НАУКА И ЖИЗНЬ

ISSN: 1683-9528

8
2023

● Хотя чёрные дыры и нельзя увидеть, их можно взвесить ● Биоразлагаемая плёнка: ещё одна веха на пути поиска «идеальной» упаковки ● Последствия работы из дома уже проявляют себя ● «На нашу планету, бог знает откуда, попала какая-то странная книга…» (из замыслов И. С. Тургенева).



В НОМЕРЕ:

Ярким солнцем, синей далью
В летний полдень любоваться —
Непонятною печалью
Дали солнечной терзаться…

Кто поймёт, измерит оком,
Что́ за этой синей далью?
Лишь мечтанье о далёком
С непонятною печалью…

Александр Блок,
1900 год

Е. СЕЙФИНА, докт. физ.-мат. наук — **Масса за горизонтом событий** (подготовила В. Смирнова) 2
Рефераты (подготовил Л. Ашкинази) 10
Д. ДОНСКОВ, канд. биол. наук — **Сюрпризы «огненной» льнянки** 12

Вести из институтов и лабораторий

Т. ЗИМИНА — **Пузырьки как подъёмная сила для микропластика** (18). **Городские реки в меняющемся климате** (19). К. СТАСЕВИЧ — **Биоразлагаемая упаковка с маслом чайного дерева** (21). Т. ЗИМИНА — **Силиценовый остров для тысячи устройств** (60).

К. ДЕГТЯРЁВ, канд. геогр. наук — **Солнечная энергетика: смещение к югу** 22
Бюро иностранной научно-технической информации 32
Б. РУБЦОВ, канд. биол. наук — **Бластофаг — пожиратель бластов** 36
Наука и жизнь сто лет назад 43
Е. БЕРКОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доктор естествознания — **Альберт Эйнштейн: счастливые годы в Берне** 44
Н. ШЕВЫРЁВА — **Папоротники в садовом дизайне** 62
О чём пишут научно-популярные журналы мира 76

«УМА ПАЛАТА»
Познавательно-развивающий раздел для школьников

Ю. ЩЕРБИНИНА, докт. пед. наук — **Библиофутурология: от фонокниги до книгофильма** (81). Р. СЕЙФУЛИНА, канд. биол. наук — **Зачем кузнечику сабля?** (90).

Ответы на кроссворд с фрагментами 99
Кроссворд с фрагментами 100
В. МАКСИМОВ, канд. филол. наук — **Из истории фамилий** 102
А. ПЕРВУШИН — **Наука о чужих. Жизнь и разум во Вселенной. VIII. Семена жизни** 106
Кунсткамера 122
Е. ВОРОН — **Если мир опрокинется** (фантастическая повесть) 124
Л. АШКИНАЗИ, Н. СЬЯНОВА — **Что видим? Нечто странное! Десять предметов** (ответы и решения) 138
Маленькие хитрости 141
С. ШКОДИНА — **Декоративная земляника фрагария** 142

НА ОБЛОЖКЕ:

1-я стр. — Мечник *(Conocephalus sp.)*. Своё название этот кузнечик получил за форму яйцеклада — длинного, как меч. Фото Р. Сейфулиной, см. её статью «Зачем кузнечику сабля?» (стр. 90).

Внизу: Одна из старинных — конца XIX века — иллюстраций, представлявших реакцию людей на падение с неба «громовых камней». (См. статью на стр. 106.)

4-я стр. — Вербейники монетный и обыкновенный «во многом не похожи, но они превосходно (по словам Дмитрия Донскова, автора статьи «Непохожие вербейники», см. «Наука и жизнь» № 7, 2023 г.) дополняют друг друга как в лесу, так и в саду!» В данном случае, в саду к концу июля. Фото Н. Домриной — в дополнение к напечатанному.

НАУКА И ЖИЗНЬ®
№ 8 АВГУСТ 2023
Журнал основан в 1890 году.
Издание возобновлено в октябре 1934 года.
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ЖУРНАЛ

