭОП были получены серии короткоэкспозиционных изображений этой малой планеты. Выполнены классические спекл-интерферометрические измерения, позволяющие по измеренным спектрам мощности определить с дифракционным разрешением угловой диаметр объекта с использованием разумной модели распределения яркости по ее диску. Продемонстрированы характерные ошибки классического варианта спекл-интерферометрии в случае, когда реальный вид объекта значительно отличается от использованной модели. Поэтому основные усилия были направлены на разработку методов синтеза дифракционных изображений диска Весты из данных спекл-интерферометрии. К этому времени было предложено несколько методов решения этой задачи, но все они требовали применения цифровых методов обработки, которыми мы в то время еще не располагали. Так как исходные спекл-интерферограммы были зарегистрированы все еще на фотографическом носителе, наиболее «узким» местом было представление их в цифровом виде для последующего ввода в ЭВМ. Поэтому вначале был использован метод восстановления, допускающий использование аналоговой техники, – так называемый метод сдвига и суммирования. Он основан на предположении, что каждое изолированное, превалирующее по яркости пятно в спекл-изображении можно рассматривать как дифракционное изображение объекта. Метод применим для случая, когда размер объекта не намного превосходит размер дифракционного изображения звезды. Именно этим методом были восстановлены первые изображения диска Весты с дифракционным разрешением 1-метрового телескопа, равным $0,13''$ (Вакулик и др., 1989, Tsvetkova et al., 1991a,b).

Параллельно Е. А. Плужник под руководством В. Н. Дудинова разрабатывал новый оригинальный метод восстановления из спекл-данных дифракционно ограниченных изображений объекта с использованием экспоненциальных множителей, требующий для своей реализации применения цифровой техники. Основные положения метода изложены в статье 1988 г. (Дудинов и Плужник, 1988), результат же его применения к реальным спекл-изображениям был получен и опубликован значительно позже (Вакулик и др., 1994, Дудинов и др., 1994). Причина такой задержки – уже упоминавшееся отсутствие устройства сканирования исходных серий, необходимого для оцифровки большого количества кадров (не менее 100) для последующего ввода в ЭВМ. В 1985 г. такое устройство, созданное в ГАО АН УССР под

руководством В. Г. Парусимова, уже функционировало, но было чрезвычайно загружено. Только в конце 80-х годов Е. А. Плужнику удалось получить время и просканировать спекл-интерферограммы.

На диске Весты, восстановленном методом экспоненциальных множителей (рис. 2.11.5), отмечаются детали, похожие на детали изображения, восстановленного аналоговым методом «сдвиг-и-сумма» с использованием того же наблюдательного материала, однако качество восстановления бесспорно лучше (более четкий край диска, выше отношение сигнал/шум). Несколько позже Космический телескоп Хаббла получил очень похожее изображение при близкой фазе вращения. Работа Е. А. Плужника явилась основательным вкладом в решение так называемой фазовой проблемы в оптике, и в 1996 г. он блестяще защитил кандидатскую диссертацию. В дальнейшем Е. А. Плужник, оставаясь сотрудником нашего отдела, много и плодотворно работал в области спекл-интерферометрии звезд в Специальной Астрофизической обсерватории РАН, где его талант астрофизика-теоретика был по достоинству оценен. В настоящее время Е. А. Плужник работает на телескопе Кек (Гавайи).

Из других работ, выполненных в 80-х годах совместно с хозяевами Майданака, можно упомянуть новые данные по структуре околядерной зоны галактики NGC 1275, свидетельствующие о том, что имеет место взаимодействие двух галактик (Дудинов и др., 1990, Dudinov et al., 1990). По материалам спекл-интерферометрии на 1-метровом телескопе выполнено восстановление методом спекл-голографии двух тесных компонентов тройной системы ζ Спс, расстояние между которыми составляет около половины угловой секунды (Дудинов и др., 1994). В ноябре-декабре 1985 г. – совместное участие в кампании международного мониторинга кометы Галлея «International Halley Watch». Обработка позволила существенно повысить точность позиционных измерений и проследить за динамикой быстрых процессов в околядерной зоне кометы (Дудинов и др., 1989). Богатейший материал по динамике облачных образований в атмосфере Юпитера был собран в середине 80-х годов на Майданаке В. Г. Черным (1986). Во время противостояния Марса в декабре 1992 г. были получены с помощью ЭОП серии изображений в трех фильтрах. Их обработка, выполненная уже с применением цифровых методов, позволила получить цветные изображения красной планеты с разрешением, составившим достойную конкуренцию аналогичным изображениям, полученным примерно в то же время Космическим Телескопом им. Хаббла. К сожалению, мир об этом не узнал, так как наш результат был опубликован с заметным опозданием, и к тому же в малоизвестной за рубежом «Кинематике и физике небесных тел» (Дудинов и др., 1994). Для нас, однако, эти великолепные картинки являются знаковыми, так как с них можно вести исчисление нашего перехода к цифровым методам обработки астрономических изображений: в 1992 г. В. Г. Вакулик, А. П. Железняк, В. В. Коничек, Е. А. Плужник и И. Е. Синельников вместе с сотрудником другого отдела В. В. Корохиным создали быстрый микрофотометр на базе ПЗС-линейки, предназначенный для быстрого ввода фотографических изображений в ЭВМ (Вакулик и др., 1994). С его помощью были просканированы изображения Юпитера, полученные на Майданакском 1,5-метровом телескопе во время падения фрагментов кометы Шумейкера-Леви 9 (Dudinov et al., 1995), приведенные на рис. 2.11.6.

Но как стремителен в нашу эпоху технический прогресс! Уже в 1995 г. необходимость в микрофотометре, сканирующем фотографические изображения для их последующего ввода в ЭВМ, практически отпала. В распоряжении астрономов стали появляться ПЗС-камеры, стали доступны персональные компьютеры с параметрами, о которых раньше нельзя было даже мечтать. Свои первые наблюдения с ПЗС-камерой Pictor-416 (кстати, камера любительская) мы провели в 1995 г., но это уже начало совершенно другой истории.

Сейчас когерентно-оптический процессор АО ХГУ, занесенный в реестр объектов, составляющих национальное достояние Украины, живет новой жизнью, совершенно отличной от той, с которой он начинался. В свое время, когда возможности электронной вычислительной техники были весьма ограничены, он был незаменим при получении высококачественных изображений астрономических объектов, и благодаря ему нам удалось выполнить ряд действительно красивых исследований, среди которых и спекл-интерферометрия звезд на 6-м телескопе БТА, и дифракционные изображения Весты, и обработанные панорамы Марса, и многое другое, о чем речь шла выше. Но в этом кратком рассказе не затронуто еще одно чрезвычайно важное свойство процессора, которое не нашло отражения и в наших публикациях. Это – возможность с его помощью быстрой и

наглядной иллюстрации и моделирования практически любых явлений, связанных с электромагнитными свойствами излучения. Его роль в углублении фундаментальных физических знаний студентов (да и начинающих научных сотрудников) трудно переоценить. Один день «игры» с когерентно-оптическим процессором заменяет месяцы обучения студентов многим непростым научным истинам, и именно поэтому заведующий кафедрой астрономии А. М. Грецкий каждый год часть времени летней практики студентов-астрономов посвящает их знакомству с процессором.

