

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Квантовая теория черных дыр

*Методические рекомендации к курсам «оптика», «нелинейная оптика»,
«квантовая теория света», «физика лазеров» физического факультета*

Красноярск 2004

Составители: Ю.И. Геллер, И.В. Жабрун, Д.Е.Совков.

Квантовая теория черных дыр: Метод рекомендации /Краснояр. гос. ун-
т; Сост. Ю.И. Геллер, И.В. Жабрун, Д.Е. Совков. Красноярск, 2003. 10 с.

Описаны основные моменты квантовой теории черных дыр, а также
наиболее связанных с ними явлений и объектов.

Предназначено для студентов физического факультета.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного университета.

© Красноярский
государственный
университет, 2004
© Ю.И. Геллер
© И.В. Жабрун
© Д.Е. Совков

Квантовая теория чёрных дыр занимается главным образом исследованием эффектов рождения частиц и поляризации вакуума в гравитационном поле черных дыр. Основной результат состоит в том, что не вращающаяся черная дыра массы M излучает рождённые кванты как термодинамически равновесное (не абсолютно чёрное) тело с температурой $T_{\text{чд}}$ (масса M выражена в г):

$$kT_{\text{чд}} = \hbar c^3 / 8\pi GM \approx k \cdot 10^6 M^{-1} K \approx 10^{16} M^{-1} \text{МэВ} \quad (1)$$

и в результате «испаряет» в окружающее пространство свою массу — энергию [эффект Хокинга (S. Hawking), 1974]. Рождение частиц происходит из-за существования *горизонта событий* черных дыр и нестатичности метрики пространства-времени под горизонтом. Излучение рождённых частиц чёрной дырой подчиняется *закону Кирхгофа*. Спектр излучения черной дыры близок к чернотельному; отличие связано с тем, что чёрная дыра не является абсолютно поглощающей для падающего на неё излучения (или квантовых частиц) с длиной волны $>$ гравитационного радиуса черной дыры (излучение частично рассеивается внешним гравитационным полем черной дыры). Для черной дыры с массой порядка массы Солнца эффект количественно ничтожен, но важен в принципиальном отношении, т. к. приводит к конечности времени существования черной дыры $t_{\text{чд}} \approx 10^{-27} M^3$ (в секундах). Эффект Хокинга мог бы быть наблюдаем непосредственно для черных дыр с малой массой $M \sim 10^{15}$ г, находящихся достаточно близко от Земли. Такие черные дыры не могут возникнуть в результате коллапса звёзд, но они могли образоваться на ранних стадиях эволюции Вселенной (т.н. первичные черные дыры). Первичные черные дыры с начальной массой $M \sim 10^{16}$ г. должны были испариться к настоящему моменту, более массивные черные дыры остаются практически неизменными. Черные дыры с $M \sim 10^{15}$ г в стационарном режиме испарения являются источниками γ -излучения, ультрарелятивистских электронов и позитронов с характерными энергиями

$E \approx 5kT_{\text{чд}} - 50 \text{ МэВ}$. Мощность, излучаемая таким объектом в виде фотонов, должна быть равна $P_v \approx 6 \cdot 10^8 (M/10^{15})^{-2}$ Вт, а в виде e^\pm — в 5 раз больше. С течением времени, вследствие уменьшения массы черной дыры, скорость её испарения возрастает. Процесс завершается «квантовым взрывом» черной дыры, когда за последнюю секунду её жизни выделяется энергия 10^{23} Дж.

Для вращающейся черной дыры кроме эффекта Хокинга существует и другой эффект рождения частиц, связанный с наличием у нее *эргосферы*. Как показывает расчёт, излучение рождённых частиц вращающейся черной дыры под суммарным действием обоих эффектов сохраняет тепловой характер с эффективной температурой $T_{\text{чд}}$, которая получается из (1) заменой M на $\frac{1}{2}M(1 + M/\sqrt{M^2 - a^2})$, $a = Jc/GM < M$, где J — полный угловой момент черной дыры.

Квантовые гравитационные эффекты приводят также к кардинальной перестройке внутреннего строения вращающихся или электрически заряженных черных дыр под их горизонтом событий (при этом исчезают т.н. *Каши горизонты*), к запрету на образование *белых дыр* во Вселенной и к существованию нижнего предела массы у черной дыры (в том числе у первичных черных дыр): $M > m_{pl}$. Возможно, что при $M \sim m_{pl}$ возникают объекты, промежуточные по своим свойствам между черной дырой и элементарными частицами, например *максимоны* М. А. Маркова.

