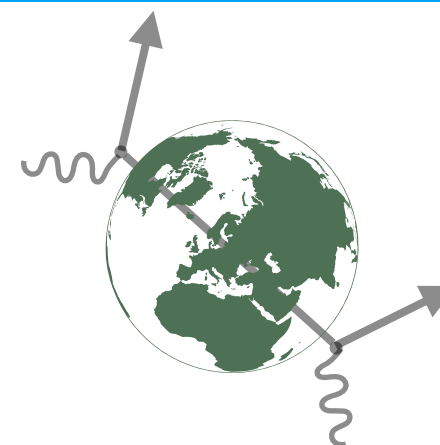


Мини-курс лекций для молодых ученых



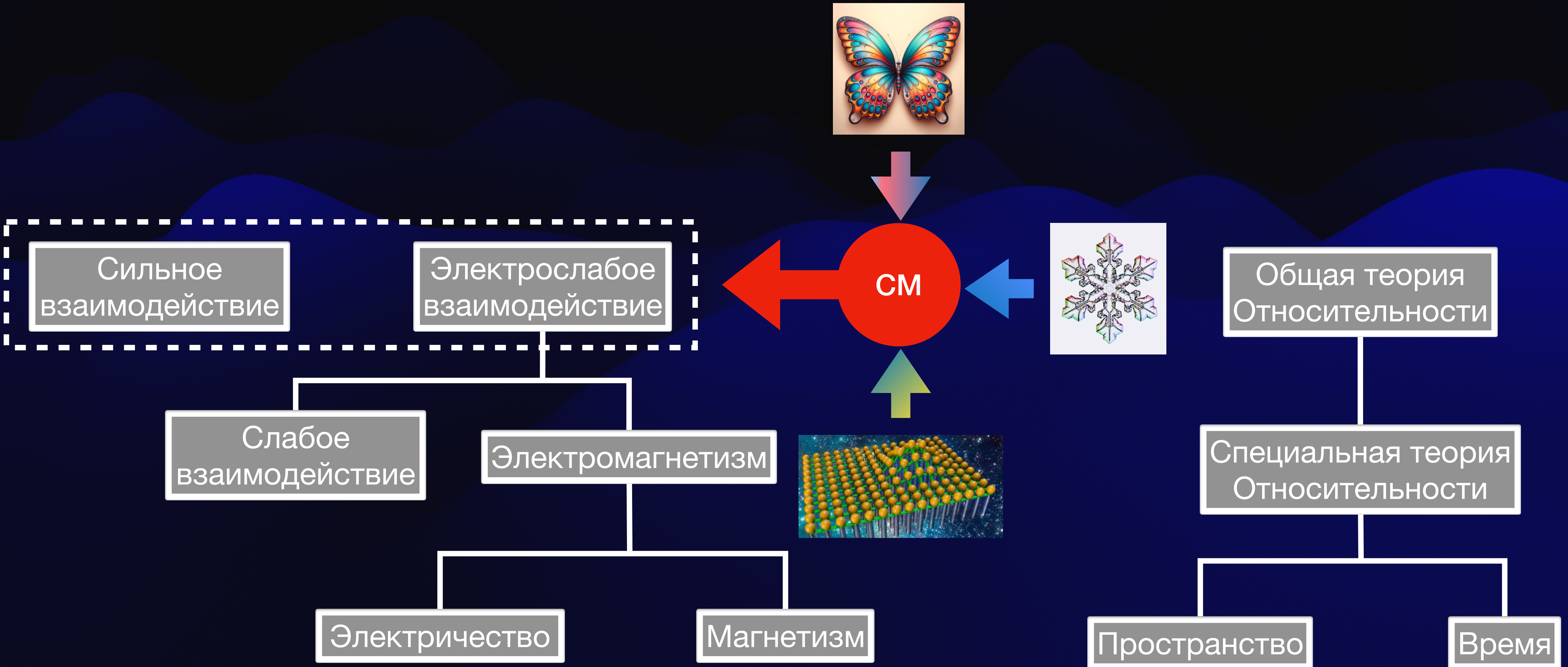
# От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

Дмитрий В.Наумов



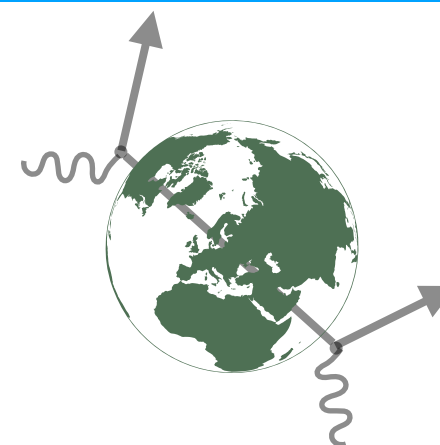
# Первые три лекции ...

# Физическая картина мира сегодня



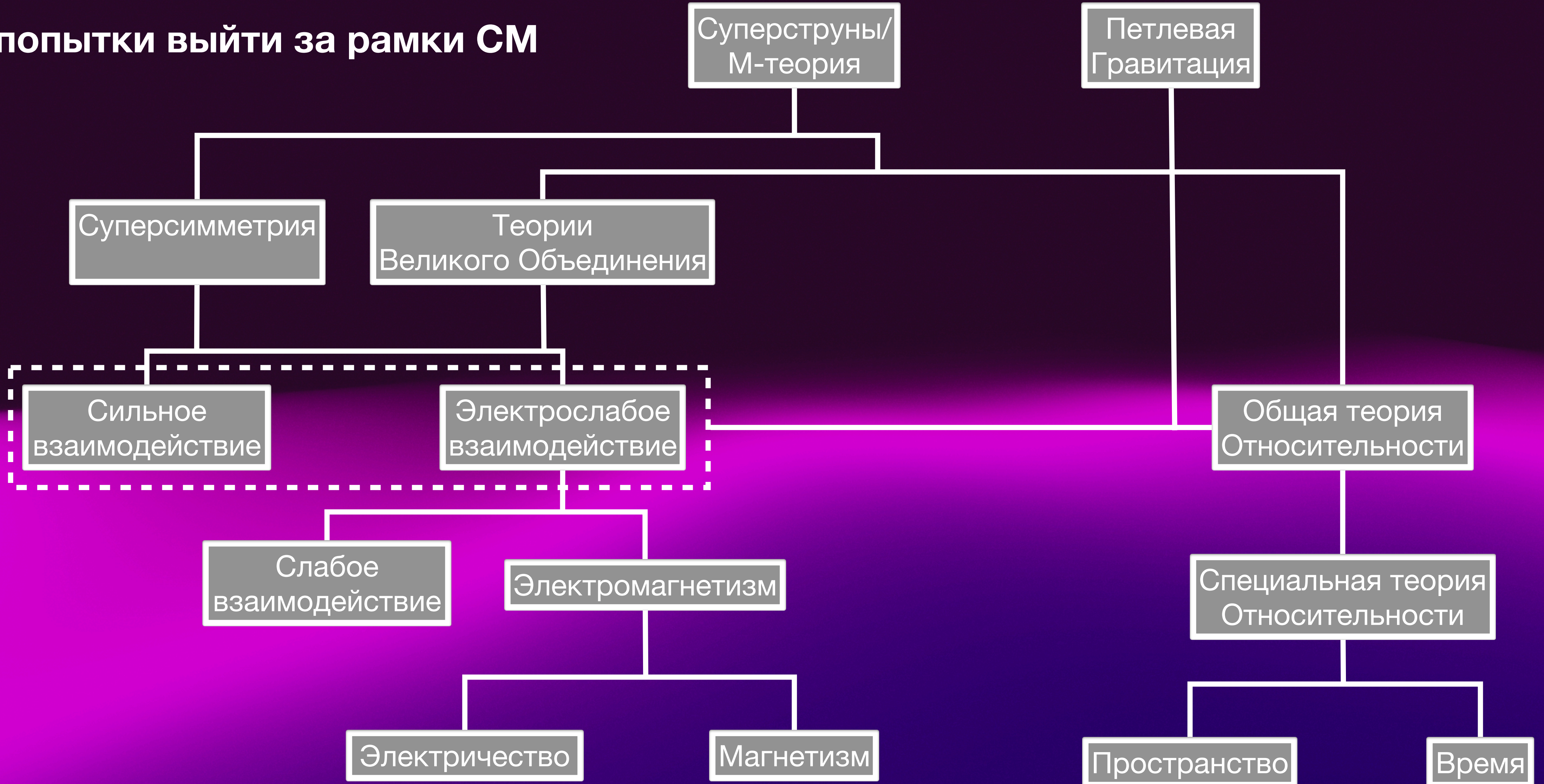


# Лекция 4. «За горизонты Стандартной модели: Пути к Новой Физике»



# Физическая картина мира сегодня

И попытки выйти за рамки СМ



**Как рассказать  
обо всем этом в  
одной лекции?**



ДН+DALL-E «Danger of oversimplification»

# Поводы для сожалений

- **Математики (почти) не будет**

- Она довольно сложная и нетривиальная и если ее не знать, может вскипеть мозг
- Если ее знать слишком хорошо, может потеряться контакт с реальностью
- Одной лекции мало, чтобы ее предметно обсуждать

- **Ограниченный набор идей и теорий для обсуждения**

- Все обсудить невозможно в одной лекции (и даже в двух тысячах)
- Я недостаточно хорошо понимаю некоторые из них. Про некоторые я даже ничего не слышал

# В этой лекции

- **Многомерные миры**
- **Струны, Суперструны и Браны**
- **Суперсимметрия**
- **Теория пространства и времени**
- **Единая сила**
- **Эксперименты будущего и что им мешает**

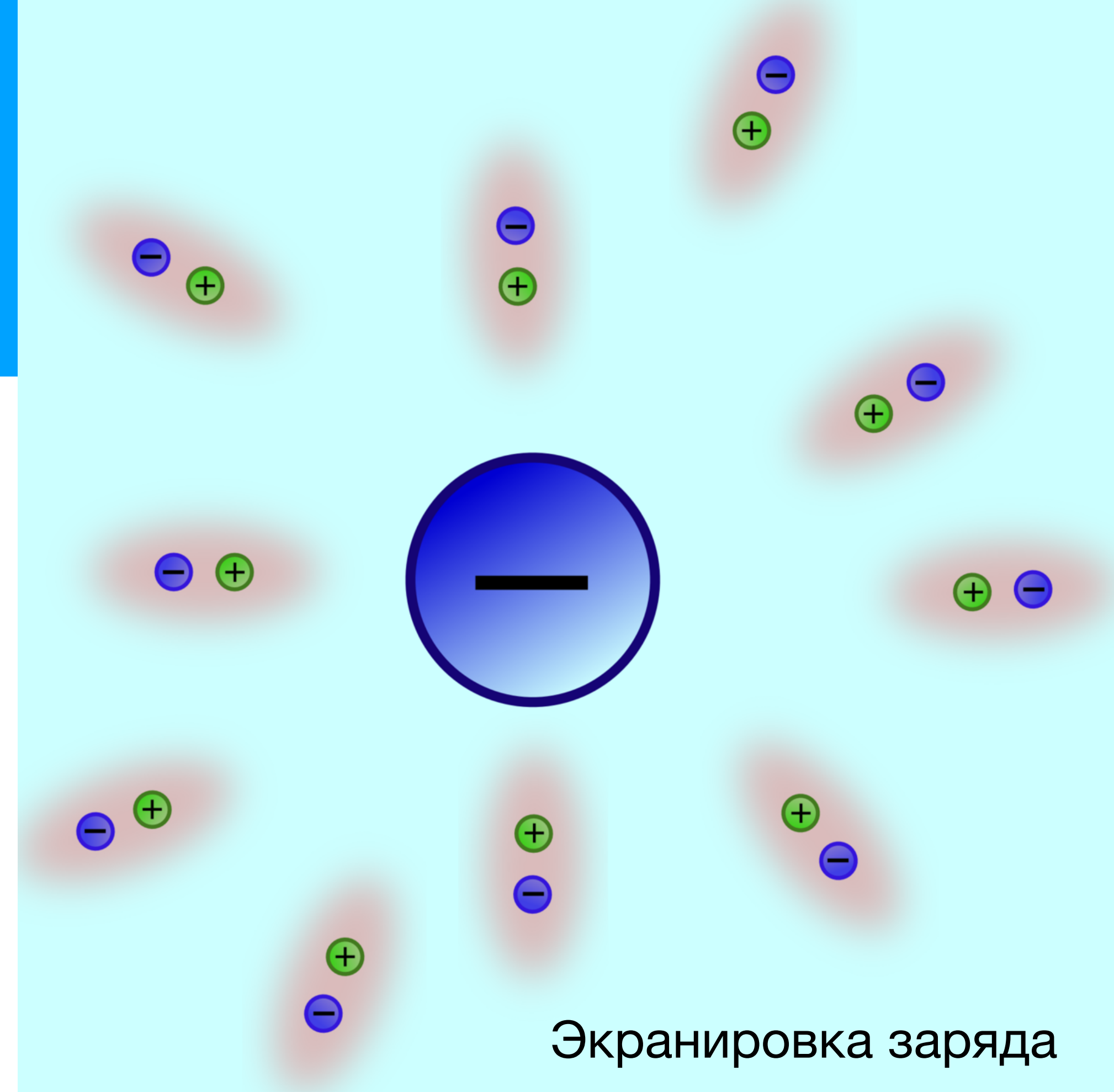
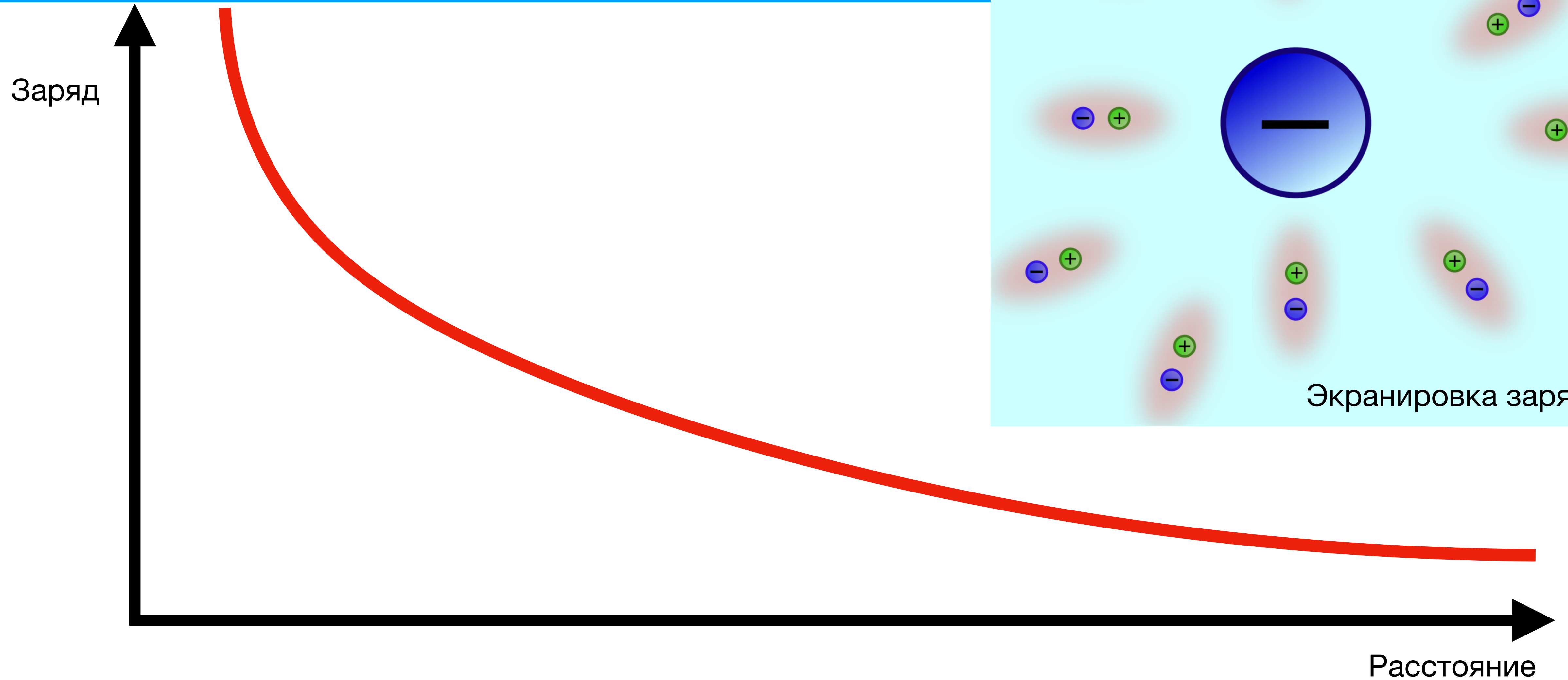