В заключение отметим, что в 1986 г. за цикл работ по аналоговой и цифровой технике обработки астрономических изображений четыре сотрудника Астрономической обсерватории – В. Н. Дудинов, В. С. Цветкова, Д. Г. Станкевич и Ю. Г. Шкуратов вместе с тремя сотрудниками из ИРЭ АН УССР и ГАО АН УССР были удостоены Государственной премии УССР.

... и дальше – к галактикам и квазарам

Бурное развитие вычислительной техники стимулировало развитие новых, более эффективных нелинейных методов восстановления изображений. Результаты по Весте (рис. 2.11.5), падению на Юпитер кометы Шумейкер-Леви 9 (рис. 2.11.6), великолепные изображения Марса (рис. 2.11.7) были получены уже с использованием цифровых методов обработки изображений.

Успешное применение методов наблюдения с высоким угловым разрешением к объектам Солнечной системы (планеты и астероиды) и галактическим объектам (спекл-интерферометрия звезд-гигантов) стимулировало естественное желание заглянуть подальше. Марс, Юпитер, Веста, галактические объекты, звезды-гиганты, что дальше? А дальше – другие галактики.

Ядра активных галактик – достаточно динамичные объекты, как правило, со сложной пространственной структурой – стали новыми объектами применения методов обработки изображения, развиваемых в отделе. Как оказалось, это был очередной этап перехода к исследованию самых удаленных объектов Вселенной – квазаров.

Теоретические работы по исследованиям эффектов гравитационного линзирования, появившиеся вновь в печати в конце 60-х – начале 70-х годов, не вызвали у нас особого интереса. И даже сообщения о возможности наблюдения «гравитационных космических миражей» – причудливых искажений изображений удаленных космологических объектов гравитационными полями более близких галактик, не вызвали доверия. Для многих из нас, вначале, это сообщение показалось очередным «открытием» теоретиков, представляющим скорее чисто академический интерес. Однако в 1979 г. теоретические предсказания получили блестящее подтверждение – появилось сообщение о наблюдении первого гравитационно-линзированного квазара Q0957+561 [1]. В последующие годы открывается еще несколько гравитационно-линзированных квазаров (ГЛК). Становится очевидным, что открыт новый тип астрономических объектов – «гравитационные линзы», для исследования которых необходимы наблюдения с высоким угловым разрешением. Непривычное сочетание слов – «гравитационная» – что-то из области строгой теории с интегралами и тензорами, и такое знакомое и понятное для экспериментаторов и наблюдателей – «линза», не могло не привлечь наше внимание. Проблема гравитационного линзирования становится темой, широко обсуждаемой на семинарах и в личных беседах сотрудников отдела методов обработки изображений.

Первые теоретические исследования эффекта гравитационной фокусировки в бывшем СССР были начаты П. В. Блюхом и А. А. Минаковым в отделе распространения радиоволн и ионосферы ИРЭ АН УССР еще в 1973 г., задолго до экспериментального обнаружения в 1979 г. первой гравитационной линзы. Основным результатом многолетних исследований явилась первая в мире монография [2], вышедшая из печати в 1989 г. и посвященная эффекту гравитационной фокусировки. В своей книге авторы привели интересные исторические факты и подвели итоги исследований гравитационных линз на конец 80-х годов XX столетия. Из механики Ньютона следовало, что свет – корпускула, как и все материальные тела, должен испытывать влияние поля тяготения, т.е. притягиваться к массивному объекту, например, Солнцу. Расчеты, проведенные немецким астрономом Зольднером в 1801 г. [3], показали, что луч света при своем прохождении вблизи края диска Солнца должен отклониться на угол $\theta \approx 0,87''$. В 1915 г. Эйнштейн, в рамках создаваемой им общей теории относительности, уточнил этот результат. Он показал, что результат

должен быть в два раза больше, т.е. $\theta \approx 1,75''$ [4]. Лодж в 1919 г. [5] обратил внимание на то, что лучи, огибающие Солнце со всех сторон, могут создать линзовый эффект. Хотя Лодж и возражал против термина «линза» из-за ее «ненормальных» свойств, тем не менее, он первый употребил это название применительно к фокусировке излучения полем тяготения.

До конца 80-х годов XX столетия теория ГЛ в основном была построена, хотя некоторые вопросы требовали еще своего решения. Многолетние исследования показывали, что имеется немалая вероятность обнаружения линзового эффекта на полях тяготения массивных галактик. И действительно, в 1979 г., как раз вовремя, и была обнаружена первая ГЛ – двойной квазар $Q\ 0957+561A,B$ [1]. Именно в этот период в строй вступили крупные оптические и радиотелескопы с высоким угловым разрешением. Можно сказать, что открытие первой гравитационной линзы не было случайным событием, а явилось результатом предсказания многолетних теоретических исследований и стремительного развития наблюдательной техники. Открытие первой ГЛ стимулировало целенаправленный поиск и наблюдения других линзированных объектов, и все большее число обсерваторий подключалось к этим исследованиям.

Тогдашний начальник Майданак С. Б. Новиков, обратив внимание на результаты наших наблюдений с ЭОП активных ядер галактик, предложил попробовать применить эту же методику к наблюдениям ГЛК. В апреле 1989 г. на 1-метровом телескопе Цейсс-1000 (гора Майданак) были проведены наблюдения ГЛК $MG1131+0456$. Этот объект был открыт в 1988 г. в радиодиапазоне как кольцеобразная структура с угловым диаметром порядка $2''$ и получил название «Кольцо Эйнштейна». К моменту наших наблюдений объект в оптическом диапазоне не был отождествлен. Несмотря на небольшой телескоп и достаточно архаичную светоприемную аппаратуру и вычислительную технику (мини-ЭВМ «Наири К»), нам удалось обнаружить объект примерно $22''$ в фильтре R. Изофоты изображения отличались от изображений точечных источников, указывая на протяженную структуру объекта, несколько вытянутую в направлении северо-восток – юго-запад. Структура содержала две конденсации яркости, что можно было интерпретировать как наличие двух компонентов в изображении $MG1131+0456$ (Вакулик и др., 1990). Следует отметить, что наблюдения $MG1131+0456$ в ближней инфракрасной области на 10-метровом телескопе в 1993 году [6] обнаружили два компонента с угловым разделением порядка $2''$, подтвердив тем самым наши предварительные оценки. Наш результат, опубликованный в небольшом сообщении в АЦ, по-видимому, является первым результативным наблюдением ГЛК, проведенным в СССР.

