

Чёрные дыры и информационный парадокс

**Хуан Малдасена
Институт перспективных
исследований,
Принстон, США**

Чёрные дыры в теории тяготения Ньютона

Теория относительности: специальная → общая → искривлённое пространство-время

Чёрные дыры

Горизонт событий

Как наблюдают чёрные дыры?

Чёрные дыры и квантовая механика

Какие загадки для теоретиков таят в себе чёрные дыры

Теория струн

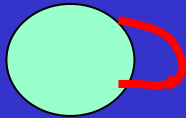
Пространство-время в теории струн

«Всякий предмет, подброшенный вверх, упадёт на землю»

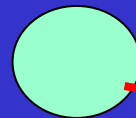
Только если скорость меньше, чем $v_e = 11 \text{ км/с}$!

Почему?

Гравитационные силы убывают с расстоянием. Если скорость достаточно велика $\rightarrow$ можно преодолеть притяжение, запускать космические корабли и т.д.



v меньше v_e



v больше v_e

Чёрные дыры в теории гравитации Ньютона

А если бы вторая космическая скорость равнялась скорости света?

$$V_e^2 = \frac{2 GM}{R}$$

Лаплас ~ 1800 г.

Если v_e больше c , тело будет выглядеть чёрным, свет не сможет преодолеть тяготение тела. Так может произойти, когда большая масса сосредоточена в малом объёме.

Назовём «радиусом чёрной дыры» для произвольного тела величину

$$R_h = \frac{2 GM}{c^2}$$

Размеры, при которых некоторые тела стали бы чёрными дырами:

$$R_{h, \text{Солнце}} = 3 \text{ км}$$

$$R_{h, \text{Земля}} = 1 \text{ см}$$

$$R_{h, \text{человек}} < \text{минимального расстояния, измеренного в эксперименте}$$

Но скорость света не обычная скорость!!!

Специальная теория относительности

Эйнштейн 1905 г.

- ✓ Скорость света — максимальная скорость передачи информации.
- ✓ Физика явлений не зависит от скорости движения наблюдателя. В частности, для всех наблюдателей скорость света одинакова.
- ✓ Время течёт по-разному для наблюдателей, движущихся относительно друг друга.
- ✓ Пространство и время взаимосвязаны. Восприятие времени зависит от скорости движения.

«Парадокс» близнецов



Для обычных скоростей, встречающихся в повседневной жизни, мы не замечаем, что время течёт по-разному.

Чтобы заметить разницу, необходимы:

1) очень высокие скорости

или

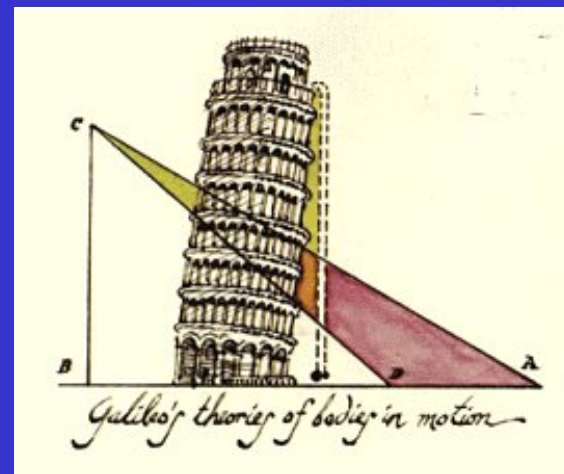
2) очень точные часы

Есть другой способ повлиять на ход времени....

Гравитация

Аристотель: «Чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает».

Галилей: «В отсутствие сопротивления воздуха все тела падают одинаково».



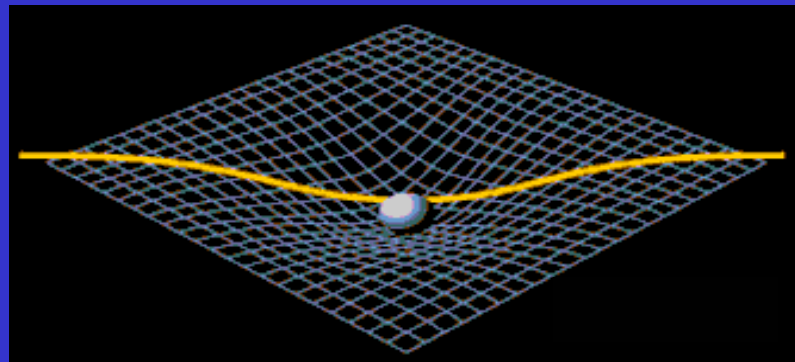
Принцип эквивалентности:

- ✓ Движение тела в гравитационном поле не зависит от его массы.

Общая теория относительности

Эйнштейн 1915 г.

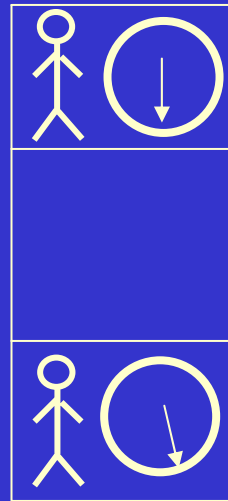
- ✓ Теория Ньютона не согласуется с законами специальной теории относительности.
- ✓ Эйнштейн: гравитация обусловлена кривизной пространства-времени
- ✓ Большая масса искривляет пространство-время
- ✓ Свет распространяется по «кратчайшей» траектории в пространстве-времени



Гравитация влияет на ход времени

Для двух наблюдателей в гравитационном поле время
может течь по-разному

Верхний
этаж



Первый
этаж

← Время течёт медленней
На $1/10^{15}$
(одна квадриллионная).

