

УНИКАЛЬНЫЙ АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ SS 433

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

UNIQUE ASTROPHYSICAL OBJECT SS 433

A. M. CHEREPASHCHUK

The SS 433 object demonstrates to us a process of accretion of matter into a relativistic object in a close binary system that implies the formation of collimated jets with a velocity of streaming of matter about 0,27 velocity of light. Presumably, similar processes of accretion leads to the appearance of relativistic jets in the nuclei of galaxies and quasars.

Объект SS 433 демонстрирует нам, как процесс аккреции вещества на релятивистский объект в двойной системе приводит к формированию узконаправленных выбросов вещества, движущегося со скоростью 0,27 скорости света. По-видимому, такие же процессы аккреции приводят к появлению релятивистских выбросов (джетов) в ядрах галактик и квазарах.

ВВЕДЕНИЕ

Галактический объект SS 433 интересен тем, что в нем формируются узконаправленные (коллимированные) релятивистские (скорость плазмы $\sim 0,27c$, c — скорость света) прецессирующие выбросы вещества — джеты. Известно, что в ядрах галактик и квазарах также наблюдаются релятивистские джеты, происхождение которых представляет большую загадку для астрофизики. Относительная близость объекта SS 433 и наличие в нем оптических затмений (объект является рентгеновской двойной системой) дают уникальную возможность наблюдательных исследований процессов формирования релятивистских джетов.

Объект SS 433 получил свое название по порядковому номеру в каталоге С. Стефенсона и Н. Сандулака, содержащем звезды с сильной эмиссионной линией водорода H_{α} . В общем “Каталоге переменных звезд” он обозначен как V 1343 Орла. Это слабый, сильно покрасневший за счет межзвездного поглощения звездобразный объект, блеск которого в визуальных лучах меняется от ~ 13 до ~ 15 звездной величины. Расстояние до него ~ 5 кпк (килопарсек). Он расположен в центре туманности W 50 — сравнительно молодого, с возрастом 10^4 – 10^5 лет остатка вспышки сверхновой звезды, который является источником оптического, рентгеновского и радиоизлучения.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТА

Уникальной особенностью объекта SS 433 является наличие в его спектре трех систем сильных линий излучения водорода и нейтрального гелия (рис. 1). Длины волн так называемых стационарных линий близки к их лабораторным значениям. Две другие системы линий перемещаются по спектру с периодом 162,5 дня, причем смещения достигают огромной величины $\sim 900 \text{ \AA}$ и в шкале скоростей (если считать эти смещения вызванными эффектом Доплера) меняются от $+50\,000$ до $-30\,000$ км/с (см. рис. 1). Подвижные эмиссии в спектре SS 433 и период их перемещения были открыты группой американских астрофизиков под руководством Брюса Маргона в 1979 году.

www.issep.rssi.ru

Эта сложная картина в спектре SS 433 совместима с представлением о том, что подвижные эмиссионные линии возникают в двух противоположно направленных коллимированных выбросах газа, движущегося со скоростью $\sim 80\,000$ км/с ($0,27c$!). Оба выброса прецессируют с периодом 162,5 суток, причем угол между направлением выбросов и осью прецессии составляет $\sim 20^\circ$, а угол между лучом зрения и осью прецессии близок к 79° (рис. 2). Смещение подвижных эмиссий вызвано эффектом Доплера. Величина красного и синего

смещения $Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ движущихся эмиссионных ли-

ний, возникающих в коллимированных джетах, описывается следующим релятивистским соотношением:

$$Z = \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \left(1 \pm \frac{V}{c} \cos \psi\right) - 1, \quad (1)$$

где $V = 80\,000$ км/с — скорость вещества в джетах, c — скорость света, ψ — угол между направлением джета и лучом зрения. Первой множитель в формуле (1) учитывает влияние поперечного эффекта Доплера и связан с релятивистским замедлением хода времени в движущемся веществе джета.

