

## ВРАЩАЮЩАЯСЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

### § 4.1. Возникновение вращающейся черной дыры

В предыдущих главах было показано, что при коллапсе сферической массы без вращения возникает сферическая черная дыра, когда радиус тела становится меньше гравитационного радиуса. Если коллапсирует тело с малым отклонением от сферической симметрии, то, как было показано в § 3.4, при образовании черной дыры все отклонения от сферической симметрии быстро исчезают, за исключением отклонений, связанных с наличием малого углового момента  $J$ . Угловой момент остается в ходе коллапса практически неизменным. Если коллапсирующее тело обладало электрическим зарядом, то неизменным остается и общий заряд, и связанное с ним электрическое поле, все же другие компоненты электромагнитного поля во внешнем пространстве также быстро исчезают.

Что будет при коллапсе тела с уже не малыми отклонениями от сферической симметрии и значительными угловым моментом и электромагнитным полем? Будет ли при этом образовываться черная дыра? А если будет, то каковы ее свойства?

В дальнейших главах мы покажем, что при сжатии произвольной вращающейся массы с электромагнитным полем до достаточно малых размеров возникает черная дыра, причем все свойства этой черной дыры и ее внешнего гравитационного и электромагнитного полей полностью определяются тремя параметрами: массой  $M$ , угловым моментом  $J$  и электрическим зарядом  $Q^*)$ . Остальные свойства коллапсирующей массы, например ее состав, несимметрия распределения вещества и электрического заряда, наличие и особенности магнитного поля и т.д., неказываются на свойствах возникающей черной дыры.

Качественно этот вывод понятен из анализа поведения малых возмущений при образовании сферической черной дыры (§ 3.4). Радиационные мультиполи всех полей быстро исчезают. Остаются только нерадиационные моды. Именно они определяются указанными тремя параметрами  $M, J, Q$ . Никакие другие "классические" физические поля с другими (нерадиационными) модами физике неизвестны. В ходе гравитационного коллапса с сильными отклонениями от симметрии возникающее гравитационное излучение уносит часть энергии и углового момента коллапсирующей массы. Поэтому  $M$  и  $J$  у черной дыры будут несколько меньшими, чем у тела до его коллапса (мы это обсудим в дальнейшем). Обнаружить подобное

*\*)* Как мы увидим в дальнейшем, для образования черной дыры должно выполняться неравенство  $M^2 > J^2/M^2 + Q^2$  (система единиц выбрана так, что  $G = c = 1$ ).

уменьшение при анализе малых возмущений было невозможно, так как мы пренебрегали обратным влиянием возмущений на метрику. В астрофизике общий электрический заряд тела можно обычно считать малым и не учитывать. Поэтому мы в первую очередь рассмотрим случай, когда заряд  $Q$  равен нулю. Случай отличного от нуля заряда рассмотрен в § 4.8.

Каково же гравитационное поле черной дыры при наличии углового момента  $J$ ? В § 6.4 будет доказано, что это поле описывается стационарным осесимметричным решением уравнений Эйнштейна, найденным Керром (1963). Мы начнем с описания физических свойств внешнего пространства вращающейся черной дыры.

#### § 4.2. "3 + 1"-расщепление пространства-времени вне черной дыры

Во второй главе исследовались внешнее поле невращающейся черной дыры (поле Шварцшильда) и особенности движения частиц в нем. При этом использовалась система отсчета Шварцшильда. Она статична, не зависит от времени и однозначно определена для каждой черной дыры \*). Ее можно представить в виде решетки, "сваренной" из невесомых твердых стержней. Движение частиц определялось по отношению к такой решетке. При этом в качестве временной переменной мы использовали время  $t$  наблюдателя на бесконечности. Правда, в каждой точке нашей решетки темп течения физического (собственного) времени  $\tau$  не совпадал с темпом течения  $t$  (время вблизи черной дыры течет медленнее), но такая "параметризация" по  $t$  была очень удобна. В частности, условие  $t = \text{const}$  означало одновременность во всей нашей системе отсчета.

В некотором смысле решетка системы отсчета Шварцшильда напоминает абсолютное ньютоновское пространство, в котором движутся тела, а  $t$  — абсолютное ньютоновское время, используемое в уравнениях движения.

Конечно, есть существенные отличия. Наше "абсолютное" пространство искривлено (особенно сильно вблизи черной дыры), а "время"  $t$  не есть физическое время.

Использование именно такой системы отсчета не только удобно для математических выкладок при решении, скажем, уравнений движения, но и обладает большой наглядностью. Мы используем привычные нам понятия ньютоновской физики ("абсолютное" жесткое пространство как неизменная сцена, на которой развертываются события, единое время), что помогает работе нашей интуиции. И хотя система Шварцшильда обладает особенностью на  $r_g$ , мы используем для пространства-времени вне черной дыры именно ее, а не, допустим, систему Леметра, которая не имеет особенности при приближении к  $r_g$ , но которая везде деформируется.

Разумеется, выбор жесткой системы был возможен только потому, что пространство-время вне черной дыры статично. В общем случае в переменном гравитационном поле такой выбор невозможен, пространственная сетка будет деформироваться с течением времени.

\*) На больших расстояниях от черной дыры эта система отсчета переходит в лоренцеву, в которой черная дыра покойится.