Красное смещение

Для наблюдателя, находящегося вдали от тяжёлого тела, время течёт быстрее, чем вблизи.

$$\text{Красное смещение} = \frac{(\text{ход времени в данной точке})}{(\text{ход времени вдали})}$$

Примеры величины красного смещения:

На поверхности Солнца: $1 - 2 \cdot 10^{-6}$

На поверхности Земли: $1 - 8 \cdot 10^{-10}$

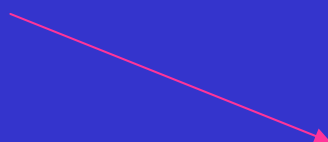
На поверхности нейтронной звезды: 0.7

ребёнок

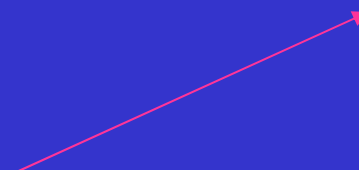


старик

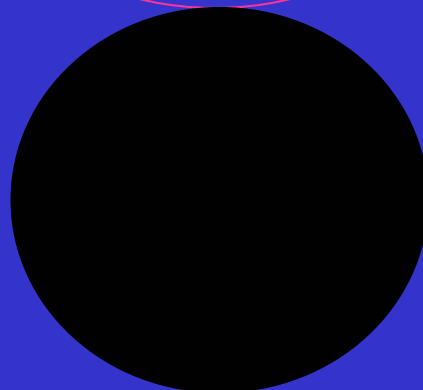
ребёнок



подросток



подросток

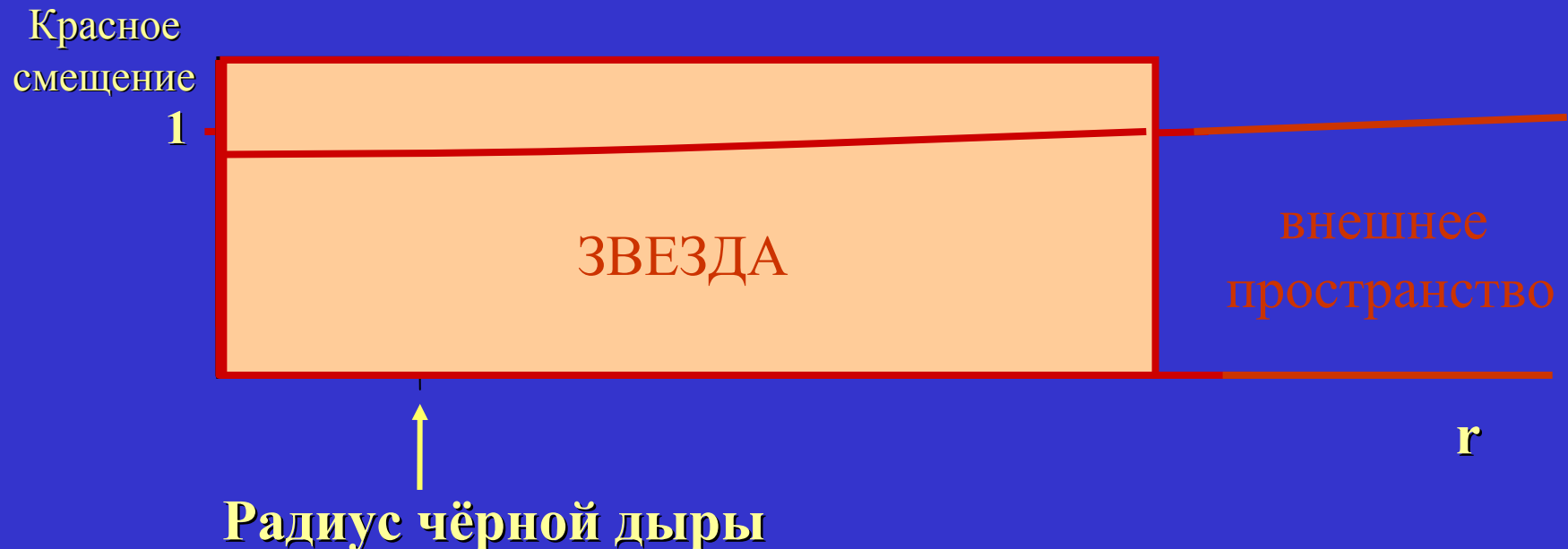


Можно найти геометрию пространства-времени вне массивного тела.

Геометрия определяет ход времени:

Красное смещение = $\sqrt{1 - \frac{r_h}{r}}$

$$r_h = 2G \frac{M}{c^2}$$



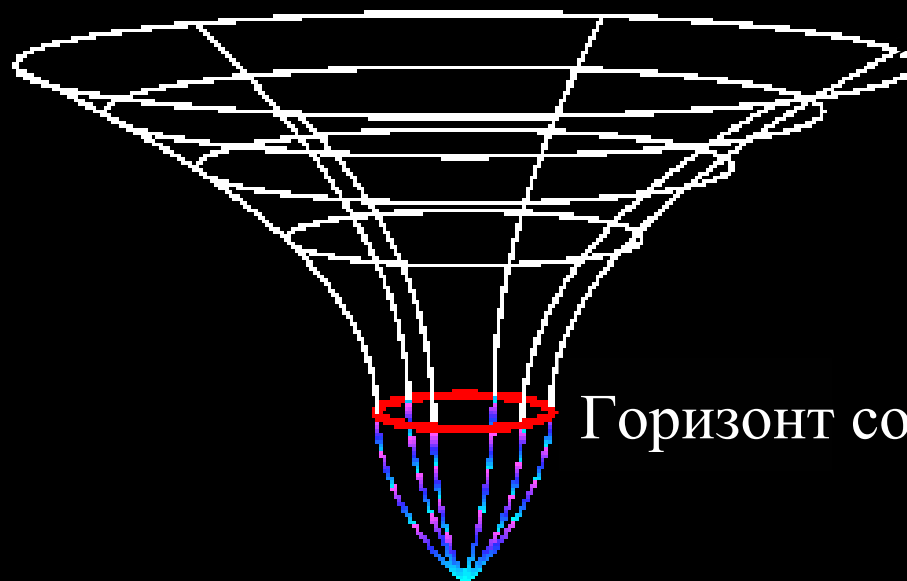
Чёрные дыры или “холодные звёзды”

Может ли размер тела быть меньше радиуса чёрной дыры?

Первоначально считалось, что это нефизично и столь малых тел не существует.

Позднее удалось понять, что:

- 1) Некоторые звёзды могут коллапсировать в чёрные дыры.
- 2) Наблюдатель, падающий на чёрную дыру, не чувствует ничего особенного, пересекая горизонт событий
- 3) Некоторые тела в космосе возможно являются чёрными дырами.



