

Информационный парадокс в физике черных дыр: обзор литературы

Дмитрий Левков



Институт ядерных исследований РАН



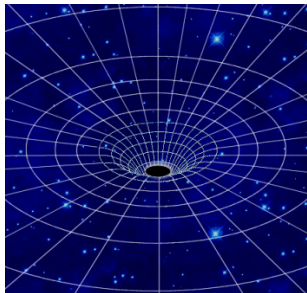
ФИАН, Москва, 12 марта 2013 г.

$$\hbar = k_B = G = 1$$

$$ds^2 = -dt^2(1 - 2M/r) + \frac{dr^2}{1 - 2M/r} + r^2 d\Omega^2$$

Координаты Леметра: $t = \tau + f(r)$

$$ds^2 = -d\tau^2 + (dr - v(r)d\tau)^2 + r^2 d\Omega^2$$
$$v(r) = -\sqrt{2M/r}$$



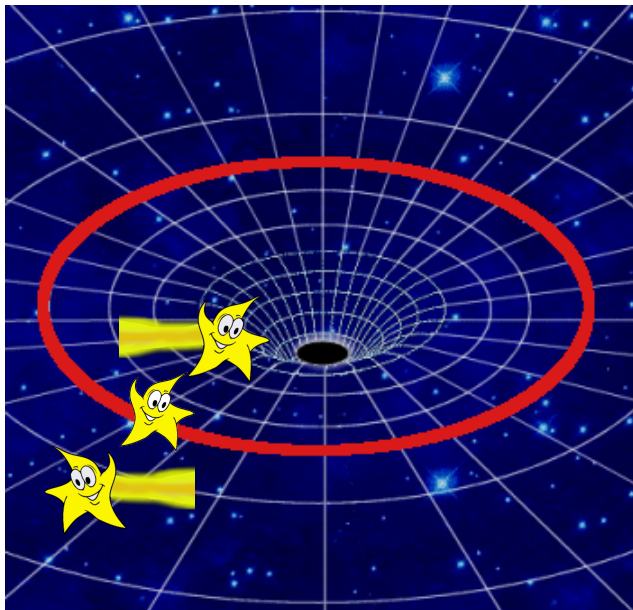
$$-\partial^0 \phi = \partial_0 \phi + v(r) \partial_r \phi \Rightarrow \text{Гидродинамическая аналогия!}$$

Гидродинамическая аналогия

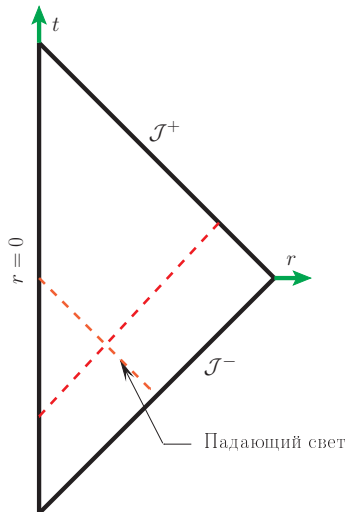


Гидродинамическая аналогия

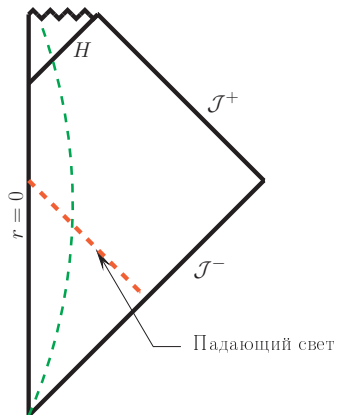




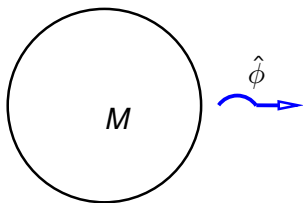
Диаграммы Пенроуза



Плоское пространство



Черная дыра

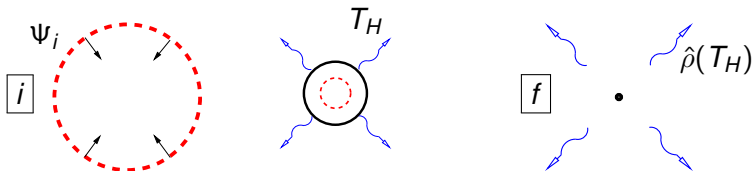


$$T_H = \frac{1}{8\pi M}$$

$$\hat{\rho} = e^{-\hat{H}/T_H} / Z(T_H)$$

Hawking '75

Коллапс:



Hawking '86

$$\Psi_i \rightarrow \hat{\rho}(T_H)$$

{ Нарушение унитарности?
Или горизонт пропускает информацию?

Парадокс?

Пути выхода:

- Поправки \Rightarrow **чистое** излучение Хокинга?

- Неунитарность КТП?