# Объединение сильных и электрослабых взаимодействий

# Бегущие константы в Стандартной Модели

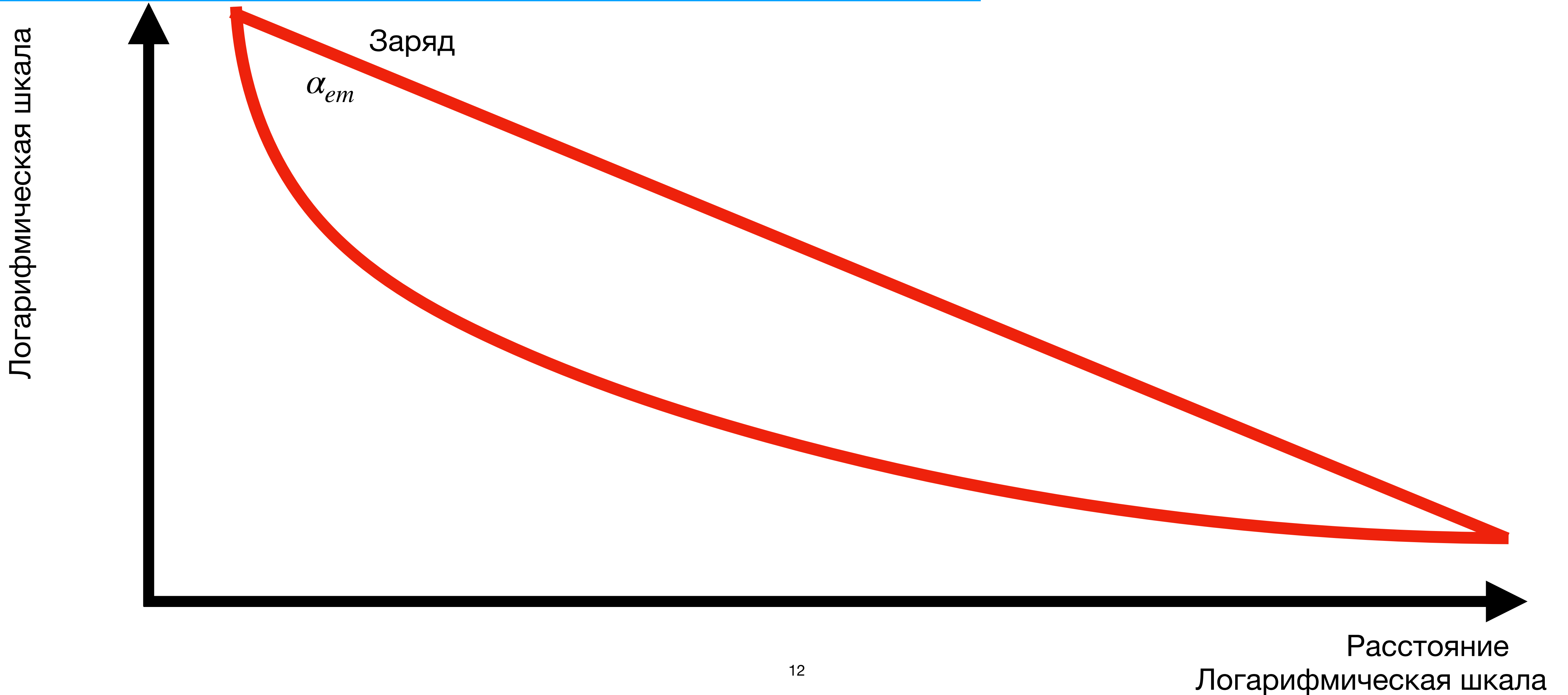
# Бегущие константы

Напоминание из Лекции N2



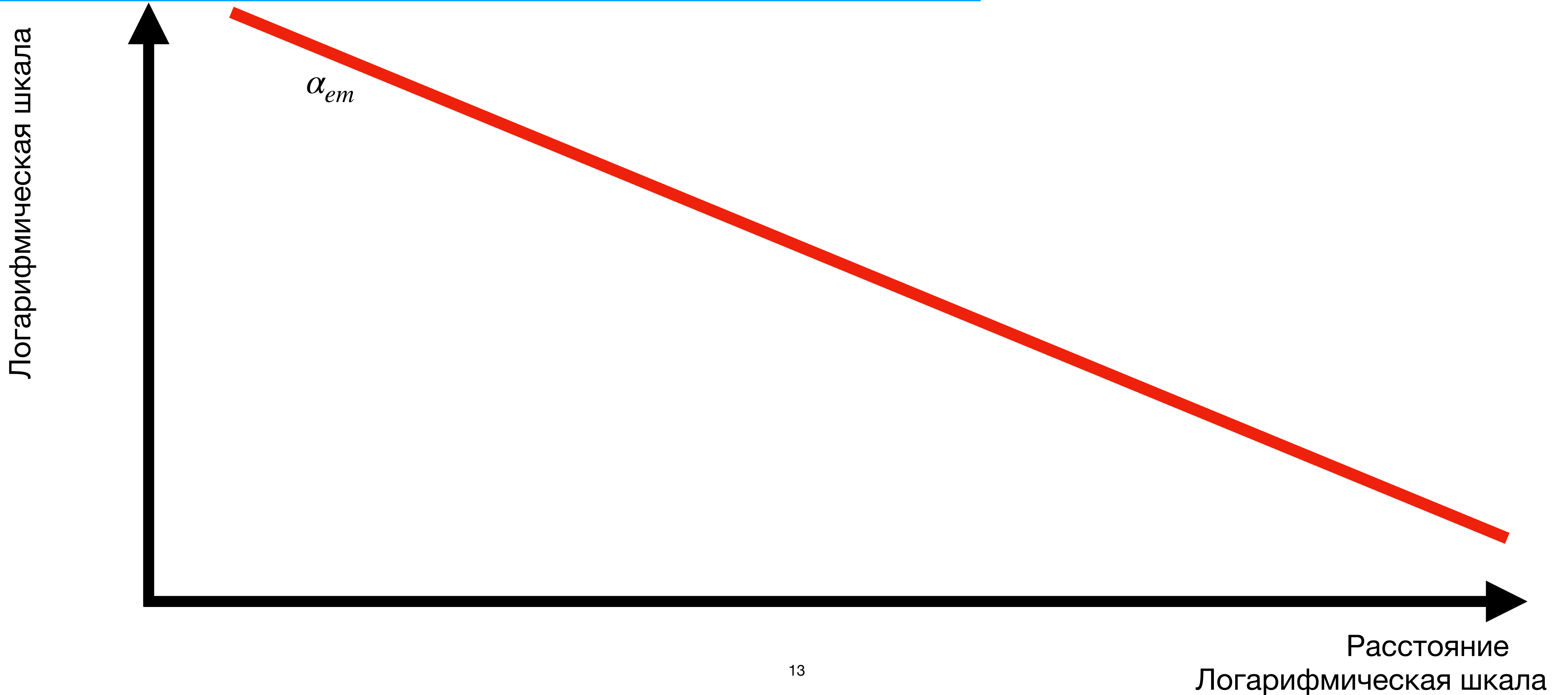
# Бегущие константы

Логарифмические оси и переобозначение



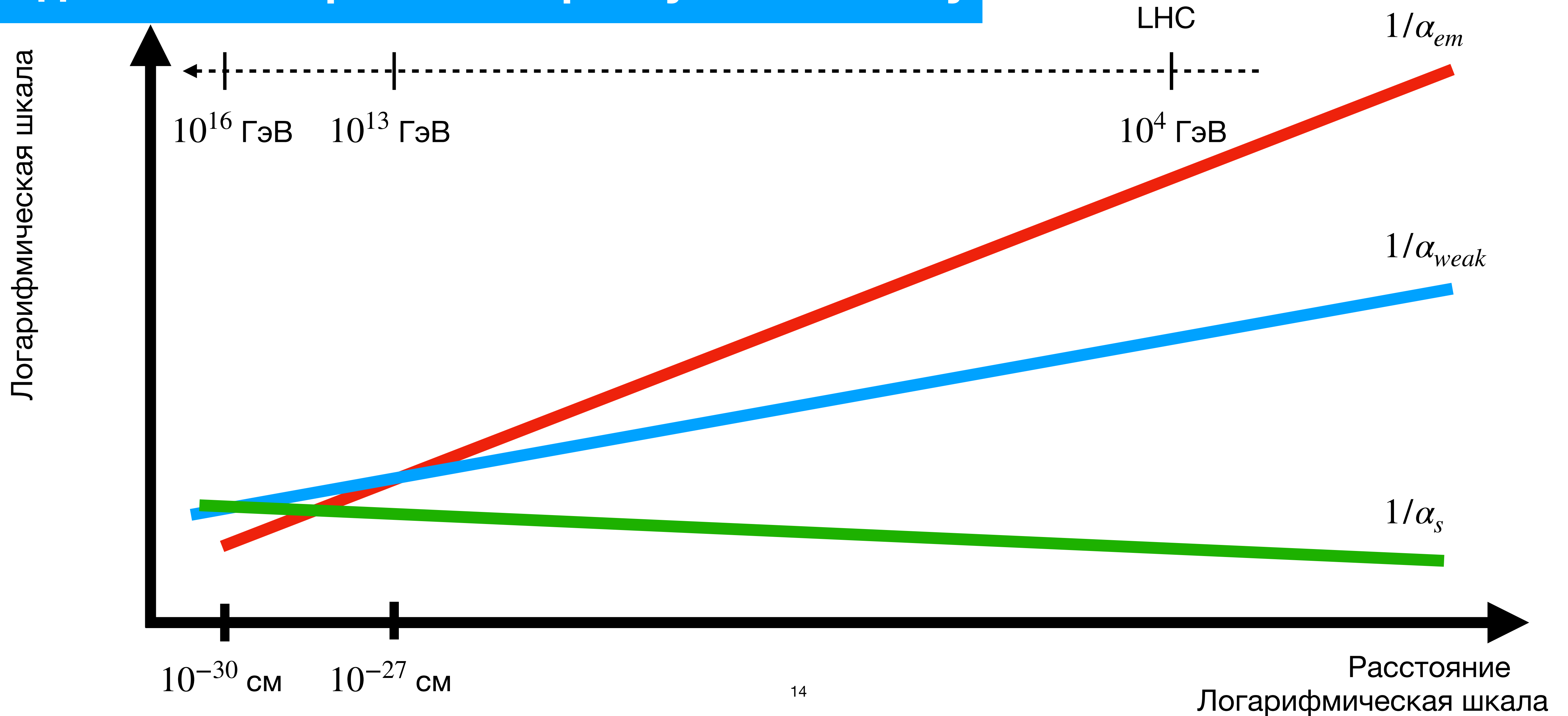
# Бегущие константы

Удобнее смотреть на обратную константу



# Бегущие константы

Удобнее смотреть на обратную константу



# Бегущие константы

## ○ Указания Стандартной Модели

- все три «заряда» (эм, слабый, сильный) независимы в СМ. Однако,
- они объединяются (не очень точно) на масштабе энергий  $(10^{13} - 10^{16})$  ГэВ
- или на расстояниях  $(10^{-27} - 10^{-33})$  см

## ○ Возможно, существует более широкая симметрия

- в которой есть один «заряд» и одно взаимодействие
- которая объяснит необъяснимое в СМ (19 свободных параметров)

# Теории Великого Объединения

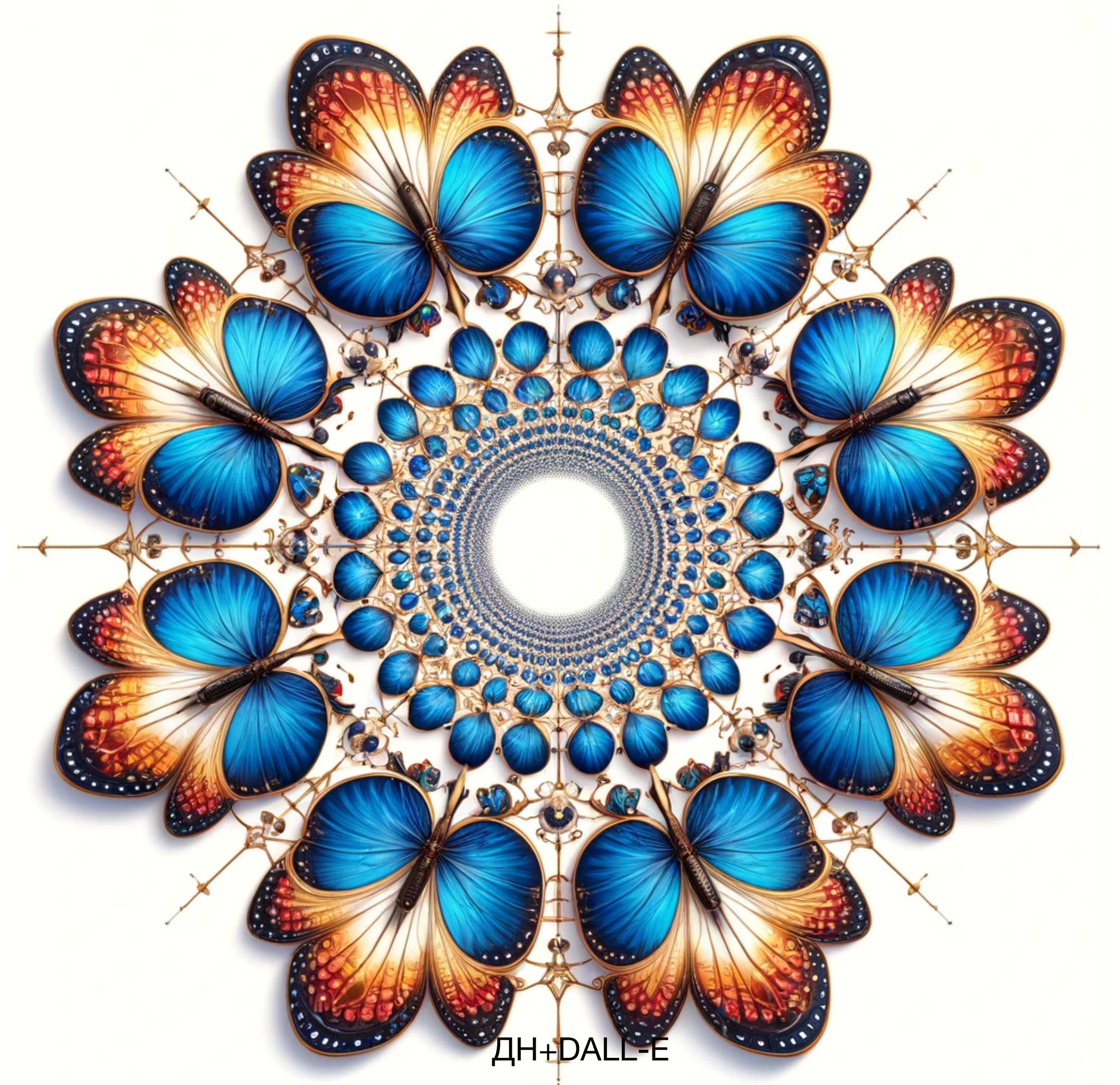
Еще больше симметрии!

- Их довольно много

- Глэшоу-Джорджи  $SU(5)$
- Пати-Салам  $SU(4) \times SU(2) \times SU(2)$
- $SO(10)$
- $E_6$
- $SU(3)_C \times SU(3)_L \times U(1)_X$
- и другие

- Нет единой и общепринятой

- и для этого есть причины!





