*1976 г. Март* *Том 118, вып. 3*

*УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.84

# ПОИСКИ ЧЕРНЫХ ДЫР *)

*К. Торн*

*Наблюдения в диапазонах видимого света, радио- и рентгеновского излучения указывают на возможность того, что рентгеновский источник Лебедь X-1 является черной дырой, обращающейся вокруг массивной звезды.*

Из всех измышлений человеческого ума, от единорогов и химер до водородной бомбы, наверное, самое фантастическое — это образ черной дыры — отделенной от остального пространства определенной границей, которую ничто не может пересечь; дыры с настолько сильным гравитационным полем, что даже свет задерживается его мертвой хваткой; дыры, которая искривляет пространство и тормозит время. Подобно единорогам и химерам, черная дыра кажется более уместной в фантастических романах или в мифах древности, чем в реальной Вселенной. И тем не менее законы современной физики фактически требуют, чтобы черные дыры существовали. Возможно, только наша Галактика содержит миллионы их.

Поиски черных дыр стали главным делом астрономии последнего десятилетия. Их результатом стало появление десятков «кандидатов», рассеянных по всему небосводу. На первых порах казалось просто невозможным представить убедительные доказательства того, что какой-либо из этих кандидатов действительно является черной дырой. Однако за последние два года об одном из кандидатов было накоплено впечатляющее количество косвенных доказательств; это — сильный источник рентгеновского излучения в созвездии Лебедя, обозначаемый как Лебедь X-1. Эти доказательства на девяносто процентов убедили меня и многих других астрономов в том, что в центре Лебедя X-1 действительно находится черная дыра.

Прежде чем приступить к изложению доказательств, приводящих к этому заключению, позвольте мне заложить для этого некий фундамент и одновременно удовлетворить свои теоретические потребности, описав некоторые из предсказываемых свойств черных дыр. Физики часто обучают себя и своих студентов на «мысленных экспериментах», результаты которых предсказываются теорией. Вот и я хочу прибегнуть к такому мысленному эксперименту, чтобы изложить основные положения, заложенные в концепции черной дыры.

---

*) Kip S. Thorne, The Search for Black Holes, Scientific American 231(6), 32 (December 1974). Перевод Ю. А. Гурьяна.

Кип С. Торн — профессор теоретической физики Калифорнийского технологического института и нештатный профессор физики Университета штата Юта, США.

© Scientific American, Inc., 1974.
© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1976 г.

Вообразим себе, что в более или менее отдаленном будущем род людской распространился по Галактике и заселил миллионы планет. Не имея более нужды в нашей Земле, люди решили превратить ее в памятник; для этого они хотят сжимать ее до тех пор, пока она не превратится в черную дыру. Чтобы произвести это сжатие, они строят множество прессов, а чтобы накопить необходимую энергию, изготовляют гигантский аккумулятор. Затем они отрезают некоторую часть земного шара и освобождают энергию, соответствующую ее массе; количество полученной энергии дается уравнением Эйнштейна $E = mc^2$, где $E$ — энергия, $m$ — масса и $c$ — скорость света. Этой энергией заряжается аккумулятор. Прессы окружают Землю со всех сторон и, получая энергию от аккумулятора, сжимают Землю до четверти ее первоначальной величины.

Чтобы проконтролировать ход событий на этом этапе, авторы проекта изготовляют из кусочка земного шара плотный сферический кожух, достаточно прочный, чтобы удерживать планету в сжатом состоянии. Они натягивают кожух на Землю и отодвигают прессы. Затем они измеряют скорость убегания ракеты, стартующей с Земли, т. е. ту скорость, которую ракета должна развить, чтобы покинуть поле земного тяготения. До сжатия Земли скорость убегания будет той же, что и сегодня, — 11 *км/сек*. Однако сжатие Земли вчетверо приближает ее поверхность к центру; при этом учетверяется кинетическая энергия убегания ракеты. Энергия убегания пропорциональна квадрату скорости убегания; следовательно, последняя после этого первого сжатия удвоится и станет равной 22 *км/сек*.

Удовлетворенные тем, что некоторый прогресс достигнут, инженеры повторяют процедуру, еще более сжимая Землю до тех пор, пока ее окружность вместо первоначальных 40 000 *км* не сделается равной всего 10 *км*. (Я говорю об окружности, а не о диаметре потому, что в сильном гравитационном поле пространство искривляется столь сильно, что нарушается евклидова формула $C = \pi d$, связывающая диаметр объекта $d$ с длиной его окружности $C$; более того, в случае черной дыры ее диаметр вообще не может быть ни измерен, ни рассчитан.) На этой стадии ракете, чтобы покинуть Землю, необходима скорость убегания в 708 *км/сек*.

После еще нескольких ступеней сжатия Земля уменьшается до окружности в 5,58 *см*. Теперь скорость убегания становится равной скорости света — 300 000 *км/сек*. Еще последний, небольшой нажим — и скорость убегания превосходит скорость света. Теперь ни сам свет, ни что-либо другое не может покинуть земную поверхность. Связь между Землей и остальной Вселенной полностью прерывается. В этом смысле Земля не является более частью Вселенной. Она исчезла, оставив вместо себя дыру в пространстве с окружностью в 5,58 *см*. За горизонтом, или границей черной дыры скорость убегания меньше скорости света, и чрезвычайно мощная ракета могла бы еще покинуть эту зону. Внутри же горизонта скорость убегания выше скорости света; отсюда не может вырваться ничто. Вся внутренняя область дыры, как и Земля, которая ее породила, отрезана от остальной Вселенной.

Вернемся теперь из будущего в настоящее и используем мысленный эксперимент для того, чтобы разобраться, что за процессы происходят в звездах.

Между Землей и массивной звездой есть принципиальная разница: для того чтобы Земля стала черной дырой, нужно приложить внешние силы; у звезды же необходимые для этого силы обеспечиваются ее собственным тяготением. Если звезда с массой, скажем, в 10 раз большей массы Солнца, расходует ядерное горючее на проходящие в ней термоядерные процессы в течение времени в несколько десятков миллионов лет,

запасы этого горючего иссякают. Такая погасшая звезда не может более развивать то огромное тепловое давление, которое ранее компенсировало направленную внутрь силу тяжести. Тяготение выигрывает битву, и звезда коллапсирует.

Если только звезда во время коллапса не выбрасывает большую часть своей массы, тяготение сдавливает ее до состояния черной дыры. Однако если звезда сможет выбросить такое количество вещества, чтобы масса ее уменьшилась примерно до удвоенной массы Солнца или менее, то она спасена: возникающие нетепловые силы, такие, как давление электронов

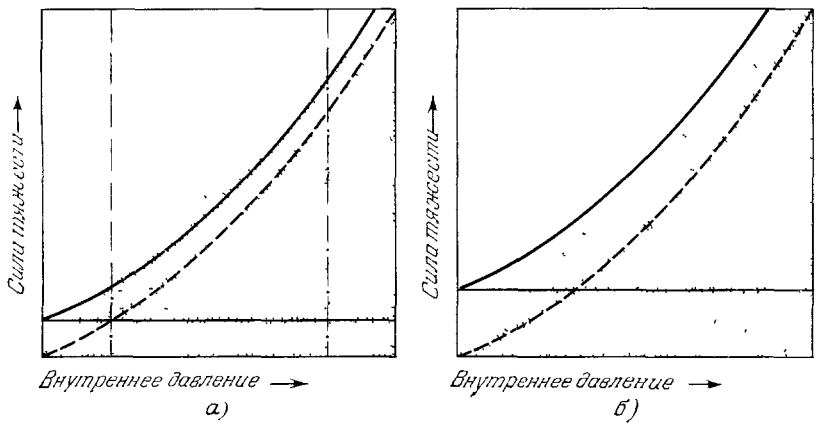


Рис. 1. Как видно из диаграмм для звезд с массой, равной двум массам Солнца (*а*) и четырем массам Солнца (*б*), только массивные звезды могут стать черными дырами. Чтобы звезда была стабильной, сжимающая ее сила тяжести (сплошные линии) должна быть уравновешена внутренним давлением звезды, расширяющим ее (области, покрытые точками). Если тяготение сильнее, звезда коллапсирует, если сильнее внутреннее давление, звезда взрывается. В компактной звезде (размерами меньше, чем Земля) внутреннее давление достаточно велико, чтобы скомпенсировать тяготение, в том случае, если масса звезды меньше трех масс Солнца. В результате образуется белый карлик или нейтронная звезда (звезда, в которой вещество настолько уплотнено, что его электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны). Если же масса звезды превосходит три солнечные массы, а плотность ее выше плотности атомного ядра, внутреннее давление в сущности работает против нее. В соответствии с общей теорией относительности, тяготение рождается не только массой (горизонтальные линии), но также и давлением (штриховые линии). При высоких давлениях сила тяжести, порождаемая давлением, пропорциональна квадрату давления. *Поэтому если внутреннее давление в звезде очень велико, оно вызывает силы тяжести, которые* преодолевают внутреннее давление, и звезда коллапсирует. Для компактной звезды с массой меньше трех масс Солнца (*а*) существует область внутренних давлений, которые могут скомпенсировать тяготение (вертикальные штрих-пунктирные линии). В более массивных же звездах (*б*) сила тяжести всегда побеждает и менее чем за секунду превращает звезду в черную дыру.

