

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

научный и общественно-политический журнал

том 83 № 3 2013 Март

Основан в 1931 г.
Выходит 12 раз в год
ISSN: 0869-5873

*Журнал издаётся под руководством
Президиума РАН*

*Главный редактор
Ю.С. Осипов*

Редакционная коллегия

Ж.И. Алфёров, А.Ф. Андреев, В.Н. Большаков, А.А. Боярчук,
В.И. Васильев, Г.С. Голицын, А.И. Григорьев,
А.П. Деревянко, Ю.М. Каган, А.И. Коновалов,
В.В. Костюк (заместитель главного редактора),
Н.П. Лавёров, Г.А. Месяц, Ю.В. Наточин,
А.Д. Некипелов, О.М. Нефёдов, В.И. Осипов, Р.В. Петров,
В.В. Пирожков (ответственный секретарь),
Д.В. Рундквист, Ф.Г. Рутберг, А.С. Спирин, В.С. Стёпин,
Л.Д. Фаддеев, Е.П. Чельшев, А.О. Чубарьян,
Н.П. Шмелёв, В.Л. Янин

*Заместитель главного редактора
Г.А. Заикина*

*Заведующая редакцией
В.В. Володарская*

Адрес редакции: 119049 Москва, Крымский вал, Марононский пер., 26
Тел./факс 8(499) 238-21-44, 8(499) 238-21-23; тел. 8(499) 238-25-10
E-mail: vestnik@naukaran.ru

Подписка на “Вестник РАН” по Москве
через Интернет WWW.GAZETY.ru

Москва
Издательство “Наука”

СОДЕРЖАНИЕ

Том 83, номер 3, 2013

Наука и общество

Д.И. Кондратов

Интернационализация евро и его перспективы в России 195

С кафедры Президиума РАН

В.В. Малахов

Революция в зоологии: новые представления о системе и филогении многоклеточных животных 210

Зоология беспозвоночных на пороге перемен. *Обсуждение научного сообщения* 214

Обзорение

А.М. Черепашук

Чёрные дыры: накануне окончательного открытия 216

Проблемы экологии

Д.Г. Замолодчиков

Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата 227

Точка зрения

И.Л. Гуфельд

Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? 236

Этюды об учёных

К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА В.И. ВЕРНАДСКОГО

Б.Е. Патон

Владимир Вернадский и Украина 246

Г.В. Добровольский

Живое вещество и биохимические процессы в почве 256

В.Ю. Рутковский

От теории инвариантности к практической космонавтике. *К 100-летию со дня рождения академика Б.Н. Петрова* 261

Времена и нравы: мемуары, письма, дневники

И.С. Кулаев

Ознакомление с ведущими научными центрами в области физико-химической биологии в США в 1960–1970-е годы 266

Научная жизнь

М.Я. Щелев

Юбилейный Международный конгресс по высокоскоростной фотографии и фотонике 274

Официальный отдел

Президиум РАН решил. – Юбилеи. – Награды и премии 281

Демидовская премия 2012 года 286

CONTENTS

Vol. 83, No. 3, 2013

Simultaneous English language translation of the journal is available from Pleiades Publishing, Ltd.
Distributed worldwide by Springer. *Herald of the Russian Academy of Sciences* ISSN 1019-3316

Science and Society

D.I. Kondratov

The Internationalisation of the Euro and its Prospects in Russia 195

On the Rostrum of the RAS Presidium

V.V. Malakhov

Revolution in Zoology: New Ideas about the System
and Phylogeny of Multicellular Animals 210

Zoology of Invertebrates on the Threshold of Changes. *Paper Discussion* 214

Review

A.M. Cherepashchuk

Black Holes: on the Eve of the Final Discovery 216

Problems of Ecology

D.G. Zamolodchikov

Natural and Anthropogenic Concepts of the Modern Climate Warming 227

Point of View

I.L. Gufeld

Is Forecasting of Strong Crustal Earthquakes Possible? 236

Profiles

ON THE 150th ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF ACADEMICIAN V.I. VERNADSKY

B.E. Paton

Vladimir Vernadsky and Ukraine 246

G.V. Dobrovolsky

V.I. Vernadsky and Pedology 256

V.Yu. Rutkowsky

From the Theory of Invariance to the Practical Cosmonautics. *On the 150th Anniversary
of the Birth of Academician B.N. Petrov* 261

Times and Mores: Memoirs, Letters, Diaries

I.S. Kulaev

Getting Acquainted with the Leading Scientific Centers in the Field
of Physico-Chemical Biology in the United States in the 1960s–1970s 266

Science News

M.Ya. Shchelev

The Jubilee International Congress on High-Speed Photography and Photonics 274

Official Section

Decisions of the RAS Presidium. Anniversaries. Awards and Prizes 281

The Demidov prize 2012 286

DOI: 10.7868/S086958731303002X

В статье рассказывается о современном состоянии астрономических исследований в области изучения чёрных дыр. В настоящее время у учёных остаётся всё меньше сомнений в их существовании, а в связи с запуском отечественного радиоинтерферометра “Радиоастрон” появилась надежда, что в недалёком будущем мы получим окончательные доказательства этого.

ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ: НАКАНУНЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ОТКРЫТИЯ

А.М. Черепашук

Чёрные дыры — эти удивительные объекты Вселенной — постепенно завоёвывают “права гражданства” среди классических объектов астрофизики — звёзд, галактик и т.п. Из наблюдений следует, что число чёрных дыр звёздных масс ($M = 8-10 M_{\odot}$) в нашей Галактике составляет не менее 10 млн., или 0.1% от массы барионного вещества (звёзд, газа и пыли). Это значительная величина ($\sim 10^8 M_{\odot}$), поэтому можно говорить об открытии нового состояния материи в Галактике в виде чёрных дыр (коллапсирующее состояние вещества наряду с газообразным, жидким, твёрдым и плазменным состояниями). Выяснилось, что в центрах большинства галактик присутствуют сверхмассивные чёрные дыры ($M = 10^6-10^{10} M_{\odot}$). В частности, масса чёрной дыры в центре нашей Галактики составляет $(4.31 \pm 0.36) \times 10^6 M_{\odot}$, она определена с точностью выше 10% по движению 28 звёзд, обращающихся вокруг неё по эллиптическим орбитам [1] (рис. 1).

Свойства этих многочисленных и чрезвычайно компактных объектов очень похожи на свойства чёрных дыр, предсказываемые общей теорией относительности (ОТО) А. Эйнштейна. Именно поэтому в настоящее время их и называют чёрными дырами, а не кандидатами в чёрные дыры, как это было принято, скажем, лет 30 назад.



ЧЕРЕПАШУК Анатолий Михайлович — академик, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова.

Хотя следует признать, что до сих пор окончательных доказательств того, что эти компактные объекты являются чёрными дырами, пока не получено. Дело в том, что главная особенность чёрной дыры — отсутствие у неё наблюдаемой поверхности; вместо этого у чёрной дыры существует горизонт событий — световая поверхность в пространстве–времени, на которой, с точки зрения далёкого наблюдателя, ход времени останавливается. А доказать отсутствие наблюдаемой поверхности у объекта гораздо сложнее, чем доказать её присутствие. По очень точному высказыванию академика В.Л. Гинзбурга, современные наблюдательные данные укрепляют нашу уверенность в реальном существовании чёрных дыр во Вселенной.

В нашем обзоре, опубликованном в 2004 г. [2], были описаны методы и результаты наблюдений сверхмассивных чёрных дыр и чёрных дыр звёздных масс. Сейчас, спустя почти девять лет, имеет смысл вернуться к рассмотрению данной проблемы. В июле 2011 г. произведён успешный запуск российского космического радиоинтерферометра “Радиоастрон”. Руководитель этого уникального эксперимента — академик Н.С. Кардашёв. С помощью “Радиоастрона” можно наблюдать ядра галактик с угловым разрешением более 10^{-5} секунды дуги. Это даёт принципиальную возможность исследовать процессы вблизи горизонтов событий сверхмассивных чёрных дыр в ядрах ближайших галактик и, более того, “увидеть” изображение сверхмассивной чёрной дыры (точнее, изображение тёмной “тени” от чёрной дыры на ярком фоне аккреционного диска вокруг неё). Тем самым появляется реальная возможность окончательного доказательства существования чёрных дыр во Вселенной.