# Рассмотрим модель Глэшоу-Джорджи $SU(5)$

- **Один «заряд» при больших энергиях**

- превращается в три «заряда» (эм, слабый, сильный) после спонтанного нарушения симметрии

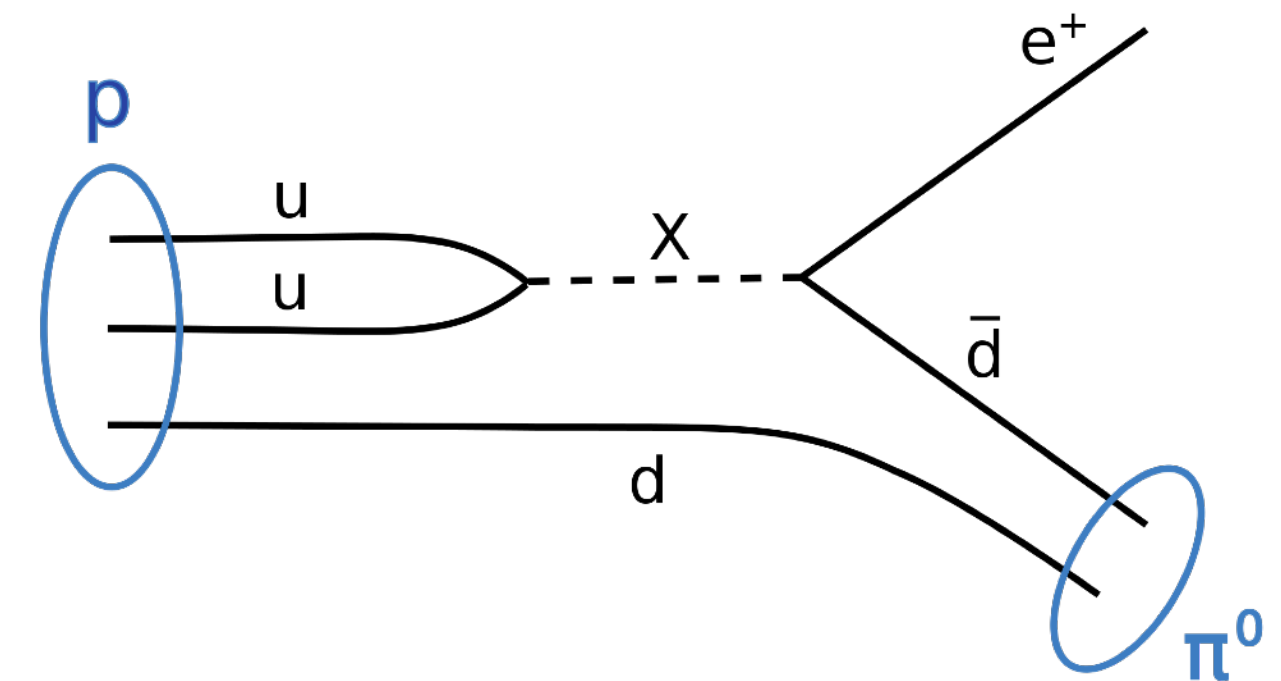
- **24 переносчика взаимодействия**

- На 12 больше, чем в СМ

- Электрические заряды новых бозонов:  $\pm \frac{4}{3}, \pm \frac{1}{3}$

- У них есть и сильные заряды

- Предсказывается распад протона



# Рассмотрим модель Глэшоу-Джорджи $SU(5)$

- **Один «заряд» при больших энергиях**

- превращается в три «заряда» (эм, слабый, сильный) после спонтанного нарушения симметрии

- **24 переносчика взаимодействия**

- На 12 больше, чем в СМ

- Электрические заряды новых бозонов:  $\pm\frac{4}{3}, \pm\frac{1}{3}$

- У них есть и сильные заряды

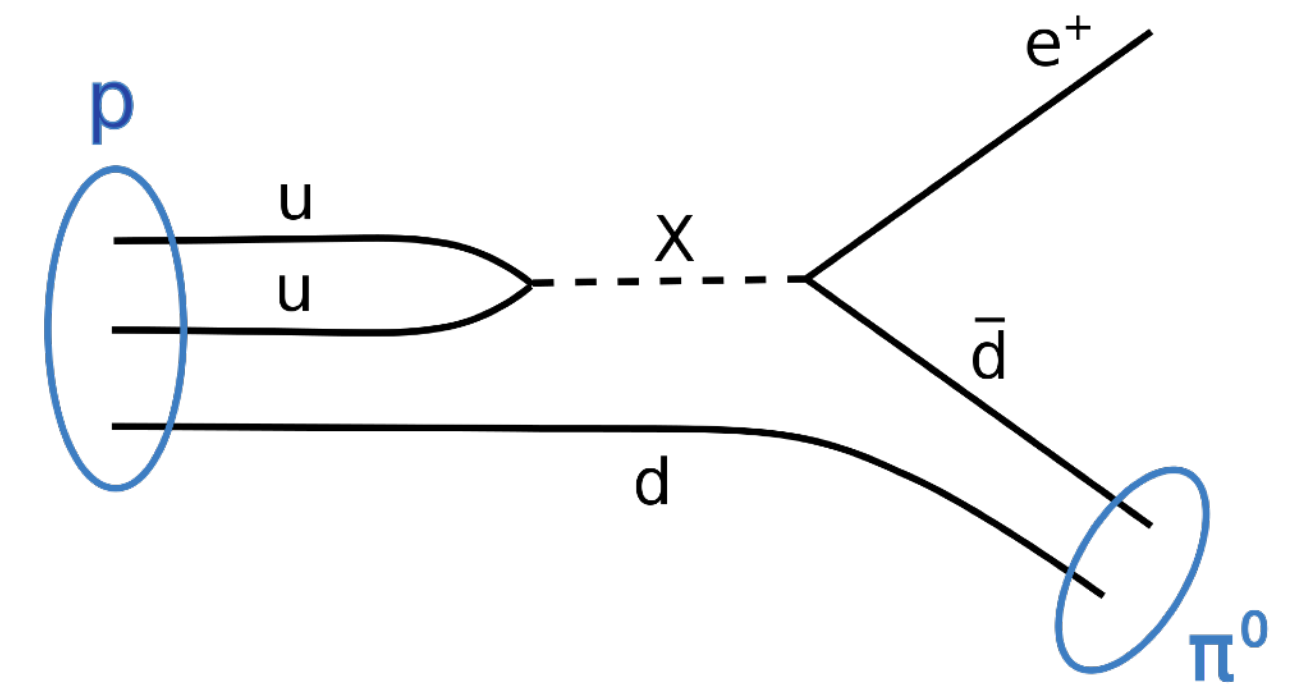
- Предсказывается распад протона

- **Объясняется дробный заряд кварков**

$$Q(d) + Q(d) + Q(d) = Q(e)$$

- **Предсказывает величину параметра СМ**

$$\sin^2 \theta_W$$



**Чего тогда вам не хватает?!**

# Проблемы $SU(5)$

- **Протон живет дольше предсказываемого**
  - Теория:  $\tau_p \simeq 10^{31}$  лет.
  - Эксперимент:  $\tau_p \geq 10^{34}$  лет
- **Соотношения между массами частиц**
  - Теория при больших энергиях:  $m_d = m_e, m_s = m_\mu, m_b = m_\tau$ .
  - Не согласуется с экспериментом
- **Нейтрино**
  - Осталось без массы

# Проблемы теорий великого объединения

- **Протон живет дольше предсказываемого**
- **Объединение «зарядов» взаимодействий**
  - Без суперсимметрии (о ней дальше) не получается свести бегущие константы в точку
- **Иерархия масштабов**
  - Объединение происходит на масштабах энергий, много больших фазового перехода в СМ
  - Почему бозон Хиггса в СМ такой легкий — загадка
- **Не объясняются массы (и смешивание) кварков и лептонов**
- **Никаких экспериментальных подтверждений**
- **Нет объединения с гравитацией**

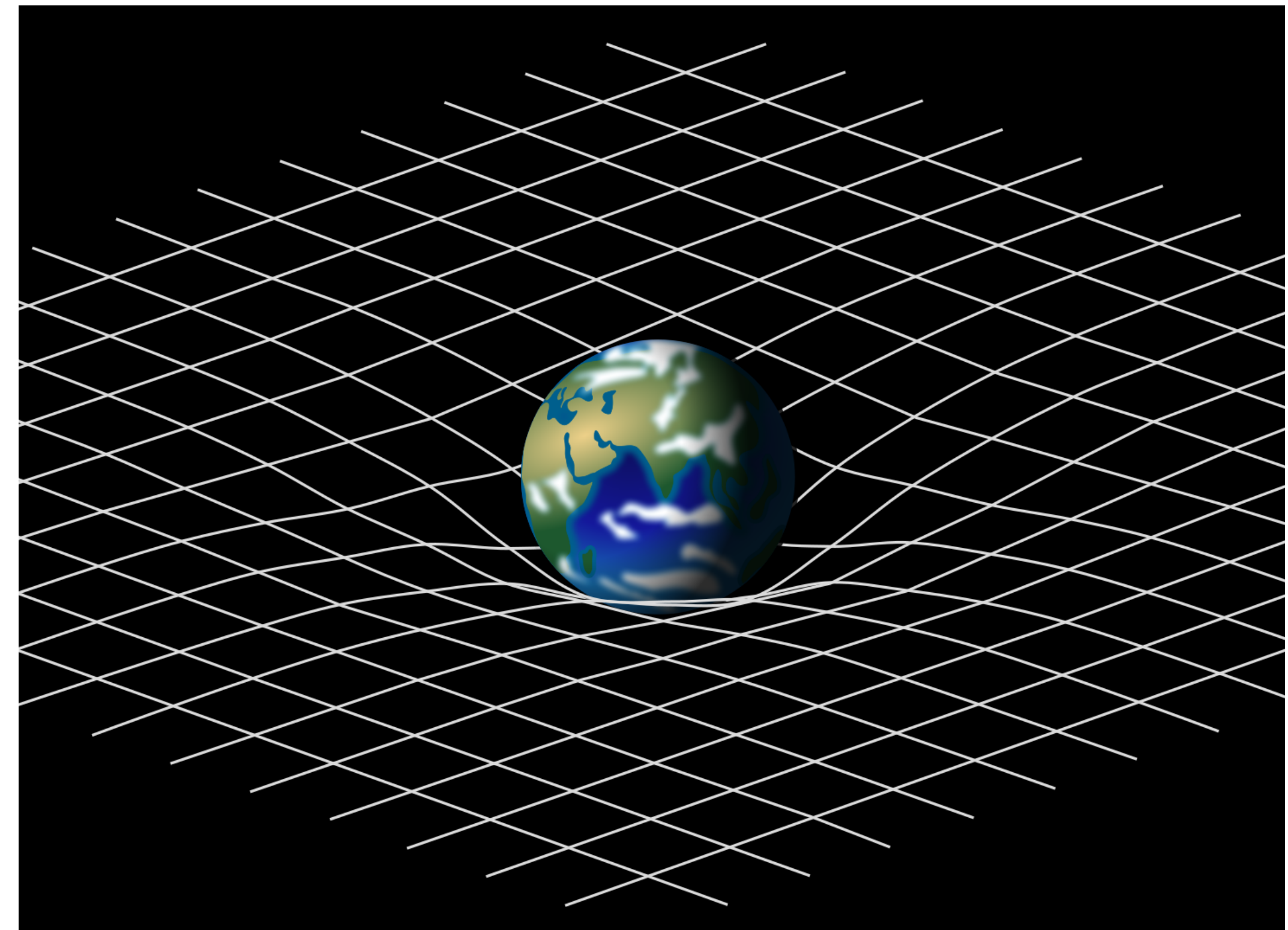
# Гравитация

Планковские единицы измерения из комбинации фундаментальных констант  $\hbar$ ,  $c$ ,  $G$

↪ Длина  $\sim 10^{-33}$  см

↪ Масса  $\sim 10^{-5}$  г

↪ Время  $\sim 10^{-44}$  секунды



# Метрический тензор

— Симметричная матрица, описывающая искривление пространства, позволяющая измерять расстояния и углы.

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ & & g_{22} & g_{23} \\ & & & g_{33} \end{pmatrix}$$

— В 3+1 пространстве: **10** независимых элементов



# Гравитация в $4+1=5$



# Теория Калуца

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} & g_{04} \\ & g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ & & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ & & & g_{33} & g_{34} \\ & & & & g_{44} \end{pmatrix}$$



Теодор Калуца

- **В 1919 Калуца построил ОТО в 4+1 измерениях**

- Метрический тензор: число независимых компонент = 15.

- Оказалось, что 10 из них описывают ОТО в 3+1 измерениях

- Оказалось, что 4 из них подчиняются уравнениям Максвелла в 3+1 измерениях (!!!)

- Последняя компонента — загадочное «дилатонное» скалярное поле.

- **Это первое (и весьма неожиданное) объединение гравитации и электромагнетизма**

- О других взаимодействиях тогда и не знали

- Эйнштейн посвятил заметную часть своей жизни развитию этой идеи

- Основа теории струн в многомерных пространствах (об этом дальше)

**Одна проблема. Наш мир:**

$$3+1=4$$

**Оскар Клейн:**

$$4+1=4.000000000\dots1$$

# Теория Калуца-Клейна

- **В 1926 Клейн предположил, что пятое измерение очень маленькое**

- круг с радиусом  $10^{-30}$  см. Поэтому мы его не «видим»

- движение частицы в пятом измерении — стоячие волны как в атоме водорода (Лекция 1)

- электрический заряд определяется направлением движения по кругу в пятом измерении

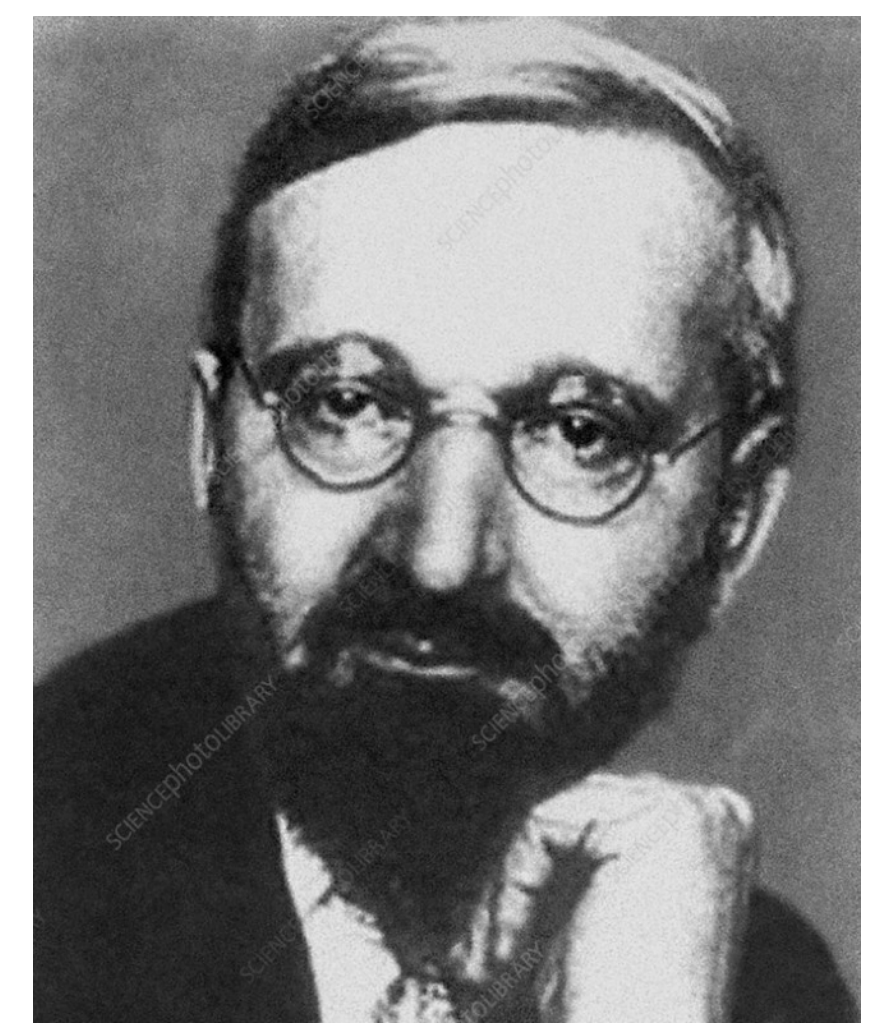
- квантование электрического заряда определяется целыми кратному импульсу в пятом измерении

- **Небольшая проблемка**

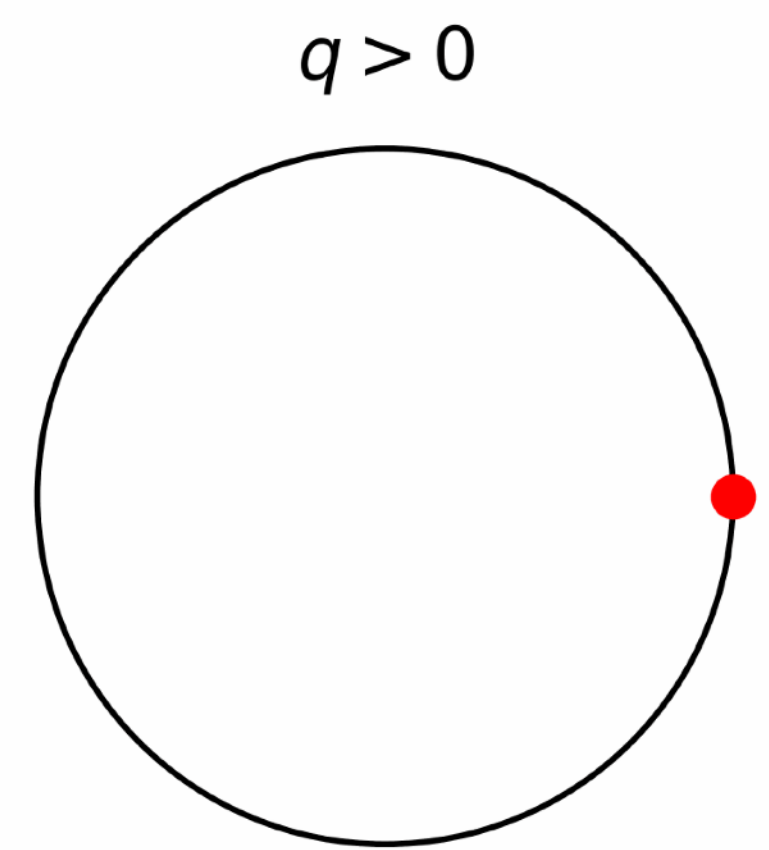
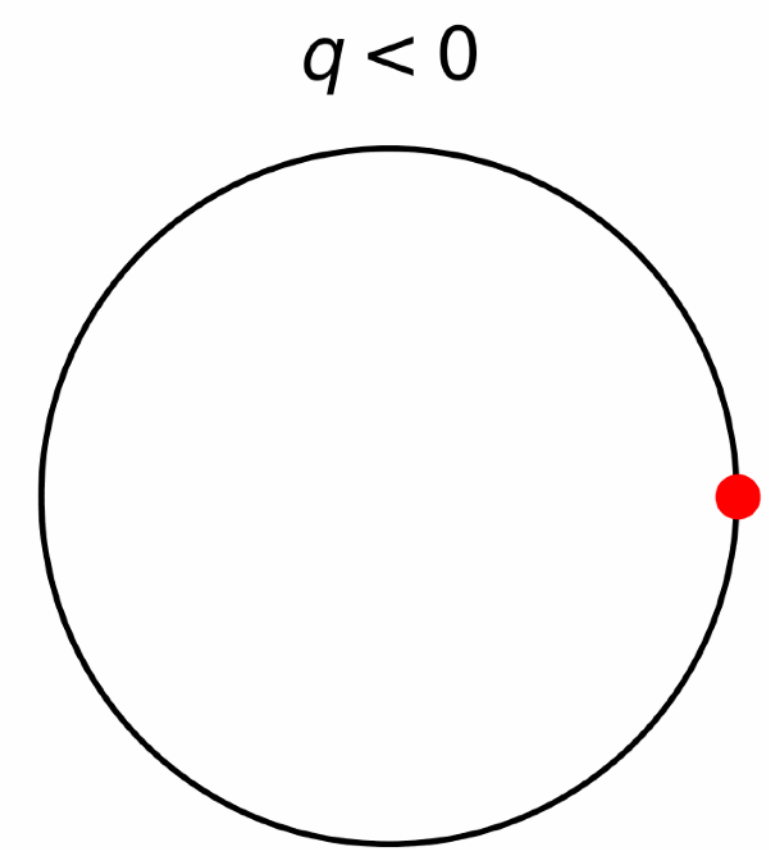
- Масса электрона = 5 кг