(которое делает камень трудно сжимаемым), останавливают коллапс. Звезда становится либо белым карликом размером примерно с Землю, либо нейтронной звездой с окружностью около 60 *км*. (Нейтронная звезда — это звезда, в которой вещество уплотнено настолько, что его электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны.) В любом случае, как и в случае с Землей, для превращения такого объекта в черную дыру нужно приложить внешние силы — силы, которые в природе не существуют.

Эти предсказания, которые основываются на обычных законах физики, говорят нам, что для существования компактной звезды (звезды с окружностью меньше земной) существует критическая масса, примерно равная двум массам Солнца. Звезда с массой ниже критической может быть белым карликом либо нейтронной звездой. При массе выше критической она может быть только черной дырой (рис. 1). Величина критической массы — ключевое звено в цепи аргументов за то, что Лебедь X-1 является черной дырой. Желательно было бы поэтому поточнее знать величину критической

массы. Однако точность тут недостижима из-за того, что нам неизвестны достаточно хорошо свойства вещества при «сверхъядерных» плотностях белого карлика или нейтронной звезды, т. е. при плотностях больше плотности атомного ядра, $2 \cdot 10^{14}$ *г/см*$^3$. Тем не менее верхний предел для критической массы известен: Р. Руффини из Принстонского университета и другие показали, что она не может превосходить три солнечные массы. Другими словами, никакая звезда — белый карлик или нейтронная — не может иметь массу, более чем в три раза превосходящую массу Солнца.

С физической и математической точки зрения черная дыра — поразительно простой объект, неизмеримо более простой, чем Земля или человек. Когда физик анализирует свойства черной дыры, ему нет никакой необходимости иметь дело со сложностями строения вещества с его молекулярной, атомной и ядерной структурой. Вещество, которое, коллапсируя, создает черную дыру, просто-напросто исчезает. Оно не оказывает никакого влияния ни на поверхность черной дыры, ни на то, что расположено над ней. Нет никакой разницы, было ли коллапсировавшее вещество водородом, ураном или антивещественными эквивалентами этих элементов. Все свойства черной дыры полностью определяются эйнштейновскими законами для структуры пространства.

Какой именно должна быть черная дыра, показали три физика: В. Израэль из университета Альберты и Б. Картер и С. Хоукинс из Кембриджа *). Они указали, что, когда черная дыра только формируется, ее горизонт может иметь причудливую форму и сильно вибрировать. Однако в течение долей секунды горизонт «успокаивается», приобретая чрезвычайно гладкую форму. Если дыра не вращается, ее форма будет строго сферической. Вращение же сплющивает ее с полюсов так же, как оно слегка сплющивает Землю. Величина уплощения и точная форма сплющенной дыры полностью определяется ее массой и моментом импульса (скоростью вращения). Масса и момент импульса определяют не только форму дыры, но и все ее остальные свойства. Представьте себе, что мы могли бы судить обо всех свойствах характера женщины по ее весу и цвету волос!

Момент импульса обычно заменяют при расчетах более удобной величиной — параметром вращения. Параметр вращения $a$ равен скорости света $c$, умноженной на момент импульса $J$ и деленной на ньютоновскую постоянную тяготения $G$ и на квадрат массы дыры $m^2$:

$$a = \frac{cJ}{Gm^2}.$$

Величина параметра вращения всегда заключена между нулем и единицей. При нулевом параметре вращения ($a = 0$) дыра имеет сферическую форму и не вращается; при единичном параметре вращения ($a = 1$) дыра сильно сплющена и вращается предельно быстро. Заставить дыру вращаться быстрее невозможно; в реальном случае дыра с параметром вращения, близким к 1, из-за сил трения между веществом и падающим на него излучением должна замедлять вращение до значения параметра вращения около 0,998.

Какие наиболее важные свойства черной дыры могут быть выведены из величин ее массы и параметра вращения? Во-первых, поле тяготения дыры подчиняется обычным законам Ньютона и Эйнштейна: сила притяжения объекта дырой пропорциональна его массе и обратно пропорцио-

*) Впервые этот вопрос был решен в работе А. Г. Дорошевича, Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова — ЖЭТФ 49, 170 (1965); см. также статью В. П. Фролова в этом номере УФН. (*Прим. ред.*)

нальна квадрату расстояния между ней и объектом, если это расстояние сколько-нибудь превосходит размеры дыры. Во-вторых, вращающаяся дыра образует в окружающем ее пространстве вихрь, тем самым засасывая в себя по воронкообразным орбитам частицы и газ. Чем больше параметр вращения дыры, тем сильнее вихрь. В-третьих, черная дыра в своей окрестности искривляет пространство и искажает ход времени. В-четвертых, черная дыра имеет четко очерченный горизонт, внутрь которого можно проникнуть, но через который ничто не может выйти. В-пятых, окружность экватора черной дыры равна 19 *км*, помноженным на отношение масс дыры и Солнца. Типичные черные дыры должны иметь массу от 3 до 50 масс Солнца и окружность примерно от 60 до 1000 *км*.

Таковы предсказываемые теорией свойства черных дыр. Эти свойства являются волнующим вызовом астроному-наблюдателю — обнаружить черную дыру и подтвердить предсказания! Однако вплоть до середины 60-х годов никто не принимал этого вызова всерьез. Черные дыры рассматривались как чисто теоретические объекты, которые в принципе могут образовываться после смерти звезды, но в действительности, вероятно, никогда не рождаются, а если и рождаются, то, по-видимому, никогда не смогут быть обнаружены наблюдателями. Такие объекты, как черные дыры или нейтронные звезды, казались слишком эксцентричными, чтобы вписаться в картину нашей спокойной Вселенной. Считалось, что, по-видимому, всем массивным звездам удается каким-то образом выбросить большую часть своей массы до своей смерти, спасая тем самым себя от участи превратиться в нейтронную звезду или черную дыру. Эти взгляды редко формулировались столь четко, но дух времени они определяли. Мне неизвестно вплоть до 1963 г. ни одного предложения по поискам черных дыр.

Однако в 60-е годы наши взгляды на Вселенную начали радикально меняться. Расширяющиеся галактики, быстропеременные радиогалактики, квазары, космическое микроволновое излучение — остаток «большого взрыва», сформировавшего Вселенную, вспыхивающие рентгеновские звезды — все эти и многие другие открытия показали нам, насколько бурной и странной может быть наша Вселенная. Постепенно и существование нейтронных звезд и черных дыр стало казаться более вероятным. Затем в 1967 г. были открыты пульсары, а в конце 1968 г. было показано, что они являются вращающимися нейтронными звездами, лучеобразно испускающими в пространство радиацию. А поскольку нейтронные звезды реально существуют, можно быть уверенным, что должны существовать и черные дыры.

Какой подход можно найти к поискам черных дыр? Если черные дыры образуются умирающими массивными звездами, то ближайшая черная дыра вряд ли будет находиться ближе к Солнечной системе, чем ближайшая массивная звезда, — примерно на расстоянии 10 световых лет. Так как большинство черных дыр должно иметь окружность менее 1000 *км*, их видимые размеры на небе должны составлять миллионные доли дуговой секунды. Поэтому наверняка нечего надеяться обнаружить черную дыру в виде черного пятна на небесной сфере.

Не удастся ли воспользоваться тем, что поле тяготения черной дыры может действовать как линза, отклоняя и фокусируя свет более отдаленной звезды, так что она временно будет выглядеть больше и ярче? Это тоже не помогает в поисках черных дыр. Если дыра располагается близко к звезде, эффект фокусировки будет слишком мал, чтобы его заметить. Если же звезда и черная дыра разнесены на большое расстояние, эффект фокусировки велик, но межзвездные расстояния настолько огромны, что необходимое выстраивание в одну линию звезды, дыры и Земли

будет чрезвычайно редким событием — настолько редким, что поиск такого случая будет напрасной тратой времени. Более того, если даже удастся наблюдать такое событие, невозможно будет сказать, является ли гравитационная линза черной дырой или просто обычной, но слабосветящей звездой.

Предположим, что черная дыра имеет звезду-спутника, которую можно видеть и изучать. Возможно, присутствие черной дыры удастся обнаружить по ее влиянию на спутника? Вооруженные этой мыслью, два советских астрофизика Я. Б. Зельдович и О. Х. Гусейнов, предприняли в 1964 г. первые поиски черных дыр. Они изучили каталоги спектрально двойных звезд в поисках систем, которые могут оказаться черной дырой и нормальной звездой, обращающимися вокруг общего центра тяжести.

