Асферический канал термального распада ложного вакуума вблизи чёрной дыры

Василий Маслов

Институт Ядерных Исследований РАН

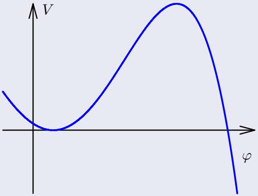
Основано на: Dmitry Gorbunov, Dmitry Levkov, VM, arXiv:soon

Сессия–конференция секции ядерной физики ОФН РАН,

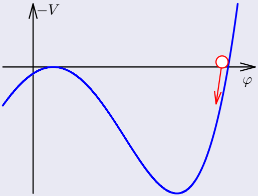
Новосибирск, 13 марта 2026 года

$\boxed{T = 0}$

Ложный вакуум



Евклидово время: $\tau = it$



Вероятность распада: $\Gamma \propto e^{-S_E[\varphi_b]}$, φ_b — отскоковое решение

- Пример: поле Хиггса в Стандартной модели

$$\lambda(\mu) < 0 \quad \text{при} \quad \mu \gtrsim 10^9\, GeV$$

Bednyakov, Fedoruk, Kazakov '25

- **Чёрные дыры** — катализируют распад!

Hiscock '87; Tetradis '16

Распад ложного вакуума при $T > 0$

- Евклидово время периодично: $0 \leqslant \tau \leqslant \beta \equiv T^{-1}$
- Потенциальный барьер E_{sph} — энергия критического пузыря φ_{sph}

2 механизма термального распада

- Подбарьерное туннелирование:

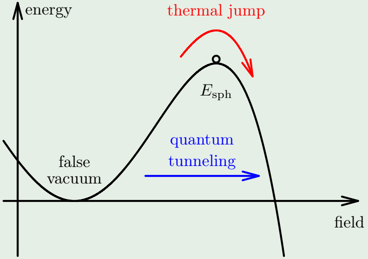
$$P \propto e^{-S_E[\varphi_{tb}]},$$

периодический инстантон $\varphi_{tb}(\tau, \boldsymbol{x})$

- Перескок *через* барьер $E > E_{sph}$:

$$P \propto e^{-E_{sph}\beta},$$

критический пузырь $\varphi_{sph}(\boldsymbol{x})$



φ_{tb}, φ_{sph} полагают центрированными на чёрной дыре, иначе их вклад не доминантен. Так ли это?

Упрощенная скалярная модель в плоском пространстве

$$\boxed{V(\varphi) = \frac{m^2\varphi^2}{2} - \frac{g_4\varphi^4}{4}}$$

Особенности:

- $T = 0, \ m = 0$:

  масштабная симметрия

  $$\varphi(x_E) \to \gamma\varphi(\gamma x_E)$$

  семейство инстантонов:

  $$\varphi_{FL} \propto \frac{a}{x_E^2 + a^2}$$

  $$S_E = \frac{8\pi^2}{3g_4}$$

  Fubini '76
  Lipatov '77

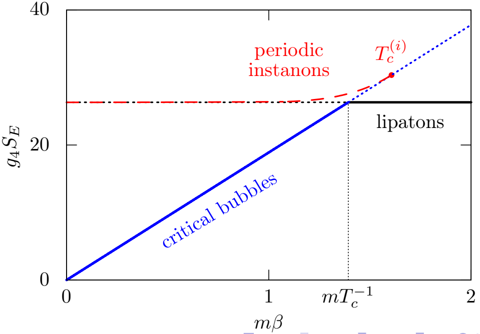
- $T = 0, \ m \neq 0$:

  симметрия нарушена

  $\boxed{a \to 0}$ — «липатон»

- $T \neq 0$:
  - липатоны ✓
  - конечные периодические инстантоны ✓

  но всегда подавлены *Kuznetsov, Tinyakov '97*



Сферические критические пузыри на чёрной дыре

- Шварцшильдова чёрная дыра (изотропные координаты)

$$ds_E^2 = \left(\frac{1 - R_s/R}{1 + R_s/R}\right)^2 d\tau^2 + (1 + R_s/R)^4 \left[dR^2 + R^2 d\Omega\right]$$

$$r(R) = R\,(1 + R_s/R)^2, \quad R_s = r_s/4$$

в равновесии с окружением имеет температуру Хокинга $\boxed{T_H^{-1} = 4\pi r_s}$

Hawking '74

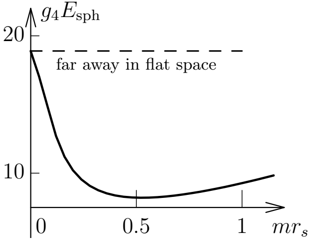
- $r_s \ll m^{-1} \iff$ горячая чёрная дыра

