

**BLACK HOLES IN BINARY
STELLAR SYSTEMS**

A. M. CHEREPASHCHUK

Recent data concerning mass determination of black holes in X-ray binary stellar systems are given. Ten X-ray binary systems containing massive X-ray sources (with a mass over than three-fold solar mass) or black hole candidates are currently known. It is very significant that none of them demonstrates the phenomena of an X-ray pulsar or X-ray burster of type I.

Изложены новейшие данные по определению масс черных дыр в рентгеновских двойных звездных системах. К настоящему времени известно 10 рентгеновских двойных систем, содержащих массивные (с массой более трех солнечных) рентгеновские источники – кандидаты в черные дыры. Замечательно, что ни у одного из них не наблюдается феноменов рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера I типа.

© Черепашук А.М., 1997

**ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ДВОЙНЫХ
ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМАХ**

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова
Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, черной дырой называется область пространства–времени, в которой гравитационное поле настолько сильно, что даже свет не может покинуть эту область. Это происходит, если размеры тела меньше его гравитационного радиуса

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где G – постоянная тяготения, c – скорость света, M – масса тела. Гравитационный радиус Солнца 3 км, Земли – около 9 мм.

Общая теория относительности А. Эйнштейна предсказывает удивительные свойства черных дыр, из которых важнейшее – наличие у черной дыры горизонта событий. Для невращающейся черной дыры радиус горизонта событий совпадает с гравитационным радиусом. На горизонте событий для внешнего наблюдателя ход времени останавливается. Космический корабль, посланный к черной дыре, с точки зрения далекого наблюдателя, никогда не пересечет горизонт событий, а будет непрерывно замедляться по мере приближения к нему. Все, что происходит под горизонтом событий, внутри черной дыры, внешний наблюдатель не видит. Космонавт в своем корабле в принципе способен проникнуть под горизонт событий, но передать какую-либо информацию внешнему наблюдателю он не сможет. При этом космонавт, свободно падающий под горизонтом событий, вероятно, увидит другую Вселенную и даже свое будущее... Связано это с тем, что внутри черной дыры пространственная и временная координаты меняются местами и путешествием во времени. Еще более необычны свойства вращающихся черных дыр. У них горизонт событий имеет меньший радиус, и погружен он внутрь эргосферы – области пространства–времени, в которой тела должны непрерывно двигаться, подхваченные вихревым гравитационным полем вращающейся черной дыры.

Столь необычные свойства черных дыр многим кажутся просто фантастическими, поэтому существование черных дыр в природе часто ставится под сомнение. Однако, забегая вперед, отметим, что,

согласно новейшим наблюдательным данным, черные дыры действительно существуют и им присущи удивительные свойства.

КАК ОБРАЗУЮТСЯ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Известно, что если масса ядра звезды, претерпевшего изменения химического состава из-за термоядерных реакций и состоящего в основном из элементов группы железа, превышает 1,4 солнечной массы M_{\odot} , но не превосходит трех солнечных масс, то в конце ядерной эволюции звезды происходит коллапс (быстрое сжатие) ядра, в результате которого внешняя оболочка звезды, не затронутая термоядерными превращениями, сбрасывается, что приводит к явлению вспышки сверхновой звезды. Это приводит к формированию нейтронной звезды, в которой силам гравитационного притяжения противостоит градиент давления вырожденного нейтронного вещества. Огромные силы давления вырожденного нейтронного вещества обусловлены тем, что нейтроны обладают полужестким спином и подчиняются принципу Паули, согласно которому в данном энергетическом состоянии может находиться только один нейтрон.

