Глава 2.
СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРОКВАЗАРА V4641 СТРЕЛЬЦА

V4641 Sgr была открыта Горанским (1978) во время вспышки в июне 1978 г. Тогда звезда достигла яркости $12^m.4$ в полосе B, что на две величины выше среднего уровня $14^m.2$ в спокойном состоянии. В большой коллекции из 345 снимков неба фототеки ГАИШ 1960–1990 годов это была единственная вспышка. В IV издании Общего каталога переменных звезд новая переменная звезда была неверно идентифицирована с GM Sgr (открытой ранее Люйтеном) и классифицирована как новоподобная переменная. Позднее Горанский (1990) обнаружил, что эта звезда является двойной системой спектрального класса A с возможным орбитальным периодом $0^d.7365$. Не наблюдалось ультрафиолетового избытка, характерного для новоподобных переменных звезд. Появление столь сильной вспышки, как наблюдавшаяся в 1978 г., в такой системе является совершенно неординарным событием. Окончательно проблема идентификации была решена в 2000 г. тем, что была найдена фотопластинка, на которой Люйтен сделал открытие GM Sgr (HV 4048) (Хазен и др., 2000). После этого звезда Горанского получила обозначение V4641 Sgr. Она оказалась на расстоянии $1'$ к северу от переменной Люйтена GM Sgr. Карта этих двух объектов содержится в статье Ороса (2000).

20–22 февраля 1999 г. V4641 Sgr была обнаружена в рентгеновских лучах как слабый переменный источник (ин'т Занд и др. (1999), Маркwардт и др. (1999)). Источник получил обозначения SAX J1819.3-2525 и XTE J1819-254. Позднее, в сентябре 1999 г. у звезды произошла еще одна сильная вспышка, зарегистрированная в оптических, рентгеновских и радиолучах. Вторая вспышка наблюдалась через 21 год после первой вспышки 1978 года. События в сентябре 1999 г. развивались следующим образом. За 6 дней до пика вспышки блеск звезды поднялся до уровня $11–12^m V$ и показывал модуляцию с периодом 2.5 дня (Като и др., 1999, Уемура и др., 2002). В момент 1999 сентябрь, 15.395 UT звезда была обнаружена Стаббингсом (1999) в максимуме вспышки на уровне $8^m.8$ vis. После максимума блеск опустился до спокойного уровня за два дня. Во вспышке наблюдались необычно сильные и широкие бальмеровские эмиссии, были видны также эмиссии He II λ 4686 и 5410Å, He I λ 5876Å (Айани и др., 1999, Джорговский и др., 1999). Полуширина линии H_α достигала 2700 км/с. Крылья эмиссии распространялись до $\pm$6000 км/с. Ширина эмиссий He I и Brγ в инфракрасных лучах достигала 5900 км/с (Чарльз и др., 1999). В работе Чати и др. (2001) показаны спектральные изменения на спаде вспышки: самый медленный спад эмиссии происходил в линии H_α, другие профили линий бальмеровской серии сразу же перешли в абсорбционные.

По мере ослабления блеска после максимума оптической вспышки наблюдалось усиление потока рентгеновского излучения от V4641 Sgr (Смит и др., 1999, Хьелминг и др, 2000). За 8 часов поток на 2–12 кэВ увеличился от 0.2 до 12 Краб, а затем резко упал до уровня обнаружения. При увеличении потока жесткость рентгеновского спектра уменьшалась. Дополнительно в данных спутников RXTE и CGRO была обнаружена рентгеновская предвспышка, происшедшая за полдня до оптического максимума. Во вспышках наблюдалась сильная переменность рентгеновского излучения: в 4 раза в шкале секунд и в 500 раз в шкале минут (Вийнандс и ван дер Клис, 2000). Такая переменность рентгеновского излучения характерна в случае аккреции на черные дыры. По данным RXTE рентгеновский источник на 2–60 кэВ был слабым и показывал неправильную переменность в течение 7 месяцев до вспышки 15 сентября 1999 г. (ин'т Занд и др., 2000). Объект виден на рентгеновских снимках галактического центра, полученных с помощью спектрометра PCA обсерватории RXTE в диапазоне 3-20 КэВ (Ревнивцев и Сюняев, 2002).

После вспышки 15 сентября 1999 г. в радиолучах наблюдался затухающий источник в диапазоне 1.4–8.4 гГц, видимый в течение 12 дней. В пике вспышки он достигал плотности потока 400 мЯн на частоте 8.4 гГц и был непрозрачным, но он быстро перешел в прозрачную для радиолучей фазу. 16 сентября он был разрешен на VLA с отношением осей 10:1. Протяженная структура, похожая на струю, была длиной $0''.25$. На радиокартах струя стала невидимой через два дня (Хьелминг и др., 2000). Вспышку V4641 Sgr 15 сентября 1999 г. можно характеризовать как эпизод сверх-эддингтоновской аккреции на черную дыру (Ревнивцев и др., 2002а,б). Во время вспышки вокруг черной дыры образовалось оптически толстое истечение (или оболочка), по своим свойствам похожее на истечение из SS 433.

Третья вспышка V4641 Sgr была обнаружена 19 мая 2002 г. Стаббингсом, через 2.7 года после второй вспышки. В пике этой вспышки блеск достиг $10^m.5$ R. Во вспышке наблюдалась быстрая переменность с амплитудой до $1^m.5$ в шкале от минут до часов. Результаты интенсивного фотометрического слежения показаны в работе Уемуры и др. (2002). Повторяющиеся поярчания и переменность блеска с большой амплитудой продолжались до 25 мая. Но и значительно позднее, в начале июля, еще наблюдались редкие вспышки продолжительностью в минуты амплитудой до 1^m. V4641 Sgr – единственный случай, когда многие наблюдатели видели в окуляр небольшого телескопа быстрые флуктуации оптического блеска, предсказанные для аккрецирующих черных дыр в теории (Шварцман (1971), Шакура и Сюняев (1973)). Изменения блеска в самой короткой шкале секунд имели амплитуду до $0^m.2$ в полосе B. Звезда снова, как и в предыдущей вспышке, появилась в радиодиапазоне и в рентгеновских лучах (Рупен и др., 2002б, Кемпбелл-Вилсон и Ханстед, 2002, Марквард и Сванк, 2002). В радиолучах на этот раз источник не был протяженным, как в сентябре 1999 г. и активно вспыхивал в шкале минуты – часы с амплитудой 30%, не было осцилляций в шкале секунд. Поведение его отличалось от поведения в сентябре 1999 г., когда после вспышки излучение прозрачного в радио-лучах источника затухало более недели. В июле это был непрозрачный радиоисточник, он появлялся и изчезал резко и неожиданно (Рупен и др., 2002б). Последние даты наблюдения радиоисточника 12 июля 2002 г.