  критические пузыри доминируют

- Сферический пузырь:

$$\partial_R^2 \varphi_{\rm sph} + \frac{2R}{R^2 - R_s^2}\,\partial_R \varphi_{\rm sph} = \left(1 + \frac{R_s}{R}\right)^4 V'(\varphi_{\rm sph})$$

гран. условие: $\quad \partial_R \varphi(R_s) = 0$



Сферические пузыри перестают доминировать

- Критерий:
  доминантный инстантон имеет отрицательную моду, но одну

  Callan, Coleman '77

- Уравнение на моды сферических пузырей $\xi = \xi_\ell(R) P_\ell(\cos\theta)$

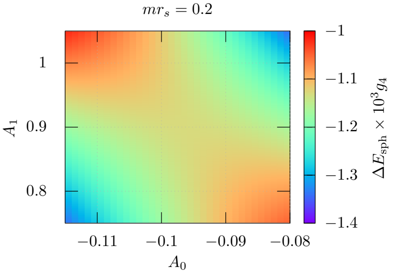
$$\left[-\partial_R^2 - \frac{2R}{R^2 - R_s^2}\partial_R + \frac{\ell(\ell+1)}{R^2} + \left(1 + \frac{R_s}{R}\right)^4 V''(\varphi)\right]\xi_\ell = \mu_\ell \xi_\ell$$

$$\boxed{R_s = \frac{r_s}{4}}$$

- (Численно) $r_s \lesssim 0.194 m^{-1}$: только $\ell = 0$ отрицательная
- При $r_s \gtrsim 0.194 m^{-1}$:
  $\ell = 1$ т.е. дипольная мода становится отрицательной
- Ищем новую седловую точку на конфигурациях вида

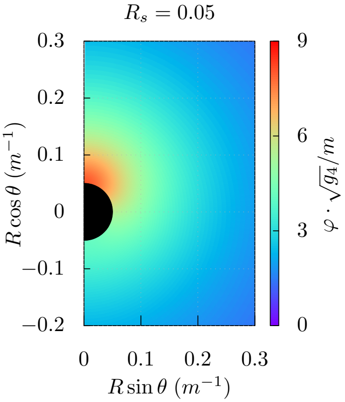
$$\varphi_{\text{sph}}(R) + A_0 \xi_0(R) + A_1 \xi_1(R) \cos\theta$$

...и находим!

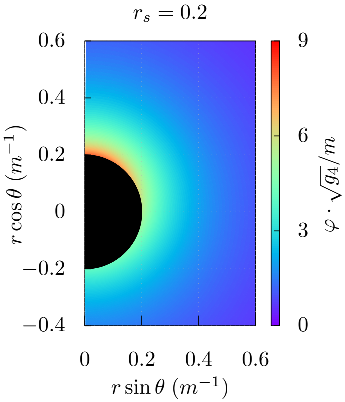


Асферические критические пузыри

Изотропные координаты: Координаты Шварцшильда:



$r = R\left(1 + \frac{R_s}{R}\right)^2$



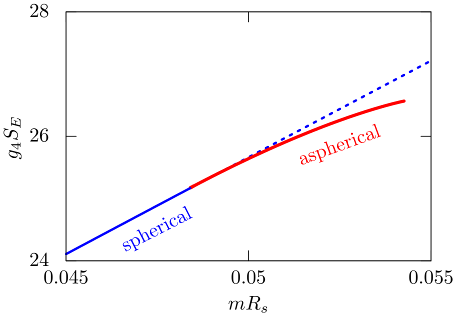
$$Z_d = \frac{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot z \cdot \mathcal{P}[\varphi]}{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot \mathcal{P}[\varphi]}$$ — «центр масс», $\mathcal{P}[\varphi] > 0$

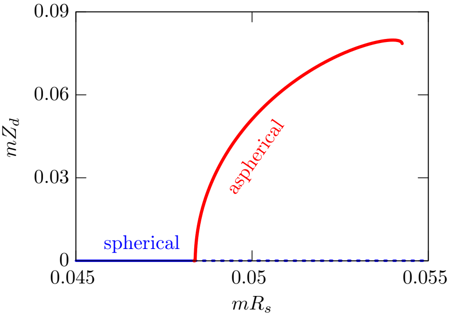
например: $\mathcal{P}[\varphi] = \varphi^4$

Асферические критические пузыри с ростом r_s

$$Z_d = \frac{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot z\cdot \mathcal{P}[\varphi]}{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot \mathcal{P}[\varphi]}$$ — «центр масс», $\mathcal{P}[\varphi] > 0$

