

полностью) возможен также вариант, когда после испарения черной дыры остается невыгоревший остаток. В качестве такого остатка могла бы образовываться элементарная черная дыра с массой порядка планковской*). (На рис. 89 этому случаю отвечало бы, например, такое поведение линии уровня $F = 0$, при котором внешняя и внутренняя части этой линии неограниченно продолжаются по координате v , близко сближаясь или даже слияясь друг с другом.) Анализ сферически-симметричного коллапса системы с массой, меньшей планковской, показывает, что квантовые эффекты и, в частности, эффект поляризации вакуума приводят к тому, что "усредненная метрика" $g_{\mu\nu} = \langle \hat{g}_{\mu\nu} \rangle$, описывающая геометрию, в этом случае является всюду регулярной и горизонт видимости (а следовательно, и горизонт событий) вообще не образуется [Фролов, Вилковыский (1979, 1981, 1982)]. Этот результат указывает на то, что черные дыры с массой, меньшей планковской, не могут существовать, т.е. элементарные черные дыры, если они существуют, должны иметь массу порядка планковской. Впервые свойства подобных объектов, получивших название максимонов, были рассмотрены Марковым (1966*) [см. также Хокинг (1971a)].

§ 13.4. Элементарные черные дыры (максимоны).

Виртуальные черные дыры и пенная структура пространства-времени

Вопрос об устойчивости максимонов относительно квантового распада — один из основных для гипотезы об их существовании. Температура классической черной дыры формально обращается в нуль, если ее параметры — электрический (Q) и магнитный (P) заряды**) и угловой момент (J) —

*) Отметим, что существование в природе тяжелых магнитных монополей, предсказываемых в теориях Великого объединения, могло бы иметь любопытное следствие для малых черных дыр [Гиббонс (1977), Хискок (1983)]. Экстремальная (с магнитным зарядом) черная дыра массы $M > 150 \cdot (10^{17} \text{ гЭВ}/\mu)^2$ (μ — масса монополя в ГэВ) обладала бы временем жизни, большим времени жизни Вселенной, поскольку хокинговская температура такой дыры равна нулю, а процесс рождения монополей подавлен из-за их большой массы.

**) Отметим, что заряженные элементарные черные дыры представляют большой интерес при исследовании проблемы собственной энергии заряженных частиц. В рамках классической теории гравитационный дефект масс приводит к тому, что наблюдаемая на бесконечности масса M отличается от внутренней массы M_0 системы. Если система нейтральна, то при фиксированном значении M_0 возможны такие конфигурации, для которых M сколь угодно мало [Зельдович (1962а*)] или тождественно обращается в нуль (например, в том случае, когда масса M_0 образует замкнутый мир). Для заряженных (с зарядом Q) систем значение M ограничено снизу величиной Q/\sqrt{G} (P/\sqrt{G} — для магнитного заряда) [Арновитт и др. (1963), Марков, Фролов (1970*, 1972*), Гиббонс, Халл (1982), Людвигсен, Викерс (1983)]. Для электрона масса e/\sqrt{G} равна $1,86 \cdot 10^{-6}$ г, что почти на порядок (на фактор $(\hbar c/e^2)^{1/2} \approx 11,7$) меньше значения планковской массы. Подобные классические решения, описывающие заряженные элементарные черные дыры, получили название "фридмонов". Их свойства подробно обсуждаются в работах Маркова, Фролова (1970*, 1972*).

связаны с массой M черной дыры соотношением

$$M^2 = \frac{Q^2 + P^2}{G} + \frac{J^2 c^2}{G^2 M^2}. \quad (13.4.1)$$

Модификация уравнений Эйнштейна – Максвелла из-за квантового эффекта поляризации вакуума может привести к изменению условия (13.4.1) обращения в нуль температуры черной дыры. Нельзя исключить также возможность, что при учете этих эффектов обратится в нуль температура и для нейтрального максимона. К сожалению, это еще не решает вопроса об устойчивости черной дыры относительно квантовых процессов. Дело в том, что максимоны (если они существуют) обладают минимально допустимой для черных дыр массой и потеря ими сколь угодно малой массы приводит к их полному развалу. При таком процессе естественно ожидать появления квантов с характерной энергией $\epsilon \sim m_p c^2$, для которых длина волны $\lambda \sim \hbar c / \epsilon$ сравнима с их гравитационным радиусом. При этих условиях приближение, основанное на малости влияния рожденных частиц на метрику, по-видимому, несправедливо.

В целом ответ на вопрос о существовании и устойчивости максимонов связан с поведением физических взаимодействий при энергиях, сравнимых с планковскими, и поэтому следует ожидать окончательного решения этого вопроса лишь после построения теории квантовой гравитации. Возможно, он найдет свое естественное решение в рамках единой теории всех взаимодействий (основанной, например, на одном из вариантов теории супергравитации или теории струн).

