

Информационный парадокс в физике черных дыр

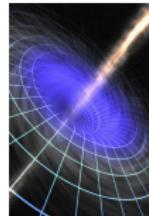
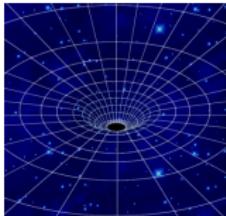
Дмитрий Левков



Кафедра физики частиц
и космологии ФФ МГУ



ИЯИ РАН



Физфак МГУ, 23 апреля 2015 г.

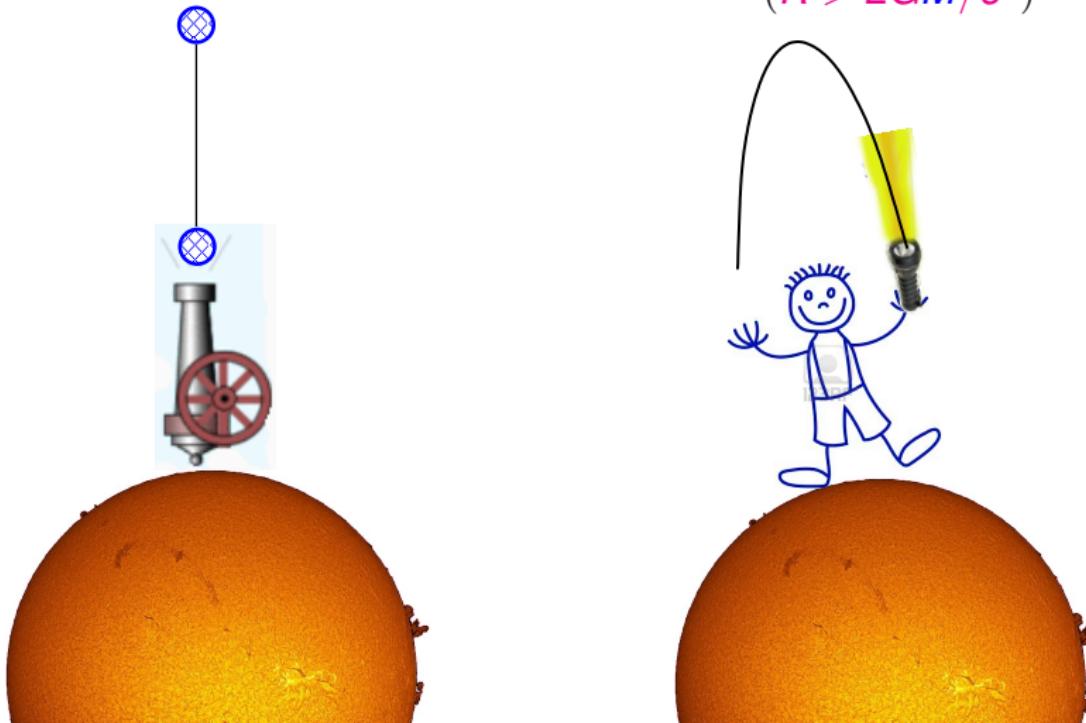
Черная звезда Митчелла (1784 г.)

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

$$v_2 < c$$

$$v_2 > c$$

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



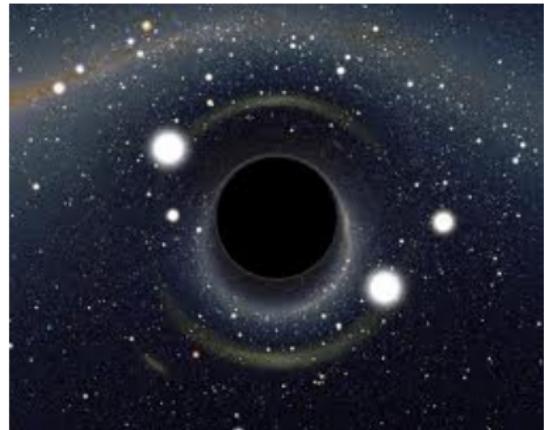
Черная звезда Митчелла (1784 г.)

