

Фазовый переход вещества при гравитационном коллапсе как возможный источник гамма-всплеска

Кузнецова Жанна Юрьевна

Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена

Кафедра теоретической физики и астрономии

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Профиль: “Физика конденсированного состояния вещества”

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Доктор физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической физики и астрономии,
профессор

Пронин Владимир Петрович

2026

Самый мощный гамма-всплеск, GRB 221009A, произошёл 9 октября 2022 года. Полная энергия, выброшенная в виде гамма-излучения, составила около $1,2 \cdot 10^{55}$ эрг. За эти рекордные показатели событие получило неофициальное название BOAT (Brightest Of All Time).

Цель: Оценить мощность излучаемой энергии при фазовом переходе вещества в процессе гравитационного коллапса.

Три модели регулярных чёрных дыр

Обобщенный вид метрики Вайдья, эта метрика используется для описания динамических чёрных дыр, в том числе для процесса гравитационного коллапса:

$$ds^2 = -f(v, r)dv^2 + 2dvdr + r^2d\Omega^2 \quad (1)$$

v - опережающее время Эддингтона-Финкельштейна, которое связано с обычным временем формулой:

$$v = t + r + 2M \ln \left| \frac{r}{2M} - 1 \right| \quad (2)$$

Бардин (1968)

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^2}{(r^2 + g^2)^{3/2}}$$

Хэйворд (2006)

$$f(r) = 1 - \frac{2Mr^2}{r^3 + 2ML^2}$$

Дымникова (1992)

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} \left(1 - e^{-\frac{r^3}{2Mr_0^2}} \right)$$

Параметры регуляризации:

- g - магнитный заряд, L - магнитный заряд, r_0 - радиус ядра де-Ситтера

Гладкий переход барионной материи в вещество Дымниковой

Метрика Киселёва - это решение уравнений Эйнштейна, которое позволяет описывать чёрную дыру с классической барионной материей.

$$f_K(r) = 1 - \frac{2M_K(r)}{r}, \quad M_K(r) = M_{0K} + \frac{N}{2r^{2\alpha-1}} \quad (3)$$

В критической точке r_c метрика Дымниковой и метрика Киселёва должны описывать одно и то же вещество, то есть обладать одинаковыми массовыми функциями M , плотностью энергии ρ и параметром баротропного уравнения состояния α . P - внутреннее давление материи.

$$M_{\text{reg}}(r_c) = M_K(r_c), \quad \rho_{\text{reg}}(r_c) = \rho_K(r_c), \quad \left. \frac{P}{\rho} \right|_{\text{reg}}(r_c) = \alpha, \quad (P = \alpha\rho) \quad (4)$$

Плотность и светимость излучения при фазовом переходе

Аналитически, плотность излучения при гамма-всплеске может быть выражена следующей формулой:

$$\rho_r = \frac{\alpha \rho_{\text{new}} - P_{\text{new}}}{\alpha - 1} \quad (5)$$

Где ρ_{new} , P_{new} - плотность излучения и давление излучения нового вещества. Зная плотность излучения, можем оценить светимость фазовых переходов:

$$L = 4\pi r^2 c \rho_r = \frac{8\pi c^5}{G} M' \quad (6)$$

Плотность излучения во время фазового перехода

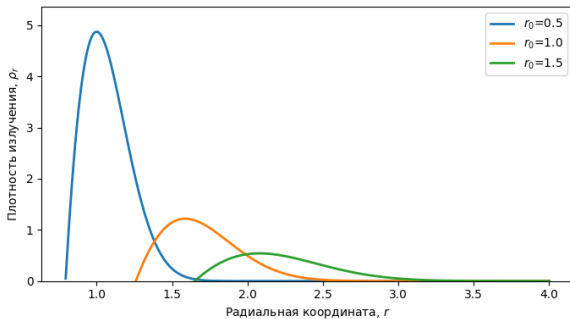


Рис. 1: Зависимость плотности излучения от радиальной координаты в метрике Дымниковой

Светимость L во время фазового перехода

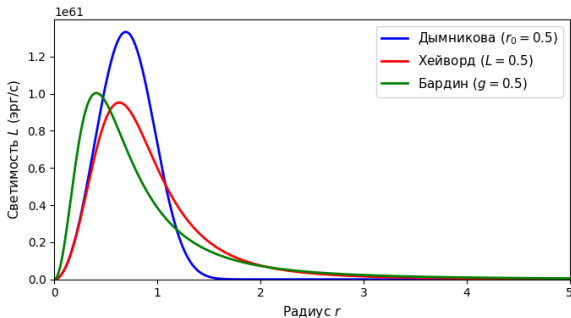


Рис. 2: Светимость для разных моделей регулярных чёрных дыр

Но: $r_{\text{max}} < r_h$ (максимум под горизонтом).

До наблюдателя доходит $\sim 10^{55}$ эрг/с — сопоставимо с GRB.

Результаты и выводы

- Область максимума находится под горизонтом событий, поэтому до внешнего наблюдателя доходит некоторая часть, для модели Дымниковой $\sim 10^{55}$ эрг/с — что сопоставимо с мощностью наблюдаемых гамма-всплесков. Таким образом, наиболее вероятным кандидатом на роль источников гамма - всплесков является черная дыра Дымниковой.
- Пиковая светимость фазового перехода в моделях Хэйворда и Бардина, составляет $10^{59}, 10^{60}$ эрг/с соответственно.
- В ходе исследования была впервые получена аналитическая и численная зависимость светимости фазовых переходов вещества в регулярных черных дырах

спасибо за внимание