СТАЦИОНАРНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

§ 6.1. "Черные дыры не имеют волос"

Световой характер горизонта событий, ограничивающего черную дыру, приводит к тому, что он выполняет роль односторонней мембраны. Частицы и излучение могут пересечь горизонт событий извне и попасть внутрь черной дыры, однако выход частиц и излучения наружу запрещен. Поэтому для процессов с участием черных дыр характерна существенная необратимость. В частности, черная дыра, предоставленная самой себе, с течением времени становится стационарной. Стандартные рассуждения, приводящие к этому выводу, сводятся к следующему. Пусть в процессе коллапса образуется черная дыра и возникшая конфигурация полей и частиц вне ее не является равновесной. Тогда конфигурация начнет перестраиваться. Этот процесс сопровождается излучением энергии на бесконечность и внутрь черной дыры. Поскольку поля и частицы вне черной дыры имели первоначально конечную энергию, а энергия, излученная на бесконечность или поглощенная черной дырой, ничем не компенсируется, то можно ожидать, что со временем этот процесс прекращается и черная дыра становится стационарной, т.е. геометрия пространства-времени вне ее все меньше отличается от стационарного пространства, допускающего векторное поле Киллинга $\xi^{\mu}_{(t)}$. Этот вывод в случае образования черной дыры при коллапсе с малыми отклонениями от сферической симметрии подтверждается результатами, приведенными в гл. 3. Об этом свидетельствуют также теоремы об устойчивости стационарных черных дыр относительно малых возмущений [см. гл. 3, а также Прайс (1972a, b), Уолд (1979a, 1980)] и доказанное в работах Чандрасекара, Детвилера (1975a), Детвилера (1977, 1979) и Чандрасекара (1983) свойство отсутствия собственных мод колебания гравитационного поля с чисто действительной частотой (без затухания) в пространстве-времени стационарной черной дыры (см. также гл. 3, 4).

Нетрудно убедиться, что условие равновесия данного физического поля вблизи поверхности стационарной черной дыры налагает жесткие ограничения на допустимые конфигурации этих полей [Израэль (1971)]. Рассмотрим, для простоты, случай невращающейся черной дыры, описываемой метрикой Шварцшильда

$$ds^2 = -\Phi\, dt^2 + \frac{dr^2}{\Phi} + r^2 d\omega^2, \quad \Phi = 1 - \frac{2M}{r}. \tag{6.1.1}$$

Пусть $T^{\mu\nu}$ – тензор энергии-импульса, описывающий физическое поле или среду вблизи этой черной дыры. Равновесие в такой системе возможно, если "вес" поля или среды в каждом элементе объема в точности компен-

сируется "выталкивающей силой", обусловленной действием компонент тензора энергии-импульса, описывающих натяжение, на поверхность, ограничивающую выбранный объем. В локальном пределе этот своеобразный "закон Архимеда" сводится к уравнению (закону сохранения)

$$T^{\nu}_{\mu;\nu} = 0, \tag{6.1.2}$$

дополненному условиями статичности

$$\partial_t T^{\mu\nu} = 0 \tag{6.1.3}$$

и отсутствия потоков

$$T^{rt} = T^{t\theta} = T^{t\varphi} = 0. \tag{6.1.4}$$

При этих условиях уравнение (6.1.2) при $\mu = t$ выполняется тождественно, а при $\mu = r$ приводит к соотношению

$$\frac{1}{2}\frac{\partial_r \Phi}{\Phi}(T^t_t - T^r_r) =$$

$$= \frac{1}{r^2}\partial_r(r^2 T^r_r) + \frac{1}{\sin\theta}\partial_\theta(\sin\theta\, T^\theta_r) + \partial_\varphi(T^\varphi_r) - \frac{1}{r}(T^\theta_\theta + T^\varphi_\varphi). \tag{6.1.5}$$

Нетрудно убедиться (переходя, например, к координатам $v = t + r^* = t + r + 2M\ln|r - 2M|$, r, θ, φ, регулярным на горизонте H^+), что в окрестности $r = 2M$ компоненты тензора $T^{\mu\nu}$, удовлетворяющего условию (6.1.3) и регулярного на H^+, имеют следующее поведение в координатах t, r, θ, φ:

$$T^t_t \sim T^r_r \sim T^\theta_r \sim T^\varphi_r \sim T^\theta_\theta \sim T^\theta_\varphi \sim T^\varphi_\varphi \sim O(1). \tag{6.1.6}$$

Поскольку все члены в правой части (6.1.5) конечны при $r = 2M$, то в окрестности горизонта должно выполняться условие $T^t_t \approx T^r_r$ *). Только при выполнении этого условия рассматриваемая конфигурация статична. Что же происходит, если оно нарушается? В этом случае обязательно отлична от нуля компонента T^t_r, так что возникает поток энергии поля через горизонт, который продолжается до тех пор, пока поле, перестроившись, не достигает возможного равновесия. Характерное время этого процесса имеет порядок $t \sim r_g/c$.

