ОПТИЧЕСКАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ ЛЕБЕДЬ X-1

Е. А. Карицкая

Институт астрономии РАН
Пятницкая 48, 119017 Москва, Россия
e-mail: `karitsk@sai.msu.ru`

В последнее время в ходе исследования первого кандидата в черные дыры Лебедь X-1 было обнаружено множество новых фотометрических эффектов. Например, помимо орбитальной переменности были выявлены различного типа вспышки, так называемый прецессионный период 147/294 дней, а также значительная корреляция между долговременными оптическими и рентгеновскими (2–10 кэВ) вариациями, которые запаздывают на одну или две недели. Для понимания физической природы этих явлений необходим детальный спектральный анализ, включая доплеровскую томографию. В статье обсуждается потенциал прецизионной спектроскопии высокого разрешения для изучения способа перетекания газа между компонентами этой двойной системы, физические характеристики газа как в области аккреционной структуры (особенно во время вспышек, причиной которых по-видимому является возрастание потока втекающей материи), так и истекающего из сверхгиганта, происхождение 147-дневного периода и т. д. Использование эшеле-спектрометра на 2-м телескопе обсерватории Терскол для этих наблюдений рассматривается в качестве наилучшего варианта.

THE OPTICAL DOPPLER TOMOGRAPHY AS A METHOD FOR INVESTIGATION OF THE X-RAY BINARY CYGNI X-1, by Karitskaya E. A. – Recently numerous photometric effects were found during the investigation of the first black hole candidate Cyg X-1. For example, in addition to orbital variations, there are different kinds of flares, the so-called precession period of 147/294 days, and a significant correlation between the long-time optical variations and the 2–10 keV X-ray variations with the time lag of one or two weeks. Detailed spectral analysis (including the Doppler tomography) is necessary for understanding the physical nature of these phenomena. In this report we discuss the high-resolution spectroscopy potentialities for recognizing the manner of gas flow between the components, the origin of a 147-day period as well as for determining the physical characteristics of gas both in the region of accretion structure (especially during the flares caused by an increasing accretion matter flux) and outflowing from supergiant, and so on. The echelle-spectrometer of the Terskol 2-m telescope could be very useful for these purposes.

ВВЕДЕНИЕ

Лебедь X-1 – это уникальная рентгеновская двойная система, релятивистский компонент которой является первым кандидатом в черные дыры. Средняя орбитальная кривая блеска с периодом 5.6 дня объясняется приливной деформацией оптической звезды – сверхгиганта O9.7Iab в поле тяжести релятивистского объекта. Сверхгигант почти заполняет свою полость Роша. Истекающая с него материя образует вокруг релятивистского компонента аккреционную структуру – по современным представлениям маленький аккреционный диск и вокруг него некую газовую структуру. Современные модельные гидродинамические расчеты перетекающего газа в тесных двойных системах, например, проводимые группой А. А. Боярчука с сотрудниками [2], способны получить детальную картину распределения газа, поле скоростей и другие его физические параметры. Для этих расчетов необходимо знать параметры системы. Однако, несмотря на многолетние интенсивные исследования, эти параметры известны до сих пор довольно плохо из-за отсутствия рентгеновского затмения. Особенно это касается угла наклона орбиты. А. М. Черепащук [6] дает его оценку $28^\circ - 63^\circ$, исходя из решений кривой блеска. Herrero *et al.* [9], используя свои спектральные данные для Лебедя X-1, получают другие оценки параметров, которые несколько выходят за рамки областей допустимости параметров, полученных с использованием фотометрических методов. Имеется также некоторое противоречие между оценкой расстояния до Лебедя X-1, полученной по межзвездным линиям, и светимостью звезды, полученной Herrero *et al.* [9] с помощью их унифицированной модели. Видимо, требуется более точная спектроскопия и расчеты профилей линий. Также некоторые спектральные линии состоят из нескольких компонентов соответственно различным областям их происхождения, и необходимо аккуратно разделить эти компоненты. Кроме того, необходимо принимать во внимание вытянутую форму сверхгиганта – так называемое гравитационное потемнение при расчете эффекта эллипсоидальности.

Согласно последним работам есть наблюдательные свидетельства нестационарного перетекания вещества с оптического компонента [10]. Нестационарность перетекания может вызвать ударные волны в окружающем газе и при втекании в аккреционный диск, а также перераспределение рассеивающей и поглощающей материи вблизи релятивистского компонента. Наблюдения [3] выявили вспышки, которые, по-видимому, возникают вследствие появления временных горячих областей – так называемых “горячих пятен”, и одновременно с ними спадов рентгеновского излучения (дипов), которые могут быть следствием появления поглощающего газа на луче зрения. Каждый из этих факторов должен оказать влияние на спектральные линии. Поэтому для их проверки требуются спектральные исследования.

