

Новиков И.Д.

Энергетика черных дыр

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 52
ББК 22.6
Н73

Н73 **Новиков И.Д.**
Энергетика черных дыр / Новиков И.Д. – М.: Книга по Требованию, 2012. –
66 с.

ISBN 978-5-458-34082-3

ISBN 978-5-458-34082-3

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ

Черные дыры со всеми их чудесами стали уже привычными гостями на страницах не только научной, но и научно-популярной литературы. Много раз эта тема обсуждалась и в брошюрах издательства «Знание» (см. список литературы). Мы тем не менее вновь обращаемся к проблеме, связанной с черными дырами. Причин для этого несколько. Во-первых, мы будем здесь говорить об энергетике черных дыр. Этот вопрос до сих пор далеко не достаточно освещен в популярной литературе.

Во-вторых, в науке о черных дырах, в особенности в разделах, связанных с выделением энергии при участии черных дыр, в последнее время получены новые существенные результаты.

Наконец, в-третьих, вопросам энергетики вообще и, в частности, энергетики для будущего развития человечества уделяется сейчас особое внимание. Не исключено, что черные дыры сыграют существенную роль в будущей истории человеческого общества.

Сегодня астрономы считают практически доказанным их существование во Вселенной (см. Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной, Знание, 1977).

Мы не будем подробно останавливаться на всех аспектах проблемы черных дыр. Как уже сказано, многое описано в имеющейся научно-популярной литературе. Мы только кратко напомним те свойства физики черных дыр и те сведения из общей теории относительности Эйнштейна, которые важны для обсуждаемых вопросов.

Черная дыра как энергетическая машина — этот аспект проблемы давно изучается физиками и астрономами.

В настоящее время есть веские основания считать, что не только мощные источники рентгеновского излучения в двойных звездных системах связаны с черными

дырамн, возникшими там после смерти массивных звезд, но и что сверхмощные источники энергии в ядрах галактик и квазарах так же связаны с процессами вокруг сверхмассивных черных дыр. А ведь эти последние источники энергии, излучающие 10^{47} эрг/с и более, являются самыми мощными в современной Вселенной. Недаром астрофизики иногда называют черные дыры «центральный мотором» квазаров и взрывающихся галактических ядер.

Мы постараемся показать, что многие аспекты энергетики черных дыр не менее удивительны, чем такие свойства этих загадочных объектов, как особая топология пространства и времени, наличие физических сингулярностей и т. д.

ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

В этом разделе мы коротко напомним читателю основные свойства поля тяготения, пространства и времени вокруг черной дыры. Черная дыра возникает, когда какая-либо масса сжимается настолько сильно, что усиливающееся гравитационное поле не выпускает во внешнее пространство никаких частиц и даже свет. Быстрее света ничто в пространстве двигаться не может. Поэтому из черной дыры не выходит никакая информация. Для того чтобы при сжатии тела массы M возникла черная дыра, необходимо, чтобы оно сжалось до размеров так называемого гравитационного радиуса

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

где G — постоянная тяготения Ньютона и c — скорость света в вакууме.

В ходе образования черной дыры гравитационное поле может быть сильно переменным, происходит излучение гравитационных волн. Однако очень быстро (за время порядка $\tau \approx r_d/c$) эти процессы замирают, гравитационные волны уносятся частично в бесконечность, частично в возникшую черную дыру. Вокруг черной дыры остается стационарное гравитационное поле, которое полностью характеризуется всего тремя параметрами: массой M тела, из которого возникла черная дыра, его угловым моментом j и полным электрическим зарядом Q (если тело было заряженным). Тот факт, что поле

тяготения черной дыры полностью определяется всего тремя числами, чрезвычайно важен. В этом отношении черные дыры коренным образом отличаются от обычных тел. Например, гравитационное поле Земли зависит не только от ее полной массы, но и от распределения вещества в земном шаре. Форма Земли очень сложна и несимметрична. Все это отражается на ее поле тяготения, которое тоже чрезвычайно сложно. Однако никаких несимметричных черных дыр быть не может! Всякие отклонения от симметрии при образовании черной дыры уносятся гравитационными волнами.