В 2012 г. исполнилось 40 лет с момента открытия “кандидата № 1” в чёрные дыры — компактного рентгеновского источника в двойной систе-

ме Cyg X-1. Как известно, за это открытие и исследования в области рентгеновской астрономии профессор Рикардо Джиаккони в 2002 г. был удостоен Нобелевской премии.

В настоящем обзоре содержится рассказ о современном наблюдательном статусе чёрных дыр и перспективах дальнейших исследований этих экстремальных объектов.

Экзотика чёрных дыр. Чёрные дыры образуются при коллапсах (сжатии) массивных тел. По современным представлениям, с учётом эффектов ОТО, если масса ядра звезды, затронутого термоядерными реакциями, превышает $3 M_{\odot}$, то при коллапсе ядра образуется чёрная дыра. Если же масса ядра звезды менее $3 M_{\odot}$, то в конце её эволюции образуется нейтронная звезда или белый карлик. Под чёрной дырой понимается объект (точнее, область пространства–времени), гравитационное поле которого столь сильно, что никакой сигнал, даже свет, не может вырваться из него на пространственную бесконечность. То есть вторая космическая скорость для чёрной дыры равна скорости света в вакууме — $300\,000$ км/с. Физической границей чёрной дыры, как уже отмечалось, является горизонт событий — световая поверхность в пространстве–времени. Любому сколь угодно малому промежутку времени на горизонте событий соответствует сколь угодно большой промежуток времени на пространственной бесконечности. Следует подчеркнуть, что у чёрных дыр, образовавшихся в нашу эпоху, горизонт событий ещё не успел сформироваться из-за релятивистского замедления хода времени для внешнего наблюдателя. Однако уже в первые секунды коллапса радиус сжимающегося объекта становится очень близким к горизонту событий. Все процессы на его поверхности для внешнего наблюдателя сильно растягиваются во времени и практически застывают, поэтому поверхность такого компактного объекта становится ненаблюдаемой. Для астрономов это практически горизонт событий.

Горизонт событий — это граница между различными сигналами, движущимися со скоростью света. Одни из них могут уйти на пространственную бесконечность, другие не могут. Как отмечают авторы [3], сможет ли сигнал навсегда покинуть чёрную дыру, зависит от области пространства–времени, которая расположена в будущем по отношению к источнику сигнала. Таким образом, движение горизонта событий чёрной дыры определяется не тем, что произошло с ним в прошлом, а тем, что произойдёт с ним в будущем. Эту необычную особенность горизонта событий — его способность “чувствовать” будущее — учёные иногда называют теологической природой горизонта [3].

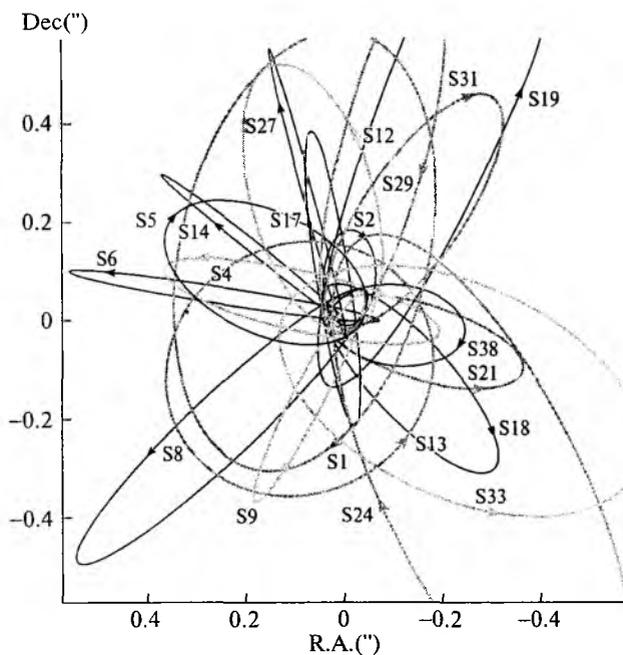


Рис. 1. Орбиты 28 звезд вокруг сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики, по которым, с использованием третьего закона Кеплера, оценивается масса чёрной дыры $M_{\text{ВН}} = (4.31 \pm 0.36) \times 10^6 M_{\odot}$ [1]

Если же говорить о внутренности чёрной дыры (так называемая Т-область), то там, с точки зрения внешнего наблюдателя, пространственная и временная координаты меняются местами. Структура пространства–времени особенно сложна внутри вращающейся чёрной дыры. Согласно [3], здесь располагается так называемый горизонт Коши, который воспринимает информацию из формально бесконечного будущего нашей Вселенной. Поэтому структура пространства–времени внутри вращающейся чёрной дыры в сильной степени зависит от судьбы самой чёрной дыры в бесконечном будущем внешнего наблюдателя, например, от возможных столкновений с другими объектами, квантового испарения и даже от будущего всей Вселенной.

В существование таких поистине экстремальных объектов действительно трудно поверить. Именно поэтому, несмотря на наличие огромного наблюдательного материала по многочисленным кандидатам в чёрные дыры, который прекрасно согласуется с предсказаниями ОТО для чёрных дыр, учёные до сих пор ищут решающие доказательства существования чёрных дыр во Вселенной. Более того, предлагаются релятивистские теории гравитации, альтернативные ОТО, в которых отвергается возможность существования чёрных дыр. Например, как показано в работах А.А. Логунова [4] и Л.П. Грищука [5], если ввести в уравнения, описывающие гравитационное поле, члены, обусловленные ненулевой массой по-

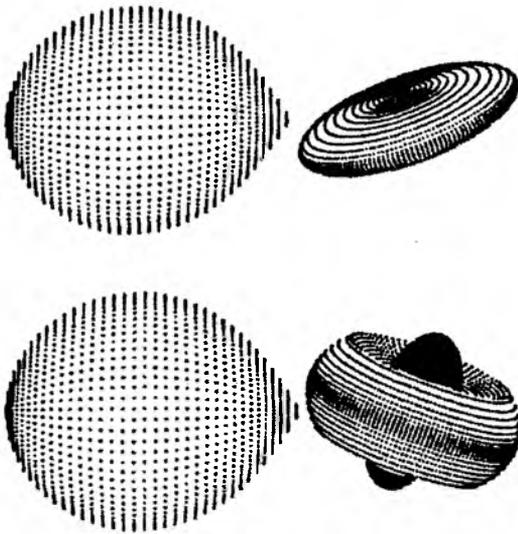


Рис. 2. Математические модели рентгеновской двойной системы с прецессирующим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта

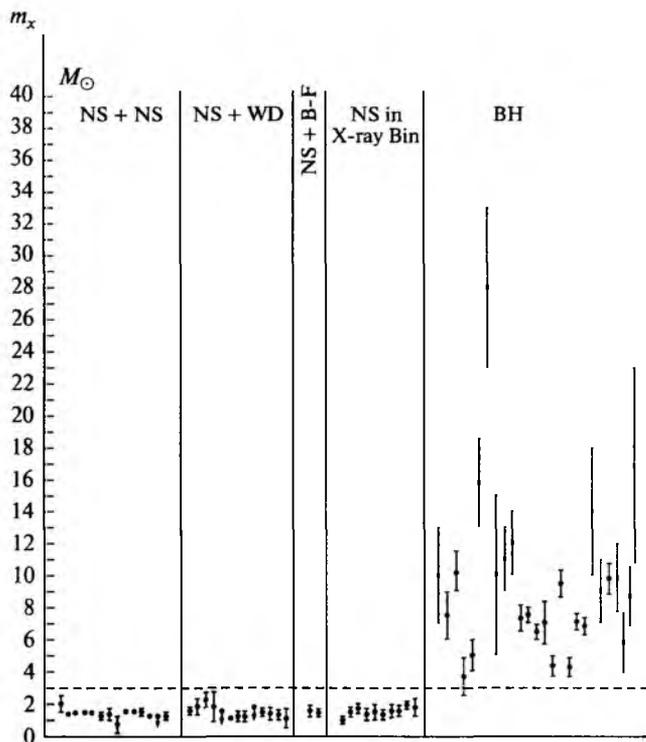


Рис. 3. Измеренные массы нейтронных звёзд (NS) и чёрных дыр (BH) в двойных системах