При сжатии ядра звезды на поздней стадии эволюции температура поднимается до гигантских значений — порядка миллиарда кельвинов, поэтому ядра атомов разваливаются на протоны и нейтроны. Протоны поглощают электроны, превращаются в нейтроны и испускают нейтрино. Нейтроны же, согласно квантовомеханическому принципу Паули, запрещающему им находиться в одинаковых состояниях, начинают при сильном сжатии эффективно отталкиваться друг от друга. В случае массы коллапсирующего ядра звезды меньше $3M_{\odot}$ скорости нейтронов значительно меньше скорости света и упругость вещества, обусловленная в основном эффективным отталкиванием нейтронов, может уравновесить силы гравитации и привести к образованию устойчивых нейтронных звезд. В случае массивных ядер звезд ($m > 3M_{\odot}$) скорости нейтронов велики, силы отталкивания между ними не могут уравновесить силы гравитации. В этом случае образующаяся нейтронная звезда остывая коллапсирует, согласно существующим представлениям, в черную дыру. Поскольку при образовании нейтронной звезды радиус звезды уменьшается от 10^6 до 10 км, из условия сохранения магнитного потока $H_0 R_0^2 = H_n R_n^2$ (где $H_0 \approx 100$ Гс, $R_0 \approx 10^6$ км — напряженность магнитного поля и радиус ядра звезды до сжатия, H_n , R_n — те же характеристики нейтронной звезды) следует, что магнитное поле нейтронной звезды радиусом 10 км может достигать очень большой величины — порядка 10^{12} Гс. Радиус нейтронной звезды порядка 10 км, плотность вещества достигает миллиарда тонн в кубическом сантиметре.

Хорошо известные радиопульсары и рентгеновские пульсары как раз и представляют собой нейтронные звезды, причем число известных радиопульсаров достигает 700. Радиопульсары наблюдаются как источники строго периодических импульсов радиоизлучения, что связано с переработкой энергии быстрого вращения звезды в направленное радиоизлучение через посредство сильного магнитного поля. Рентгеновские пульсары светят за счет аккреции вещества в тесных двойных звездных системах: сильное магнитное поле нейтронной звезды направляет плазму на магнитные полюсы, где она сталкивается с поверхностью нейтронной звезды и разогревается в ударной волне до температур в десятки и сотни миллионов градусов. Это приводит к излучению рентгеновских квантов. Поскольку ось магнитного диполя не совпадает с осью вращения нейтронной звезды, рентгеновские пятна (их называют аккреционными колонками) при вращении нейтронной звезды то видны для земного наблюдателя, то экранируются телом нейтронной звезды, что приводит к эффекту маяка и феномену рентгеновского пульсара — строго периодической переменности рентгеновского излучения на временах от долей секунды до тысяч секунд. Периодические пульсации радио- или рентгеновского излучения говорят о том, что у нейтронной звезды есть сильное магнитное поле ($\sim 10^{12}$ Гс), твердая поверхность и быстрое вращение (периоды радиопульсаров достигают миллисекунд времени). У черной дыры строго периодических пульсаций излучения ожидать не приходится, поскольку, согласно предсказанию общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна, описывающей сильные гравитационные поля, черная дыра не имеет ни твердой поверхности, ни сильного магнитного поля.

Для звезд, массы железных ядер которых в конце эволюции превышают три солнечных, ОТО предсказывает неограниченное сжатие ядра (релятивистский коллапс) с образованием черной дыры. Это объясняется тем, что силы гравитации, стремящиеся сжать звезду, определяются плотностью энергии, а при громадных плотностях вещества, достигаемых при сжатии ядра звезды (порядка миллиарда тонн в кубическом сантиметре), главный вклад в плотность энергии вносит уже не энергия покоя частиц, а энергия их движения и взаимодействия. Получается, что давление вещества при больших плотностях как бы само “весит”: чем больше давление, тем больше плотность энергии и, следовательно, силы гравитации, стремящиеся сжать вещество. Кроме того, при сильных гравитационных полях, согласно ОТО, становятся принципиально важными эффекты искривления пространства-времени, что также способствует неограниченному сжатию ядра звезды.

Черные дыры с очень большими массами (до миллиардов солнечных масс), по-видимому, существуют в ядрах галактик, и в последние годы в

наблюдательном исследовании сверхмассивных черных дыр намечился существенный прогресс в связи с использованием космического телескопа им. Хаббла и применения методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. Кроме того, теория предсказывает возможность существования первичных черных дыр, образовавшихся в момент образования Вселенной. Мы ограничимся рассмотрением лишь черных дыр звездной массы, образовавшихся на конечных этапах эволюции массивных (с массой в десятки солнечных) звезд.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЧЕРНЫХ ДЫР

Известно, что массу звезды можно измерить, если она входит в двойную систему. Наблюдая движение звезд — компонент двойной системы и применяя законы Кеплера, вытекающие из закона тяготения Ньютона, можно измерить массы звезд. При этом, поскольку размеры орбиты двойной системы в миллионы раз больше гравитационных радиусов компонент, для определения масс звезд, в том числе и масс нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, вполне достаточно использования закона тяготения Ньютона. Мы не рассматриваем здесь случай двойных радиопульсаров, где громадная точность определения моментов прихода радиоимпульсов позволяет наблюдать релятивистские эффекты (обусловленные ОТО) в движении пульсара, и по ним определять с высокой точностью массы пульсаров, и даже наблюдать вековое укорочение орбитального периода двойной системы, обусловленное излучением потока гравитационных волн.