Оскар Клейн



Теодор Калуца



# Теория Калуца-Клейна

## Важные уроки

### ○ Новые идеи:

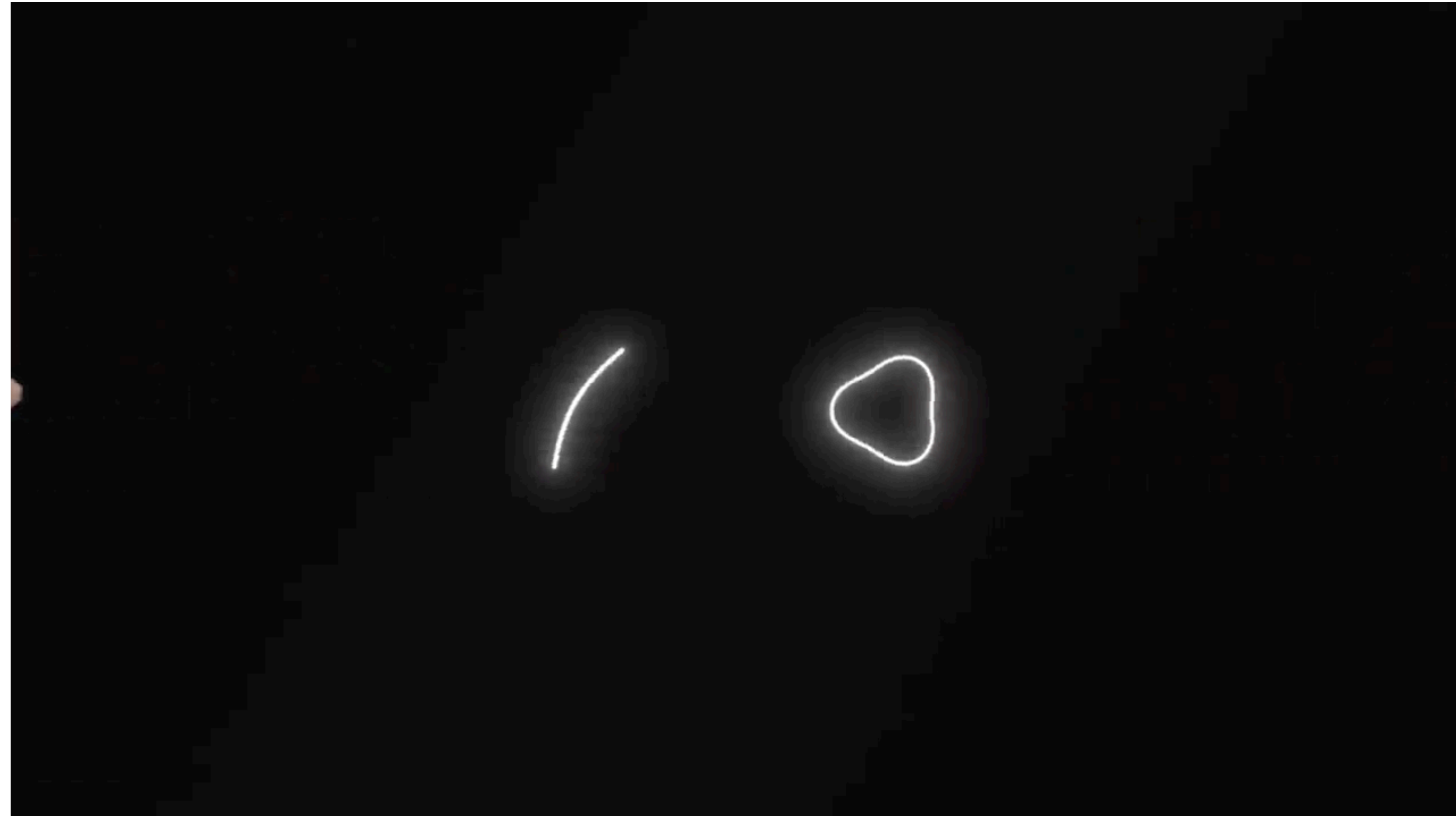
- Мир может иметь размерность пространства-времени больше, чем  $3+1$
- Компоненты метрики дополнительных измерений — физические поля в  $3+1$
- Дополнительные размерности пространства могут быть компактными
- Основа для многих современных теорий сегодня: суперструны и др.

**Здесь должна быть шутка**

# Теория струн

# Струны

- Вместо (почти) точечных частиц струны планковского масштаба  $\sim 10^{-33}$  см
- Струны открытые и замкнутые
- У струны есть длина и натяжение
- Струны вибрируют
- Частоты (ноты) и форма вибраций определяют массы и спин частиц





# Колебания струн = частицы

- Частоты (ноты) и форма вибраций определяют массы и спин частиц
- Одна мода колебаний похожа на фотон: нулевые масса и эл. заряд, спин = 1
- Другая мода колебаний похожа на гравитон: нулевые масса и эл. заряд, спин = 2 (!)
- Надежда теории струн: все частицы это колебания струны



# Гармонии Вселенной. Струнная симфония

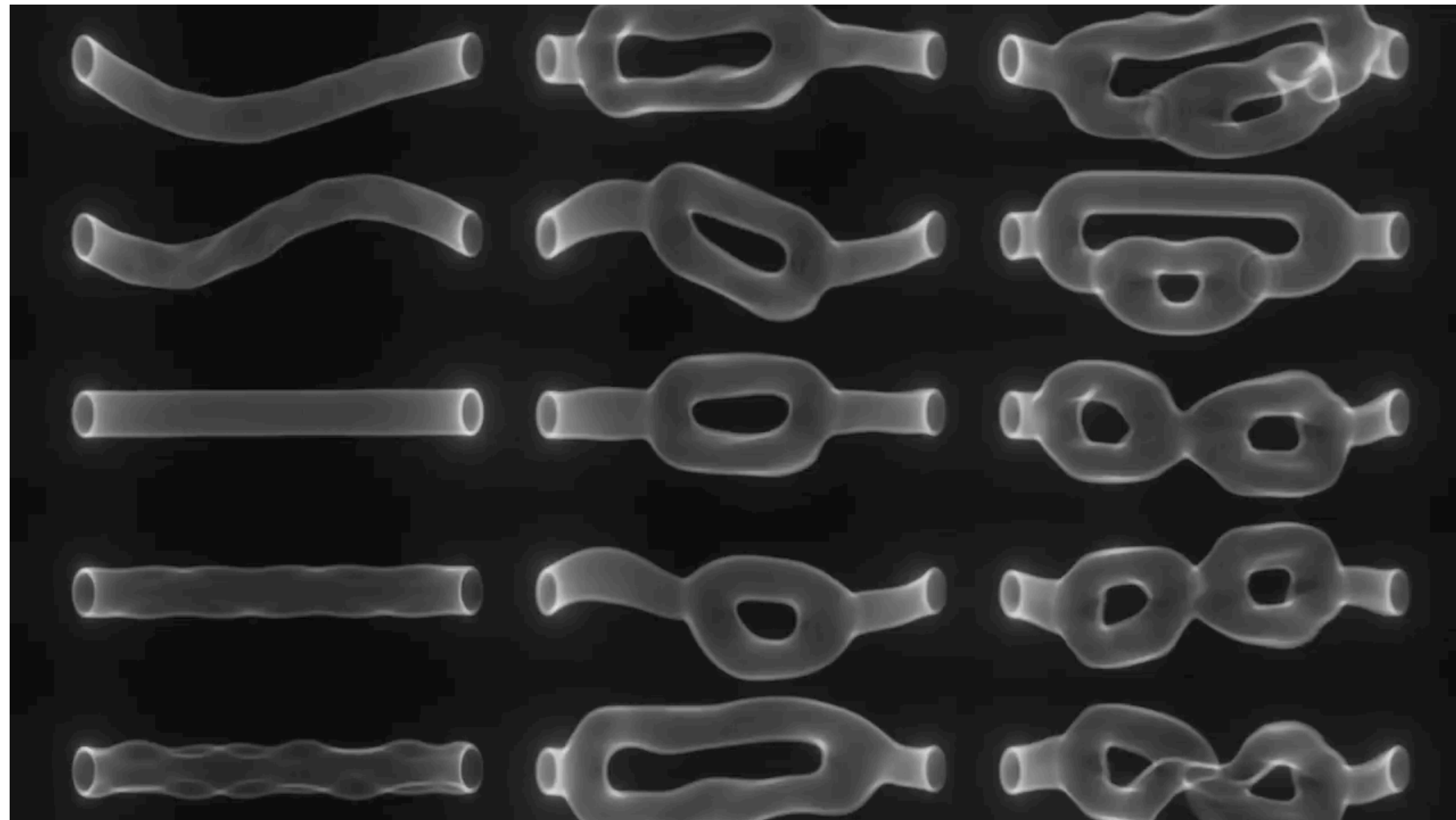


# Взаимодействия струн

— Диаграммы Фейнмана становятся объемными

— В силу топологии диаграмм, из них исчезают бесконечности!

— Включение гравитона в квантовую теорию больше не проблема



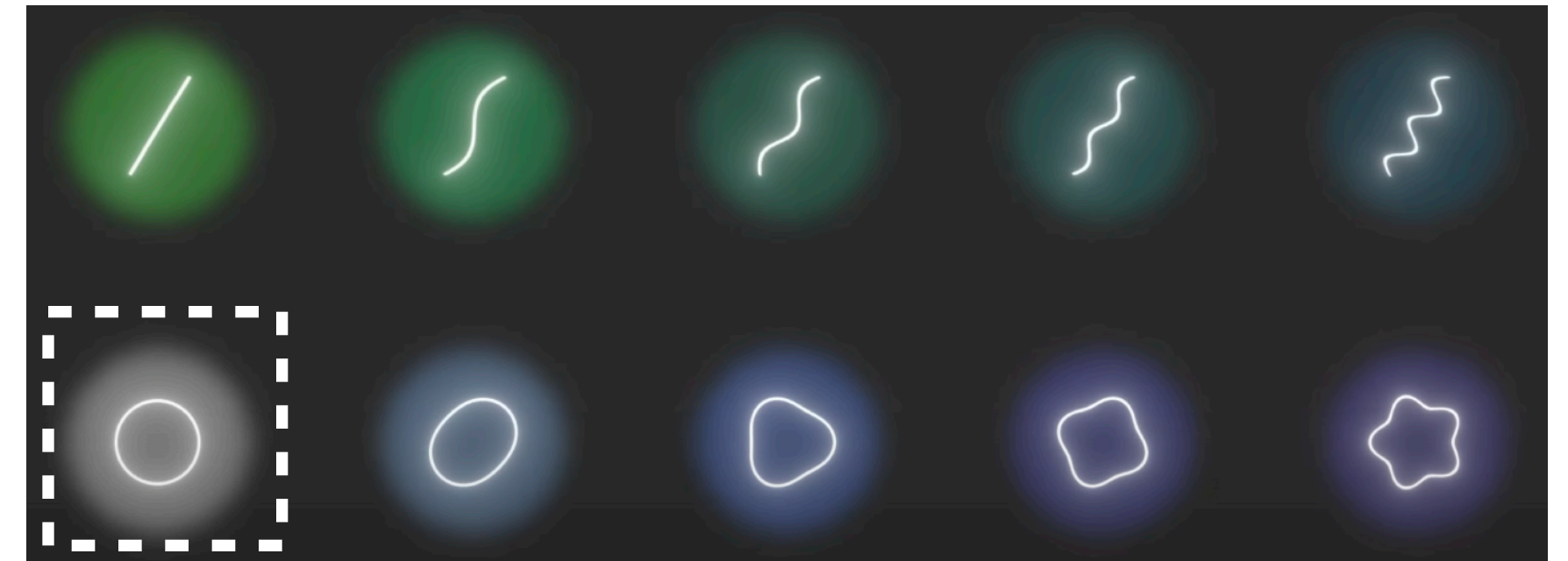
# Теория струн

Не только предсказывает гравитон, но и позволяет вычислять как он взаимодействует с другими частицами

**Теория струн = теория  
квантовой гравитации**

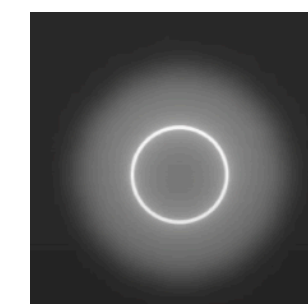
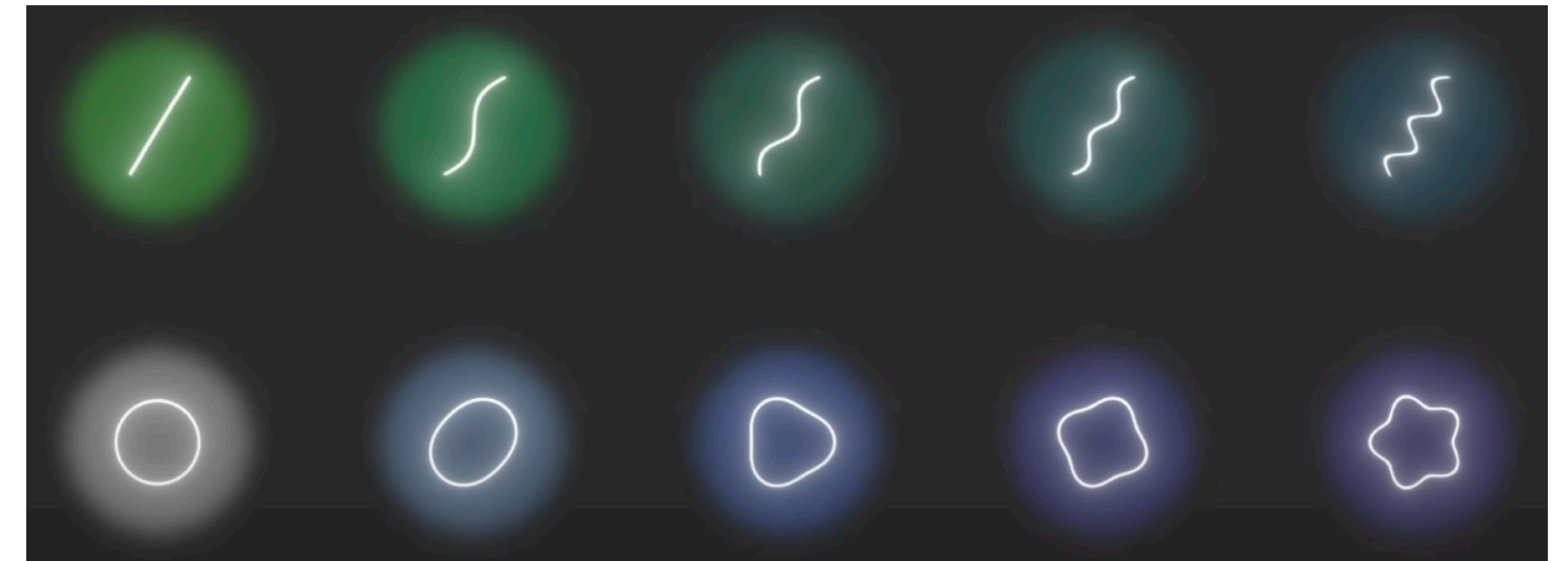
# К этому слайду теория струн выглядит перспективной

- Объясняет почему существуют различные частицы
- Предсказывает, что они должны взаимодействовать друг с другом
- Включает квантовое описание гравитации



# К этому слайду теория струн выглядит перспективной

- Объясняет почему существуют различные частицы
- Предсказывает, что они должны взаимодействовать друг с другом
- Включает квантовое описание гравитации