Оптические вспышки, сопровождавшиеся рентгеновским и радиоизлучением наблюдались также в 2003 г. (Бакстон и др., 2003; Рупен и др., 2003; Бэйлин и др., 2003), в 2004 г. (Сванк, 2004; Рупен и др., 2004; Уемура и др., 2005) и в 2005 г. (Сванк и др., 2005; Хамитов и др., 2005; Бакстон и др., 2005), из чего следует, что у V4641 Sgr активные состояния происходят с частотой примерно раз в год. Но столь мощная вспышка с выбросом релятивистских струй, как в сентябре 1999 г. еше ни разу не повторялась.

В нашей работе (Горанский и др., 2003) в результате длительного фотометрического слежения в спокойном состоянии обнаружены эпизоды слабой активности V4641 Sgr. Форма кривой блеска определяется эффектом эллипсоидальности большой амплитуды. В спокойном состоянии она имеет минимальный разброс, определяемый ошибками наблюдений. Явно повышенный блеск объекта до $\Delta m = 0^m.26$, а затем спад блеска за время 0.02 дня мы наблюдали в 2002 г. ночь JD 2452432 через 12 дней после окончания большой вспышки в мае на 1-м телескопе Цейсса САО. В июле 2002 г. нами было зарегистрировано еще два эпизода активности в JD 2452458 и JD 2452465. Все три события наблюдались как в фильтре V, так и в фильтре R, при хороших погодных условиях, что не оставляет сомнений в их реальности. Амплитуда переменности доходила до $0^m.2$, а характерные времена были явно меньше времени экспозиции, 2 минуты, что преуменьшает оценку амплитуды.

В циркулярах VSNET Т. Като сообщал о таких же проявлениях вспышечной активности V4641 Sgr 7–8 июля 2002 г. (JD 2452462 – 2452463). В частности, 7 июля зарегистрирована вспышка на 1^m, подъем в максимум продолжался всего 30 с (ПЗС-изображение звезды в этой вспышке выставлено на странице VSNET). Время спада блеска вспышек в e раз по наблюдениям Т. Като составило несколько минут. Наблюдались многочисленные быстрые вспышки с амплитудой до $0^m.3$, подтвержденные независимыми рядами ПЗС-наблюдений в Японии. Поразительно, что в эти даты на долготе Крыма мы обнаружили V4641 Sgr в совершенно спокойной фазе. По сообщениям VSNET объект 11 и 12 июля (JD 2452466 и 245467) перешел в спокойное состояние. Наши данные показывают последний эпизод активности 10 июля (JD 2452465).

Как и у V4641 Sgr, фотометрическая активность рентгеновских систем проявляется как превышение блеска над спокойным уровнем орбитальной переменности. Примерами могут служить системы V1357 Cyg (Cyg X-1) (Карицкая и др., 2001) или V1341 Cyg (Cyg X-2) (Горанский и Лютый, 1988).

Специальные наблюдения проводились для измерения рентгеновского и радиоизлучения звезды в спокойном состоянии. 5 августа 2002 г. источник не удалось зарегистрировать на спутнике "Чандра" с экспозицией 72 мин., верхний предел потока $1.3 \cdot 10^{-14}$ эрг см$^{-2}$с$^{-1}$ на 0.5–7 кэВ. По наблюдениям VLA 1–13 августа источник был за пределом 0.07 – 0.1 мЯн (Томсик и др., 2002). Вместе с тем он появлялся в радиолучах 17 и 18 июля 2000 г. во время длительного спокойного состояния на уровне 1.6 и 1.1 мЯн (Хьелминг, 2000).

Орбитальный период системы V4641 Sgr, равный 2.81730 $\pm$0.00001 дня, был определен с использованием лучевых скоростей в работе Ороса и др. (2001). По этим данным в системе V4641 Sgr содержится черная дыра с массой в пределах 8.7–11.7 $M_{\odot}$. Таким образом, описанные ранее необычные изменения в оптическом диапазоне и в других диапазонах электромагнитного спектра связаны с поведением аккрецирующей черной дыры в этой системе. Масса нормальной звезды B9III 5.5–8.1 $M_{\odot}$.

Некоторые исследователи считают, что следует осторожно применять термин "кандидат в черные дыры" к компактным компонентам двойных систем с динамической массой больше 3 $M_{\odot}$. Поскольку у V4641 Sgr кроме такой массы наблюдается прямое указание на то, что ее компонент является релятивистской черной дырой – оптическое мерцание с большой амплитудой, предсказанное теорией черных дыр, мы считаем, что в данном случае можно применять термин "черная дыра". Этот термин применяется даже в заголовке статьи Ороса и др. (2001) и во многих других работах.

Орбитальный период 2.817 дня был обнаружен также и в рентгеновских лучах (Ревнивцев и др., 2002а,б) в период 13 марта по 20 августа

1999 г., когда звезда была слабым источником рентгеновского излучения. Амплитуды кривых блеска составляют 36 и 25% в диапазонах 1.5–3.0 кэВ и 3–5 кэВ, соответственно. Максимум потока близок к фазе нижнего соединения черной дыры. Рентгеновская кривая блеска объясняется абсорбцией излучения протяженного рентгеновского источника на луче зрения, проходящем около оптической звезды. Полных затмений рентгеновского излучения не наблюдалось (ин'т Занд и др., 2000).

Оценки расстояния до V4641 Sgr в разных работах весьма различны и меняются в пределах от 0.5 (Хьелминг и др., 2000) до 9.6 кпс (Орос и др., 2000).

