

Информационный парадокс в физике черных дыр

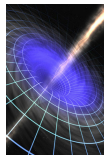
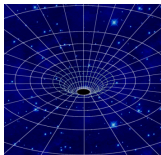
Дмитрий Левков



Кафедра физики частиц
и космологии ФФ МГУ



ИЯИ РАН

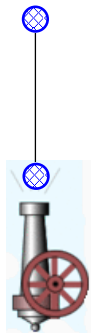


Физфак МГУ, 23 апреля 2015 г.

Черная звезда Митчелла (1784 г.)

Вторая космическая скорость: $v_2 = \sqrt{2GM/R}$

$$v_2 < c$$



$$v_2 > c$$

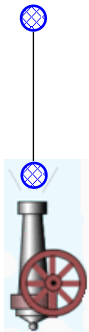
$$(R > 2GM/c^2)$$



Черная звезда Митчелла (1784 г.)

Вторая космическая скорость: $v_2 = \sqrt{2GM/R}$

$$v_2 < c$$



$$v_2 > c$$

$$(R > 2GM/c^2)$$



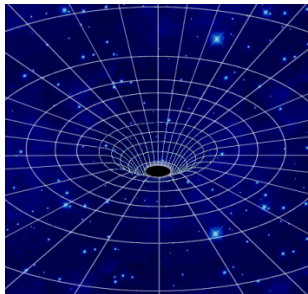
Радиус Шварцшильда:

$$R_S = 2GM/c^2$$

$$R_S(M_\odot) \approx 3\text{ км}$$

ОТО

Решение Шварцшильда



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

$R_S = 2GM/c^2$ — радиус Шварцшильда.

Гидродинамическая аналогия

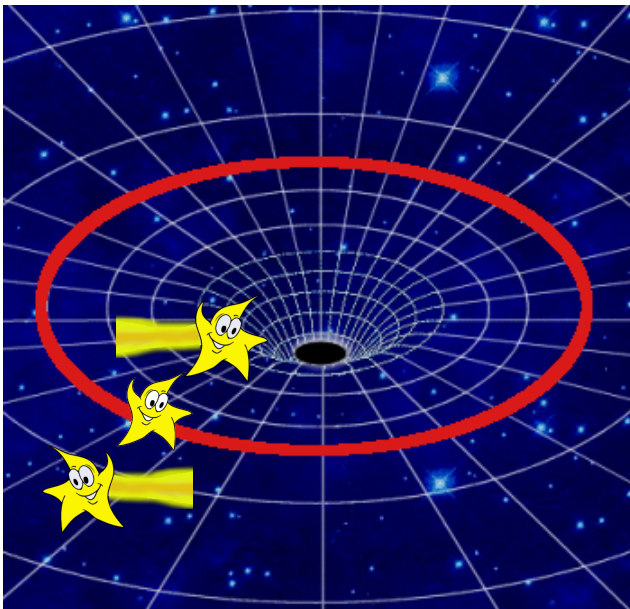


Гидродинамическая аналогия



Черная дыра

$$R = R_S$$

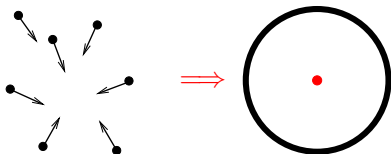


Решение сингулярно!

Сингулярности запрещены! Не рассмотрим?

Теоремы о сингулярностях (С. Хокинг, Р. Пенроуз, 1970-е)

Сингулярности образуются из **гладких** конфигураций!



Коллапс — процесс образования черной дыры.

Не обойтись без сингулярных решений!

Решение сингулярно!

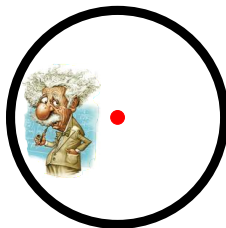
~~Сингулярности запрещены!~~

Гипотеза о космической цензуре

Все гравитационные сингулярности **за горизонтом**.

Мы **не можем измерить**, что там творится!