Оптическая звезда в двойной системе является не только пробным телом в гравитационном поле черной дыры, позволяющим измерить ее массу, но также своеобразным донором, поставляющим вещество на соседний релятивистский объект (нейтронную звезду или черную дыру). Аккреция этого вещества на релятивистский объект приводит к разогреву плазмы до температур в десятки и сотни миллионов градусов и к появлению мощного рентгеновского источника. Теоретическое предсказание мощного энерговыделения при несферической аккреции вещества на черную дыру было сделано в 1964 году Я.Б. Зельдовичем и Е.Е. Салпитером. Теория дисковой аккреции вещества на релятивистский объект в тесной двойной звездной системе развита в начале 70-х годов в работах Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева, Дж. Прингла и М. Риса, И.Д. Новикова и К.С. Торна.

К настоящему времени с бортов специализированных спутников открыты десятки тысяч компактных рентгеновских источников, большинство из которых представляют собой рентгеновские двойные системы — тесные двойные системы, состоящие из нормальной оптической звезды типа Солнца и релятивистского объекта, находящегося в режиме аккреции вещества. Космические рентге-

новские и наземные оптические наблюдения в данном случае прекрасно дополняют друг друга: наличие мощного рентгеновского источника (со светимостью, в сотни тысяч раз превышающей болометрическую светимость Солнца) указывает на присутствие в двойной системе массивного объекта малых размеров (менее радиуса Земли), а спектральные и фотометрические наблюдения оптического спутника позволяют измерить массу релятивистского объекта. Если масса релятивистского объекта превышает три солнечных, его можно считать кандидатом в черные дыры. К настоящему времени число таких кандидатов в черные дыры в двойных системах с надежно измеренными массами достигло десяти и благодаря успехам рентгеновской и оптической астрономии непрерывно возрастает. Постепенно выявляется замечательный факт: ни один из известных десяти кандидатов в черные дыры не является рентгеновским пульсаром, то есть кандидаты в черные дыры отличаются от нейтронных звезд не только большими массами, но и наблюдательными проявлениями в полном соответствии с предсказаниями ОТО (!).

Опишем, как можно определить массу черной дыры в рентгеновской двойной системе. Наблюдения доплеровских смещений линий в спектре оптической звезды, вызванных ее орбитальным движением, позволяют построить кривую лучевых скоростей этой звезды, то есть зависимость от времени проекции вектора полной скорости звезды на луч зрения. Период, амплитуда и форма кривой лучевых скоростей определяют функцию масс оптической звезды:

$$f_v(m) = \frac{m_x^3 \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} = 1,038 \cdot 10^{-7} K_v^3 P (1 - e^2)^{3/2},$$

где m_x , m_v — массы релятивистского объекта и оптической звезды (в солнечных массах), K_v — наблюдаемая полуамплитуда кривой лучевых скоростей оптической звезды (в км/с), P — орбитальный период (в сутках), e — эксцентриситет орбиты, i — наклонение орбиты системы (угол между нормалью к плоскости орбиты и лучом зрения). Легко видеть, что функция масс оптической звезды $f_v(m)$ — это абсолютный нижний предел для массы релятивистского объекта m_x . Значение массы релятивистского объекта (в нашем случае черной дыры) вычисляется по формуле

$$m_x = f_v(m) \left(1 + \frac{m_v}{m_x} \right)^2 \frac{1}{\sin^3 i}.$$

Таким образом, для нахождения массы черной дыры помимо кривой лучевых скоростей необходимо из независимых данных знать два параметра: отношение масс компонент $q = m_x/m_v$ и наклонение орбиты i .

Величины q и i могут быть определены из анализа оптической кривой блеска рентгеновской двойной системы, длительности затмения рентгеновского источника оптической звездой (в случае, когда величина i близка к 90°), а также с использованием информации об отсутствии рентгеновских затмений, информации о расстоянии до системы и информации о вращательном уширении линий поглощения в спектре оптической звезды.