В дальнейшем мы будем рассматривать главным образом незаряженные черные дыры. Для их описания достаточно двух параметров — M и j .

Конечно, гравитационное поле черной дыры вблизи ее границы очень сильное. Оно не может быть описано законом тяготения Ньютона и описывается теорией тяготения Эйнштейна.

Нас не будет интересовать, что происходит внутри черной дыры. В дальнейшем мы будем обсуждать лишь процессы во внешнем пространстве. Хорошо известно, что черная дыра не имеет материальной поверхности. Наблюдатель, падающий в черную дыру, при пересечении ее границы не встретит ничего, кроме пустого пространства. Эта граница определяется только тем условием, что из внутренней области из-за сильного тяготения не выходят наружу даже световые сигналы. Границу черной дыры называют горизонтом событий. Тем не менее, с точки зрения внешнего наблюдателя, все время остающегося снаружи черной дыры, она во многих отношениях похожа на компактное тело, ограниченное поверхностной мембраной с определенными механическими и электродинамическими свойствами. Принимается, что мембрана расположена как раз снаружи горизонта событий. Это, конечно, чисто условное представление. Однако оно очень наглядно и помогает работать нашей интуиции в условиях, когда силы тяготения огромны и многие представления необычны, даже без обращения к свойствам внутреннего пространства черной дыры. Такой подход называют «мембранным представлением» черной дыры. В последнее время он получил широкое распространение, особенно среди астрофизиков. Строгим его математическим обоснованием занимается американский физик Кип Торн и его коллеги.

помня все время об его ограниченности, о том, что черная дыра вовсе не тело с мембраной. Забвение этого факта может вести к серьезным ошибкам.

Итак, рассматриваем черную дыру как некоторое компактное «тело» во внешнем пространстве, в котором черная дыра создает поле тяготения.

Ниже мы остановимся на силах, которые, согласно теории Эйнштейна, действуют в этом пространстве, а также рассмотрим свойства этого пространства и течения в нем времени.

Начнем с простейшего случая, когда черная дыра возникает из невращающегося тела. Такая черная дыра носит название невращающейся или шварцшильдовской (по имени ученого, впервые описавшего ее гравитационное поле в 1916 г.).

Прежде всего геометрия внешнего пространства, как предсказывает теория Эйнштейна, оказывается не евклидовой, а подобной геометрии на искривленной поверхности (так называемой римановой геометрии). Это означает, что привычные геометрические соотношения не выполняются. Так, отношение длины окружности к радиусу не равно 2π , сумма углов треугольника не равна π и т. д. Отличия от евклидовой геометрии практически отсутствуют вдали от черной дыры, где поле тяготения слабо, но весьма заметны вблизи ее границы. В дальнейшем, когда мы будем говорить о расстоянии r какой-либо точки в пространстве от центра тяготения черной дыры, то будем иметь в виду не расстояние по радиусу от центра до данной точки, а длину окружности l , проведенной через эту точку вокруг черной дыры, деленную на 2π (напомним, что из-за неевклидовости геометрии это не одно и то же!). Такое определение связано с тем, что при мембранном представлении мы должны оставаться все время вне черной дыры и до ее центра добраться не можем, а значит, не можем и измерить расстояние от него.

Помимо неевклидовости геометрии внешнего пространства, оказывается, что в этом пространстве на разных расстояниях от черной дыры по-разному течет время. Согласно теории Эйнштейна время в сильном поле тяготения течет медленнее, чем в его отсутствие. Если обозначить через t время, текущее вдали от черной ды-

r от центра тяготения, будет $\tau = t \sqrt{1 - r_d/r}$. Вблизи границы черной дыры при $r \rightarrow r_d$ бег времени замирает.

Обратимся теперь к силам тяготения, действующим во внешнем пространстве.

