

Физический факультет МГУ им. Ломоносова.
Кафедра квантовой статистики и теории поля

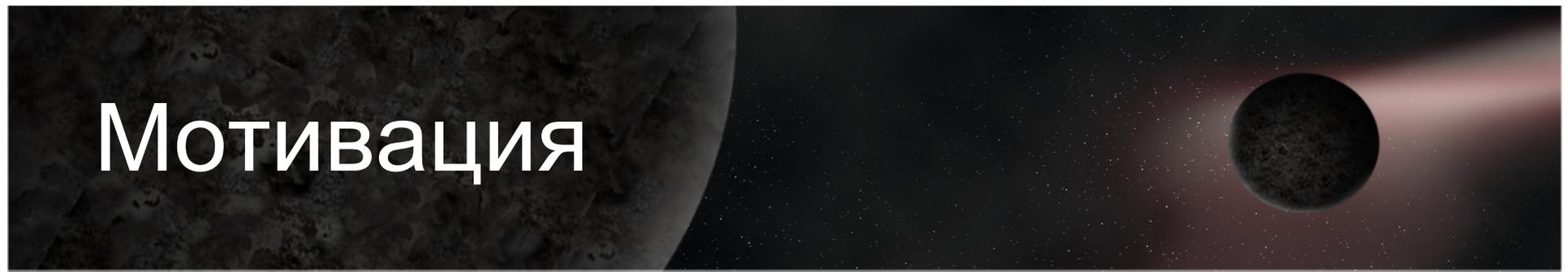
Рождение черных дыр в AdS_3

Доклад Калайджяна Т.К.
Научный руководитель ст.н.с. ИППИ
к.ф.-м.н. доц. Соболевский А.Н.

Цель и задачи работы

- Рассмотреть процесс образования черной дыры в рамках классической трехмерной гравитации с отрицательной космологической постоянной в результате столкновения нескольких безмассовых частиц
- Сформулировать задачу в терминах элементов группы голономии для накрытий AdS_3
- Найти пороговую энергию образования
- Найти длину горизонта как функцию времени и числа налетающих частиц
- Найти решение типа шоковых волн на пространстве анти-де Ситтера и геодезические для них

Мотивация



- Исследование квантовых и термодинамических свойств черных дыр, toy model
- Образование черных дыр на ускорителях высоких энергий
- Гравитация на масштабе ТэВ
- Исследование гравитационных шоковых волн
- Дуальные задачи, AdS/CFT-соответствие
- Развитие математического аппарата для работы с пространствами анти-де Ситтера.

AdS₃: метрика

$$ds_{AdS}^2 = -dZ_0^2 + dZ_1^2 + dZ_2^2 - dZ_3^2$$

$$-\Lambda = l^{-2}$$

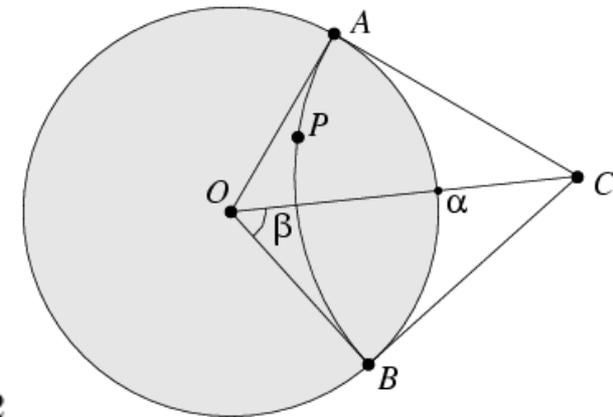
$$-l^2 = -Z_0^2 + Z_1^2 + Z_2^2 - Z_3^2$$

$$ds^2 = d\chi^2 + \sinh^2 \chi d\varphi^2 - \cosh^2 \chi dt^2$$

$$\chi \geq 0 \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad r \equiv \tanh(\chi/2)$$

$$ds^2 = \left(\frac{2}{1-r^2}\right)^2 (dr^2 + r^2 d\varphi^2) - \left(\frac{1+r^2}{1-r^2}\right)^2 dt^2.$$

$t = \text{const}$: геометрия
плоскости Лобачевского в
модели Пуанкаре



VTZ-черная дыра: метрика

M. Bañados, C. Teitelboim, J. Zanelli (1992)

$$ds^2 = -N^2 dt^2 + N^{-2} dr^2 + r^2 (N^\phi dt + d\phi)^2$$

$$N^2(r) = -M + \frac{r^2}{l^2} + \frac{J^2}{4r^2}$$

$$N^\phi(r) = -\frac{J}{2r^2}$$

$$-\Lambda = l^{-2}$$

горизонт черной дыры r_+ :

$$r_{\pm} = l \left[\frac{M}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{J}{Ml} \right)^2} \right) \right]^{1/2}$$

