Мини-курс лекций

Joint Institute
for Nuclear Research

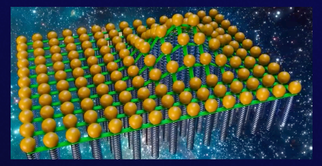
От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

Дмитрий В.Наумов

Первые три лекции …

Физическая картина мира сегодня

СМ



Сильное взаимодействие

Электрослабое взаимодействие

Слабое взаимодействие

Электромагнетизм

Электричество

Магнетизм

Общая теория Относительности

Специальная теория Относительности

Пространство

Время

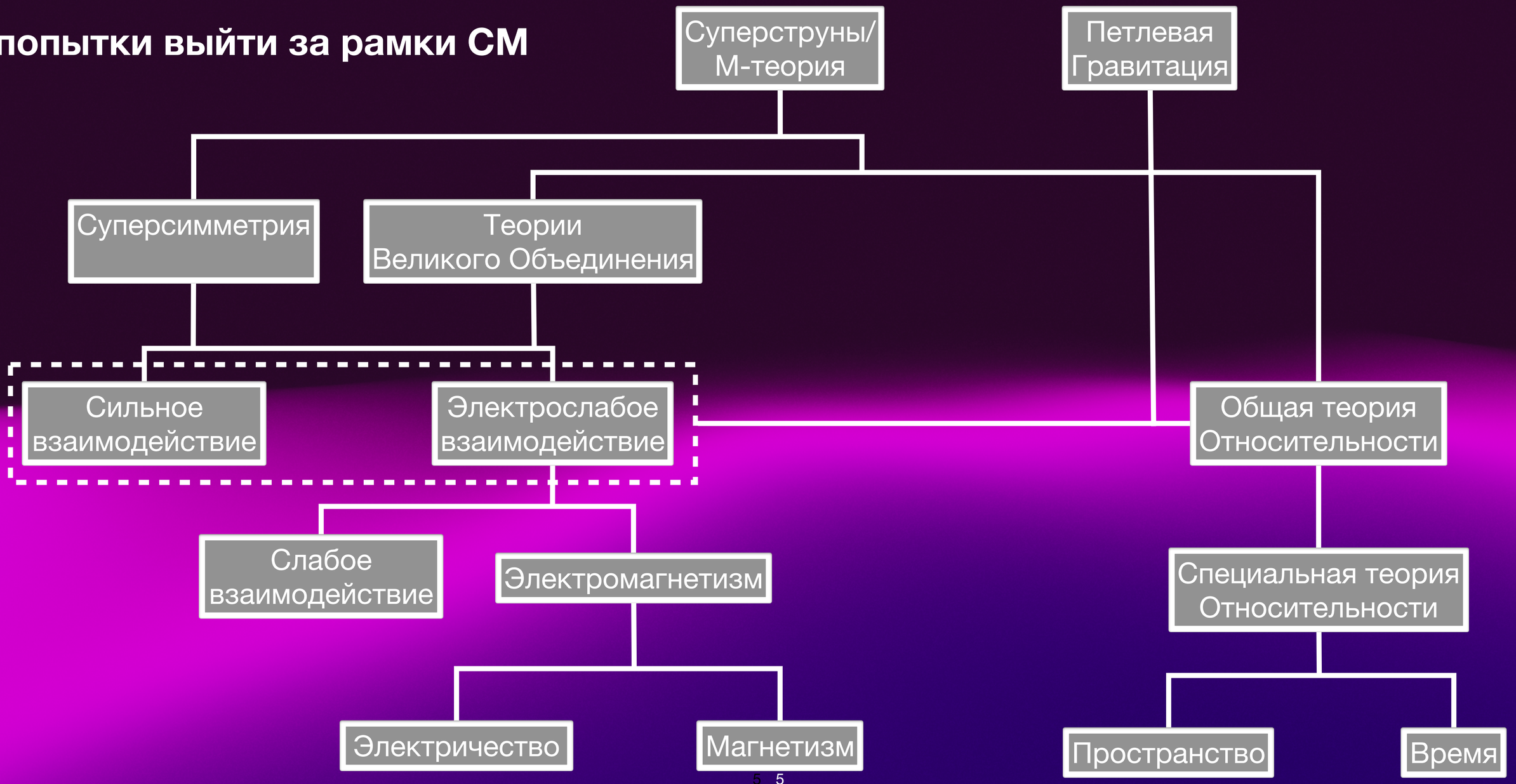
3

Joint Institute
for Nuclear Research

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

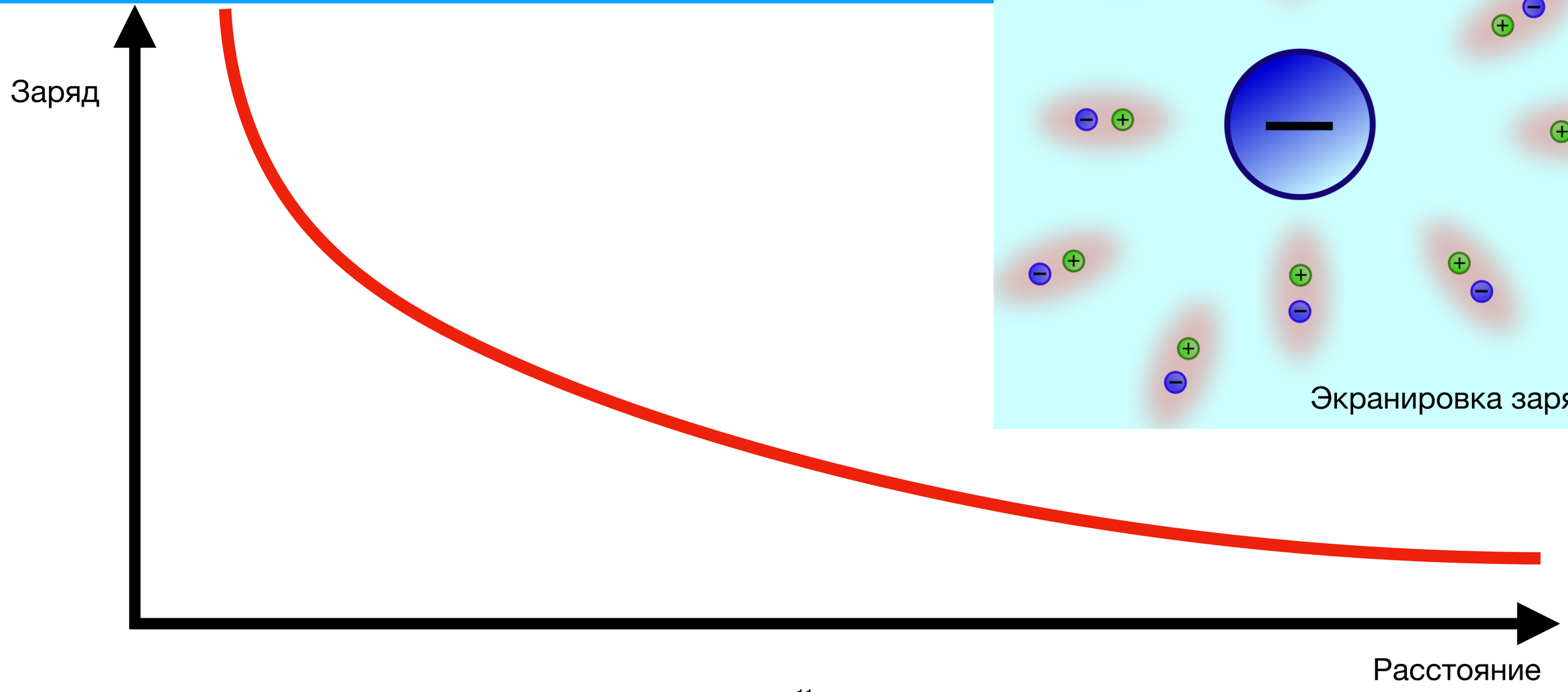
- Многомерные миры
- Струны, Суперструны и Браны
- Суперсимметрия
- Теория пространства и времени
- Единая сила
- Эксперименты будущего и что им мешает

