
ТЕРМОДИНАМИКА ЧЕРНЫХ ДЫР

§ 11.1. Черные дыры и термодинамика

Открытие Хокингом теплового излучения черной дыры было для большинства специалистов полной неожиданностью, хотя к моменту этого открытия уже существовало довольно много соображений, свидетельствующих о тесном переплетении физики черных дыр и термодинамики.

Уилер, по-видимому, первым обратил внимание на то, что в рамках классической теории тяготения уже сам факт существования черной дыры противоречит закону возрастания энтропии. Действительно, представим себе, что черная дыра поглощает горячее тело, обладающее некоторым запасом энтропии. Тогда внешний наблюдатель видит уменьшение полной энтропии в части мира, доступной его наблюдению. Чисто формально этого уменьшения энтропии можно было бы избежать, если просто приписать энтропию, связанную с упавшим телом, внутренности черной дыры. Однако этот "выход" явно неудовлетворителен, поскольку любые попытки "внешнего" наблюдателя определить значение энтропии, "поглощенной" черной дырой вместе с горячим телом, обречены на неудачу. По прошествии краткого времени после этого процесса черная дыра становится стационарной и вследствие эффекта "выпадания волос" полностью "забывает" такие "детали", как строение упавшего тела и его энтропию.

Если мы не хотим отказаться от закона возрастания энтропии только по той причине, что во Вселенной где-то образовалась черная дыра, следует сделать вывод, что всякая черная дыра *сама по себе* обладает определенным запасом энтропии и что горячее тело при падении передает ей не только массу, угловой момент и заряд, но и свою энтропию S , так что энтропия черной дыры возрастает на величину, не меньшую S . Бекенштейн (1973а) обратил внимание на то, что свойства одной из характеристик черной дыры — площади ее поверхности A — напоминают свойства энтропии. Действительно, согласно теореме Хокинга при любых классических процессах площадь A не убывает, т.е. ведет себя так же, как энтропия. Вообще оказалось, что аналогия между физикой черных дыр и термодинамикой простирается довольно далеко. Она относится как к конкретным термодинамическим устройствам (типа тепловой машины), так и к общим законам термодинамики, каждому из которых нашелся свой аналог в физике черных дыр.

Как и термодинамическая система, произвольная черная дыра после релаксационных процессов приходит в равновесное (стационарное) состояние, в котором она полностью описывается заданием малого числа параметров: M, J, Q . Площадь поверхности A стационарной черной дыры яв-

ляется функцией этих параметров:

$$A = 4\pi(2M^2 - Q^2 + 2M\sqrt{M^2 - Q^2 - J^2/M^2}). \quad (11.1.1)$$

Это соотношение можно обратить и найти выражение для внутренней энергии черной дыры

$$M \equiv M(A, J, Q) = \left\{ \frac{\pi [(Q^2 + A/4\pi)^2 + 4J^2]}{A} \right\}^{1/2}. \quad (11.1.2)$$

Для двух стационарных черных дыр со слегка отличными значениями площади δA , углового момента δJ и электрического заряда δQ внутренняя энергия отличается на величину

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A + \Omega^H \delta J + \Phi^H \delta Q, \quad (11.1.3)$$

где $\kappa = 4\pi\sqrt{M^2 - Q^2 - J^2/M^2}/A$ — поверхностная гравитация, $\Omega^H = 4\pi J/MA$ — угловая скорость и $\Phi^H = 4\pi Qr_+/A$ — электрический потенциал черной дыры. Второй и третий члены этой формулы описывают изменение энергии вращения и электрической энергии.

Это соотношение аналогично первому закону термодинамики; при этом в качестве аналога температуры (величины, сопряженной энтропии) выступает величина, пропорциональная поверхностной гравитации κ . Результат Хокинга о тепловом характере излучения стационарной черной дыры не только подтверждает указанную аналогию, но и позволяет найти коэффициент, связывающий температуру θ и поверхностную гравитацию κ :

$$\theta = \hbar \kappa / 2\pi c k. \quad (11.1.4)$$

При этом соотношение (11.1.3) в точности совпадает с первым законом термодинамики

$$\delta E = \theta \delta S^H + \Omega^H \delta J + \Phi^H \delta Q, \quad (11.1.5)$$

если для энтропии черной дыры принять выражение

$$S^H = A/4l_{Pl}^2, \quad l_{Pl}^2 = \hbar G/c^3. \quad (11.1.6)$$

Приведенные соображения дают все основания отнести серьезно к упомянутой аналогии между физикой черных дыр и термодинамикой. Основные законы физики черных дыр, играющие роль, аналогичную законам термодинамики, мы рассмотрим в § 11.3 после обсуждения общих свойств поверхностной гравитации κ и вывода так называемых массовых формул, обобщающих соотношения (11.1.2) и (11.1.3) на случай произвольных стационарных черных дыр, окруженных стационарным распределением вещества и полей.

§ 11.2. Поверхностная гравитация. Массовая формула

Согласно теоремам единственности (§§ 6.3, 6.4) уединенная стационарная черная дыра в общем случае является керр-ньюменовской. Для такой черной дыры значения угловой скорости Ω^H , поверхностной гравитации κ и электрического потенциала Φ^H постоянны на горизонте событий. Свойство постоянства этих величин сохраняется и в том случае, если черная дыра окружена веществом, при условии, что геометрия пространства-времени