

Вращающаяся Ч. д.-линза может быть расположена на луче зрения между наблюдателем и источником излучения, угл. размеры к-рого больше угл. размеров Ч. д. В этом случае Ч. д. будет выглядеть буквально как чёрная дыра в изображении источника, ограниченная несимметричным светящимся ореолом, образованным фотонами, отклоняемыми дырой на углы

$$\Delta\varphi \approx \pm 3k\pi \quad (k=1, 2 \dots).$$

В результате асимметрии рассеяния должно возникать относительное запаздывание во времени распространения фотонов, образующих границу дыры в картинной плоскости источника излучения. Относительное запаздывание фотонов, идущих в экваториальной плоскости с максимальным и минимальным прицельными параметрами, описывается ф-лой $\Delta t \approx 3|\Delta\varphi|GMc^{-3}$. При изменении яркости источника излучения яркость граничной кривой (ореола) будет меняться неравномерно: по ней победит «зайчик» из точки, соответствующей мин. значению прицельного параметра, со скоростью $v_s \approx (c/6)R_S/R_H$ (для $a=1$), где R_H —расстояние от наблюдателя до Ч. д., R_S —расстояние от наблюдателя до источника излучения.

3. Физика чёрных дыр

К кон. 60-х гг. в работах В. Израэля (W. Israel), Б. Картера (B. Carter) и Хокинга были доказаны теоремы единственности, согласно к-рым Ч. д. полностью определяется её массой M , угл. моментом I и зарядом Q . Уилер сформулировал этот результат как теорему «Ч. д. не имеет волос». В 1971 Уилер показал, что эта теорема означает возможность нарушить второе начало термодинамики. Достаточно бросить в Ч. д. какое-нибудь горячее тело, обладающее определ. энтропией, уменьшая тем самым энтропию оставшейся части Вселенной. Параметры M, I, Q , определяющие Ч. д. единственным образом, не несут никакой информации о кол-ве энтропии, поглощённой Ч. д. (как в процессе её формирования, так и всей дальнейшей истории). Т. о., существование хотя бы одной Ч. д. не позволяло бы с уверенностью утверждать, что полная энтропия Вселенной не убывает.

Парадокс выглядел следующим образом: либо второе начало термодинамики не является универсальным законом природы, либо Ч. д. не могут существовать в принципе.

Решение этого парадокса было предложено в 1972 студентом Уилера Дж. Бекенштайном (J. Beckenstein). Он исходил из результатов, полученных Д. Кристоудлу (D. Christodoulou) (1970) и Хокингом (1971), согласно к-рым площадь Ч. д. (площадь поверхности горизонта событий) не может уменьшаться и возрастает в динамич. процессах. Существенным свойством динамич. процессов, происходящих с Ч. д., является необратимость; мера необратимости определяется площадью поверхности Ч. д.

$$A = 4\pi r_+^2 = \frac{4\pi}{c^4} G^2 (2M^2 - Q^2 + 2M\sqrt{M^2 - Q^2 - I^2/M^2}).$$

Бекенштайн предположил, что Ч. д. обладает конечной энтропией, пропорциональной площади её поверхности A (линейная зависимость может обеспечить аддитивность энтропии). В качестве коэф. пропорциональности Уилер предложил величину l_{Pl}^2 , поскольку планковская длина $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ см является характерной длиной, зависящей только от фундам. постоянных, и представляет собой мин. масштаб, в к-ром пространство-время может рассматриваться как гладкое многообразие.

Т. о., энтропия Ч. д. определяется ф-лой

$$S_H = \frac{c^3 \hbar}{4hG} A. \quad (4)$$

Обобщенное второе начало термодинамики звучит так: сумма обычной энтропии (т. е. энтропии вне Ч. д.) и энтропии Ч. д. никогда не убывает.