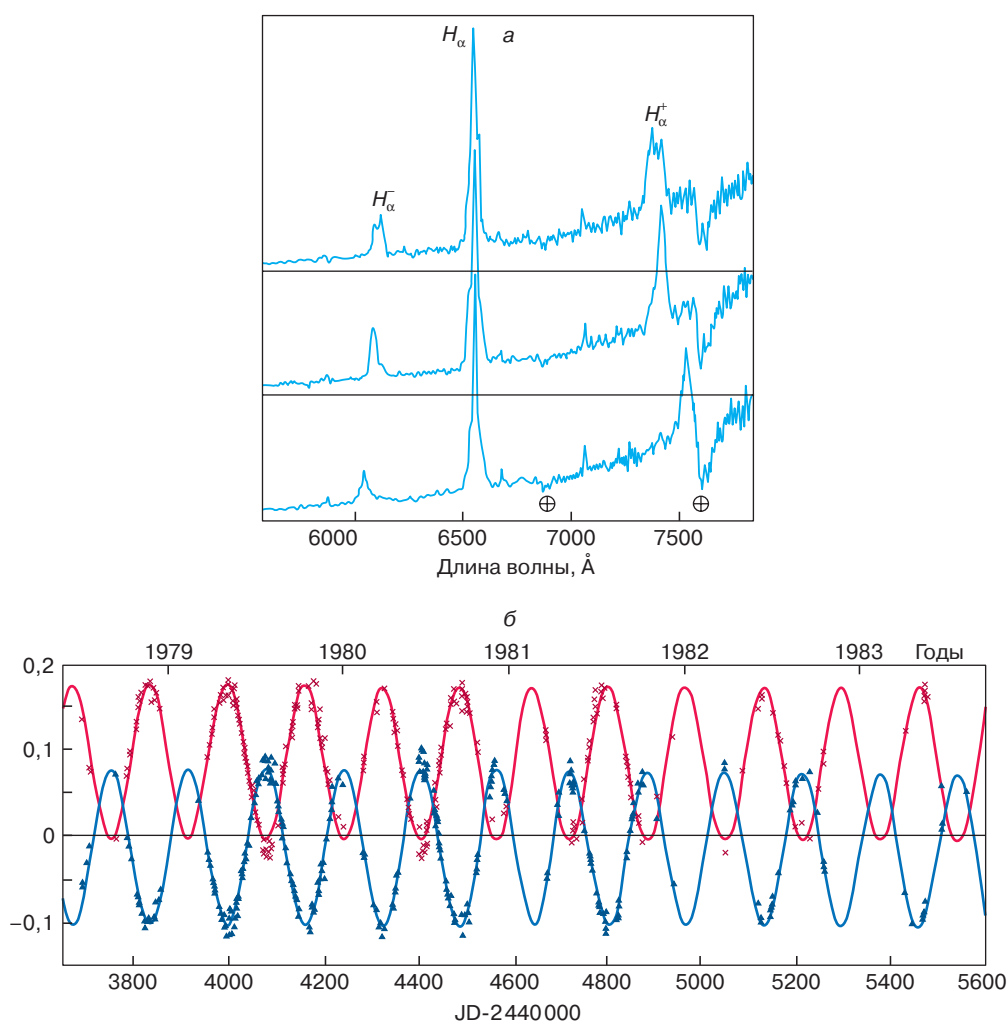


Рис. 1. а – три последовательных спектра SS 433 вблизи линии водорода H_α , снятые Брюсом Маргоном с интервалом в 1 сутки. Видно систематическое перемещение подвижных эмиссионных линий H_α^+ и H_α^- относительно стационарной эмиссии H_α . б – кривые лучевых скоростей для синей и красной подвижных эмиссионных линий водорода H_α в спектре SS 433. Отчетливо прослеживается прецессионный период 162,5 суток