По предположению Хьелминга и др. (2000) V4641 Sgr может быть примером объекта нового, наиболее многочисленного класса двойных систем с релятивистскими объектами – разделенных систем. Так как проявления активности у них редки или вообще отсутствуют, в спектре можно увидеть только один, нормальный звездный компонент без следов взаимодействия (газовых потоков, аккреционных дисков, эффектов, связанных с прогревом поверхности нормальной звезды), отсутствует рентгеновское излучение, то вероятность открытия таких систем очень мала. Их можно открыть среди класса эллипсоидальных переменных звезд, если доказать, что в спектре видны линии только одного компонента. Поэтому исследование V4641 Sgr именно в спокойном состоянии представляет большой интерес.

1. Спектральные наблюдения V4641 Sgr в спокойном состоянии

В работах Горанского и др. (2002a,2003) приводятся результаты нашего комплексного, фотометрического и спектрального исследования V4641 Sgr в спокойном состоянии. В этих работах автору диссертации принадлежит спектроскопическая часть: обработка и анализ спектральных наблюдений. Автор участвовал также в проведении фотометрического слежения. Список полученных спектров, моменты времени наблюдений, диапазон длин волн и разрешение даются в табл. 6.

Первые спектроскопические наблюдения были проведены на БТА со спектрографом СП-124 в 1996 г., еще до большой оптической и рентгеновской вспышки, когда релятивистская природа этой системы не была известна, но было отмечено ее необычное поведение (Горанский, 1990). Уже тогда мы обнаружили у нее обычный абсорбционный звездный спектр без каких-либо следов эмиссии или эмиссионных компонентов в профилях линий.

Таблица 6. Спектральные наблюдения V4641 Sgr на БТА

JD hel. 24...	Дата	Фаза орбиты	λ (Å)	Разрешение (Å)	S/N
50317.2535	21.08.1996	$0^p.36$	4730–7200	2.2	50
50317.2642	"		"	2.2	50
50317.2812	"	0.38	3700–6100	2.2	50
50317.2854	"		"	2.2	50
51439.1807	17.09.1999	0.60	3800–6200	3	10
51439.1889	"		"	3	10
52102.3325	11.07.2001	0.9841	5800–7100	1.4	200
52102.3471	"	0.9893	"	1.4	200
52102.3643	"	0.9954	4630–5880	1.4	200
52102.3790	"	0.0006	"	1.4	200

Спектр в синей области, включая линию H_β, 17 сентября 1999 г. получен всего через двое суток после пика большой вспышки 15 сентября.

Точные фотометрические и орбитальные элементы V4641 Sgr были определены Горанским (2001) по длительному ряду фотографических наблюдений и современной ПЗС-фотометрии:

$Min\ I = 2451764.298 + 2^d.81728(\pm1)E$ (1).

Наша кривая блеска в полосе R показана на рис. 20. Согласно кривой лучевых скоростей (Орос и др., 2001, рис. 2) максимальная лучевая скорость нормального компонента приходится на фазу 0.75 от настоящих элементов, а это значит, что в Min I черная дыра находится в нижнем соединении. Фазы наших спектроскопических наблюдений, подсчитанные с этими элементами, указаны вертикальными штрихами, они же даны в табл. 6. В 1996 и 1999 г. орбитальные элементы еще не были известны, и наблюдения оказались в случайных фазах (0.37 и 0.60).

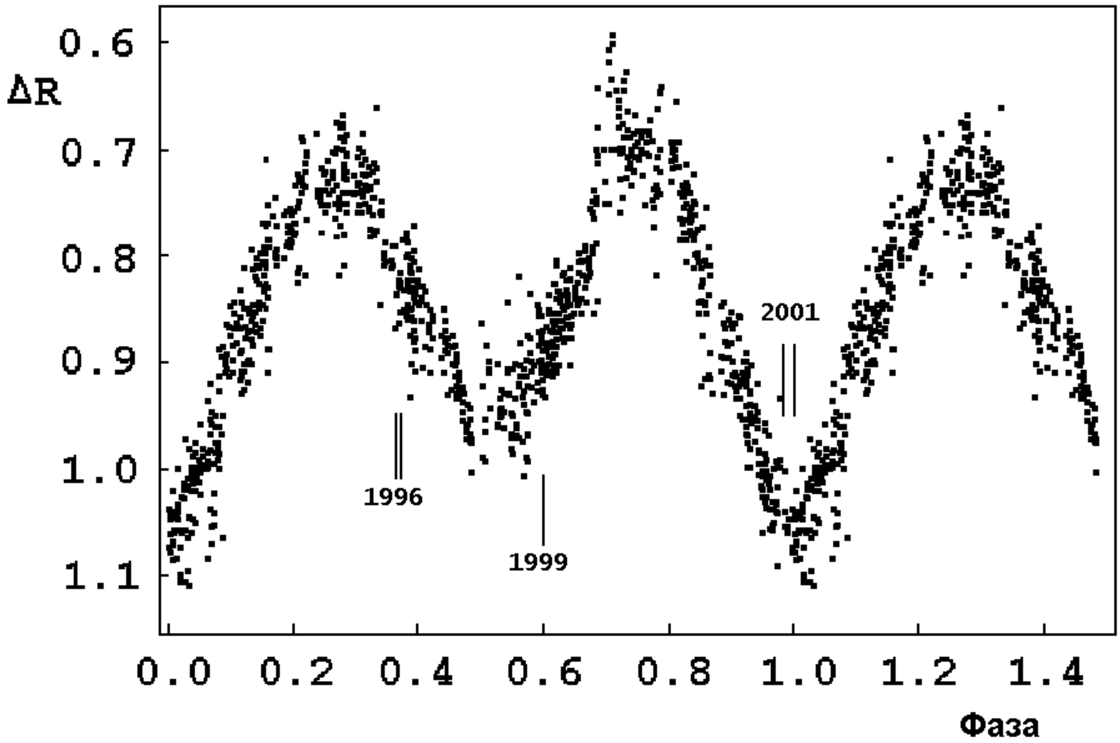

Рис. 20.

Кривая блеска V4641 Sgr в полосе R. Наиболее глубокий главный минимум соответствует фазе нижнего соединения черной дыры. Вертикальными линиями выделены фазы спектроскопических наблюдений.

В июле 2001 г. мы провели спектральные наблюдения на БТА со спектрографом UAGS в фазах около нижнего соединения черной дыры для того, чтобы на просвет на фоне нормальной звезды просмотреть содержимое полости Роша черной дыры и ее окрестностей. Кроме того мы получили такие же спектры контрольной звезды 8-й величины спектрального класса A2 HD 315568, расположенной вблизи V4641 Sgr.