Основная идея: группа голономий

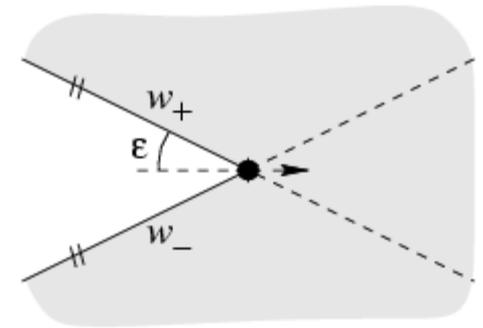
$$\gamma_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{1,2} \cong \mathfrak{sl}(2) : \mathbf{z} = t \gamma_0 + x \gamma_1 + y \gamma_2$$

$$\mathbf{z} \mapsto \mathbf{u}^{-1} \mathbf{z} \mathbf{u}, \quad \mathbf{u} \in \mathrm{SL}(2)$$

$$\mathbf{u} = u \mathbf{1} + p^a \gamma_a, \quad \mathbf{p} = p^a \gamma_a$$

$$\frac{1}{2} \mathrm{Tr}(\mathbf{u}) = \cos m, \quad 0 \leq m \leq \pi$$

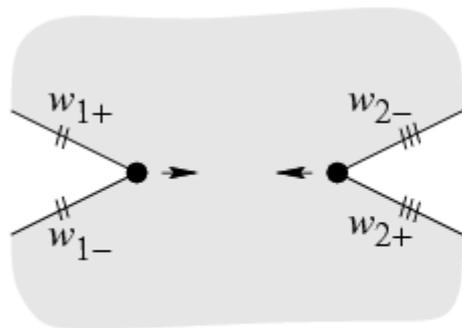


$$\mathbf{u} = \mathbf{1} + \tan \epsilon (\gamma_0 + \gamma_1)$$

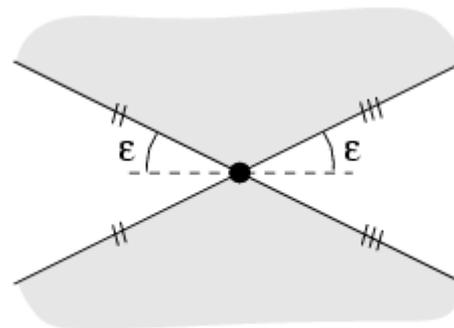
$$\mathrm{AdS}_3 \rightarrow \mathrm{SL}(2, \mathbb{R}) : \mathbf{x} = e^{\frac{1}{2}(t+\varphi)\gamma_0} e^{\chi\gamma_1} e^{\frac{1}{2}(t-\varphi)\gamma_0} =$$

$$= \cosh \chi (\cos t \mathbf{1} + \sin t \gamma_0) + \sinh \chi (\cos \varphi \gamma_1 + \sin \varphi \gamma_2)$$

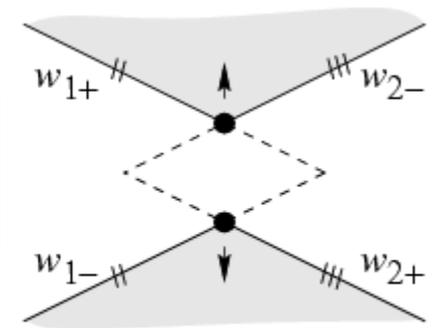
$M_{1,2}$: Столкновение 2-х частиц



(a) $t < 0$



(b) $t = 0$

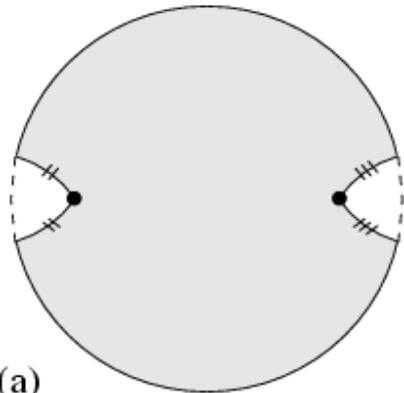


(c) $t > 0$

$$\mathbf{u}_+ = \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_1 = (1 - 2 \tan^2 \epsilon) \mathbf{1} + 2 \tan \epsilon (\gamma_0 + \tan \epsilon \gamma_2)$$