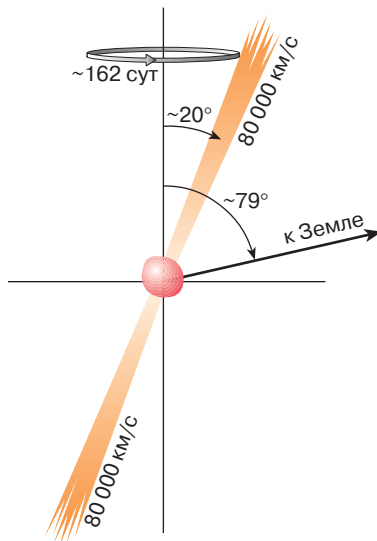


Рис. 2. Кинематическая модель объекта SS 433, построенная на основе анализа кривых лучевых скоростей подвижных эмиссионных линий в его спектре. Релятивистские коллимированные джеты вырываются в противоположных направлениях из центрального источника (внутренних частей аккреционного диска) и прецессируют с периодом 162,5 суток. Угол раствора конуса прецессии составляет 20° , а ось симметрии этого конуса (перпендикулярная плоскости орбиты двойной системы) наклонена к лучу зрения земного наблюдателя на угол $78^\circ 7'$

ПЕРВАЯ КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ SS 433 КАК ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Канадские ученые Д. Крэмптон, А. Каули и Дж. Хатчингс в 1980 году открыли периодическую (период 13,08 дня) переменность лучевых скоростей по узким компонентам стационарных эмиссионных линий в спектре SS 433, что свидетельствует о том, что этот объект является тесной двойной системой. Амплитуда этих смещений равна ± 72 км/с. Предположив, что узкие компоненты стационарных линий H_α , H_β формируются в аккреционном диске вокруг релятивистского объекта, канадские ученые определили массы компонент двойной системы. Их расчеты показали, что SS 433 — маломассивная двойная система, в которой нормальная звезда имеет массу менее $1 M_\odot$ ($M_\odot$ — масса Солнца), а масса релятивистского объекта также не более $1 M_\odot$ (что характерно для нейтронной звезды или белого карлика). Как выяснилось позднее, такие параметры SS 433 оказались ошибочными.

Весной 1980 года автор данной статьи выполнил фотометрические наблюдения SS 433 и обнаружил, что это затменная переменная двойная система (рис. 3). Сопоставление кривой блеска с этой кривой лучевых скоростей показало, что в момент затмения аккреци-

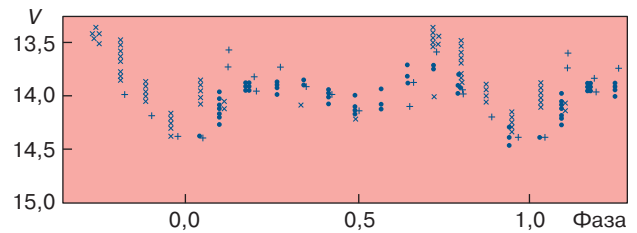


Рис. 3. Орбитальная кривая блеска SS 433, полученная автором статьи в 1980 году. Видны затмения аккреционного диска нормальной звездой (фаза 0,0) и звезды диском (фаза 0,5). На основании этой кривой блеска была построена первая модель объекта SS 433 как двойной системы с прецессирующим сверхкритическим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта. Здесь и на рис. 5 V — звездная величина в видимых лучах

онного диска звездой лучевая скорость не равна скорости центра масс двойной системы, а достигает своего максимума, то есть газ, формирующий стационарные линии H_α , H_β , удаляется от наблюдателя. Это позволило заключить, что узкие эмиссионные пики стационарных линий H_α , H_β не отражают орбитального движения компонент двойной системы, а формируются в газовых потоках, истекающих из нормальной звезды к аккреционному диску. Это доказывает, что прямое определение масс компонент системы SS 433 по кривой лучевых скоростей для стационарных эмиссий H_α , H_β 件возможно.