Спектрально двойная система даже в самые мощные телескопы видна как одиночная звезда. Однако линии ее спектра периодически сдвигаются от голубого края к красному и обратно по мере обращения наблюдаемой звезды вокруг более темного спутника. Периодический сдвиг вызывается эффектом Допплера: когда звезда движется по орбите в направлении на нас, линии сдвигаются к голубому краю, а когда от нас — к красному. Могут регистрироваться и спектральные линии спутника, причем они имеют красное смещение, когда линии более яркой, или первичной, звезды смещены в голубую сторону, и наоборот. В этом случае спутник заведомо не является черной дырой. Если же звезда-спутник не наблюдается, она может быть и черной дырой.

Звездные каталоги полны двойных систем, в которых наблюдаются спектральные линии только одной звезды. Таких систем известно несколько сотен, и, если бы были серьезные стимулы для поисков, наверное, можно бы было открыть еще тысячи. Для сокращения круга поисков Зельдович и Гусейнов исследовали массу каждого темного компаньона. Эту массу можно грубо оценить по величине допплеровского сдвига спектральных линий. Чем более массивен компаньон, тем сильнее он притягивает первичную звезду и, следовательно, тем больше допплеровский сдвиг спектральных линий. Беря лишь системы со спектральным сдвигом, твердо доказывающим, что масса темного компаньона не менее чем втрое превосходит массу Солнца (т. е. он не является белым карликом или нейтронной звездой), Зельдович и Гусейнов сильно сократили первичный список спектрально двойных систем. В некоторых из этих систем первичная звезда была настолько яркой, что ее темный компаньон вполне мог быть обычной звездой, чей свет тонет в сиянии первичной. После исключения и этих случаев у Зельдовича и Гусейнова осталось пять кандидатов в системы, которые могут заключать черную дыру.

В 1968 г. мы с В. Тримбл пересмотрели и расширили список Зельдовича — Гусейнова. К несчастью, ни один из восьми хороших кандидатов, стоявших в нашем новом списке, не был по-настоящему «подозреваем», что это черная дыра. Во всех восьми случаях В. Тримбл смогла придумать более или менее разумное объяснение, почему темный компаньон не виден, не прибегая к гипотезе черной дыры. Например, темная звезда может сама оказаться двойной системой и иметь поэтому светимость меньше, чем следует из ее массы. В других случаях оказывалось, что первичная звезда имеет бо́льшую светимость, чем предполагалось. Или же сложная структура спектра первичной звезды могла маскировать спектральные линии звезды вторичной. Казалось, что на этом этапе поиски черных дыр в двойных системах зашли в тупик.

Оставалась одна серьезная надежда. Еще в 1964 г. было показано, что черная дыра в тесной двойной системе может стягивать газ со своей звезды-спутника. При падении высвобожденного газа на черную дыру

он может разогреться настолько, что начнет испускать рентгеновское излучение. Поэтому если бы обнаружили, что какой-либо из восьми хороших кандидатов испускает рентгеновские лучи, предположение, что его темный компаньон является черной дырой, стало бы гораздо более убедительным.

Поиски испускаемого двойными системами рентгеновского излучения нельзя проводить наземными приборами, так как рентгеновские лучи поглощаются атмосферой Земли. Можно использовать для этой цели приборы, установленные на зондирующих ракетах. Однако такие ракеты взлетают выше атмосферы лишь на короткое время, после чего падают обратно на Землю; их приборы могут поэтому зарегистрировать лишь самые яркие рентгеновские звезды и исследовать их излучение лишь в самых общих чертах. Приборы, поднимаемые на высотных баллонах, также дают мало информации: атмосферное поглощение делает их чувствительными только к наиболее проникающему рентгеновскому излучению. Для серьезных поисков пригоден только рентгеновский телескоп на борту искусственного спутника.

Первый такой телескоп был установлен на борту итало-американского спутника «Ухуру», запущенного 12 декабря 1970 г. К весне 1972 г. «Ухуру» накопил информацию, достаточную для составления детального каталога 125 рентгеновских источников. Для астронома, занимающегося поисками черных дыр, результаты «Ухуру» были одновременно и разочаровывающими, и обнадеживающими. Разочаровывающими, потому что ни один из рентгеновских источников не совпадал с каким-либо из восьми кандидатов в черные дыры. Обнадеживающими, потому что оказалось, что по меньшей мере шесть источников лежат в других двойных системах, как правило, в системах, которые ранее не были распознаны как двойные и, следовательно, не рассматривались при поисках.

Было ясно, что два из этих шести рентгеновских источников, Центавр X-3 и Геркулес X-1, не содержат черных дыр. Это явствует из того, что их рентгеновское излучение представляет собой строго периодические импульсы со временем между импульсами 4,84239 *сек* у Центавра X-3 и 1,23782 *сек* у Геркулеса X-1. Ничто, связанное с черной дырой, не может обнаруживать столь правильное поведение. По всей видимости, каждая из этих двух систем включает вращающуюся нейтронную звезду с собственным магнитным полем, наклоненным относительно оси вращения. Газ, срываемый со звезды-компаньона, транспортируется вдоль магнитных силовых линий на магнитные полюсы нейтронной звезды, где тепловая энергия соударений порождает пучок рентгеновских лучей, сканирующий по небесной сфере при вращении звезды. Каждый, раз, когда этот пучок при сканировании захватывает Землю, спутник «Ухуру» регистрирует вспышку рентгеновского излучения. Черная дыра не может образовывать такой пучок, поскольку с ней не может быть связана никакая неаксиальная структура, подобная такому магнитному полю. Черная дыра, в соответствии с эйнштейновскими законами тяготения, быстро разрушила бы такую структуру *).

Четыре оставшихся рентгеновских источника в двойных системах обозначаются как 2U 1700-37, 2U 0900-40, SMC X-1 и Лебедь X-1, 2U означает «второй каталог Ухуру», а SMC — Малое Магелланово облако, спутник нашей Галактики. Изучение каждого из этих источников в види-

---

*) Этот факт был показан в работах: В. Л. Гинзбург, ДАН СССР 156, 46 (1964); В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, ЖЭТФ 47, 1030 (1964); подробнее см. статью В. П. Фролова в этом номере УФН. (*Прим. ред.*)

мой области обнаружило сверхгигантскую первичную звезду с предательским периодически меняющимся допплеровским сдвигом. Не было обнаружено никаких следов спектральных линий вторичной звезды. Однако во всех четырех случаях в видимом спектре присутствуют линии, испускаемые газом, текущим от первичной звезды к невидимой вторичной. Рентгеновское излучение из трех систем, 2U 1700—37, 2U 0900-40 и SMC X-1, затмевается всякий раз, когда первичная звезда проходит между Землей и невидимой вторичной. Следовательно, почти с уверенностью источником рентгеновского излучения является вторичная звезда. Излучение вероятнее всего генерируется, когда истекающий с первичной звезды газ нагревается при падении на вторичную, как и в случае падения газа на нейтронную звезду; по крайней мере, астрономы не смогли дать этому явлению никакого другого количественного объяснения.

Для нагрева падающего газа до температуры, достаточной для испускания рентгеновских лучей, требуется огромное количество энергии, которое можно получить только при падении в очень сильном поле тяготения. Поле, окружающее нормальную звезду или планету, для этого недостаточно сильно. Только три типа объектов обладают достаточно сильным полем: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. И единственная достаточно определенная возможность сделать выбор между этими тремя вероятностями — это каким-то образом измерить массу вторичной звезды. Если масса превосходит в 1,4 раза массу Солнца, объект не может быть белым карликом. Если масса больше солнечной в три раза, объект не может быть и нейтронной звездой. В последнем случае он должен быть черной дырой.

Получить грубую оценку массы вторичной звезды не очень сложно. Для этого необходимо только иметь минимальный объем данных наблюдений допплеровского сдвига и достаточно хорошую информацию о спектре первичной звезды. На основе таких данных для массы невидимого спутника в 2U 1700-37 получена величина, равная 2,5 массы Солнца, для массы спутника в 2U 0900-40 — 3, для массы спутника в SMC X-1 — 2 и для массы спутника в Лебеде X-1 — около 8 масс Солнца *).

Эти цифры означают, что по крайней мере одна, а возможно и все четыре двойные системы содержат черную дыру. Эти оценки, однако, очень грубы. Отдельные астрономы, по-разному интерпретирующие данные, могут расходиться в своих оценках массы в два раза и более. И любой астроном, пожелающий выступить в роли «адвоката дьявола», легко может уменьшить эти оценки, применив свой особый подход к интерпретации данных.

Только в случае Лебедя X-1 «адвокатам дьявола» действительно приходится трудно. Даже анализ данных «на наихудший случай» указывает, что невидимый компаньон обладает массой не менее чем четыре массы Солнца. Отсюда можно сделать вывод, что в Лебеде X-1 действительно присутствует черная дыра. По крайней мере такое заключение наиболее обосновано (рис. 2).