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

$$v_2 < c$$

$$v_2 > c$$

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



Радиус Шварцшильда:

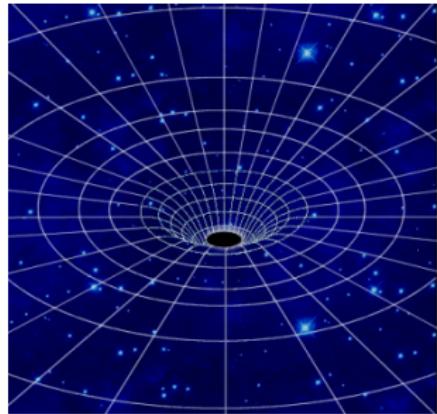
$$R_S = 2GM/c^2$$

$$R_S(M_\odot) \approx 3\text{ km}$$

Черная дыра в ОТО

OTO

Решение Шварцшильда



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

$R_S = 2GM/c^2$ — радиус Шварцшильда.

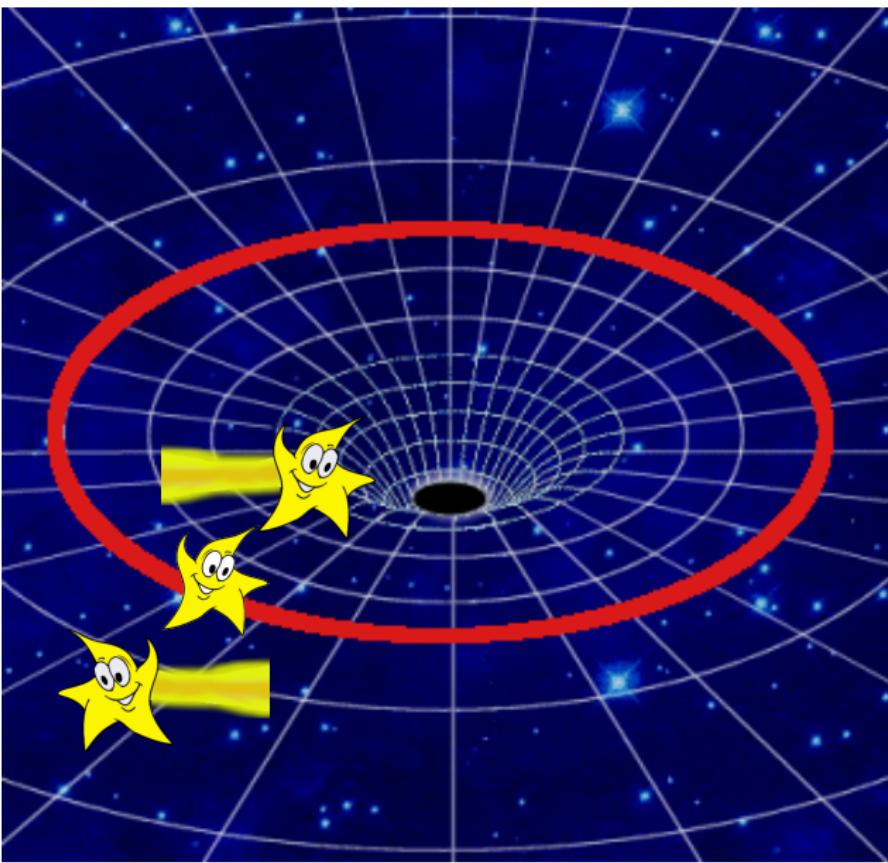
Гидродинамическая аналогия



Гидродинамическая аналогия



Черная дыра

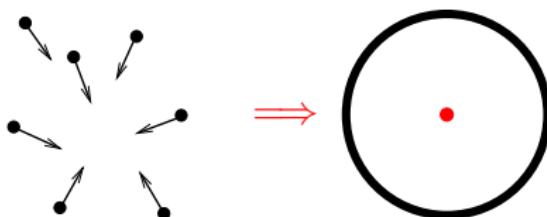


Решение сингулярно!