Поскольку болометрическая светимость системы SS 433 превышает 10^{39} эрг/с, а на кривой блеска SS 433 уверенно наблюдаются затмения как аккреционного диска нормальной звездой, так и звезды диском, автор статьи пришел к выводу, что ни одна из компонент двойной системы не может иметь массу менее солнечной. Скорее всего, SS 433 представляет собой массивную затменную двойную систему, состоящую из нормальной звезды спектрального класса $\sim B$ и релятивистского объекта, окруженного оптически ярким аккреционным диском, прецессирующим с периодом 162,5 дня. Из центральных частей аккреционного диска вырываются коллимированные релятивистские джеты, перпендикулярные к плоскости диска и отслеживающие прецессию диска. Случайные отклонения от перпендикуляра к плоскости диска не превышают величины угла раствора джетов (не более 1°). Нормальная звезда в системе SS 433 переполняет свою полость Роша и истекает на соседний релятивистский объект с огромным темпом $\sim 10^{-4} M_\odot/\text{год}$, что приводит к образованию сверхкритического аккреционного диска вокруг релятивистского объекта.

Центральный релятивистский объект не в состоянии принять все вещество, поступающее в диск от

нормальной звезды, поэтому подавляющая часть вещества (более 99%) выбрасывается наружу от диска в виде квазисферического ветра под действием давления радиации, превышающего силу гравитационного притяжения релятивистского объекта. Реализуется режим сверхкритической аккреции, впервые описанный в 1973 году Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым. В таком режиме под действием давления излучения центральные части диска стремятся принять квазисферическую форму и у диска появляется мощная протяженная атмосфера из вещества, оттекающего со скоростями в 1000–3000 км/с. Именно эта атмосфера, то есть звездный ветер от диска, и ответственна за появление стационарного линейчатого эмиссионного спектра SS 433. Вполне возможно, что вещество в джетах ускоряется до релятивистских скоростей давлением излучения в сверхкритическом аккреционном диске, однако детали таких процессов пока неясны.

Таким образом, в отличие от классических массивных рентгеновских двойных систем (типа Cyg X-1 или Cen X-3) объект SS 433 находится на более продвинутой стадии эволюции, при которой нормальная звезда переполняет свою полость Роша, что и объясняет столь сильный темп потери массы звездой и соответственно яркие наблюдательные проявления SS 433 в оптическом диапазоне. Длительность такой стадии эволюции очень коротка — порядка 10^3 – 10^4 лет, и это объясняет, почему объект SS 433 — пока единственный из обнаруженных рентгеновских двойных систем на такой стадии эволюции.

В решении вопроса о том, по какой причине аккреционный диск в системе SS 433 прецессирует, в последнее время также появились некоторые идеи. Еще в 1972 году Н.И. Шакура показал, что если плоскость аккреционного диска не лежит в плоскости орбиты двойной системы, то он может прецессировать. У. Робертс (США) и автор статьи отметили: небольшая асимметрия взрыва сверхновой звезды, в результате которого образуется релятивистский объект, в некоторых случаях приводит к повороту плоскости орбиты двойной системы относительно оси вращения нормальной звезды. Поэтому после взрыва сверхновой и образования релятивистского объекта ось вращения нормальной звезды может быть ориентирована неперпендикулярно плоскости орбиты рентгеновской двойной системы. Это приводит к нарушению симметрии истечения вещества из нормальной звезды к релятивистскому объекту и может сформировать аккреционный диск, не лежащий в плоскости орбиты. В пользу такой картины прецессии свидетельствует тот факт, что в классических рентгеновских двойных системах также наблюдаются прецессионные эффекты, например в системах Cyg X-1, LMC X-4, LMC X-3, Her X-1.

Таким образом, совместный анализ фотометрических и спектральных наблюдений SS 433 позволил построить качественную модель этой пекулярной рентгеновской двойной системы.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ

Модель SS 433 как массивной двойной системы получила подтверждение в 1981 году, когда канадские астрономы Д. Крэмpton и Дж. Хатчингс построили кривую лучевых скоростей по эмиссионной линии He II 4686 в спектре SS 433 (эта линия формируется в горячем аккреционном диске). Сравнение этой кривой лучевых скоростей с кривой блеска SS 433 позволило сделать вывод, что кривая лучевых скоростей по линии He II 4686 отражает орбитальное движение аккреционного диска в двойной системе. Соответствующая функция масс релятивистского объекта $f_x(m)$ составляет $10,1 M_\odot$, то есть масса оптической звезды превышает $10 M_\odot$.