В настоящее время поиски анизотропии реликтового электромагнитного излучения с мультипольной зависимостью или излучения от первичных черных дыр (если они существуют) являются наиболее, перспективными с точки зрения обнаружения первых наблюдаемых следствий эффектов квантовой теории гравитации.

Эргосфера — область вблизи вращающихся компактных релятивистских объектов (нейтронных звёзд или чёрных дыр), находящаяся внутри поверхности бесконечного гравитационного красного смещения для

источника, покоящегося относительно инерциального наблюдателя на пространственной бесконечности. В случае вращающейся чёрной дыры, описываемой метрикой Керра (Керра пространство-время), эргосфера лежит между поверхностью бесконечного красного смещения $g_{00} = 0$, или $r^2 - 2Mr + a^2 \cos^2 \Theta = 0$, и горизонтом событий $r = r_+ = M + \sqrt{M^2 + a^2}$ (в системе единиц, где скорость света и гравитационная постоянная равны 1). Внутри эргосферы никакое физическое тело не может покоиться относительно удалённого наблюдателя, оно должно вращаться вокруг компактного объекта в ту же сторону, что и он сам. Существование эргосферы является специфическим гравитационно-релятивистским эффектом, отсутствующим в теории ньютоновской гравитации.

При нестационарном движении физических объектов внутри эргосферы их полная энергия, измеренная относительно удалённого наблюдателя, может быть отрицательной. Это даёт возможность отнимать энергию вращения от компактных релятивистских объектов посредством разложения физических процессов (процесса Пенроуза – распада влетевшего в эргосферу тела на две или более частей с последующим вылетом одного из осколков из эргосферы, эффекта суперрадиации – усиления электромагнитных и гравитационных волн при рассеянии на вращающейся чёрной дыре, аккреции замагниченной плазмы и др.). В ходе этих процессов вращение релятивистских объектов замедляется, а их эргосфера сжимается (но площадь поверхности горизонта событий чёрной дыры всегда возрастает).

Горизонт событий в теории чёрных дыр и в общей теории относительности – граница области в пространстве-времени, в которой сигналы, распространяющиеся со скоростью света, полностью удерживаются тяготением и не могут уйти в бесконечность во внешнем пространстве. Горизонт событий возникает при гравитационном коллапсе, приводящем к образованию чёрной дыры, когда усиливающееся гравитационное поле

перестаёт выпускать наружу даже лучи света. Горизонт событий является границей чёрной дыры. Если чёрная дыра не вращается, то горизонт событий совпадает со сферой Шварцшильда – сферой с радиусом, равным гравитационному радиусу $r_g = 2GM/c^2$, где M – масса чёрной дыры, G – гравитационная постоянная. Вращение чёрной дыры деформирует горизонт событий, оставляя его размеры по порядку величины теми же.

Белая дыра — гипотетический космический объект, эволюция которого представляет собой обращённый во времени гравитационный коллапс небесного тела с образованием чёрной дыры. Предсказание возможности существования белой дыры (И. Д. Новиков, 1964) следует из общей теории относительности. Вещество, находившееся первоначально внутри белой дыры, с течением времени расширяется и выходит из-под гравитационного радиуса белой дыры («взрыв» белой дыры); весь этот процесс является видимым для удалённого наблюдателя. Белые дыры в расширяющейся Вселенной могут реализовываться как ядра вещества, задержавшиеся в общем космологическом расширении из-за локальной неоднородности начальных условий. В первоначальных, идеализированных моделях белой дыры, величина задержки расширения вещества белой дыры, отсчитанная от начала общего космологического расширения, могла быть произвольной. В связи с этим в прошлом делались попытки привлечь белые дыры к объяснению таких явлений, как активность квазаров и ядер галактик. Однако в 1974 году было выяснено, что аккреция белой дыры окружающего её вещества и квантово – гравитационные эффекты, возникающие в сильных гравитационных полях внутри белой дыры (Квантовая теория гравитации), препятствуют взрыву белой дыры и заставляют вещество белой дыры оставаться внутри неё, если время задержки существенно превышает r_g/c , где r_g – гравитационный радиус белой дыры [Я. Б. Зельдович, и. Д. Новиков, А. А. Старобинский; Д. Эрдли (D. Eardley)]. Образующийся при этом объект совпадает по своим наблюдательным свойствам с чёрной дырой,

отличаясь от неё только историей, своего происхождения и некоторыми деталями внутреннего строения; применительно к нему названия «белой дыры» приобретают условный характер. Те белой дыры, которые могли бы существовать во Вселенной в настоящее время, принадлежат к объектам последнего типа и не взрываются.