Сингулярности запрещены! Не рассматриваем?

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!

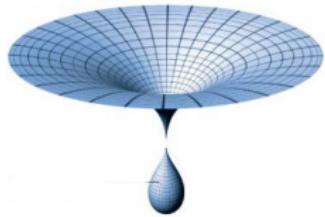
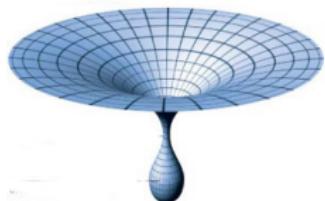
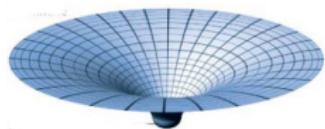
⇒ Сингулярности разрешены! (Отсюда все проблемы)



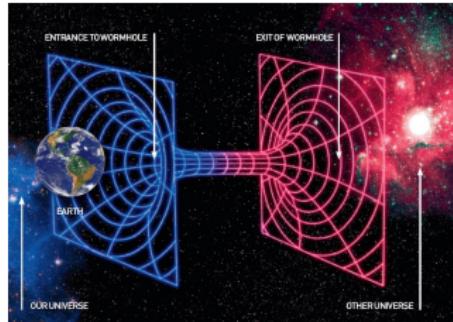
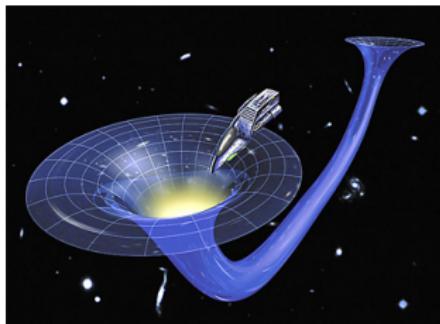
Эйнштейн, до свидания!

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.



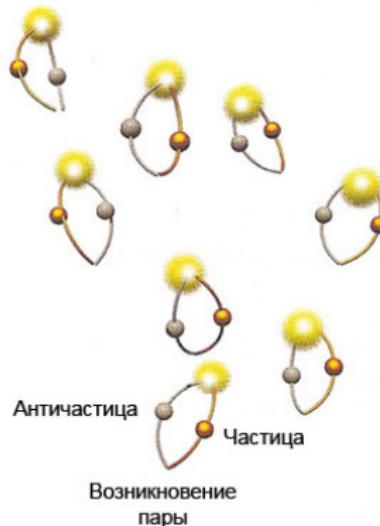
Как «потрясти» черную дыру?

Квантовые флюктуации «трясут» все!

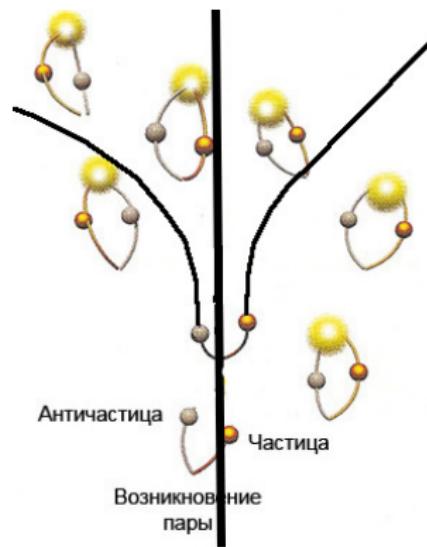
Испарение черных дыр: С. Хокинг, 1975 г.

