

может излучать только безмассовые частицы. В этом случае $C = 2,83 \cdot 10^{-4}$. В поле чёрной дыры массой $5 \cdot 10^{14} \text{ г} \ll M \ll 10^{17} \text{ г}$ могут рождаться ультрарелятивистские электроны и позитроны и $C = 4,466 \cdot 10^{-4}$. Время жизни Ч. д.

$$\tau = \frac{1}{3C} \frac{M^3}{\hbar} = \begin{cases} 1,9 \cdot 10^{17} \left(\frac{M}{10^{17} \text{ г}}\right)^3 \text{ лет при } M \gg 10^{17} \text{ г} \\ 1,5 \cdot 10^{10} \left(\frac{M}{5 \cdot 10^{14} \text{ г}}\right)^3 \text{ лет при } 5 \cdot 10^{14} \text{ г} \ll M \ll 10^{17} \text{ г} \end{cases}$$

При дальнейшем уменьшении массы Ч. д. и росте её темп-ры растёт число типов излучаемых частиц и коэф. С. Конечный этап испарения должен протекать как мощная вспышка гамма-излучения (длительностью $\sim 0,1 \text{ с}$ для $M \sim 10^9 \text{ г}$).

При полном испарении Ч. д. её энтропия уменьшается до нуля. Расчёты энтропии, заключённой в испарившихся квантах, дали величину $S_{\text{изл}} \approx (4/3) S_H$. Т. о., квантовое испарение Ч. д. является необратимым процессом. При рождении пар заряж. частиц в поле заряж. Ч. д. её электр. заряд также уменьшается практически до нуля.

Существенные особенности физики вращающихся Ч. д. связаны с наличием эргосферы. Так называется область, заключённая между поверхностью $S_m [g_{00} = 0, \text{ ф-ла (3)}]$ и поверхностью горизонта событий S_+ (рис. 4). Здесь могут разыгрываться события, сопровождаемые непосредственным извлечением энергии вращения чёрной дыры. При переходе через поверхность S_m величина g_{00} меняет знак и становится отрицательной. Поэтому энергия частицы с 4-скоростью u^a , $\mathcal{E} = m(g_{00}u^0 + g_{0k}u^k)$ может оказаться отрицательной. Геодезические с $\mathcal{E} < 0$ целиком заключены внутри эргосферы,

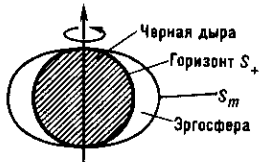


Рис. 4.

поэтому никакая свободная движущаяся частица не может попасть на такую геодезическую извне. Однако она может появиться в результате распада влетевшего в эргосферу тела, причём др. фрагмент расставшегося тела может уйти на бесконечность, унося с собой часть энергии вращения Ч. д. Такой механизм извлечения энергии из вращающейся Ч. д. был найден Р. Пенроузом (R. Penrose) в 1969.

Волновым аналогом процесса Пенроуза является суперрадиационное рассеяние волн вращающейся Ч. д. Впервые на такую возможность указал Зельдович в 1971, рассматривая рассеяние эл.-магн. волн на вращающемся с угл. скоростью Ω проводящем цилиндре; в этом случае волна с азимутальным квантовым числом m и частотой ω будет усилена при отражении от цилиндра, если $\omega < m\Omega$, а энергия и угл. момент отражающего тела уменьшатся. Зельдович показал, что аналогичный эффект должен иметь место при рассеянии волн на вращающейся Ч. д. и при квантовом рассмотрении должно происходить спонтанное излучение энергии и угл. момента за счёт рождения пар фотонов внутри эргосферы с последующим поглощением одного из них дырой и излучением другого на бесконечность. Коэф. отражения эл.-магн. волн вращающейся Ч. д. на неск. процентов больше единицы и достигает максимума (1,044) при $\omega \rightarrow m\Omega_+$ (А. А. Старобинский, С. М. Чурилов, 1973). Гравитац. волна может быть усилена более чем вдвое. Коэф. отражения равен 2,38 при $a=1, l=m=2$ и $\omega \rightarrow m\Omega_+$. Эффект усиления гравитац. волн приводит к существованию вблизи вращающейся Ч. д. «плавающих» орбит, на к-рых энергетич. потери на излучение гравитац. волн в точности компенсируются энергией, извлекаемой из Ч. д. за счёт суперрадиационного рассеяния.