Коши горизонт – поверхность, являющаяся границей области причинной предсказуемости физических явлений в будущем по начальным данным (начальным условиям), заданным на некоторой пространственноподобной трёхмерной поверхности (частичной поверхности Коши). Термин «Коши горизонт» был введён в 1966 Р. Пенроузом (R. Penrose) и С. Хокингом (S. Hawking) при исследовании задачи Коши (т.е. задачи определения значений физических полей, включая гравитационное, по начальным данным на поверхности Коши) в общей теории относительности. За Коши горизонтом однозначные предсказания ни в классической, ни в квантовой теории невозможны, поскольку часть необходимой информации может приходиться туда из других областей пространства, не пересекающихся с начальной частичной поверхностью Коши. Коши горизонт представляет собой трёхмерную поверхность с нулевым геодезическим интервалом, т. е. он образован траекториями световых лучей. В пространстве-времени Минковского существование Коши горизонта вызвано только тем, что частичная поверхность Коши, по отношению к которой он определён, имеет край (иначе говоря, начальные условия заданы не во всём пространстве). Для максимально расширенной поверхности Коши в пространстве-времени Минковского, примером которой является трёхмерная поверхность $t = \text{const}$ в инерциальной системе отсчёта, Коши горизонт отсутствует и область причинной предсказуемости совпадает со всем пространством-временем. В этом случае поверхность Коши называется глобальной.

Принципиально иная ситуация с Коши горизонтом имеет место в общей теории относительности (ОТО) ввиду того, что пространство-время в этой теории может обладать сложной топологической структурой. В решениях

ОТО Коши горизонты могут сохраняться даже при максимальном, непрерывном расширении любой частичной поверхности Коши. Такие Коши горизонты являются уже свойством пространства-времени в целом. Их существование однозначно связано с отсутствием глобальной причинной предсказуемости. Обычно, говоря о Коши горизонте в каком-нибудь искривлённом пространстве-времени, имеют в виду именно эти Коши горизонты. В частности, решения ОТО, описывающие идеализированные вращающиеся или электрически заряженные чёрные дыры, обладают Коши горизонтом, определённым по отношению ко всему трёхмерному асимптотически евклидову пространству, в котором находится чёрная дыра; при этом Коши горизонт всегда находится под горизонтом событий чёрной дыры и, таким образом, не виден внешнему наблюдателю. Для этих решений нельзя также построить глобальную поверхность Коши.

С принципиальной точки зрения существование Коши горизонта даже для максимально расширенных частичных поверхностей Коши и отсутствие глобальной причинной предсказуемости для некоторых решений ОТО — нежелательное свойство. Однако теоретические исследования (Р. Пенроуз, И. Д. Новиков и А. А. Старобинский и др.) показали, что Коши горизонт внутри идеализированных (стационарных) вращающихся или заряженных чёрных дыр неустойчив как по отношению к малым нестационарным гравитационным возмущениям, так и вследствие квантового эффекта рождения пар элементарных частиц гравитационным или электрическим полем чёрной дыры (Квантовая теория гравитации). Поэтому можно полагать, что внутри реальных чёрных дыр, возникающих в результате коллапса первоначально регулярного распределения вещества, Коши горизонт не образуется и имеет место глобальная причинная предсказуемость.

Максимон — название гипотетической частицы максимально большой массы в спектре масс элементарных частиц. Другими словами, термин «максимон» (М. А. Марков, 1965) [7] предполагает, что спектр элементарных частиц ограничивается сверху массой определенного значения. По своему

положению предельной частицы в спектре масс элементарных частиц максимум должен обладать некоторыми свойствами, связанными с фундаментальными параметрами, характеризующими свойства материи. Можно полагать, что не случайно из мировых констант c , \hbar , G (гравитационная постоянная) можно единственным, образом построить величину с размерностью массы, а именно:

$$m \sim \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim 10^{-5} \text{ г}. \quad (2)$$

Предположено [7], что выражением (2) определяется масса максимона

$$b_{\text{max}} = \alpha \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}, \text{ где } \alpha \sim 1 \quad (3)$$