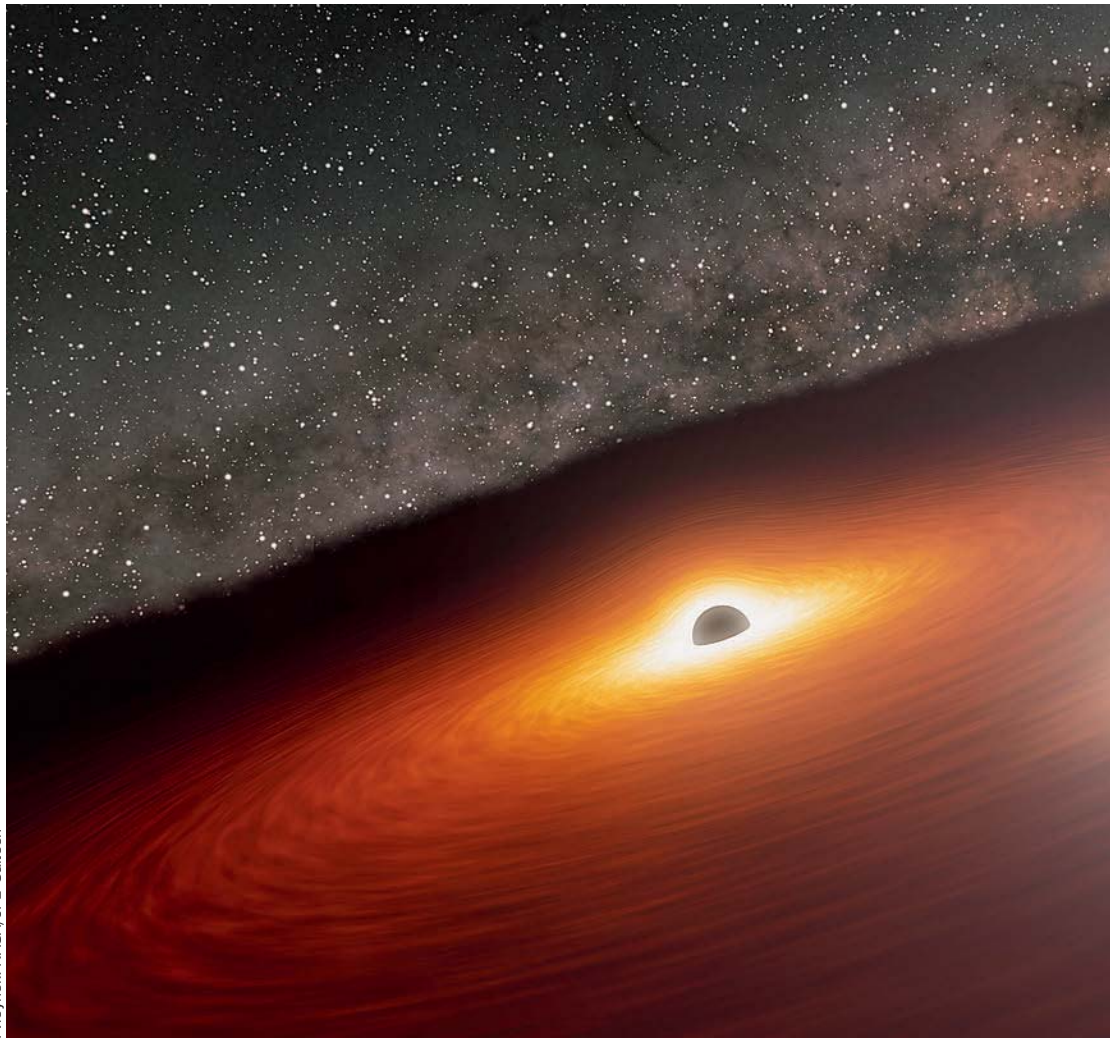


Рисунок: NASA/JPL-Caltech

МАССА ЗА ГОРИЗОНТОМ СОБЫТИЙ

В ядрах большинства галактик прячутся сверхмассивные чёрные дыры. Их масса может быть в миллионы и миллиарды раз больше массы Солнца. Однако это вовсе не означает, что чем больше чёрная дыра, тем её будет проще найти и исследовать. Крупные чёрные дыры могут неплохо играть с астрофизиками в прятки, тогда как дыры поменьше не прочь и проявить себя, порой весьма ярким образом. Кстати, в центре одной и той же галактики могут мирно уживаться две чёрные дыры разного размера, подобные двойные объекты астрономы находят всё чаще. О том, как удалось обнаружить — а потом и «взвесить»! — меньшую из двух сверхмассивных чёрных дыр в галактике OJ 287, рассказывает доктор физико-математических наук Елена СЕЙФИНА, ведущий научный сотрудник отдела звёздной астрономии Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ.

Материал подготовила Виктория Смирнова.



Система из двух сверхмассивных чёрных дыр в центре галактики OJ 287 в представлении художника.

ЗАЧЕМ «ВЗВЕШИВАТЬ» ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ?

Наверное, нужно начать издалека: зачем вообще изучать чёрные дыры? Космос — это наш дом. И его очень интересно исследовать, узнавать, что находится в окрестностях Солнечной системы, а что затерялось в его далёких уголках.

С точки зрения физики, чёрные дыры являются проявлением сверхсильных полей тяготения. Полей, которые способны разгонять движущееся в них вещество до скоростей, близких к скоростям света. Ни в каких других объектах поля тяготения не достигают столь больших величин. Удивительно, что причиной такой «сверхсилы» чёрных дыр служит просто их большая масса (загнанная под горизонт событий или, правильнее сказать, сконцентрированная в пределах гравитационного радиуса). Поэтому и важно оценить, насколько велика эта масса, за счёт чего чёрная дыра её наращивает или теряет, какую роль она играет в равновесии окружающего многомерного пространства. Возможно, удастся получить ответы на эти вопросы в недалёком будущем. А пока мы исследуем доступные в нашем измерении свойства чёрных дыр, ключевое из которых — их масса.

Понятно, что чёрные дыры нельзя увидеть в прямом смысле этого слова. Мы лишь догадываемся о наличии чёрной дыры по её гравитационному воздействию на окружающие звёзды или вещество. Дело в том, что вещество, аккрецирующее на чёрную дыру, сразу не может упасть на неё, так как оно вращается по орбите и центробежные силы мешают его падению на тяготеющий центр. Вещество постепенно закручивается по спирали вокруг чёрной дыры в диск — его называют аккреционным диском. Из-за того, что эти спиральные слои трутся друг о друга, они разогреваются до таких температур, при которых материя уже начинает светиться в рентгеновском диапазоне. Рентген мы видим хорошо и благодаря ему понимаем, где находится чёрная дыра. Первый объект, содержащий чёрную дыру, Cygnus X-1, был открыт ещё в 1964 году именно в рентгеновском диапазоне длин волн.

Поэтому чёрные дыры лучше всего изучать в рентгеновских лучах. Однако земная атмосфера полностью поглощает космическое рентгеновское излучение, из-за чего наблюдения за рентгеном от чёрных дыр можно вести, только «выйдя за атмосферу». Так что с усовершенствованием орбитальной техники процесс наблюдений за чёрными дырами значительно упростился (см. статью: А. Понятов. «„Спектр-РГ". Обсерватория для нового обзора неба». — «Наука и жизнь» № 8, 2019 г. — **Прим. ред.**).

Преимущество рентгеновского излучения ещё и в том, что оно несёт больше

информации из самых дальних уголков Вселенной из-за его высокой проницаемости в межзвёздной среде по сравнению со светом оптического диапазона. Данные наблюдений с орбитальных рентгеновских телескопов сейчас доступны из любой точки мира по интернету. Раньше, лет десять тому назад, результаты космических наблюдений можно было получить только в специальных космических центрах за рубежом. И обработку наблюдений приходилось проводить там же. Сейчас уже накопилось множество архивных данных, которые доступны любому пользователю. Нужно лишь ввести имя объекта, указать название телескопа, примерные даты наблюдения и скачать информацию. А потом уже начинать обработку данных.