Группа «адвокатов дьявола» во главе с Дж. Баколлом из Принстонского университета и Дж. Принглом из Кембриджа разработала жизнеспособные, хотя и менее правдоподобные альтернативные модели, объясняющие данные наблюдений. Эти модели исходят из того, что массивный вторичный объект, вокруг которого обращается яркая первичная звезда,

*) В работе В. М. Лютого, Р. А. Сюняева и А. М. Черепащука — Астрон. ж. 50, 3 (1973) — для оценки массы спутника в системе Лебедь XI привлечены дополнительные данные о перемещении яркости видимой звезды. Оценки подтверждают большое значение массы. (*Прим. ред.*)

является нормальной, но тусклой звездой. В одной из моделей источником рентгеновского излучения является нейтронная звезда-спутник, обращающаяся вокруг массивной нормальной вторичной звезды. В другой модели нейтронная звезда, испускающая рентгеновское излучение, обращается по широкой орбите вокруг нормальной в целом двойной системы. В третьей модели источником излучения вообще не является нейтронная звезда или какой-либо другой компактный объект. Вместо этого предполагается, что между двумя нормальными звездами простирается сильное магнитное поле, которое при вращении обеих звезд непрерывно скручивается, свивается в узлы и разрывается. Закручивание и разрывы поля нагревают связанный с ним газ, и горячий газ испускает рентгеновское излучение. Четвертая модель предполагает, что вторичный объект, испускающий рентгеновское излучение, не черная дыра, а даже нечто еще более интересное и странное: массивная «чистая сингулярность» в структуре пространства-времени. Эйнштейновские законы тяготения, по-видимому, запрещают образование чистых сингулярностей, но все попытки доказать это строго терпят неудачу.

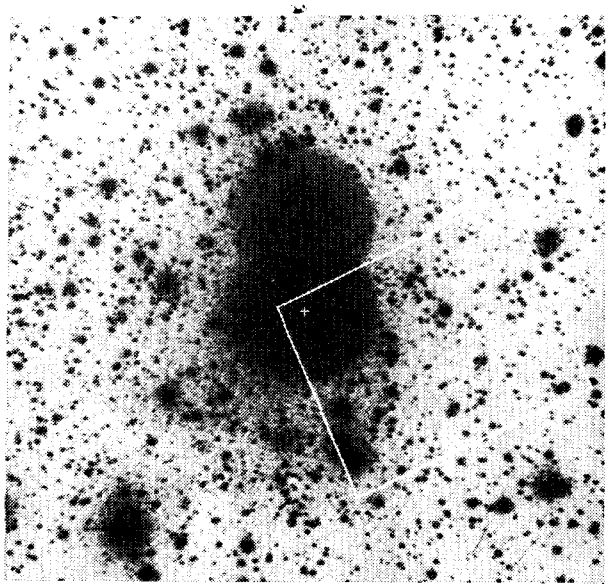

Рис. 2. Считается, что Лебедь X-1 ассоциируется со звездой HDE 226868 — самым темным и крупным объектом на этом негативном снимке малого участка неба.

Фотография выполнена Д. Кристианом на 200-дюймовом рефлекторе обсерватории Маунт-Паломар. Пластинка экспонировалась достаточно долго, чтобы стали видны даже очень слабые (до 22-й величины) звезды. На фотографии нанесено положение источников радио- (маленький крестик) и рентгеновского излучения (белой линией). Положение Лебедя X-1 неизвестно достаточно точно из одних только рентгеновских наблюдений из-за низкого разрешения рентгеновских телескопов. Однако в течение последней недели марта и первой недели апреля 1971 г. в Лебеде X-1 произошел катаклизм, и до сих пор в нем видны непрерывные изменения. В результате он стал излучать радиоволны, а средняя энергия его рентгеновского излучения удвоилась. Поскольку положение радиоисточников можно измерить точно, изменения в Лебеде X-1 помогли астрономам идентифицировать его положение.

Ныне мы сталкиваемся с ситуацией, весьма типичной для астрономии. Одна из моделей, а именно модель черной дыры на орбите вокруг нормальной звезды, может хорошо объяснить данные наблюдений Лебедя X-1 в видимой и рентгеновской области. Другие распространенные модели, предполагающие, что вторичный объект является белым карликом или нейтронной звездой, наблюдениями не подтверждаются. Однако можно еще разработать альтернативные объяснения, которые согласуются с данными наблюдений. Такая ситуация подводит астрономов к финальной стадии поисков черных дыр: попытке собрать больше данных, более высокого качества или нового типа, данных, которые (как я надеюсь!) постепенно «похоронят» конкурирующие модели и решат дело в пользу черной дыры. На этой финальной стадии полезно знать, на что обращать внимание. Какие отличительные признаки должны характеризовать рентгеновское и световое излучение,

генерируемое двойной системой, в которой вторичный объект является черной дырой, аккретирующей газ с первичной звезды?

Подробные теоретические исследования таких двойных систем были начаты в 1971 г., еще до того, как наблюдения на «Ухуру» подтвердили тот факт, что некоторые двойные системы испускают рентгеновские лучи. Эти исследования были независимо начаты на основе ньютоновской теории тяготения Н. Шакурой и Р. Сюняевым из Московского института прикладной математики *) и Принглом и Рисом из Кембриджа. Позднее ряд исследователей произвели анализ, основанный на эйнштейновской общей теории относительности. Этим занимались мы с Д. Пейджем в Калифорнийском технологическом институте, И. Новиков и А. Полнарев в Москве и К. Каннингем в университете Вашингтона. Все эти исследования в общем одинаково дают грубую структуру бинарной системы и потока газа внутри нее (рис. 3).

Поле тяготения черной дыры постоянно стягивает газ со сверхгигантской звезды или из ее ближайших окрестностей и направляет его на орбиту вокруг черной дыры. Центробежные и гравитационные силы сплющивают находящийся на орбите газ в тонкий диск вокруг черной дыры, аналогичный кольцам Сатурна, но гораздо большего масштаба. Если бы не было трения, газовая струя, втянутая в этот диск, оставалась бы на орбите навсегда. Однако трение между соседними газовыми струями вынуждает газ двигаться по сужающейся спирали внутрь. Скорость движения внутрь значительно менее одного процента орбитальной скорости. Через несколько недель или месяцев после того, как струя вошла в диск, она по спирали проникает внутрь него на несколько миллионов километров и достигает внутреннего края диска. Здесь тяготение черной дыры делается непреодолимым. В доли секунды газовая струя будет вырвана из диска и всосана через горизонт черной дыры внутрь нее.

Побочным продуктом трения является теплота. Вначале, когда струя газа захватывается в диск, она, по-видимому, имеет температуру около 25 000 °К, такую же температуру, как и поверхность сверхгигантской первичной звезды. По мере того как газ дрейфует внутрь диска, трение разогревает его, так что на последних 100 *км* своего спирального спуска его температура превышает 10 млн. градусов.

Горячий газ излучает энергию, около 80% которой испускается из внутренних 200 *км* диска в виде рентгеновского излучения. Вероятно, именно это излучение и регистрируется телескопом на «Ухуру». Остальные 20% излучения, испускаемые из сравнительно холодных внешних частей диска, должны быть более мягкими рентгеновскими лучами, которые не могут быть зарегистрированы существующими сейчас приборами, а также ультрафиолетовым и видимым светом, не различимым в сиянии сверхгигантской звезды (рис. 6).

Доводы в пользу черной дыры в Лебеде X-1 были бы существенно подкреплены, если бы теоретикам, работающим над этой моделью, удалось предсказать более подробно свойства рентгеновского излучения. Главным камнем преткновения в этом деле является трение в диске. Мы не знаем, вызывается ли трение турбулентностями в движущемся по спирали газе, связанным с газом магнитным полем или же комбинацией турбулентностей и магнитных полей. И даже если бы мы знали источник трения, мы все равно не могли бы рассчитать его величину, так как недостаточно знакомы с общефизическим поведением турбулентного намагниченного газа.