Горизонт событий

Сингулярность

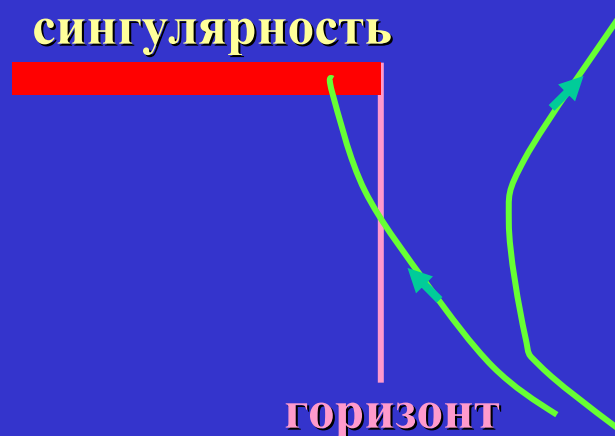
Горизонт и за его пределами

Поверхность, на которой время для внешнего наблюдателя останавливается, называется горизонтом событий.

Пересекая горизонт, вы ничего не чувствуете, но вернуться обратно не сможете.

Преодолев горизонт, вы продолжаете падать и разбиваетесь о «сингулярность». Это область очень большой кривизны пространства-времени, которая разорвет вас на части.

Пенроуз



Пространство-время и река



Рыбы могут плыть с максимальной скоростью c . Если рыба попадает в область, где скорость реки больше c , она упадёт в водопад.

Пересекая участок реки, где скорость воды больше c , рыбы ничего особенного не почувствуют.

Гравитация → общая теория относительности → чёрные дыры

Как их наблюдают?

Реальные чёрные дыры

Чёрные дыры могут образовываться в астрофизических процессах.

Такие чёрные дыры могут быть следующих типов:

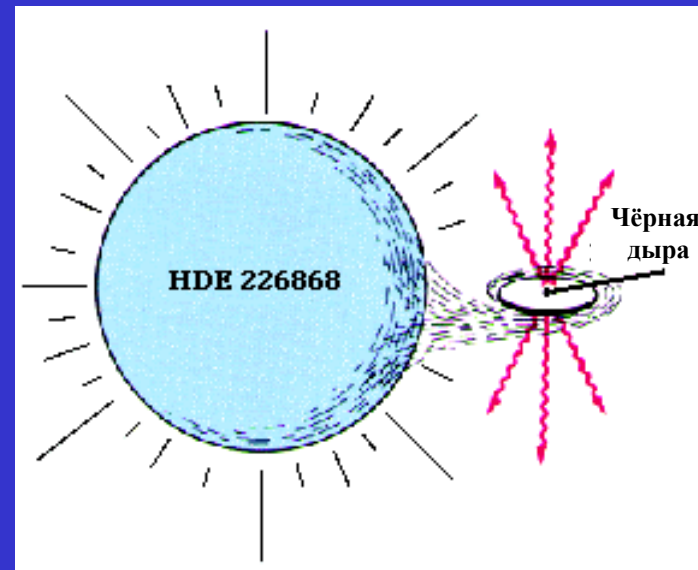
1) Чёрные дыры, образующиеся в результате коллапса звёзд с массой в несколько солнечных
($r_h \sim 10$ км)

2) Чёрные дыры в центрах галактик с массами порядка миллиардов масс Солнца.
($r_h \sim 3 \cdot 10^9$ км $\sim$ размер Солнечной системы)

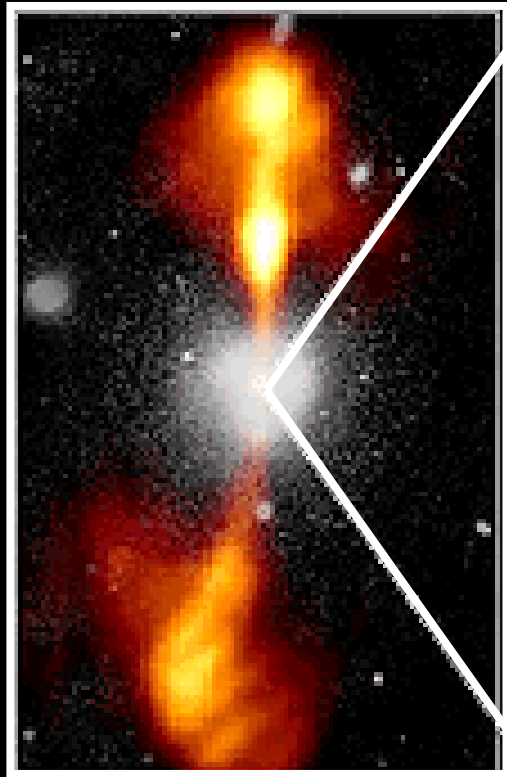
Как их наблюдают?

Их можно, в принципе, обнаружить, наблюдая за отклонённым ими светом.

В некоторых случаях чёрные дыры окружены газом, который при падении на них нагревается особым образом. Астрономы могут наблюдать излучение испускаемое этим газом