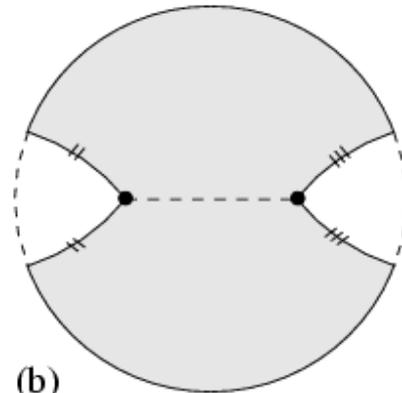
$$\mathbf{u}_- = \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 = (1 - 2 \tan^2 \epsilon) \mathbf{1} + 2 \tan \epsilon (\gamma_0 - \tan \epsilon \gamma_2)$$

AdS_3 : столкновение 2-х частиц



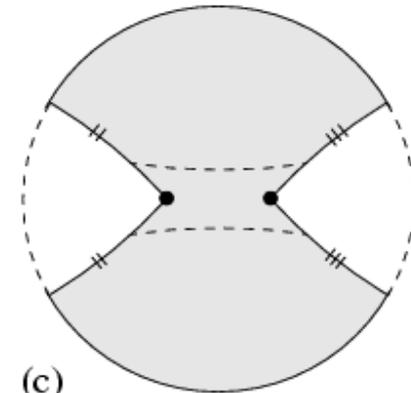
(a)

$$-\pi/2 < t < \tau - \pi/2$$



(b)

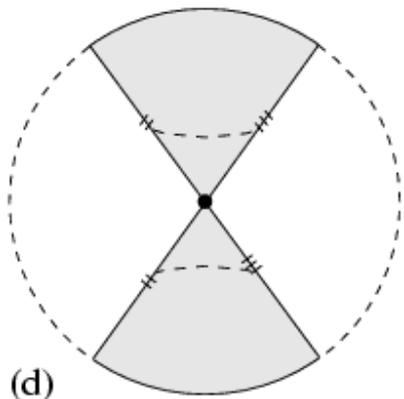
$$t = \tau - \pi/2$$



(c)

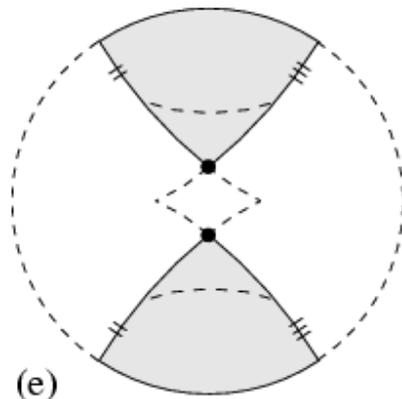
$$\tau - \pi/2 < t < 0$$

$$\varepsilon > \pi / 4$$



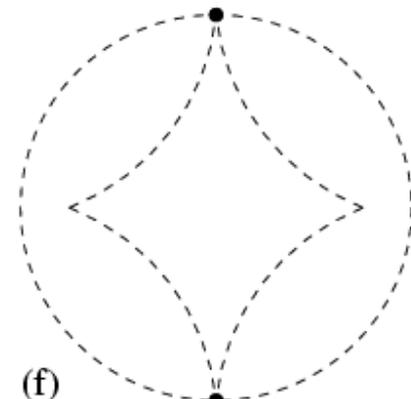
(d)

$$t = 0$$



(e)

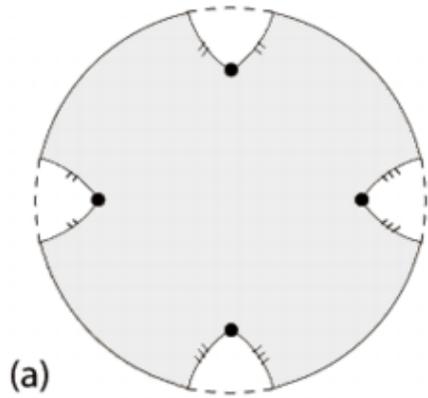
$$0 < t < \tau$$



(f)

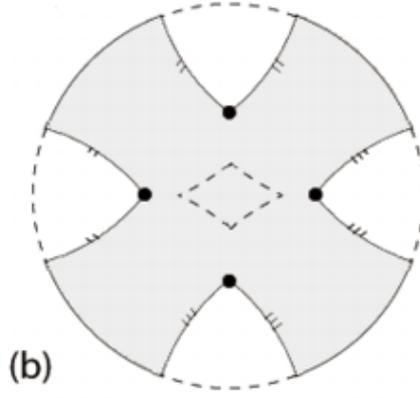
$$t = \tau$$

AdS₃: столкновение 4-х частиц



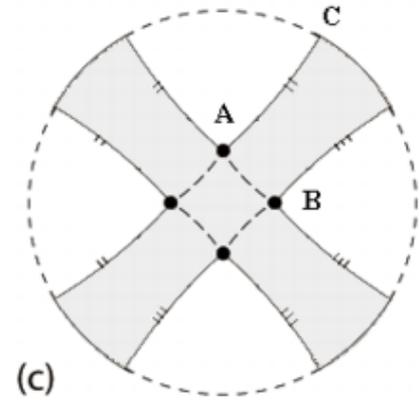
(a)

$$-\pi/2 < t < \tau - \pi/2$$



(b)