NS + NS означает радиопульсар в паре с нейтронной звездой, NS + WD — радиопульсар в паре с белым карликом, NS + B-F — радиопульсар в паре с невырожденной звездой спектрального класса B-F, NS in X-ray Bin — рентгеновский пульсар в двойной системе; пунктирная горизонтальная прямая отсекает значение $3 M_{\odot}$ — абсолютный верхний предел массы нейтронной звезды, предсказываемый ОТО А. Эйнштейна

коя гравитона, то горизонт событий не образуется, и коллапсирующий объект большой массы (более $3 M_{\odot}$) может иметь наблюдаемую поверхность. Этот вывод радикально отличается от предсказания ОТО, что делает проблему поиска чёрных дыр особенно интригующей и интересной.

Чёрные дыры звёздных масс в рентгеновских двойных системах. Чёрные дыры встречаются в рентгеновских двойных системах ($M_{\text{BH}} = 4-20 M_{\odot}$) и в ядрах галактик ($M_{\text{BH}} = 10^6-10^{10} M_{\odot}$). Рентгеновская двойная система состоит из нормальной оптической звезды типа нашего Солнца (донора вещества) и релятивистского объекта — нейтронной звезды или чёрной дыры — находящегося в режиме аккреции вещества, поставляемого спутником. Приливные воздействия гравитационного поля релятивистского объекта на оптическую звезду вызывают её деформацию и истечение из неё вещества, что приводит к формированию вокруг релятивистского объекта аккреционного диска с высокой температурой в его центральных частях, поэтому окрестности релятивистского объекта светятся в рентгеновском диапазоне спектра (см., например, [6]). К настоящему времени с бортов специализированных спутников (UHURU, Einstein, Rosat, Мир-Квант, Granat, Ginga, Chandra, XMM-Newton, Integral и др.) открыто свыше 1000 рентгеновских двойных систем, которые стали мощным инструментом для обнаружения и исследования чёрных дыр звёздных масс (звёздных чёрных дыр). Сейчас рядом научных групп, в частности из США, Англии, Германии, Голландии, Франции, России, измерены массы 26 звёздных чёрных дыр ($M_{\text{BH}} = 4-20 M_{\odot}$), а также массы примерно 50 нейтронных звёзд ($M_{\text{NS}} = 1-2 M_{\odot}$) в двойных системах (рис. 2, 3).

Массы нейтронных звёзд лежат в пределах $1-2 M_{\odot}$, средняя масса нейтронной звезды $\sim 1.4 M_{\odot}$. Уже найдены тонкие различия в массах нейтронных звёзд разных типов. Оказалось, что массы быстро вращающихся нейтронных звёзд (периоды вращения $\geq 10^{-3}$ с), которые увеличили свой угловой момент за счёт аккреции вещества на стадии обмена масс в тесных двойных системах, в среднем на $\sim 0.15 M_{\odot}$ больше, чем массы медленно вращающихся нейтронных звёзд (периоды ~ 1 с) [7], что согласуется с соответствующими теоретическими предсказаниями [8]. Все нейтронные звёзды с измеренными массами показывают явные признаки наблюдаемой поверхности, они являются радиопульсарами, рентгеновскими пульсарами либо рентгеновскими барстерами 1-го типа. Напомним, что феномен рентгеновского пульсара отражает наличие горячих рентгеновских областей (ударных волн) вблизи магнитных полюсов быстро вращающейся сильно намагниченной аккрецирующей нейтронной звезды. Феномен радиопульсара связан с быстрым осе-

вым вращением и сильным магнитным полем нейтронной звезды, “привязанным” к её поверхности. Феномен рентгеновского барстера 1-го типа обусловлен термоядерными взрывами вещества, накопленного в процессе аккреции на поверхности нейтронной звезды со слабым магнитным полем. Очевидно, все эти три феномена были бы невозможны, если бы нейтронные звёзды не обладали наблюдаемыми поверхностями. Подчеркнём, что быстрое вращение и сильное магнитное поле нейтронной звезды — естественные следствия сильного сжатия звезды до очень малых размеров — около 10 км. Таким образом, во всех случаях, когда компактный объект демонстрирует явные признаки наблюдаемой поверхности, его измеренная масса составляет $1-2 M_{\odot}$ и не превышает $3 M_{\odot}$ в полном согласии с предсказанием ОТО о существовании верхнего предела масс для нейтронных звёзд. Число измеренных масс нейтронных звёзд уже превышает 50, так что статистика в данном случае весьма надёжна.

Рассмотрим теперь наблюдаемые свойства кандидатов в чёрные дыры. Измеренные массы 26 кандидатов лежат в пределах $4-20 M_{\odot}$, среднее значение составляет $\sim 9 M_{\odot}$. Поскольку чёрная дыра не имеет наблюдаемой поверхности, она не должна показывать описанных выше феноменов. Так и есть: ни один из этих 26 массивных ($M > 3 M_{\odot}$) компактных (радиус не превышает нескольких r_g) объектов — рентгеновских источников — не является ни радиопульсаром, ни рентгеновским пульсаром, ни рентгеновским барстером 1-го типа. Все они показывают лишь иррегулярную или квазипериодическую (но не строго периодическую) переменность рентгеновского излучения с характерным временем до $\sim 10^{-3}$ с. В модели, учитывающей колебания внутренних частей аккреционного диска или орбитальное движение горячих пятен во внутренних частях диска, удаётся показать [9], что столь быстрая рентгеновская переменность кандидатов в чёрные дыры обусловлена их очень малыми размерами, которые не превышают нескольких гравитационных радиусов.

Отметим, что, помимо описанных ярких различий в наблюдательных проявлениях нейтронных звёзд и кандидатов в чёрные дыры, имеются и более тонкие, связанные с формой и характером изменения во времени спектров их рентгеновского излучения (см., например, [10]). Эти тонкие различия также свидетельствуют о том, что нейтронные звёзды обладают наблюдаемыми поверхностями, а кандидаты в чёрные дыры ими не обладают.

К сожалению, до сих пор не имеется достаточных критериев для отбора реальных чёрных дыр из найденных кандидатов. Дело в том, что некоторые нейтронные звёзды, так же, как и чёрные дыры, могут не показывать признаков наблюдаемой поверхности. Например, феномен рентге-

новского пульсара может не наблюдаться из-за совпадения оси магнитного диполя нейтронной звезды и оси её вращения. В этом случае тяжёлую нейтронную звезду можно спутать с чёрной дырой. Поэтому, учитывая описанные выше почти фантастические свойства чёрных дыр, мы, соблюдая осторожность, должны заключить, что если ОТО верна, то чёрные дыры, безусловно, открыты. Но если мы хотим проверять ОТО в экстремально сильных гравитационных полях, необходимо прямыми наблюдениями убедиться в отсутствии у кандидатов в чёрные дыры наблюдаемых поверхностей, а также в наличии у них горизонтов событий и эргосфер.