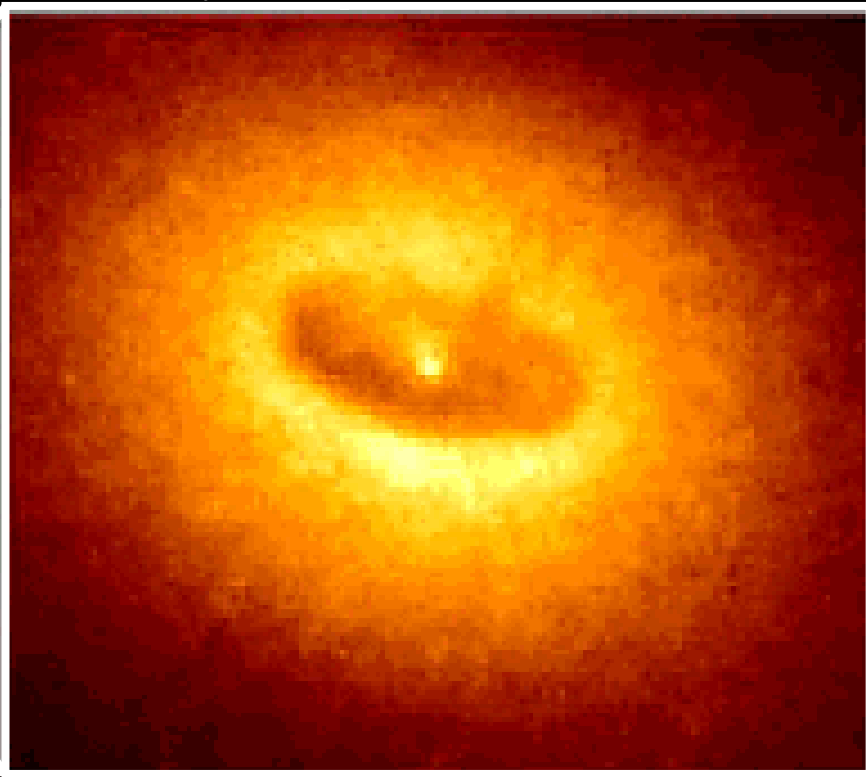


Изображение в
оптическом и в радио- диапазоне



←→
90000 световых лет

Изображение пыли и газового диска,
полученное с телескопа Хаббл



←→
400 световых лет

Считается, что у всех галактик, похожих на нашу,
в центре есть чёрная дыра.

Любопытные свойства чёрных дыр

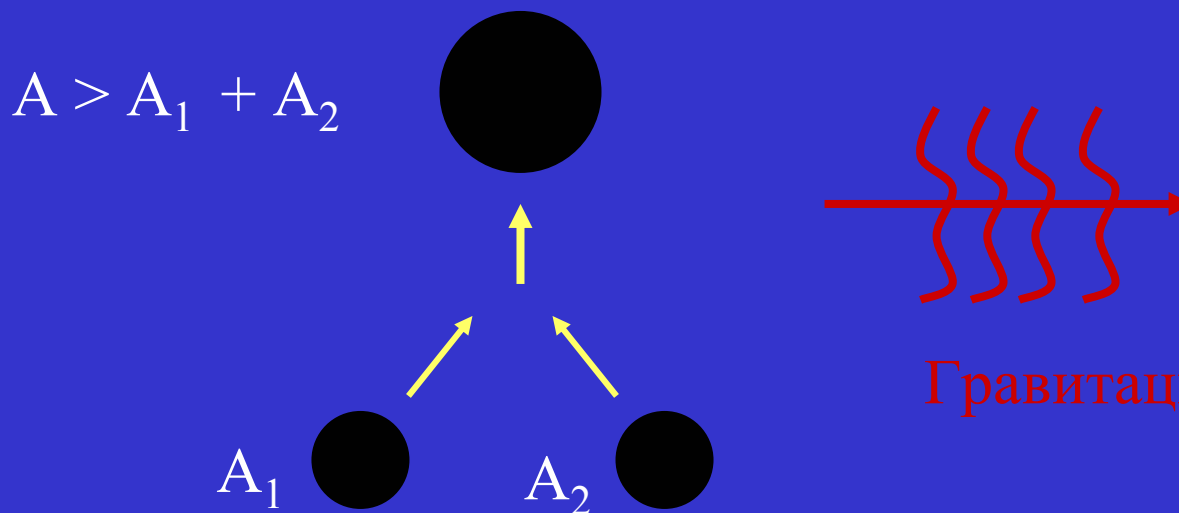
Универсальность:

Окончательная форма чёрной дыры для внешнего наблюдателя не зависит от истории её происхождения (с точностью до массы, момента импульса и заряда).

Закон площадей:

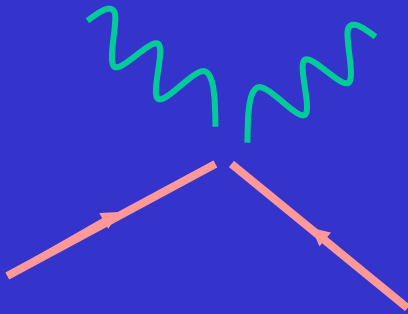
Полная площадь горизонта всегда возрастает. Полная масса чёрной дыры не обязана возрастать.

Хокинг



Релятивистская квантовая механика

- Частицы могут рождаться и уничтожаться



$$E = m c^2$$

Вакуум

→ Возникновение пар частиц

античастица

частица

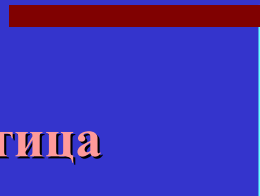


В плоском пространстве действует закон сохранения энергии, в конечном итоге новые частицы не возникают.

При наличии горизонта событий:

античастица

частица



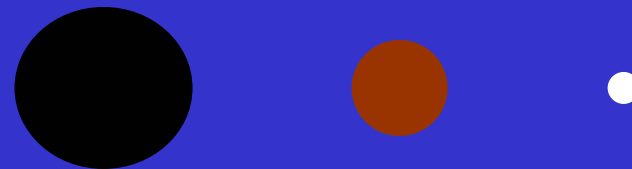
Возникают новые частицы

Белые чёрные дыры!

Из законов квантовой механики следует, что чёрные дыры испускают тепловое излучение.

Чем меньше чёрная дыра, тем выше её температура.

$$k T = \frac{\hbar}{r_h}$$



Температура чёрных дыр с различными массами:

$$T_{\text{Солнце}} = 3.6 \cdot 10^{-7} \text{ К} \quad \text{размер: 3 км}$$

$$T_{\text{Земля}} = 0.1 \text{ К} \quad \text{размер: 1 см}$$

$$T_{M=10^{18} \text{ кг}} = 7000 \text{ К} \quad (\text{выглядит белой}) \quad \text{размер: микроскопический}$$

Жизнь и смерть чёрной дыры

- ✓ Чёрная дыра излучает → теряет энергию → имеет конечное время жизни (при условии, что на неё не падает материя)

Время жизни некоторых чёрных дыр:

- ✓ Масса Солнца → много больше времени жизни Вселенной
- ✓ Человек (100 кг) → одна миллисекунда.
- ✓ 10^{12} кг (гора) → возраст Вселенной.
Её можно было бы наблюдать, если бы она образовалась во время Большого Взрыва.