Мы с моим коллегой Львом Григорьевичем Титарчуком заметили, что все чёрные дыры, независимо от их массы, ведут себя одинаково во время рентгеновских вспышек. То есть их вспышки происходят всегда по одному и тому же сценарию. Чёрные дыры с небольшой массой называются чёрными дырами звёздных масс, потому что их масса примерно такая же, как у звёзд: от 3 до 20 масс Солнца (массы звёзд и чёрных дыр принято измерять в массах Солнца, $1\ M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$ г). Это относительно легковесные чёрные дыры. Но бывают чёрные дыры с очень большой массой — их называют сверхмассивными, они весят 1—1000 миллионов масс Солнца. Когда мы подробно изучили сценарий вспышек у чёрных дыр звёздных масс, то смогли применить его и к сверхмассивным чёрным дырам. Главным индикатором чёрных дыр и их большой массы были именно рентгеновские вспышки, протекающие по специфическому сценарию. Во время нарастания вспышки происходит постепенное увеличение такого параметра, как фотонный индекс Г, который выходит на характерное «плато». Подобный участок насыщения на кривой служит ключевым признаком наличия чёрной дыры в двойной системе.

То есть чтобы распознать чёрную дыру в центре галактики, необходимо наблюдать эту галактику во время вспышки. Так мы и сделали: следили за галактикой OJ 287 во время последней её вспышки. Нам удалось обнаружить это «плато» и понять, что природа наблюдаемой вспышки обусловлена наличием в её центре сверхмассивной чёрной дыры, а также оценить её массу. За этой кажущейся простотой метода на самом деле стоит многолетний труд и множество исследований маленьких чёрных дыр.

Галактика OJ 287 — яркий представитель нового класса релятивистских объектов, открытия которых посыпались как из рога изобилия, особенно в течение последних двух лет. Всего около 10% галактик показывают активность в виде рентгеновских вспышек, причём вспыхивают главным образом ядра галактик. Долгое время причина этой активности оставалась загадкой. Было предложено множество разных гипотез, одна из них сейчас принята в качестве рабочей: в центре галактики находится чёрная дыра, и активность ядра вызвана падением вещества галактики на эту чёрную дыру.

Роль центральных чёрных дыр в жизни галактик полна загадок, начиная с их рождения. Считается, что галактики образуются вокруг чёрных дыр. Далее чёрная дыра может ускорять или приостанавливать рост галактики вокруг себя. Существовало мнение, что сверхмассивные чёрные дыры крепко «держат» свои галактики. Хотя сейчас доказали, что если чёрную дыру каким-то образом удалить из центра сформировавшейся галактики, галактика не развалится и, возможно, даже не ощутит этой «потери». Но пока чёрная дыра находится в центре галактики, она соединяет приятное с полезным, ведь именно в этом месте дыра наращивает свою массу.

Хоть галактика OJ 287 и расположена очень далеко от Земли — 1 гигапарсек, или 3,5 миллиарда световых лет, — она содержит в своём центре одну из самых массивных среди известных чёрных дыр во Вселенной. Возможно, этим и объясняется её мощное излучение. Поэтому она и интересна. Тем более что в OJ 287 не одна, а две сверхмассивные чёрные дыры.

ОДНА ДЫРА ХОРОШО, А ДВЕ… ИНТЕРЕСНЕЕ

Двойственность объекта часто определяется по его спектру, точнее, по переменности формы его спектра (по переменности

Схематическое представление двойной системы из сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД), образующих орбитальную пару, расположенную в ядре галактики OJ 287. Более тяжёлая «первая» чёрная дыра массой около 10^{10} $M_\odot$ окружена аккреционным диском. Более лёгкая «вторая» чёрная дыра (массой около 10^8 $M_\odot$) вращается вокруг первой, дважды пронзая её аккреционный диск каждые 12 лет. В этот момент происходит вспышка в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах.

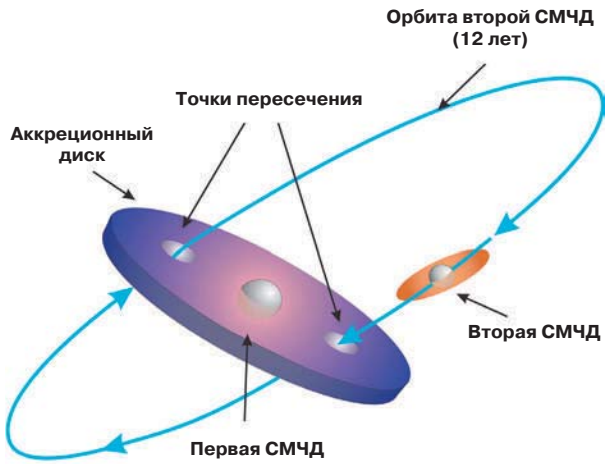


Рисунок из статьи: Titarchuk L., Seifina E., Shrader C. OJ 287: A new BH mass estimate of the secondary. Astronomy & Astrophysics, 2023, V. 671, A159/ CC BY 4.0.

количества квантов той или иной энергии, которую он излучает). Обычно такие объекты представляют собой двойные системы, состоящие, например, из двух звёзд, которые вращаются друг вокруг друга, точнее, вокруг общего центра масс. При вращении звёзд вокруг центра масс одна из них приближается к нам, а другая от нас удаляется. Если скорости вращения таких компонентов достаточно велики, то можно заметить две разные группы спектральных линий, которые смещаются по спектру из-за эффекта Доплера. Периодическое изменение лучевой скорости приводит к периодическому изменению сдвигов соответствующих линий.

Но так как изучаемая нами галактика расположена очень далеко, то с помощью только спектрального метода определить двойственность объекта никак не получилось бы. Кроме того, мы имеем дело не с парой звёзд, которые ярко светят, а с чёрными дырами, которые сами по себе не видны — из «лап гравитации» чёрных дыр не может вырваться даже свет.

Поэтому чёрные дыры мы «видим» только по их гравитационному воздействию на окружающее их вещество и пространство. Например, это может быть притяжение или поглощение близлежащих звёзд. В наиболее благоприятном для нас случае наблюдается свечение от падающего на дыру вещества за счёт развития им очень большой скорости. Поэтому мы искали любую зацепку в характере такого свечения, которая указывала бы на двойную чёрную дыру. Нам повезло, что OJ 287 наблюдается очень давно, аж с 1888 года. И её двойственность была установлена по переменности такого свечения. Причём «поярчание» объекта возникало со строгой периодичностью в 12 лет, что и подтолкнуло задуматься о непростой природе источника излучения в центре этой удивительной галактики. Почему нас так заинтересовала периодичность? Дело в том, что это редкое явление для обычных ядер галактик с одной сверхмассивной чёрной дырой в центре, в которых активность проявляется спорадически, то есть носит случайный характер. Кроме того, кривая яркости объекта OJ 287 имеет специфический двойной пик.