Модель рентгеновской двойной системы, используемая при интерпретации ее оптической кривой блеска, учитывает четыре типа оптической переменности: эффект эллипсоидальности оптической звезды, связанный с приливной деформацией формы оптической звезды в гравитационном поле релятивистского объекта, эффект отражения, точнее, прогрева поверхности оптической звезды мощным рентгеновским излучением аккрецирующего релятивистского объекта, затмения компонент и прецессию аккреционного диска, окружающего релятивистский объект (аккреционный диск может быть наклонен к плоскости орбиты и медленно прецессировать). Эффекты эллипсоидальности и отражения были впервые обнаружены и использованы для оценки параметров q , i в 1972 году В.М. Лютым, Р.А. Сюняевым и автором данной статьи в рентгеновских двойных системах Лебедь X-1 и Геркулес X-1. Эти эффекты оказались типичными в оптических проявлениях рентгеновских двойных систем и помогают осуществлять надежную оптическую идентификацию рентгеновских двойных систем: совпадение периодов и фаз оптической и рентгеновской переменности или совпадение рентгеновской и оптической вспышек доказывает достоверность отождествления. В настоящее время оптическая переменность рентгеновских двойных систем, обусловленная в основном эффектом эллипсоидальности оптической звезды, эффективно используется при определении масс черных дыр в транзиентных рентгеновских двойных системах (рентгеновских Новых). Примеры кривых блеска, лучевых скоростей, а также компьютерная модель рентгеновской системы приведены на рис. 1–4.

КАК ОТЛИЧИТЬ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Как уже отмечалось, аккрецирующая черная дыра не должна проявлять себя как рентгеновский пульсар. У нее может наблюдаться лишь иррегулярная переменность рентгеновского излучения с характерными временами

$$\Delta t \approx \frac{r_g}{c} \approx 10^{-3} - 10^{-4} \text{ с.}$$

И действительно, в рентгеновской двойной системе Лебедь X-1, содержащей черную дыру с массой около десяти солнечных, в состоянии, когда рентгеновская

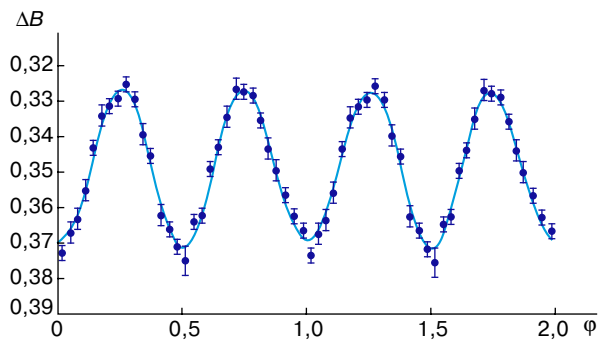


Рис. 1. Оптическая кривая блеска системы Cyg X-1. Здесь ϕ – фаза орбитального периода, ΔB – разность звездных величин в синих лучах. Точки – данные наблюдений, сплошная линия – теоретическая кривая блеска, рассчитанная с учетом эффекта эллипсоидальности оптической звезды при оптимальных параметрах модели

