

Взаимосвязь между нарушением светоподобного энергетического условия и термодинамикой при испарении чёрной дыры Киселёва

Григорьев Максим, Вертоградов Виталий

Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена

11 августа 2026 г.

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2M(v, r)}{r} \right) dv^2 + 2 dv dr + r^2 d\Omega^2,$$

$$M(v, r) = M(v) - \frac{N(v)}{2r^{3\omega}}.$$

- $M(v)$ и $N(v)$ масса и заряд (параметр нелинейной электродинамики)
- Тензор энергии-импульса содержит внутреннее давление, плотность энергии и плотность потока энергии:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + P)(l_\mu n_\nu + l_\nu n_\mu) + P g_{\mu\nu} + \mu l_\mu l_\nu,$$

где l^μ , n^μ – светоподобные векторы ($l^\mu l_\mu = n^\mu n_\mu = 0$).

Светоподобное энергетическое условие (NEC)

Для любого светоподобного вектора k^μ требуется

$$T_{\mu\nu}k^\mu k^\nu \geq 0.$$

Выбирая $k^\mu = l^\mu$, получаем $\mu \geq 0$. Из уравнений Эйнштейна находим компоненту G_v^v и, следовательно,

$$\mu = \frac{2\dot{M}(v,r)}{r^2} \geq 0 \quad \implies \quad \dot{M}(v,r) \geq 0.$$

С учётом вида $M(v,r)$ условие NEC принимает явный вид:

$$\boxed{\dot{M}(v) - \frac{\dot{N}(v)}{2r^{3\omega}} \geq 0}$$

Горизонт энергетического условия r_{nec}

Граница между областями выполнения и нарушения NEC определяется условием

$$\dot{M}(v, r_{\text{nec}}) = 0 \implies r_{\text{nec}} = \left(\frac{\dot{N}}{2\dot{M}} \right)^{\frac{1}{3\omega}}.$$

- Радиус r_{nec} существует, только если $\dot{N}$ и $\dot{M}$ одного знака.
- Если r_{nec} отсутствует, NEC нарушается, либо выполняется глобально.

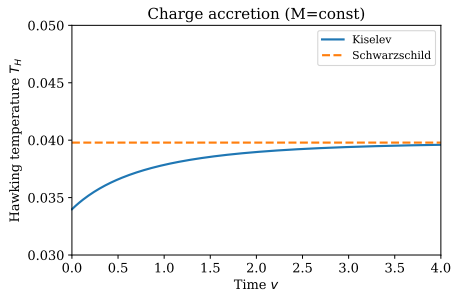
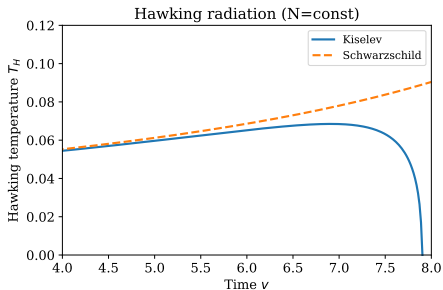
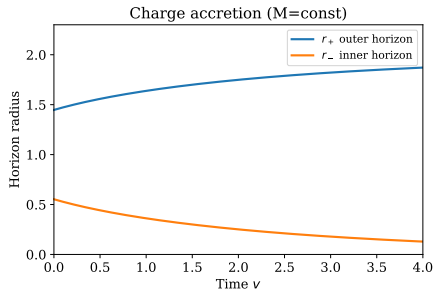
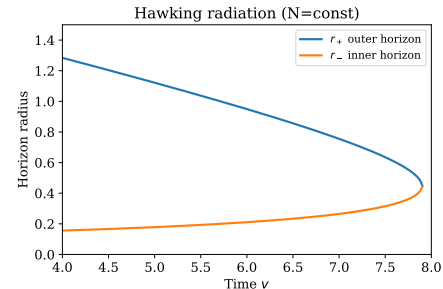
Температура Хокинга T_H

Для внешнего горизонта r_+ температура выражается через поверхностную гравитацию:

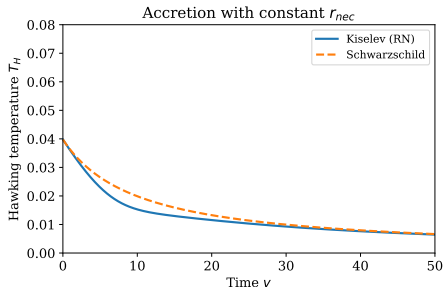
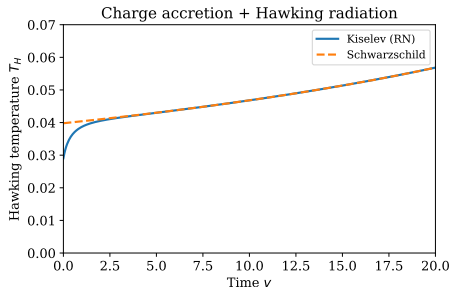
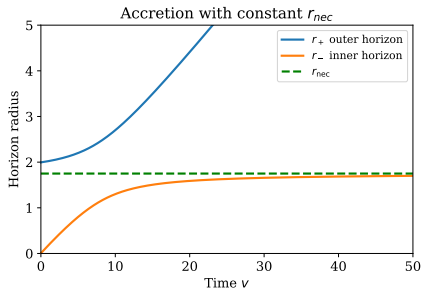
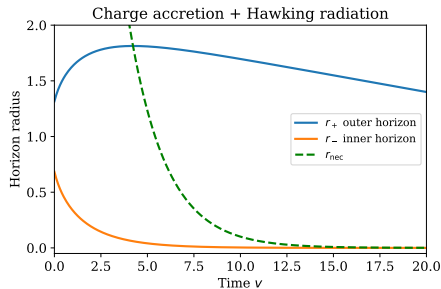
$$T_H = \frac{1}{4\pi r_+} \left(1 - \frac{3\omega N}{r_+^{3\omega+1}} \right).$$

- В экстремальном случае ($r_+ = r_-$) температура обращается в ноль.
- При испарении массы без изменения N температура падает до нуля при слиянии горизонтов.
- Если N убывает быстрее массы, температура растёт.

Горизонты и температура при отсутствии r_{nec}



Влияние горизонта $r_{\text{нec}}$ на динамику



- Глобальное нарушение NEC (испарение незаряженных частиц) приводит к уменьшению внешнего горизонта, увеличению внутреннего и возникновению экстремальной чёрной дыры.
- Частичное или полное выполнение NEC восстанавливает классическую картину испарения: температура может расти неограниченно.
- Радиус $r_{\text{нec}}$ является границей, разделяющей области с разной динамикой горизонтов.
- Результаты справедливы для любого сферически-симметричного решения с двумя горизонтами.

Спасибо за внимание!