Мы сосредоточились на повторяемости таких вспышек и предположили, что рентгеновские вспышки связаны с орбитальным движением в двойной системе. А именно, вращением «второй», более лёгкой, чёрной дыры вокруг «первой», более тяжёлой. При этом «вторая» дыра дважды пронзает аккреционный диск «первой» чёрной дыры каждые 12 лет. Когда малая чёрная дыра проходит через диск, вокруг большой чёрной дыры происходит «прокалывание» близлежащей к траектории малой чёрной дыры части этого диска и, возможно, подпитка окружающим веществом небольшого аккреционного диска малой. →

Мы также предположили, что при прохождении малой чёрной дыры через диск тяжёлой происходит деформация и разрушение его окрестной части в сильном гравитационном поле малой чёрной дыры. При этом формируется мощный «временный» диск из вращающегося вещества вокруг малой чёрной дыры. Тогда и рождается яркая рентгеновская вспышка из-за разогрева при вязком трении неоднородных слоёв вращающегося вещества «временного» диска. Так малая чёрная дыра обнаруживает себя для земного наблюдателя в виде вспышки.

Всплески от пересечений орбит чёрных дыр были зафиксированы много раз. Именно по тому факту, что они происходят два раза за период и ассоциируются с двойным пиком на оптической кривой блеска, удалось определить то, что объект двойной. Но откуда берутся такие пары? Этот вопрос остаётся открытым до сих пор, и на этот счёт пока имеются лишь гипотезы. Существуют сценарии, в которых допускается столкновение целых галактик друг с другом. Например, при столкновении двух галактик чёрные дыры, находящиеся в их центрах, не сливаются воедино, а образуют пару. Пара из чёрных дыр в ядре OJ 287, возможно, появилась как результат подобного слияния галактик в прошлом.

СВЕРХМАССИВНОЕ ПРОШЛОЕ — КАКОЕ ОНО?

Происхождение сверхмассивных чёрных дыр — до сих пор горячо обсуждаемая тема. Согласно одной из гипотез, сверхмассивные чёрные дыры образуются из чёрных дыр звёздной массы путём наращивания массы при аккреции окружающего их вещества. Но эта гипотеза сталкивается с серьёзными проблемами. В частности, для «выращивания» сверхмассивной дыры таким путём потребовалось бы огромное количество времени, намного большее, чем существует Вселенная. Другая гипотеза гласит, что образование сверхмассивных чёрных дыр является результатом слияния нескольких чёрных дыр звёздных масс. Ещё одна гипотеза: рост сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик происходит путём накопления массы на чёрных дырах-затравках с бóльшей массой, чем звёздные чёрные дыры. Это было бы неплохое решение проблемы, но обще-

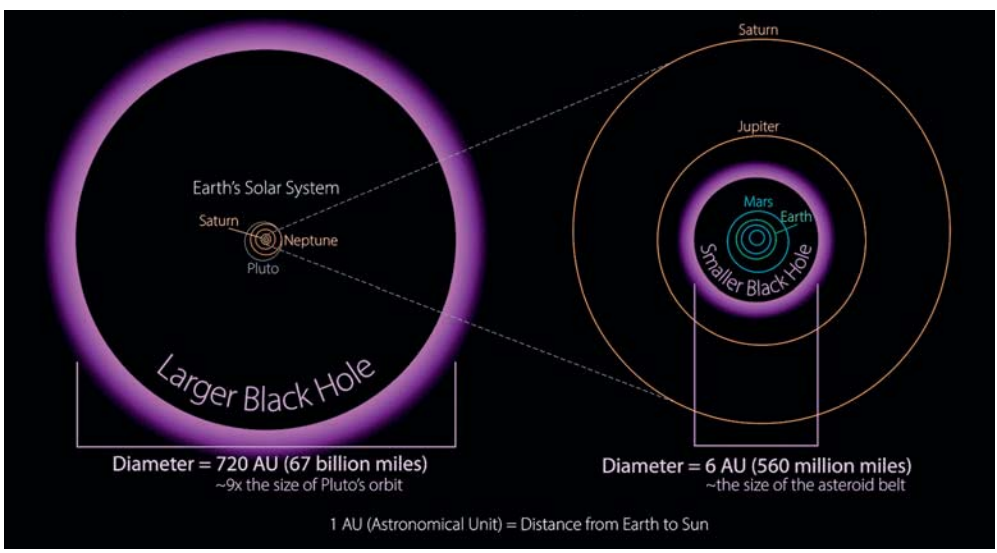


Рисунок: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC)

Размер двух сверхмассивных чёрных дыр в центре галактики OJ 287 в сравнении с размерами объектов Солнечной системы. Диаметр большей чёрной дыры оценивается в 720 а. е. (для сравнения — аппарат NASA «Вояджер-1» в 2023 году находится от Земли на расстоянии около 160 а. е., или 24 млрд км). Если меньшую чёрную дыру поместить в центр Солнечной системы, то она займёт пространство, включающее орбиты Земли и Марса, а её граница окажется около Пояса астероидов.

принятая теория звёздной эволюции пока не располагает сценариями естественного образования таких массивных дыр-затравок. И галактика OJ 287 может стать удобной лабораторией для тестирования жизнеспособности этих гипотез.

В последнем случае можно предположить, что наращивание массы в центре галактики способна выдержать только сверхмассивная чёрная дыра. Например, если в центр галактики OJ 287 поместить маленькую дыру, то она — галактика — просто разорвёт или вытолкнет маленькую чёрную дыру своими приливными силами. Поэтому в ней «имеет право» находиться именно сверхмассивная чёрная дыра. Неожиданно наблюдения последних двух лет поставили ещё более сложную задачу: объяснить ситуацию, когда в центре галактики находится не одна, а две дыры, как в галактике OJ 287. И тут же посыпался град вопросов. Как они две там уживаются? Обмениваются ли они веществом и энергией? Является ли это новым типом активности ядер галактик?