Если элементарные черные дыры существуют в природе, то они обладают рядом удивительных свойств [Марков (1966 *)]. Их характеризует крайне малое сечение взаимодействия – порядка 10^{-66} см^2 . При падении максимона в поле тяготения Земли он приобретает энергию порядка 10^{20} эВ. Однако, поскольку скорость его движения невелика, то, по-видимому, наблюдать максимоны по их ионизующей способности невозможно, даже если они заряжены и их взаимодействие с веществом достаточно сильное. Максимоны трудно удерживать и накапливать в обычном веществе на поверхности Земли, поскольку на длине межмолекулярного расстояния обычного вещества гравитационное поле Земли сообщает им энергию $\sim 10^3$ эВ, что значительно больше энергии взаимодействия молекул.

Малость сечения взаимодействия нейтральных максимонов с веществом приводит к тому, что значительная (или даже основная) часть материи во Вселенной в настоящее время могла бы состоять из максимонов, не приводя к противоречию с наблюдениями. В частности, максимоны могли бы играть роль невидимого вещества, существование которого признается в настоящее время в космологии [Марков (1981б) *].

По-видимому, наиболее перспективным методом поиска максимонов следует считать метод, основанный на регистрации продуктов их распада.

*) Имеется возможность получить сильные ограничения на допустимую среднюю плотность максимонов во Вселенной с помощью соображений, аналогичных тем, которые используются при выводе ограничения на число монополей и других массивных частиц [см., например, Полнарев, Хлопов (1985 *)].

Если допустить существование связанный системы многих максимонов [Марков, Фролов (1979*)] или малого их числа – например, пары [Аман (1983)] – то при эволюции таких систем возможно слияние пары максимонов в один с выделением энергии порядка 10^{28} эВ. Такого типа процессы могли бы, по-видимому, регистрироваться в экспериментах типа ДЮМАНД [более подробно об этом см. Марков (1981а), Марков, Железных (1981)].

Стабильные максимоны являются максимальными тяжелыми фундаментальными частицами [Марков (1976*, 1981с)]. Если связать с размером частицы ее комптоновскую длину волны $\lambda = \hbar/mc$, то для частиц с массой $m > m_{Pl}$ этот размер оказывается меньшим, чем ее гравитационный радиус *). Имеется и другая причина, по которой элементарные черные дыры, даже если они нестабильны, важны для теории элементарных частиц. Дело в том, что при проведении расчетов в современной квантовой теории, в частности, при вычислении собственной энергии частиц обычно учитывают вклад промежуточных состояний с произвольно большой энергией, что приводит к появлению известных расходимостей. Учет гравитационного взаимодействия соответствующих виртуальных частиц и возможности появления виртуальных (короткоживущих) черных дыр в промежуточном состоянии может привести к устранению этих расходимостей [Марков (1971)].

Виртуальные черные дыры могут возникать и в вакууме в результате квантовых флуктуаций. Квантовые флуктуации гравитационного поля тем больше, чем меньше масштабы длин. На расстояниях порядка планковских флуктуации метрики сравнимы с самой метрикой. Подобные флуктуации означают возможность сильных отклонений от плоской геометрии и евклидовой топологии. Иными словами, из-за непрерывного рождения и уничтожения виртуальных черных дыр пространство-время в малых масштабах напоминает мыльную пену.

Представление о пенной структуре пространства-времени, сформулированное в 50-х годах Уилером, в последние годы получило развитие в работах Хокинга и его группы [Хокинг (1978, 1984), Хокинг и др. (1979, 1980), Уорнер (1982)].

Среди интересных приложений этих идей отметим: 1) возможное нарушение квантовой когерентности и превращение чистого состояния в смешанное из-за взаимодействия квантованного поля с флуктуациями гравитационного и 2) несохранение барионного и лептонного зарядов в процессе взаимодействия элементарных частиц с виртуальными черными дырами (с пространственно-временной "пеной") [Хокинг (1984)]. И хотя ожидаемое время жизни протона относительно этого процесса на много порядков превосходит предсказываемое в рамках теорий Великого объединения, сама возможность подобных процессов может иметь фундаментальное значение, особенно при обсуждении вопроса о происхождении Вселенной.

) Отметим, что планковская длина в этой ситуации выполняет роль своеобразной фундаментальной длины. Можно показать [Гинзбург (1975), Гинзбург, Фролов (1976*)], что в самом общем случае появление фундаментальной длины приводит к ограничению снизу спектру существующих черных дыр.