В последнее время обнаружена корреляция между долговременными изменениями оптического и рентгеновского потока с запаздыванием рентгеновской переменности относительно оптической в среднем примерно на 7 дней (в 1996 г.) и 12 дней (в 1997–1998 гг.) [3, 4]. Такие же запаздывания были обнаружены между оптическими и рентгеновскими вспышками. Согласно предложенной физической интерпретации они являются характерным временем, которое требуется для прохождения вещества через аккреционную структуру [3]. Изучение изменения профилей линий относительно указанных вариаций помогло бы проследить последовательность прохождения вещества через эту структуру.

Несмотря на то, что о существовании аккреционных дисков известно уже давно, до сих пор не вполне ясны динамика взаимодействия газовых потоков с их внешними частями и сам процесс истекания вещества из оптического компонента. Особенно это касается системы Лебедь X-1, в которой сверхгигант на несколько процентов недозаполняет свою полость Роша. С одной стороны, следует ожидать перенос вещества с помощью сфокусированного звездного ветра [8], а с другой стороны, в связи с тем, что верхние слои атмосферы заполняют полость Роша, следует ожидать формирование струи. Расчет модели атмосферы сверхгиганта, выполненный в разных точках с учетом звездного ветра и падающего снаружи рентгеновского потока, и сравнение расчетных профилей линий с наблюдаемыми позволили бы понять формирование потока оттекающей материи.

ОПТИЧЕСКАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ КАК АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕБЕДЬ X-1

Как было сказано во введении, параметры рентгеновской двойной Лебедь X-1 известны недостаточно хорошо. Имеется сильное влияние некоторых параметров (например степени заполнения полости Роша) на течение газа в системе. С другой стороны, современный расчет газодинамических моделей способен дать довольно подробную геометрическую и кинематическую картину газовых потоков в тесных двойных системах. Поэтому сравнивая теоретическую картину с наблюдаемой, можно было бы в принципе судить о значениях параметров этой системы. В последнее время стал бурно развиваться метод томографии в астрофизике (см. статью Бочкарева [1]), который в принципе может позволить получить наблюдаемую газодинамическую картину.

Метод доплеровской томографии позволяет построить доплеровскую карту (томографическую карту) распределения интенсивности эмиссионной линии на плоскости скоростей $I(V_x, V_y)$, используя последовательные спектрограммы этой эмиссионной линии – последовательные профили $I(\lambda, t)$ (или иначе $I(V_R, \varphi)$, где φ – фаза двойной системы). Имея достаточно хорошее представление о распределении скоростей в двойной системе, можно также получить распределение материи, излучающей эту эмиссионную линию. Эта задача является неоднозначной, так как могут существовать точки, имеющие одинаковые радиальные скорости, но располагающиеся в разных местах двойной системы. При этом они будут давать вклад в одно и то же место доплеровской карты. В работе Кузнецова, Боярчука, Бисикало и др. [5] использовался более корректный метод для изучения тесной двойной системы IP Peg. Авторы сравнивали теоретические томографические карты, которые они рассчитывали с помощью газодинамических моделей, с наблюдаемыми. Такой метод позволяет более точно судить о модели и параметрах системы. Выполнение такого анализа в свете вышесказанного представляется особенно важным именно для Лебедя X-1. Для этого необходимо получить много высококачественных спектрограмм, распределенных достаточно часто и однородно по орбитальным фазам, желательно за один орбитальный период.

Первая попытка провести томографический анализ профилей линий H_α системы Лебедь X-1 (Sowers *et al.* [11]) показала перспективность этого метода и вместе с тем сложность его применения к данной системе, несмотря на сильную регулярную переменность профилей линий с орбитальным периодом 5.6 дня. В этой работе было получено только $I(V_R, \varphi)$, но был сделан вывод, что эта линия излучается двумя областями – сверхгигантом и эмиссионным компонентом, находящимся в потоке материи между двумя компонентами. Необходимы более рафинированные методы наблюдений и анализа:

А. Следует принимать во внимание вариации параметров спектральных линий по поверхности звезды вследствие гравитационного потемнения и эффекта отражения.

Б. Необходимо повысить точность измерений и улучшить спектральное разрешение.