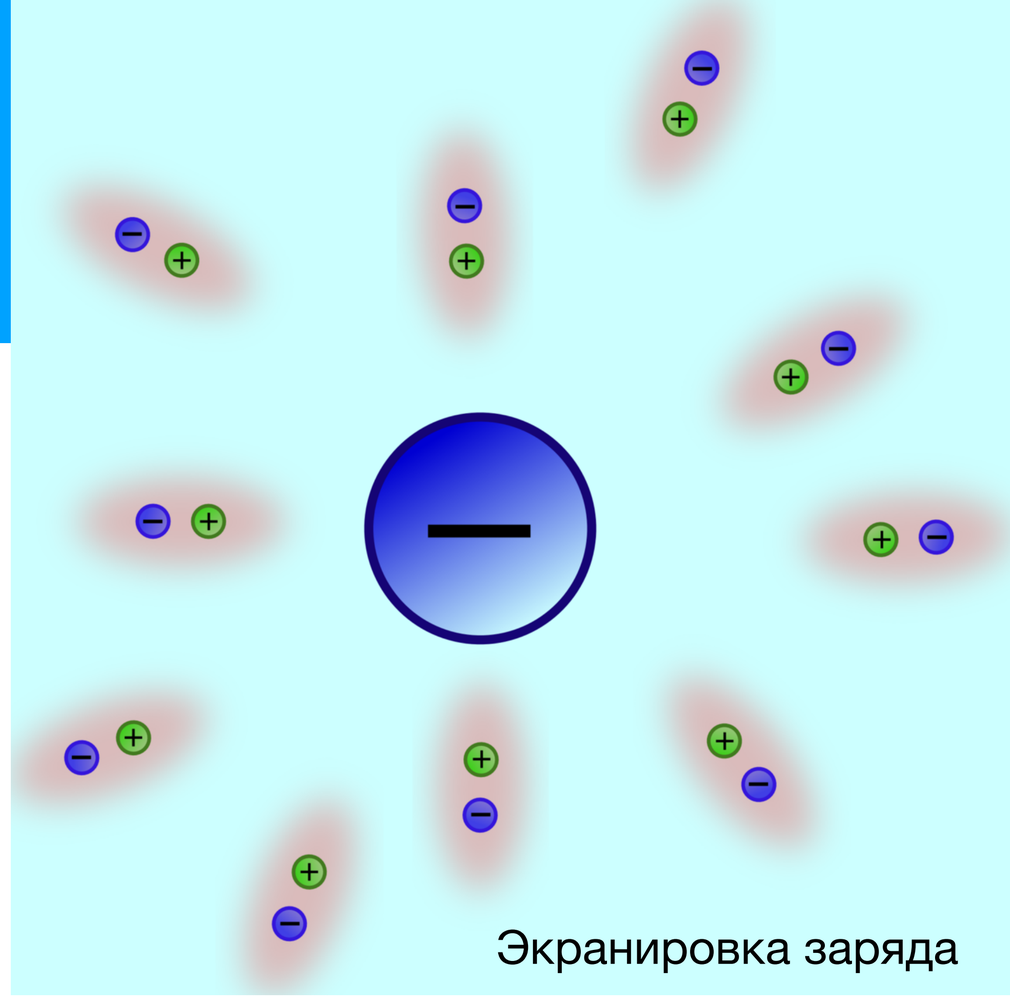
Объединение сильных и электрослабых взаимодействий