До 1998 г. мы были уверены в том, что ОТО без Λ -члена правильно описывает структуру и динамику Вселенной на больших масштабах. Однако после неожиданного открытия в 1998 г. (удостоенного Нобелевской премии 2011 г.) оказалось, что Вселенная расширяется с ускорением, для её описания на больших масштабах требуется либо ввести в ОТО аналог Λ -члена (который называют тёмной энергией — новым видом материи), либо обобщить ОТО, введя, например, так называемую $F(R)$ -гравитацию (где гравитация отождествляется уже не с кривизной пространства-времени, а с некоторой функцией этой кривизны). Возникает вопрос: если такие неожиданности с применением ОТО мы повстречали, идя в “макромир”, то где гарантия того, что, идя в “микромир”, мы не встретимся с новыми неожиданностями? Поэтому в выводах об открытии чёрных дыр необходимо подождать результатов эксперимента “Радиоастрон”, который обеспечит реальную возможность окончательно доказать существование чёрных дыр в ядрах ближайших галактик.

В последнее время, в связи с пуском в строй новых крупных 8–10-метровых оптических телескопов, началось изучение рентгеновских двойных систем, расположенных в других галактиках [11, 12], что может привести к значительному росту числа измеренных масс нейтронных звёзд и чёрных дыр. Это улучшит статистическую значимость выводов о различии в наблюдательных проявлениях этих двух классов релятивистских объектов.

Новые результаты получены в последние годы по исследованию вращения звёздных чёрных дыр. Как уже отмечалось в нашем обзоре [2], возможность определения углового момента чёрной дыры связана с тем, что если чёрная дыра вращается в том же направлении, что и аккреционный диск, то внутренний край диска подходит к ней значительно ближе, чем в случае невращающейся чёрной дыры, ибо радиус горизонта событий у вращающейся чёрной дыры меньше. Поэтому при аккреции гравитационное энерговыделение, а следовательно, светимость и температура тепловой компоненты рентгеновского излучения у вра-

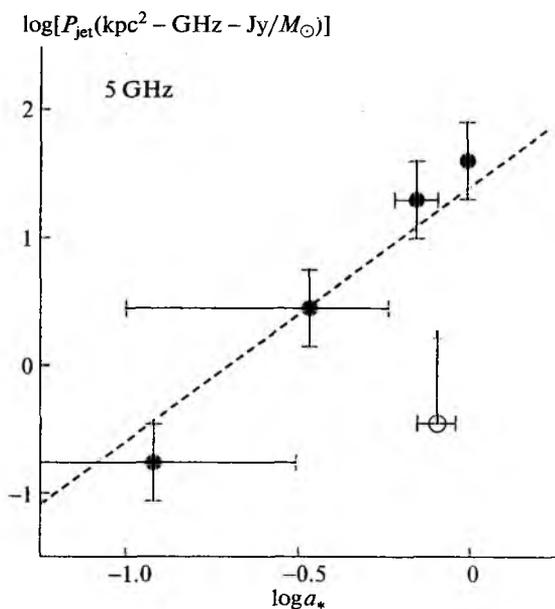


Рис. 4. Зависимость мощности релятивистских выбросов-джетов P_{jet} от аккрецирующих звёздных чёрных дыр, оценённой по наблюдаемым радиопотокам, от безразмерного параметра α , характеризующего угловой момент вращения чёрной дыры [18]

Пунктирная линия соответствует теоретической зависимости $P_{\text{jet}} \sim \alpha^2$, как предсказывается теорией Блэнфорда–Знаека

щающихся чёрных дыр должны быть больше, чем у невращающихся. Это отмечалось ещё в классической работе И.Д. Новикова и К.С. Торна [13], которые построили теорию дисковой аккреции вещества с учётом эффектов ОТО. В обзоре [14] описано несколько методов определения углового момента чёрных дыр, включая и поляризационные наблюдения в рентгеновском диапазоне аккрецирующих чёрных дыр. Если масса чёрной дыры известна с достаточно высокой точностью, метод, основанный на описании рентгеновского спектра аккрецирующей чёрной дыры с помощью модели релятивистского тонкого аккреционного диска, развитой И.Д. Новиковым и К.С. Торном, является наиболее доступным и весьма надёжным. К настоящему времени угловые моменты вращения определены для девяти звёздных чёрных дыр: из них пять находятся в маломассивных, транзиентных (вспыхивающих) рентгеновских двойных системах — рентгеновских новых (A0620-00, XTE J1550-564, GRO J1655-40, GRS 1915+105, 4U1543-47) [15] и четыре чёрные дыры являются компонентами массивных квазистационарных рентгеновских двойных систем: LMCX-3 [16], M33 X-7 [17, 18], LMCX-1 [19], Cyg X-1 [20] (рис. 4).

Сверхмассивные чёрные дыры в ядрах галактик.

Массы сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик определяются в предположении, что дви-

жение “пробных тел” (газовых дисков, газовых облаков, отдельных звёзд вблизи чёрной дыры) управляется гравитационным полем центральной чёрной дыры. Тогда, используя закон тяготения Ньютона и приравнявая силу тяготения центростремительной силе, можно получить выражение для массы центральной сверхмассивной чёрной дыры:

$$M_{\text{BH}} = \frac{\eta v^2 r}{G},$$

где v — скорость пробного тела, r — его расстояние от центральной чёрной дыры, G — гравитационная постоянная, $\eta = 1-3$ — коэффициент, учитывающий характер движения пробных тел вокруг центральной чёрной дыры (для круговых движений $\eta = 1$). Масса пробного тела сокращается в силу принципа эквивалентности — равенства инертной и тяготеющей масс. Поэтому для нахождения массы чёрной дыры достаточно знать v и r .

Существуют два наиболее надёжных метода определения масс сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик: метод разрешённой кинематики и метод эхокартирования. Первый метод основан на непосредственных наблюдениях движения пробных тел. Он применяется для наиболее близких галактик, для которых угловое разрешение телескопа позволяет “увидеть” пробные тела, расположенные в ядре галактики, и прямо измерить их скорости и расстояния от центральной чёрной дыры. Как уже упоминалось, методом разрешённой кинематики определена масса чёрной дыры в центре нашей Галактики (более подробно об этом см. [2]). С использованием радиointерферометров со сверхдлинной базой указанным методом удалось надёжно измерить массу сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики NGC 4257: $M_{\text{BH}} = 3.9 \times 10^7 M_{\odot}$ [21]. К сожалению, для большинства удалённых галактик угловое разрешение телескопов не позволяет увидеть отдельные пробные тела; в этих случаях для определения масс сверхмассивных чёрных дыр применяется метод эхокартирования, с помощью которого скорости и расстояния пробных тел определяются опосредованно. Скорость v оценивается по доплеровской ширине линий излучения, формирующихся в газовых облаках, которые двигаются вокруг центральной чёрной дыры. Эти линии в спектре ядра галактики уширены вследствие эффекта Доплера, поэтому их полуширина характеризует среднюю скорость движения “пробных тел”. Характерное расстояние r газовых облаков от центральной чёрной дыры определяется по времени запаздывания переменности линий излучения относительно переменности непрерывного спектра (континуума) ядра галактики, который излучается в центральных частях ядра. Знание характерной скорости и характерного расстояния позволяет оценить массу чёр-

ной дыры по приведённой выше формуле. К настоящему времени косвенными методами оценены массы многих тысяч сверхмассивных чёрных дыр.

Прямые измерения радиуса чёрной дыры в центре нашей Галактики выполняются в последние годы с помощью методов наземной межконтинентальной радиоинтерферометрии на коротких волнах (~ 1.3 мм) с угловым разрешением лучше 10^{-4} секунды дуги. В работе [22] прямыми наблюдениями центра нашей Галактики показано, что размеры светящейся окрестности сверхмассивной чёрной дыры массой $4 \times 10^6 M_{\odot}$ меньше размеров её тёмной “тени”. По-видимому, авторы фиксировали излучение от приближающейся к наблюдателю внутренней части вращающегося аккреционного диска, яркость которой усилена за счёт релятивистских эффектов. Не исключено также и то, что в данном случае наблюдалось излучение от основания релятивистского джета, формирующегося вблизи чёрной дыры. Из этого следует, что линейный размер сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики близок к её гравитационному радиусу. Для окончательного доказательства того, что сверхмассивный компактный объект в центре нашей Галактики действительно является чёрной дырой, авторы названной работы планируют проведение своих наблюдений со сверхдлинной базой на более коротких волнах (< 1 мм) и с большим количеством приёмных антенн. В итоге есть надежда получить изображение тёмной “тени” от центральной сверхмассивной чёрной дыры и тем самым окончательно доказать, что данный объект — реальная чёрная дыра.