В 1982 году сотрудники группы Дж. Каца (США) получили дополнительные доказательства того, что в SS 433 есть прецессирующий аккреционный диск. Изучив периодические отклонения лучевых скоростей подвижных эмиссий от средних значений, Кац с сотрудниками пришли к выводу: эти отклонения с периодом 6,29 дня отражают эффект нутации диска, которая возникает под воздействием периодических возмущений со стороны нормальной звезды на внешние части диска. Такие возмущения вызваны движением звезды по орбите. Забегая вперед, отметим, что и прецессионная, и нутационная переменность SS 433 были обнаружены также и в изменениях блеска SS 433. Таким образом, существование оптически яркого аккреционного диска в SS 433, наклоненного к плоскости орбиты системы, не вызывает сомнения.

Существование коллимированных релятивистских выбросов вещества в SS 433 непосредственно подтверждено оптическими, радио- и рентгеновскими наблюдениями туманности W 50, окружающей этот объект. На расстоянии ± 60 пк от SS 433 были обнаружены слабые тонковолокнистые туманности, которые образовались в результате “сгребания” межзвездного газа веществом выбросов-джетов. По оптической светимости этих туманностей оценивается поток кинетической энергии джетов. Он оказался более $6 \cdot 10^{39}$ эрг/с, то есть того же порядка, что и болометрическая светимость аккреционного диска!

Наличие прецессирующих релятивистских джетов подтвердили наблюдения на радиоастрономической системе “Very Large Array” (США). Они показали: на расстоянии нескольких угловых секунд от SS 433 находится переменная (с периодом 162,5 дня) радио-структура в виде двух противоположно направленных

спиральных выбросов. Измеряя угловое перемещение отдельных деталей в радиовыбросах, удалось доказать отсутствие заметного торможения движения вещества в них и при известной линейной скорости вещества в джетах (80 000 км/с) определить расстояние до SS 433, которое оказалось равным 5 кпк.

Наиболее ярко влияние релятивистских джетов на морфологию туманности W 50 проявилось в рентгеновских наблюдениях с борта орбитальной станции “Эйнштейн”, а также с японского рентгеновского спутника “Aska”. Рентгеновская светимость центрального источника (собственно объекта SS 433) в туманности W 50 составляет порядка 10^{36} эрг/с. В отличие от классических затменных рентгеновских двойных систем (типа Her X-1) рентгеновский поток во время затмения в SS 433 не спадает до нуля, а уменьшается всего примерно в два раза. Это говорит о том, что рентгеновское затмение в SS 433 связано в основном не с затмением центрального компактного источника, а с затмением оснований прецессирующих релятивистских джетов, которые светят в рентгеновском диапазоне вплоть до расстояний $\sim 10^{12}$ см от центра аккреционного диска.

После тщательной обработки рентгеновских наблюдений оказалось, что в туманности W 50 можно выделить две вытянутые в противоположных направлениях рентгеновские струи длиной до 100 пк. Эти струи совпадают с направлением радиовыбросов и являются результатом взаимодействия релятивистских выбросов с межзвездной средой. Поток кинетической энергии вещества в выбросах, оцененный по светимости протяженных рентгеновских струй в туманности W 50, достигает 10^{41} эрг/с.

Итак, удивительная машина, расположенная в центре аккреционного диска в системе SS 433, перерабатывает с огромной эффективностью тепловую энергию в кинетическую энергию направленного упорядоченного движения газа релятивистских джетов, воздействующих на межзвездную среду на громадных расстояниях ± 100 пк. Ничего подобного в Галактике ранее астрофизики не наблюдали, поэтому неудивительно, что объект SS 433 приковывает к себе внимание астрофизиков всего мира, и этот объект по праву называют загадкой века.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ: НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Описанные характеристики объекта SS 433 основаны на данных наблюдений, полученных в 1979–1990 годах, то есть в течение первого десятилетия исследований этого уникального объекта. В последние годы появились новые рентгеновские и оптические наблюдательные данные по SS 433, которые, как это часто бывает в науке, поставили много новых проблем.