Сейчас известно, что ядро OJ 287 представляет собой двойную систему, состоящую из двух сверхмассивных чёрных дыр, находящихся на стадии эволюции, близкой к слиянию. Более того, эта система классифицирована как «тесная» двойная система, то есть между компонентами такой двойной системы происходит обмен массой. Это, в свою очередь, поставило перед теоретиками сложнейшую задачу: объяснить возможность обмена веществом между двумя чёрными дырами. Сложность задачи состоит в том, что, по определению, чёрная дыра не выпускает никакое вещество из своих цепких лап... Предположение обмена массой в тесных двойных системах из чёрных дыр ставит эту задачу в один ряд с испарением чёрных дыр, предложенным Стивеном Хокингом.

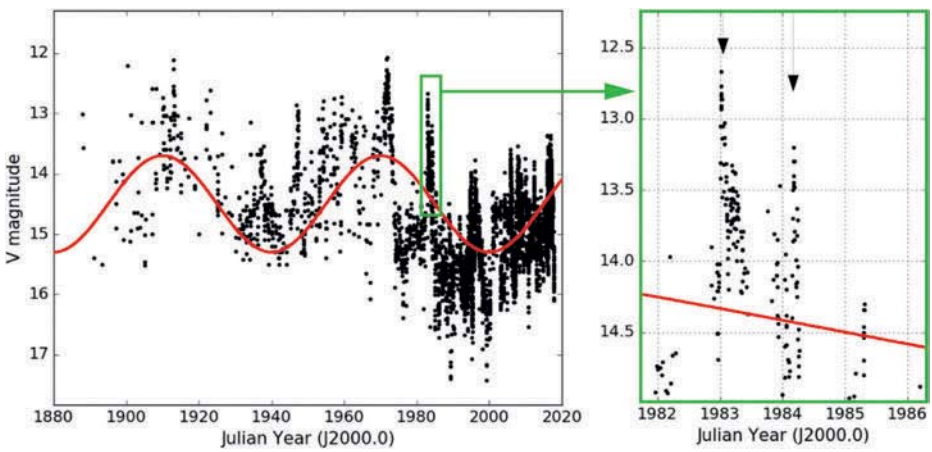
Бывают и пары чёрных дыр одинаковой массы, но это встречается реже. Обычно в паре одна чёрная дыра всегда больше своей «напарницы». Если бы они были одинаковыми, то их слияние происходило бы быстрее. Перед слиянием дырам очень важно сбросить угловой момент, то есть притормозить или остановить своё вращение. Но за счёт чего они могут сбросить этот угловой момент? Только за счёт трения или столкновения, например, со спорадическими звёздами. Но когда чёрные дыры достигают центра галактики, где звёзд уже практически нет или их значительно меньше, наступает фаза «мёртвой зоны», в которой такая пара может находиться бесконечно долго. Благодаря этому и можно успеть проследить за ними, пока не наступило быстрое слияние. На фазе слияния сброс углового момента происходит за счёт излучения гравитационных волн.

МАССА ВЫХОДИТ ИЗ ТЕНИ

Мы предположили, что все процессы в чёрных дырах протекают одинаково, а именно, что вспышка проходит по одному и тому же сценарию. Тогда различия в их свечении, видимом с Земли, связаны только с массами и расстояниями до них. Если учесть это расстояние и корректно всё посчитать, то мы получаем массу чёрной дыры так называемым методом скалирования. Проблема заключалась в нахождении опорного источника, с которым мы будем сравнивать интересующую нас чёрную дыру. Казалось бы, что здесь сложного? Но нужно подобрать такой источник, который был бы похож на нашу дыру. При этом у него должны быть известны масса и расстояние до него.

Сначала мы нашли такой источник среди чёрных дыр звёздной массы. Но сразу возникло естественное возражение: можно ли рассчитать массу сверхмассивной чёрной дыры при сравнении её с чёрной дырой звёздной массы в качестве опорной? Ведь нужно сравнивать подобное с подобным... Мы учли это справедливое замечание и нашли чёрную дыру в галактике M 101. Так благодаря этому методу мы и получили массу чёрной дыры, которая находится в OJ 287, равную $1{,}25 \times 10^8$ солнечных масс. Но, как выяснилось, это масса меньшей чёрной дыры в паре.

Почему мы уверены, что это именно масса меньшей чёрной дыры? А ответ такой: потому что большая чёрная дыра, находясь в центре, не активна и «не светит». При этом она окружена большим аккреционным диском, и когда маленькая



Оптическая кривая блеска OJ 287, по данным наблюдений с 1886 по 2017 год. Красной линией показано долгопериодное колебание яркости (слева). Структура двойного пика одного из 12-летних максимумов яркости, соответствующего моментам прохождения малой чёрной дыры сквозь аккреционный диск большой чёрной дыры, показана на увеличенном фрагменте графика (справа).

Рисунок из статьи: Dey L., Valtonen M. J., Gopakumar A. et al. The Astrophysical Journal, 2018, 866, 11.

чёрная дыра «бегает» по орбите вокруг неё и сталкивается с этим диском, мы видим, как происходит рентгеновская вспышка в момент столкновения. В результате «работает» только маленькая чёрная дыра, только она обеспечивает вспышку, и заметить можно только её.

А массу большой чёрной дыры оценить не удалось, потому что по нашему методу мы можем оценить только ту дыру, которая вспыхивает в рентгене. А вот вторую, которая спокойна, взвесить не удастся. Мы к ней подобраться не можем, поскольку она не активна. Для методов небесной механики это возможно, но для этого нужно, чтобы система находилась поближе к нам и вращалась постоянно без вспышек. То есть при возникновении вспышки небесно-механические методики сразу отбрасывают такие данные как непригодные. А для нас, рентгенщиков, наоборот хорошо, что объект активен. Только тогда возможно его «взвешивание». Когда происходит вспышка, объект проявляет свою «чернодырность» и сигнализирует о своей массе.