*) В настоящее время Р. А. Сюняев — сотрудник Института космических исследований АН СССР, Н. А. Шакура — сотрудник ГАИШ МГУ. (*Прим. ред.*)

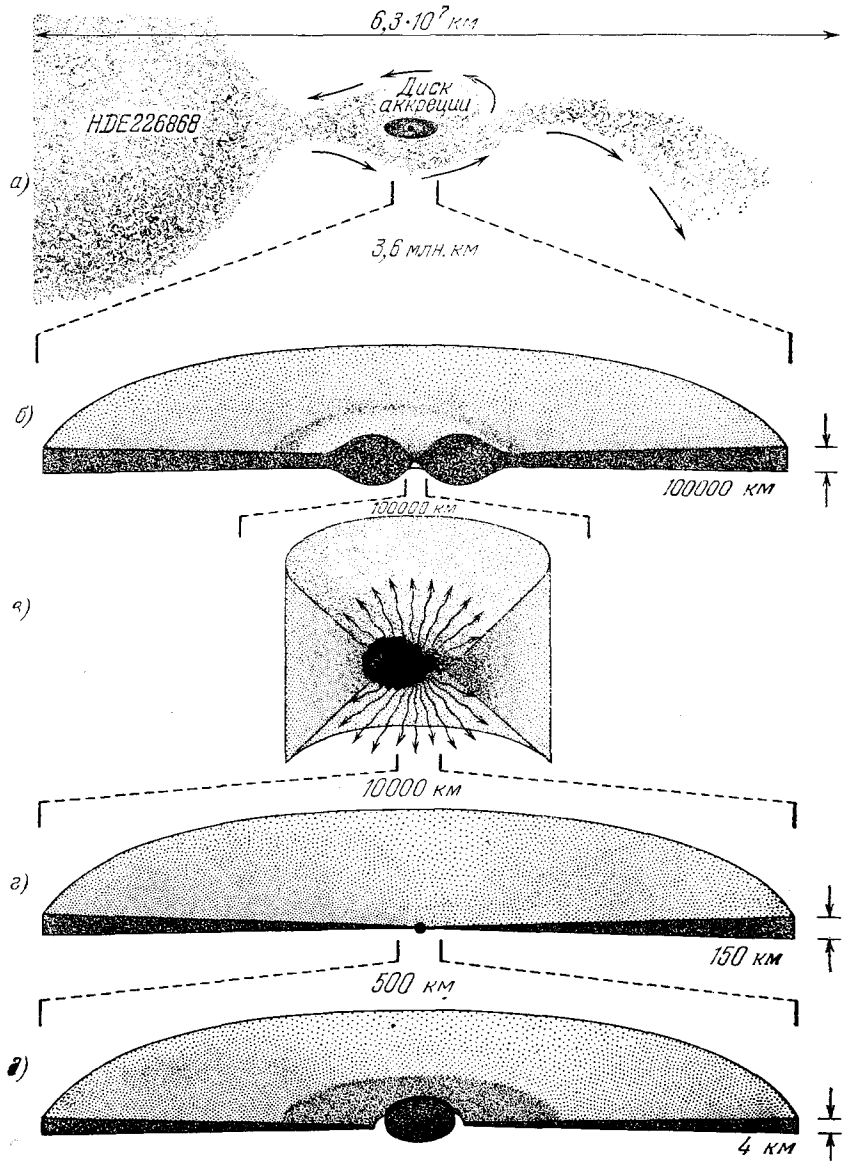


Рис. 3. Модель черной дыры в Лебеде X-1, являющаяся правдоподобным объяснением наблюдений в видимом и рентгеновском диапазонах.

Поле тяготения черной дыры стягивает газ со сверхгигантской первичной звезды HDE 226868 (*а*). Пока газ падает на черную дыру, последняя сдвигается по своей орбите, вследствие чего газ пролетает мимо нее. Ближайшая к черной дыре часть газа закручивается вокруг нее, двигаясь по тесной круговой орбите и образуя диск аккреции. На рис. *б*) в масштабе, в 20 раз более крупном, показана ожидаемая форма диска аккреции. Тяготение черной дыры сжимает диск, делая его тонким. В то же время тепловыделение в газе работает против сил сжатия и пытается утолстить диск. Лишь в центральном вздутии (*в*) давление достаточно, чтобы диск действительно утолстился. Большое давление во вздутии вызвано теплом от рентгеновского излучения, испускаемого вблизи черной дыры. В сердцевине диска аккреции (*г*) тепловое давление даже выше, чем во вздутии, однако тяготение здесь неимоверно огромно, что не дает диску утолщаться. Наблюдаемое с Земли рентгеновское излучение генерируется лишь в самых внутренних 200 *км* диска с черной дырой в центре (*д*). В самых внутренних 50—100 *км* диск становится прозрачным, сильно турбулентным и гораздо более горячим, чем на всем остальном своем протяжении. Диск ограничен возле самой черной дыры, где тяготение настолько велико, что газ не может более двигаться по орбите и всасываться внутрь. Место ограничения и структура внутренней части диска чувствительны к скорости вращения черной дыры (см. рис. 4). Здесь полагается, что черная дыра вращается очень быстро; если вращение медленнее, область испускания рентгеновского излучения будет иметь радиус ближе к 400, чем к 200 *км*.

Знаменательно то, что, несмотря на наше невежество, мы все же можем весьма достоверно рассчитать некоторые важнейшие характеристики

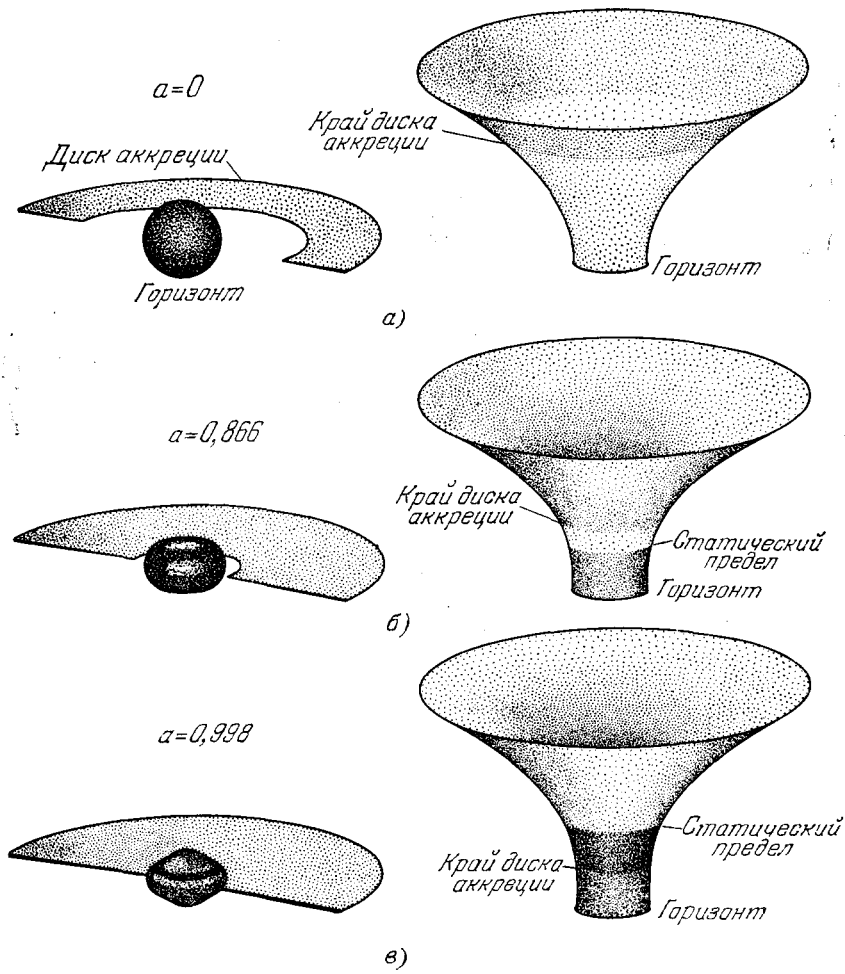


Рис. 4. Изображение дисков аккреции трех черных дыр и окружающего их искривленного пространства демонстрирует влияние на них скорости вращения дыры.

Не вращающаяся дыра (*а*) имеет горизонт, или границу, сферической формы. Ее параметр вращения *a* (скорость света, умноженная на момент импульса и деленная на произведение ньютоновской гравитационной постоянной и квадрата массы черной дыры) равен нулю. Дыра, вращающаяся со средней скоростью (*б*; параметр вращения 0,866), будет совершенно плоской с полюсов, но еще круглой на экваторе. Вращение не влияет на длину окружности ее экватора. Горизонт быстровращающейся черной дыры (*в*; параметр вращения 0,998) имеет форму, которая не может существовать в нашем привычном неискривленном евклидовом пространстве. У всех трех черных дыр изображен горячий газовый диск аккреции, который, как полагают, окружает черную дыру в Лебеде X-1. Газ движется по спирали внутрь диска к горизонту, разогреваясь от трения и испуская на своем пути рентгеновское излучение. С внутреннего края диска горячий газ втягивается в дыру. Вихревое движение в пространстве, создаваемое вращением черной дыры, закручивает к центру внутреннюю часть диска, вследствие чего его внутренний край тем ближе к горизонту, чем быстрее вращается дыра. Искривленное пространство вокруг дыры и относительное расположение дыры и диска аккреции в искривленном пространстве показано при помощи диаграмм вложения (см. рис. 5). Статический предел — это место, где вихревое движение пространства делается непреодолимым. У быстро вращающейся черной дыры диск аккреции простирается намного ниже статического предела. Рентгеновское излучение, испускаемое таким диском, может иметь специфические особенности, которые могут показать, верна ли теория черной дыры.