**Но есть три  
проблемы ...**





# Три проблемы теории струн

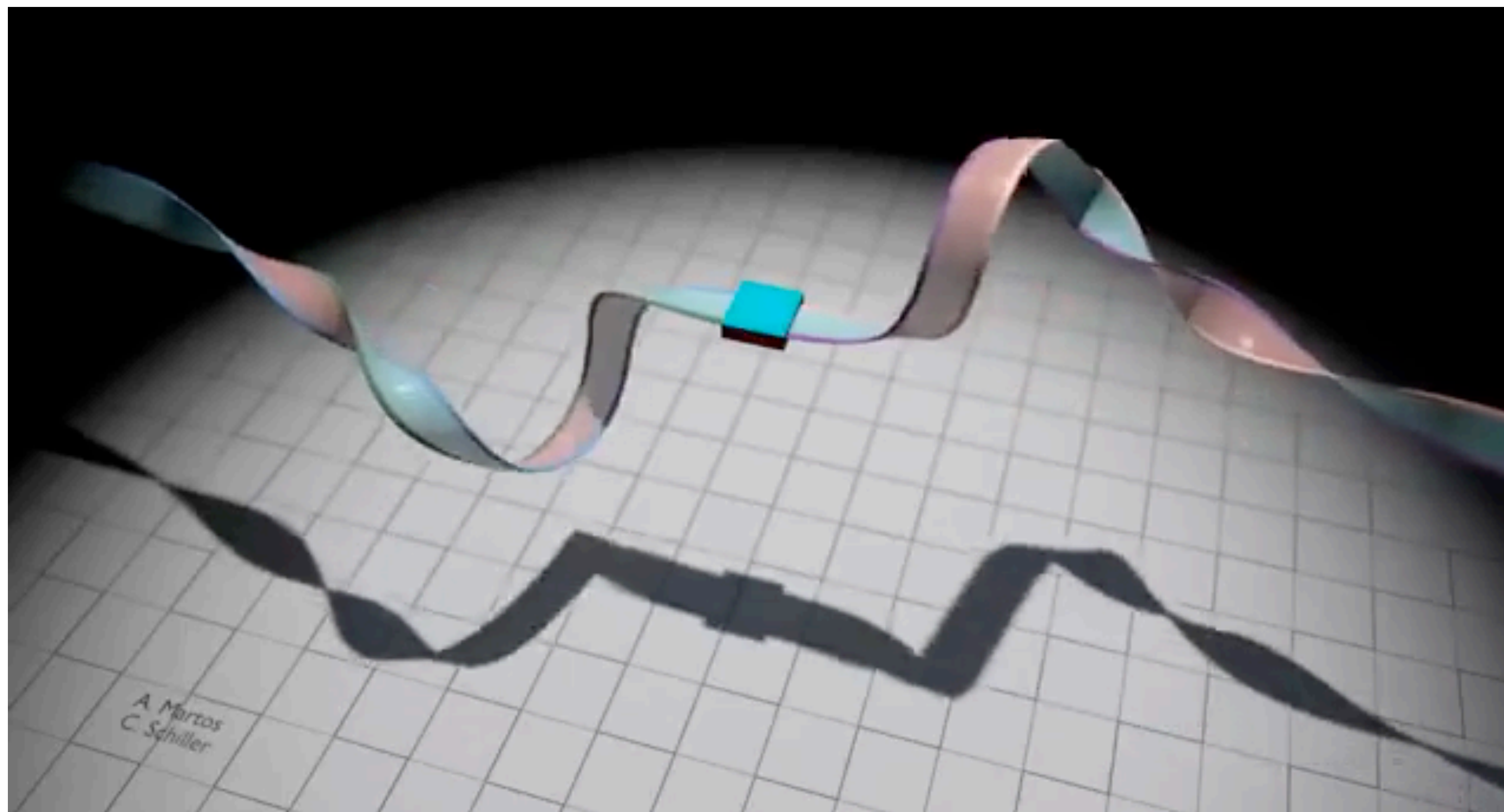
- **Все струны бозоны (частицы с целым спином).**
  - Нет фермионов (частицы с полуцелым спином). А это вся материя Вселенной
- **Теория предсказывает тахион**
  - Частица с мнимой массой  $m \sim \sqrt{-1}$  и сверхсветовой скоростью
- **Теория внутренне непротиворечива только в  $D = 26$** 
  - Размерность пространства-времени = 26

# Но что такое фермион?



Внимание! Эксперимент!

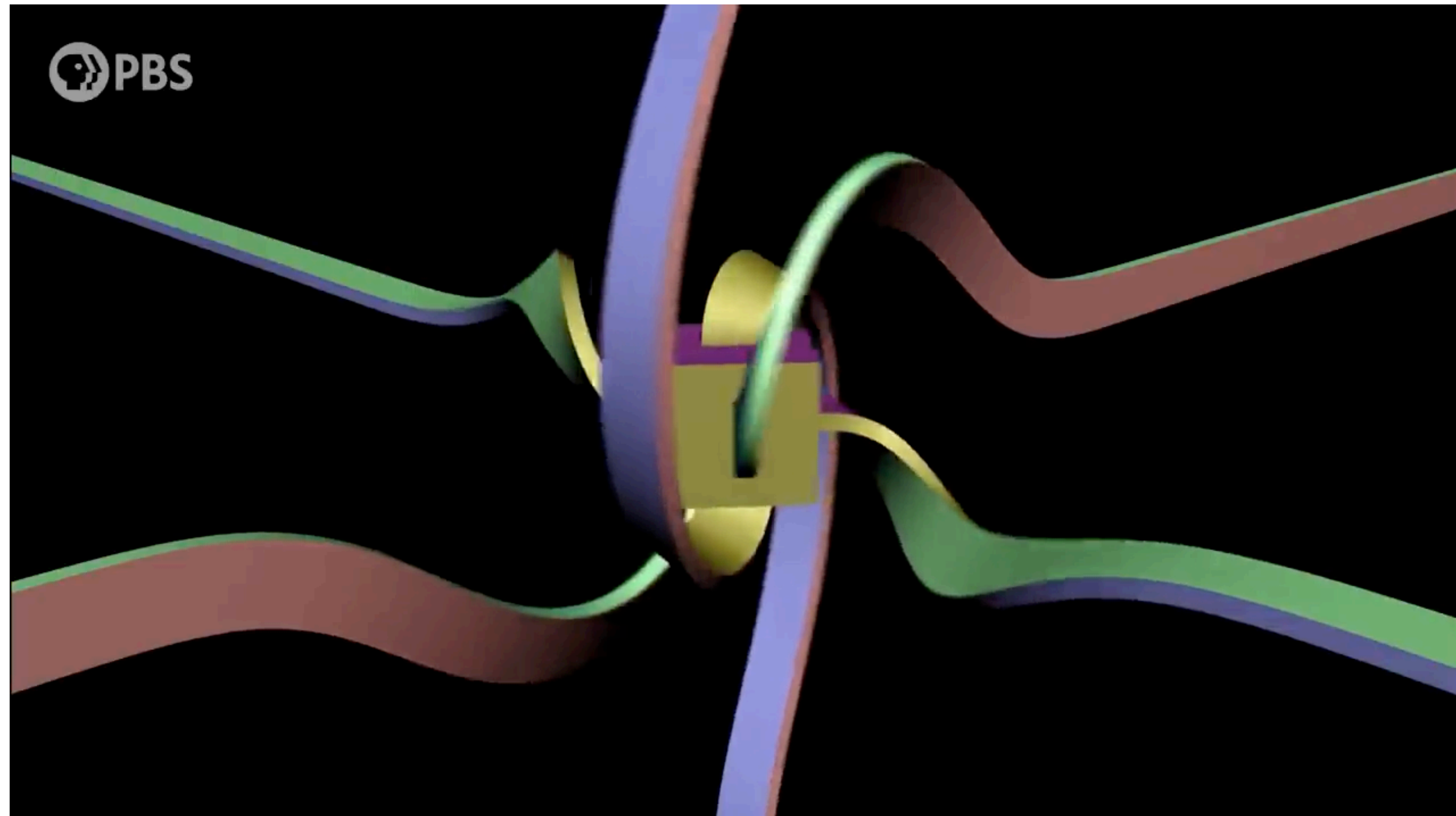
# Трюк Дирака



# Механическая аналогия для фермиона

Оборот на 720 градусов возвращает систему к прежнему состоянию

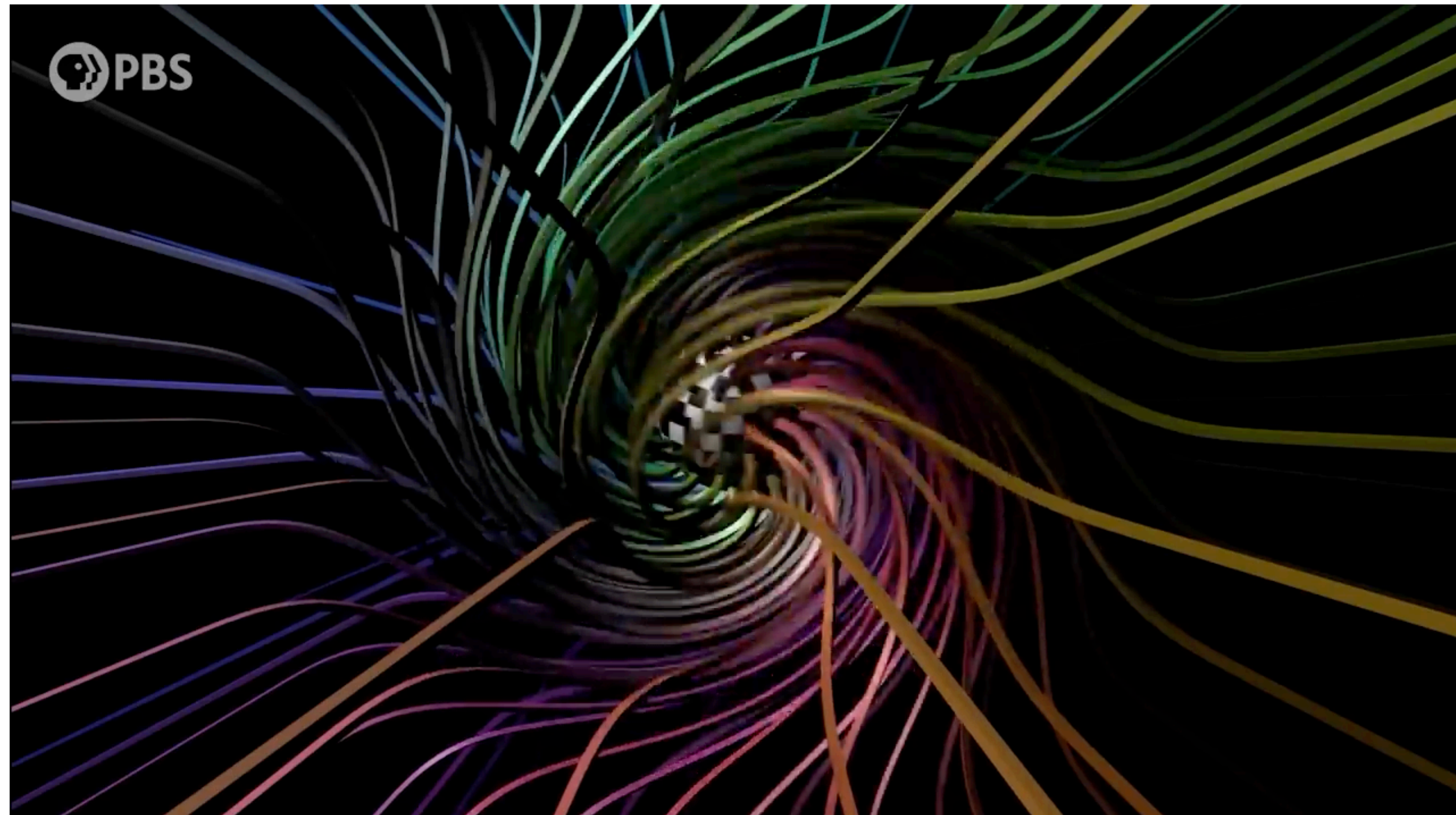
Кубик/шарик может крутиться бесконечно долго и никогда не запутается



# Механическая аналогия для фермиона

Оборот на 720 градусов  
возвращает систему к  
прежнему состоянию

Кубик/шарик может  
крутиться бесконечно  
долго и никогда не  
запутается



# Целый и полуцелый спины

Качественная картинка

Целый спин



Спин 1/2



# СУПЕРСИММЕТРИЯ

# Суперсимметрия

## ○ Симметрии пространства-времени

Теорема Колемана-Мандула (1967): единственные симметрии пространства-времени — это трансляции, вращения и изменение скорости.

## ○ Возможная новая симметрия пространства-времени

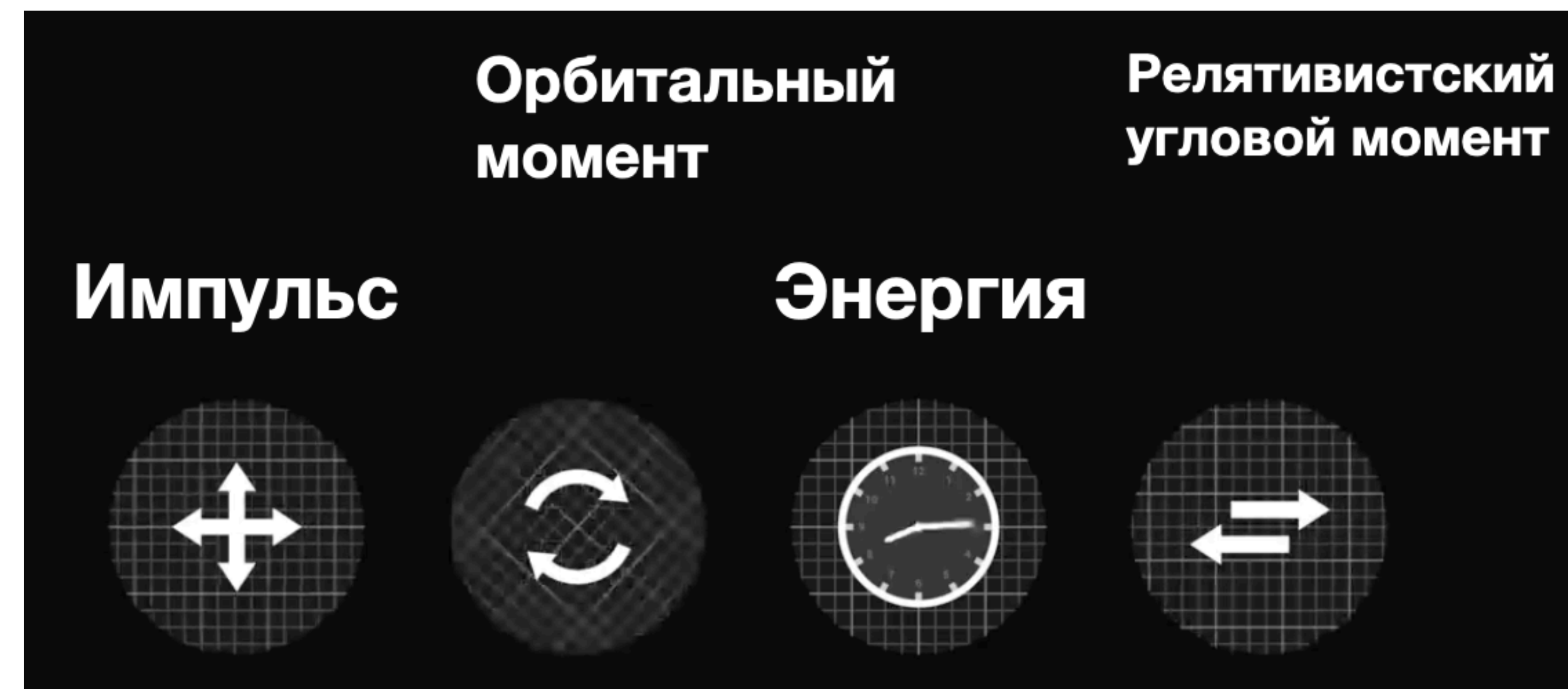
1971: Ж.Л. Жерве, Б. Сакита

1971: Ю. Гольфанд, Е. Лихтман

1972: Д. Волков, В. Акулов



Открыли новый возможный вид симметрии пространства-времени — суперсимметрию!





# Суперсимметрия

Это не теория!

## ○ Симметрия взаимозамены фермион $\leftrightarrow$ бозон

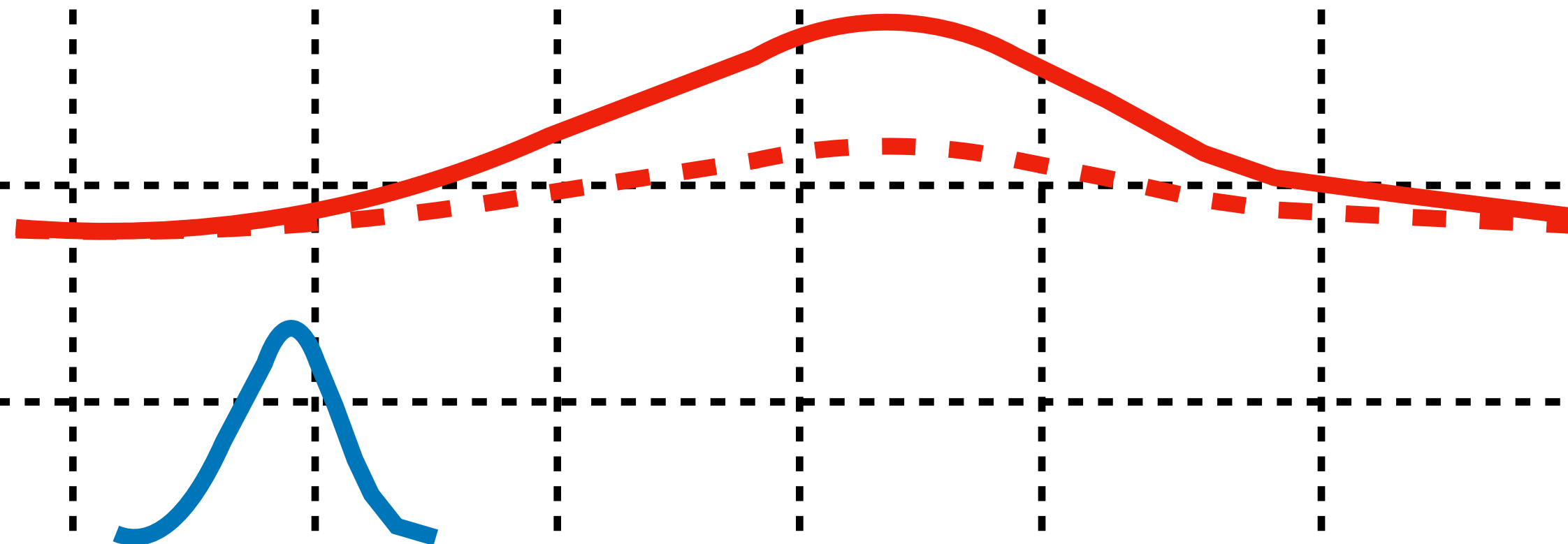
— Необходимо, чтобы для каждой частицы (поля) существовал партнер с точно такими же свойствами, но другим спином (отличающимся на  $1/2$ )

Частица	Суперпартнер
Электрон Спин = $1/2$	сэлектрон Спин = 0
Фотон Спин = $1/2$	Фотино Спин = $1/2$
Хиггс Спин = 0	Хиггсино Спин = $1/2$

# Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?