Помимо наблюдений $MG1131+0456$, на 1-метровом телескопе Цейсса на горе Майданак в 1989 – 1992 г.г. наблюдались и другие ГЛК – $Q2237+0305$, $Q0957+561$, $PG1115+080$, $H1413+117$. Наблюдения проводились с использованием ЭОП УМ-92, позволяющего регистрировать на фотопленке изображение ГЛК с экспозициями 40 – 60 секунд. Как правило, для каждого объекта регистрировалось 40 – 60 таких изображений. Применение достаточно коротких экспозиций несколько снижало требования к точности системы гидирования телескопа. В дальнейшем изображения вводились в компьютер с помощью специально разработанного для этих целей скоростного микрофотометра, (Вакулик и др., 1994), и с применением численных методов синтезировались усредненные высокоинформативные изображения, которые позволяли проводить улучшение качества зарегистрированных изображений – их восстановление. Такая методика позволяла реализовать достаточно высокую квантовую эффективность ЭОП порядка нескольких процентов, что заметно выше квантовой эффективности лучших астрономических фотоэмульсий. Наши наблюдения ГЛК главным образом были ориентированы на исследование тонкой структуры их изображений и на обнаружение линзирующих галактик. Однако когда к решению этих задач был подключен Космический телескоп Хаббла с угловым разрешением $0,04''$, наземным наблюдениям стало трудно выдерживать с ним конкуренцию.

В то же время, уже первые регулярные наблюдения $Q2237+0305$ и $Q0957+561$ показали, что эти столь удаленные объекты достаточно «живые» и динамичные – наблюдаются изменения блеска их компонентов на интервалах в несколько лет или даже месяцев [7]. Причиной этих вариаций являются события микролинзирования, проявляющиеся в локальных усилениях блеска отдельных компонентов ГЛК объектами линзирующей галактики – звездами и/или планетами. Из-за наличия относительного движения системы «квазар – линзирующая галактика (линза) – наблюдатель» видимые положения расщепленных макро-

линзой – галактикой изображений в разные моменты времени различным образом проектируются на плоскость галактики, как бы сканируют ее изображение. При этом, если в какой-то момент вблизи луча зрения в направлении на один из компонентов окажется объект галактики (звезда или иная компактная масса), его изображение дополнительно линзируется этим объектом. Возникающие при этом расщепления компонентов порядка нескольких угловых микросекунд не могут наблюдаться современными средствами. Однако изменения блеска, сопутствующие этому явлению, оказываются достаточно заметными и могут быть зарегистрированы при фотометрии такого объекта. Частота таких событий определяется относительной поперечной скоростью системы «квазар – линза – наблюдатель» и поверхностной плотностью объектов, а количественно наблюдаемые изменения блеска определяются массами линзирующих объектов и существенным образом зависят от углового размера линзируемого источника. Наблюдения событий микролинзирования предоставляют уникальную возможность измерения характерного размера квазара и изучения характеристик объектов линзирующей галактики с угловым разрешением, недоступным никаким другим методам.

Особо стоит отметить еще один важнейший астрофизический аспект применения эффекта гравитационного линзирования – измерения постоянной Хаббла. Если собственный блеск линзируемого объекта (квазара) изменяется во времени, эти изменения будут наблюдаться в каждом из его линзированных компонентов. Так как лучи света, формирующие изображения компонентов, распространяются по разным оптическим путям, вариации блеска источника будут наблюдаться в его линзированных изображениях не одновременно, а с некоторым запаздыванием (или опережением) относительно друг друга. Имея достаточно точные кривые блеска компонентов, можно получить оценки времени запаздывания. Если при этом измерены красные смещения объекта и гравитационной линзы и известно распределение массы в линзе (построена модель линзы), можно получить теоретические оценки ожидаемых времен запаздывания. Сравнение ожидаемых и измеренных времен запаздывания позволяет оценить постоянную Хаббла.

Решение этих задач требует получения продолжительных регулярных рядов оценок блеска компонентов – проведения программ мониторинга ГЛК, требующих значительных затрат наблюдательного времени. Из-за высокой стоимости наблюдательного времени Космического телескопа и наиболее крупных наземных телескопов проведение таких программ может быть осуществлено только на наземных телескопах умеренного размера, установленных в местах с наилучшим астроклиматом. С этой точки зрения обсерватория на горе Майданак представляется идеальным астропунктом для проведения регулярных фотометрических наблюдений с высоким угловым разрешением, необходимых для мониторинга ГЛК.

Становится очевидным, что регулярный фотометрический мониторинг ГЛК является актуальной задачей наземных наблюдений. Однако, как правило, эти объекты достаточно компактны ($1''$ – $2''$), изображения их компонентов даже при наилучших атмосферных условиях в значительной степени перекрываются друг с другом, поэтому оценки их блеска не могут быть получены простой апертурной фотометрией. Чтобы разделить (оценить) относительный вклад каждого компонента, необходимо знать характер распределения освещенности в изображениях точечных объектов – функцию рассеяния точки, т.е. фактически разделить систему на компоненты. Зачастую дополнительную проблему при фотометрии представляет линзирующая галактика, изображение которой накладывается на изображения линзированных компонентов квазара. Таким образом, фотометрическая задача ГЛК, по сути, становится адекватной задаче восстановления их изображений.

Однако применению ЭОП для фотометрических исследований препятствовали высокий уровень его собственных шумов и значительная и непостоянная во времени неоднородность чувствительности по фотокатоду. Чрезвычайно малое поле зрения ЭОП практически исключало возможность одновременной регистрации в кадре изображений звезд, которые могли быть использованы как вторичные стандарты. С конца 70-х годов на Западе в практику астрономических наблюдений начали внедряться светоприемники нового типа – приборы с зарядовой связью (ПЗС). Благодаря высокой квантовой эффективности и фотометрической стабильности ПЗС, их применение заметно повысило точность и эффективность астрономических наблюдений. Уже первые программы мониторинга ГЛК проводились с использованием ПЗС-приемников, что позволяло получить фотометрическую точность в несколько процентов для компонентов ГЛК 18^m – 19^m . Рассчитывать на приобре-

тение столь дорогостоящего приемника в середине 90-х годов в условиях жесточайшего экономического кризиса в Украине не приходилось, и дальнейшие перспективы этой работы представлялись достаточно неопределенными.

Однако проблема гравитационного линзирования уже прочно вошла в круг научных интересов сотрудников отдела. Ко всему прочему оказалось, что все знающие и все могущие объяснить теоретики находятся совсем рядом – в Радиоастрономическом институте НАНУ. Как уже отмечено ранее, в РИ НАНУ, в отделе, возглавляемом П. В. Блюхом, теоретические исследования проблем гравитационного линзирования проводились с 1973 года. Тесные научные и личные контакты сотрудников отдела методов обработки изображений с теоретиками из РИ НАНУ установились с 1988 г. Эти контакты не только позволили более определенно очертить круг наиболее интересных проблем, связанных с исследованиями гравитационного линзирования, но и стимулировали новые попытки наблюдений ГЛК.