В этой связи большие возможности предоставляет космический радиоинтерферометр “Радиоастрон”, угловое разрешение которого на длине волны $\lambda = 1.3$ см (самая короткая, на которой работает “Радиоастрон”) лучше 10^{-5} секунды дуги. С помощью “Радиоастрона” можно надеяться “увидеть” тень от центральной сверхмассивной чёрной дыры массой $6 \times 10^9 M_{\odot}$ в ядре галактики M87. Особенно перспективным для подобных экспериментов представляется проект космического радиоинтерферометра “Миллиметрон”, разрабатываемый под руководством академика Н.С. Кардашёва. Он будет работать на очень коротких волнах ($\lambda < 1$ мм), где поглощение и рассеяние радиоволн на неоднородностях плазмы вблизи чёрной дыры мало, с огромным угловым разрешением (до 10^{-9} секунды дуги), что принципиально важно для исследования сверхмассивных чёрных дыр в ядрах многих галактик.

Таким образом, в ядрах сотен галактик к настоящему времени открыты сверхмассивные ($M_{\text{ВН}} = 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$) и очень компактные (радиусы не превышают нескольких гравитационных радиу-

сов) объекты. По всем признакам — это, скорее всего, чёрные дыры.

Демография звёздных и сверхмассивных чёрных дыр. Большое число открытых кандидатов в чёрные дыры позволяет развивать демографию чёрных дыр — новую область астрофизики, которая изучает рождение, рост чёрных дыр и их эволюционную связь с другими объектами Вселенной. В последние годы между наблюдательными проявлениями рентгеновских двойных систем с чёрными дырами и ядрами галактик было установлено близкое подобие [23]. В частности, для сверхмассивных и звёздных чёрных дыр была открыта статистическая зависимость, называемая фундаментальной плоскостью. Выявлено также, что переменность активных галактических ядер, содержащих аккрецирующие сверхмассивные чёрные дыры, подобна переменности аккрецирующих звёздных чёрных дыр в рентгеновских двойных системах, если время этой переменности нормировать в зависимости от массы чёрной дыры [23]. Это справедливо как для звёздных, так и сверхмассивных чёрных дыр. Чёрные дыры в двойных системах, находящиеся в режиме аккреции, показывают аperiодическую переменность рентгеновского излучения на временах от нескольких суток до $10^{-2} - 10^{-3}$ с. Подобная переменность наблюдается и в излучении аккрецирующих сверхмассивных чёрных дыр, но на гораздо более длительных временах — от нескольких лет до нескольких месяцев и недель.

Интересные результаты получены при изучении распределения звёздных чёрных дыр по массам. Как оказалось, нет зависимости масс релятивистских объектов от масс их спутников в двойных системах [2]. И нейтронные звёзды, и чёрные дыры встречаются в двойных системах, имеющих спутники как больших, так и малых масс. Также отсутствует зависимость между массой чёрной дыры в двойной системе и массой спутника. В этом смысле тесные двойные системы с нейтронными звёздами и чёрными дырами подобны классическим тесным двойным системам, в которых, как неоднократно подчеркивалось Д.Я. Мартьяновым, встречаются любые комбинации компонент [24].

Необычным оказалось и распределение масс нейтронных звёзд и чёрных дыр [25, 26] (рис. 5). Число изученных чёрных дыр звёздных масс не возрастает с уменьшением их массы. Это удивительно, поскольку распределение масс звёзд в Галактике (наиболее массивные из которых являются производителями релятивистских объектов) таково, что численность звёзд очень сильно (как M^{-5}) возрастает с уменьшением массы звезды. Поскольку звёздные чёрные дыры образуются при коллапсах железных ядер массивных ($M > 30 M_{\odot}$) звёзд, казалось бы, число звёздных чёрных дыр

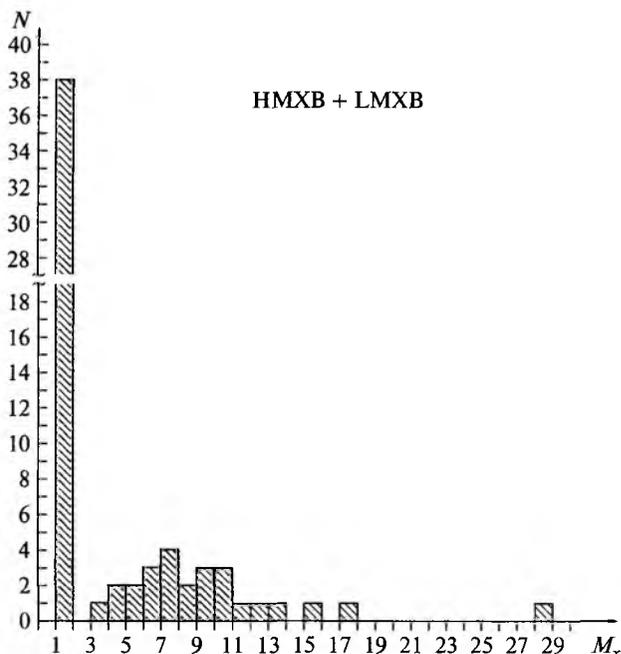


Рис. 5. Распределение масс нейтронных звезд и чёрных дыр в двойных системах
Высокий пик слева соответствует нейтронным звёздам

должно резко возрастать в сторону меньших масс, но такого не наблюдается. В связи с этим стоит упомянуть об одной интересной возможности объяснения необычного распределения звёздных чёрных дыр по массам. В работе [27] высказана гипотеза о том, что плоское распределение звёздных чёрных дыр по массам и провал в этом распределении в области $2-4 M_{\odot}$ могут быть связаны с усиленным квантовым испарением чёрных дыр, которое следует из некоторых многомерных моделей гравитации. Поскольку темп квантового испарения резко (как M^{-3}) возрастает с уменьшением массы чёрной дыры, можно предполагать, что наблюдаемый дефицит маломассивных чёрных дыр и провал в распределении масс релятивистских объектов в интервале $2-4 M_{\odot}$ связаны с тем, что многие чёрные дыры с относительно малыми массами успели испариться в течение времени жизни Вселенной. С другой стороны, если время квантового испарения звёздной чёрной дыры меньше возраста Вселенной (1.4×10^{10} лет), то уменьшение массы чёрной дыры в рентгеновской двойной системе должно приводить к наблюдаемому изменению её орбитального периода. Поиски таких изменений ведутся, в том числе и нашей научной группой. Результаты исследований уже позволили получить ограничение сверху на характерный масштаб дополнительного пространственного измерения: $L < 0.1$ мм [28]. Поскольку точность определения орбитального периода двойной системы возрастает с увеличением числа

протекших периодов, дальнейшее накопление наблюдательных данных по определению орбитальных периодов рентгеновских двойных систем позволит значительно улучшить эту оценку.