По теории тяготения Ньютона сила, с которой сферическая масса M притягивает частицу с массой m , находящуюся на расстоянии r от ее центра, есть $F_n = GMm/r^2$, а ускорение свободного падения $a_n = GM/r^2$. Согласно теории Эйнштейна, сила тяготения, действующая на частицу, покоящуюся по отношению к тяготеющему центру (или движущуюся со скоростью малой по сравнению со скоростью света), и ускорение свободного падения выражаются соответственно формулами

$$F_g = \frac{GMm}{r^2 \sqrt{1 - r_d/r}}, \quad a_g = \frac{GM}{r^2 \sqrt{1 - r_d/r}}.$$

В теории Эйнштейна сила тяготения больше, чем в ньютоновской теории. С приближением к границе черной дыры сила тяготения стремится к бесконечности.

Указанные отличия теории Эйнштейна от теории Ньютона приводят к своеобразию движения частиц вокруг черной дыры и своеобразию распространения электромагнитных, гравитационных и других волновых полей. Прежде чем обращаться к этим особенностям, рассмотрим силы, которые действуют вокруг черной дыры, возникающей из вращающегося тела.

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

Прежде всего напомним, что согласно теории Эйнштейна поле тяготения вращающегося тела отличается от поля тяготения невращающегося тела той же массы. Поясним это отличие.

Невращающийся шар создает вокруг себя поле тяготения, аналогичное электрическому полю заряженной сферы (закон Кулона подобен закону Ньютона). Если вращать электрически заряженную сферу, то помимо электрического вокруг нее возникнет дипольное магнитное поле. Магнитное поле B не действует на покоящийся электрический заряд e . Однако если заряд движется со скоростью v , то на него начинает действовать лоренцева сила

$$F_A = [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \frac{e}{c},$$

отклоняющая заряд перпендикулярно направлению его движения.

Оказывается, в теории тяготения Эйнштейна имеется полная аналогия в этом отношении электромагнитному полю. Если тяготеющее тело завращать, то помимо сил притяжения, аналогичных кулоновским (и называемых поэтому гравиелектрическими), появляются гравитационные силы, действующие только на движущиеся массы, полностью аналогичные лоренцевым силам (и называемые гравимагнитными). Конечно, в сравнительно слабом поле тяготения обычных вращающихся тел гравимагнитные силы и вызываемые ими эффекты крайне малы. Так, напряженность гравимагнитного поля H на расстоянии r от шара радиуса r_1 массы M , вращающегося на экваторе со скоростью v_1 , составляет по порядку величины:

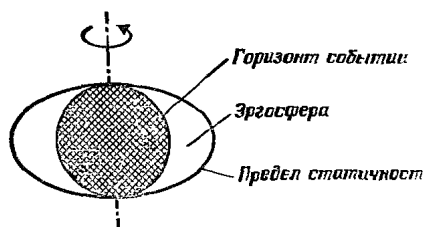
$$H \approx \frac{GMv_1r_1}{cr^3} \approx \frac{Gj}{cr^3},$$

где j — угловой момент тела. Вызываемое этим полем ускорение, действующее на частицу, летящую со скоростью v , есть: $a_{\text{л}} \approx vH/c$ (все скорости считаются малыми по сравнению со световой). Гравимагнитные силы проявляются прежде всего в том, что отклоняют падающие на тело частицы от радиального движения в сторону вращения тела. Этот эффект называют эффектом «увлечения».

Другим проявлением гравимагнитных сил является вызываемая ими прецессия (поворот) оси гироскопа по отношению к далеким звездам. Вблизи поверхности вращающейся Земли гироскоп должен прецессировать с угловой скоростью около $0,1''$ в год. В настоящее время имеется несколько проектов для экспериментального обнаружения этого эффекта.