Hawking '86

Самопротиворечивые модели!

- Изменение гравитации? (**firewall, fuzzball**)

Сильное нарушение принципа эквивалентности!

- Остаток?

Не может вместить информацию!

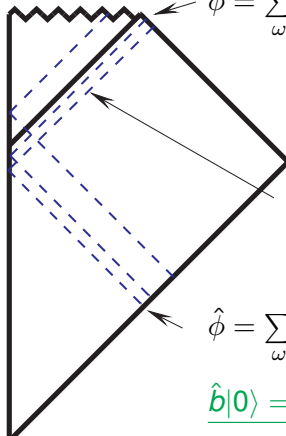
Новорожденная Вселенная?

Frolov, Markov, Mukhanov '89

Не рождается классически!

Вывод излучения Хокинга

$\square \hat{\phi} = 0$ на фиксированном фоне



$$\hat{\phi} = \sum_{\omega} \left[\hat{a}_{\omega} f_{\omega}(r, t) + \hat{a}_{\omega}^{\dagger} f_{\omega}^{*}(r, t) \right]$$

$$f_{\omega}|_{t \rightarrow +\infty} \propto e^{-i\omega t}$$

$\hat{a}|0\rangle \neq 0$ — не вакуум!

$$g_{\omega} \propto e^{-i\omega \tau} \Rightarrow \text{вакуум } |0\rangle$$

$$\hat{\phi} = \sum_{\omega} \left[\hat{b}_{\omega} g_{\omega}(r, t) + \hat{b}_{\omega}^{\dagger} g_{\omega}^{*}(r, t) \right]$$

$$g_{\omega}|_{t \rightarrow -\infty} \propto e^{-i\omega t}$$

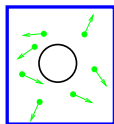
$\hat{b}|0\rangle = 0$ — вакуум!

$f_{\omega}, f_{\omega}^{*}$ и $g_{\omega}, g_{\omega}^{*}$ — 2 разных базиса \Rightarrow

$$\hat{b}_{\omega} = \alpha_{\omega} \hat{a}_{\omega} + \beta_{\omega}^{*} \hat{a}_{\omega}^{\dagger}$$

Вывод излучения Хокинга

$$n_\omega = \langle 0 | \hat{b}_\omega^+ \hat{b}_\omega | 0 \rangle = |\beta_\omega|^2 = \frac{1}{e^{\omega/T_H} - 1} \quad \Leftrightarrow \quad \hat{\rho} = \frac{1}{Z} e^{-\hat{H}/T_H}$$



$$S_{BH} = \frac{\delta Q}{T_H} = A/4$$

Приближения:

- Квазиклассическая гравитация: $M \gg 1$
- Излучение не влияет на фон: $T_H \ll M \Leftrightarrow M \gg 1$

Могут ли поправки по $1/M$ нести всю информацию?

Berezin, Boyarsky, Neronov '99

Parikh, Wilczek '00

- ① Унитарная эволюция:

$$\Psi_{\Sigma_t} = \hat{U}_t \Psi_{\Sigma_0},$$

$$\hat{U}_t^\dagger \hat{U}_t = 1$$

- ② Локальность:

$$\mathcal{H}_{\Sigma_t} = \mathcal{H}_{\Sigma_{in}} \otimes \mathcal{H}_{\Sigma_{out}}$$

$$\begin{array}{ccc} \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow \\ \Psi_{\Sigma_t} & \Psi_{\Sigma_{in}} & \Psi_{\Sigma_{out}} \end{array}$$

- ③ Унитарность \mathcal{S} -матрицы:

$$\Psi_{\Sigma_{out}} = \hat{S}_{out} \Psi_{\Sigma_0} \text{ — чистое!}$$

$$\text{Следствие: } \Psi_{\Sigma_t} = \Psi_{\Sigma_{in}} \otimes \Psi_{\Sigma_{out}}$$

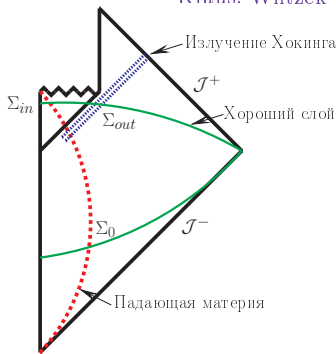
$$\parallel \hat{S}_{out} \Psi_{\Sigma_0}$$

- ④ Принцип эквивалентности:

$$\Psi_{\Sigma_{in}} = \hat{S}_{in} \Psi_{\Sigma_0}$$

Таким образом,

$$\Psi_{\Sigma_0} \rightarrow (\hat{S}_{in} \otimes \hat{S}_{out}) \cdot (\Psi_{\Sigma_0} \otimes \Psi_{\Sigma_0})$$