Выйдет ли однажды большая чёрная дыра из тени и проявит ли себя как-нибудь? Думаю, это может произойти, когда она приблизится к малой чёрной дыре за счёт торможения её орбитального вращения. При их сближении силы приливного тяготения возрастут и тогда они «почувствуют» гравитационное возмущение друг от друга. Это может породить гравитационные волны. При этом чёрные дыры движутся по спирали друг к другу и в определённый момент сольются друг с другом. Вот тогда может произойти вспышка. Но после их слияния периодически повторяющиеся вспышки, очевидно, прекратятся. Образуется новая чёрная дыра, масса которой будет состоять из масс двух чёрных дыр предшественников. Но это будет не очень скоро. Теоретики подсчитали, что нужно ждать порядка 100 лет и более.

Впрочем, процесс поглощения большой дырой более мелких может продолжиться — это называется иерархическим слиянием. Вероятность того, что «голодная» дыра может найти себе ещё одну чёрную дыру в качестве пары, чтобы с ней слиться, повышается, если она находится в каком-нибудь скоплении галактик. Там и в местах ячеистой структуры, где галактики стыкуются как соты, больше шансов чёрным дырам «познакомиться».

ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ — ГРОЗА ДЛЯ ГАЛАКТИКИ?

Скорее всего, нет. Если подсчитать приливный радиус, который составляет опасность в плане разрушения своей галактики, то в его пределах окажется только небольшая внутренняя часть диска галактики. Все звёзды, которые находились близко к чёрной дыре, уже были когда-то ей «съедены». Остальные же находятся вне пределов досягаемости её гравитации. В них может попасться разве что спорадическая звезда. Но это явление происходит редко.

Есть ещё один интересный момент. Учёные обнаружили достаточно много чёрных дыр, которые движутся с огромной скоростью по Вселенной. Как они возникли, как получили такую высокую скорость — это до сих пор отрытый вопрос. Но факт их обнаружения составляет серьёзный повод задуматься об их происхождении и о том, что происходит в космосе вокруг нас. Я думаю, что в результате некоего катаклизма, например столкновения, таким чёрным дырам предалась скорость, с которой они и летят в пространстве. Если чёрная дыра будет лететь в вакууме, то она ничего не образует вокруг себя. А если по курсу располагается звезда, то она может её поглотить или немного притормозится. Если она встретится по пути с другой чёрной дырой, то может образовать пару.

Ближайшая к нам сверхмассивная чёрная дыра располагается в центре нашего Млечного Пути. И по прогнозам, она не проявляет никаких движений в сторону Солнечной системы. Мы вместе с Землёй и Солнечной системой находимся на периферии Галактики, довольно далеко от центра. Вообще в нашей Галактике очень много двойных систем, в том числе систем с чёрными дырами звёздной массы. Самая близкая к Земле среди таких обнаруженных чёрных дыр, Gaia BH1, находится на расстоянии 1600 световых лет в направлении созвездия Змееносца.

МАССА ОТКРЫТИЙ

По сути, OJ 287 — это первая двойная сверхмассивная чёрная дыра, которую мы исследовали. Есть подозрение, что хорошо известная галактика M 87 тоже содержит двойную чёрную дыру. Мы с моим коллегой недавно ею заинтересовались, решили посчитать её массу. 10 апреля 2017 года были наблюдения M 87 в радиодиапазоне, а спустя всего 4 дня проводились наблюдения в рентгеновском диапазоне на орбитальной обсерватории Chandra. Интересно, что при «взвешивании» этой чёрной дыры на основе рентгеновских данных мы получили значение в 10^7 масс Солнца, что в 100 раз меньше оценок этой чёрной дыры по оптическим данным (10^9 масс Солнца). Возник вопрос, почему у нас получилась масса на два порядка меньше? Нам говорили, что у нас ошибка. Конечно, мы всё проверили, и ошибки не было. Тут пришла идея, что подобная разница могла возникнуть в том случае, если мы «взвесили» маленькую чёрную дыру в паре из двух чёрных дыр. То есть центральную чёрную дыру в M 87 мы не увидели, потому что она не проявляет себя в рентгене, а маленькая чёрная дыра, которая вспыхивает, заметна для нас, и поэтому удалось определить её массу по рентгеновским данным. Тем самым различие «оптической» и «рентгеновской» массы чёрной дыры может указывать на её двойственность.

Также есть подозрение, что сверхмассивная чёрная дыра в центре нашей Галактики тоже двойная или была двойной в недалёком прошлом, а сейчас уже находится на стадии после слияния. На это указывает нетипичный звёздный состав в одном из её рукавов, который, возможно, является оставшимся уцелевшим «островком» той галактики, которую поглотил Млечный Путь.

Для меня остаётся всё-таки открытым вопрос, как можно взвесить ту большую чёрную дыру в OJ 287. Я понимаю своё бессилие, потому что никакой рентгеновский сигнал не даёт таких подсказок. В принципе, сейчас мы находимся на пике массового открытия двойных сверхмассивных чёрных дыр. Двойственность установлена уже у более ста чёрных дыр в центрах разных галактик. Оказывается таких пар так много! Хочется изучить их все, посчитать массу этих чёрных дыр. И побольше узнать о том, как устроен мир вокруг нас.

ПРОТОН И БОР – СУПЕРСИНТЕЗ

При бомбардировке изотопа бора ^{11}B протонами может идти реакция ядерного синтеза $p^{11}B \rightarrow 3\alpha + 8{,}7$ МэВ. В качестве источника энергии эта реакция хороша тем, что бор не слишком редкий элемент, он широко применяется в промышленности, добыча налажена. Правда, придётся разделять изотопы (в природном боре нужного изотопа 80%, остальное ^{10}B), но этот процесс освоен, есть даже несколько вариантов. И ещё хорошо то, что на выходе нет нейтронов, от которых трудно защититься, а есть существенно более безобидные α-частицы, то есть ядра гелия-4 (они заряжены, а заряженные частицы тормозятся лучше). Однако для начала реакции требуется в 30 раз более высокая температура, чем в дейтерий-тритиевой схеме. Это само по себе — проблема, кроме того, из-за электромагнитного излучения плазмы уменьшается выход полезной энергии. Теоретические расчёты тем не менее показали, что если удастся нарушить тепловое равновесие электронов и положительных ионов, причём уменьшив электронную температуру (энергию электронов), то радиационные потери можно понизить. До сих пор реакция $p^{11}B$ наблюдалась только в плазме, которая создаётся мощными лазерными импульсами, и на ускорителях.