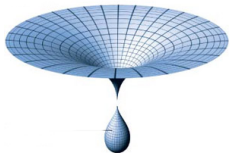
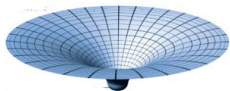
⇒ Сингулярности разрешены! (Отсюда все проблемы)



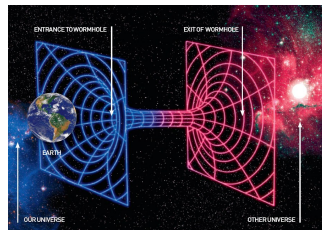
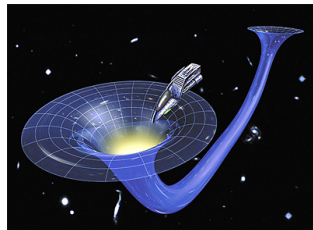
Эйнштейн, до свидания!

А может, нет сингулярности?

Новорожденная Вселенная?



Кротовая нора?



Для этих решений требуется материя с $E < 0$!

Нет такой материи!

Черные дыры - могильщики Вселенной?



Сколько информации поместится?

Сколько у черной дыры состояний!

$$\Gamma = e^S$$

S — энтропия черной дыры.

Чему равна энтропия черной дыры?

Как вычислить энтропию?



Сколько спичек в коробке?

Тряси и слушай!



Энтропия \longleftrightarrow число спичек, которые могут двигаться.



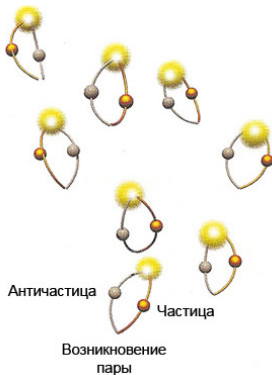
Как «потрясти» черную дыру?

Квантовые флуктуации «трясут» все!

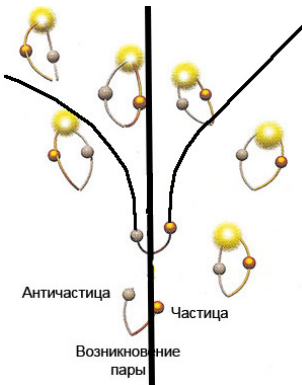
Испарение черных дыр: С. Хокинг, 1975 г.

Принцип неопределенности Гайзенберга: $\Delta p \Delta x \sim \Delta E \Delta x \gtrsim \hbar$

в вакууме:



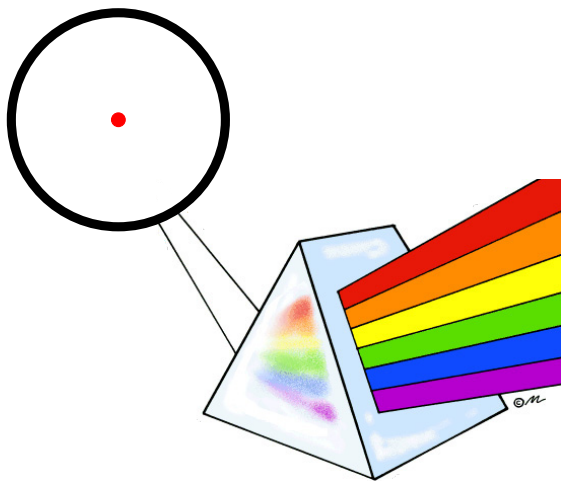
вблизи горизонта:



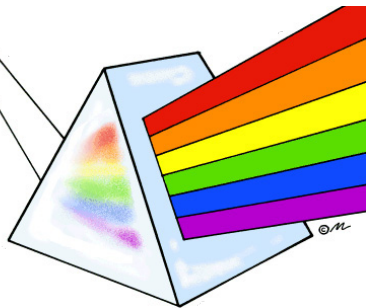
Масса черной дыры уменьшается:

$$\Delta M = -\Delta E/c^2$$

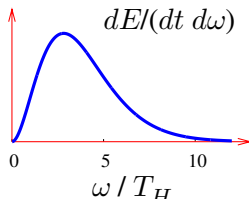
Спектр излучения черной дыры



Спектр излучения черной дыры



$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}$$

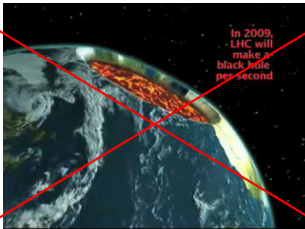


Черная дыра = черное тело с температурой T_H !