Подытожив результаты многочисленных работ, посвященных возможным конечным состояниям черных дыр, Уилер сформулировал утверждение, состоящее в том, что уединенная черная дыра при переходе в стационарное состояние избавляется в процессе излучения от всех тех характеристик, от которых можно избавиться путем излучения. Поскольку для безмассового бозонного поля спина s возможно излучение, связанное с изменением мультипольного момента l системы при $l \geqslant s$, то, согласно предположению Уилера, стационарная черная дыра, возникающая в результате коллапса нейтрального вещества, обладающего только гравитационнным взаимодействием ($s = 2$), описывается метрикой, содержащей лишь два

*) Можно показать, что условие $T^t_t = T^r_r$ является необходимым и достаточным для выполнения теоремы Биркгофа, гарантирующей статичность сферически-симметричных решений. Это условие, очевидно, выполнено в пространствах Рейсснера–Нордстрема и де Ситтера.

свободных параметра: масса M $(l = 0)$ и угловой момент J $(l = 1)$. Если коллапсирующее вещество обладало электрическим зарядом, то возникающая стационарная метрика однозначно определяется заданием трех параметров: M, J и Q (электрический заряд) *).

Уединенная стационарная черная дыра не может быть источником какого-либо массивного поля, поскольку для таких полей возможны все моды излучения, включая $l = 0$, и, согласно гипотезе Уилера, все они должны излучаться при переходе черной дыры в стационарное состояние. Аналогичное заключение должно иметь место и для скалярного безмассового поля.

Эти соображения означают, что гипотеза Уилера эквивалентна следующему утверждению: независимо от деталей коллапса, строения и свойств коллапсирующего тела возникающая стационарная черная дыра однозначно описывается геометрией, определяемой параметрами M, J и Q. Это свойство стационарных черных дыр Уилер образно охарактеризовал следующим известным высказыванием: "Черные дыры не имеют волос".

К настоящему времени получено почти исчерпывающее доказательство гипотезы Уилера. В этой главе собраны основные результаты, связанные с этим доказательством.

§ 6.2. Общие свойства стационарных черных дыр

Поскольку имеются все основания считать, что при отсутствии внешних воздействий и в пренебрежении квантовыми эффектами конечное состояние любой черной дыры является стационарным, то, естественно при описании свойств этих конечных состояний начать с изучения стационарных черных дыр.

Свойство стационарности пространства-времени означает возможность так ввести в нем координаты, что коэффициенты метрики будут независимы от одной из них – "временной" координаты. На "более" геометрическом языке это означает, что пространство-время допускает однопараметрическую группу движений, генераторами которой является $\xi^\mu \partial_\mu$, где ξ^μ – векторное поле Киллинга, удовлетворяющее уравнению

$$\xi_{(\mu;\nu)} = 0. \tag{6.2.1}$$

Так как мы хотим, чтобы пространство-время не изменялось при сдвиге "по времени", то логично потребовать, чтобы вектор ξ был времениподобным и $\xi \cdot \xi < 0$. В общем случае, однако, нельзя гарантировать, что $\xi \cdot \xi$ имеет один и тот же знак во всем пространстве-времени. Поэтому мы будем называть асимптотически плоское пространство стационарным, если оно допускает векторное поле Киллинга ξ^μ, являющееся времениподобным $(\xi \cdot \xi < 0)$ в окрестности $\mathcal{J}^+$ и $\mathcal{J}^-$.

Для доказательства содержательных утверждений относительно общих свойств стационарых черных дыр приходится дополнительно сделать два следующих предположения:

1) пространство-время является регулярно предсказуемым;

---

*) Если в природе существуют магнитные монополи и коллапсирующее тело обладает магнитным зарядом, то для описания стационарной черной дыры требуется задание величины этого заряда в качестве четвертого параметра.