Не теряя надежды на возможность дальнейшего проведения наблюдений ГЛК в условиях астроклимата горы Майданак, сотрудники НИИ астрономии А. П. Железняк, В. В. Коничек, И. Е. Синельников под руководством В. Н. Дудинова всячески пытались поддерживать техническое состояние телескопа АЗТ-22, оказывая узбекским коллегам помощь в его обслуживании и юстировке. В одной из таких поездок в сентябре 1995 г. В. Н. Дудинов встретился в обсерватории Майданак с Петером Нотни, сотрудником Потсдамского астрофизического института, который проводил наблюдения галактик с ПЗС Pictor-416. По предложению В. Н. Дудинова на этой ПЗС-камере было получено несколько изображений Q2237+0305.

Этот удивительно красивый объект – четыре попарно-симметричных звездообразных изображения вокруг ядра достаточно яркой и протяженной галактики (рис. 2.11.8), уверенно разделился на компоненты при высоком атмосферном качестве г. Майданак и вызвал искренний восторг и интерес у Петера. В течение трех последующих ночей, даже с некоторым ущербом для наблюдательной программы П. Нотни, были получены серии VRI-изображений Q2237+0305.

Предварительная обработка полученных изображений была выполнена в Потсдаме Петером Нотни, и для дальнейшей фотометрии отдельные фрагменты изображений были переданы в Харьков по электронной почте. В Харькове, в отделе методов обработки изображений, был разработан специальный алгоритм и программа для фотометрии этого сложного объекта. Однако полученные результаты VRI-фотометрии оказались весьма неожиданными – показатели цвета (V-R), (R-I) и (V-I) компонента В (как ожидалось, более «красного») оказались меньше показателей цвета компонента А. Как впоследствии стало понятно, был обнаружен новый важный результат, поэтому остановимся на вопросе о цвете компонентов Q2237+0305 более подробно.

Уже первые результаты фотометрии компонентов Q2237+0305, полученные в 1988 г. Йи [8] в фильтрах gri фотометрической системы Ганна, обнаружили заметное различие показателей цвета его компонентов. Так как показатели цвета компонентов систематически увеличивались по мере приближения их положений к центру линзирующей галактики, Йи предположил, что их наблюдаемые различия – результат селективного ослабления света компонентов веществом линзирующей галактики. На двухцветной диаграмме (g-i)-(g-r) значения показателей цвета компонентов расположились практически на прямой линии, что также подтверждало предположение Йи. Мало того, наклон линии покраснения на этой диаграмме оказался близким к наклону на аналогичной диаграмме, построенной по звездам нашей Галактики, что указывало на близость закона поглощения света в нашей Галактике и в галактике Q2237+0305, по крайней мере, в визуальной области спектра.

Эффект гравитационного линзирования не должен приводить к появлению каких-либо цветовых эффектов – фотоны разной энергии отклоняются гравитационным полем на один и тот же угол. Однако, еще в 1986 г. Кайзер с коллегами [9] обратили внимание, что, если линзируемый источник имеет температурный (а, следовательно, и цветовой) градиент вдоль радиуса, эффективный размер такого источника будет разным в разных длинах волн. Так как количественно увеличение блеска при микролинзировании источника зависит от его эффективного размера, при наблюдении в разных фильтрах возможно появление вариаций показателей цвета. Впервые этот эффект был проанализирован в численных модельных экспериментах в работе И. Вамбсгансса и Б. Пачински [10].

Незначительные вариации показателя цвета (B-r) компонентов Q2237+0305 были обнаружены в рамках первого мониторинга этого объекта в 1986 – 1989 г.г. [7]. Однако количественно эти изменения цвета незначительно превышали ошибки измерений, и

авторам не удалось выявить систематический характер этих изменений.

К моменту наших первых наблюдений Q2237+0305 объяснение полученных Ии систематических различий цветов компонентов селективным поглощением веществом линзирующей галактики представлялось неизбежным. Согласно результатам фотометрии Ии, показатели цвета компонента А, наиболее удаленного от ядра галактики, оказались наименьшими, $(g-i) = -0,08^m$ относительно компонента В. Согласно нашим измерениям, более «красным» оказался компонент А – его показатель цвета $(V-I)$ оказался равным $+0,12^m$ по отношению к показателю компонента В.

Хотя сами значения обнаруженных изменений относительных показателей цвета компонентов А и В заметно превосходили ошибки их измерений, убежденность в ахроматичности эффектов микролинзирования была настолько велика, что мы долго не могли поверить полученному результату и тщетно пытались обнаружить ошибки в программе фотометрии или самой идеологии используемого алгоритма. Нотни даже высказал предположение, не перепутал ли В. Г. Вакулик, непосредственно занимающийся фотометрией Q2237+0305, его компоненты А и В местами. Впрочем, посмотрев на левое верхнее изображение Q2237+0305 на рис. 2.11.8, легко понять, что такое предположение не лишено оснований: система на момент наблюдений выглядит очень симметричной, а в нашем распоряжении были только небольшие фрагменты ПЗС-изображений, содержащие сам объект и звезду для оценки ФРТ.

Тщательные и многократные проверки подтвердили – ошибки нет, мы наблюдаем вариации показателей цвета компонентов. Статья с результатами фотометрии была направлена в печать, получила положительную рецензию И. Вамбсгансса и была опубликована в 1997 г. (Vakulik et al., 1997). В дальнейшем, результаты VRI-фотометрии изображений Q2237+0305, полученных на 2,4-метровом телескопе на острове Ла Пальма на месяц позже наших наблюдений [11], полностью подтвердили инверсию показателей цвета компонентов А и В.

Таким образом, с первой попытки был получен важный и интересный результат – в ГЛК, помимо вариаций блеска компонентов, наблюдаются заметные вариации их показателей цвета. Теперь предстояло выяснить, что является причиной этих вариаций, и проследить их возможную связь с событиями микролинзирования компонентов. Для исследования микролинзирования дальнейшие наблюдения Q2237+0305, кроме мониторинга в фильтре R, проводились также в фильтрах VRI.

Во многом благодаря успешным наблюдениям Q2237+0305 в 1995 г. и полученным интересным результатам было прорублено окно в Европу – наши сотрудники в 1997 г. были приглашены для участия в симпозиуме по гравитационному линзированию, проводимому Институтом астрофизики в Осло. В работе симпозиума приняли участие А. П. Железняк и сотрудник РИ НАНУ В. Н. Шаляпин. Были сделаны доклады об обсерватории Майданак и о работах, проводимых в отделе методов обработки изображений НИИ астрономии, а также о теоретических исследованиях эффектов ГЛ, проводимых в РИ НАНУ под руководством П. В. Блюха и А. А. Минакова. Были установлены контакты с мэтром европейского гравлинзирования Сьюром Рефсдалом и другими известными специалистами – Р. Стабелем, Д. Сюрдежем, И. Вамбсганссом. В Осло состоялось также знакомство с известным американским астрофизиком-наблюдателем, сотрудником Гарвард-Смитсоновского Астрофизического центра (США) Рудольфом Шилдом. С этого момента доброжелательный, энергичный, постоянно заряженный новыми идеями Руди становится на многие последующие годы нашим постоянным соавтором и надежным партнером. О его заметной роли в становлении наших исследований ГЛК мы скажем еще не раз.