Наблюдения обработаны автором диссертации в среде MIDAS по стандартной методике. После обработки все полученные спектры за ночь в выбранном диапазоне складывались. Нормализованные спектры для V4641 Sgr и контрольной звезды A2 HD 315568 показаны на рис. 21, профили линий H_α и H_β – на рис. 22 и 23, соответственно.

Спектры 1996 года практически не отличаются от спектра одиночной нормальной звезды позднего подкласса B – раннего подкласса A. Мы определяем спектр звезды как A0III, что очень близко к B9.5III Ороса и др. (2001). Кроме широких абсорбционных линий бальмеровской серии отождествляются дублеты Ca II H и K, Na I D_1 и D_2, оба на пределе разрешения. Не заметно никаких следов эмиссионных компонентов от аккреционного диска в профилях абсорбционных линий, которые симметричны. В целом по спектрам в спокойном состоянии можно сделать вывод, что V4641 Sgr – система без активного обмена масс, в спектре виден только один звездный компонент. Это интересно, потому что мы пришли к такому выводу за три года до вспышки в рентгене в 1999 г., когда объект был открыт как микроквазар. На рис. 21 видно, что бальмеровские абсорбции HD 315568 более широкие и интенсивные по сравнению с V4641 Sgr. Это эффект штарковского уширения линий, который подтверждает вывод Ороса и др. (2001), о том, что нормальный компонент V4641 Sgr имеет повышенную светимость.

Спектры в диапазоне λ3800–6200 Å, полученные 17 сентября 1999 г. всего через 2 дня после максимума большой оптической и рентгеновской вспышки, тоже абсорбционные, хотя в это время в линии H_α (что за пределом диапазона наших спектров) еще наблюдалась эмиссия (Чати и др., 2001). Не заметно эмиссии в линии He II λ 4686Å. Из-за низкого соотношения сигнал-шум $\approx$10 мы можем отметить только некоторую асимметрию профилей бальмеровских абсорбций. В частности на рис. 23 в синем крыле линии H_β виден избыток эмиссии, вследствие чего профиль сильно асимметричен.

11 июля 2001 г. мы провели специальные наблюдения V4641 Sgr на БТА около фазы нижнего соединения черной дыры, чтобы рассмотреть

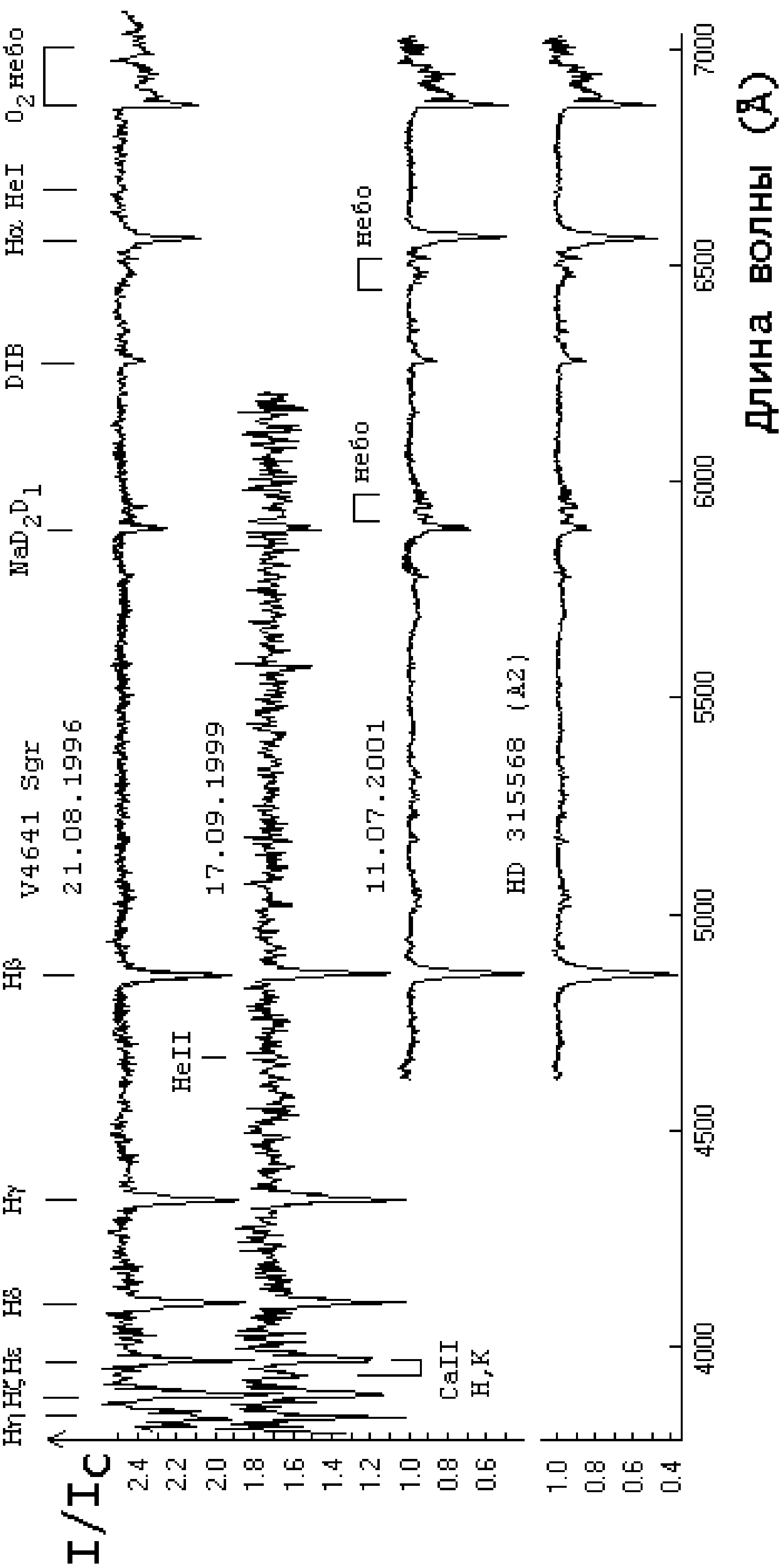

Рис. 21.