Бегущие константы в Стандартной Модели

Бегущие константы

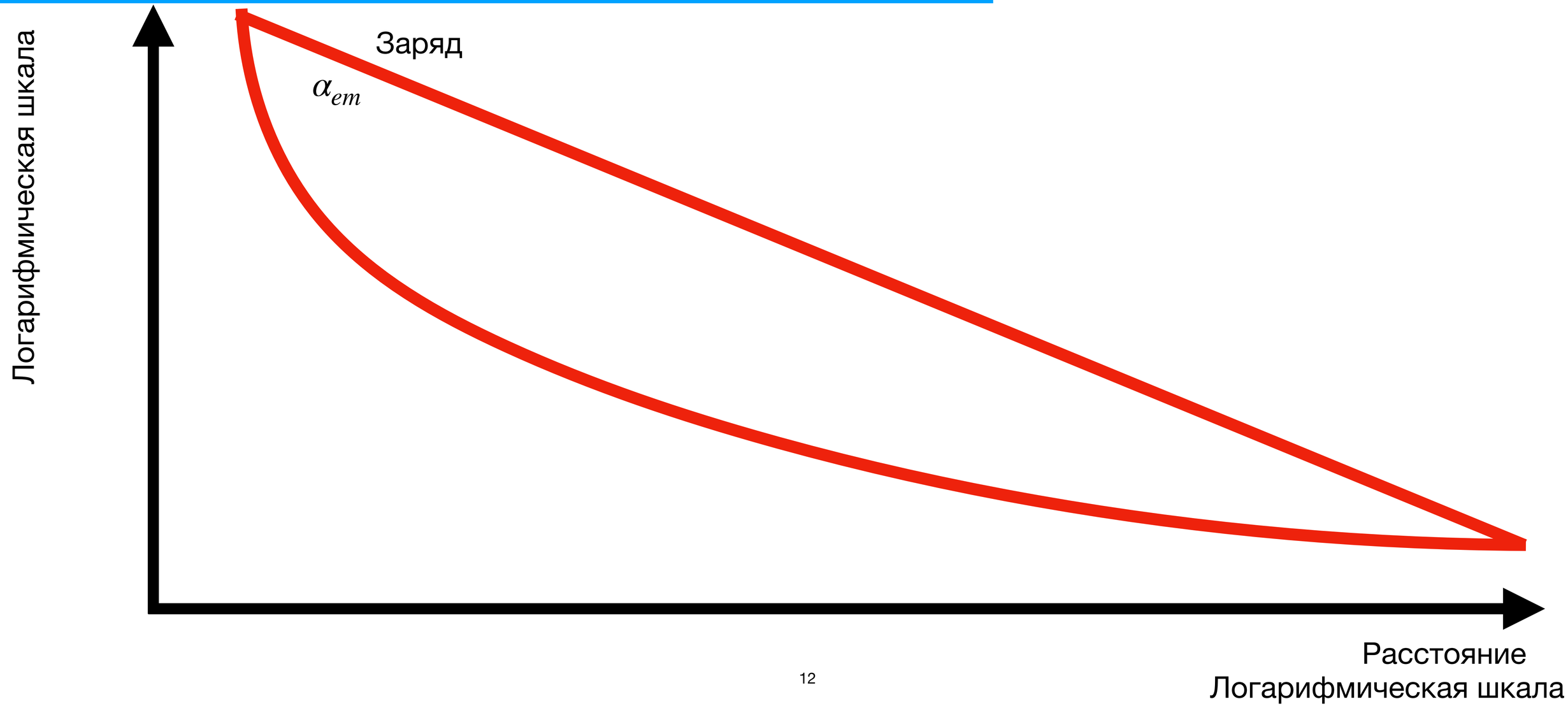
Напоминание из Лекции N2





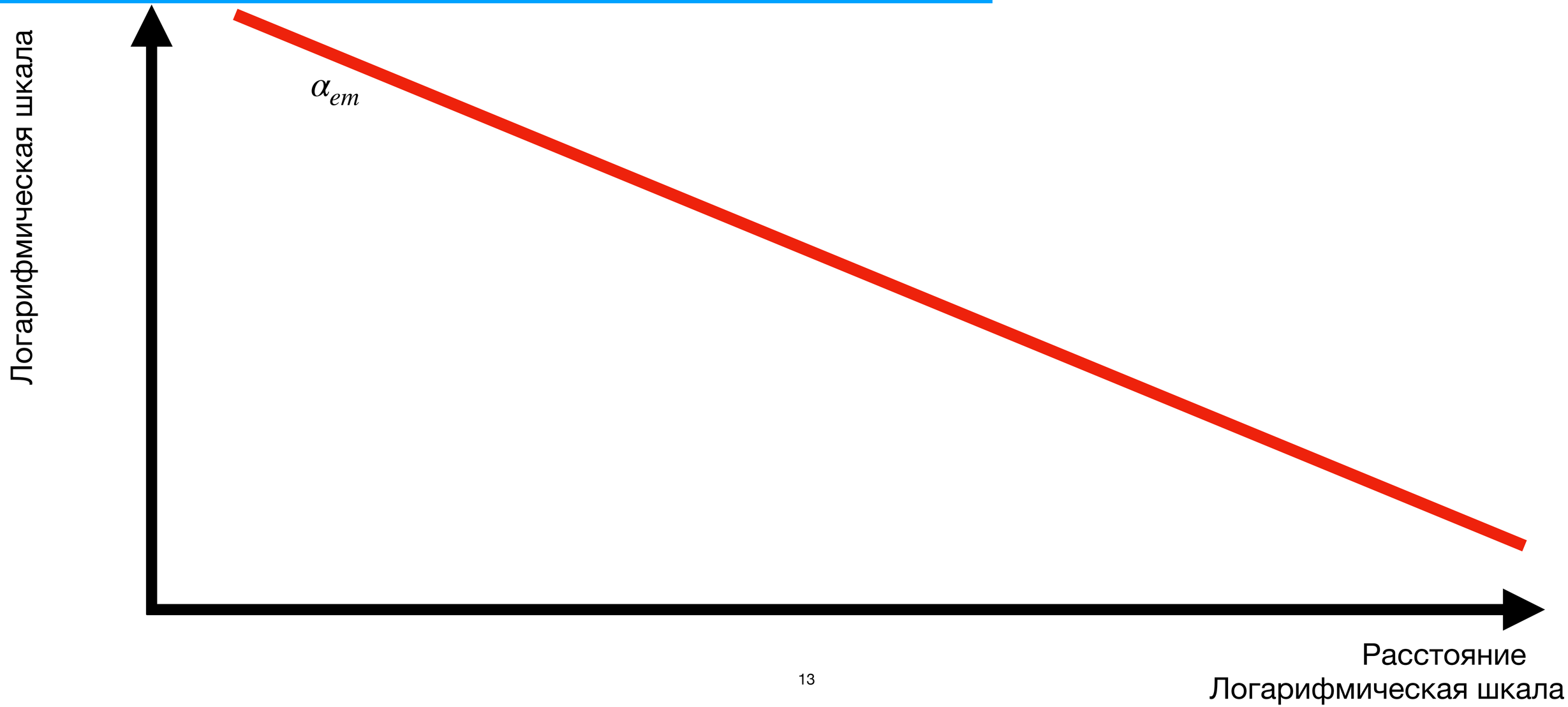
Бегущие константы

Логарифмические оси и переобозначение



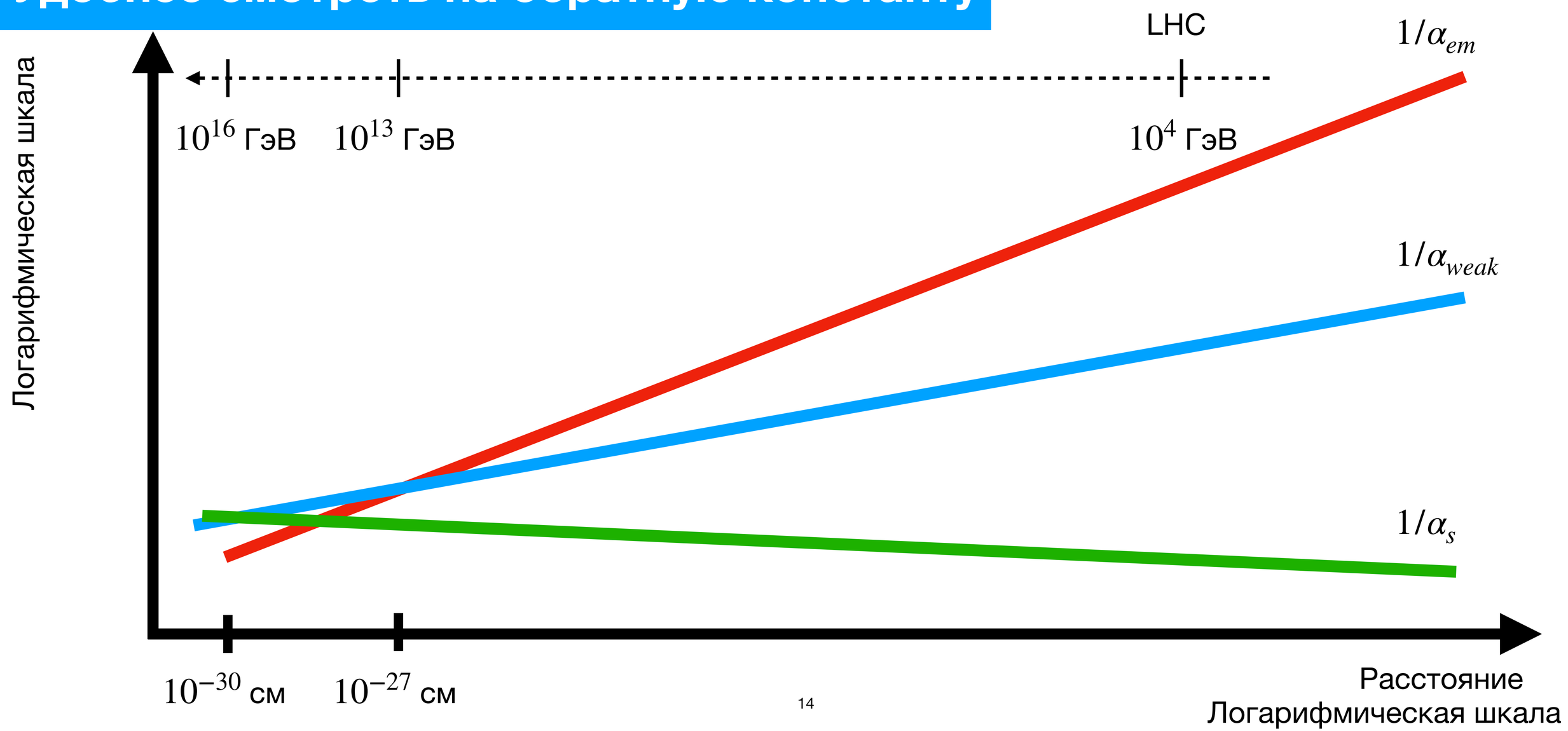
Бегущие константы

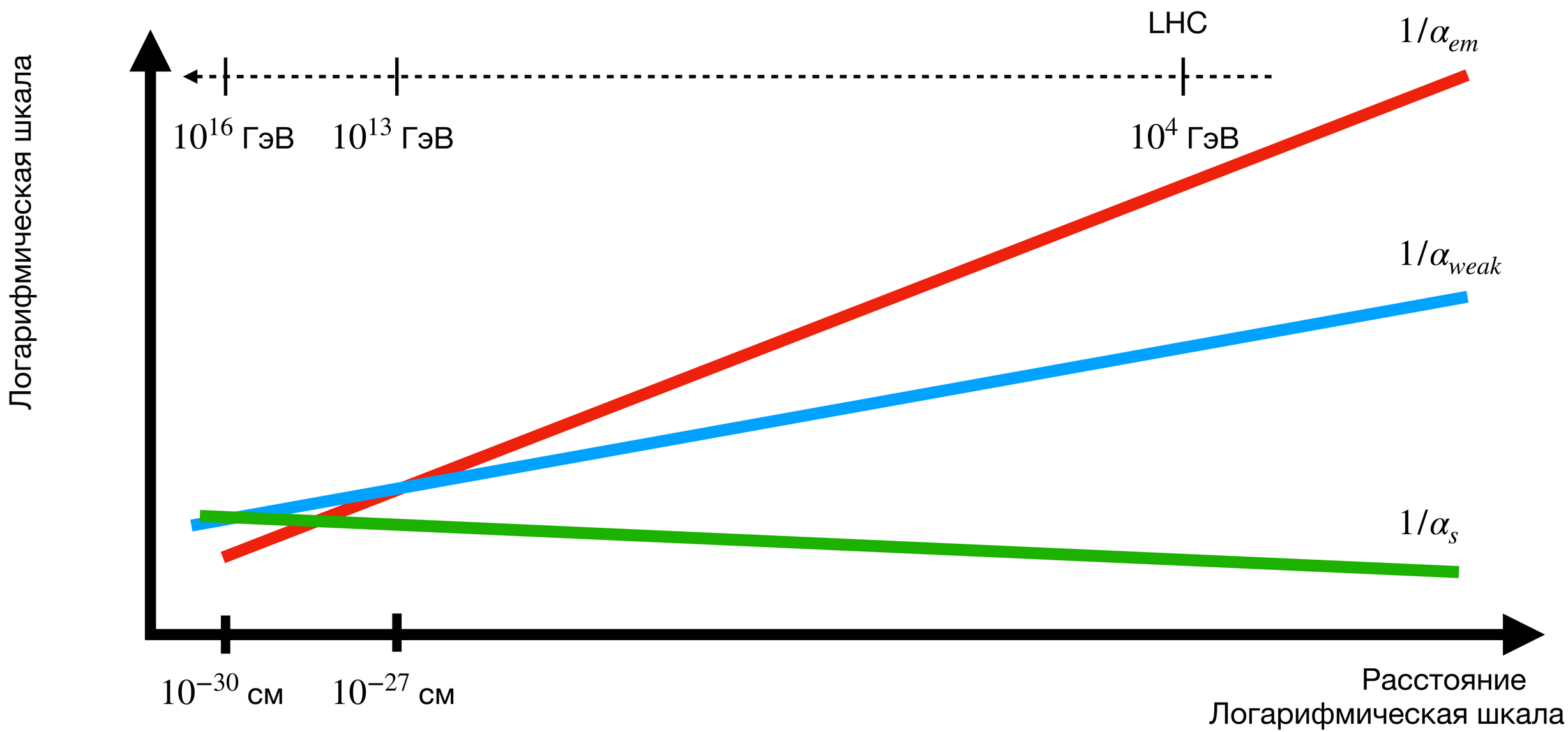
Удобнее смотреть на обратную константу



Бегущие константы