В 1997 г. В. Н. Дудинову и А. А. Минакову, благодаря активной поддержке директора Института радиоастрономии НАНУ Литвиненко Л. Н., удалось инициировать долгосрочную научно-техническую программу «Развитие наблюдательной базы оптической астрономии на горе Майданак», которая была утверждена на уровне Министерства по делам науки и технологии Украины. В рамках этого проекта, помимо модернизации телескопа АЗТ-22, предполагались наблюдения и исследования ГЛК. Таким образом, программа по наблюдению ГЛК впервые получила финансовую поддержку, позволяющую проводить хотя бы эпизодические наблюдения этих объектов на телескопе АЗТ-22 на горе Майданак.

В рамках этой программы 30% наблюдательного времени телескопа АЗТ-22 предоставлялось для мониторинга ГЛК, но, чтобы обеспечить эффективную загрузку телескопа и организовать регулярные наблюдения, было необходимо дополнительное финансирование. Актуальной также оставалась проблема приобретения для телескопа АЗТ-22 совре-

менной ПЗС-камеры. Поэтому, в 1996 г. совместно с Институтом радиоастрономии НАНУ была подана заявка в международный фонд исследований и развития (CRDF). В рамках предложенного проекта были заявлены регулярные высокоточные наблюдения нескольких ГЛК с целью обнаружения и последующего анализа событий микролинзирования их компонентов. Руководителем проекта с украинской стороны согласился быть профессор РИ НАНУ Павел Викторович Блюх, один из авторов первой отечественной монографии «Гравитационные линзы» [2]. С американской стороны быть руководителем проекта любезно согласился профессор Принстонского университета (США) Богдан Пачински, известный специалист в области гравитационного линзирования, который к этому времени уже был лично знаком с В. П. Блюхом и А. А. Минаковым. Благодаря высокому научному авторитету руководителей проекта и приложенным к заявке прекрасным изображениям Q2237+0305, полученным на горе Майданак, он был одобрен и получил финансовую поддержку, которая позволяла обеспечить регулярные наблюдения ГЛК на протяжении двух лет.

В состав участников проекта вошли сотрудники отдела методов обработки изображений НИИ астрономии (руководитель В. Н. Дудинов) и сотрудники отдела космической радиофизики РИ НАНУ, руководимого А. А. Минаковым. Руководитель проекта, Павел Викторович Блюх, несмотря на плохое в то время состояние здоровья, оставался генератором идей и душой команды. Таким образом, сложился научный коллектив, способный проводить комплексные исследования ГЛК, начиная с наблюдений и фотометрии этих объектов, до интерпретации результатов наблюдений и теоретических исследований.

Неожиданно временно решилась проблема светоприемника для телескопа АЗТ-22. В 1996 году для мониторинга квазаров профессором Д. Тарншеком (США) на Майданакскую обсерваторию была поставлена ПЗС-камера TI-800 – охлаждаемая азотом профессиональная камера 800 x 800 элементов с размером пикселя 15 микрон. По договоренности с Д. Тарншеком эта камера могла быть также использована для наблюдений ГЛК, и с июля 1997 г. на АЗТ-22 были начаты их регулярные наблюдения.

К сожалению, на тот момент ПЗС-камера TI-800 была уже достаточно устаревшим прибором, со всеми недостатками, свойственными первым разработкам приборов этого типа. Наиболее существенным из таких недостатков является неэффективность переноса заряда – «растекание» вдоль столбца заряда, накопленного в светочувствительной ячейке, при его многократном переносе в процессе считывания. Вследствие этого, изображения компактных объектов, зарегистрированных на таких ПЗС, имеют вытянутую вдоль столбцов форму. Это не исключает возможность проведения точной апертурной фотометрии звездобразных объектов. Однако при фотометрии таких компактных объектов, как ГЛК, возникли серьезные проблемы, и при использовании этой камеры точность измерений оказалась недостаточно высока. Тем не менее, по кривым блеска Q2237+0305, полученным летом-осенью 1997 г., удалось обнаружить и впервые отметить (Блюх и др., 1999, Дудинов и др., 2000) некоторое увеличение блеска компонента С. Как оказалось впоследствии, это незначительное увеличение блеска было началом беспрецедентного события микролинзирования этого компонента, в результате которого его блеск в июле 1999 г. увеличился практически на 1^m .

В 1998 г. в Осло проходил очередной симпозиум по гравитационному линзированию, в работе которого приняли участие В. Н. Дудинов и А. П. Железняк. Были доложены первые результаты мониторинга ГЛК на горе Майданак. Для развития и финансовой поддержки наблюдений, по инициативе норвежского и датского коллег профессоров Р. Стабеля и Й. Хьорса, был учрежден международный общественный Фонд «Майданак», основными спонсорами которого выступили молодой норвежский астрофизик Хенрик Нильсен и американский энтузиаст и любитель астрономии Джеймс Буш. За счет средств Фонда Р. Шилдом в США была приобретена одна из лучших в то время полупрофессиональных ПЗС-камер ST-7, и уже с июля 1999 г. мониторинг ГЛК на горе Майданак проводился на этой камере. В Осло состоялось также совещание по совместному исследованию ГЛК, и было заключено Соглашение о дальнейшем сотрудничестве, а также было принято решение об оснащении телескопа АЗТ-22 специально разработанной профессиональной ПЗС для дальнейших совместных наблюдений ГЛК на горе Майданак. Разработка такой камеры была поручена специалистам из Копенгагенской астрономической обсерватории, и осенью 2000 года на обсерваторию на горе Майданак была поставлена ПЗС BroCam – охлаждаемая азотом камера 2000x800 элементов с размером пикселя 15 микрон. С 2001 года наблюдения ГЛК были продолжены на этой ПЗС.

Таким образом, благодаря настойчивости и энтузиазму сотрудников отдела, эпизодические наблюдения ГЛК на обсерватории Майданак с 1998 г. приобрели статус международной программы мониторинга ГЛК (Dudinov et al., 2000). Кроме украинских участников – НИИ астрономии и Радиоастрономического института НАНУ, в наблюдениях приняли участие ГАИШ МГУ (Россия) и Институт астрономии им. Улугбека (Узбекистан). Наблюдения проводились в тесном сотрудничестве с Институтом теоретической астрофизики (Норвегия) и Гарвард-Смитсоновским астрофизическим центром (США) и при финансовой поддержке гранта CRDF (1997 – 1999 г.г., руководители П. В. Блюх и Б. Пачински), грантов УНТЦ N-43 (2001 – 2003 г.г., руководитель И. Б. Вавилова) и U-127к (2004 – 2006 г.г., руководитель А. А. Минаков).