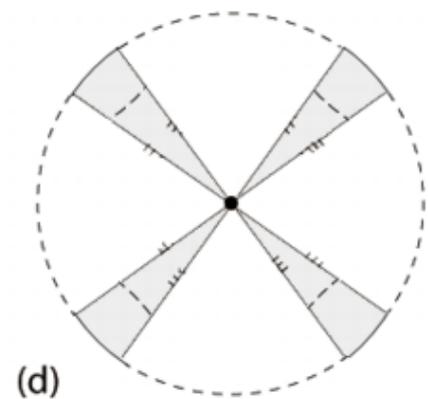
$$\tau - \pi/2 < t < \bar{\tau}$$



(c)

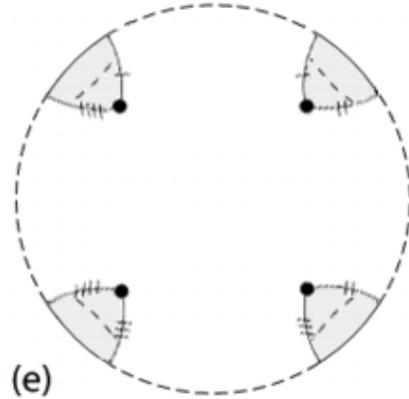
$$t = \bar{\tau}$$

$$\varepsilon > \pi / 8$$



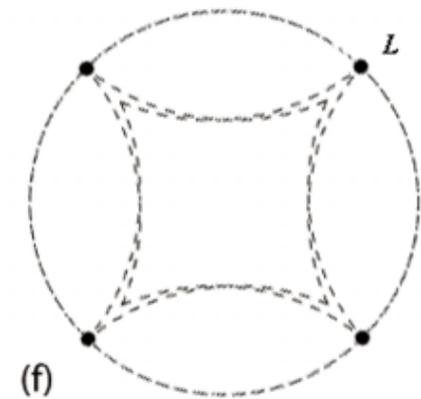
(d)

$$t = 0$$



(e)