например: $\mathcal{P}[\varphi] = \varphi^4$



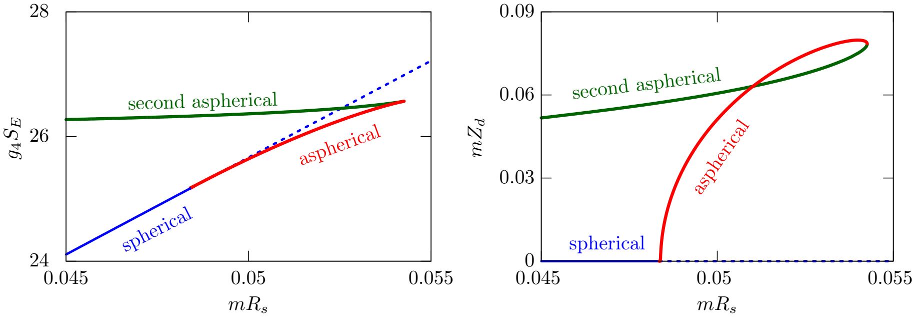


Почему исчезают пузыри при больших r_s?

Асферические критические пузыри с ростом r_s

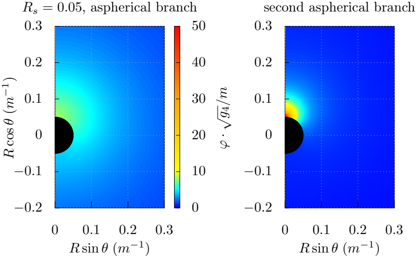
$$Z_d = \frac{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot z \cdot \mathcal{P}[\varphi]}{\int d^3\mathbf{x}\sqrt{g_E}\cdot \mathcal{P}[\varphi]}$$ — «центр масс», $\quad \mathcal{P}[\varphi] > 0$

например: $\mathcal{P}[\varphi] = \varphi^4$



Почему исчезают пузыри при больших r_s?

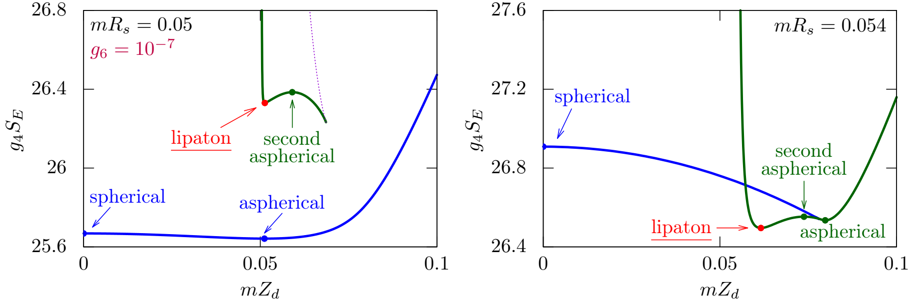
Бифуркация со второй, подавленной веткой решений!



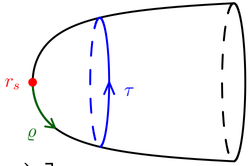
Найдём седловые точки с фиксированным Z_d:

$$S \to S - \lambda\, \mathcal{C}[\varphi]$$

$$\mathcal{C}[\varphi] = \int d^3\boldsymbol{x} \sqrt{g_E}\,(z - Z_d)\,\mathcal{P}[\varphi]$$



- Евклидово пространство — регулярно на горизонте чёрной дыры!



- Регулярные на горизонте координаты:

$$\boxed{\varrho = (R - R_s)\sqrt{R_s/R}}$$

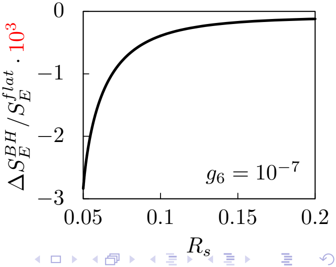
также: $\eta = \theta R_s, \quad \tilde{\tau} = \tau/8R_s$

$$\Downarrow$$

$$\frac{1}{16} ds^2 = \frac{\varrho^2 d\tilde{\tau}^2}{\kappa_\varrho} + \kappa_\varrho \left[d\varrho^2 + \kappa_\varrho \left(d\eta^2 + R_s^2 \sin^2 \frac{\eta^2}{R_s^2} d\phi^2 \right) \right], \qquad \kappa_\varrho = 1 + \frac{\varrho^2}{4R_s^2}$$