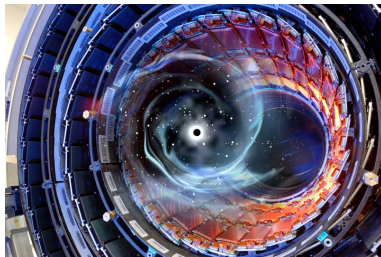
Низкая температура: $T_H(M_\odot) \sim 10^{-7} K$

Высокая температура: $T_H(1 \text{ kg}) \sim 10^{23} K$

Черные дыры на БАК



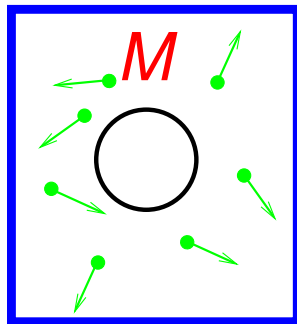
Маленькие черные дыры
мгновенно испаряются!



Черная дыра - нагретое тело!



=



I начало термодинамики

Сохранение энергии: $\delta Q = dM c^2$

Энтропия черной дыры

Теорема Клаузиуса:

$$dS = \frac{\delta Q}{k T_H} = \frac{8\pi G}{\hbar c} \cdot M \cdot dM$$

Энтропия Бекенштейна:

$$S = \frac{4\pi G}{\hbar c^3} \cdot M^2 = \frac{4\pi R_S^2}{4l_P^2}$$

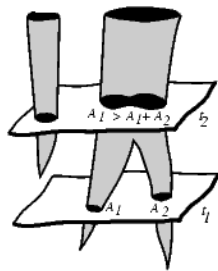
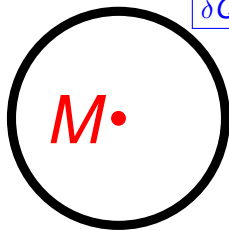
$$l_P = \sqrt{\hbar G / c^3} \sim 10^{-33} \text{ см} — \text{длина Планка}$$

II начало термодинамики: С. Хокинг, 1970 г.

Площадь горизонта **увеличивается!**

Не дырка в пространстве!

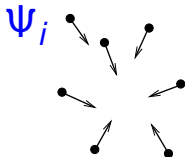
$$\delta Q = dM$$



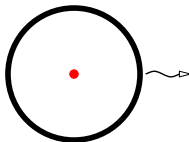
Информационный парадокс

Коллапс и испарение:

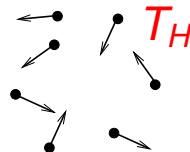
Начало



Черная дыра



Конец



Куда делась информация?

Назад по времени: Нарушен принцип детерминизма!



Бокс?



Как решить парадокс?

- Хокинг ошибся: информация сохраняется.

Но: Информация \rightarrow сингулярность,
а излучает горизонт!



- ОТО — самопротиворечивая теория.

Но: Какая теория — правильная?

- Информация исчезает в новорожденной Вселенной.

Но: Нет решений, описывающих эти процессы!

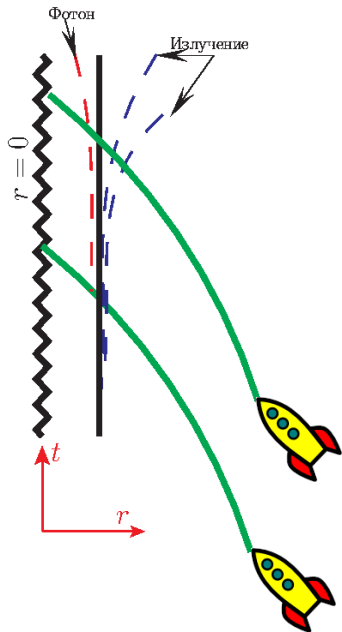


1997 г.: пари. С. Хокинг и К. Торн против Дж. Прескилла.

