УДК ___.___:___.___

Излучение Хокинга и эволюция заряженной чёрной дыры: динамика потери массы и заряда

Иванов Л. Н. Москва, Россия, 2025 г.
E-mail: lev-ivanov@inbox.ru

Аннотация
В работе рассматривается процесс испарения заряженных чёрных дыр в рамках теории излучения Хокинга. Показано, что электрический заряд существенно модифицирует спектр излучения, приводит к асимметрии в испускании частиц материи и антиматерии, а также изменяет временные масштабы эволюции чёрной дыры. Проанализированы три фазы эволюции, выявлены ключевые зависимости температуры, темпа потери заряда и массы от параметров системы.

Ключевые слова: чёрная дыра, излучение Хокинга, заряд, испарение, квантовая гравитация, Рейсснер — Нордстрём.

1. Введение

Излучение Хокинга — квантово-гравитационный процесс, предсказывающий тепловое излучение чёрных дыр вследствие квантовых эффектов вблизи горизонта событий. Хотя экспериментальное обнаружение этого явления остаётся за пределами современных возможностей, теоретический анализ его последствий имеет фундаментальное значение для квантовой гравитации и физики чёрных дыр.

Особую роль играет изучение заряженных чёрных дыр (решение Рейсснера — Нордстрёма), поскольку их электромагнитное поле вносит существенные модификации в процесс испарения. В данной работе систематизированы механизмы и динамика потери заряда и массы таких объектов.

Цель исследования:

- описать механизм асимметричного излучения заряженной чёрной дыры;
- выделить фазы эволюции и их особенности;

- установить зависимости температуры, темпа потери заряда и массы от параметров M и Q;

2. Теоретические основы

2.1. Излучение Хокинга для нейтральных чёрных дыр

В отсутствие заряда излучение Хокинга описывается как тепловой процесс с температурой:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}, \tag{1}$$

где:

- M — масса чёрной дыры;
- $\hbar$ — постоянная Планка;
- c — скорость света;
- G — гравитационная постоянная;
- k_B — постоянная Больцмана.

Спектр излучения близок к чёрнотельному, а испарение симметрично относительно материи и антиматерии.

2.2. Решение Рейсснера — Нордстрёма

Для заряженной чёрной дыры метрика определяется параметрами M (масса) и Q (заряд). Температура модифицируется:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B} \cdot \frac{\sqrt{M^2 - Q^2/c^4}}{M\left(M + \sqrt{M^2 - Q^2/c^4}\right)^2}, \tag{2}$$

где Q выражен в единицах СИ. При $|Q|=Mc^2$ (в геометрических единицах) температура обращается в ноль — экстремальный случай.

3. Механизм асимметричного излучения

Электромагнитное поле заряженной чёрной дыры поляризует квантовый вакуум, приводя к асимметрии в рождении пар частица — античастица:

- частицы с зарядом, противоположным Q, испытывают притяжение и легче преодолевают кулоновский барьер;
- частицы с тем же знаком заряда, что Q, отталкиваются, их излучение подавлено.

Это приводит к преимущественному испусканию:

- частиц с зарядом $-q$ при $Q>0$;
- частиц с зарядом $+q$ при $Q<0$.

Физический механизм потери заряда:

1. Квантовая поляризация вакуума: поле Q ориентирует рождение виртуальных пар.
2. Асимметричное излучение: улетающая частица уносит заряд q, упавшая (с отрицательной энергией) уменьшает заряд дыры на $-q$.
3. Энергетический баланс: чёрная дыра теряет массу/энергию, эквивалентную энергии улетевшей частицы ($E=mc^2$).

4. Динамика эволюции

Процесс испарения проходит три фазы:

Фаза 1: Большой заряд ($|Q|\sim M$)

- высокая асимметрия излучения: быстрый сброс заряда;
- темп потери заряда:

$$\frac{dQ}{dt} \sim -\alpha |Q| T^2, \qquad (3)$$

  где α — коэффициент, зависящий от типов излучаемых частиц;
- излучение ослаблено из-за кулоновского подавления.