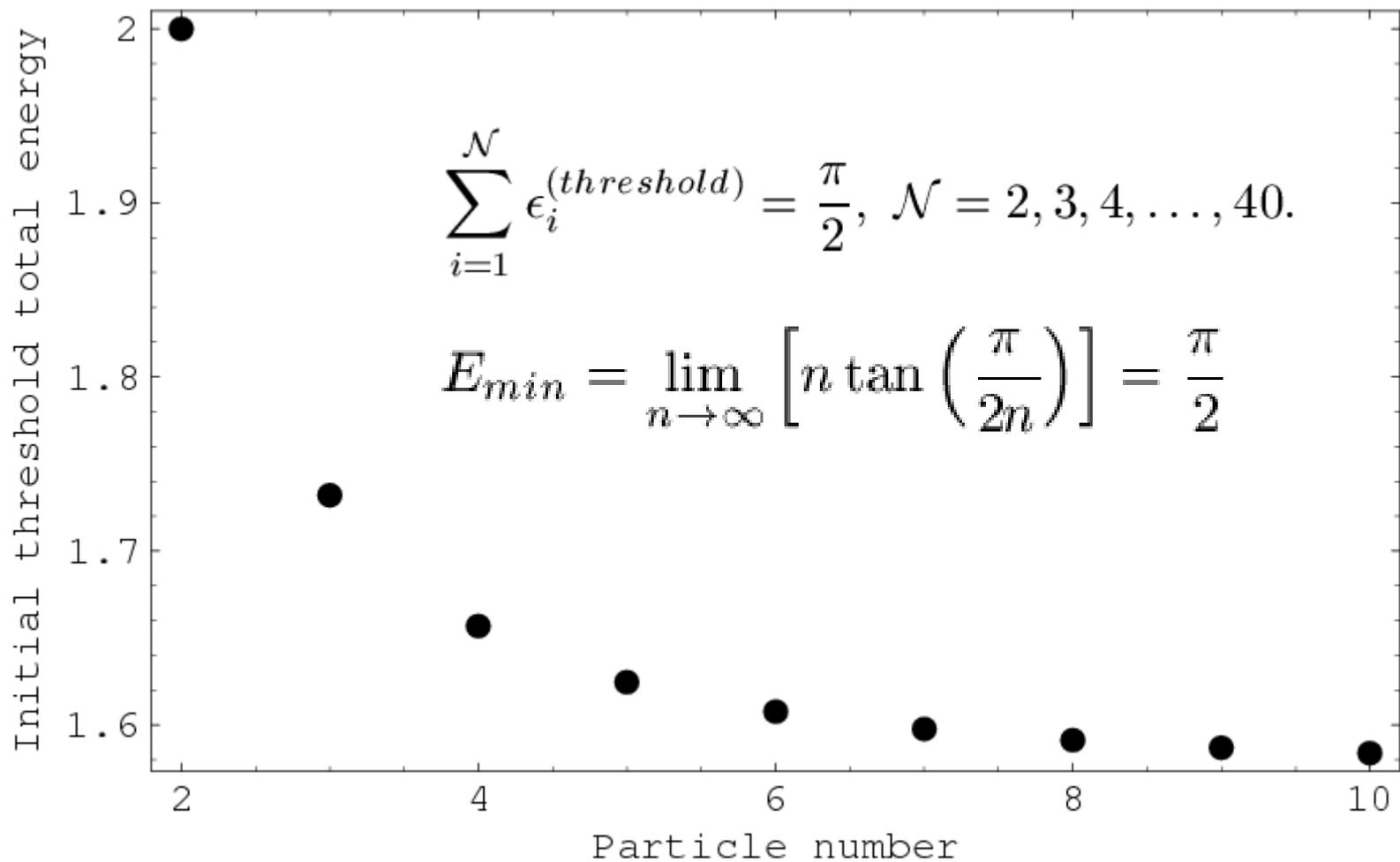
$$0 < t < \tau$$



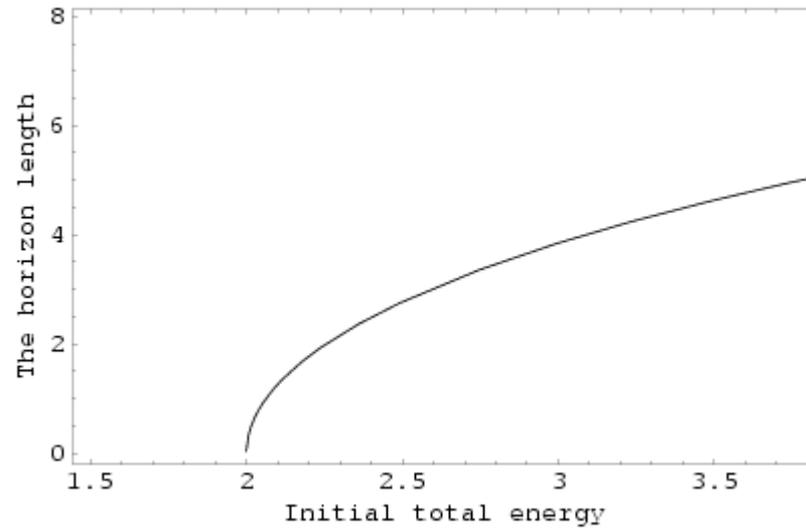
(f)