Нормализованные спектры V4641 Sgr. Внизу для сравнения показан спектр контрольной звезды HD 315568 (A2).

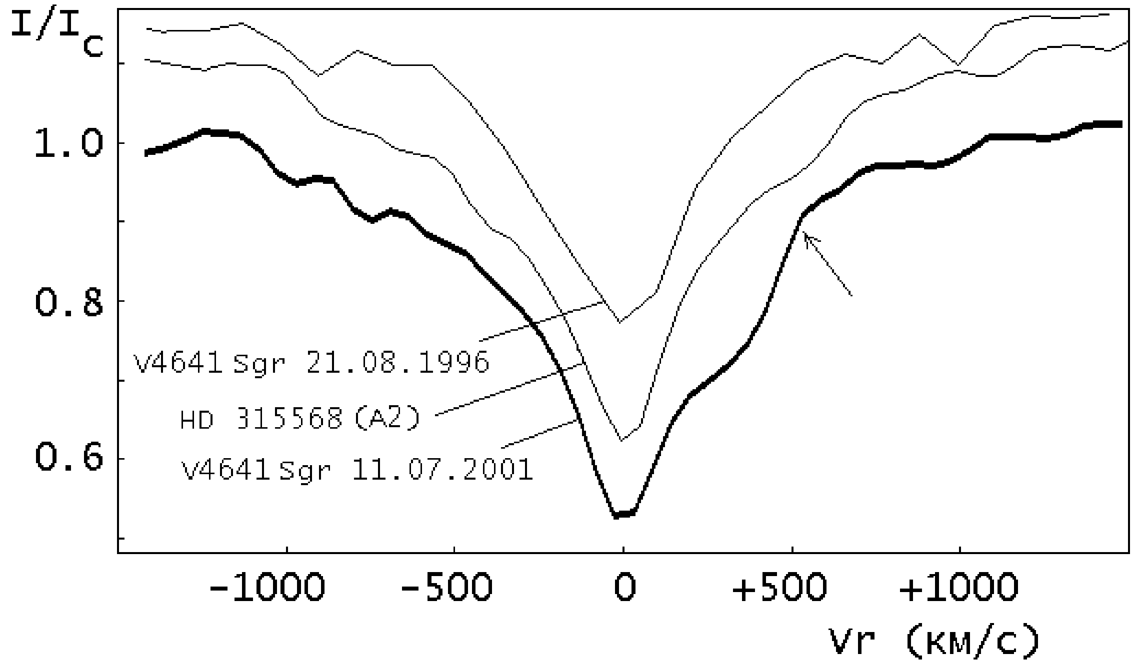

Рис. 22.

Профили линии H_α в нормированных спектрах V4641 Sgr в сравнении со звездой класса A2 HD 315568. Профиль абсорбции водорода около нижнего соединения черной дыры выделен жирной линией, орбитальная фаза наблюдений 0.9867. Стрелкой показано положение максимальной скорости депрессии.

ее окрестности на просвет на фоне звездного диска нормального компонента, и установить, есть ли газ вблизи компонентов в системе в спокойном состоянии. Наблюдения проводились примерно через два года после вспышки 1999 г. во время длительного спокойного состояния. Были получены два спектра в красной области, включая абсорбционную линию H_α, и два спектра в синей области, включая H_β. Напомним, что V4641 Sgr имеет низкое склонение и наблюдалась на БТА при воздушной массе около 3 атм. Условия наблюдений были благоприятными: качество изображений $\approx 2''$. Проводились наблюдения близкой контрольной звезды того же спектрального класса. В спектрах V4641 Sgr и контрольной звезды видны слабые эмиссии земной атмосферы на нулевой скорости. Спектры имеют высокое отношение сигнал/шум около 200 и спектральное разрешение 1.4Å.

Рис. 22 и 23 демонстрируют профили абсорбционных линий H_α и H_β, полученные 11 июля 2001 г. (нанесены жирными линиями). Для сравнения тонкими линиями представлены также профили V4641 Sgr, полученные в 1996 и 1999 г., и профили контрольной звезды HD 315568. Масштаб всех профилей на рисунке одинаков, но для удобства они нанесены с произвольным сдвигом вдоль оси интенсивности. Профили совмещены по оси лучевой скорости. В красном крыле профиля H_α 11 июля на рис. 22 наблюдается депрессия с эквивалентной шириной EW = 0.5Å (эквивалентная ширина всей линии H_α для сравнения составляет 9.5Å). Депрессия

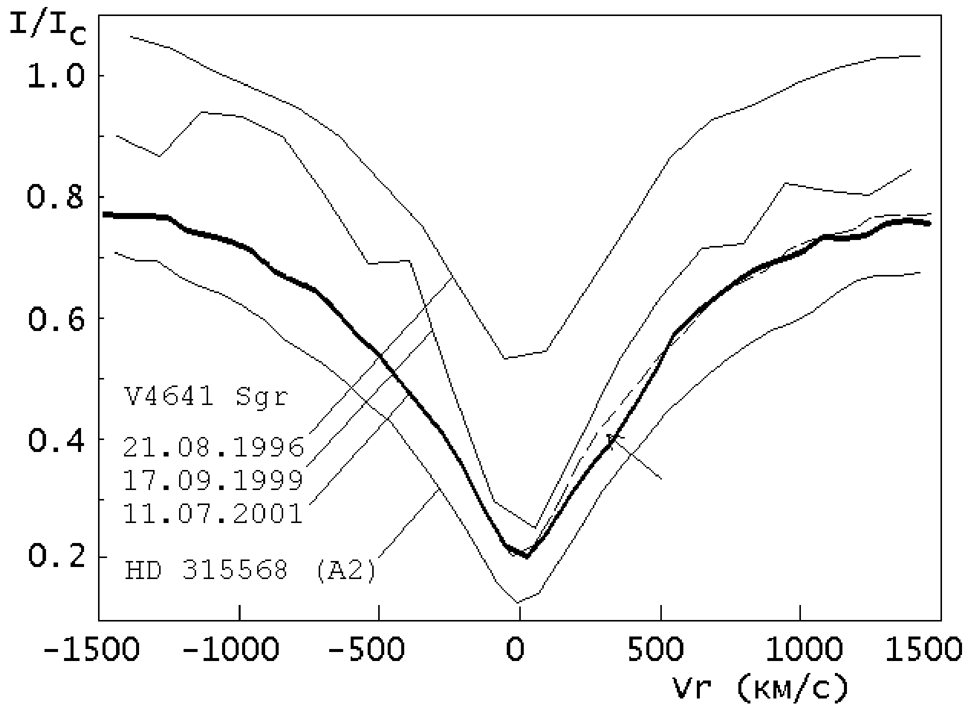

Рис. 23.