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

в вакууме:



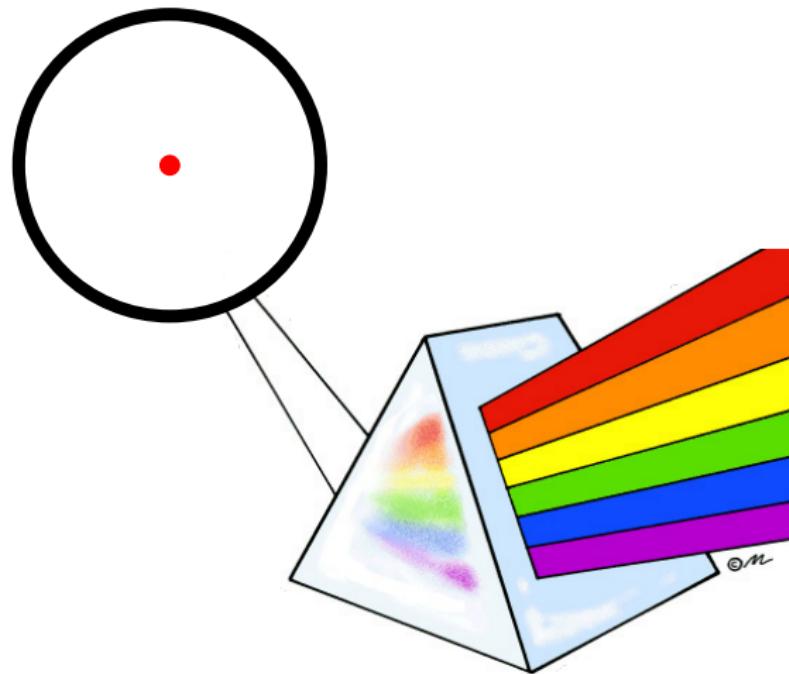
вблизи горизонта:



Масса черной дыры уменьшается:

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

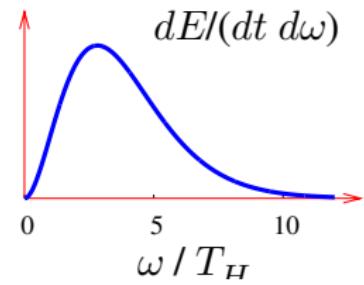
Спектр излучения черной дыры



Спектр излучения черной дыры



$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

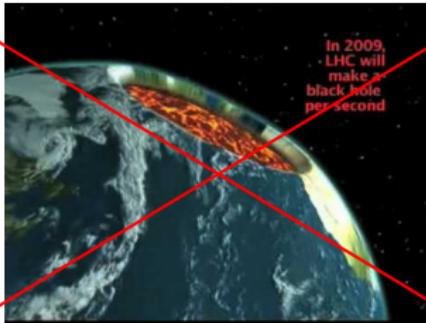


Черная дыра = черное тело с температурой T_H !

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

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

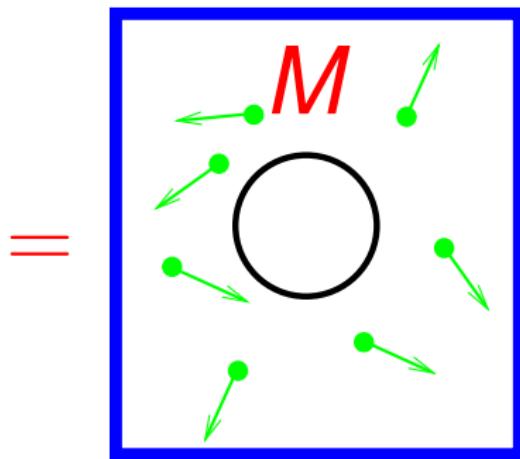
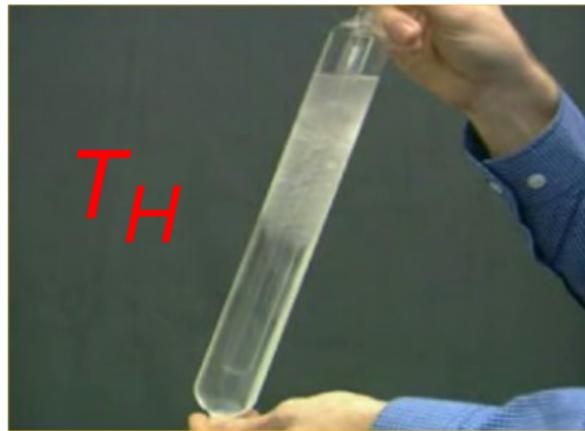
Черные дыры на БАК



Маленькие черные дыры
мгновенно испаряются!