Вернемся теперь к черной дыре, возникающей при сжатии вращающегося тела. После возникновения черной дыры во внешнем пространстве остаются помимо гравиелектрических еще и гравимагнитные силы. Поэтому такая черная дыра называется вращающейся (или керовской, по имени ученого, который в 1963 г. описал ее гравитационное поле). Вращение черной дыры

Рис. 1. Вращающаяся черная дыра



характеризуют ее гравимагнитным полем H или угловым моментом j , который связан с H уже приведенным выше соотношением $H \approx Gj/cr^3$. Вращение черной дыры не может быть сколь угодно большим. Иначе центробежные силы помешали бы сжимающемуся телу достичь размеров гравитационного радиуса и превратиться в черную дыру. Максимально возможное вращение черной дыры массой M характеризуется угловым моментом $j = GM^2/c$. По мере приближения к вращающейся черной дыре и гравиелектрические и гравимагнитные силы возрастают. Если какое-либо тело покоится относительно далеких звезд, то гравитационная сила, действующая на него, на некотором расстоянии r становится бесконечной. Подчеркнем, что в отличие от невращающейся черной дыры здесь силы становятся бесконечными еще до достижения ее границы! Бесконечной в этом месте становится и угловая скорость прецессии гироскопа. Поверхность, которая на некотором расстоянии окружает вращающуюся черную дыру и на которой силы становятся бесконечными, называют пределом статичности. Она изображена на рис. 1. Ближе предела статичности уже никакое тело не может находиться в покое относительно далеких звезд. Все тела в этой области неудержимо увлекаются во вращение вокруг черной дыры в ту же сторону, что и вращается она сама. Однако предел статичности еще не есть граница черной дыры. Частица может и влететь в него и вылететь наружу. При этом она лишь обязана двигаться в сторону вращения черной дыры. Границей же черной дыры, как мы помним, называют границу области, откуда нельзя вылететь! Эта граница расположена внутри предела статичности (см. рис. 1). Область между границей черной дыры и пределом статичности называют эргосферой. Размеры эргосферы зависят от скорости вращения черной дыры. В отсутствие вращения эргосферы нет вообще.

Длина экватора предела статичности всегда равна $2\pi r_d$, а размер горизонта событий при наличии вращения несколько меньше. При максимальном вращении длина его экватора πr_d . Напомним, что $r_d = 2GM/c^2$.

Итак, в эргосфере никакие тела не могут находиться в покое, они обязаны вращаться вокруг черной дыры. Помимо всего прочего, это обстоятельство создает трудности с измерением гравитационных сил, измерением напряженности электромагнитных и других физических полей вблизи черной дыры. Действительно, значения напряженностей полей зависят от движения наблюдателей. В эргосфере любые наблюдатели движутся, покой невозможен. Спрашивается, каких же наблюдателей выбрать в качестве основных (фундаментальных, как говорят физики), аналогов неподвижных наблюдателей в случае невращающейся черной дыры? Условились выбрать во всем пространстве в качестве фундаментальных следующих наблюдателей. Во-первых, они находятся на неизменных расстояниях от черной дыры и от оси ее вращения. Во-вторых, они вращаются вокруг оси вращения черной дыры, каждый с неизменной угловой скоростью, разной на разных расстояниях от черной дыры.

Угловая скорость фундаментальных наблюдателей выбирается следующим образом. Если в черную дыру будут падать частицы, покоящиеся вначале вдали от черной дыры (на бесконечности), то, падая, они будут увлекаться во вращение вокруг дыры. Угловую скорость наблюдателей выбирают равной угловой скорости такой падающей частицы, которая проходит мимо наблюдателей. Естественно, что эта угловая скорость возрастает при приближении к черной дыре. Оказывается, все наши падающие частицы пересекают горизонт событий с одинаковой угловой скоростью, ее и называют угловой скоростью вращения черной дыры. В специальной литературе наших фундаментальных наблюдателей иногда называют «невращающимися». Мы не будем здесь разбирать, почему возникло такое название.

Условились, что когда говорят о напряженности каких-либо полей вокруг вращающейся черной дыры, имеют в виду напряженности, измеряемые фундаментальными наблюдателями.

Теперь мы достаточно вооружены некоторыми сведениями о черных дырах, чтобы приступить к рассмотрению их как возможных энергетических машин.

КАК ИЗГОТОВИТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ

Прежде всего несколько слов о том, как можно создать черную дыру.