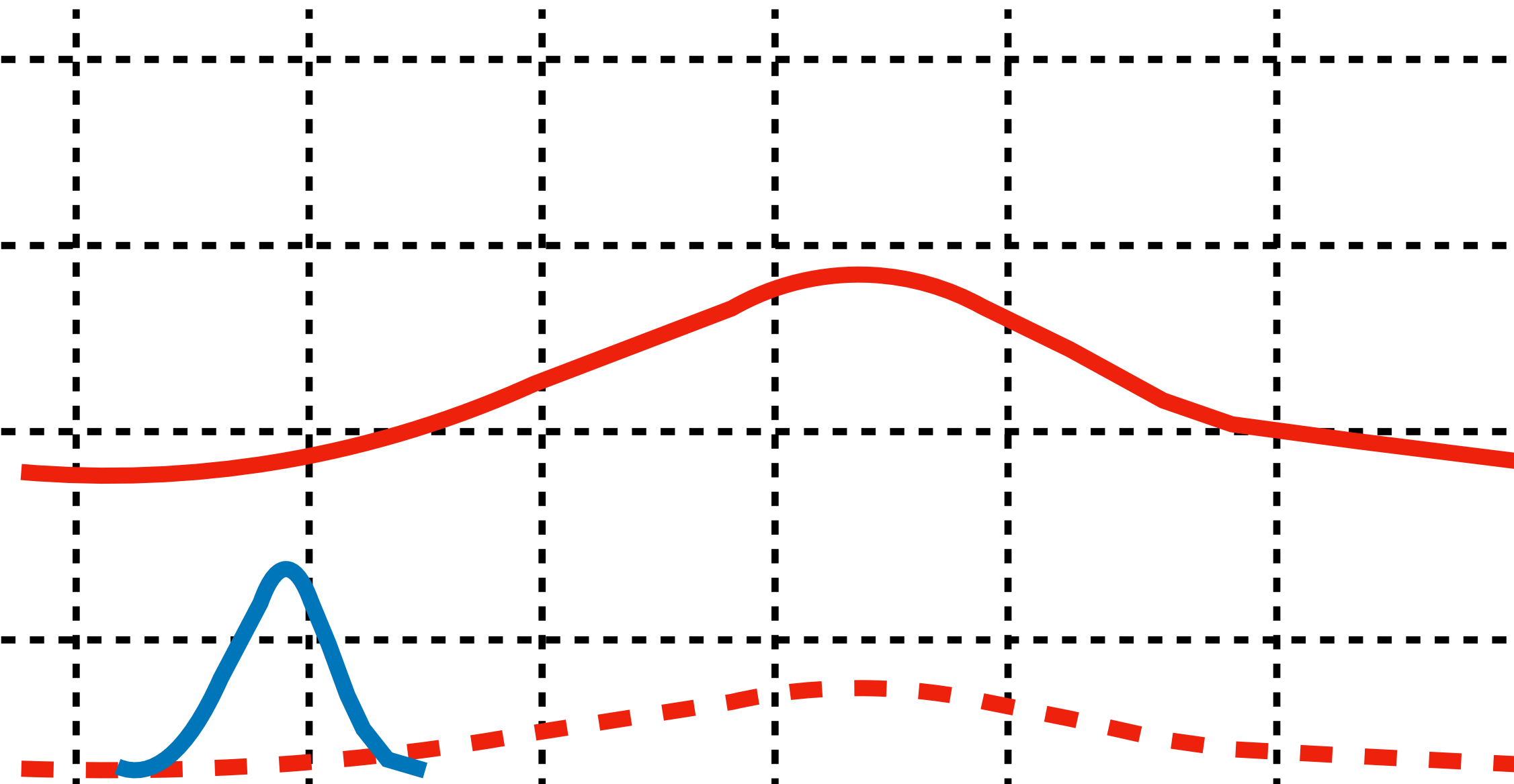
— Фермионное поле  
— Бозонное поле



# Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?

— Фермионное поле  
— Бозонное поле



# Почему суперсимметрия

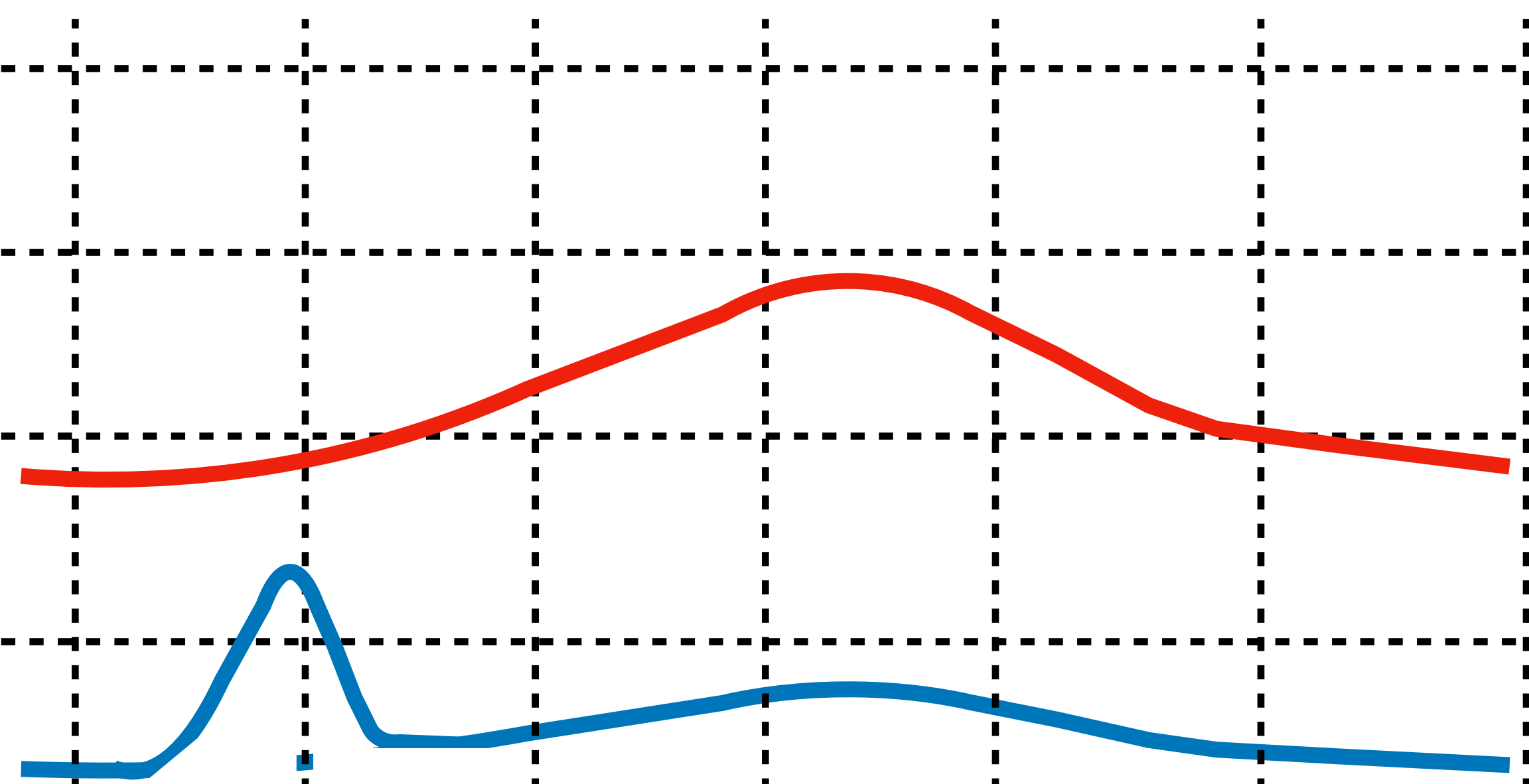
— симметрия пространства-времени?



Фермионное поле



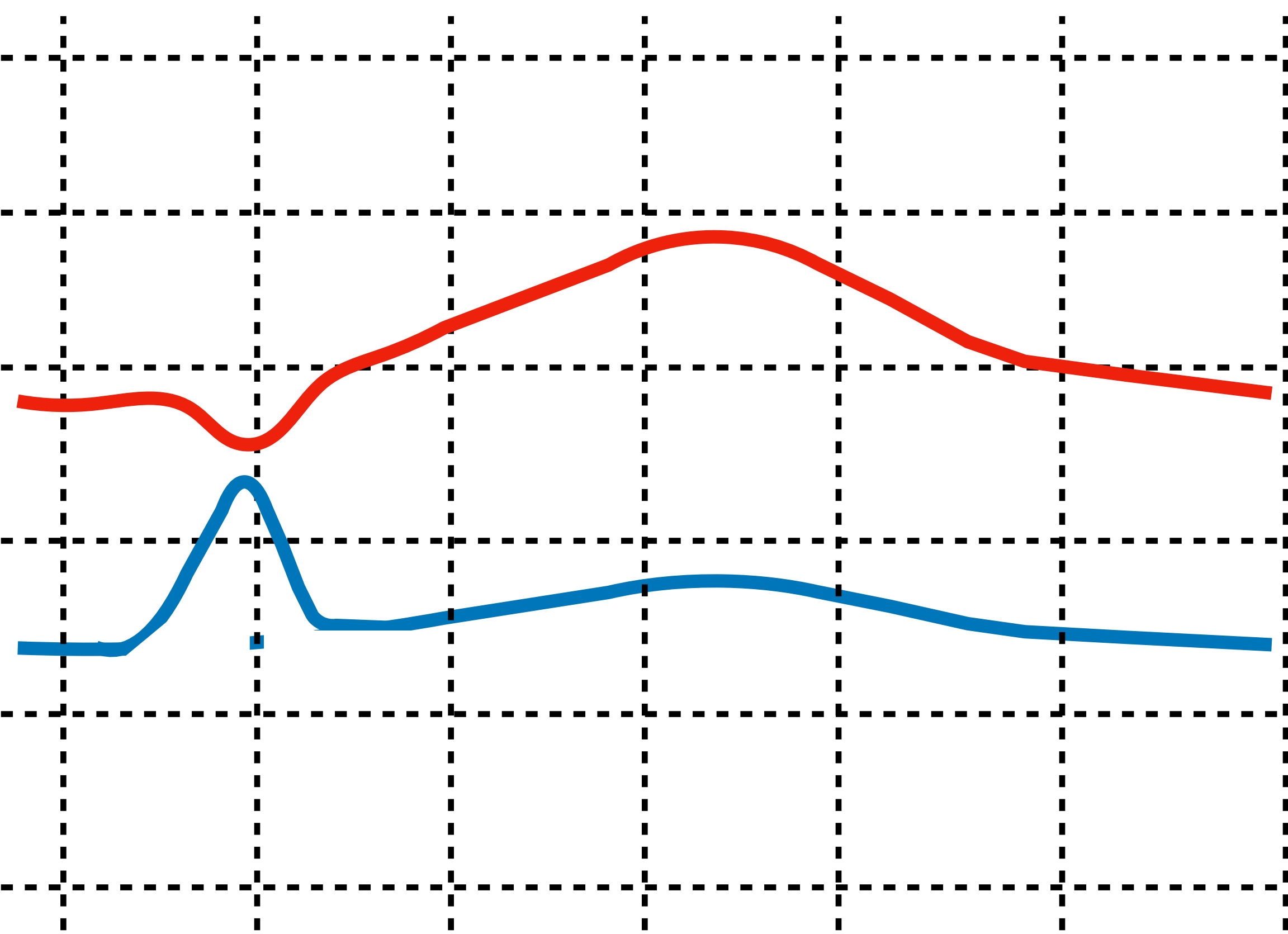
Бозонное поле



# Суперсимметрия

Это симметрия пространства-времени

— Фермионное поле  
— Бозонное поле



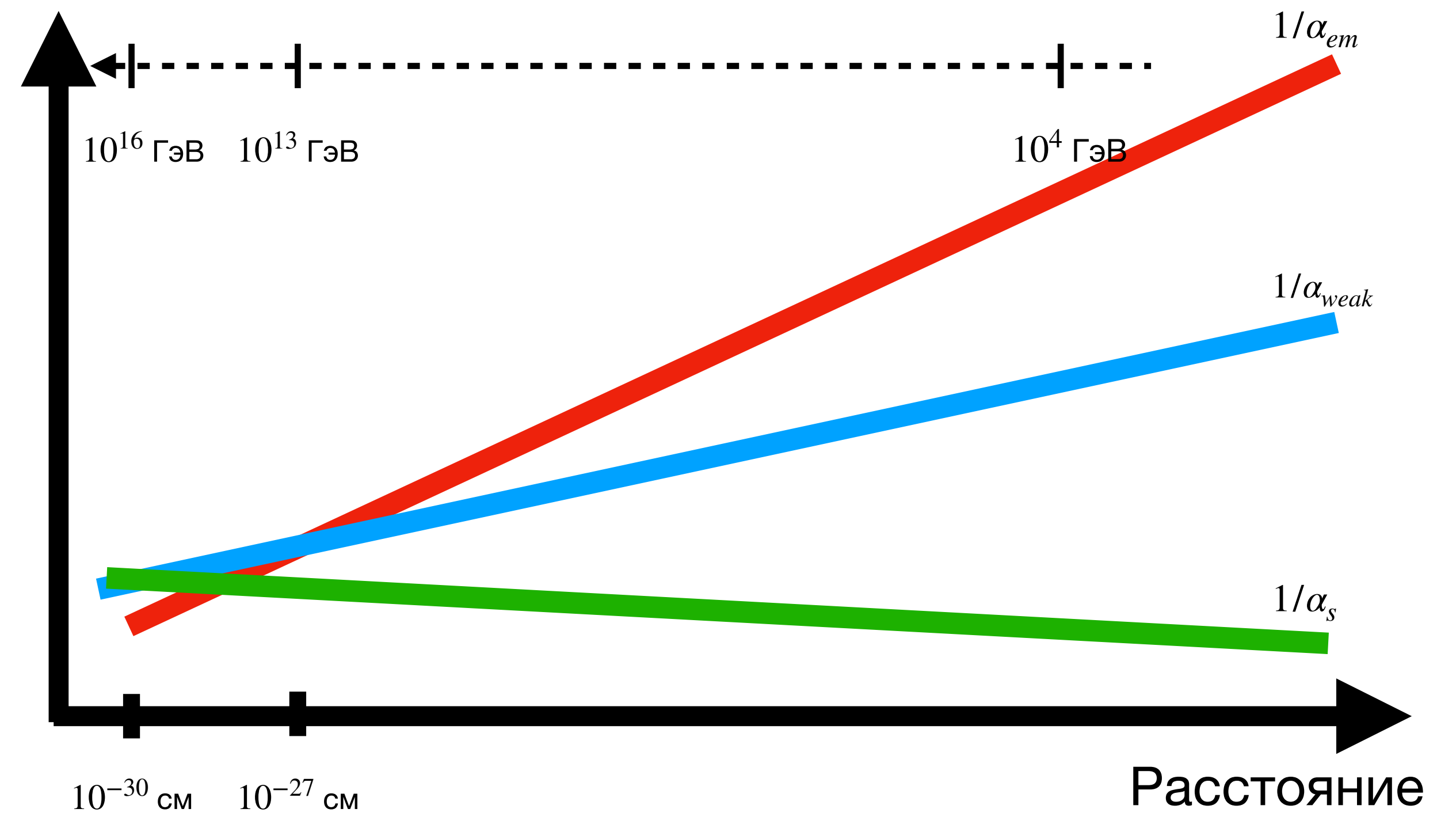
Физика остается неизменной при таких изменениях полей в пространстве-времени

# Суперсимметричные надежды

# Суперсимметричные надежды

## ○ Объединение электрослабых и сильных взаимодействий

Силы сходятся в одной точке!