Обсудим теперь проблему демографии сверхмассивных чёрных дыр. Как выяснилось, время формирования сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик очень короткое — меньше 1 млрд. лет. Об этом свидетельствует открытие свыше десятка квазаров с огромным красным смещением $z > 6$. Недавно [29] была открыта очень массивная чёрная дыра с массой $4 \times 10^{10} M_{\odot}$, расположенная в центре галактики, красное смещение которой $z \sim 3.4$ (собственный возраст галактики около 1 млрд. лет). Столь быстрое формирование очень массивных чёрных дыр трудно объяснить в моделях, предполагающих рост сверхмассивной чёрной дыры за счёт аккреции газа на маломассивную, затравочную чёрную дыру (образованную в результате коллапса ядра массивной — $M = 100-1000 M_{\odot}$ звезды населения III), даже если темп аккреции очень сильный. Поскольку масса чёрной дыры в 40 млрд. солнечных масс составляет почти половину массы барионного вещества нашей Галактики, некоторые учёные, например Н.С. Кардашёв, всерьёз обсуждают вопрос о том, что первично — образование галактики на ранних стадиях эволюции Вселенной с последующим формированием в её центре сверхмассивной чёрной дыры или же формирование первичной сверхмассивной чёрной дыры, которая затем “натягивает” на себя барионное вещество, из которого формируются звёзды галактики.

В обзоре [2] мы описали основные статистические зависимости между массой центральной сверхмассивной чёрной дыры и параметрами родительской галактики. К настоящему времени множество из этих корреляций подтверждено на большем наблюдательном материале. С 2006 г. в ГАИШе на 6-метровом телескопе САО РАН нами ведутся наблюдения скоростей вращения и дисперсии скоростей звёзд и газа галактик с надёжно измеренными массами центральных сверхмассивных чёрных дыр [30, 31]. Это позволяет изучать связь между массой центральной сверхмассивной чёрной дыры и кинематическими характеристиками галактик и их структур (рис. 6). Важно то, что по вращению галактики можно оценить её полную массу, включая такую как барионную, так и тёмную материю (которая по массе может на порядок превышать вклад барионной материи). Подтверждена найденная ранее почти линейная зависимость между массой сверхмассивной чёрной дыры в ядре галактики и массой балджа галактики — сферического сгущения старых маломассивных звёзд вблизи ядра с большой дисперсией скоростей [31, 32]. Выявляется новый удивительный факт: масса центральной сверх-

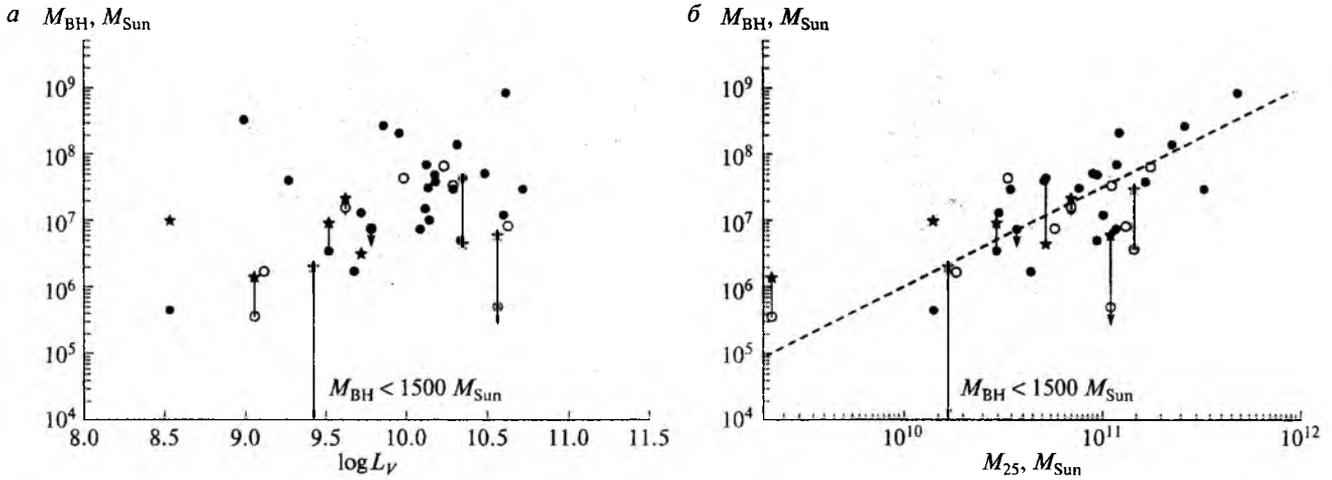


Рис. 6. Сравнение масс сверхмассивных чёрных дыр с полной оптической светимостью родительской галактики L_V ,

характеризующей массу барионного вещества (а), с индикативной массой галактики $M_{25} = \frac{V_{\text{FAR}}^2 R_{25}}{G}$, включающей как барионное вещество, так и тёмную материю (б)

V_{FAR} – предельная скорость вращения галактики, R_{25} – предельный радиус галактики, соответствующий поверхностной яркости 25-й звёздной величины с квадратной секунды

массивной чёрной дыры по отношению к массе балджа галактики растёт с увеличением красного смещения, то есть с уменьшением собственного возраста галактики [33].

Эксперименты с высоким угловым разрешением. Наиболее убедительным свидетельством существования чёрной дыры было бы получение её прямого изображения. Разумеется, ввиду того, что сама чёрная дыра ничего не излучает, наблюдать её в изолированном виде невозможно. Однако в реальной ситуации и звёздные, и сверхмассивные чёрные дыры окружены аккреционными дисками, в которых происходит выделение гравитационной энергии при аккреции. Как уже отмечалось выше, на светлом фоне внутренних частей геометрически тонкого аккреционного диска чёрная дыра должна наблюдаться как тёмное пятно (тень), поскольку от горизонта событий никакой сигнал, в том числе и электромагнитное излучение, не может удалиться на пространственную бесконечность. Из-за эффектов гравитационного линзирования типичный диаметр тени от чёрной дыры в 2.6 раза больше её удвоенного гравитационного радиуса. Более того, фотоны от аккреционного диска вблизи горизонта событий могут не только искривлять свои траектории, но и захватываться гравитационным полем чёрной дыры и двигаться, совершая много оборотов вокруг неё. Это одна из причин увеличения видимого диаметра тени. Размеры и форма тени могут быть вычислены (с учётом эффектов ОТО) с использованием метода трассировки лучей света вдоль геодезических линий в пространстве–времени чёрной дыры. Согласно [34], в случае центра на-

шей Галактики (радиоисточник SgrA*) в модели с низкой радиационной эффективностью (ADAF – модель, где доминирует адвекция вещества на чёрную дыру) от источника SgrA* в диапазоне длин волн $\lambda \leq 1$ мм доминирует синхротронное излучение тепловых электронов в магнитное поле. Лучи света, испускаемые внутренними частями аккреционного диска с низкой радиационной эффективностью, сильно искривляются в гравитационном поле чёрной дыры, а также поглощаются и подвергаются рассеянию в плазме, окружающей чёрную дыру. Это поглощение и рассеяние в межзвёздной среде приводит к дополнительному увеличению эффективного размера видимого изображения чёрной дыры, которое растёт с длиной волны как λ^2 . Поэтому, как уже отмечалось, чтобы наблюдать истинную тень от чёрной дыры в центре нашей Галактики, необходимо проводить наблюдения на коротких волнах с $\lambda < 1$ мм [22].