В процессах Пенроуза и суперрадиационного рассеяния площадь поверхности горизонта не уменьшается, поскольку расходуется только энергия вращения Ч. д.

Квантовое рождение частиц в поле вращающейся Ч. д. сопровождается потерей как угл. момента, так и массы:

$$\frac{dI}{dt} \sim -\hbar\Omega_+, \quad \frac{dM}{dt} \sim -\hbar\Omega_+^2.$$

Квантовая темп-ра вращающейся Ч. д. определяется ф-лой

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k M} \cdot \frac{(r_+^2 - a^2)}{r_+^2}.$$

Численные расчёты квантового испарения (с учётом суперрадиации) показывают, что: вращающаяся Ч. д. испаряется тем быстрее, чем быстрее она вращается; угл. момент излучается существенно быстрее, чем масса; испарение увеличивает энтропию быстровращающейся Ч. д., но уменьшает энтропию медленно вращающейся Ч. д.; суммарная энтропия Ч. д. и окружающей Вселенной увеличивается.

Применение термодинамич. методов в квантовой физике Ч. д. оказывается исключительно плодотворным, особенно если учесть, что Ч. д. не имеет никакого нерелятивистского предела вообще и что не существует пока последовательных теорий, объединяющих ОТО с квантовой механикой.

В 1985 началось развитие статистич. механики Ч. д., позволяющее использовать мощные статистич. методы для исследования стабильности Ч. д. как самогравитирующих квантовых систем.

В последнее время (К. Maeda et al, 1994) стали применяться методы теории катастроф для детального исследования связи физики Ч. д. с физикой элементарных частиц, рассматриваемых как локализованные частицеподобные решения нелинейных полевых ур-ний.

Фундам. проблемой физики Ч. д. является проблема сингулярности внутри Ч. д. Качественно это означает, что в конце коллапса всё коллапсировавшее вещество (массой от $\sim 10 M_\odot$ до $\sim 10^9 M_\odot$) сжимается в точку ($r=0$), в к-рой, следовательно, плотность становится бесконечной. Математически, при $r \rightarrow 0$ все инварианты тензора кривизны $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ стремятся к бесконечности. Поэтому само понятие пространства-времени теряет смысл в сингулярности.

Неизбежность сингулярности следует из теорем, доказанных в кон. 60-х гг. Одним из условий образования сингулярности является сильное энергетич. условие Хокинга и Пенроуза (1969), согласно к-рому для любого времениподобного вектора u^a

$$\left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}T\right)u^a u^b \geq 0, \quad (6)$$

где $T_{\alpha\beta}$ — тензор энергии-импульса материи, $T = T^\alpha_\alpha$ — его след.

Условие (6) гарантирует, что материя не препятствует монотонному сжатию геодезических, и означает, что в гравитац. коллапсе, когда гравитация становится доминирующей, она ведёт к неогранич. сжатию.

Для локального наблюдателя в его сопутствующей системе отсчёта условие (6) принимает вид $\epsilon + \sum_{k=1}^3 p_k \geq 0$, где ϵ — плотность энергии, а $p_k = -T^k_k$ — гл. давления. В изотропном случае это означает, что $\epsilon + 3p \geq 0$, причём величина $(\epsilon + 3p)$ определяет ускорение в ОТО

$$g = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\epsilon + 3p).$$

Т. о., условие (6) гарантирует, что гравитация всегда действует как притяжение.

Сильное энергетич. условие не следует из фундам. принципов, а базируется на гипотезе, что можно экстраполиро-