(вообще говоря, α должна определяться из квантовой теории гравитации и, в конце концов, экспериментально). Частица такой массы – максимум – действительно обладает рядом свойств, которые, в известном смысле, носят «предельный» характер. Так, её гравитационный радиус ($r_{\text{gp}} \sim m_{\text{max}} G / c^2$) оказывается равным комптоновской длине волны этой частицы

$$\lambda_c / 2\pi = \frac{\hbar}{m_{\text{max}} c} \sim \frac{m_{\text{max}} G}{c^2}. \quad (4)$$

Массу максимона можно получить из равенства (4), которое является предельным значением неравенства

$$\lambda_c / 2\pi \geq r_{\text{gp}} \quad (6)$$

Этому неравенству, по-видимому, удовлетворяют все частицы, фигурирующие в литературе под термином «элементарные» [8]. При массе $m > m_{\text{max}}$ условие (5) не выполняется и такая частица выпадает из списка элементарных.

Физическая реальность максимона в такой же мере (или даже более) несомненна, как и существование распадающихся чёрных дыр [5]. Если чёрные дыры существуют и распадаются за счёт хокинговского излучения,

то, достигая в процессе распада массы — 10^{-5} г, они становятся по своим свойствам максимонами с указанными выше параметрами. Вся масса максимона заключена под сферой Шварцшильда с радиусом $m_{\text{gp}} \sim mG/c^2$ с плотностью, выражаемой также через мировые константы,

$$\rho_{\text{max}} \sim \frac{m_{\text{max}}}{r_{\text{gp}}^3} \sim \frac{c^5}{\hbar G^2} \sim 10^{94} \text{ г/см}^3. \quad (5)$$

Можно предполагать, что данная плотность материи представляет собой то же предельное значение, возможное при коллапсе звёзд и Вселенной (Марков, 1982 [9], Н. Розен, 1985 [10]).

Теоретически максимумы – богатое разнообразием семейство частиц. Они могут быть как электрически заряженными, так и нейтральными, обладать спином, внутренней предельно большой температурой или быть абсолютно холодными [11], представляться чёрной дырой как 1-го рода, так и 2-го рода («серой дырой») [10]. Вопрос о возможной стабильности некоторых из них является пока открытым. Наличие стабильных максимумов могло бы решить астрофизическую проблему скрытой массы.

Литература

1. Зельдович Я.В., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. - М., 1975.
2. Общая теория относительности: Пер. с англ. /Под ред. С. Хокинга, В. Израэля. - М., 1983.
3. Биррелл Н., Девис П. Квантованные поля в искривленном пространстве-времени: Пер. с англ. М., 1984.
4. Линде А.Д. Раздувающаяся Вселенная. //Успехи физических наук. – 1984. Т. 144. С. 177.
5. Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика чёрных дыр. - М., 1986.
6. Мизнер Ч., Торн К., Уиллер Дж. Гравитация: Пер. с англ. Т. 3, М., 1976.
7. Markov M.A. Can the gravitational field prove essential for the theory of elementary particles. //Progr. Theor. Phys. Suppl. Extra number. 1965. P. 85; Марков М.А. Элементарные частицы максимально больших масс (кварки, максимоны) //ЖЭТФ. – 1966. Т. 51. С. 878.
8. Марков М.А. О «Максимоне» и «минимоне» в свете возможной формулировки «элементарной частицы». //Письма в ЖЭТФ – 1987. Т. 45. С. 115.
9. Марков М.А. Предельная плотность материи как универсальный закон природы. //Письма в ЖЭТФ. – 1982. Т. 36. С. 214.
10. Rosen N. General relativity cosmological models without the big bang. //Astrophys. J. – 1985. Vol. 297. P. 347.
11. Марков М.А. О природе материи. - М., 1976. С. 210.
12. Черные дыры. Сб. статей. - М.: Мир, 1978. - 324 с.
13. Черные дыры мембранный подход. /Под ред. К. Торна и др. М.: Мир. 1988. - 432 с.

Учебное издание

**Юрий Исаевич Геллер
Игорь Валентинович Жабрун
Денис Евгеньевич Совков**

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

Методические рекомендации

Редактор А.А. Назимова
Корректор Т.Е. Бастрыгина
Лицензия ЛР № 020372 от 29.01.1997 г.

Подписано в печать 21.05.2004

Тиражируется на электронных носителях

Заказ 301

Дата выхода 16.06.2004

Адрес в Internet: www.lan.krasu.ru/studies/editions.asp

Отдел информационных ресурсов управления информатизации КрасГУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. 22-05, e-mail: info@lan.krasu.ru

Издательский центр Красноярского государственного университета
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: rio@lan.krasu.ru