Профили линии H_β в нормированных спектрах V4641 Sgr в сравнении со звездой класса A2 HD 315568. Профиль абсорбции водорода в нижнем соединении черной дыры выделен жирной линией, орбитальная фаза наблюдений 0.9980. Для этого профиля на красное крыло наложено зеркально отраженное голубое крыло. Недостаток излучения в красном крыле показан стрелкой.

одинаково хорошо видна в двух спектрах, а приведенный на рис. 22 профиль – суммарный. Спектры получены за час до нижнего соединения черной дыры при среднем значении фазы орбиты 0.9867.

Мы специально проанализировали возможные причины инструментального искажения профиля линии. Поскольку такая же депрессия не наблюдается у расположенной рядом контрольной звезды, не вероятно, чтобы это было поглощение земной атмосферы. В отличие от контрольной звезды из-за большей экспозиции в профиле линии H_α V4641 Sgr видны узкие эмиссионные линии неба. Мы просмотрели по пикселям последовательный процесс вычитания линий неба и провели специальное исследование, чтобы убедиться, что описанная депрессия не возникает по причине неполного или избыточного вычитания эмиссий неба. На рис. 24 мы показали суммарный спектр звезды с линиями неба, чистый вычитаемый спектр неба и остаток – спектр звезды. Как видно, ни одна из эмиссий неба не попадает на область профиля, где наблюдается депрессия. Таким образом, у нас есть все основания считать наблюдаемый эффект реальным.

Мы полагаем, что причина депрессии в том, что в это время на фоне диска нормальной звезды был виден газовый поток, направленный от наблюдателя в сторону нормальной звезды (см. рис. 25, справа вверху). Этот газовый поток, по всей вероятности, является частью разреженного газового диска вокруг черной дыры, расположенного в плоскости орбиты системы. Газ прозрачен в непрерывном спектре, но непрозрачен только в линиях Бальмера. Максимальная гелиоцентрическая скорость депрессии в проекции на луч зрения, снятая с профиля линии, составляет 640($\pm$10) км/с, а гелиоцентрическая скорость центра масс системы, которая сразу следует из нашего наблюдения, равна γ = 108$\pm$3 км/с. Последнее значение совпадает с величиной, найденной в работе Ороса и др. (2001) 107.4$\pm$2.9 км/с. Чтобы сравнить форму профилей в разных фазах орбиты, независимо от орбитального движения, на рис. 22 и 23 профили линий совмещены по центрам симметрии. На рис. 22 стрелкой показана граница депрессии с максимальной скоростью в системе центра

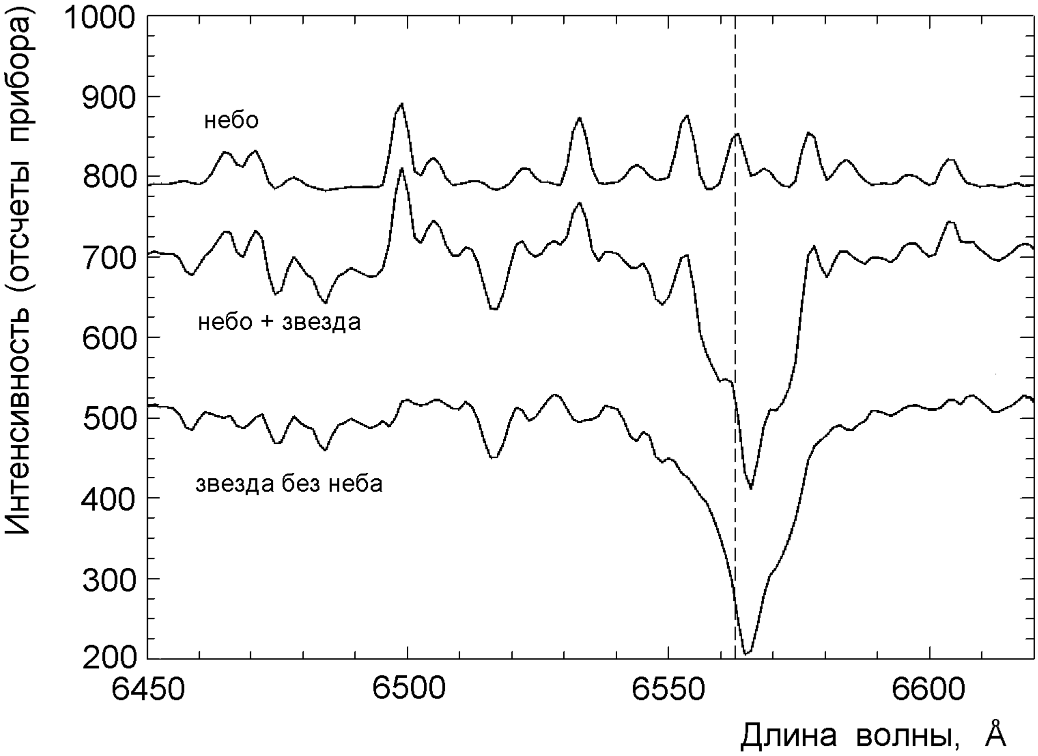

Рис. 24.

Экстракция спектра V4641 Sgr в районе линии H_α из спектрограммы с длинной щелью в пакете MIDAS. Вверху – спектр неба, в середине – суммарный спектр звезды и неба, внизу – чистый выделенный спектр звезды. Вертикальной штриховой линией отмечена лабораторная длина волны линии H_α.

масс, $642 - 108 = 534$ (± 30) км/с.

Из наших наблюдений следует, что соединение черной дыры в системе V4641 Sgr является касательным, так как мы наблюдаем поглощение света нормальной звезды газом, находящимся в ближайшей окрестности компактного компонента. Наклонение орбиты является предельным, при котором еще отсутствует затмение, и равным $i = 70^o.7$, как следует из работы Ороса и др. (2001).