Загадки чёрных дыр

В тепловых свойствах чёрных дыр объединены квантовая механика и гравитация. Объединить эти две теории сложно.

Загадки:

- ✓ Энтропия чёрных дыр.
- ✓ Потеря информации.

Теплота и энтропия

Теплота → движение микроскопических составляющих системы.

Число микроскопических степеней свободы измеряется энтропией системы

Первое начало термодинамики → связь между теплоёмкостью и энтропией.
больше энергии затрачивается для повышения температуры → больше величина энтропии

Откуда берётся тепловая энергия чёрной дыры? Какое «движение» обуславливает эту энтропию? **Вычислим энтропию из первого начала:**

Бекенштейн, Хокинг

$$S = \frac{\text{площадь горизонта}}{4 G_N \hbar}$$

$$S = \frac{\text{площадь горизонта}}{(10^{-33} \text{ см})^2}$$

Чёрные дыры и структура пространства-времени

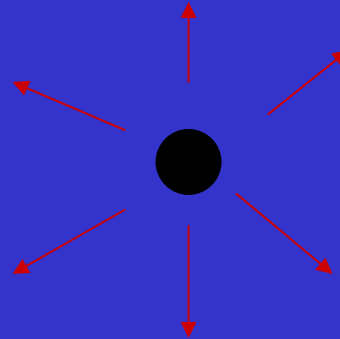
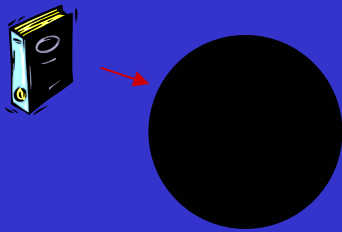
Состояние чёрных дыр не зависит от предыстории. Их тепловые свойства подчиняются только законам гравитации и квантовой механики. И это должно найти своё объяснение в рамках квантовой теории гравитации.

Грубо говоря, энтропия чёрной дыры обусловлена движением «квантов пространства-времени», элементарных квантов (или атомов...), из которых состоит пространство-время.

Чёткое понимание тепловых свойств чёрных дыр позволит узнать больше о квантовой структуре пространства-времени.

Потеря информации

Чёрную дыру можно создать многими способами, но испаряется она всегда одинаково.



Если бы информация терялась → пришлось бы изменить квантовую механику → ???

Квантовая механика → Точное описание чёрных дыр.
Необходима теория, объединяющая квантовую механику и
тепловые свойства возникают только как приближение.
гравитацию → Теория струн

Информация должна быть закодирована в тонких свойствах корреляции в испускаемом излучении.

Гравитация → чёрные дыры

Чёрные дыры + квантовая механика → проблемы

Энтропия

Информационный парадокс

Сингулярность?

Чтобы разрешить проблемы, необходима теория,
объединяющая квантовую механику и гравитацию

Кандидат: теория струн

Квантовая гравитация необходима также для понимания
начала Большого Взрыва (возникновения Вселенной)

Теория струн

- Квантовая теория гравитации
- Гравитоны = кванты геометрии пространства-времени → маленькие петли 
- Другие объекты → D-браны
- Точные математические законы определяют их поведение

- До сих пор нет экспериментальной проверки
- Теория находится в стадии разработки
- Объединяет все взаимодействия → различные возбуждения струны соответствуют различным частицам
- Тесная связь с теориями, используемыми в настоящее время в физике частиц (→ частицы внутри протонов и нейтронов связаны струнами, образованными из «глюонов»)
- Очень активно развивающаяся область исследований

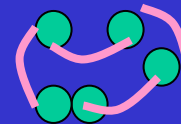
Чёрные дыры в теории струн

- Нам понятно поведение некоторых простых чёрных дыр

Строминджер, Вафа



$g \rightarrow 0$



Набор D-бран и струн.

Энтропия: число способов размещения струн и D-бран.

Голография и чёрные дыры

Энтропия = Площадь $\neq$ Объём

Обычная оптическая голограмма: двумерная поверхность содержит всю информацию о форме трёхмерного объекта

‘т Хофт, Сасскинд

Голография в квантовой гравитации:

Число степеней свободы, необходимых для описания области, растёт пропорционально площади этой области.

Голография в теории струн

Х. Малдасена 1997 г.

Мы можем описать внутреннюю часть некоторого пространства времени с помощью теории на его границе.

Теория на границе является относительно простой теорией частиц.