Удобнее смотреть на обратную константу




LHC
$1/\alpha_{em}$
10^{16} ГэВ
10^{13} ГэВ
10^{4} ГэВ
$1/\alpha_{weak}$
$1/\alpha_{s}$
Логарифмическая шкала
10^{-30} см
10^{-27} см
Расстояние
Логарифмическая шкала

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**

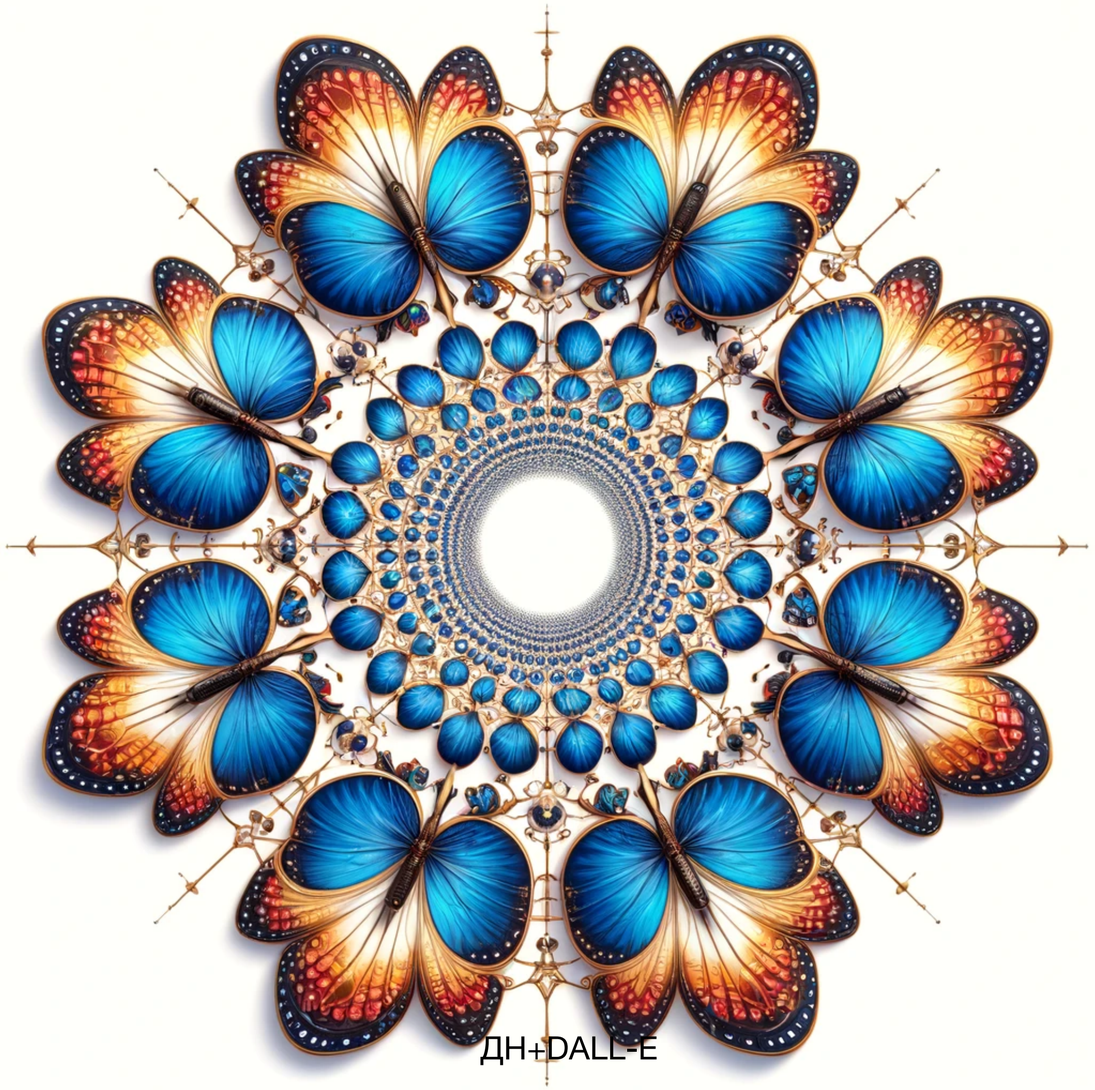
  — в которой есть один «заряд» и одно взаимодействие

  — 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!