С 1998 по 2006 г.г. в рамках этой совместной программы проводятся регулярные наблюдения более 20 ГЛК и получено в общей сложности более 20 тысяч их ПЗС-изображений. Изображения 20 ГЛК, наиболее активно наблюдаемых на горе Майданак, представлены на рис. 2.11.9. По результатам исследований этих ГЛК был получен и опубликован ряд интересных результатов, наиболее значимыми из которых нам представляются следующие.

Q2237+0305. Получены кривые блеска компонентов ГЛК Q2237+0305 в фильтре R, охватывающие период с 1997 по 2005 г.г. (рис. 2.11.10). Обнаружены события микролинзирования всех четырех компонентов (Блюх и др., 1999, Дудин и др., 2000, Vakulik et al., 2003, Vakulik et al., 2004). На рис. 2.11.8 представлены изображения Q2237+0305, полученные в фильтре R в 1995-2001 годах на 1,5 метровом телескопе на горе Майданак – заметные вариации взаимного блеска всех компонентов можно видеть даже без фотометрии изображений.

По результатам анализа VRI-фотометрии Q2237+0305 была установлена тесная связь вариаций показателей цвета компонентов с событиями микролинзирования. В работах (Дудин и др., 2000, Vakulik et al., 2003) отмечена качественная тенденция смещения показателей цвета компонентов в «синюю» сторону при увеличении их блеска. По мере накопления данных по вариациям показателей цвета был проведен количественный корреляционный анализ их связи с вариациями блеска. Полученный достаточно высокий коэффициент корреляции (0,8) полностью подтвердил выявленную ранее качественную тенденцию и предположение, что наиболее вероятной причиной наблюдаемых вариаций показателей цвета компонентов являются события их микролинзирования (Vakulik et al., 2004). Это важное заключение, так как прямым его следствием является возможность исследования пространственно-спектральной структуры квазара, которая, очевидно, имеет достаточно сложный характер.

Анализ кривых блеска компонентов Q2237+0305, полученных по результатам фотометрии 2003 г., выявил почти синхронное увеличение блеска всех четырех компонентов (Vakulik et al., 2006). Хорошо известно, что квазары не являются стационарными объектами, и их блеск может меняться до 0,1-1 звездной величины на временных интервалах в несколько лет или месяцев. Известны также работы, в которых сообщается о быстрых вариациях блеска на интервалах несколько часов, которые могут достигать нескольких процентов. Но в системе Q2237+0305, благодаря необычной близости к наблюдателю линзирующей галактики ($z = 0.04$), высока вероятность событий микролинзирования, и вызванные ими значительные вариации блеска (до 1 звездной величины) могут маскировать возможные слабые вариации блеска источника-квазара. Именно поэтому в этой хорошо изученной и регулярно наблюдаемой ГЛК до 2003 года не удавалось обнаружить вариации блеска самого источника-квазара. Только благодаря низкой активности микролинзирования всех компонентов в период с июня по октябрь 2003 г. удалось уверенно обнаружить увеличение блеска самого квазара.

Коэффициенты корреляции кривых блеска компонентов оказались достаточно высокими – от 0,96 (для A и C компонентов) до 0,87 (для C и D), что указывало на то, что синхронные вариации блеска значительно превосходили индивидуальные вариации блеска компонентов, вызванные их микролинзированием. Был разработан метод оценок времен запаздывания путем совместной аппроксимации кривых блеска всех компонентов предполагаемой кривой блеска квазара, но с некоторым временным сдвигом для каждого компонента. Впервые для системы Q2237+0305 получены экспериментальные оценки времен запаздывания, не превышающие трех суток с ошибкой порядка одних суток.

Точность полученных оценок пока не высока, и они не позволяют сделать определенный выбор между существующими моделями микролинзы, но уже сам факт выявления синхронных вариаций блеска компонентов системы Q2237+0305 представляется достаточно важным, потому что является наиболее убедительным подтверждением гравитационно-линзированного происхождения этой системы.

Q0957+561. Это один из первых отождествленных ГЛК, в котором наблюдается феномен гравитационного линзирования [1]. Компоненты системы А и В имеют примерно равный блеск в красных лучах 17^m . Красное смещение компонентов Z, измеренное по эмиссионным линиям спектров, составляет для А 1,4054 и 1,4047 для В, по линиям поглощения – 1,3905 и 1,3908 для А и В, соответственно.

Квазар-источник в системе Q0957+561 оказался переменным, как в оптическом, так и в радиодиапазоне. Регулярные наблюдения вариаций блеска компонентов Q0957+561 позволили оценить время запаздывания между А и В – 417 суток. Помимо этого, анализ данных фотометрического мониторинга выявил события микролинзирования и возможные быстрые вариации блеска малой амплитуды [12,13].

Точность опубликованных на момент начала наблюдений оценок времени запаздывания для Q0957+561 составляла порядка 1 суток. В случае Q0957+561, как было показано в [13], измерение времени запаздывания с точностью порядка нескольких часов принципиально возможно благодаря наличию быстрых колебаний блеска источника-квазара (порядка 1% в течение ночи).

Для получения непрерывной кривой блеска компонентов Q0957+561 по инициативе Р. Шилда и В. Колли (R. Schild, W. N. Colley, Гарвард-Смитсоновский Астрофизический центр, США) был образован Наблюдательный консорциум, в состав которого вошли заинтересованные наблюдатели из 10 обсерваторий северного полушария, находящихся на различных долготах почти по всему земному шару. Для более надежного перекрытия 10-суточного интервала непрерывных наблюдений были задействованы также несколько обсерваторий на близких долготах, но в заведомо разных климатических зонах; последнее позволяло снизить риск, связанный с погодными условиями. Наблюдения планировались в два 10-суточных этапа, разнесенные во времени на значение времени запаздывания вариаций блеска между компонентами А и В Q0957+561. Главная цель наблюдений – обнаружить на первом этапе мониторинга значимые вариации блеска компонента А (ведущего) и обнаружить те же детали в кривой блеска компонента В (ведомого) в течение второго этапа непрерывных наблюдений, примерно через время запаздывания, т.е. примерно через 417 суток.

В рамках этой программы наблюдения Q0957+561 были проведены 20-29 января 2000 года А. П. Железняком и И. Е. Синельниковым и 12-21 марта 2001 года А. П. Железняком на 1,5-метровом телескопе на горе Майданак.

Вклад Майданакской обсерватории в полученный по данной программе наблюдательный материал составил 27 часов наблюдений на первом этапе и 53 часа – на втором, в общей сложности более 400 изображений. Фотометрическая обработка всех изображений, полученных на 10 обсерваториях, была проведена в Гарвард-Смитсоновском Астрофизическом центре. Высокое качество изображений, полученных на Майданакской обсерватории, и достаточно регулярная выборка по ночам позволили использовать эти изображения как базовый ряд для привязки наблюдений других 9 обсерваторий.