# Суперсимметричные надежды

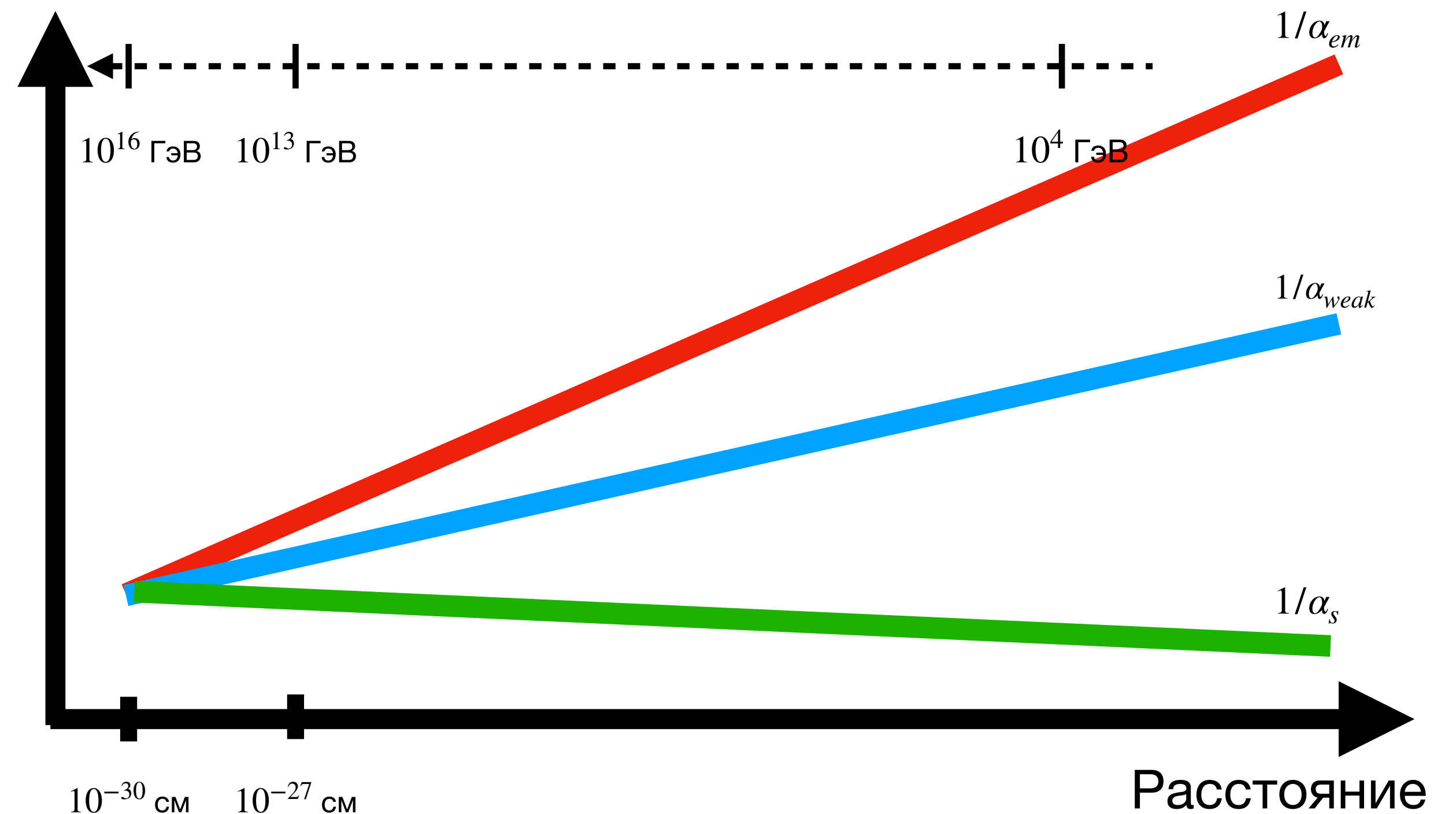
## ○ Объединение электрослабых и сильных взаимодействий

— Силы сходятся в одной точке!

## ○ Бозон Хиггса остается легким

— Загадка СМ: почему бозон Хиггса не тяжелее в  $10^{17}$  раз (Планковский масштаб)

## ○ Кандидат в темную материю





# Что такое суперсимметричная теория?

- **Теория, использующая принцип суперсимметрии**
  - Суперсимметричная квантовая механика
  - Суперсимметричная квантовая теория поля
  - Суперсимметричная теория конденсированного состояния
  - ...
  - Суперсимметричная теория струн = суперструн

# Суперструны

# Три проблемы теории струн

## Что дает суперсимметрия?

- **Все струны бозоны (частицы с целым спином).**

↪ В теории равное число фермионов и бозонов



- **Теория предсказывает тахион**

↪ Частица с мнимой массой  $m \sim \sqrt{-1}$  исчезла



- **Теория внутренне непротиворечива только в  $D = 26$**

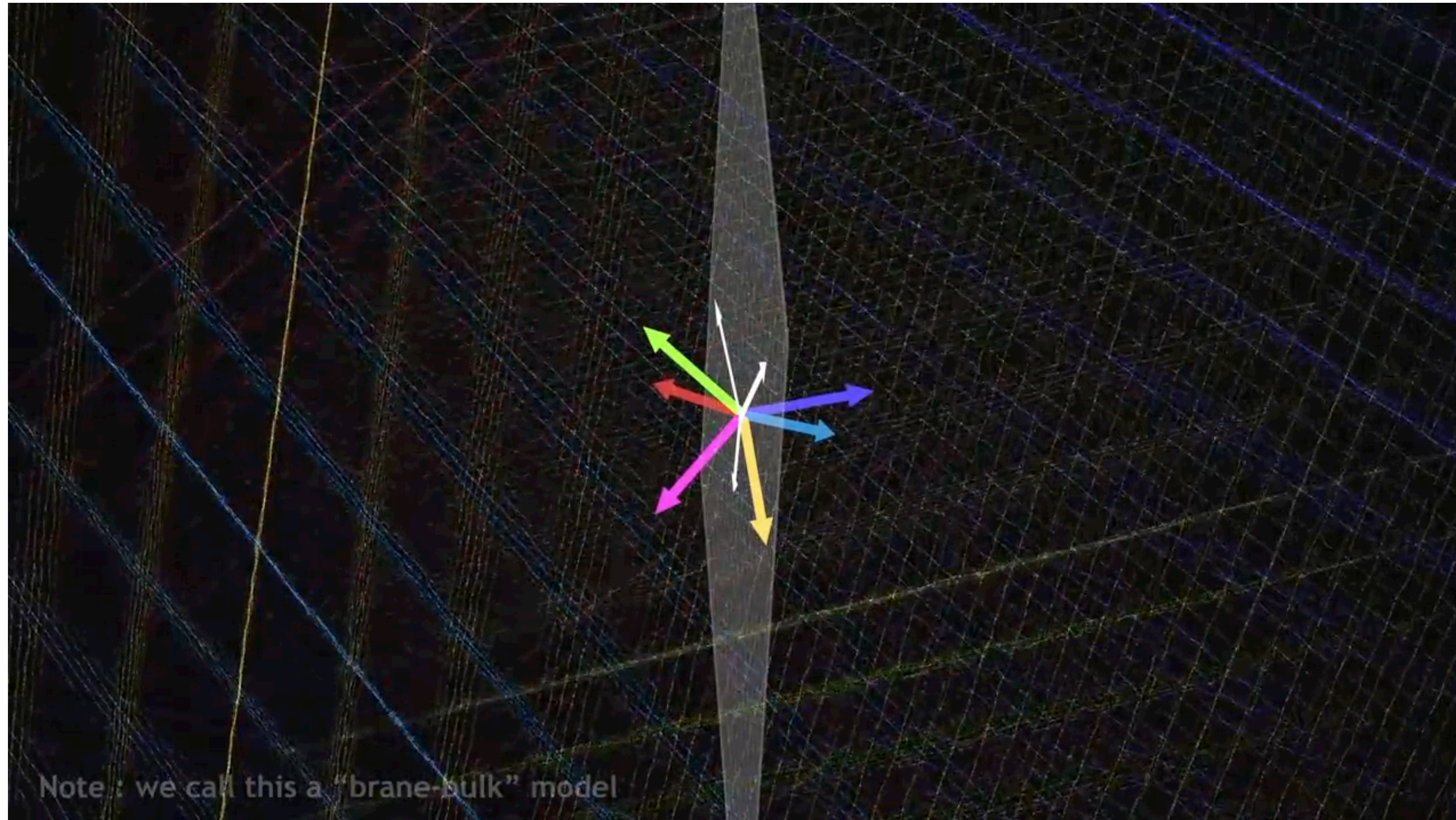
— Размерность пространства-времени = 10



**Где остальные 6 измерений?**

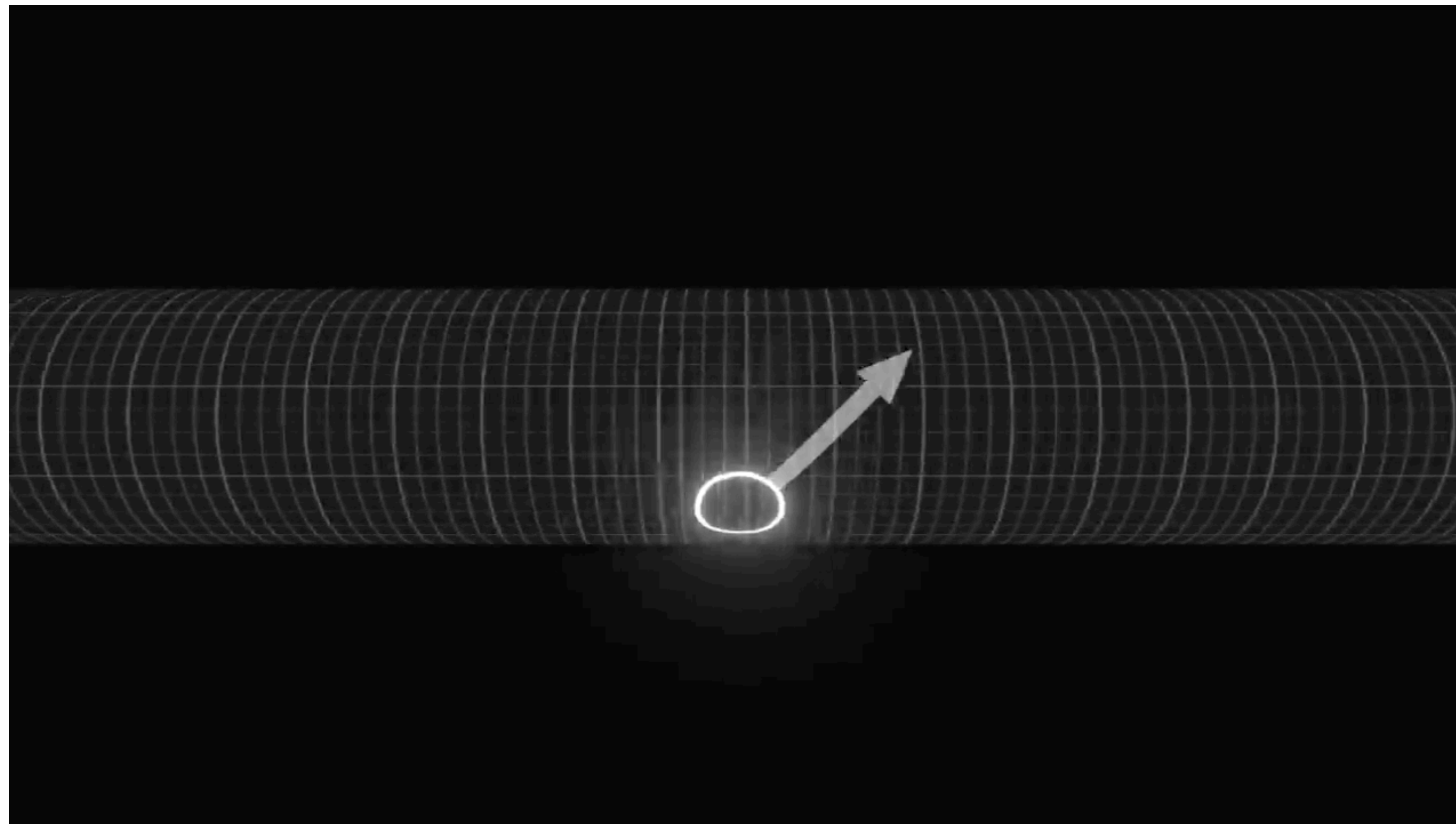
# Две возможности

- Наше трехмерное пространство — срез 9-мерного



# Две возможности

- Наше трехмерное пространство — срез 9-мерного
- Шесть дополнительных измерений малы. Очень малы

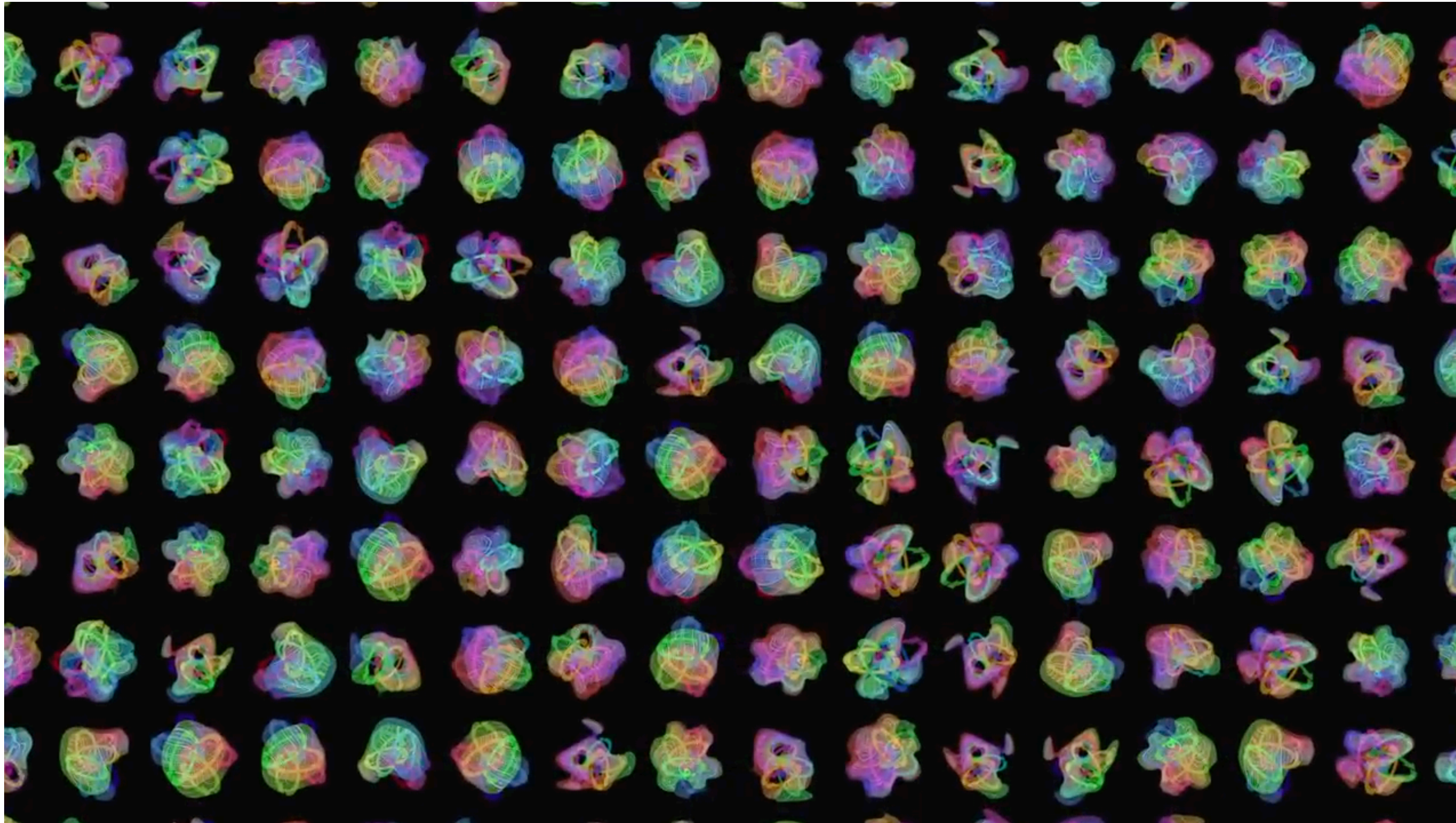


**Как компактифицировать  
дополнительные измерения?**

# Огромное число способов

Оценка:  $10^{500}$

- Многообразия Калаби-Яо

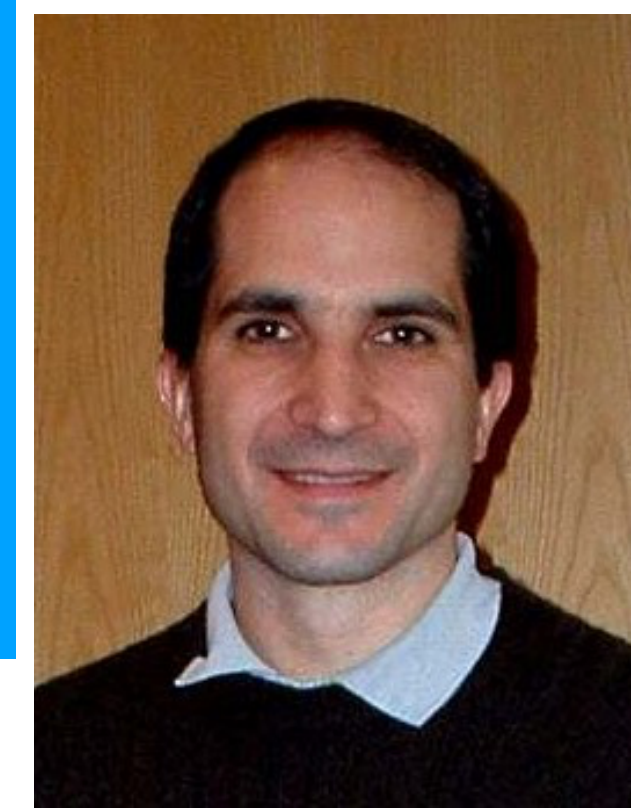




# Краткая история теории суперструн

# Краткая история суперструн

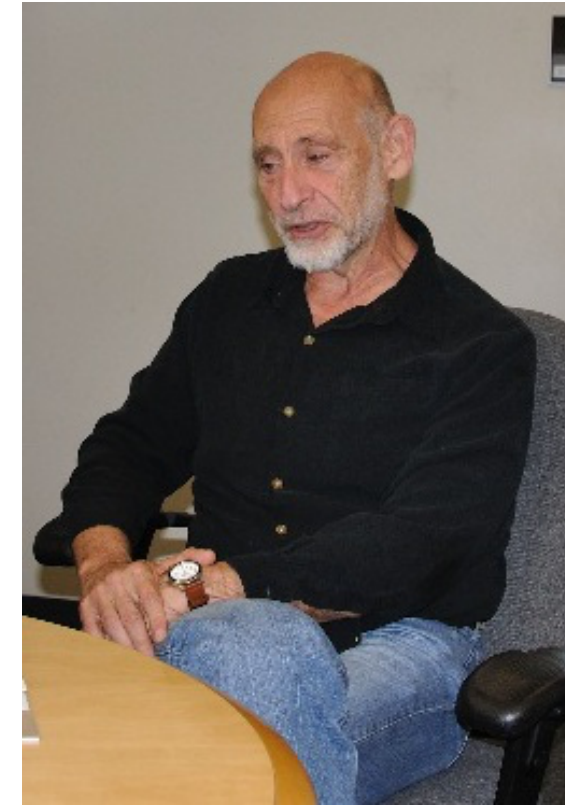
Очень краткая и очень неполная!