В. Следует использовать линии, являющиеся индикатором аккреционной структуры (например He II 468.6 нм).

Г. Для анализа процесса истечения вещества из сверхгиганта необходимо использовать линии, образующиеся в разных слоях атмосферы звезды. Например, для этих целей целесообразно получить высокоточные спектральные наблюдения двух участков спектра:

– от линии He II 468.6 нм до линии H_β;

– содержащий линии H_α, He I 667.1 нм и He II 668.3 нм (переход между уровнями 13 и 11).

Звездная величина Лебедя X-1 равна $B = 9.7^m$, $V = 8.9^m$. Спектральные наблюдения, необходимые для решения проблемы, целесообразно проводить на телескопе умеренного размера, чтобы было возможно выполнять не слишком короткие ряды спектральных наблюдений с достаточно высокими – спектральным разрешением (15 000 – 50 000), временным разрешением (десятки минут – часы) и отношением сигнала к шуму S/N, превышающим 100. Необходимо охватывать все предварительно выбранные участки спектра по возможности одновременно. Наблюдения с помощью эшеле-спектрометра на 2-м телескопе обсерватории Терскол могли бы удовлетворить этим требованиям. Этот эшеле-спектрометр перекрывает спектральный диапазон от 0.3–0.4 мкм до 1 мкм со спектральным разрешением 45 000. В течении часа наблюдений можно достичь требуемого сигнала к шуму S/N. Такое высокое спектральное разрешение делает эту задачу почти предельной для этого телескопа. Однако есть надежда, что в следующем году появится другая мода спектрографа со спектральным разрешением 20 000. Такое разрешение достаточно для этой задачи и позволит наблюдать Лебедь X-1 каждую ясную ночь независимо от ее качества.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ЛЕБЕДЬ X-1, ТРЕБУЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕТАЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Прецизионная спектроскопия высокого разрешения (в особенности в сочетании с фотометрическими, рентгеновскими и радио наблюдениями) открывает широкие возможности для исследования процесса истекания вещества из сверхгиганта, спорадических и квазипериодических нестационарностей перетекания вещества, взаимодействия газового потока с внешними частями аккреционной структуры (см. введение). Можно получить информацию о геометрии и кинематике газовых течений из наблюдательных данных с использованием численных расчетов профилей спектральных линий.

Однако для адекватного анализа наблюдений столь высокого качества необходимо использовать новые методы, которые включают сопоставление наблюдаемых профилей линий с модельными теоретическими, рассчитанными в NLTE-приближении, в истекающих звездных атмосферах, облучаемых снаружи излучением рентгеновского компонента. Основой для соответствующего метода анализа могут служить алгоритмы, разработанные группой Н. А. Сахибуллина (Казанский университет).

Из полученных спектров предполагается отобрать несколько пар или групп по возможности близких по длинам волн спектральных линий, имеющих разный потенциал возбуждения и образующихся в существенно разных областях течения вещества (в разных слоях атмосферы O-сверхгиганта или аккреционного течения), и изучить по возможности зависимость этих линий от фаз орбитального периода и периода 147/294 дня. Эти линии должны быть удобны для теоретических расчетов в NLTE-приближении. На основе полученных моделей атмосферы можно будет рассчитывать в NLTE-приближении профили отобранных наблюдаемых линий в разных точках поверхности звезды и выполнять интегрирование по поверхности для получения модельных профилей, пригодных для сопоставления с наблюдениями. Сравнение их с наблюдаемыми в зависимости от орбитальной фазы позволит понять процесс истекания вещества из звезды, а также определить величину приливного искажения формы сверхгиганта в поле тяжести второго компонента.Это даст ключ к более точному определению параметров системы, например, отношения масс компонентов. Изучение линий, образующихся в разных слоях атмосферы сверхгиганта, даст возможность исследовать истекание газа из сверхгиганта, формирование газового потока вблизи внутренней точки Лагранжа, а также определить, каким способом перетекает вещество в виде струи или сфокусированного звездного ветра.

Предыдущий опыт исследования показывает, что сопоставление полученных данных позволяет выделить эффекты, связанные с нестационарностью перетекания. В связи с тем, что излучение в разных спектральных диапазонах образуется в разных частях аккреционной структуры, следует изучать запаздывание во времени проявлений нестационарности в разных диапазонах спектра совместно с изменениями в спектральных линиях друг относительно друга. Это позволит исследовать строение аккреционной структуры и динамику процесса аккреции непосредственно исходя из наблюдений.