Прежде всего в 1991 году немецкий ученый Д’Одориго с сотрудниками с использованием спектрограмм высокого разрешения получил уточненное значение функции масс релятивистского объекта $f_x(m)$ по кривой лучевых скоростей для стационарной эмиссии He II 4686. Новое значение $f_x(m) = 2M_\odot$ сильно отличается от величины $10,1M_\odot$, определенной в 1980 году канадскими учеными.

Следует отметить, однако, что новые спектроскопические наблюдения Д’Одориго с сотрудниками выполнены в фазах прецессионного периода, не близких к моменту максимального раздвижения подвижных эмиссий в спектре SS 433 (когда аккреционный диск максимально наклонен по отношению к земному наблюдателю). Как следует из независимых наблюдений, выполненных на 6-метровом телескопе CAO РАН, именно в фазах максимального раздвижения подвижных эмиссий функция масс $f_x(m)$ для SS 433 максимальна и составляет около $8M_\odot$, что согласуется с данными канадских ученых. Заметим, что огромная светимость аккреционного диска в системе SS 433 (10^{39} – 10^{40} эрг/с) свидетельствует в пользу наличия черной дыры.

Очень важным для исследования SS 433 оказались данные рентгеновских наблюдений. Н. Каваи с сотрудниками в 1987 году на японском спутнике “Ginga” впервые детально наблюдали рентгеновское затмение в SS 433 в фазе прецессии аккреционного диска, близкой к моменту его максимального раскрытия для наблюдателя. Из полной длительности затмения в рентгеновском диапазоне $D = 2,4$ дня следует, что относительные размеры нормальной звезды, затмеваемой рентгеновские джеты, относительно велики, что соответствует ма-

лому отношению масс компонент $q = \frac{m_x}{m_o} \approx 0,2$. Столь

малое отношение масс соответствует тому, что релятивистский объект в системе SS 433 является нейтронной звездой. На рис. 4 представлена соответствующая компьютерная модель системы SS 433. Длительность и форма рентгеновских затмений в системе SS 433 были подтверждены новыми наблюдениями с борта японского спутника “Aska”. Совершенно неожиданным оказалось открытие командой “Aska” подвижных рентгеновских линий излучения, смещающихся как в синюю, так и в красную части спектра. Эти смещения происходят так же регулярно с периодом 162,5 дня, как и смещения подвижных эмиссий водорода и нейтрального гелия в оптическом диапазоне, причем не наблюдается заметного запаздывания между прецессионными перемещениями рентгеновских и оптических линий. Это говорит о том, что длины джетов, излучающих в рентгеновских лучах при температуре в десятки миллионов градусов, и оптических джетов, излучающих при

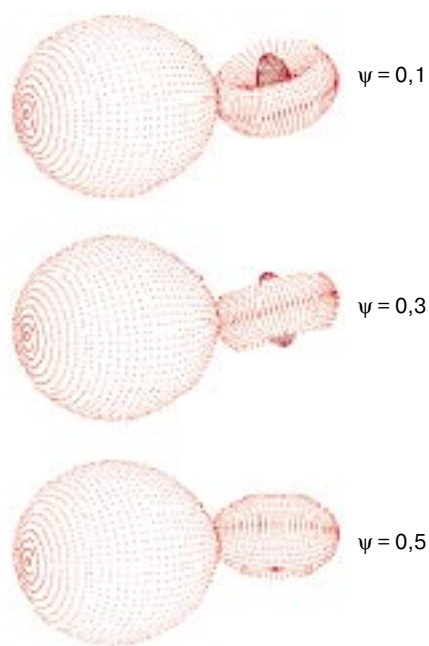


Рис. 4. Компьютерная модель SS 433 как тесной двойной системы с прецессирующим аккреционным диском, построенная в разных фазах ψ прецессии

температуре в десяток тысяч градусов, различаются не более чем на один-два порядка.