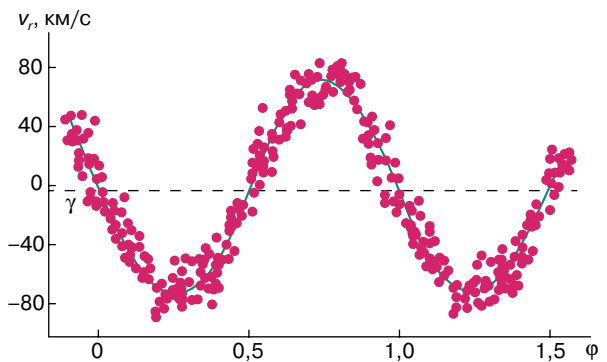


Рис. 2. Кривая лучевых скоростей системы Cyg X-1

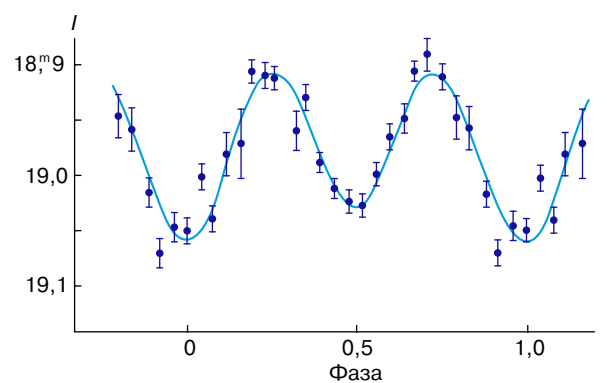


Рис. 3. Кривая блеска рентгеновской Новой XN Mus 1991 в спокойном состоянии, обусловленная в основном эффектом эллипсоидальности оптической звезды. Точки – данные наблюдений, сплошная линия – теоретическая кривая блеска, соответствующая оптимальным параметрам модели: $q = 16$, $i = 41^\circ$, $m_x = 13M_\odot$

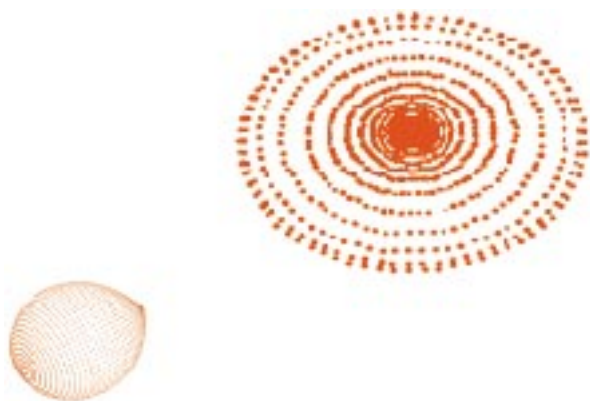


Рис. 4. Компьютерная модель системы XN Mus 1991, построенная для оптимальных параметров: $q = 16$, $i = 41^\circ$, $m_x = 13M_\odot$. Оптическая звезда приливо деформирована и имеет грушевидную форму. Аккреционный диск вокруг черной дыры имеет большие относительные размеры

светимость понижена, а рентгеновский спектр жесткий и степенной, наблюдается быстрая иррегулярная переменность рентгеновского потока на временах порядка миллисекунды. Наблюдения, выполненные с бортов современных рентгеновских обсерваторий, таких, как ГИНГА, МИР–КВАНТ, ГРАНАТ, АСКА, показали, что рентгеновские спектры аккрецирующих черных дыр систематически более жесткие, чем спектры аккрецирующих нейтронных звезд, и простираются до энергий в несколько мегаэлектрон-вольт.

Как уже отмечалось, аккрецирующая нейтронная звезда может проявлять себя как рентгеновский пульсар. Однако, если нейтронная звезда обладает слабым магнитным полем (напряженностью менее 10^{10} Гс) или если ее ось вращения неудачно ориентирована относительно земного наблюдателя, при аккреции на такую нейтронную звезду могут не наблюдаться регулярные пульсации рентгеновского излучения. Поэтому отсутствие строго периодических пульсаций рентгеновского излучения — это лишь необходимый, но не достаточный признак черной дыры. В то же время при слабом магнитном поле нейтронной звезды и несильном темпе аккреции вещества на ее поверхности могут происходить термоядерные взрывы накопленного вещества, приводящие к явлению рентгеновского барстера I типа — коротким (длительностью порядка 1–10 с) и мощным вспышкам интенсивности рентгеновского излучения, что также является характерным признаком аккрецирующей нейтронной звезды, обладающей твердой поверхностью. Поскольку черная дыра не обладает твердой поверхностью, аккреция вещества на нее не должна приводить к феномену рентгеновского барстера I типа. Разумеется, отсутствие этого феномена также является лишь необходимым кри-

терием наличия черной дыры. Таким образом, мы можем сформулировать важнейшие признаки аккрецирующей черной дыры: это мощное рентгеновское излучение, большая масса (более трех солнечных), отсутствие феноменов рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера I типа. При этом вопрос о надежном определении массы релятивистского объекта в рентгеновской двойной системе является решающим при идентификации его с черной дырой.

НОВЕЙШИЕ ДАННЫЕ

К настоящему времени в двойных системах измерены массы шести рентгеновских и пяти радиопулсаров. Оказалось, что во всех случаях, когда удастся надежно определить массу рентгеновского или радиопулсара (то есть нейтронной звезды), она не превосходит трех солнечных масс — теоретический верхний предел для массы нейтронной звезды, предсказываемый ОТО (!). Среднее значение массы нейтронной звезды, полученное для одиннадцати объектов, составляет около 1,4 солнечной массы и прекрасно согласуется с современной теорией поздних стадий эволюции массивных звезд.