В результате реализации этой программы получена оценка временной задержки вариаций блеска компонентов Q0957+561 417.105 суток с формальной ошибкой $\pm 0,047$ суток (Colley et al., 2002, 2003).

SBS 1520+530. Двойной квазар SBS 1520+530 был открыт в 1996 г.; состоит из двух компонентов, разделенных угловым расстоянием $1,57''$. Красные смещения компонентов, измеренные по сильным эмиссионным линиям, оказались практически одинаковыми – $Z = 1.855$, что при почти полной тождественности спектров является наиболее весомым аргументом в пользу гравитационно-линзовой природы этого объекта.

Регулярные наблюдения этого объекта проводятся на горе Майданак с 1998 г. (Железняк и др., 2003, Zheleznyak et al., 2003). По изображениям, полученным при наилучшем качестве атмосферы в 2001 – 2002 г.г., синтезированы высокоинформативные изображения SBS 1520+530 в R и I фильтрах (рис. 2.11.11 а,б). Последующая специальная обработка и анализ позволили обнаружить линзирующую галактику (рис. 2.11.11 б) и получить оценки ее блеска в фильтрах R и I, причем в фильтре R такая оценка получена впервые (Zheleznyak et al., 2003).

Построена модель макролинзы SBS 1520+530, получена оценка массы линзирующей галактики и ожидаемое время запаздывания вариаций блеска компонентов 100 суток. Измеренные блеск в фильтре R и показатель цвета (H-R), а также оценка массы, полученная из моделирования, указывают, что линзирующая галактика в SBS 1520+530 является

спиральной (Zheleznyak et al., 2003).

Проведен анализ вариаций блеска компонентов, полученных в фильтре R в 2001 – 2002 годах, согласно которому оценка времени запаздывания составляет 128 суток. За период наблюдений с 2001 по 2005 г.г. обнаружено как минимум два события микролинзирования компонентов SBS 1520+530 (Khamitov et al., 2006).

SBS 0909+532. Из анализа объединенных кривых блеска компонентов SBS 0909+532, полученных в VR-фильтрах на телескопах Калар Альто, Визе и Майданакской обсерваторий, получена оценка времени запаздывания вариаций блеска A, B компонентов 45_{-11}^{+1} суток. Ведущим является компонент B. С учетом полученного времени запаздывания уточнена также разность блеска компонентов $m_B - m_A = 0.^m575 \pm 0.^m014$ в фильтре R, которая хорошо согласуется с моделью макролинзы и оценками, полученными ранее в работе (Ullan et al., 2006).

Кроме наблюдений ГЛК, фотометрии их изображений и анализа кривых блеска, в течение многих лет продолжались и теоретические исследования. Особое внимание уделялось вопросам статистики эффекта микролинзирования (ЭМЛ). Интерес к этому явлению объясняется, прежде всего, тем, что с помощью ЭМЛ можно получать важную информацию о распределении масс в галактиках – линзах и изучать тонкую структуру излучающих областей квазаров. Основные результаты, полученные в этом направлении, представлены в работах Минакова и Вакулика (2000), Минакова и др. (2001).

В работе Минакова и Вакулика (2000) исследовалось влияние эффекта микролинзирования на характеристики изображений далеких источников, видимых вблизи критических кривых сложных гравитационных линз, которые представлялись в виде суммы компактных образований – микролинз (звезды, звездоподобные или планетоподобные тела) и диффузно распределенной материи (пылевые, газовые облака и т.д.). Признаком близости изображений к критическим кривым гравитационных линз является наблюдение сливающихся, крестообразных, кольцообразных или дугообразных изображений источников. Основной целью работы являлось исследование структуры критических кривых и каустик сложной ГЛ при нахождении микролинз (звезд) вблизи критической кривой макролинзы – галактики. Исследования проводились на примере модели, соответствующей ГЛК Q2237+0305.

Проведенный анализ и численное моделирование позволили сделать следующие выводы:

1) Отдельная микролинза – звезда деформирует критическую кривую и каустик регулярной ГЛ. Величины деформаций пропорциональны малому параметру Γ , равному отношению массы микролинзы к массе ядра галактики, и быстро убывают по мере удаления микролинзы от критической кривой макролинзы. Для фиксированного положения источника излучения деформация макрокаустики приводит к фактическому изменению расстояния от источника до каустики, что вызовет соответствующие изменения блеска макроизображений. Учитывая, что вблизи критической кривой макролинзы может одновременно находиться достаточно большое количество микролинз, их влияние приведет к размытию границ критической кривой и каустики макролинзы.

2) Структура и поведение критических кривых, возникающих вблизи микролинзы, зависит не только от расстояния до критической кривой регулярной ГЛ, но и от того, в каком секторе углов перемещается микролинза. Характерные размеры критических кривых и микрокаустик пропорциональны $\sqrt{\Gamma}$.

3) Наибольшие деформации критических кривых и каустик, пропорциональные $\Gamma^{1/3}$, наблюдаются при нахождении микролинз в непосредственной близости от критической кривой регулярной ГЛ. В этом случае кривые макро- и микро-линз сливаются воедино, образуя сложные непрерывные линии.

4) Отличие результатов работы от полученных ранее в рамках стандартного (линеаризованного) учета действия регулярной ГЛ тем больше, чем ближе к критической кривой расположены микролинзы.

При гравитационной фокусировке переменных во времени и протяженных в пространстве источников излучения, кроме пространственных перераспределений яркости в видимых изображениях, происходит также и сложная деформация кривых их блеска. Величина временных деформаций зависит не только от параметров ГЛ (распределение массы внутри линзы), но и от параметров источника излучения (линейный размер излучающей

области, ее положение относительно критической кривой линзы, а также длительность импульса). Оказалось, что величины деформаций кривых блеска различны для каждого из наблюдаемых изображений. Можно сказать, что ГЛ действует подобно многоканальному фильтру, пропуская без искажения медленные временные вариации яркости источника и сглаживая быстрые.

В качестве примера в работе Минакова и др. (2001) была рассмотрена модель, описывающая фокусирующие свойства ГЛК Q2237+0305 («Крест Эйнштейна»). Результаты исследования показали, что вид кривой блеска отдельного изображения зависит от величины параметра $R \sim (\nu_0 \tau_g)^{-2}$. Здесь $\tau_g = 2r_g / cT_s$ – безразмерный параметр, равный отношению удвоенного гравитационного радиуса линзы $2r_g$ к расстоянию cT_s , которое свет проходит за время длительности сигнала T_s , излученного источником; а ν_0 – угловой размер источника, выраженный в единицах углового радиуса кольца Эйнштейна-Хвольсона.