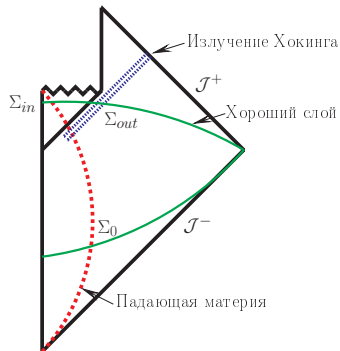


$$\begin{cases} |A\rangle \rightarrow |A\rangle \otimes |A\rangle \\ |B\rangle \rightarrow |B\rangle \otimes |B\rangle \end{cases}$$
$$|A\rangle + |B\rangle \begin{matrix} \swarrow \\ \rightarrow \end{matrix} |A\rangle \otimes |A\rangle + |B\rangle \otimes |B\rangle \neq (|A\rangle + |B\rangle) \otimes (|A\rangle + |B\rangle)$$

Нарушение принципа суперпозиции!

Где ошибка?

- 1 Унитарная эволюция?
Между какими состояниями?
Остаток?
- 2 Локальность?
 $\mathcal{H}_{\Sigma_{in}} \cap \mathcal{H}_{\Sigma_{out}} \neq 0!$
- 3 Унитарность \mathcal{S} -матрицы?
- 4 Принцип эквивалентности?
Что-то есть на горизонте.



Квантовая механика: $\Psi(x)$ или $\Psi(p)$.

Susskind, Thorlacius, Uglum '93

Черные дыры:

асимптотический и падающий наблюдатели **не встречаются!**

Предположения.

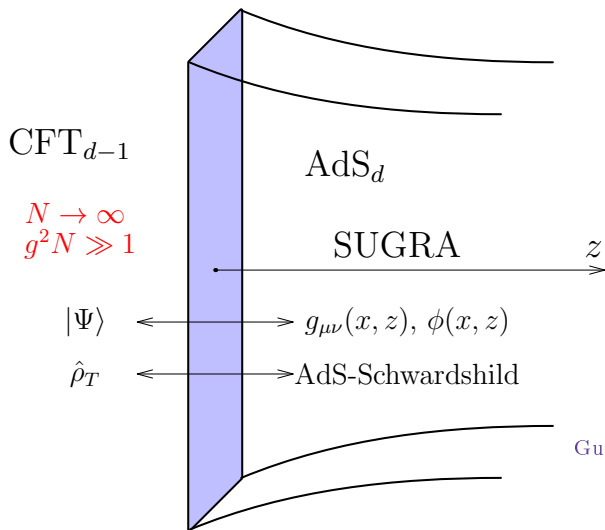
Асимптотический наблюдатель:

- 1 S —матрица унитарна;
- 2 квазиклассическая гравитация верна вне горизонта;
- 3 черная дыра имеет $\exp(S_{BH})$ микросостояний.

Падающий наблюдатель:

- 1 не встречает ничего особенного на горизонте.

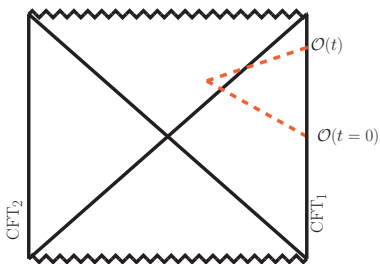
Формулировка квантовой гравитации!



Maldacena, 1997

Gubser, Klebanov, Polyakov, 1998

Witten, 1998



$$\langle \hat{\mathcal{O}}(t) \hat{\mathcal{O}}(0) \rangle \propto \begin{cases} e^{-D \cdot t/M}, & t \ll t_{\text{испарения}} \\ e^{-c \cdot S_{\text{ВН}}}, & t \sim t_{\text{испарения}} \end{cases}$$

D — коэффициент диссипации

Есть корреляции при $t \sim t_{\text{испарения}}$!

Унитарность \mathcal{S} -матрицы можно считать подтвержденной!

Разрешение парадокса:

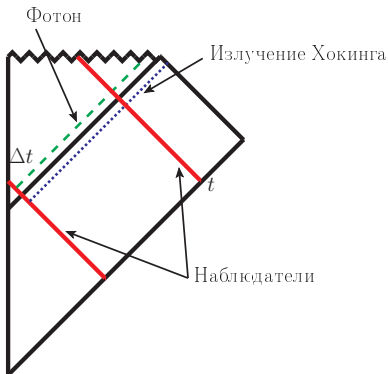
- Фотон упал в сингулярность при
 $t > t_* \sim -2M \ln \Delta t$
- Принцип неопределенности:
 $\Delta t M > 1$



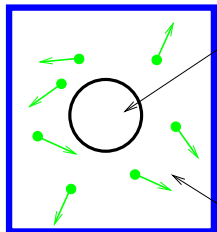
Задержка Хокинговского фотона

$$t > t_* \sim M \ln M$$

t_* — время засекачивания



Время испускания Хокинговского фотона еще больше!