Перейдем теперь к наиболее интригующему вопросу о том, как обстоят дела с массивными (с массами более трех солнечных) рентгеновскими источниками. К настоящему времени известно десять рентгеновских двойных систем с массивными рентгеновскими источниками (табл. 1).

Надежность определения масс m_x черных дыр в этих системах не вызывает сомнения, поскольку модель двойной системы в данном случае уверенно обоснована тем фактом, что в моменты минимума блеска лучевая скорость оптической звезды совпадает с лучевой скоростью центра масс системы. Следовательно, изменения со временем лучевой скорости оптической звезды связаны с ее орбитальным движением, а не с пульсациями звезды или

Таблица 1

№ п/п	Рентгеновский источник	$f_0(m)$	Масса релятивистского объекта m_x	Масса оптической звезды m_0
1	Cyg X-1	0,23	7–18	20–30
2	LMC X-3	2,3	7–11	3–6
3	LMC X-1	0,14	4–10	18–25
4	A0620-00	3,1	5–17	≈0,7
5	V404 Cyg	6,3	10–15	0,5–1
6	XN Mus 1991	3,01	9–16	0,7–0,8
7	QZ Vul	5,0	5,3–8,2	≈0,7
8	XN Per 1992	0,9	2,5–5,0	≈0,4
9	XN Sco 1994	3,2	4–6	≈2,3
10	XN Oph 1977	4,0	5–7	≈0,8

Примечание. $f_0(m)$, m_x и m_0 — в единицах солнечных масс M_\odot .

движением газовых потоков в системе. Применение мощных методов определения масс, развитых для тесных двойных систем (см. выше), позволяет дать надежные оценки масс черных дыр.

Строгие скептики придумали для рентгеновских двойных систем с большой функцией масс модель тройной системы. В этой модели рентгеновский источник — это аккрецирующая нейтронная звезда, а большая функция масс связана с движением оптической звезды вокруг третьей массивной звезды. Специальные тщательные спектроскопические исследования не выявили признаков тройственности ни у одной из десяти описанных выше рентгеновских двойных систем. Кроме того, в системах, где масса оптической звезды мала (менее одной-двух солнечных масс), модель тройной системы неприемлема уже потому, что третья звезда должна иметь массу в несколько солнечных и на ее ярком фоне невозможно было бы наблюдать линии поглощения слабой маломассивной оптической звезды. Таким образом, к настоящему времени проблема черных дыр встала на прочный наблюдательный базис.

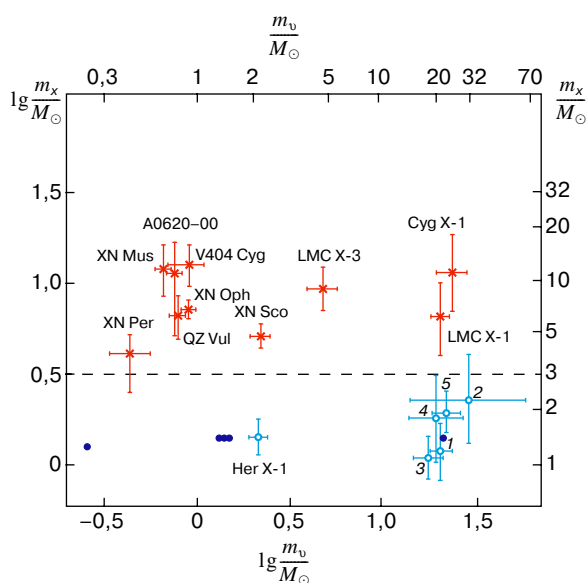


Рис. 5. Зависимость масс нейтронных звезд (кружки) и черных дыр (крестики) от масс спутников m_x в тесных двойных системах. Цифрами обозначены: 1 – система Cen X-3, 2 – LMC X-4, 3 – SMC X-1, 4 – 4U 1538-52, 5 – 4U 0900-40. Указаны ошибки определения масс. Темные кружки соответствуют радиопульсарам в двойных системах, ошибки определения масс которых менее размеров кружка. Ни один из массивных рентгеновских источников (с массой более трех солнечных) не является рентгеновским пульсаром и не является рентгеновским барстером I типа, то есть не обладает признаками, характерными для аккрецирующих нейтронных звезд