Об относительно большой длине рентгеновских джетов ($\sim 10^{12} - 10^{13}$ см) свидетельствует и тот факт, что прецессирующий аккреционный диск не может полностью перекрыть удаляющийся релятивистский рентгеновский джет, что приводит к видимости в рентгеновском спектре SS 433 как синих, так и красных подвижных рентгеновских линий излучения. Большая длина рентгеновских джетов свидетельствует о сравнительно большом времени высвечивания высокотемпературной плазмы рентгеновского джета, то есть об относительно низкой плотности вещества в этой области джета. Это приводит к оценке потока кинетической энергии вещества джетов $\sim 10^{39}$ эрг/с, которая на порядок меньше той величины, которая была получена из оптических и радиоданных.

К настоящему времени несколько групп наблюдателей получили продолжительные ряды фотометрических наблюдений SS 433 в оптическом диапазоне. В частности, в ГАИШ МГУ фотометрия SS 433 велась на протяжении 19 лет — с 1979 по 1997 год. К настоящему времени мы имеем 2292 фотометрических наблюдения SS 433 (рис. 5). Анализ этих оптических наблюдений приводит к следующим выводам.

1. Прецессионный, орбитальный и нутационный периоды, независимо определенные из фотометрических

данных, стабильны на протяжении по крайней мере 20 лет. Максимум внезатменного блеска SS 433 соответствует максимальному раздвижению подвижных эмиссий в спектре SS 433, что согласуется с представлением о том, что релятивистские джеты перпендикулярны плоскости аккреционного диска.

2. Блеск вне затмений, глубина и форма главного и вторичного минимумов на орбитальной затменной кривой блеска меняются с фазой прецессионного периода 162,5 дня, что естественно объясняется переменностью проекции диска на картинную плоскость, связанной с его прецессией.

3. Блеск в середине главного затмения, когда нормальная звезда затмевает аккреционный диск, также меняется с фазой прецессии 162,5 дня, что свидетельствует о наличии частных затмений прецессирующего аккреционного диска оптической звездой. Этот надежный наблюдательный факт свидетельствует об относительно малых размерах нормальной звезды и соответственно большой величине отношения масс компонент $q \sim 1$. Таким образом, приходится признать, что параметры SS 433, оцененные из данных рентгеновских и оптических наблюдений, сильно различаются, что говорит о несовершенстве модели. Для разрешения этого противоречия необходимы более точные и более детальные рентгеновские наблюдения SS 433, а также новые представления об этом уникальном объекте в рамках модели тесной двойной затменной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При всей неопределенности параметров объекта SS 433 ясно, что появление релятивистских коллимированных джетов в нем связано с аккрецией вещества на релятивистский объект.

То, что джеты в объекте SS 433 отслеживают прецессию аккреционного диска, позволяет заключить, что их формирование связано не с активностью центрального объекта, а с магнитогидродинамическими процессами в плазме внутренних частей аккреционного диска.

Релятивистские джеты, часто наблюдаемые в ядрах галактик и квазарах, по-видимому, также связаны с аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру. Джетопоподобные структуры наблюдаются также и у протозвездных и молодых звездных объектов, например у звезд типа Т Тельца. Скорость вещества в джетах здесь составляет порядка сотни километров в секунду. Одной из причин того, что выбросы в таких объектах коллимированы, может служить наличие толстого фокусирующего диска вокруг истекающего центра, который представляет собой сжимающуюся под действием сил гравитации газовую протозвезду.