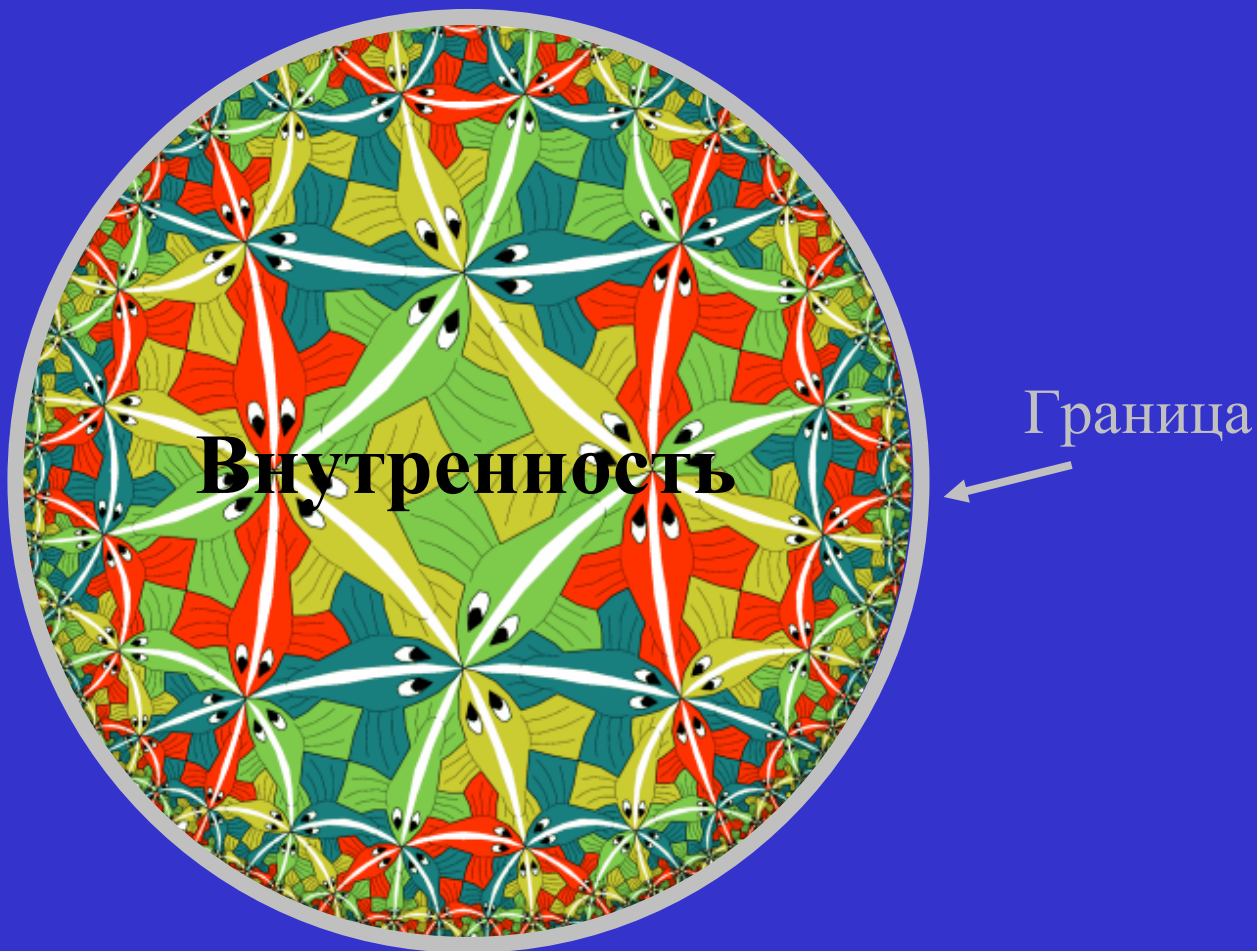
Зачем это нужно?

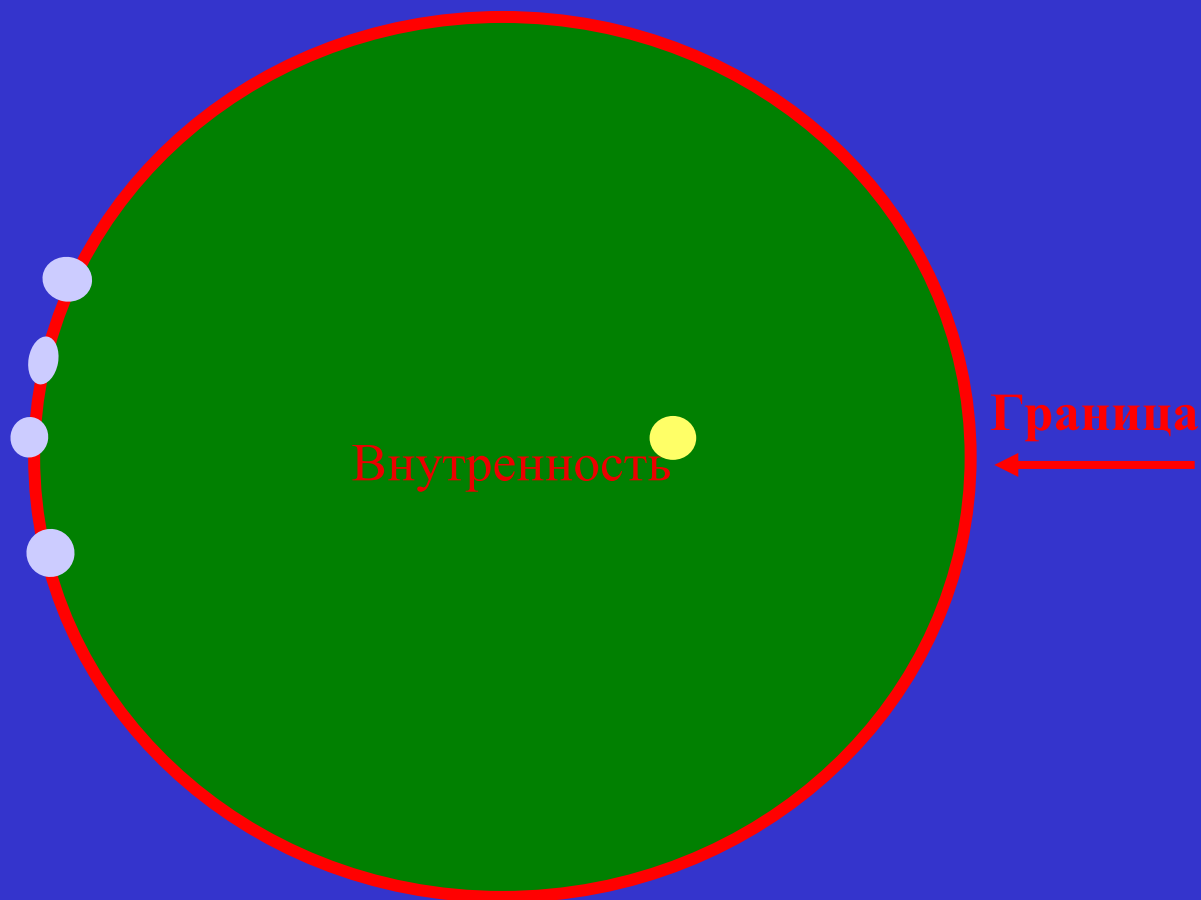
Получить описание чёрных дыр

Лучше понять квантовую теорию гравитации

Объединить глюонные струны со струнами квантовой гравитации

Пространство отрицательной кривизны





Гравитация внутри → Описывается поведением частиц на границе

Чёрным дырам соответствует
большое число частиц на
границе

Выводы

Чёрные дыры — это удивительны объекты, в поведении которых существенную роль играют эффекты кривизны пространства-времени.

Соединение чёрных дыр и квантовой механики представляет собой необычайно интересную проблему в нашем понимании пространства-времени.