ДН+DALL-E

Рассмотрим модель Глэшоу-Джорджи $SU(5)$

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

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

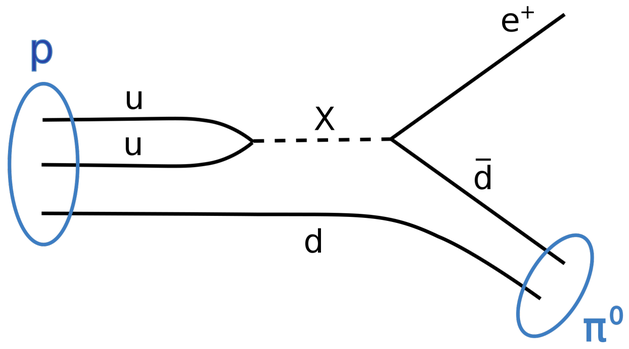
- **24 переносчика взаимодействия**

  — На 12 больше, чем в СМ

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

  — У них есть и сильные заряды

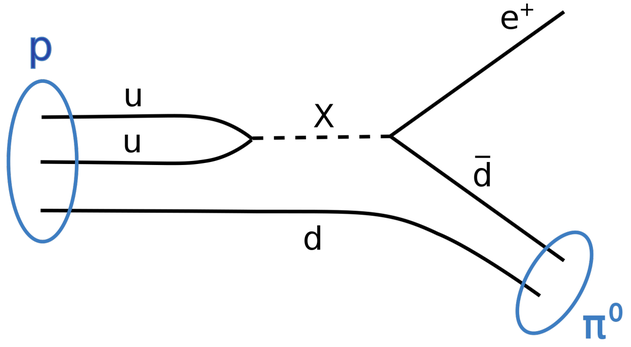
  — Предсказывается распад протона



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**

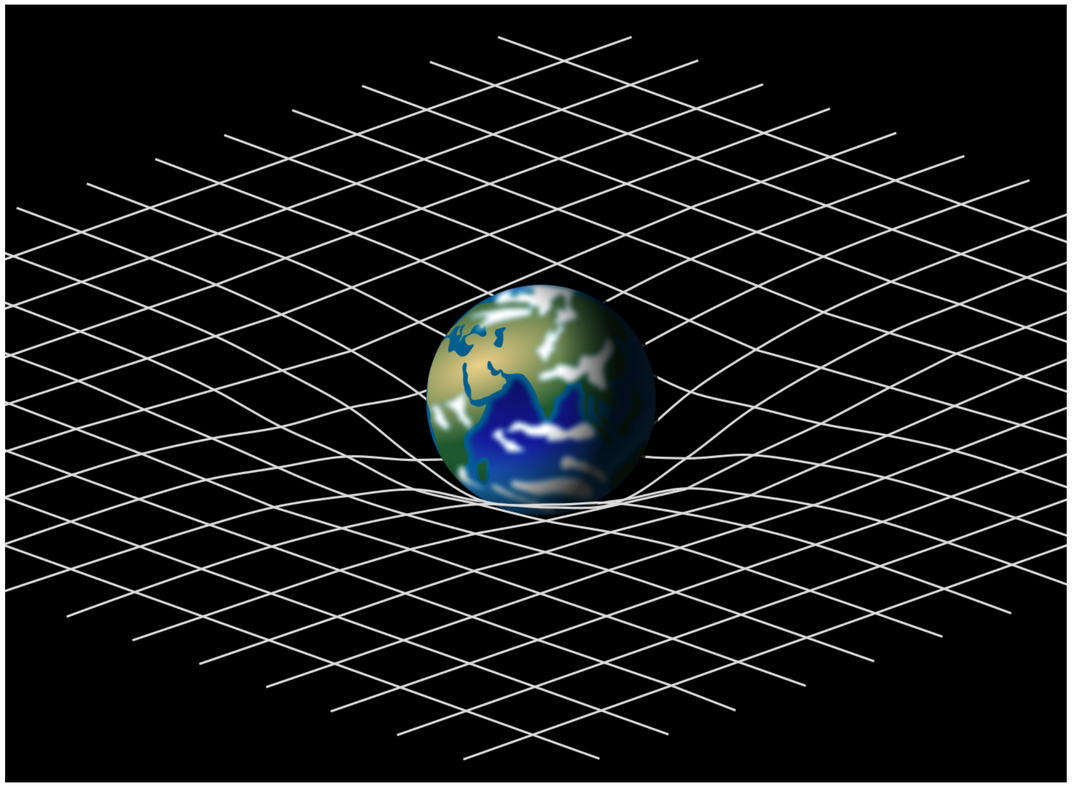
  —Объединение происходит на масштабах энергий, много больших фазового перехода в СМ

  —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

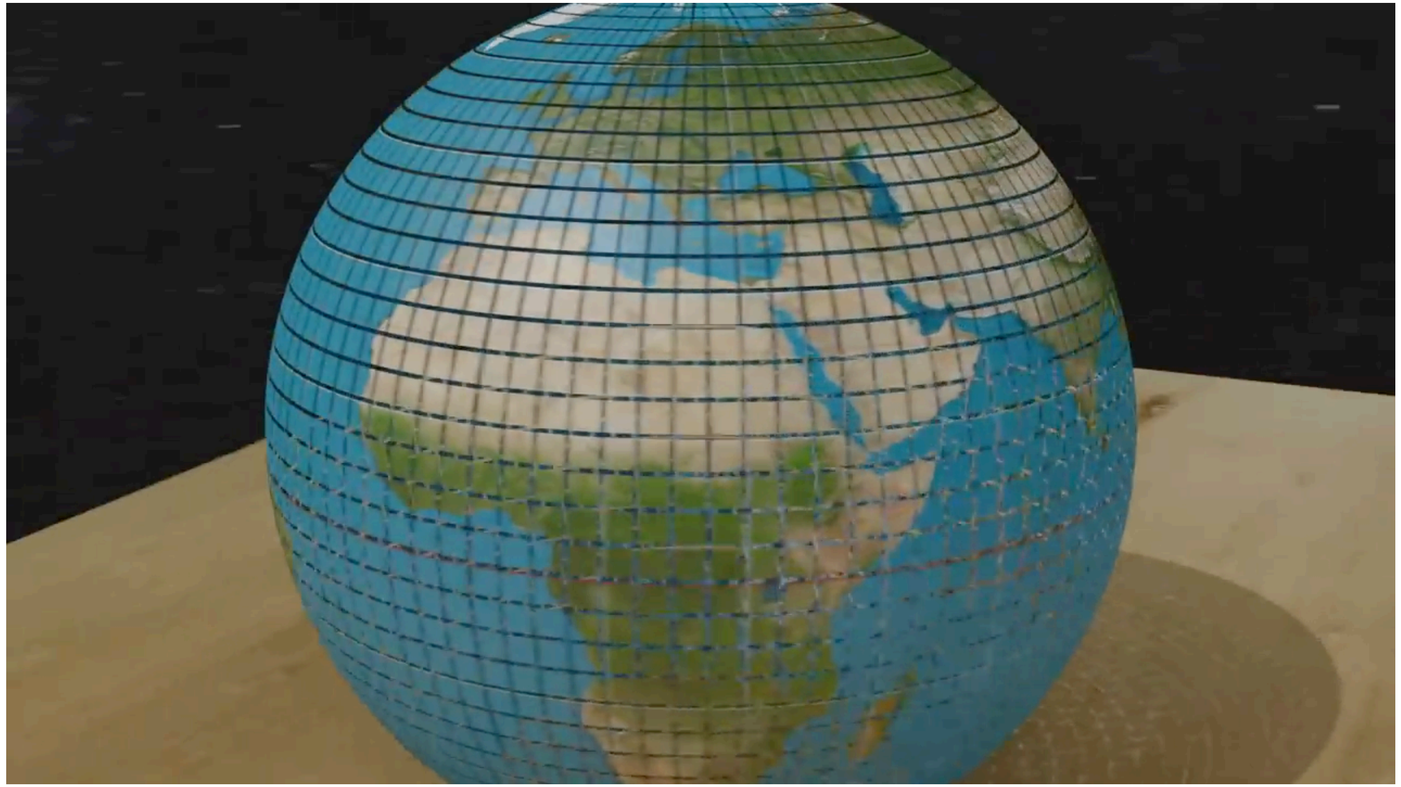
- ↪ Длина $\sim 10^{-33}$см
- ↪ Масса $\sim 10^{-5}$ г
- ↪ Время $\sim 10^{-44}$ секунды



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

Адаптировано из Dialect

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)

Фото из sciencephoto

Одна проблема. Наш мир:

3+1=4

Оскар Клейн:

$$4+1= 4.00000000\ldots1$$

Теория Калуца-Клейна

Оскар Клейн

Теодор Калуца

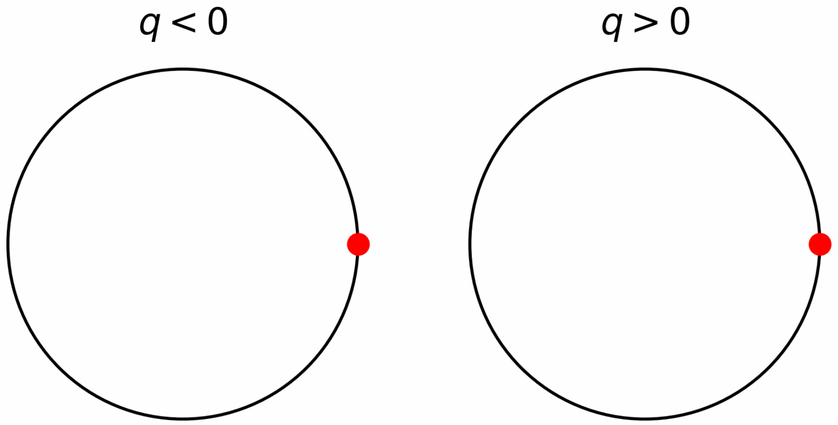
- **В 1926 Клейн предположил, что пятое измерение очень маленькое**

  —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

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

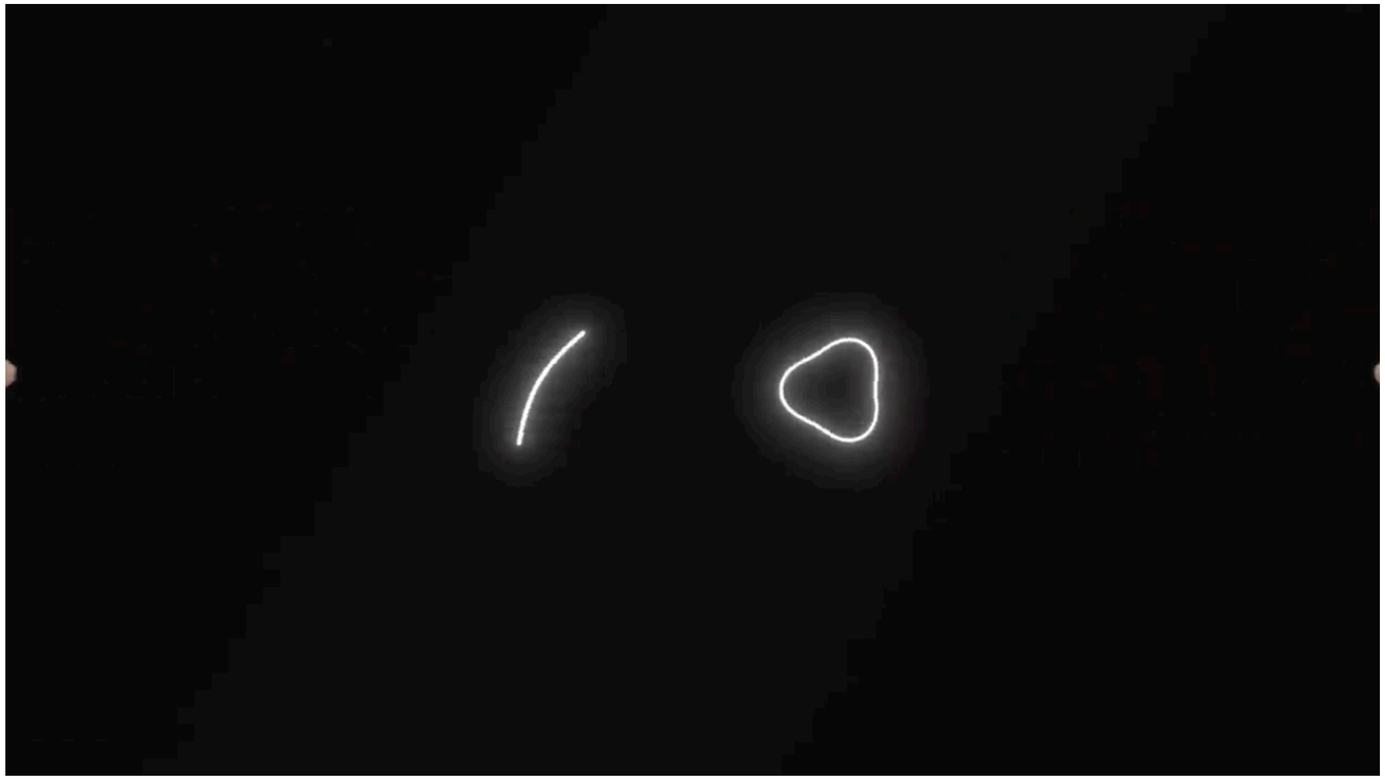
—Вместо (почти) точечных частиц струны планковского масштаба $\sim 10^{-33}$см

— Струны открытые и замкнутые

— У струны есть длина и натяжение

— Струны вибрируют

— Частоты (ноты) и форма вибраций определяют массы и спин частиц



Адаптировано из ScienceClick

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

Адаптировано из ScienceClick

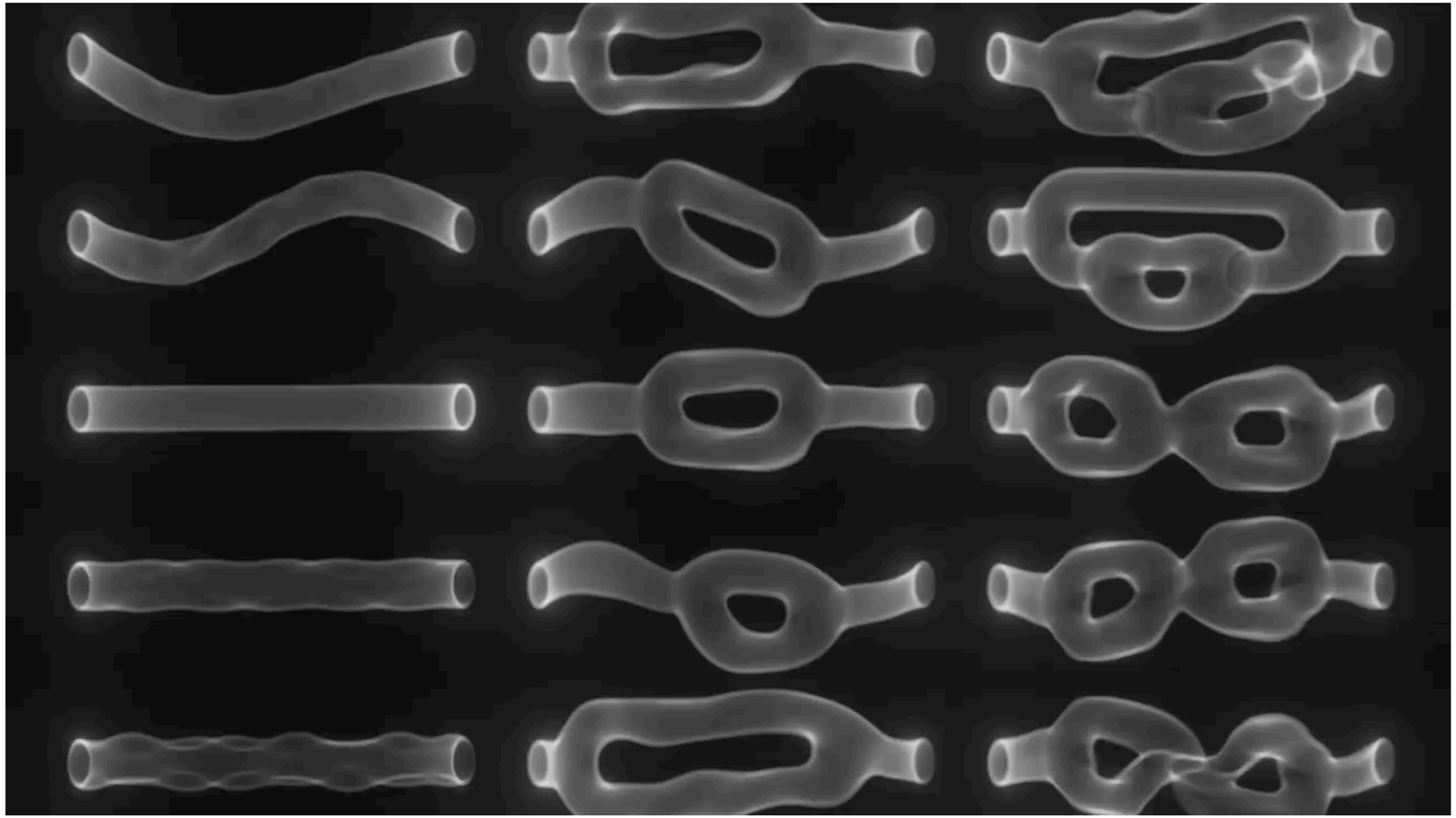
Гармонии Вселенной. Струнная симфония

Взаимодействия струн

— Диаграммы Фейнмана становятся объемными

— В силу топологии диаграмм, из них исчезают бесконечности!