Важно заметить, что в голубом крыле профиля линии H_α не наблюдается никаких следов поглощения, которое должно быть в случае существования течения газа со вторичного компонента через точку Лагранжа

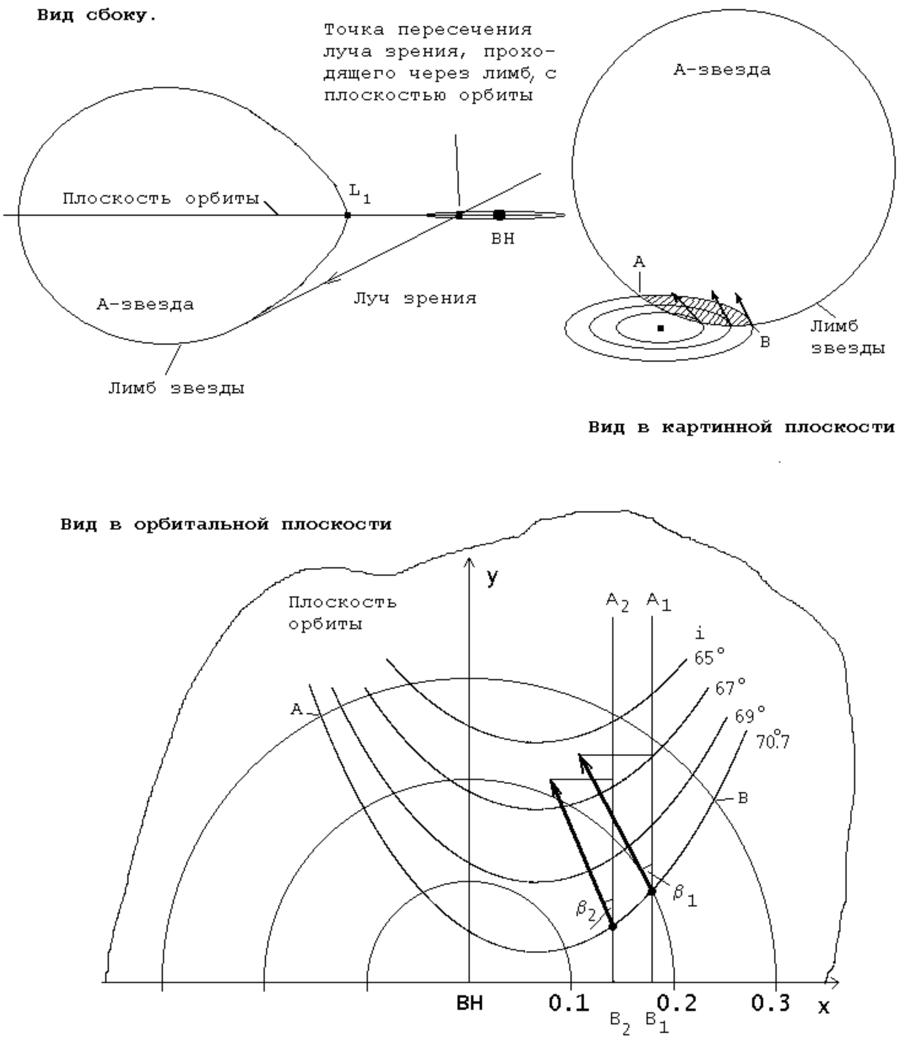

Рис. 25.

Геометрия затмения звезды потоками разреженного диска. Справа вверху заштрихованная область – область формирования депрессии в красном крыле линии H_α на диске в плоскости орбиты. Эта область ограничена с одной стороны внешним краем диска, с другой – линией пересечения луча зрения, проходящего через лимб звезды, орбитальной плоскостью. Слева вверху показано, как находится точка пересечения луча зрения, проходящего через лимб, с плоскостью орбиты. Внизу фрагменты эллипсов – линии пересечения луча зрения, проходящего по лимбу звезды, с плоскостью орбиты при разных значениях наклонения орбиты. Показано, как определяется угол β между направлением потоков и проекцией луча зрения на плоскость орбиты на лимбе звезды. Пояснения в тексте.

L_1 системы. Это означает, что система V4641 Sgr разделенная, и нормальная звезда не заполняет свою полость Роша. Наша фотометрия (рис. 20) показывает интересный эффект: наиболее глубокий минимум двойной волны соответствует фазе нижнего соединения черной дыры. Этот эффект совершенно противоположен тому, который наблюдается у большинства рентгеновских систем. У некоторых рентгеновских систем сторона спутника, обращенная к компактному компоненту, подогрета рентгеновским излучением от этого компонента ("эффект отражения"), и поэтому амплитуда фотометрического минимума на кривой блеска в фазе нижнего соединения меньше, чем в противоположной фазе. У V4641 Sgr обращенная к черной дыре сторона спутника даже более темная и холодная, чем противоположная сторона. Этот эффект можно объяснить из теоремы фон Цейпеля, из которой следует, что, температура элемента поверхности пропорциональна локальной эффективной силе тяжести g^{β}, где $\beta = 0.2 - 0.3$ (фон Цейпель, 1924). Очевидно, в разделенной системе у нормальной звезды в области ее поверхности, непосредственно лежащей под точкой L_1, эффективная сила тяжести будет минимальной по сравнению с остальными областями. Подобный же эффект может существовать и в толстых аккреционных дисках. Удаленные от центрального источника энергии части поверхности толстого диска меньше прогреваются центральным источником, а потому светят слабее и имеют более низкую поверхностную температуру, что учитывается, например, при моделировании аккреционных дисков (см., книгу Гончарского и др., 1991). Фотометрический эффект более глубокого ослабления блеска в нижнем соединении черной дыры по сравнению с верхним соединением также свидетельствует в пользу того, что отсутствует течение через точку Лагранжа, и что V4641 Sgr – разделенная система.