Хуан  
Малдасена



Эдуард  
Виттен



Леонард  
Сасскинд

- 1960-1970. Безуспешная теория сильных взаимодействий
- 1969-1970. Может быть, это теория пространства-времени (Намбу, Нильсен, Сасскинд)?
- 1971. Суперструны (Рамон, Шварц, Неве)
- 1974. Суперструны = теория гравитации (Енея, Шварц, Шерк)
- 1980е. Первая струнная революция (Виттен)
- 1995. Вторая струнная революция = М-теория (Виттен).  $D=11$
- 1997. Ads/CFT (Малдасена)

# Критика теорий суперструн

# Критика теории суперструн

## Нелегкие времена

- **Огромное число решений**

↪ Как проверить теорию?

- **Совместимость с наблюдаемой темной энергией**

↪ До сих пор неизвестно, совместима ли теория суперструн с положительной космологической константой

- **Объясняют ли суперструны гравитацию?!**

↪ Струны «живут» во внешнем пространстве-времени, не искажая его. Струнный гравитон — это возмущение чего?!

**Суперсимметрия до сих пор не найдена**

# Кризис теории струн



# Петлевая квантовая теория гравитации

# Революционная идея

## Пространство = квантовый объект

- Пространство дискретно= квантовые ячейки.
- Квантовые ячейки соединены друг с другом определенным образом
  - На малых (Планковских масштабах) пестрая структура как в калейдоскопе
  - На больших выглядит как **непрерывное** пространство
- Работы ведутся с 1980х



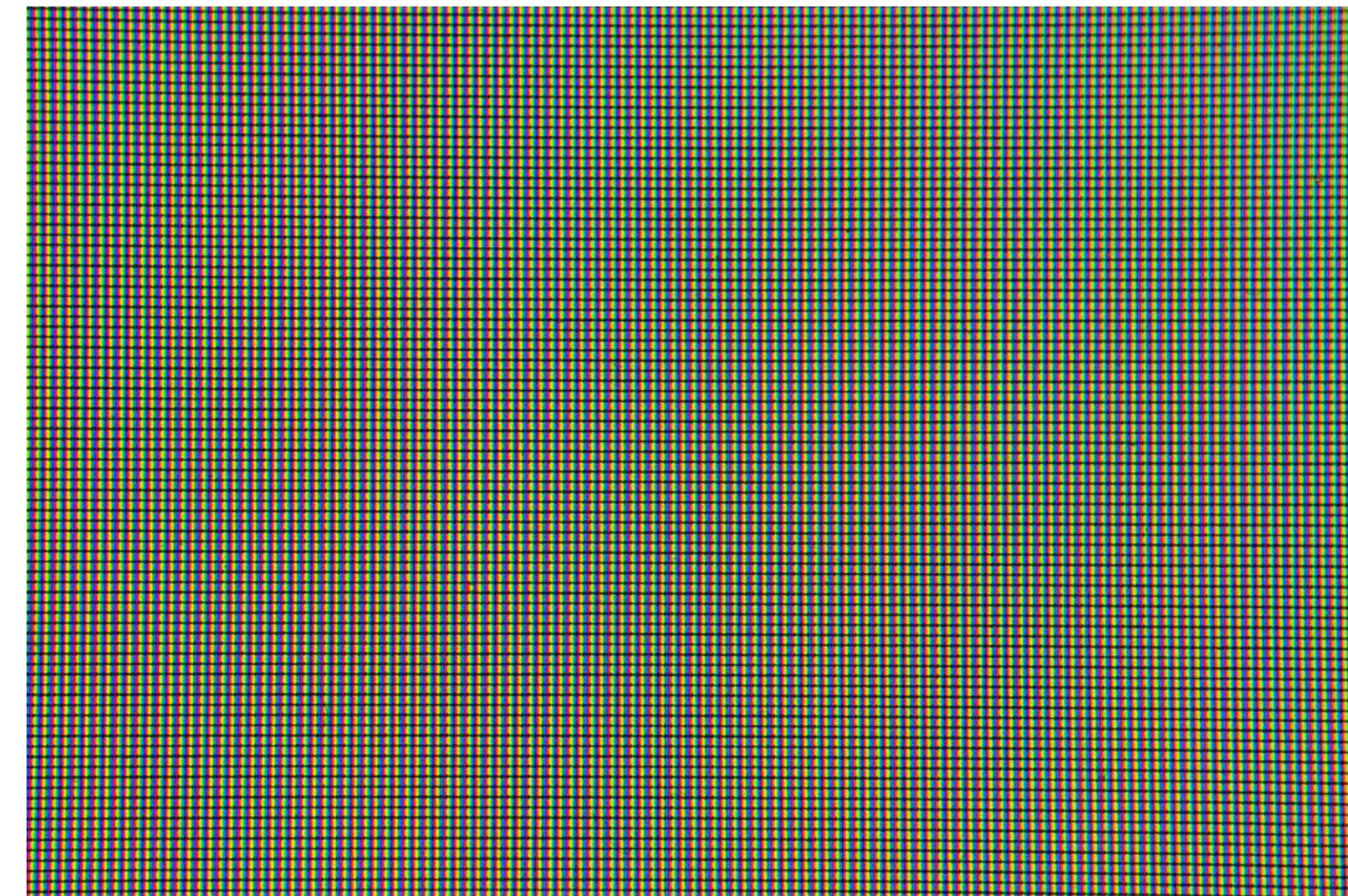
Абэй Аштекар



Карло Ровелли



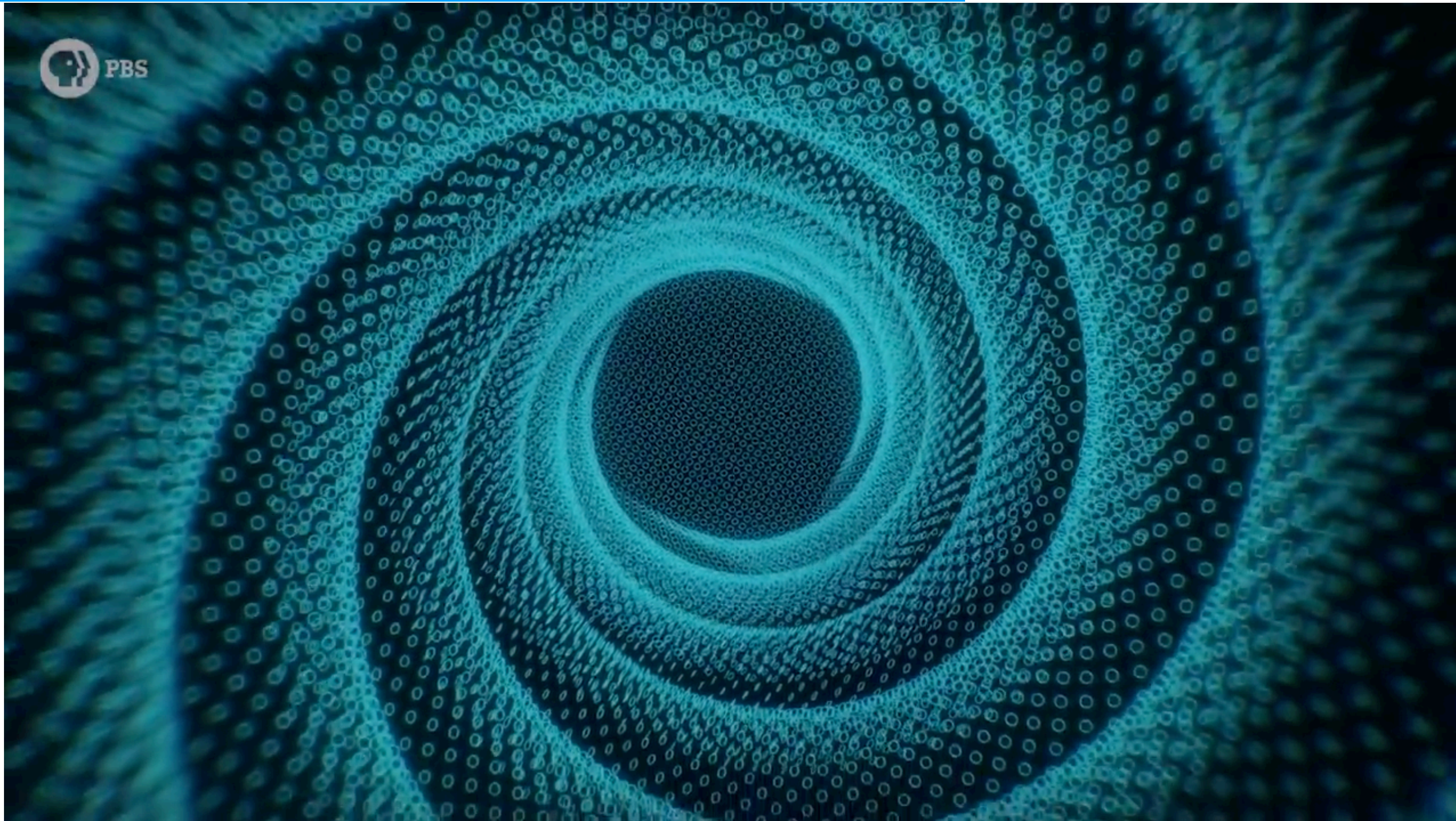
Ли Смолин





# Петлевая гравитация

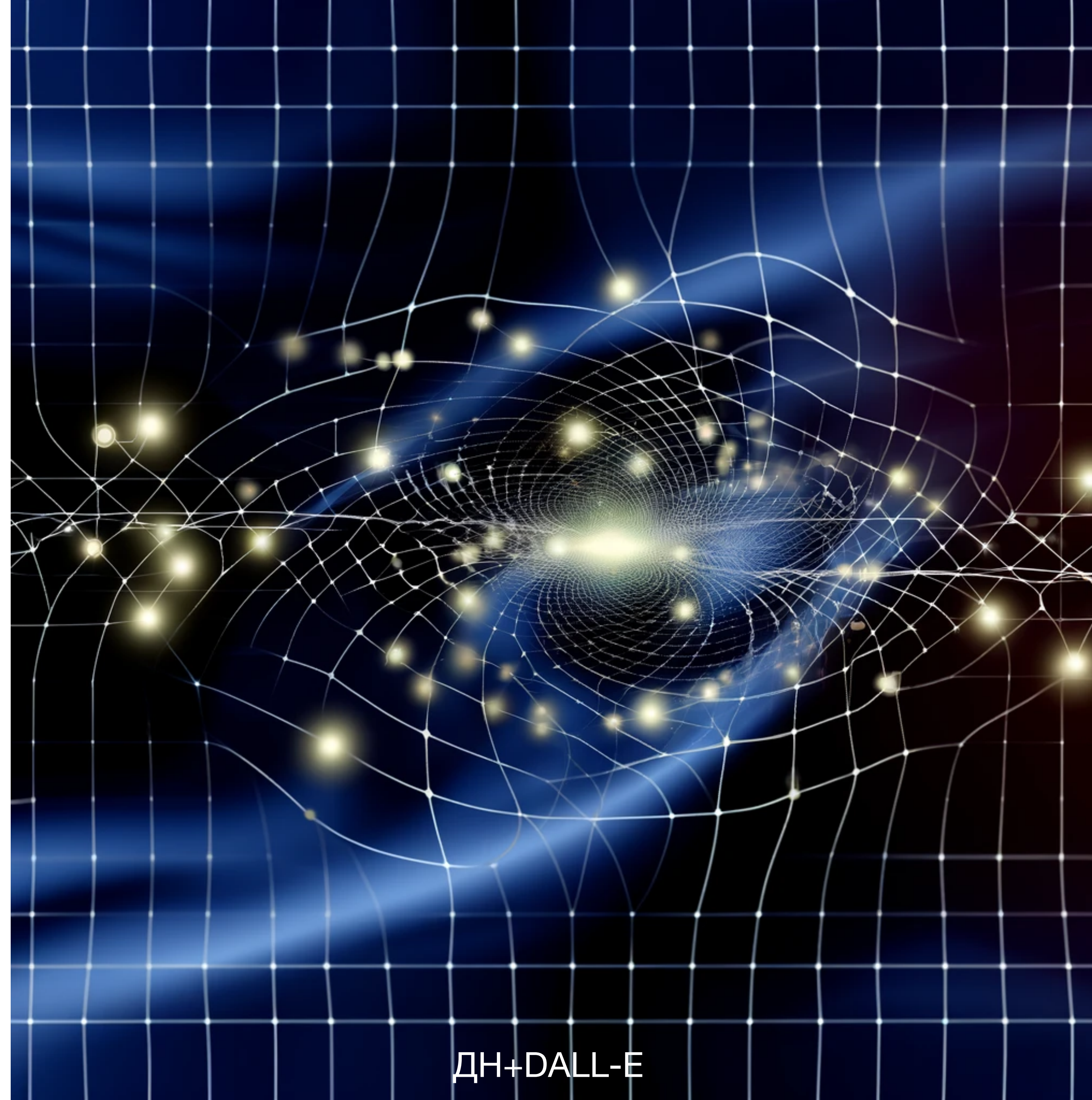
Любая геометрия как свитер, перчатки и  
т.д. из петель



# Петлевая квантовая гравитация

- **Объединение ОТО и квантовой теории**
- **Не требуются серьезные предположения**
  - Суперсимметрия
  - Суперструны
  - Дополнительные размерности пространства
- **Предсказывает излучение Хокинга черными дырами**
- **Но где в теории время?!**
- **И что такое частицы в этой теории?!**

**ВРЕМЯ**



ДН+DALL-E

# Петлевая квантовая гравитация

## Время

- Время — возникающее (эмерджентное) понятие
  - Цепочке квантовых взаимодействий можно поставить в соответствие цепочку смежных областей пространства-времени

# Фабрика Вселенной



ДН+DALL-E

# Петлевая квантовая гравитация

## Стандартная Модель

- Переплетения пространства-времени в виде ленточных структур — основа для построения «частиц»
  - Фермионы = перекрученные ленты
  - Бозоны = неперекрученные ленты
  - Заряды = топология перекручивания и переплетения

# Петлевая квантовая гравитация

## Эволюция Вселенной

- Вселенная не может сжаться в точку из-за свойств квантовых ячеек
  - При экстремальном сжатии происходит остановка. Затем снова расширение
  - «Большой взрыв» часть истории «предыдущей» Вселенной

**ИТОГИ**



# ИТОГИ

## О чем мы говорили в четырех лекциях

- **Эволюция наших представлений об устройстве природы**
  - От куска камня с урановой рудой до «атомов» пространства-времени
- **Революционные идеи**
  - Специальная теория относительности
  - Общая теория относительности
  - Квантовые поля
  - Происхождение сил
  - Симметрии и спонтанное нарушение симметрий
  - Объединение взаимодействий
  - Суперструны, квантовые ячейки (петли) пространства, суперсимметрия

**Центральный вопрос:**

**Как экспериментально исследовать  
новые теории?**