A: Черная дыра, $N_A = \exp(A/4)$
 $\hat{\rho}_A = \text{tr}_B \hat{\rho}$

B: Радиация, $N_B = \exp(S_r)$
 $\hat{\rho}_B = \text{tr}_A \hat{\rho}$

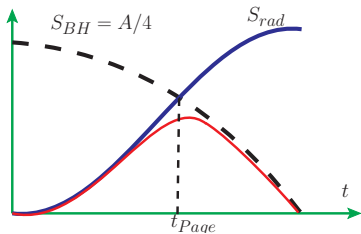
Энтропия запутывания: $\tilde{S}_i = \text{tr}_i(\hat{\rho}_i \ln \hat{\rho}_i)$

- $\hat{\rho} = |\Psi\rangle\langle\Psi| \Rightarrow \tilde{S}_A = \tilde{S}_B$
- $\max(\tilde{S}_i) = \ln N_i$ — достигается при $\hat{\rho}_i \propto \hat{1}$
- $\min(\tilde{S}_i) = 0$ — достигается при $\hat{\rho}_i = |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|$

Выводы:

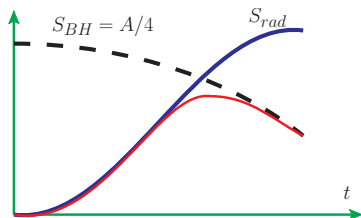
- $I_B = \ln N_B - \tilde{S}_B$ — количество информации в радиации.
- $\tilde{S}_B < \min(\ln N_A, \ln N_B) = \min(A/4, S_r)$

При испарении черной дыры



Нет остатка

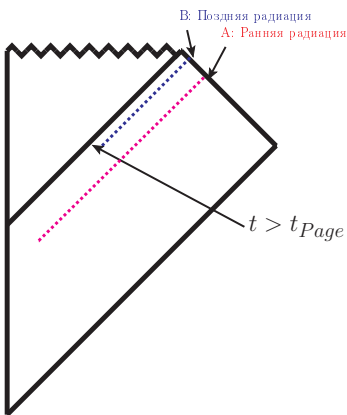
$$t_{Page} \approx \frac{1}{2} t_{\text{испарения}} \\ \propto M^3$$



Есть остаток

$$N > \exp(\tilde{S}_B) \gg 1!$$

Аргумент: Для типичного $|\Psi_{A+B}\rangle$ энтропия \tilde{S} близка к максимальной.



Свойства подсистем:

- $\hat{\rho}_{A+B} = |\Psi\rangle\langle\Psi|$,
но **A** и **B** запутаны!
- **A: Ранняя радиация**
 $\hat{\rho}_A$ неизвестно
 $N_A \sim \exp[(A_0 - A_t)/4]$
- **B: Поздняя радиация**
 $\hat{\rho}_B = \hat{I}/N_B$
 $N_B \sim \exp(A_t/4) \ll N_A$

Теорема

Измеряя систему **A**, можно перевести систему **B** в любое состояние.

Парадокс AMPS

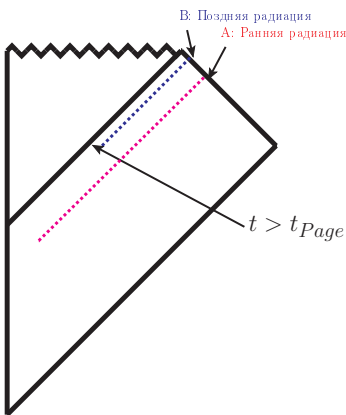
Almheiri, Marolf, Polchinski, Sully '12

Измеряем $A \Rightarrow \hat{\rho}_B = |n_\omega\rangle\langle n_\omega|$
 $\hat{b}_\omega|n_\omega\rangle = (\alpha_\omega\hat{a}_\omega + \beta_\omega^*\hat{a}_\omega^+)|n_\omega\rangle \neq 0$

Но B не в вакууме вблизи горизонта!



Падающий наблюдатель встречает
частицы **вне** горизонта!



Выход:

Существенная нелокальность или **огненная стена**.

- Горизонт - **нелокальное** понятие!
Видимый горизонт не подходит!
Сильная нелокальность?
Hwang, Lee, Yeom '12
- **AdS/CFT**:
Локальные операторы $\hat{\phi}(x, z) = \sum_{\omega} \hat{O}_{\omega} f_{\omega}(x, z)$
На горизонте ничего особенного!
Papadodimas, Raju '12
- Измерение **A** изменит макроскопическое состояние черной дыры!
Hsu '13
- **Нет времени** на квантовое вычисление!
Harlow, Hayden '13
Susskind '13
- Нельзя выделить «позднее» излучение, близкое к горизонту.
Jacobson '12
Susskind '13

Жить стало веселее!