В заключение кратко перечислим актуальные задачи, которые по нашему представлению могут быть решены с помощью высокоточных спектральных наблюдений с высоким разрешением, полученных эшеле-спектрографом на 2-м телескопе.

1. По наблюдаемым профилям линий в разных орбитальных фазах:

а) получить с помощью метода томографии картину распределения газа в системе или хотя бы томографическую карту; полученную картину сравнить с результатами газодинамических расчетов, например, проведенных в ИНАСАН группой А. А. Боярчука, Д. В. Бисикало и др. Это позволит получить представления о параметрах системы и судить более точно о модели системы;

б) использовать полученные спектры для уточнения функции масс двойной системы Лебедь X-1 и других параметров системы.

2. Из анализа линий, принадлежащих ионам с существенно разными потенциалами ионизации (H I, He I, He II), получить:

а) градиенты скорости оттока газа от сверхгиганта;

б) распределение свойств параметров атмосферы вдоль поверхности оптического компонента;

в) ограничения на возможные вариации характера движения газа в атмосфере с фазой так называемого прецессионнного периода 147/294 дня, которые могут пролить свет на природу этого периода.

3. Из сопоставления “спорадических” вариаций спектров со вспышечными явлениями уточнить природу:

а) оптических вспышек длительностью порядка дней [3, 7];

б) переходов между “жестким” и “мягким” состояниями рентгеновского спектра Лебедь X-1.

Исследование поддержано Федеральной научно-технической целевой программой “Астрономия” Российской Федерации.

[1] *Бочкарев Н. Г.* Томография в астрофизике // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.–2003.–№ 4.–С. 91–96.

[2] *Бисикало Д. В., Боярчук А. А., Кузнецов О. А., et al.* Свидетельства отсутствия ударного взаимодействия струи и диска (“горячего пятна”) в полуразделенных двойных системах // Астрон. журн.–1998.–**75**, № 1.–С. 40–53.

[3] *Карицкая Е. А., Горанский В. П., Гранкин К. Н., Мельников С. Ю.* Исследование переменности Cyg X-1 (V1357 Cyg) в 1995–1996 гг. во время “жесткого” и “мягкого” состояний спектра рентгеновского излучения // Письма в Астрон. журн.–2000.–**26**, № 1.–С. 27–40.

[4] *Карицкая Е. А., Волошина И. Б., Горанский В. П. и др.* Результаты наблюдений Cyg X-1 (V1357 Cyg) по кооперативной программе стран СНГ в 1994–1998 гг. // Астрон. журн.–2001.–**78**, № 5.–С. 408–420.

[5] *Кузнецов О. А., Бисикало Д. В., Боярчук А. А. и др.* Синтетические доплеровские томограммы газовых потоков в двойной системе IP Peg // Астрон. журн.–2001.–**78**, № 1.–С. 997–1007.

[6] *Черепащук А. М.* Массы черных дыр в двойных звездах // Успехи физ. наук.–1996.–**166**, № 8.–С. 809–832.

[7] *Bochkarev N. G., Karitskaya E. A., Lyuty V. M.* Optical flares of Cyg X-1 // Modern Problem of Stellar Evolution: Proc. Intern. Conf. / Ed. D. S. Wiebe.–Moscow: Geos, 1998.–P. 187–191.

[8] *Gies D. R., Bolton C. T.* The optical spectrum of HDE 226868 = Cygnus X-1. III. A focused stellar wind model for He II λ4686 emission // Astrophys. J.–1986.–**304**.–P. 371–381.

[9] *Herrero A., Kudritzki R. P., Gabler R., et al.* Fundamental parameters of galactic luminous OB stars. II. A spectroscopic analysis of HDE 226868 and the mass of Cygnus X-1 // Astron. and Astrophys.–1995.–**297**.–P. 556–566.

[10] *Karitskaya E. A.* Optical and X-ray variability of Cyg X-1: evidences of non-stationary accretion in 1996 // Modern Problem of Stellar Evolution: Proc. Intern. Conf. in honour of Professor A. G. Massevitch's 80th birthday (Zvenigorod, Russia, Oct. 13–15, 1998) / Ed. D. S. Wiebe.–Moscow: Geos, 1998.–P. 181–186.

[11] *Sowers J. W., Gies D. R., Bagnuolo W. G. Jr, et al.* Tomographic analysis of H_α profiles in HDE 226868/Cygnus X-1 // Astrophys. J.–1998.–**506**.–P. 424–430.