Спектры в синей области, полученные в ту же ночь в орбитальной фазе 0.9980 (рис. 23), существенно ближе к фазе нижнего соединения, не показывают в профиле абсорбционной линии H_β подобной сильной депрессии и более симметричны, чем профили H_α. Хотя очень слабая депрессия в красном крыле линии H_β выявляется, если на красное крыло линии наложить зеркально отраженное голубое крыло, как это сделано на рис. 23 (штриховая линия). Депрессия сказывается на форме профиля как заметная асимметрия. Заметные различия в профилях H_α и H_β весьма примечательны и требуют объяснения. Вероятности поглощения квантов света бальмеровской серии атомом водорода одинаковы: в обоих случаях при поглощении в этих линиях происходит перехват кванта электроном, находящимся на втором уровне. Мы объясняем отсутствие глубокой депрессии в H_β тем, что на звездный диск в фазе 0.9980 (ближе к фазе нижнего соединения) газовый диск проецируется симметрично. Составляющие круговой скорости газа симметричны относительно диска звезды, а к тому же проекция этих скоростей значительно меньше по величине. Поэтому картина поглощения в линии H_β более симметрична относительно центра линии. С этой точки зрения естественно ожидать, что после соединения депрессия должна наблюдаться в голубом крыле линии уже от направленного *на наблюдателя* газового потока. Если, конечно, газовый диск расположен в плоскости орбиты. Спектральную картину прохождения черной дыры около нижнего соединения интересно проследить в более широком диапазоне орбитальных фаз.

В одном из последних спектроскопических исследований Линдстром и др. (2005) пишут, что "ни один из их спектров не показывает переменности или искажений спектральных линий, которые могли бы проявиться из-за какой-либо аккреционной активности (Горанский и др., 2003), кроме тех обнаруживаемых изменений, которые обусловлены орбитальным движением вторичного компонента". Так что возможно, что явление, которое мы наблюдали, представляет временное событие, и наблюдается не всегда. Это вполне естественно, так как у объекта наблюдаются и другие, фотометрические эпизоды активности, описанные нами ранее. С другой стороны, на рис. 7 в статье Линдстрома и др. (2005) видно, что на кривой лучевой скорости нет наблюдений в фазе, столь близкой к нижнему соединению релятивистского компонента, как в наших наблюдениях 2001 г.

Мы попытались оценить массу черной дыры по скорости и радиусу орбиты, по которой движется вещество вокруг нее. Так как на звездный диск проецируются потоки аккреционного диска, движущиеся под разными углами, причем даже перпендикулярно лучу зрения, и находящиеся на разных орбитах, расчет депрессии в профиле – сложная задача. Гораздо проще оценить радиус орбиты того потока, который в проекции на звездный диск имеет максимальную скорость.

Зная скорость объекта на кеплеровской круговой орбите и радиус орбиты можно измерить массу центрального тела. Приравняем центростремительную силу кругового движения к силе гравитации:

$$mv^2/R = GmM_{BH}/R^2,$$

где m и M_{BH} – массы тел, находящегося на круговой орбите, и центрального тела, v – скорость тела, находящегося на орбите, R – расстояние между ними, а G – гравитационная постоянная. Из этой формулы следует:

$$M_{BH} = v^2R/G.$$

Из наблюдений определяется не максимальная скорость потока, а ее проекция на луч зрения. Для определения скорости кругового движения по ее проекции 534 км/с нужно учесть наклонение орбиты i и угол β между направлением кругового движения и проекцией луча зрения на орбитальную плоскость для потока с максимальной скоростью. Для определения угла β мы построили геометрическую модель системы с $q = M_x/M_* = 1.5$ (Орос и др., 2001) и коэффициентом заполнения полости Роша $\mu = 0.98$ для фазы получения красного спектра 0.9867. На рис. 25 в орбитальной плоскости для нескольких значений наклонения орбиты, в пределах $i = 65^o - 70^o.7$, нанесены сечения плоскости орбиты лучем зрения, проходящим по лимбу звезды (фрагменты эллипсов). Нанесены также круговые орбиты с шагом $\Delta R = 0.1a$ (a – расстояние между черной дырой и центром нормальной звезды). На рис. 25 (фрагмент справа вверху) видно, что максимальные проекции скоростей потоков наблюдаются на лимбе звезды, а при удалении от лимба проекции всегда уменьшаются. Максимальные скорости при фазе 0.9867 наблюдаются в тех точках на лимбе звезды, расстояние которых от центрального тела $R = 0.15 - 0.20a$. При этом углы между направлением кругового движения и проекцией луча зрения (A_1B_1, A_2B_2) около $\beta = 30 - 36^o$. Радиус орбиты газового потока, определяемый из модели, не зависит сильно от отношения масс компонентов, но зависит от орбитальной фазы наблюдения, которая известна. В то же время решение зависит от наклонения орбиты. При увеличении наклонения угол β увеличивается, и при этом определяемое значение круговой скорости увеличивается, а определяемая в результате масса черной дыры увеличивается пропорционально квадрату скорости. Определяем теперь круговую скорость из ее проекции при наклонении орбиты $i = 70^o.7$: $v_{circ.} = v_{proj.}/(sini \cdot cos\beta) = 650$ км/с. Принимая $a = 21.33R_\odot$ из работы Ороса и др. (2001), получаем массу черной дыры в пределах $7.1 \leq M_{BH} \leq 9.5M_\odot$. Полученные пределы массы хорошо перекрываются с пределами $8.7 \leq M_{BH} \leq 11.7M_\odot$ из работы Ороса и др. (2001). При уменьшении наклонения орбиты i оценки массы могут быть еще выше. Таким образом мы показали, что измеренная скорость вещества на оцененном расстоянии соответствует расчетной скорости в модели с массивной черной дырой, и подтверждаем массу, найденную в этой работе.

3. Основные результаты исследования V4641 Sgr

1) В спектрах V4641 Sgr не видно эмиссионных линий аккреционного диска, видны только абсорбционные линии одного оптического компонента спектрального класса A0III. Это свидетельствует в пользу того, что V4641 Sgr является разделенной системой.

2) Спектральные наблюдения V4641 Sgr на 6-м телескопе в фазе около нижнего соединения черной дыры обнаружили вокруг нее разреженный газовый поток, поглощающий излучение звезды в линиях водорода. Воз-

можно, этот разреженный поток – временное явление, и наблюдается не постоянно, как и другие проявления активности.

3) По скорости движения вещества диска вокруг черной дыры и по радиусу орбиты наиболее высокоскоростного потока в диске оценена масса черной дыры $7.1 \leq M_{BH} \leq 9.5M_{\odot}$, подтверждающая модель Ороса и др. (2001).