На первый взгляд, задача эта несложная. Надо взять какую-либо массу M и сжать ее до размеров гравитационного радиуса $r_d = 2GM/c^2$. Это, конечно, верно. Однако, дело чрезвычайно осложнено тем, что величина гравитационного радиуса ничтожно мала, даже для больших масс (r_d пропорционален массе). Так, если взять массу небольшой горы, то ее пришлось бы сжать до размера атомного ядра! Разумеется, не может быть и речи об искусственном создании черных дыр в современных лабораториях или в лабораториях обозримого будущего.

Даже если бы мы взяли массу Земли ($6 \cdot 10^{27}$ г), то ее пришлось бы сжать до размеров 1 см, а массу Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) — до размеров 3 км.

Но оказывается, природа сама позаботилась о возможности возникновения черных дыр, правда, достаточно большой массы. Такие черные дыры могут возникать в конце жизни достаточно массивных звезд.

Мы не будем здесь сколь-нибудь подробно говорить об эволюции звезд и о том, что их ждет в конце жизненного пути. Читатель опять же может узнать об этом из книг, приведенных в списке литературы. Для нас достаточно будет сказать, что если звезда в самом конце активной эволюции, уже после исчерпания ядерного горючего, имеет массу, скажем, в десять масс Солнца и более, то весьма вероятно, силы собственного тяготения сжимают ее до размеров гравитационного радиуса и превращают в черную дыру. Более того, первые черные дыры во Вселенной, возникшие из звезд, вероятно, уже открыты астрономией. О методах их поисков и открытий мы несколько подробнее скажем далее в связи с одним из способов выделения энергии с помощью черной дыры. Наконец, весьма вероятно, как мы уже говорили, что сверхмассивные черные дыры с массой от 10^4 до 10^8 масс Солнца и более возникают в центрах галактических ядер. Возможно также, что во Вселенной есть черные дыры и другой природы.

Таким образом, в будущем в первую очередь, вероятно, будут использоваться черные дыры естественного происхождения. Мы в дальнейшем изложении не станем

останавливаться на многих технических деталях, сосредоточив внимание на принципиальных вопросах.

ПРОСТЕЙШАЯ МАШИНА

Для наглядности представим себе полуфантастическую картину. Черная дыра, скажем с массой с 10 масс Солнца и радиусом около 30 км, окружена искусственной сферой на достаточно большом расстоянии (~ 10 млн. км), где поле тяготения уже слабо, с тем чтобы на поверхности этой сферы ускорение силы тяжести было невелико и могла существовать цивилизация.

Самый простой способ использования гигантского поля тяготения черной дыры заключается в следующем.

Будем опускать в черную дыру какой-либо груз массой m , закрепленный на прочном канате. Считаем для простоты, что канат имеет пренебрежимо малую массу. Второй конец каната намотан на вал маховика. Груз, опускаясь к черной дыре, будет раскручивать маховик. Энергию маховика можно использовать для работы динамомашинны или аккумулировать любым другим способом (растягивая пружины и т. д.).

Пусть для простоты черная дыра не вращается. Тогда при медленном опускании груза m до радиуса r выделится энергия, равная

$$\Delta E = mc^2(1 - \sqrt{1 - r_d/r}).$$

Если мы опустим груз вплотную к горизонту событий $r \approx r_d$, то выделится энергия $\Delta E \approx mc^2$. Таким образом, при этом будет выделена практически вся внутренняя энергия груза, которая по формуле Эйнштейна и есть mc^2 ! Стопроцентное извлечение энергии из массы m ! Никакие термоядерные источники энергии не могут сравниться с подобной машиной! Так, при превращении водорода в гелий в будущих управляемых термоядерных реакциях выделяемая энергия не превышает одного процента от mc^2 .

Если сравнивать нашу машину с более привычными источниками энергии, то можно сказать, что при опускании 1 г груза выделяется столько же энергии, сколько дает падение 100 млн. т воды с плотины высотой 100 м. Заметим теперь следующее. Если мы медленно опускаем груз почти к самой дыре, то сила тяготения, действующая на груз, стремится к бесконечности. Груз будет тя-