2004 г. Хокинг признал поражение.

Ошибка Хокинга? Парадокс клонирования!

Susskind, Thorlacious '93



Наблюдатель 2

2 одинаковых фотона $\Psi \rightarrow \Psi \cdot \Psi$

Запрещено в квантовой теории!

Принцип неопределенности

Нельзя одновременно измерить x и p !

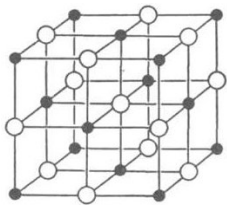
$$\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$$

Противоречие!

Разрешение противоречия

Информация выходит через время
зачекривания?

Черные дыры $(2 + 1)$ -мерные?



$$N \times N \times N$$



$$(3 + 1)D$$

$$\Gamma \sim 2^{N^3} \Rightarrow S = \ln \Gamma \propto N^3$$

Ограничение Бекенштейна

$$S < S_{BH} = \frac{4\pi R^2}{4l_P^2}$$



Мир двумерен!

Его можно описать с помощью функций $2+1$ переменных?!

Черные дыры (2 + 1)-мерные?



$$N \times N \times N$$

Черная дыра

$$S \propto R_S^2 \propto N^2$$

Ограничение Бекенштейна

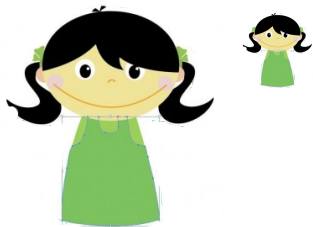
$$S < S_{BH} = \frac{4\pi R^2}{4l_P^2}$$



Мир двумерен!

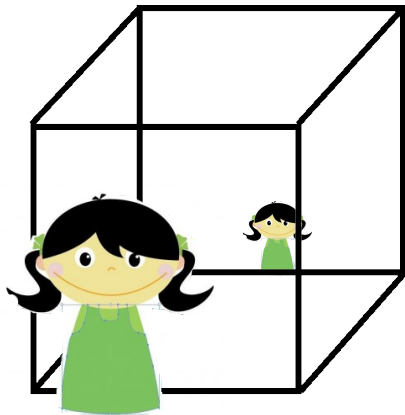
Его можно описать с помощью функций 2+1 переменных?!

Х. Мальдасена, 1997



Девочка меньше

Х. Мальдасена, 1997



Девочка дальше

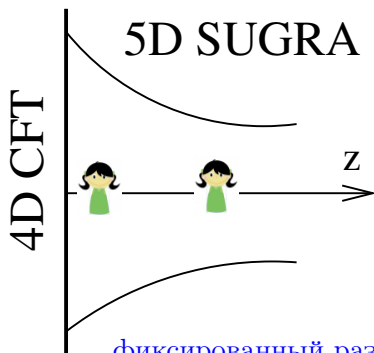
Пример голографического описания

AdS/CFT соответствие



Хуан Малдасена

решения всех размеров!
плоское пространство



$$l_P = \sqrt{\hbar G / c^3}$$

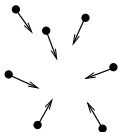
$$\text{AdS} = \text{CFT}$$

Квантовая теория гравитации!