диска. Например, исходя из законов сохранения энергии и момента импульса, мы можем рассчитать, какие количества энергии излучает каждая область диска. Мы приходим к заключению, что большая часть

излучения должна исходить из горячих внутренних 200 *км* диска, каков бы ни был источник и величина трения. Однако мы не в состоянии подсчитать температуру этой внутренней области и спектр рентгеновского излучения, которое она испускает. Взамен этого нам приходится определять вид спектра из наблюдений, из которых следует, что температура заключена в пределах от 5 до 500 млн. градусов. Возвращаясь вновь к моделям, мы видим, что такие высокие температуры несовместимы с картиной спокойного диска с малым трением и турбулентностями, но будут вполне разумными, если внутренняя область диска сильно турбулентна и оптически тонка, т. е. прозрачна для излучения. Затем мы вновь обращаемся к наблюдениям и видим, что рентгеновское излучение, достигающее Земли, неравномерно, его интенсивность флуктуирует в два-три раза и более в любые промежутки времени от миллисекунд до дней. Такие флуктуации также характерны для турбулентного диска (рис. 7).

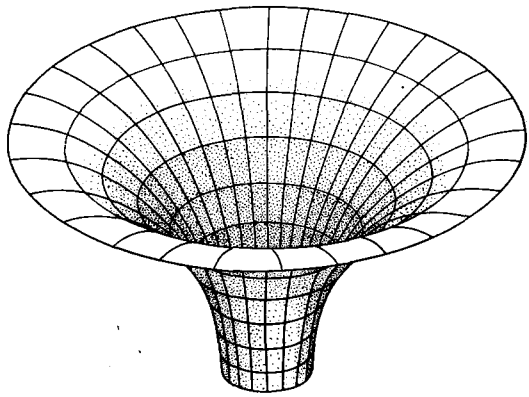

Рис. 5. В присутствии сильного поля тяготения пространство искривляется.

Это искривление изображается так называемой диаграммой вложения, на которой трехмерное пространство представлено плоской поверхностью, которая искривляется в присутствии звезды или другого массивного объекта. Величина искривления зависит от поля тяготения объекта и определяет направление и время распространения лучей света и меру расстояния.

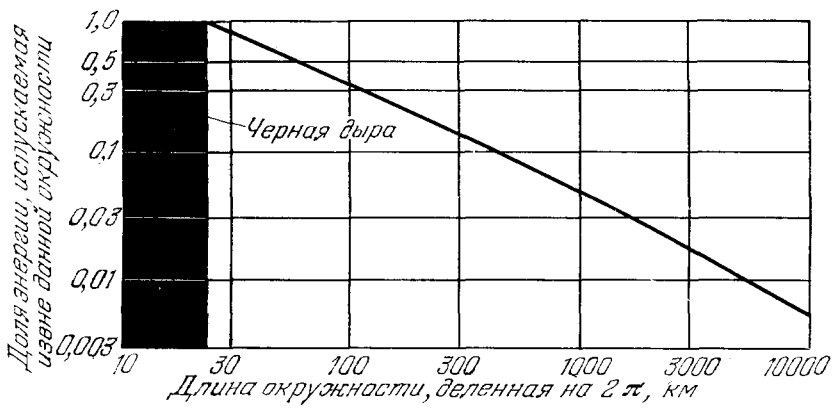


Рис. 6. Энергия, излучаемая различными областями сердцевины диска аккреции вокруг черной дыры в Лебеде X-1, в долях полной энергии.

Место области в диске указано в единицах длины окружности, деленной на $2\pi$. Это не есть радиус, так как вблизи черной дыры пространство сильно искривлено. Половина излучаемой энергии исходит из самых внутренних 56 *км* диска, где температура выше 30 млн. °К; энергия типичного рентгеновского кванта превышает 5 *кэв*.

Лавируя таким образом между теорией и наблюдениями, нам с Р. Прайсом из университета штата Юта удалось построить работоспособное описание структуры внутреннего диска Лебедя X-1. Разумеется, успех в построении такой модели — не слишком сильный аргумент в пользу существования в Лебеде X-1 черной дыры. Слишком многое было взято из наблюдений и слишком мало рассчитано на базе исходных предполо-

жений и фундаментальных принципов физики (рис. 8). С другой стороны, могло бы быть и хуже. Наблюдения могли оказаться несовместимыми

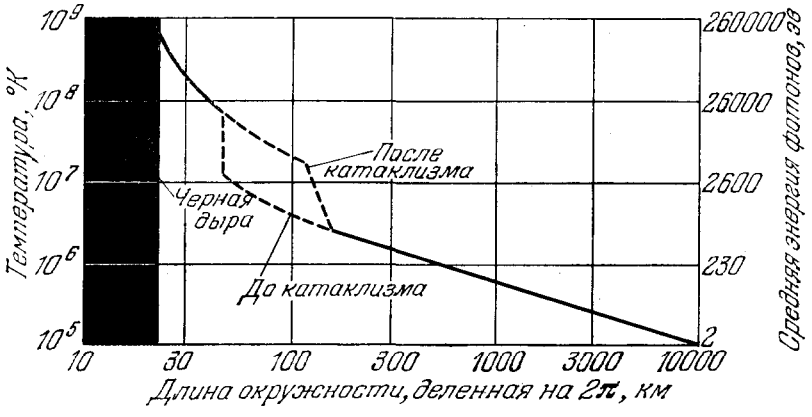


Рис. 7. Температура газа и энергия фотонов для различных областей диска аккреции.

До последнего времени рентгеновские телескопы могли детектировать лишь излучение жестче излучения с энергией 2 *кэв*, поэтому кривая для меньших энергий взята из теоретических расчетов. Телескопы будущего должны проверить теорию при исследовании области энергий фотонов от 0,4 до 2 *кэв*. Катаклизм, вызвавший изменения в излучении Лебедя X-1, может быть объяснен изменением состояния области диска между 50 и 100 *км*.

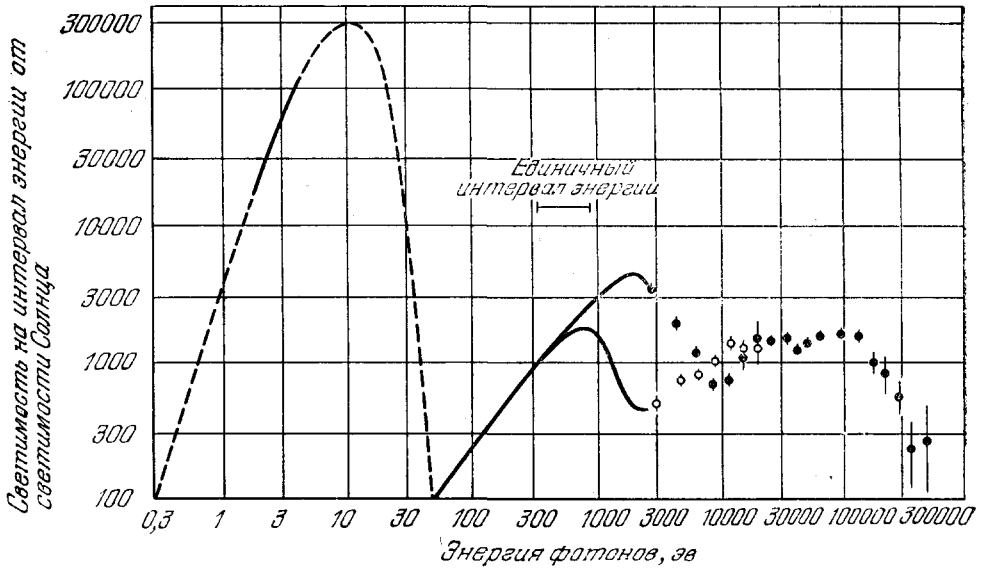


Рис. 8. Спектр звезды HDE 226868 и Лебедя X-1 в единицах абсолютной светимости Солнца.

За единичный интервал энергии выбран интервал, в котором энергия возрастает в число раз, равное основанию натуральных логарифмов $e \approx 2{,}718$, например интервал между 1000 и 2718 *эв*. Кривой слева показан спектр HDE 226868; сплошная часть кривой — результат наблюдений в видимой области, штриховая — экстраполяция наблюдений в инфракрасную и ультрафиолетовую области. Рентгеновское излучение сердцевины диска аккреции Лебедя X-1 показано кривой справа. Кружки при энергии выше 2700 *эв* представляют наблюдения Лебедя X-1 в рентгеновском диапазоне; короткие флуктуации (от миллисекунд до минут) усреднены. Вертикальные границы ошибок у каждого кружка дают статистическую ошибку, обусловленную конечным количеством фотонов, зарегистрированных в наблюдении. Черные кружки относятся к наблюдениям, сделанным до катаклизма, светлые показывают, как изменился спектр после катаклизма.

с любым типом модели, полагающей, что рентгеновское излучение испускается газом, падающим на черную дыру. В этом смысле модель черной

дыры выдержала отрицательный тест. Этот тип тестов является главным инструментом, при помощи которого астрофизики доказывают или опровергают модели. Если модель устояла под натиском различных отрицательных тестов, которые погубили ее конкурентов, астрофизики начинают относиться к ней весьма серьезно.