$$t = \tau$$

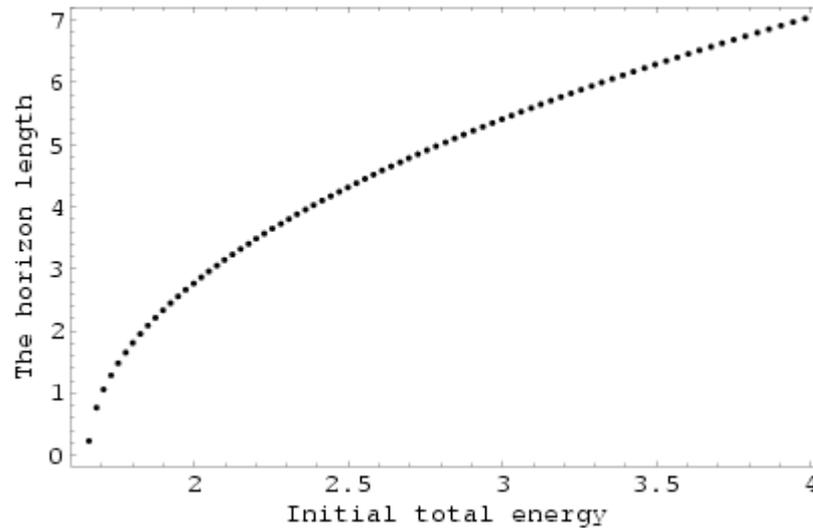
Пороговая энергия



Длина горизонта. $N = 2, 4$

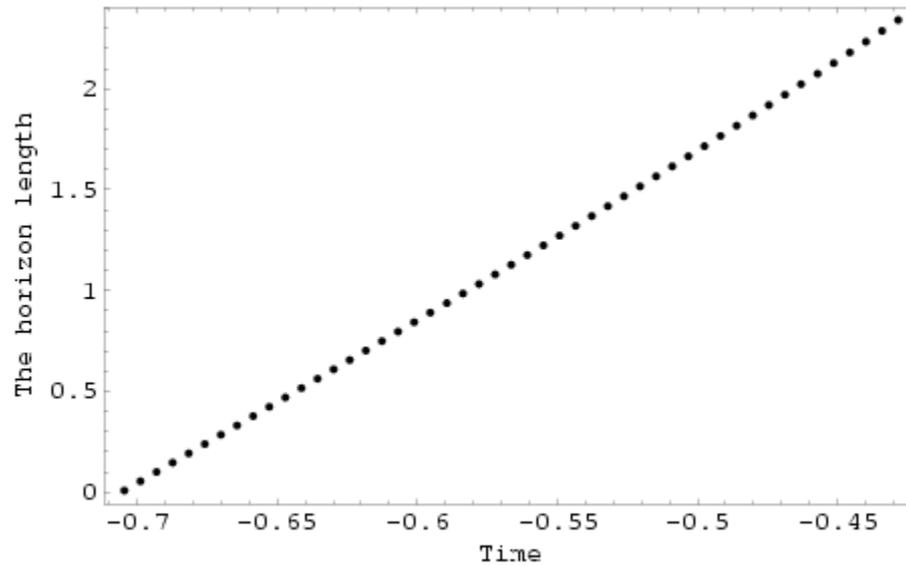


$N = 2$



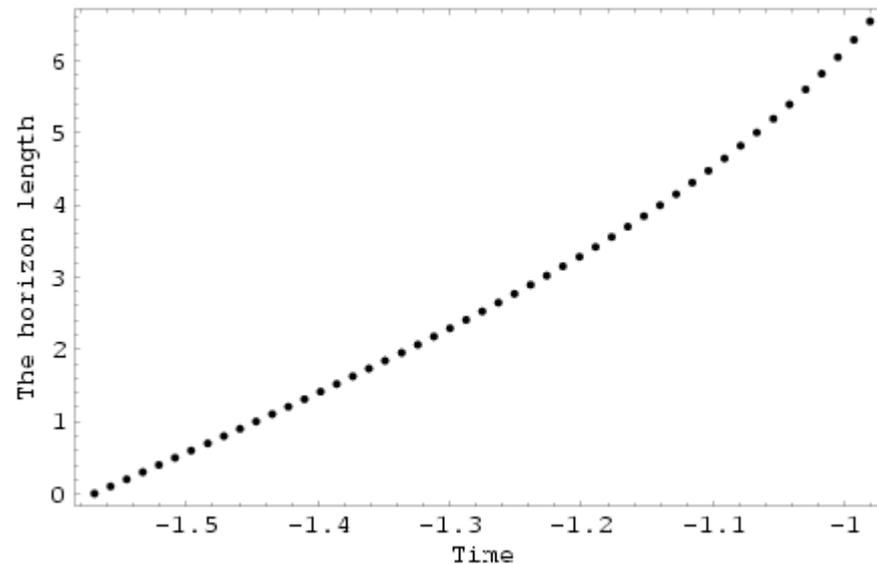
$N = 4$

Динамика горизонта. $N = 4$



$$\varepsilon = \pi / 7$$

После входа
частиц под
горизонт длина
горизонта не
меняется



$$\varepsilon = \pi / 4$$

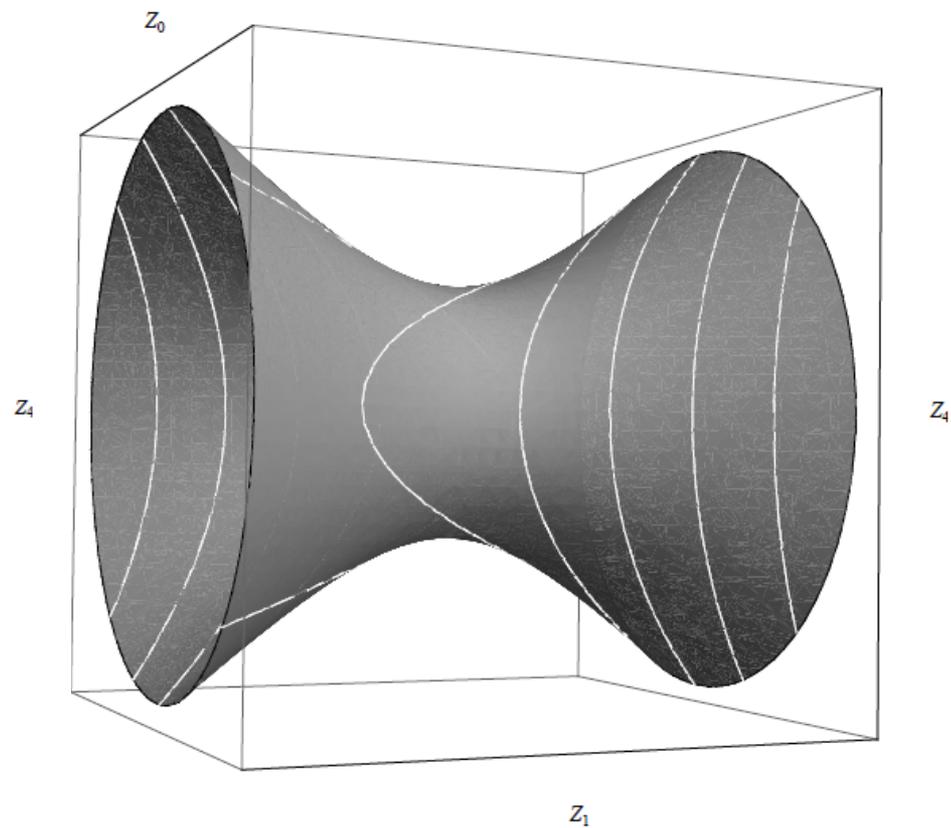
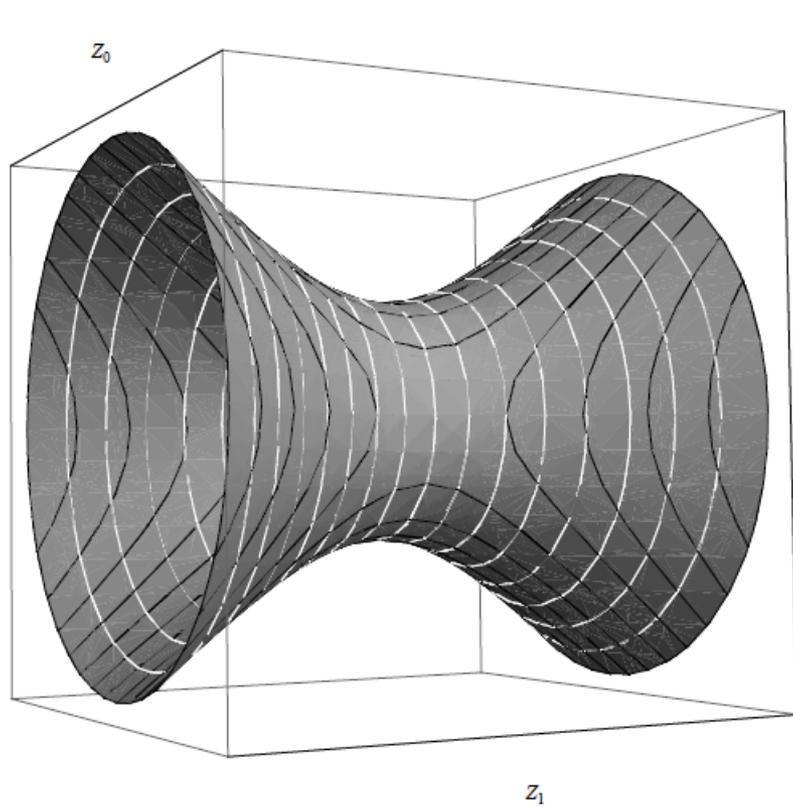
Шоковые волны на AdS_3

$$\begin{aligned} ds_{BOOST}^2 &\rightarrow -dUdV + dZ_2^2 - dZ_4^2 - \pi p |Z_2| \delta(U) dU^2 = \\ &= ds_{AdS}^2 - \pi p |Z_2| \delta(U) dU^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V(U) &= V_0 + \dot{V}_0(1 + U) - \pi p |Z_{20} + \dot{Z}_{20}| \theta(U) - \\ &\quad - \pi p \cdot \text{sgn}(Z_{20} + \dot{Z}_{20}) \left(\dot{Z}_{20} - \frac{\pi p}{4} \cdot \text{sgn}(Z_{20} + \dot{Z}_{20}) \right) U \theta(U) \end{aligned}$$

$$Z_2(U) = Z_{20} + \dot{Z}_{20}(1 + U) - \frac{\pi p}{2} \cdot \text{sgn}(Z_{20} + \dot{Z}_{20}) U \theta(U)$$