Черная дыра - нагретое тело!



I начало термодинамики

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

Энтропия черной дыры

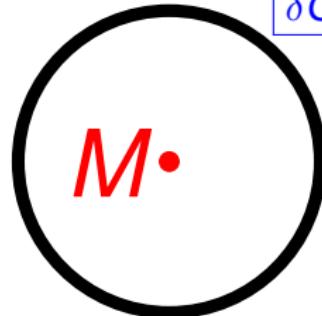
Теорема Клаузиуса:

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

$$\delta Q = dM$$

Энтропия Бекенштейна:

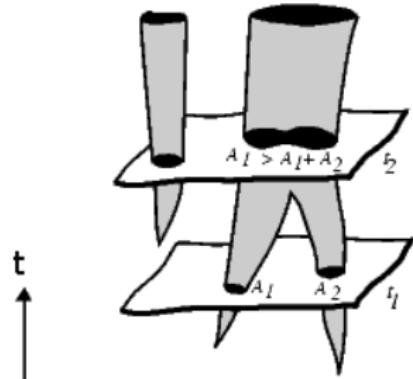
$$S = \frac{4\pi G}{\hbar c^3} \cdot M^2 = \frac{4\pi R_S^2}{4l_P^2}$$



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

II начало термодинамики: С. Хокинг, 1970 г.

Площадь горизонта **увеличивается!**



Не дырка в пространстве!

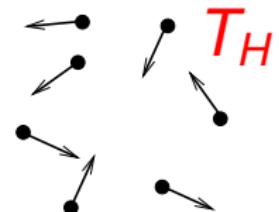
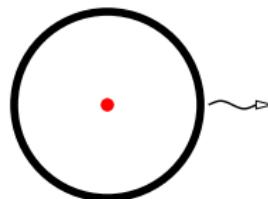
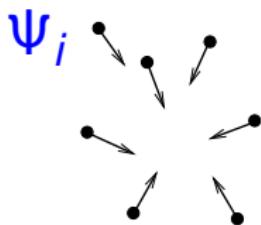
Информационный парадокс

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 → сингулярность,
а излучает горизонт!
- ОТО — самопротиворечивая теория.
Но: Какая теория — правильная?
- Информация исчезает в новорожденной Вселенной.
Но: Нет решений, описывающих эти процессы!

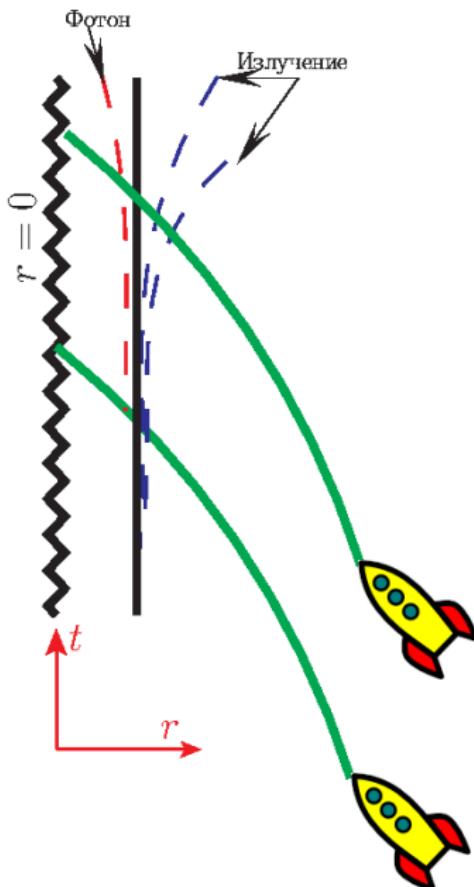


1997 г.: пари. С. Хокинг и К. Торн против Дж. Прескилла.