На рисунке 7 приведено изображение тени и ближайших окрестностей аккреционного диска для источника SgrA* в центре нашей Галактики, построенное по результатам теоретических расчётов [35]. В данном случае тень от чёрной дыры видна на ярком фоне аккреционного диска (вкладом излучения релятивистского джета пренебрегается). Как известно, в центре нашей Галактики расположена чёрная дыра массой $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$. На рисунке видна тень от неё и сложное распределение яркости вблизи неё: левая часть аккреционного диска, в которой вещество, движущееся со скоростями, близкими к скорости света, приближается к наблюдателю, из-за действия релятивистских эффектов имеет большую яркость и

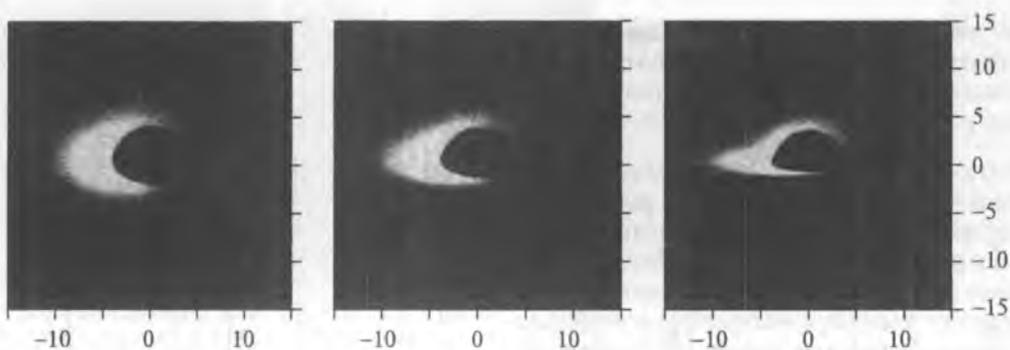


Рис. 7. Картина, которую “увидит” наблюдатель центра Галактики с помощью интерферометра с угловым разрешением $\sim 10^{-6}$ с, на коротких радиоволнах

Видны внутренняя часть яркого аккреционного диска и тень от сверхмассивной чёрной дыры; показаны изображения для разных углов наклона плоскости диска к картинной плоскости: $i = 60^\circ$ (левое изображение), 70° (центр) и 80° (правое изображение) (по [35])

более высокую температуру излучения. Светящийся “ореол” вокруг тени виден даже тогда, когда луч зрения почти лежит в плоскости аккреционного диска. Это связано с искривлением лучей света в сильном гравитационном поле чёрной дыры, что приводит к тому, что видна даже задняя часть аккреционного диска. Кроме того, вблизи тени фотоны, испускаемые задней частью аккре-

ционного диска, отклоняются в гравитационном поле чёрной дыры настолько сильно, что двигаются по замкнутым траекториям. Предполагаемая структура ближайших окрестностей чёрной дыры массой $6 \times 10^9 M_\odot$ в центре галактики M87 [36] приведена на рисунке 8. Недавно были опубликованы результаты наблюдений центра галактики M87 методом межконтинентальной радио-

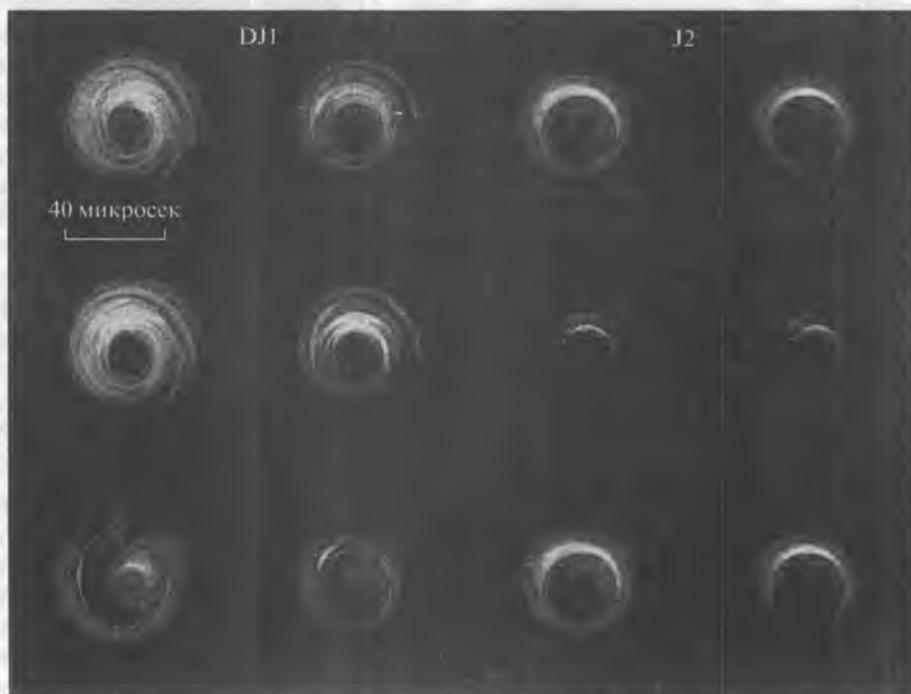


Рис. 8. Изображение окрестностей сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики M87, полученное на основе модельных расчётов в работе [36]

Видна тень от чёрной дыры на фоне излучения аккреционного диска и джетов. Расчёты выполнены в рамках двух моделей: модели с доминирующим излучением аккреционного диска (две колонки слева) и модели с доминирующим излучением джетов (две колонки справа); в каждой паре колонок левая соответствует длине волны $\lambda = 1.3$ мм, правая — 0.87 мм. В первой модели наблюдается излучение диска и слабое излучение джета, а излучение контрджета поглощено аккреционным диском; во второй модели доминирует излучение контрджета, усиленное за счёт искривления лучей света в сильном гравитационном поле чёрной дыры, а излучение переднего джета сильно ослаблено из-за действия сильного гравитационного поля чёрной дыры. Верхняя строка соответствует структуре “диск плюс джет”, средняя — диску, нижняя — джету

интерферометрии на короткой длине волны 1.3 мм с угловым разрешением порядка 10^{-5} секунды дуги [37]. Измеренный диаметр светящейся области вокруг сверхмассивной чёрной дыры составляет 5.5 ± 0.4 шварцшильдовских радиусов. Авторы использовали две модели для оценки углового размера светящейся области вблизи чёрной дыры: распределение яркости по закону Гаусса, а также гауссово распределение яркости во внешних частях с сильно пониженной яркостью в центральных частях (что моделирует наличие тёмной тени от центральной чёрной дыры). Оказалось, что обе модели позволяют хорошо описать данные радиоинтерферометрических наблюдений. Важно то, что модель с тенью от чёрной дыры не отвергается наблюдениями. Дальнейшее накопление наблюдательных данных в этой программе (которую авторы называют Event Horizon Telescope – телескоп для исследования горизонтов событий чёрных дыр) позволит окончательно установить природу сверхмассивного компактно-го объекта в центре галактики M87.

Наконец, нельзя не упомянуть и о возможности прямого доказательства существования чёрных дыр во Вселенной путём наблюдения гравитационно-волновых сигналов от слияния чёрных дыр в двойных системах [3, 38]. Наблюдения на лазерных гравитационно-волновых антеннах первого поколения пока не привели к обнаружению гравитационно-волновых сигналов из космоса [39]. Через несколько лет вступят в строй антенны второго поколения с чувствительностью на один-два порядка выше. Можно надеяться, что при этом будут открыты гравитационно-волновые всплески от сливающихся чёрных дыр в двойных системах. Поскольку к настоящему времени задача о слиянии двух чёрных дыр решена [38, 40] и получены соответствующие “кривые блеска” в гравитационно-волновом излучении при разных параметрах двойных чёрных дыр, то сравнение теоретических “кривых блеска” с наблюдаемыми позволит изучить динамические характеристики пространства–времени при слиянии чёрных дыр и тем самым доказать реальное существование этих объектов, а также осуществить строгую и всестороннюю проверку ОТО в экстремально сильных гравитационных полях.