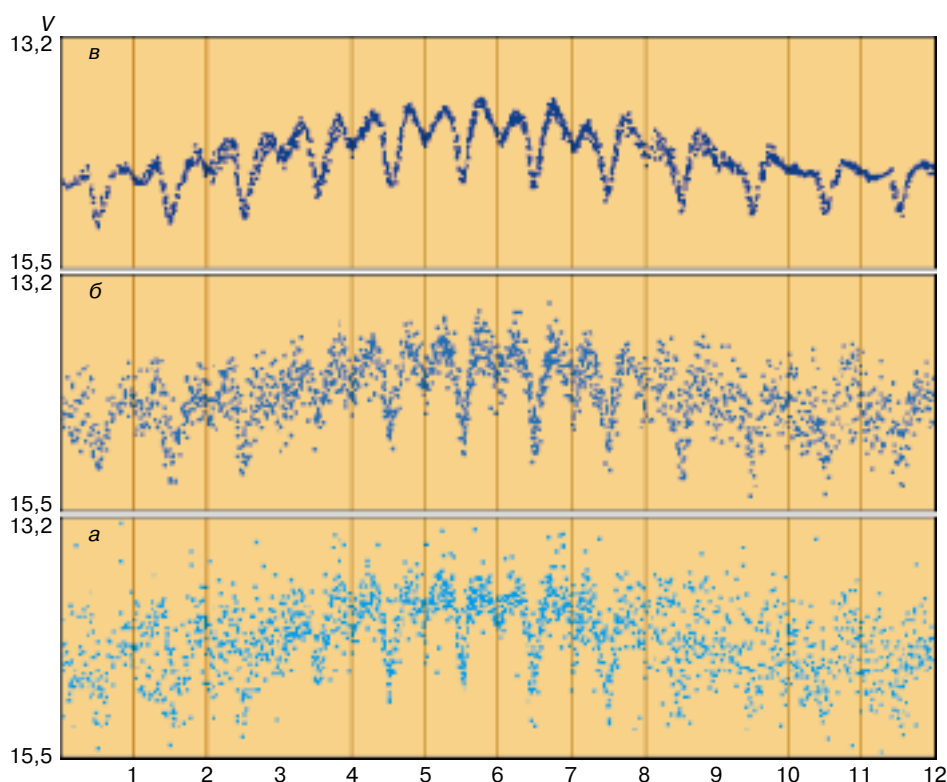


Рис. 5. Оптическая кривая блеска системы SS 433, построенная как функция фазы прецессионного периода 162,5 суток. Кривая объединяет 2292 наблюдения, полученные в 1979–1997 годы. а – исходные данные наблюдений; б, в соответствуют различной степени фильтрации наблюдательных данных, сглаживающей иррегулярную переменность. Видны затмения аккреционного диска нормальной звездой и звезды диском, следующие с орбитальным периодом 13,082 суток. Глубина и форма затмений, а также блеск вне затмений и в моменты затмений меняются с фазой прецессионного периода 162,5 суток, что обусловлено прецессией аккреционного диска и наличием частных затмений диска звездой. Максимальный блеск вне затмений достигается в момент максимального раздвижения подвижных эмиссионных линий в спектре SS 433

Наконец, в последнее время были открыты релятивистские (скорость плазмы $\sim 0,9$ скорости света!) коллимированные джеты в галактических транзитных рентгеновских двойных системах (рентгеновских новых), содержащих черные дыры (системы 1E1740.7-2942, GRS 1915-105, GRO J1655-40).

Таким образом, коллимированные джеты — явление общее и для ядер галактик, и для релятивистских объектов звездной массы в двойных системах, равно как и для нерелятивистских объектов, окруженных дискообразными оболочками. Среди всех этих объектов объект SS 433 уникален тем, что в нем помимо релятивистских джетов наблюдается эффект регулярной прецессии джетов с удивительно стабильным периодом.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Черепашук А.М. SS 433: Новые результаты, новые проблемы // Земля и Вселенная. 1986. № 1. С. 21–29.

2. Липунов В.М. В мире двойных звезд. М.: Квант, 1986.

3. Гончарский А.В., Романов С.Ю., Черепашук А.М. Конечно-параметрические обратные задачи астрофизики. М.: Изд-во МГУ, 1991.

4. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро “Квантум”, 1995.

Рецензент статьи В.М. Липунов

* * *

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Область научных интересов – физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Автор свыше 200 научных работ и десяти монографий.