В случае, когда $R \gg 1$ ($\nu_0 \tau_g \ll 1$, «маленький» источник излучения, «слабая» линза или «длинный» импульс), форма кривой блеска изображения практически не отличается от формы невозмущенной кривой источника. При небольших значениях R , когда $R < 1$ ($\nu_0 \tau_g > 1$, «протяженный» источник излучения, «сильная» линза или «короткий» импульс), необходимо учитывать сглаживающее действие линзы. При этом, из-за существующих различий фактора R для различных изображений, величины деформаций будут различными для разных изображений.

Характерные времена изменений яркости источника T_s , при которых необходимо учитывать сглаживающее действие ГЛ, можно определить как $T_s < r_g \nu_0 / c$ ($\nu_0 \tau_g < 1$). Для регулярной модели ГЛ Q2237+0305 с массой ядра галактики $M \sim 10^{10} M_\odot$ ($r_g \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ км}$) и характерным угловым размером источника (квазара) в оптике, равным $\nu_0 \sim 10^{-4}$, была получена оценка $T_s < 10$ сек. Из наблюдений же «креста Эйнштейна» в ИК диапазоне [14] величина ν_0 была оценена как $10^{-5} < \nu_0 < 10^{-1}$. Выбрав, например, $\nu_0 \sim 10^{-2}$, получим оценку $T_s < 10^3$ сек. Таким образом, полученные оценки показали, что собственные изменения блеска квазара в оптике с временами $T_s < 10$ сек будут сглаживаться, а при $T_s > 10$ сек будут наблюдаться в изображениях практически без изменений.

В настоящее время гравитационно-линзовая тематика прочно вошла в жизнь нашего отдела. В 2004 г. А. П. Железняк успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную изучению феномена гравитационного линзирования. Практически подготовлены еще две диссертации. Закончил аспирантуру выпускник астрономического отделения университета Г. В. Смирнов.

Два минувших года были годами напряженной работы по выполнению украинско-узбекского проекта УНТЦ, в течение которого был получен огромный наблюдательный материал, который явился источником новой информации о населении других галактик, пространственной структуре квазаров, геометрии наблюдаемой части Вселенной. И это, конечно, главный продукт нашей деятельности.

Но так уж всегда был устроен наш отдел, что практически всегда все этапы работы у нас выполнялись силами наших сотрудников – от создания приборов до анализа полученных результатов. Так и сейчас, прекрасный Майданакский полутораметровый телескоп, оставшийся с развалом Союза без хозяина, пришлось «приводить в чувство» своими силами, в сотрудничестве с москвичами и узбеками. Однако львиная доля работы пришлась на долю наших сотрудников – В. В. Коничека, А. П. Железняка, И. Е. Синельникова, А. В. Сергеева, А. Е. Кочетова. Сейчас телескоп находится полностью в рабочем состоянии: были отъюстированы обе фокальные системы, f/8 и f/16, установлена новая научная ПЗС-камера, приведена в порядок система вращения купола башни, наконец, что самое главное, в 2006 году была создана и установлена система автоматического гидирования. Если раньше из-за несовершенства существующей «родной» системы слежения невозможно было наблюдать с экспозициями больше 3 минут, теперь, благодаря новой системе, длительность экспозиций стала практически неограниченной. Благодаря всем этим мерам телескоп АЗТ-22 стал первоклассным инструментом, способным обеспечивать качество

изображения, определяющееся только астроклиматическими условиями. Остановка за малым – найти соответствующее финансирование, но это уже совсем не научная проблема.

Итак, прошли годы, менялись методы и аппаратные средства, и хотя наши научные интересы от объектов Солнечной системы сместились к самым удаленным объектам Вселенной – квазарам, неизменным осталось одно – стремление получить информацию о пространственной структуре объекта с предельно высоким разрешением. И если читателю покажется, что сейчас наши интересы свелись к наблюдению и тривиальной фотометрии пусть и таких нетривиальных объектов, как ГЛК, это совсем не так. Анализируя полученные кривые блеска ГЛК, мы пытаемся расшифровать, «рассмотреть» тонкую структуру изображений квазаров с угловым разрешением порядка микросекунд, что недостижимо другими средствами. Как и много лет назад, мы по-прежнему пытаемся «увидеть» на небе то, чего еще никто не видел...

Литература

1. *Walsh D., Carswell R., Weymann R.* 0957+561 A,B: twin quasistellar objects or gravitational lens? // *Nature* –1979. – 279, p.381-390.
2. *Блюх П. В., Минаков А.А.* // Гравитационные линзы. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240с.
3. *Zoldner J.* Über die ablenkung eines lichtstrahls von fainer geradlinigen bewerbung, durch die attraktion eines weltkorpers, an welchem er nahe vorbei gent // *Berlin. Astron. Jahrbuch fur* 1804. – Berlin, 1804.– S.161.
4. *Эйнштейн А.* Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности // *Собр. науч. трудов.* – М., 1965. – Т.1. – С.439-447.
5. *Lodge O.* Gravitation and light // *Nature.* –1919. –104, N 2614. – P.354.
6. *Larkin J. E., Matthews K., Lawrence C. R., Graham J. R., Harrison W., Jernigan G., Lin S., Nelson J., Neugebauer G., Smith G., Soifer B. T., Ziolkowski C.* Near-infrared images of MG 1131+0456 with the W. M. Keck telescope: Another dusty gravitational lens? // *Astrophys. J., Part 2 – Letters (ISSN 0004-637X),* vol. 420, no. 1, p. L9-L12.
7. *Corrigan R. T., Irwin M. J., Arnaud J., et al.* Initial lightcurve of Q2237 +0305 // *Astron. J.* – 1991. –102. – P.34-40.
8. *Yee H.K.C.* High-resolution imaging of the gravitational lens system candidate 2237+0305 // *Astron. J.* –1988. – 95. – P. 1331-1339.
9. *Kayser R., Refsdal S., Stabell R.* Astrophysical applications of gravitational micro-lensing // *Astronomy and Astrophysics,* 1986, 166, no. 1-2. – P. 36-52.
10. *Wambsganss J., Paczynski B.* Expected color variations in the gravitationally microlensed QSO 2237+0305 // *Astron.J.* –1991. – 102. – P. 864-868.
11. *Burud I., Stabell R., Magain P. et al.* Three photometric methods tested on ground-based data of Q2237+0305 // *Astron. and Astrophys.* –1998. –339. – P.701-708.
12. *Colley W. N., Schild R. E.* Precision Photometry for Q0957+561 Images A and B // *Astrophys. J.* – 1999. – 518, № 1. – P. 153–156.
13. *Colley W. N., Schild R. E.* Hourly Variability in Q0957+561 // *Astrophys. J.* – 2000. –540, № 1. – P. 104–112.
14. *Agol E., Jones B., Blaes O.* Keck mid-infrared imaging of the QSO 2237+0305 // *Astrophys. J.* – 2000. – 545, pp. 657-663.