2004 г. Хокинг признал поражение.

Ошибка Хокинга? Парадокс клонирования!

Susskind, Thorlacius '93



Наблюдатель 2

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

Запрещено в квантовой теории!

Принцип неопределенности

Нельзя одновременно измерить x и p !

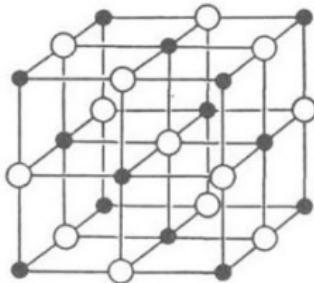
$$\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$$

Противоречие!

Разрешение противоречия

Информация выходит через время
зачекречивания?

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?



Черная дыра

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

$N \times N \times N$

Ограничение Бекенштейна

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

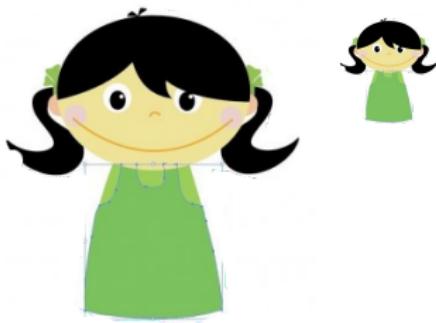


Мир двумерен!

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

Пример голографического описания

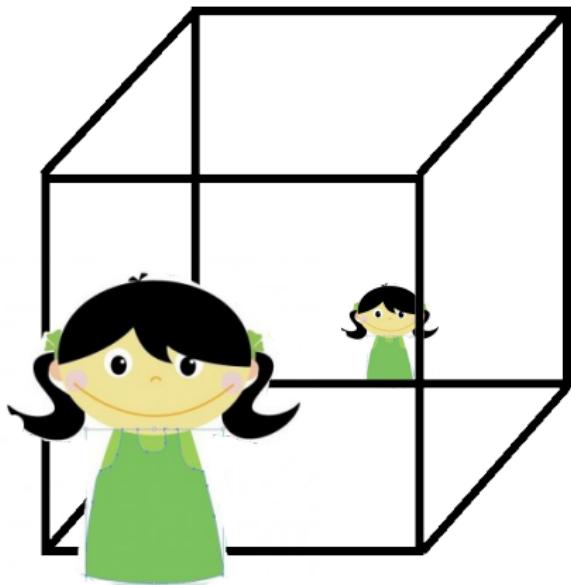
Х. Мальдасена, 1997



Девочка меньше

Пример голографического описания

Х. Мальдасена, 1997



Девочка дальше

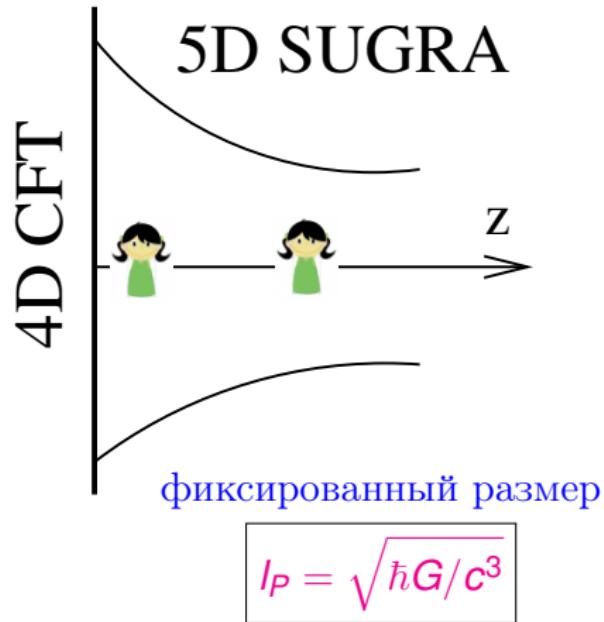
Пример голографического описания

AdS/CFT соответствие



Хуан Малдасена

решения всех размеров!
плоское пространство



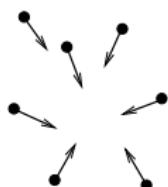
$$\boxed{\text{AdS} = \text{CFT}}$$

Квантовая теория гравитации!