Сотрудники Национального института термоядерных исследований (Япония) и Tri Alpha Energy Technologies (США) впервые продемонстрировали реакцию $p^{11}B$ в плазме с магнитным удержанием. Они использовали сверхпроводящий стелларатор LHD (Large Helical Device), в котором магнитное поле полностью создаётся внешними катушками, а не катушками и током, текущем в плазме, как в токамаке. Бор поступал в камеру в виде порошка, туда же инжектировались протоны. Протекание ядерной реакции обнаруживалось по появлению α-частиц. Для практического применения реакции $p^{11}B$ в реакторе потребуется найти решение сложных технических проблем, на фоне которых проблемы токамака могут показаться шуточками.

Magee R. M. et al. First measurements of $p^{11}B$ fusion in a magnetically confined plasma. Nat. Commun. 14, 955 (2023). При подготовке реферата использована публикация «Реакция синтеза $p^{11}B$ в стеллараторе» в рубрике «Новости физики в сети Internet (по материалам электронных препринтов)» УФН, 2023, вып. 4, с. 462, ведущий рубрики Ерошенко Ю. Н. (с разрешения редакции УФН).

ЗВЁЗДНАЯ МЕТЛА ДЛЯ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

В галактиках, кроме звёзд, планет, межзвёздного газа и элементарных частиц, есть ещё пыль. Часть её концентрируется в самом диске галактики, а часть располагается над диском (у галактики невозможно сказать, где низ и где верх, поэтому будем считать, что вся она «над») и даже за его пределами в радиальном направлении. Пыль возникает в самой галактике, главные её источники — звёзды на поздних стадиях эволюции и оболочки сверхновых звёзд. А вот по каким причинам она покидает галактику, преодолевая гравитацию и сопротивление межзвёздного газа? Астрофизики полагают, что из спокойных галактик без активного звездообразования пыль выметается давлением, создаваемым излучением звёзд.

Сотрудники Института астрономии РАН исследовали этот процесс, построив модель движения трёх типов пылевых частиц — силикатных, графитовых и состоящих из полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Во всех случаях учитывались их плотность, оптические свойства и пористость. Варьировались размеры частиц (от 1 до 100 нм) и места их старта (в плоскости галактики и над нею). Принималось во внимание даже вращение галактики. Выяснилось, что на движение одних пылинок оно влияет, а на движении других не сказывается. Далее оказалось, что разные частицы ведут себя совершенно по-разному: некоторые выметаются из плоскости галактики и образуют «гало» — окружение галактики, а какие-то остаются в её плос-

кости. Например, силикатные частицы выметаются менее эффективно, а частицы ПАУ — наиболее эффективно. Считалось, что пылинки не заряжены и поэтому магнитное поле галактики на них не влияет.

Важный вывод исследования заключается в том, что подобное движение пыли способствует дифференциации (разделению) частиц разных типов и влияет на состав вещества галактики, а значит, и на другие идущие в ней процессы, в том числе на химическую эволюцию галактических дисков. Полная потеря массы галактики за счёт такого выметания пыли составляет величину порядка 0,03 массы Солнца в год.

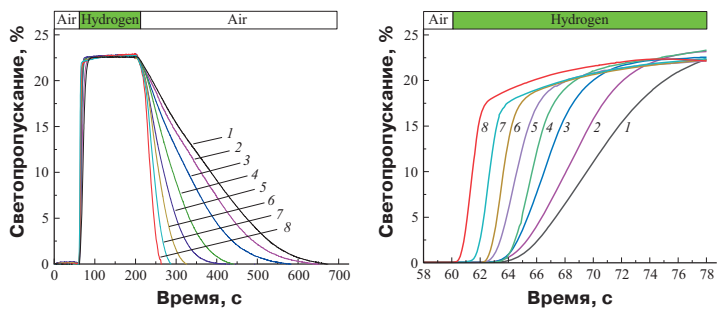
Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Шустов Б. М. Выметание пыли давлением излучения звёзд и особенности химического состава дисковых галактик. Астрономический журнал, 2021, № 5, с. 363.

ПРОЗРАЧНЫЙ ПАЛЛАДИЙ

Во многих учебниках упоминается, что тонкие плёнки золота пропускают свет. На самом деле по мере уменьшения количества вещества на единице площади пропускание света всегда обязано стремиться к 100%. Но есть, кроме толщины, и другие способы влиять на светопропускание.

Сотрудники ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН и Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова изучали прозрачность плёнок палладия, взаимодействующего с водородом. Выбор веществ для исследования был не случаен — палладий способен поглощать значительное количество водорода, и водород в нём имеет высокий коэффициент диффузии. Эти свойства используются в технике, например для очистки водорода диффузией через мембраны из палладия. А изменение оптических свойств палладия может служить сенсором водорода.

Авторы статьи изготовили плёнки палладия толщиной 11 нм на стеклянных подложках и при температурах от 300 до 355 К помещали их в среду водорода при давлении 1 атм, при этом плёнки через некоторое время становились полупрозрачными — пропускали 23% света. Потом их возвращали на воздух, и они становились, как им и полагалось, непрозрачными. Пример полученных зависимостей прозрачности от времени и температуры показан на рисунке. Сложный ход кривых указывает на то, что по мере поглощения водорода кристаллическая структура плёнок изменяется: при концентрации водорода до 3% — это α-фаза, при большей концентрации — смесь с β-фазой, а при концентрации более 60% весь образец состоит из β-фазы, которая оказалась при этой толщине полупрозрачной.



Светопропускание плёнки палладия толщиной 11 нм при помещении её в водород (в момент времени 60 с) и обратно на воздух (в момент времени 200 с). Кривые 1—8 соответствуют температурам от 300 до 335 К с шагом 5 К.

Рисунки (с изменениями) из реферируемой статьи.

Шутаев В. А. и др. Кинетика изменения оптической прозрачности наноплёнок палладия при взаимодействии с водородом. Оптика и спектроскопия, 2023, том 131, вып. 3, с. 419.