В 1973 Дж. Бардин (J. Bardeen), Картер и Хокинг сформулировали четыре закона механики Ч. д.:

нулевой закон — поверхностная гравитация стационарной Ч. д.

$$\kappa = \frac{GM}{r_+^2} = \frac{4\pi GM}{A} = \frac{4\pi}{A} \sqrt{M^2 - Q^2 - I^2/M^2}$$

постоянна на горизонте событий;
первый закон —

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A + \Omega_H \delta I + \Phi_H \delta Q,$$

где Ω_H — угл. скорость Ч. д. и Φ_H — электр. потенциал Ч. д.;

второй закон — площадь поверхности горизонта событий для любой Ч. д. не убывает со временем, т. е. $\delta A \geq 0$;
третий закон — не существует механизма, сколь угодно идеализированного, позволяющего привести к нулю поверхностную гравитацию κ с помощью конечной последовательности операций.

Замечательная аналогия между этими законами и законами термодинамики считалась в 1973 чисто формальной, ибо Ч. д., рассматриваемая как классич. система, не может излучать и поэтому её темп-ра должна быть равна нулю, а энтропия — бесконечности. Энтропия определяется соотношением $S = k \ln G$, где G — число микросостояний, соответствующих определ. макросостоянию. Для классич. Ч. д. число внутр. микросостояний должно было бы быть бесконечным, так как Ч. д. могла бы, в принципе, образоваться в ходе коллапса из бесконечно большого числа частиц бесконечно малой массы.

Бекенштайн отметил, что должно существовать квантовое ограничение на массу частиц, образующих Ч. д.: комптоновская длина волны $\lambda_c = \hbar/mc$ должна быть ограничена радиусом Ч. д. и поэтому число внутренних микросостояний должно быть конечным, хотя и очень большим.

Следующий решающий шаг был сделан Хокингом в 1974. Казалось очевидным, что из предположения о конечности энтропии Ч. д. следует, что она должна испускать тепловое излучение. В этом случае первый закон механики Ч. д. становится законом термодинамики. Для невращающейся незаряж. Ч. д. он имеет вид $dM = TdS$, и из (4) немедленно следует ф-ла для темп-ры Ч. д., излучающей как абсолютно чёрное тело:

$$T_H = \frac{\hbar}{2\pi ck} \kappa = \frac{\hbar c^3}{8\pi GkM} \sim 6 \cdot 10^{-8} \left(\frac{M_\odot}{M} \right) \text{ К}. \quad (5)$$

Фундам. результат Хокинга заключается в том, что он нашёл механизм, обеспечивающий излучение Ч. д. Таким механизмом является квантовое рождение частиц в её гравитац. поле. Внутри Ч. д. имеются орбиты, для к-рых энергия отрицательна с точки зрения внеш. стационарного наблюдателя. Поэтому энергетически возможно спонтанное рождение пары частиц вблизи горизонта событий. Одна из частиц имеет положит. энергию и уходит на бесконечность, другая имеет отрицат. энергию и падает в Ч. д., уменьшая тем самым её массу. Наличие горизонта событий препятствовало бы этому при классич. рассмотрении, но в квантовом случае это возможно благодаря туннелированию частиц сквозь горизонт. Механизм Хокинга получил назв. квантового испарения Ч. д. Вследствие наличия горизонта событий квантовое излучение Ч. д. описывается не чистым квантовым состоянием, а квантовой матрицей плотности. Поэтому излучение Ч. д. имеет тепловой спектр (строго говоря, спектр отличается от теплового вследствие рассеяния излучения гравитац. полем Ч. д.). Хокинг доказал, что Ч. д. излучает как чёрное тело с темп-рой (5). Квантовое испарение ведёт к потере массы Ч. д. со скоростью

$$\frac{dM}{dt} = -C \frac{\hbar}{M^2},$$

где коэф. C зависит от числа типов излучаемых частиц. Для Ч. д. массой $M \gg 10^{17}$ г темп-ра $T_H \ll 10^9$ К и Ч. д.