Решение информационного парадокса

Было:

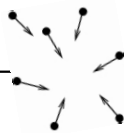
4D



частицы

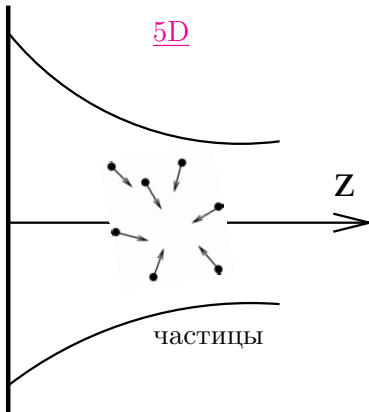
плоское
пространство

5D



частицы

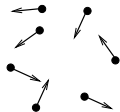
гравитация



Решение информационного парадокса

Стало:

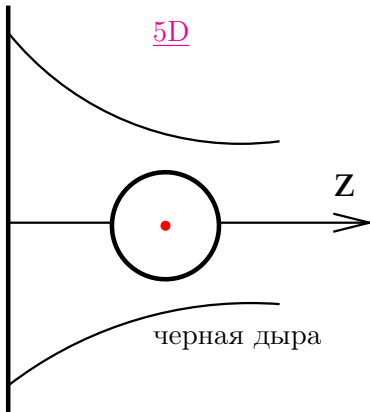
4D



частицы

плоское
пространство

5D



черная дыра

гравитация

Ищите лучше: Информация сохраняется!

Парадокс огненной стены

Принцип суперпозиции: $\Psi = \underbrace{\Psi_1}_{\text{нет атома}} + \underbrace{\Psi_2}_{\text{есть атом}}$



$$\psi^{cat} = \underbrace{\psi_1^{cat}}_{\text{мертвый}} + \underbrace{\psi_2^{cat}}_{\text{живой}}$$

Измерение: Либо мертвый, либо живой!

Чтобы узнать, какой кот бывает, надо измерить!

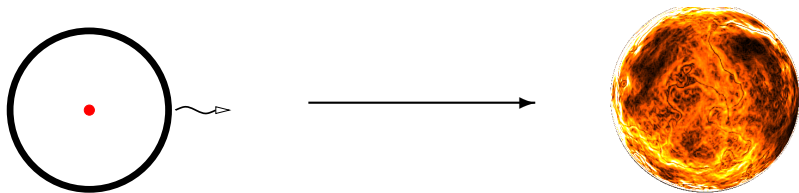
Парадокс огненной стены

Almheiri, Marolf, Polchinski, Stanford, Sully, 2012:

Если информация сохраняется, тогда

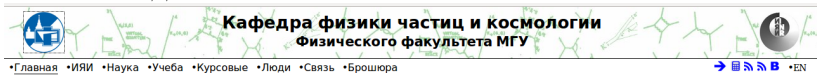
Измерение радиации Хокинга

⇒ огненная стена вокруг черной дыры!



Возможно, черная дыра — совсем не то, что кажется!

- Сайт: <http://ppc.inr.ac.ru>



Дорогие друзья!

Интересует ли вас устройство нашей Вселенной? А может, вы мечтаете придумать новую теорию элементарных частиц? В общем, вас привлекают загадки фундаментальной физики? **Тогда мы ждем вас!**

Кафедра физики частиц и космологии [Физического факультета МГУ](#) основана приказом ректора в декабре 2008 года по инициативе сотрудников [Института ядерных исследований РАН](#). Научная деятельность кафедры связана с задачами на стыке теоретической физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. В состав кафедры входят ученые-теоретики мирового уровня. Обучение студентов на кафедре ориентировано на научную работу в сотрудничестве со специалистами из различных институтов - [НИИЯФ](#), [ОИЯИ](#), [ФИАН](#), [ИТЭФ](#). Кафедра поддерживает устойчивые научно-технические связи с зарубежными институтами, такими как [CERN](#), [EPFL](#) (Швейцария), [ULB](#) (Бельгия), [ICRR](#) (Япония), [Boston U.](#) (США). Базовым институтом кафедры является [Институт ядерных исследований РАН](#).



Темная материя в сталкивающихся скоплениях галактик

- Курсовые работы:
 - Найдите сотрудника: <http://ppc.inr.ac.ru/professors.php>
 - Либо курсовую: <http://ppc.inr.ac.ru/2kurs.php>
- Встреча с кафедрой: 28 апреля, 17:05, 5-24
- Защита курсовых (2 курс): 13 мая, 15:00
- Собеседование (2 курс): 15 мая, 16:00



за внимание!