Однако отрицательные тесты, очевидно, не единственный способ доказательства или опровержения гипотезы о черной дыре в Лебеде X-1. Сюняевым был предложен и положительный тест; другие теоретики подыскивают еще и новые тесты такого рода. Тест Сюняева состоит в рассмотрении небольших вспышек интенсивности рентгеновского излучения. Предполагается, что такие вспышки могут порождаться неустойчивыми горячими пятнами во внутренних 100 *км* диска (рис. 9). Надежной теории рождения и распада таких пятен не существует, но тем не менее кажется вероятным, что, раз родившись, горячее пятно просуществует более чем один оборот по орбите вокруг черной дыры. Рентгеновское излучение от горячего пятна будет испускаться в определенном направлении в виде пучка, который будет вращаться по мере обращения пятна вокруг черной дыры. Образование направленного пучка может вызываться отчасти процессом, в котором рождается излучение, а отчасти фокусировкой излучения полем тяготения черной дыры. Кроме того, допплеровский сдвиг увеличивает интенсивность излучения, когда пятно при вращении по орбите движется по направлению к нам, и уменьшает, когда оно движется в обратном направлении. Следовательно, излучение от горячего пятна должно восприниматься не плавно, а импульсно, с интервалами между импульсами, равными периоду обращения пятна вокруг черной дыры. Таким образом, эта модель предсказывает, что короткие вспышки интенсивности рентгеновского излучения, по-видимому, должны иметь микроструктуру из импульсов с интервалами между ними порядка нескольких миллисекунд.

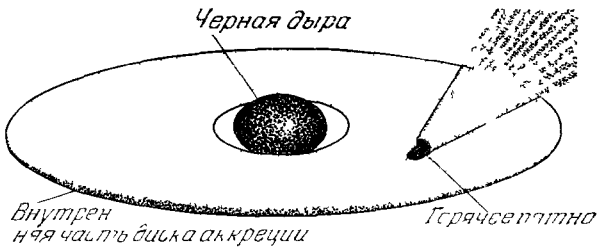


Рис. 9. Излучение горячего пятна в диске аккреции черной дыры фокусируется в широкий конус, который описывает окружность на небесной сфере над диском при каждом обороте пятна вокруг дыры.

При многократных прохождениях этого конуса по Земле рентгеновские телескопы будут наблюдать импульсы излучения на фоне общего возрастания полной интенсивности регистрируемых рентгеновских лучей. Результатом будет регистрация вспышки излучения, имеющей импульсную структуру.

Если такие импульсы обнаружены и известна масса черной дыры, то по интервалу между импульсами можно рассчитать длину окружности орбиты горячего пятна. Наблюдая достаточное количество таких пульсирующих вспышек рентгеновского излучения, можно определить минимальный интервал между импульсами, а следовательно, рассчитать длину окружности внутреннего края диска и сделать вывод о скорости вращения черной дыры.

Для черной дыры с массой в 8 масс Солнца минимальный интервал между импульсами лежит в пределах от 3,6 *мсек* для невращающейся дыры (параметр вращения $a = 0$) до 0,6 *мсек* для быстро вращающейся (параметр вращения $a = 0{,}998$) (рис. 10). Такая пульсирующая микроструктура не является, однако, обязательной для вспышек интенсивности излучения. Вспышки без импульсной микроструктуры могут порождаться горячими пятнами, далеко (по-видимому, далее чем на 100 *км*)

отстоящими от черной дыры; их излучение не фокусируется тяготением дыры и не меняется в заметной степени за счет эффекта Допплера. Они также могут порождаться очень большими пятнами, которые при орбитальном движении газа быстро вытягиваются в «огурец» вдоль орбиты.

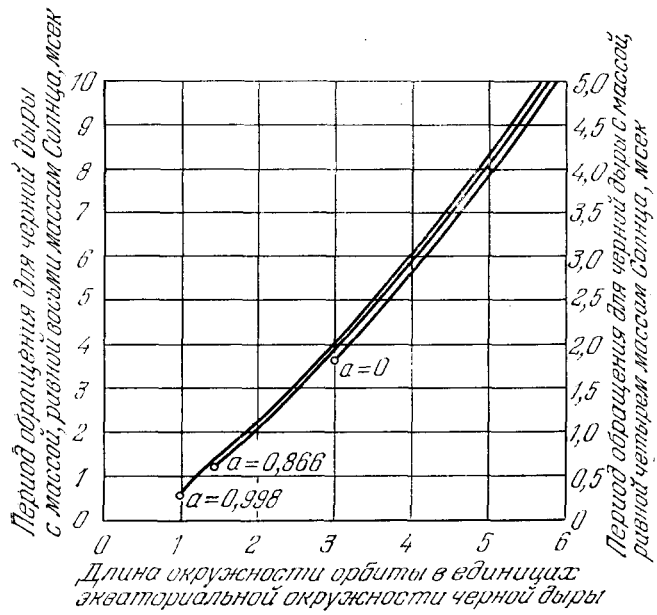


**Рис. 10.** Интервал времени между импульсами, испускаемыми горячим пятном, движущимся в диске аккреции по орбите вокруг черной дыры, однозначно и точно определяется длиной окружности орбиты пятна, массой дыры и ее параметром вращения $a$. Чем быстрее вращается дыра, тем меньше внутренний край ее диска аккреции и, следовательно, тем короче минимальное время между импульсами во вспышке рентгеновского излучения. Наблюдения таких импульсов во вспышках излучения могут дать способ измерения параметра вращения черной дыры в Лебеде X-1.

Поэтому наблюдение непульсирующих вспышек тоже вполне согласуется с моделью черной дыры в Лебеде X-1. Однако если будут обнаружены пульсирующие вспышки излучения, вид этих пульсаций обязательно должен соответствовать предсказаниям Сюняева.

Для поисков пульсирующих вспышек интенсивности требуется рентгеновский телескоп, который может производить измерения за время менее одной миллисекунды и обладающий чувствительной площадью более 10 000 *см*$^2$, чтобы за каждое миллисекундное измерение регистрировалось достаточно много фотонов. Такой телескоп, вероятно, не появится на орбите до запуска американского Астрономического спутника высоких энергий (HEAO-A). По-видимому, это произойдет в 1977 г. До тех же пор нам придется довольствоваться менее подробными наблюдениями с ракет и баллонов.

Первое такое наблюдение, проведенное в октябре 1973 г., было многообещающим. Телескопом с временным разрешением 0,32 *мсек* и довольно скромной чувствительной площадью в 1360 *см*$^2$ были зарегистрированы вспышки интенсивности рентгеновского излучения с длительностью около 0,1 *сек* (рис. 11). Похоже, что самая большая из этих вспышек имеет импульсную микроструктуру, но число фотонов, зарегистрированных во вспышке, недостаточно, чтобы говорить об этом с уверенностью. А пока

мы, теоретики, в нетерпеливом ожидании нового поколения рентгеновских телескопов занимаемся своим делом: те из нас, кто принадлежит к «правоверным», пытаются с превеликими трудностями создать лучшие

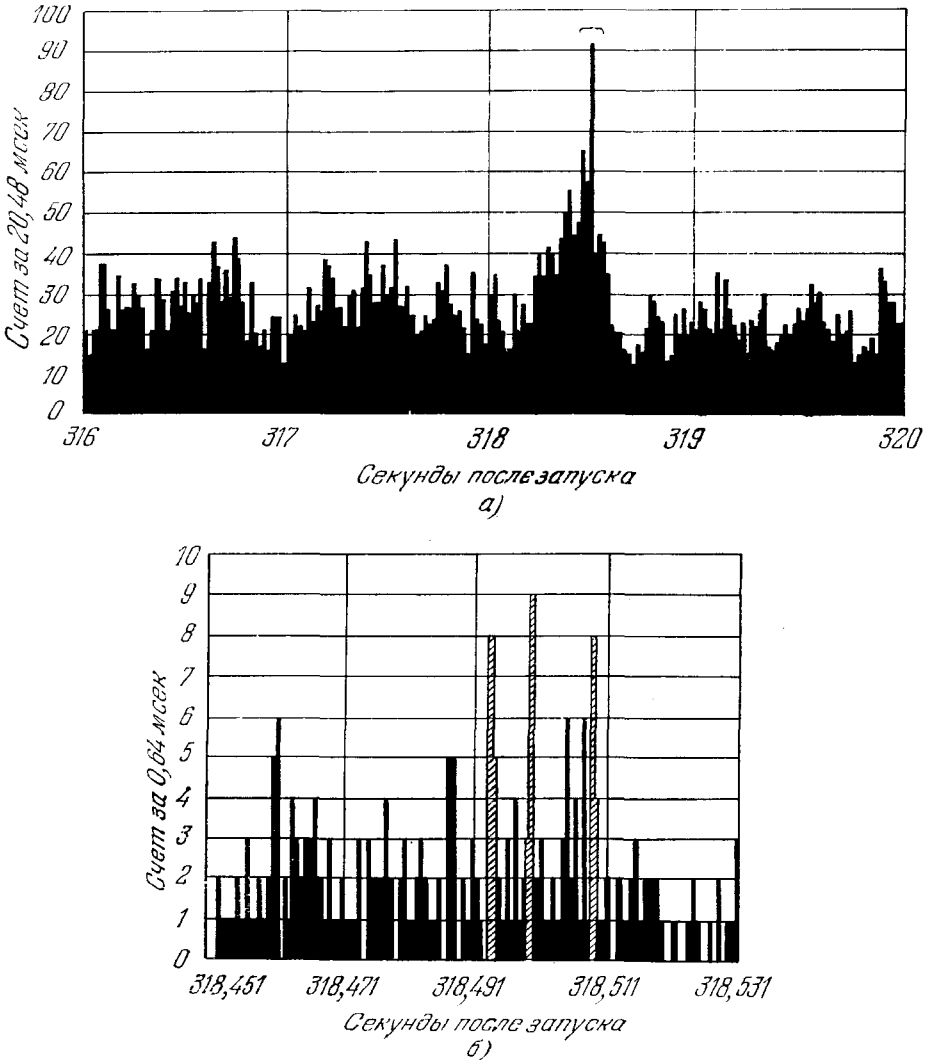


Рис. 11. Наблюдения вспышки рентгеновского излучения от Лебедя X-1, проведенные рентгеновским телескопом на борту ракеты Годдардовского центра космических полетов в октябре 1973 г. (*а*).