Теория струн — интересный претендент на описание квантовой теории гравитации и объединение всех взаимодействий

Теория струн в состоянии объединить классические и квантовые свойства чёрных дыр и не приводит к потере информации

В теории струн геометрия пространства-времени — это эффективное понятие, возникающее как результат взаимодействия более элементарных частиц.

Для обычных скоростей, встречающихся в повседневной жизни, мы не замечаем, что время течёт по-разному.

Чтобы заметить разницу, нужны:

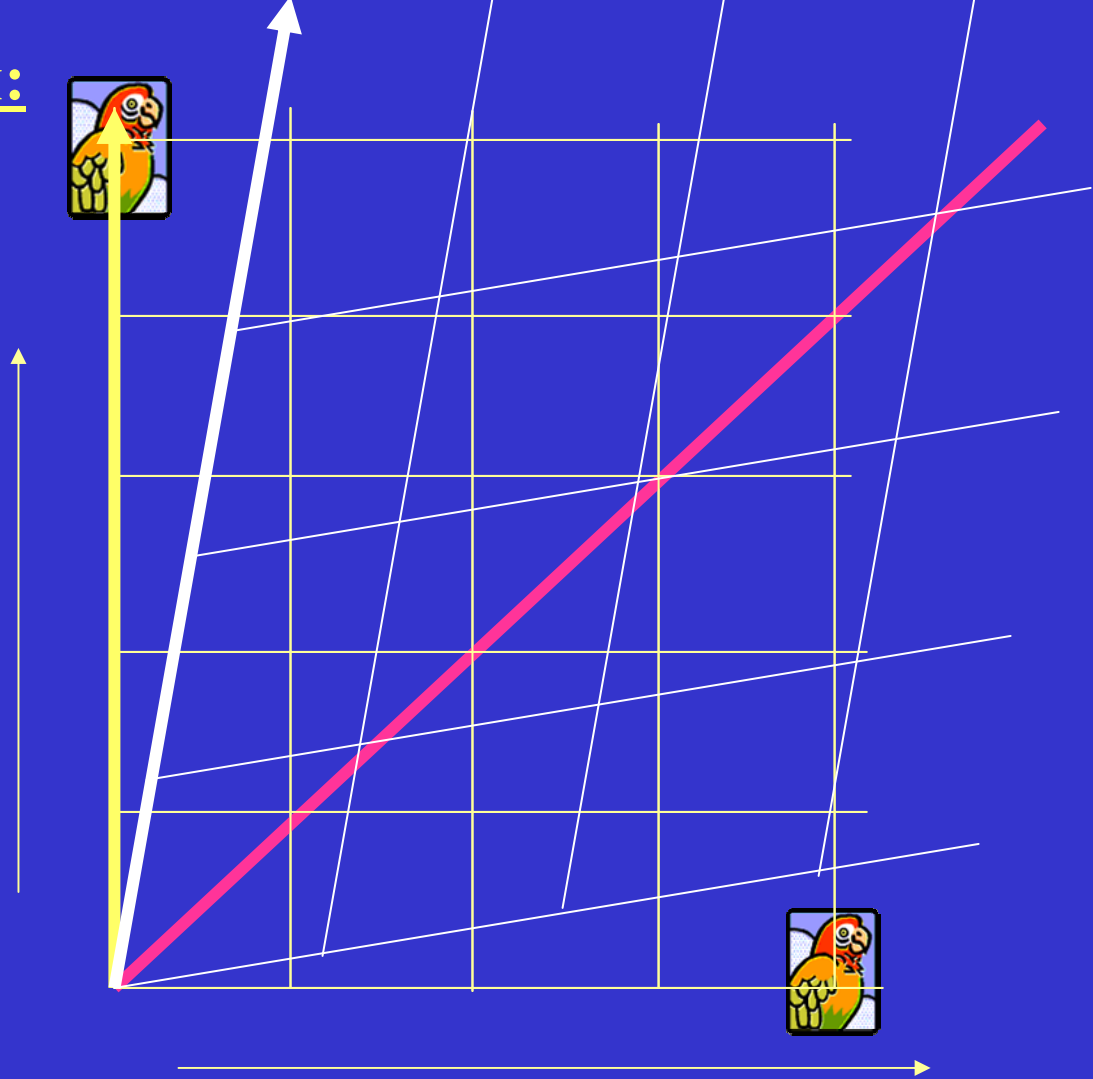
1) очень высокие скорости

или

2) очень точные часы

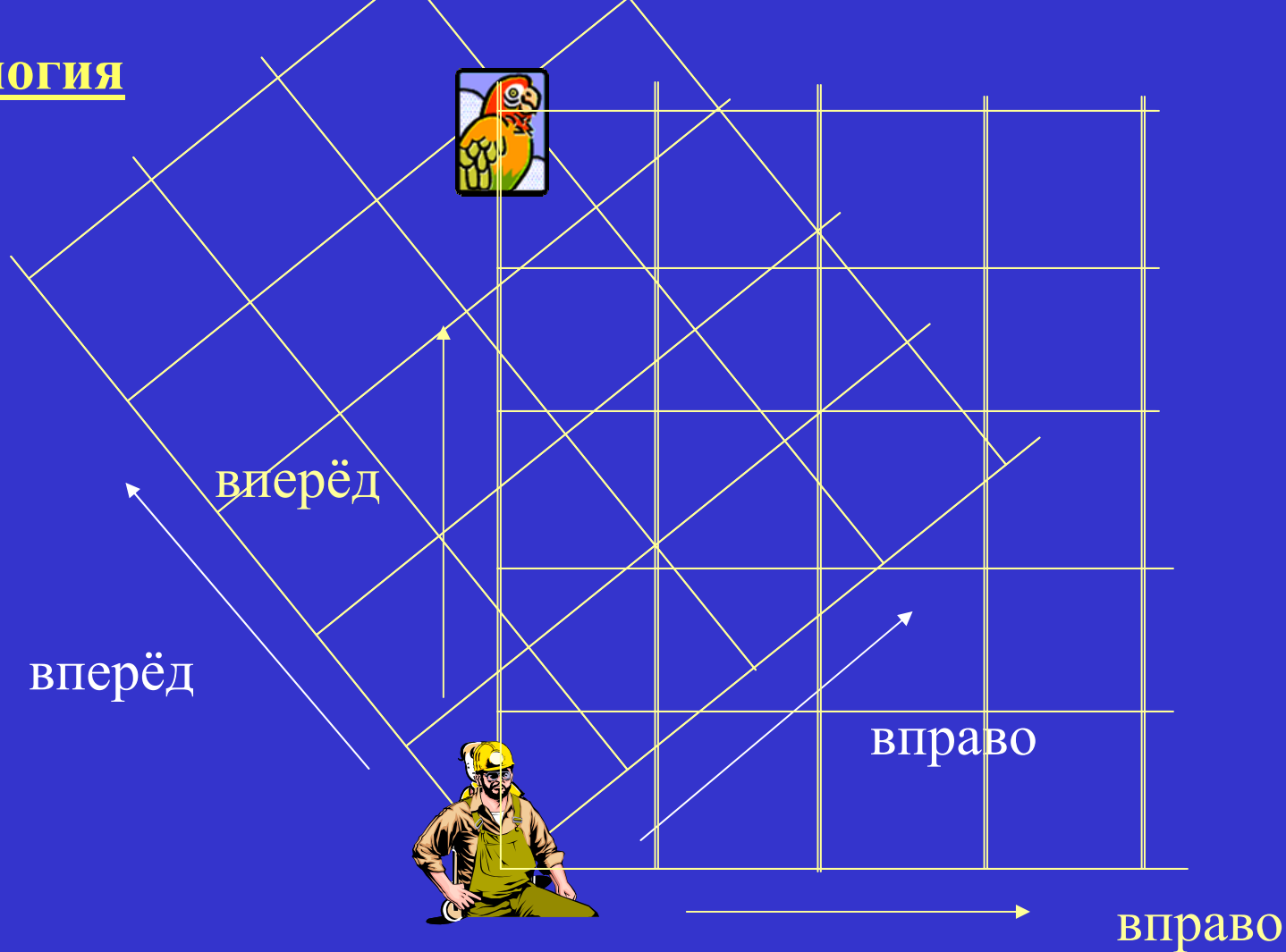
Пространство-время:

Время



Пространство

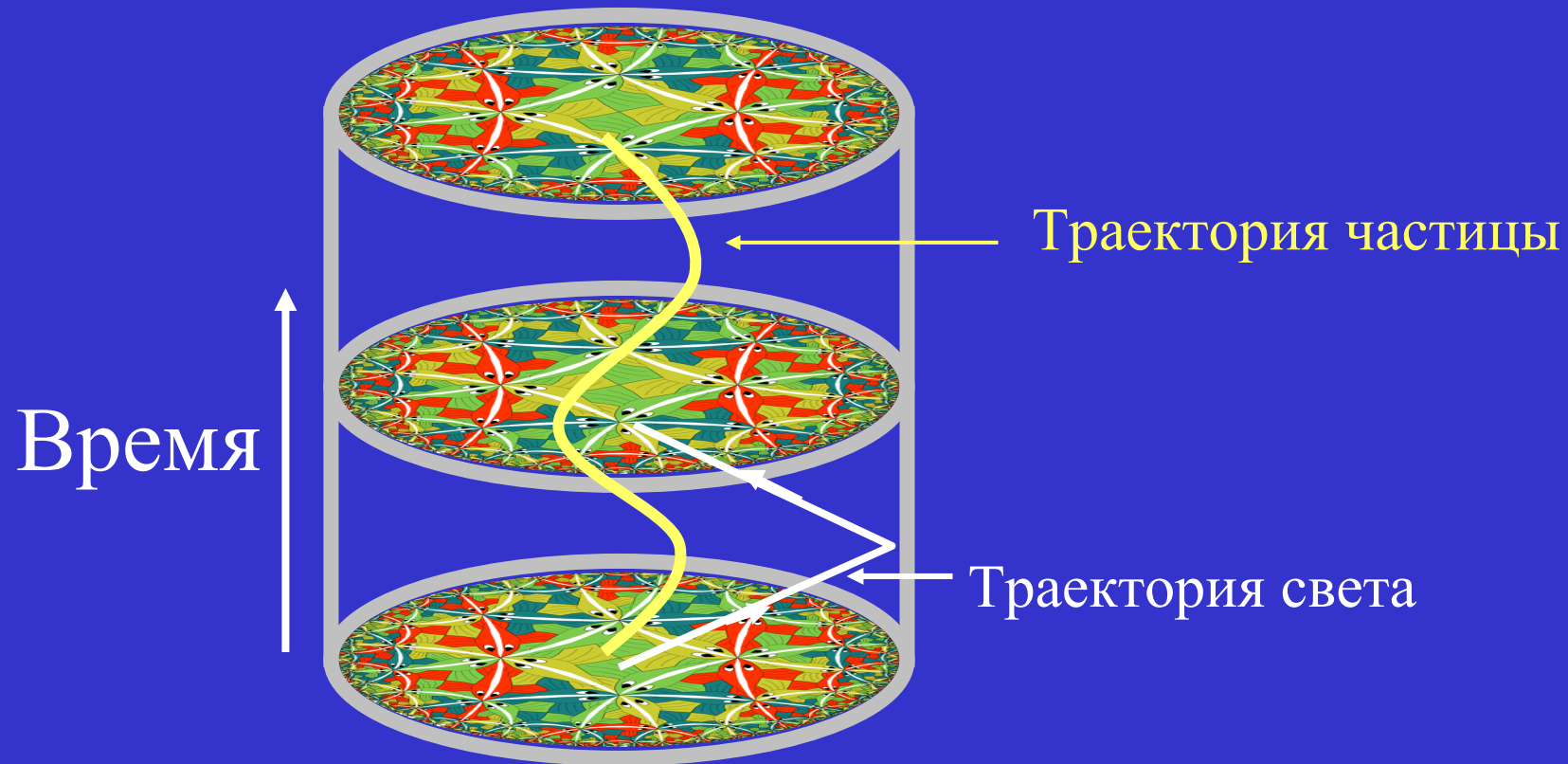
Аналогия



Пётр: Попугай впереди в 5 футах

Алиса: Попугай в 4 футах вперёд и в 3 футах вправо

Пространство-время отрицательной кривизны



Частицы, находящиеся внутри → притягиваются к центру