Фаза 2: Промежуточный заряд ($|Q| \ll M$)

- снижение асимметрии: вероятности излучения частиц разных знаков сближаются;
- доминирование потери массы за счёт нейтральных частиц (фотонов, нейтрино);
- переход к режиму, близкому к нейтральной дыре.

Фаза 3: Остаточный заряд ($|Q| \to 0$)

- почти симметричное излучение;
- финальное испарение:

$$\frac{dM}{dt} \sim -\beta T^4, \qquad (4)$$

где β — постоянная, связанная с числом степеней свободы частиц.

5. Ключевые зависимости

1. **Температура**

$$T \propto \frac{1}{M}\sqrt{1 - \frac{Q^2}{M^2}}. \qquad (5)$$

Чем больше $|Q|$, тем ниже T и медленнее испарение.

2. **Время жизни**
Полное испарение занимает больше времени, чем у нейтральной дыры, из-за:
    - кулоновского подавления излучения;
    - необходимости сначала сбросить заряд, затем массу.
3. **Критическая точка**
При $|Q|=M$ (в геометрических единицах) $T=0$ — экстремальная чёрная

дыра. В реальности такие объекты, вероятно, не существуют из-за квантовых эффектов.

6. Наблюдательные следствия

1. **Состав излучения**
   Преобладание:
   - электронов при $Q>0$;
   - позитронов при $Q<0$
     на ранних этапах испарения.
2. **Спектральные особенности**
   - отклонение от теплового спектра из-за кулоновского влияния;
   - подавление частиц с зарядом того же знака, что Q.
3. **Временны́е шкалы**
   Замедленное испарение по сравнению с нейтральными дырами той же массы.
4. **Финальная стадия**
   В конце испарения дыра становится практически нейтральной, завершая процесс по «нейтральному» сценарию.

7. Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что заряд чёрной дыры:

- нарушает симметрию между материей и антиматерией в излучении Хокинга;
- замедляет темп испарения за счёт кулоновского подавления;
- приводит к многофазной эволюции с последовательным сбросом заряда и массы.

Эти выводы согласуются с известными теоретическими работами по квантовой гравитации и термодинамике чёрных дыр (Хокинг, Бекенштейн, Зурек и др.).

8. Заключение

В работе проанализирована динамика испарения заряженных чёрных дыр. Показано, что:

1. Заряд вызывает асимметрию в излучении материи и антиматерии.
2. Процесс эволюции проходит три последовательные фазы: быстрый сброс заряда, переход к нейтральному излучению, финальное испарение.
3. Кулоновское поле снижает температуру и интенсивность излучения, увеличивая полное время жизни дыры.
4. Квантовые эффекты предотвращают достижение экстремального состояния ($|Q|=M$).

Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

- уточнение спектральных характеристик излучения с учётом квантовых поправок;
- моделирование наблюдательных признаков испарения заряженных дыр;
- анализ влияния вращения (решение Керра — Ньюмена) на процесс.

Список литературы

1. Hawking S. W. Particle creation by black holes // Communications in Mathematical Physics. 1975. Vol. 43, No. 3. P. 199–220.
2. Reissner H. Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie // Annalen der Physik. 1916. Vol. 355, No. 9. P. 106–120.
3. Nordström G. Über die Möglichkeit, das Elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld zu vereiningen. Phys. Zeitschr., 1914, Vol. 15, S. 504–506.
4. On the Energy of the Gravitational Field in Einstein’s Theory // Verhandl. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., Afdel. Natuurk., Amsterdam. 1918. Vol. 26. P. 1201–1208.
5. Bekenstein J. D. Black holes and entropy // Physical Review D. 1973. Vol. 7, No. 8. P. 2333–2346.
6. Zurek W. H. Entropy evaporated by a black hole // Physical Review Letters. 1982. Vol. 49, No. 22. P. 1683–1686.