Более подробный анализ вспышки в пределах, отмеченных на рис. *а*) скобкой сверху, показывает (*б*), что она, по-видимому, имеет пульсирующую микроструктуру, проявляющуюся на пределе чувствительности телескопа (заштриховано). Показанные черным кажущиеся импульсы на самом деле являются случайными флуктуациями сигнала. Интервал между импульсами не короче 0,005 *сек*, что соответствует окружности внутреннего края диска не менее учетверенной окружности черной дыры. Эта окружность недостаточно мала, чтобы определить параметр вращения черной дыры.

модели черной дыры в Лебеде X-1, а те, кто предпочитает примкнуть к «адвокатам дьявола», с не меньшим трудом пытаются построить модели без черной дыры.

Пока одни из нас «воюют» с Лебедем X-1, другие ведут поиски других черных дыр. Возможности тут еще далеко не исчерпаны, но пока еще никому не удалось дать серьезные доказательства существования других

подобных объектов. Еще несколько спектрально двойных систем, в том числе ε Возничего и β Лиры, включают вторичную звезду с массой, большей чем 4 массы Солнца, которая окружена огромным непрозрачным или отчасти непрозрачным диском. С Земли видно, что диск периодически затемняет свет яркой первичной звезды. А. Камерон из обсерватории Гарвардского колледжа и Э. Дивини из университета Южной Флориды предполагают, что массивные объекты в центре этих дисков могут быть черными дырами. Другие астрономы дают иные, не менее правдоподобные объяснения.

Советский астроном В. Ф. Шварцман ведет поиски черных дыр, не входящих в двойные системы. Он рассчитал, что межзвездный газ, всасываемый в такую изолированную дыру, должен испускать свет, мерцающий с периодом в несколько миллисекунд. К несчастью для наблюдателей, этот свет должен быть слабым: он составит не более 1 % света Солнца, если наблюдать Солнце с того же расстояния. Поэтому, так как ближайшая черная дыра вряд ли располагается ближе, чем на расстоянии в многие световые годы, она будет выглядеть как слабая быстро мерцающая звезда. Чтобы зарегистрировать такое мерцание и получить тем самым сильные доказательства существования изолированной черной дыры, Шварцману необходимы чувствительная электроника и мощный телескоп для наблюдений в видимой области. Он работает в Крымской астрофизической обсерватории, где вскоре будет завершено сооружение 240-дюймового телескопа.

Коллапс звезды, порождающий черную дыру, должен вызывать мощную вспышку гравитационных волн. Существующие приемники гравитационных волн первого поколения имеют чувствительность, достаточную лишь для того, чтобы регистрировать такие вспышки, происходящие в пределах нашей Галактики, где их нельзя ожидать чаще, чем раз в несколько лет. Приемники второго поколения, конструируемые сейчас в Стэнфордском университете, университете штата Луизиана и в Московском университете, возможно, смогут детектировать такие вспышки в скоплении из 2500 галактик в созвездии Девы. Еще более чувствительные приемники третьего поколения смогут сделать это с уверенностью. Теоретики полагают, что в скоплении Девы ежегодно рождается несколько черных дыр. Детектируя и анализируя гравитационные волны от этих рождений, можно не только доказать факт образования черной дыры, но и изучить некоторые индивидуальные особенности вновь образовавшегося объекта. Это — дело примерно ближайшего десятилетия.

Выше я описал только нормальные черные дыры, рождающиеся при коллапсе нормальных звезд с массой от трех до 60 масс Солнца. Вероятно, существуют сверхмассивные дыры, а возможно, и «минидыры» тоже. Д. Линден-Белл из Кембриджа утверждает, что плотная среда из газа и звезд, которая питает крупномасштабные взрывы в ядрах некоторых галактик, должна в конечном счете коллапсировать, образуя сверхмассивную черную дыру *). Если это так, то галактики, подобные нашей, которые, вероятно, испытывали взрывы в своем ядре в далеком прошлом, ныне содержат в этом ядре огромную черную дыру. Эта дыра является как бы памятником бурному прошлому галактики. В нашей Галактике такая черная дыра должна была бы иметь массу в 100 млн. масс Солнца и окружность в 2 млрд. *км*. Такая дыра должна втягивать в себя газ из близлежащей части ядра галактики, образуя возможно гигант-

*) Для скопления точечных масс принципиальная неизменность коллапса была показана в работе Я. Б. Зельдовича и М. А. Падуреца, ДАН СССР 156, 57 (1964).

ский диск аккреции, аналогичный дискам в спектрально двойных системах. Линден-Белл и Рис рассчитали, что такой диск должен испускать не рентгеновское, а сильное радио- и инфракрасное излучение. В ядре нашей Галактики действительно наблюдается несколько ярких инфракрасных и «радиозвезд». К несчастью для теоретиков, диск аккреции вокруг сверхмассивной черной дыры — далеко не единственное объяснение наблюдаемых объектов, а решающий тест для проверки этой гипотезы до сих пор никем не изобретен.

Минидыры, обладающие значительно меньшей массой, чем Солнце, в современной Вселенной рождаться не могут. В природе просто не существует необходимых для этого сил сжатия. Эти силы существовали, однако, в первые мгновения после образования Вселенной в «большом взрыве». Если большой взрыв был достаточно хаотичным, тогда, в соответствии с расчетами, проведенными Хоукинсом, он должен был породить большое количество минидыр. Хоукинс показал, что минидыры ведут себя совершенно не так, как дыры нормальных размеров *). Любая дыра с массой менее $10^{16}$ *г* (масса небольшого айсберга) должна постепенно разрушаться за счет испускания света и частиц в соответствии с законами квантовой механики. Эти законы, влияние которых несущественно для дыр бóльших размеров, серьезно меняют свойства маленьких дыр. В итоге все черные дыры с первичной массой менее $10^{15}$ *г* к настоящему времени должны были распасться. Те же, которые имели массу от $10^{15}$ до $10^{16}$ *г*, сейчас умирают. В период «агонии» такие умирающие черные дыры будут уже совсем не черными. Такая дыра будет «огненным шаром», достаточно мощным, чтобы обеспечить энергетические потребности Земли в течение десятилетий, но тем не менее настолько маленьким, что он может поместиться внутри атомного ядра.

Хоукинс получил эти результаты менее года тому назад, и следствия из них еще детально не разработаны. Они могут вызвать поток предложений по поискам минидыр. Сам Хоукинс вместе с Пейджем разрабатывает одну из возможностей, а именно, что вспышки космического $\gamma$-излучения, обнаруженные спутниками серии «Вела», порождаются взрывами минидыр.

Настоящий перечень путей поисков черных дыр и мест, где их можно искать, далеко не полон. Такое обилие возможностей не может не вдохновлять теоретика, подобного автору, — пока он не побеседует со своими более «приземленными» друзьями-экспериментаторами. Только тогда он начинает понимать, насколько трудное дело такие поиски. Мы не можем ждать от них быстрых результатов, но будущее их выглядит отнюдь не безнадежным.

## ЛИТЕРАТУРА

J. A. Wheeler, in: Science Year: The World Book Science Annual, 1973, p. 76.
C. W. Misner, K. S. Thorn, J. A. Wheeler, Gravitation, W. H. Freeman and Comp., 1973.
S. W. Hawking, Nature 248 (No. 5443), 30 (1974).

*) Белые и черные минидыры космологического происхождения были рассмотрены в ряде советских работ 1964—1967 гг.; см. книгу Я. Б. Зельдовича и Н. Д. Новикова «Релятивистская астрофизика» («Наука», 1967) и статью В. П. Фролова. В последней принадлежащая Хоукинсу теория испарения черных дыр рассмотрена подробно. (*Прим. ред.*)