На рис. 5 приведены массы релятивистских объектов в зависимости от масс спутников в двойных системах. Спутниками рентгеновских пульсаров и черных дыр в двойных системах являются оптические звезды спектральных классов M–O. Спутники радиопульсаров — неактивные нейтронные звезды (например, система PSR 1913+16), белые карлики (PSR 1855+09), а также массивные звезды спектрального класса B (PSR 1259-63). Мы здесь не рассматриваем проблему планет — спутников радиопульсаров. Как видно на рис. 5, нет зависимости масс релятивистских объектов от масс спутников. И нейтронные звезды, и черные дыры встречаются в двойных системах со спутниками как большой, так и малой массы. Ситуация здесь подобна той, которая имеет место в классических тесных двойных звездных системах, где встречаются любые комбинации компонент. Среди черных дыр в двойных системах встречаются объекты как большой массы (система V404 Cyg, $m_x = (10-15)M_\odot$), так и малой массы (система XN Per 1992, $m_x = (2,5-5,0)M_\odot$).

В тех случаях, когда спутником является массивная горячая оптическая звезда спектрального класса O–B (системы Cyg X-1, LMC X-3, LMC X-1), рентгеновский источник является квазистационарным. Во всех системах, у которых спутники — маломассивные холодные звезды поздних спектральных классов (всего семь таких систем), рентгеновский источник является транзитным (рентгеновской Новой): в основном, спокойном состоянии его рентгеновская светимость мала (менее 10^{33} эрг/с), однако раз в несколько десятков лет наблюдается явление рентгеновской Новой, когда рентгеновская светимость увеличивается в миллионы раз и затем с характерным временем порядка нескольких месяцев спадает до ненаблюдаемого уровня. Эту замечательную корреляцию между характером нестационарности рентгеновского источника и массой спутника — оптической звезды нужно обязательно учитывать при построении теории нестационарной дисковой аккреции на черные дыры.

Следует подчеркнуть очень важный наблюдательный факт: ни у одного из десяти массивных (с массой более трех солнечных) рентгеновских источников — кандидатов в черные дыры не обнаружено феноменов рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера I типа, характерных для аккрецирующих нейтронных звезд. Этот факт имеет фундаментальное значение и может рассматриваться как наблюдательный аргумент (но, разумеется, еще не как окончательное доказательство) в пользу того, что наблюдаемые десять кандидатов в черные дыры действительно являются черными дырами в смысле ОТО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы описали астрономические методы и результаты определения масс черных дыр в рентгеновских

двойных системах, основанные главным образом на их оптических исследованиях. Уже сейчас на основании надежных определений масс большого числа нейтронных звезд и черных дыр можно заключить, что наблюдения релятивистских объектов в двойных звездных системах согласуются с предсказаниями ОТО. Новейшие наблюдательные данные по черным дырам, изложенные выше, имеют принципиальное значение для фундаментальной физики и релятивистской астрофизики, а также для теории внутреннего строения звезд и звездной эволюции. Без преувеличения можно сказать, что в проблеме поиска и наблюдательных исследований черных дыр за последние годы произошла тихая революция и проблема черных дыр во Вселенной из чисто умозрительной превратилась в наблюдательную. Это означает качественно новый этап в исследованиях черных дыр и их удивительных свойств, что в ближайшем будущем должно привести к значительному прогрессу в этой увлекательной области исследований.

Автор благодарит С.С. Герштейна за ценные замечания.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И.Д. Черные дыры и Вселенная. М.: Мол. гвардия, 1985.
2. Липунов В.М. В мире двойных звезд. М.: Квант, 1986.
3. Черепашук А.М. Массивные тесные двойные системы // Земля и Вселенная. 1985. № 1. С. 16–24.
4. Лютый В.М., Черепашук А.М. Оптические исследования рентгеновских двойных систем // Там же. 1986. № 5. С. 18–25.
5. Черепашук А.М. Черные дыры: новые данные // Там же. 1992. № 3. С. 23–30.
6. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро “Квантум”, 1995. 106 с.

* * *

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ. Область научных интересов: физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Автор свыше 200 научных работ, в том числе десяти монографий.