— Включение гравитона в квантовую теорию больше не проблема



Адаптировано из ScienceClick

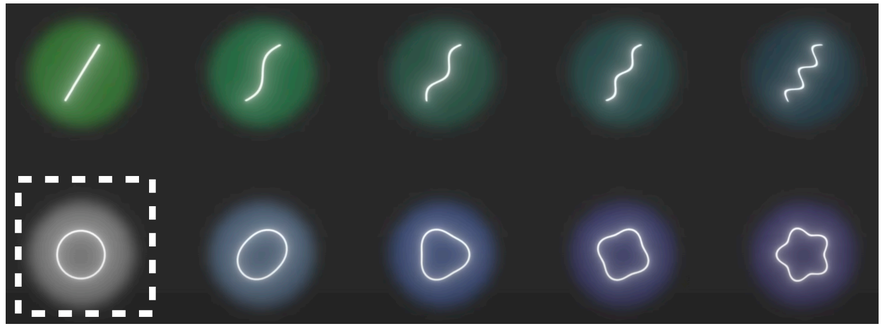
Теория струн

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



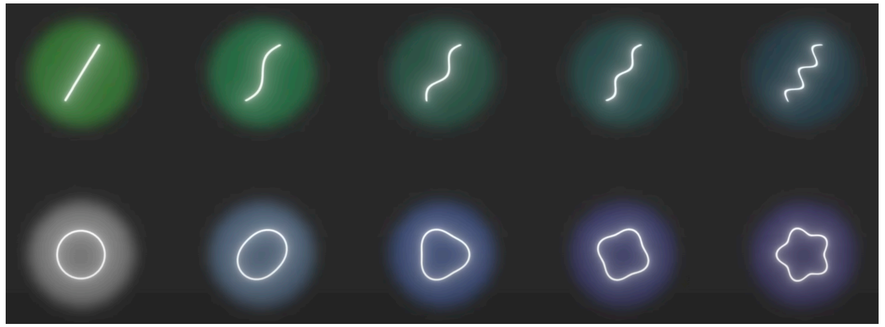
- Предсказывает, что они должны взаимодействовать друг с другом

- Включает квантовое описание гравитации

Адаптировано из ScienceClick

К этому слайду теория струн выглядит перспективной

- Объясняет почему существуют различные частицы



- Предсказывает, что они должны взаимодействовать друг с другом

- Включает квантовое описание гравитации

Адаптировано из ScienceClick

Но есть три проблемы ...

Три проблемы теории струн

- **Все струны бозоны (частицы с целым спином).**
  — Нет фермионов (частицы с ~~полуголым~~ полуцелым спином). А это вся материя Вселенной

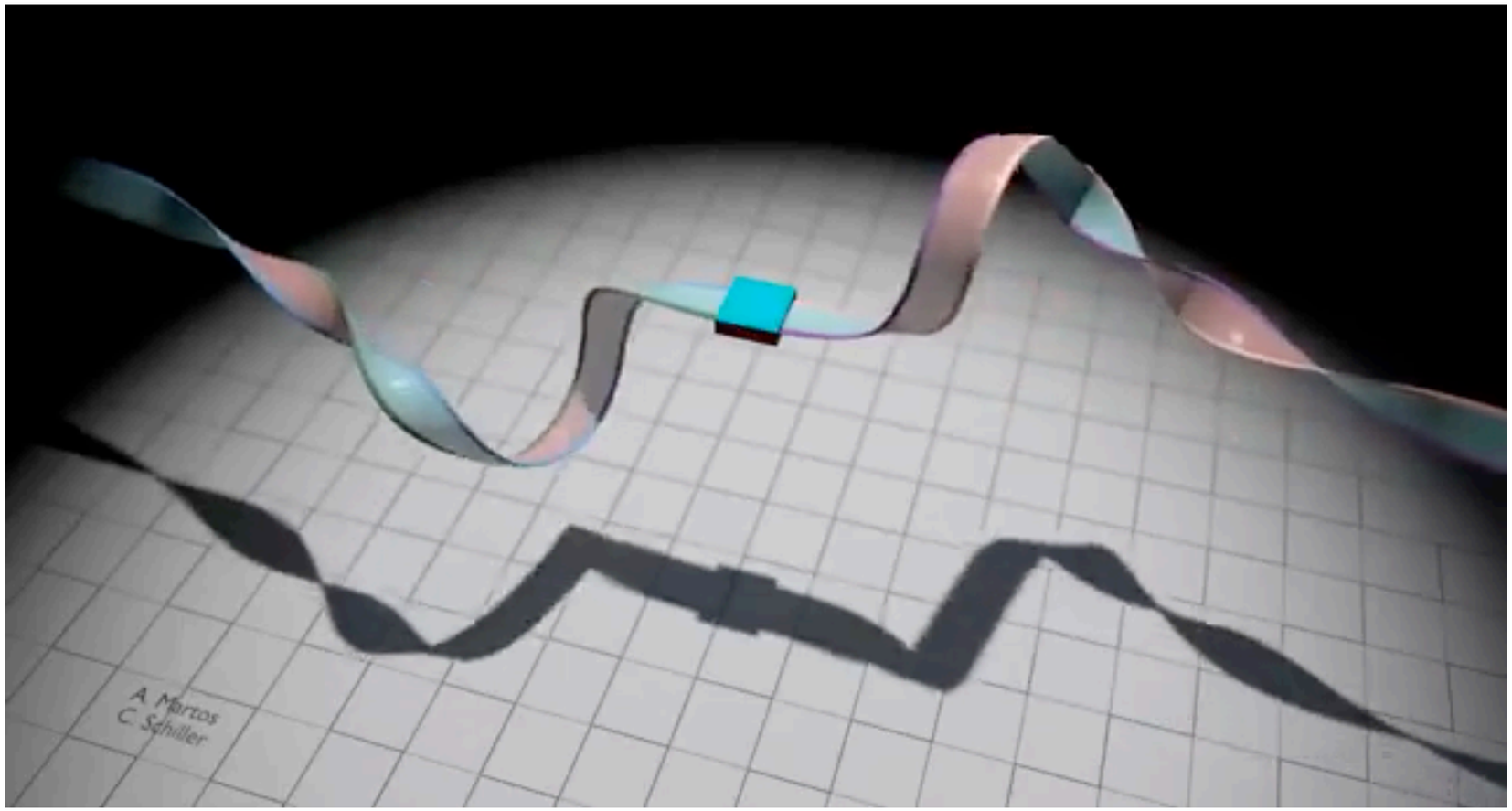
- **Теория предсказывает тахион**
  — Частица с мнимой массой $m \sim \sqrt{-1}$ и сверхсветовой скоростью

- **Теория внутренне непротиворечива только в $D = 26$**
  — Размерность пространства-времени = 26

Но что такое фермион?

Внимание! Эксперимент!