* * *

После 40 лет исследований чёрных дыр у учёных остаётся всё меньше сомнений в реальном существовании этих экстремальных объектов во Вселенной. Поэтому вот уже на протяжении последних 20 лет большинство исследователей используют термин “чёрная дыра” вместо более осторожного выражения “кандидат в чёрные дыры”. Это связано с тем, что весь комплекс наблюдательных данных по многочисленным массив-

ным и чрезвычайно компактным объектам находится в полном согласии с предсказаниями ОТО для чёрных дыр. Следует отметить два неожиданных наблюдательных факта из области демографии чёрных дыр, которые нуждаются в дальнейшем теоретическом анализе: необычное (плоское) распределение звёздных чёрных дыр по массам и очень быстрый темп роста сверхмассивных чёрных дыр (характерное время – менее миллиарда лет). В связи с запуском российского космического радиоинтерферометра “Радиоастрон” появилась реальная возможность получать изображения теней от сверхмассивных чёрных дыр в центрах ближайших галактик и наблюдать процессы вблизи горизонтов событий чёрных дыр. Это позволяет надеяться, что в недалёком будущем будут получены окончательные доказательства существования чёрных дыр во Вселенной. Они приведут к прорыву в нашем понимании природы материи и пространства–времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gillessen S., Eisenhauer F., Trippe S. et al.* Monitoring Stellar Orbits Around the Massive Black Hole in the Galactic Center // *Astrophysical Journal*. 2009. V. 692. P. 1075.
2. *Черепашук А.М.* Поиски чёрных дыр // *Вестник РАН*. 2004. № 6. С. 488.
3. *Новиков И.Д., Фролов В.П.* Чёрные дыры во Вселенной // *Успехи физ. наук*. 2001. Т. 171. С. 307.
4. *Логунов А.А.* Теория гравитационного поля. М.: Наука, 2000.
5. *Babak S.V., Grishchuk L.P.* Finite-Range Gravity and its Role in Gravitational Waves, Black Holes and Cosmology // *International Journal of Modern Physics D*. 2003. V. 12. P. 905.
6. *Shakura N.I., Sunyaev R.A.* Black Holes in Binary Systems. Observational Appearances // *Astronomy and Astrophysics*. 1973. V. 24. P. 337.
7. *Kiziltan B., Kottas A., Thorsett S.E.* The Neutron Star Mass Distribution // Preprint arxiv: 1011.4291.
8. *Alpar M.A., Cheng A.F., Ruderman M.A., Shaham J.* A new class of radio pulsars // *Nature*. 1982. V. 300. P. 728.
9. *McClintock J.E., Remillard R.A.* Black hole binaries // *Compact stellar X-ray sources* / Eds. W. Lewin, M. van der Klis. Cambridge Astrophysics Series. N 39. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. P. 157.
10. *Cherepashchuk A.M.* X-ray Nova Binary Systems // *Space Science Review*. 2000. V. 93. P. 473.
11. *Orosz J.A., McClintock J.E., Narayan R. et al.* A 15.65-solar-mass black hole in an eclipsing binary in the nearby spiral galaxy M 33 // *Nature*. 2007. V. 449. P. 872.
12. *Абубекеров М.К., Антохина Э.А., Богомазов А.И., Черепашук А.М.* Масса чёрной дыры в рентгеновской двойной системе M33 X-7 и эволюционный статус систем M33 X-7 и IC 10 X-1 // *Астрономический журнал*. 2009. Т. 86. С. 260.

13. *Novikov I.D., Thorne K.S.* Astrophysics of Black Holes // Black Holes / Eds. C. DeWitt, B.S. DeWitt. N.Y.: Gordon and Breach, 1973.
14. *McClintock J.E.* Black Hole Binaries: The Journey from Astrophysics to Physics // Short-Period Binary Stars: Observations, Analyses, and Results / Eds. E.F. Milone et al. Berlin Springer, 2008. P. 3.
15. *Remillard R.A., McClintock J.E.* X-Ray Properties of Black-Hole Binaries // Annual Review of Astronomy & Astrophysics. 2006. V. 44. P. 49.
16. *Davis S.W., Done C., Blaes O.* Testing Accretion Disk Theory in Black Hole X-Ray Binaries // Astrophysical Journal. 2006. V. 647. P. 525.
17. *Liu J., McClintock J.E., Narayan R.* Precise Measurement of the Spin Parameter of the Stellar-Mass Black Hole M33 X-7 // Astrophysical Journal. 2008. V. 679. P. L37.
18. *Narayan R., McClintock J.E.* Observational Evidence for a Correlation Between Jet Power and Black Hole Spin // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2012. V. 419. P. L69.
19. *Gou L., McClintock J.E., Liu J.* A Determination of the Spin of the Black Hole Primary in LMC X-1 // Astrophysical Journal. 2009. V. 701. P. 1076.
20. *Gou L., McClintock J.E., Reid M.* The Extreme Spin of the Black Hole in Cygnus X-1 // Astrophysical Journal. 2011. V. 742. P. 85.
21. *Moran J.M., Greenhill L.J., Herrnstein J.R.* Observational Evidence for Massive Black Holes in the Centers of Active Galaxies // Journal of Astrophysics and Astronomy. 1999. V. 20. P. 165.
22. *Doeleman S.S., Weintraub J., Rogers A.E.E. et al.* Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre // Nature. 2008. V. 455. P. 78.
23. *McHardy I.M., Koending E., Knigge C. et al.* Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes // Nature. 2006. V. 444. P. 730.
24. *Мартынов Д.Я.* Тесные двойные звёзды и их значение для теории звёздной эволюции // Успехи физ. наук. 1972. Т. 108. С. 701.
25. *Черепашук А.М.* Звёзды Вольфа–Райе и релятивистские объекты: различие распределений масс в тесных двойных системах // Астрономический журнал. 2001. Т. 78. С. 145.
26. *Черепашук А.М.* Звёзды Вольфа–Райе и релятивистские объекты // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. С. 959.
27. *Постнов К.А., Черепашук А.М.* Массы звёздных чёрных дыр и возможности проверки теорий гравитации // Астрономический журнал. 2003. Т. 80. С. 1075.
28. *Johannsen T., Psaltis D., McClintock J.E.* Constraints on the Size of Extra Dimensions from the Orbital Evolution of Black-Hole X-Ray Binaries // Astrophysical Journal. 2009. V. 691. P. 997.
29. *Ghisellini G., Foschini L., Volonteri M. et al.* The blazar S5 0014+813: a real or apparent monster? // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2009. V. 399. P. L24.
30. *Черепашук А.М., Афанасьев В.Л., Засов А.В., Катков И.Ю.* Кинематика дисковых галактик с известными массами сверхмассивных чёрных дыр. Наблюдения // Астрономический журнал. 2010. Т. 87. С. 634.
31. *Засов А.В., Черепашук А.М., Катков И.Ю.* Сверхмассивные чёрные дыры и кинематика галактик // Астрономический журнал. 2011. Т. 88. С. 648.
32. *Beifiori A., Courteau S., Corsini E.M., Zhu Y.* On the correlations between galaxy properties and supermassive black hole mass // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2012. V. 419. P. 2497.
33. *Decarli R., Falomo R., Treves A. et al.* The quasar MBH-Mhost relation through cosmic time – II. Evidence for evolution from $z = 3$ to the present age // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2010. V. 402. P. 2453.
34. *Huang L., Cai M., Shen Z.-Q., Yuan F.* Black hole shadow image and visibility analysis of Sagittarius A* // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2007. V. 379. P. 833.
35. *Watarai K.-Y., Ohsuga K., Takahashi R., Fukue J.* Geometrical Effect of Supercritical Accretion Flows: Observational Implications of Galactic Black-Hole Candidates and Ultraluminous X-Ray Sources // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2005. V. 57. P. 513.
36. *Dexter J., McKinney J.C., Agol E.* The size of the jet launching region in M87 // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2012. V. 421. P. 1517.
37. *Doeleman S.S., Fish V.L., Schenck D.E. et al.* Jet Launching Structure Resolved Near the Supermassive Black Hole in M 87 // Science. 2012. V. 338. P. 355.
38. *Thorne K.* Black Holes: A New Golden Age // Ginzburg conference on physics (abstracts), May 28–June 2, 2012, Moscow Lebedev Institute. P. 33.
39. *Abbott B.P., Abbott R., Acernese F. et al.* An upper limit on the stochastic gravitational-wave background of cosmological origin // Nature. 2009. V. 460. P. 990.
40. *Pretorius F.* Binary Black Hole Coalescence // Physics of Relativistic Objects in Compact Binaries: From Birth to Coalescence, Astrophysics and Space Science Library, v. 359. Springer, UK-Netherlands, Dordrecht, 2009. P. 305.