Решение информационного парадокса

Было:

4D

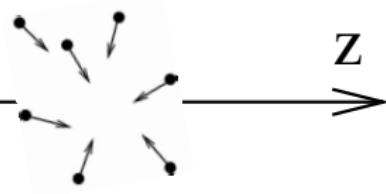


частицы

плоское

пространство

5D



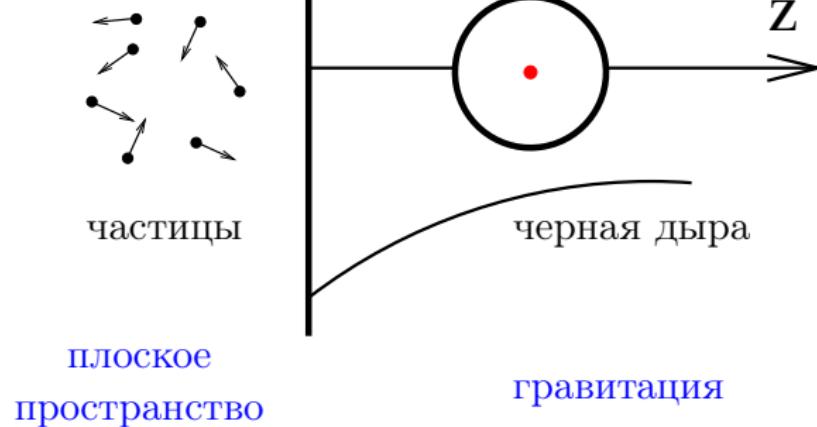
частицы

гравитация

Решение информационного парадокса

Стало:

4D



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!

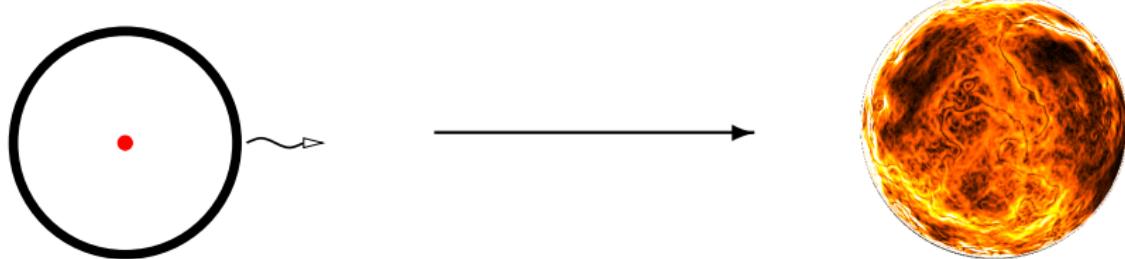
Парадокс огненной стены

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!

Информация о кафедре

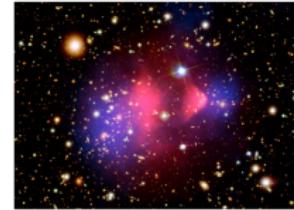
- Сайт: <http://ppc.inr.ac.ru>

The screenshot shows the homepage of the Faculty of Physics and Cosmology at MGU. The header features the faculty's logo and name in Russian: "Кафедра физики частиц и космологии Физического факультета МГУ". Below the header is a navigation menu with links to "Главная", "ИЯИ", "Наука", "Учеба", "Курсовые", "Люди", "Связь", and "Брошюра". On the right side of the header are icons for search, email, and social media. A decorative banner with various scientific symbols like Feynman diagrams runs across the top.

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 - НИЯФ, 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!