Шоковые волны на AdS_3



Заключение

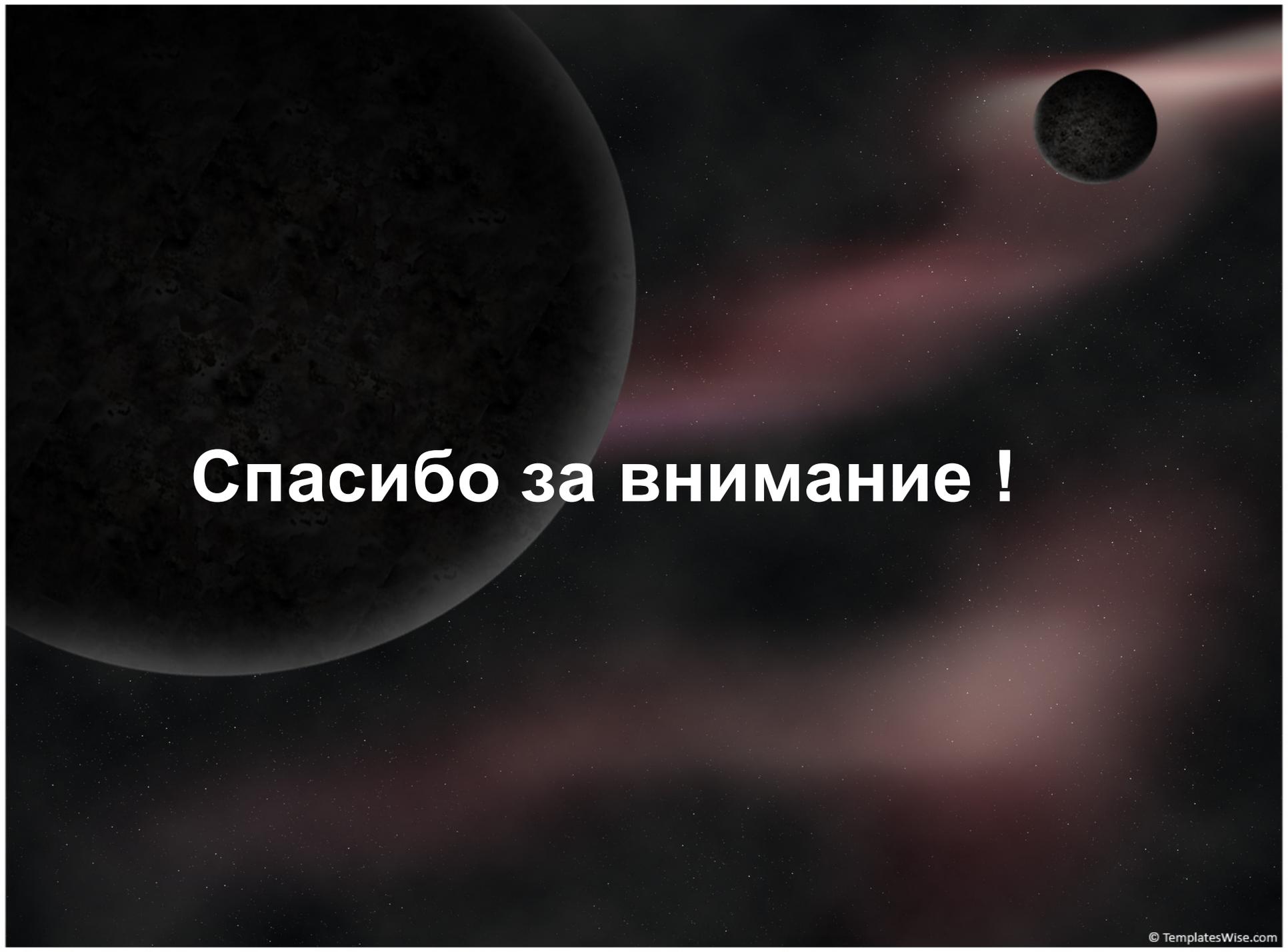


Результаты:

- Метод нахождения параметров системы в результате столкновения
- Ограничение на энергетический порог образования черных дыр
- Размер горизонта в зависимости от числа налетающих частиц
- Динамика горизонта, “no-hair theorem”
- Шоковые волны и геодезические

Дальнейшее исследование:

- Столкновение пучков частиц
- Ненулевой прицельный параметр, кротовы норы
- Trapped surfaces на AdS и кварк-глюонная плазма

A dark space background featuring a large, textured planet on the left and a smaller, cratered planet in the upper right. The scene is filled with numerous small stars and a soft, reddish-pink nebula-like glow.

Спасибо за внимание !