- Для очень маленького липатона $\frac{a}{R_s} \to 0$ горизонт — плоский!
- τ — угол на горизонте, липатон от него не зависит

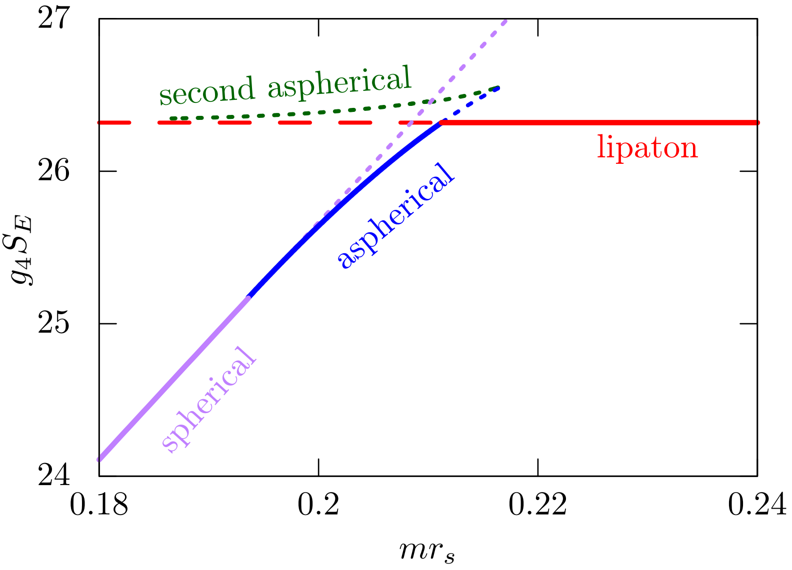
$$S_E(a=0) = 8\pi^2/3g_4$$



- В регуляризованной теории $g_6\varphi^6$:
  - липатон конечного размера $a > 0$
  - На горизонте доминантный вклад:

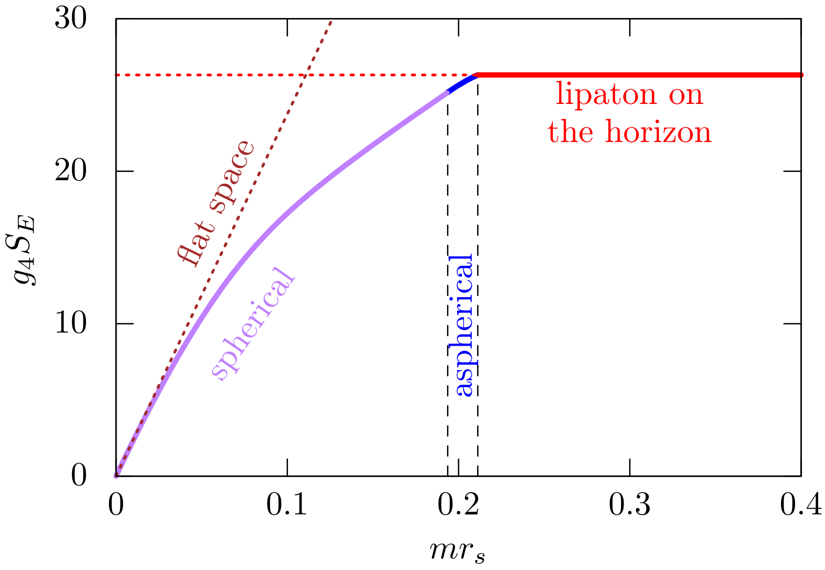
$$S_E^{BH} < S_E^{flat}, \qquad \Delta S_E^{BH} \propto \left(\frac{a}{R_s}\right)^4 \text{(num)}$$

Итоги



27
26
25
24
$g_4 S_E$
second aspherical
lipaton
aspherical
spherical
0.18
0.2
0.22
0.24
mr_s

Итоги



30
20
10
0
$g_4 S_E$
flat space
spherical
aspherical
lipaton on
the horizon
0
0.1
0.2
0.3
0.4
mr_s

Выводы и перспективы

- Распад ложного вакуума в присутствии чёрной дыры может происходить асферически
- В скалярной модели с потенциалом $\frac{m^2\varphi^2}{2} - \frac{g_4\varphi^4}{4}$ асферический канал доминирует при $r_s \gtrsim 0.194 m^{-1}$
- Перспективы: применение к Стандартной модели
  - Тоже нарушена масштабная симметрия безмассовой $-\lambda\varphi^4$
  - Но не массовым членом, а бегущей констаной связи $\lambda(\varphi)$!
  - Решения РГ уравнений известны численно $\Longrightarrow$ фитируем?

Спасибо за внимание!