Подготовил Леонид АШКИНАЗИ.



● ЛИЦОМ К ЛИЦУ С ПРИРОДОЙ

Фото Натальи Домриной (2)

СЮРПРИЗЫ «ОГНЕННОЙ» ЛЬНЯНКИ

Кандидат биологических наук Дмитрий ДОНСКОВ.

Взор без огня — без запаха цветок!
Михаил Лермонтов

Без цветков льнянка маловыразительное растение, едва приметное среди зелёных собратьев. Но когда зацветёт — не заметить её невозможно! На конце высоких стеблей вдруг словно вспыхивает яркое солнечное пламя. От ветерка побеги колышутся, и создаётся ощущение, что «огонь» трепещет, приплясывает, перекатывается волнами!

Льнянка растение неприхотливое и встречается повсеместно. Её одной из первых видишь, сойдя с загородной платформы. Она поджидает путника на обочинах просёлочных дорог. Соседствует с дачником, притулившись у забора. Не прочь освоить заброшенный пустырь и склоны вырытой канавы. С удовольствием займёт участок луга, где много солнца и свободного пространства, чтобы сформировать довольно плотные заросли.

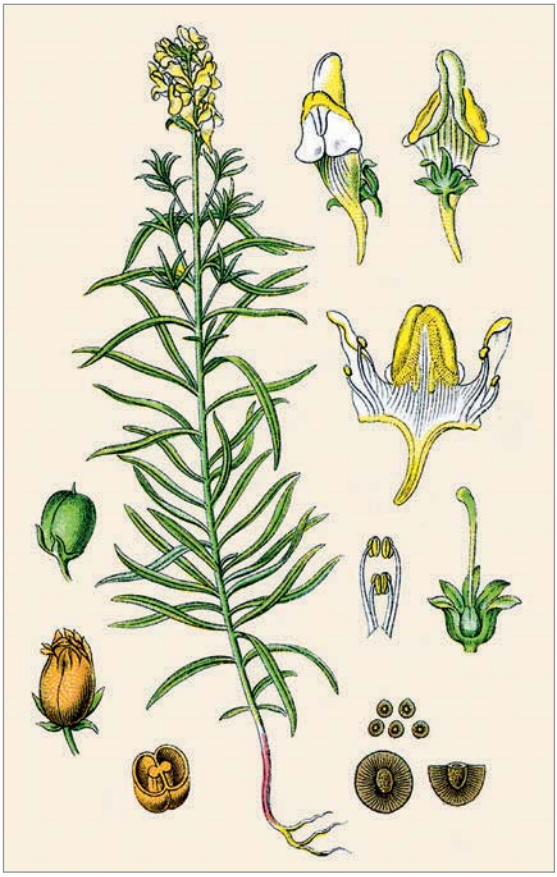
Род льнянка (*Linaria*) довольно многочисленный, по оценкам, включающий около 100 видов однолетних и многолетних растений. Ранее он помещался в семейство Норичниковые (Scrophulariaceae), но в результате новейших генетических исследований последних двух десятилетий теперь относится к значительно расширенному семейству Подорожниковые (Plantaginaceae). Латинское название рода означает «подобный льну» и происходит от слова linum — «лён». Это название очень точно отражает сходство листьев льнянки и льна.

Наиболее известна льнянка обыкновенная *(Linaria vulgaris)*, за которой в народе закрепилось множество имён: дикий лён, жабрей, собачки, серпорез, чистик, головная трава, леновник, башмачок и другие. Однако её самое знаменитое прозвище — дикий львиный зев. И это неспроста, льнянка действительно похожа на своего дальнего родственника. Настоящий львиный зев относится к роду антирринум (*Antirrhinum*) того же семейства Подорожниковые, он знаком многим цветоводам главным образом в лице антирринума большого (*Antirrhinum majus*), завезённого из Северной Америки.

Своей живучестью льнянка во многом обязана корневой системе. Корень стержневой, на плодородных землях довольно глубокий, а на песках скорее горизонтальный — это и понятно, пита-



Соцветие льнянки яркое и узнаётся издалека. Цветки будто напитаны солнечным светом.



Источник: www.BioLib.de

Льнянка обыкновенная (Linaria vulgaris).
Рисунок из книги: Sturm, Jacob; Sturm, Johann Georg. Deutschlands Flora in Abbildungen. 1796 год.

тельная среда тут ближе к поверхности. Имеются и корневища — длинные, ползучие, быстро растущие. Поэтому в садах и огородах льнянка может превратиться в надоедливый сорняк. Сколько ни дёргай побеги, сколько ни выкапывай, а всё равно что-то остаётся, и даже маленький кусочек корневища может заново разрастись в приличную куртину.

Стебель льнянки невысокий, от 30 до 90 см, прямостоячий, простой или ветвистый, густо облиственный. Листья узкие, линейные, относительно твёрдые, покрытые тонким налётом воска. Такое строение помогает противостоять неожиданным засухам. Соцветия густые, верхушечные, кистевидные.

Венчик резко двугубый, его основной цвет бледно-жёлтый. Верхняя губа по длине несколько превышает нижнюю, имеет две доли, концы которых изящно вздёрнуты вверх. Нижняя губа широкая, из трёх долей, сложного строения. В её основании расположен длинный шпорец, содержащий нектар. Ближе к краю —выпуклость, покрытая волосками, по цвету ярко-оранжевая, отчётливо контрастирующая с общим тоном цветка. Если рассматривать отдельный цветок, то можно представить, как из его глубины вырывается раскалённый язык пламени. В массе соцветий именно эти пятна усиливают ощущение всполохов огня. Цвет выпуклости привлекает насекомых, а сама она обеспечивает удобную посадочную площадку. Волоски служат направляющими, указывая путь к сладкому угощению. Но достать последнее



Фото: Fritz Geller-Grimm/Wikimedia Commons/ CC BY-SA 2.5

Отдельный цветок крупным планом. Видны шпорец и мохнатая губа.



Фото: Frank Vincentz/Wikimedia Commons/ CC BY-SA 3.0

Внутри цветка можно увидеть тычинки, похожие на глазки улитки, выглядывающие из раковины.