Трюк Дирака

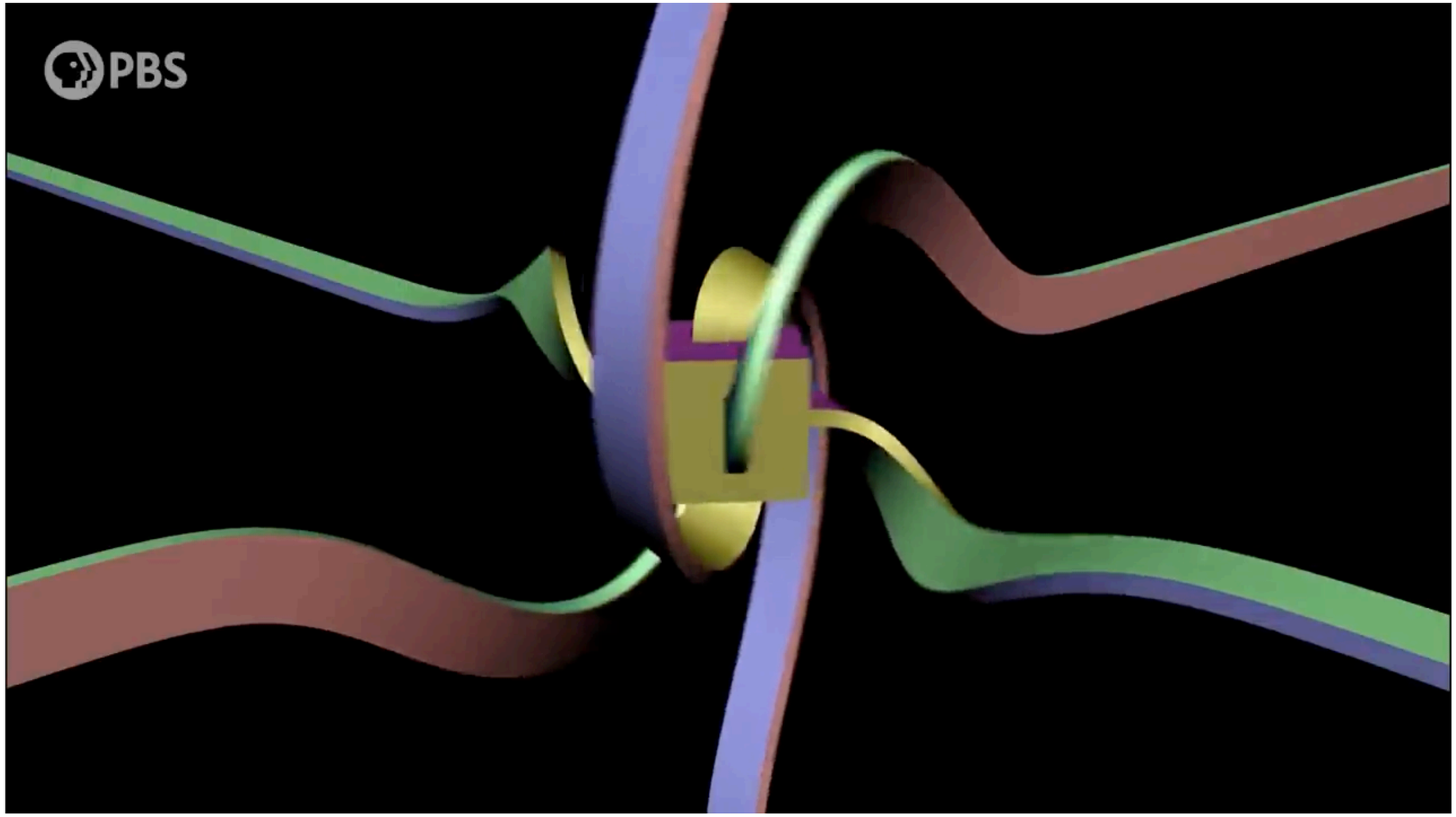


Адаптировано из De la Torre

Механическая аналогия для фермиона

Оборот на 720 градусов возвращает систему к прежнему состоянию

Кубик/шарик может крутиться бесконечно долго и никогда не запутается

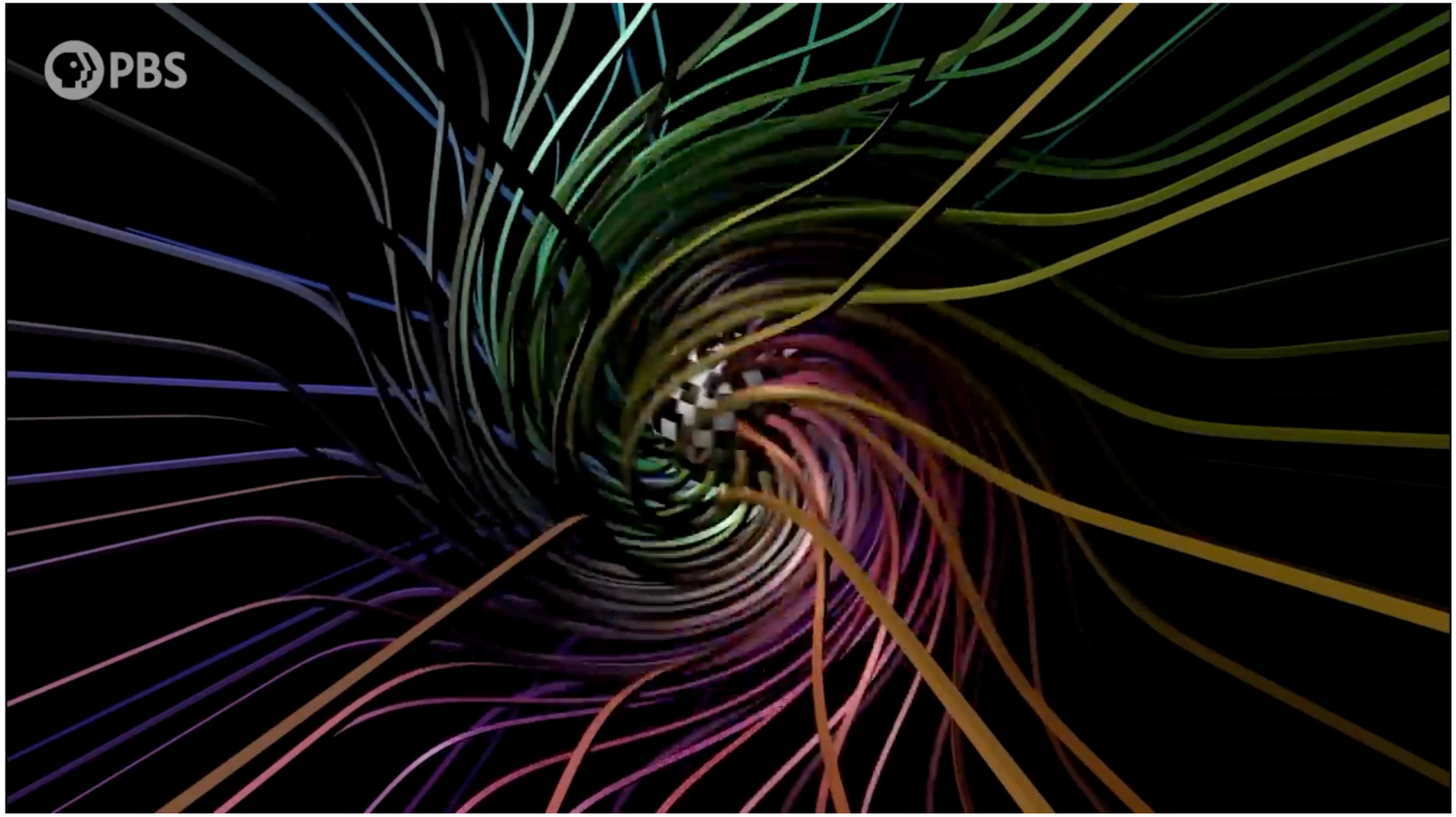


Адаптировано из PBS

Механическая аналогия для фермиона

Оборот на 720 градусов возвращает систему к прежнему состоянию

Кубик/шарик может крутиться бесконечно долго и никогда не запутается



Адаптировано из PBS

Целый и полуцелый спины

Качественная картинка

Целый спин

Спин 1/2

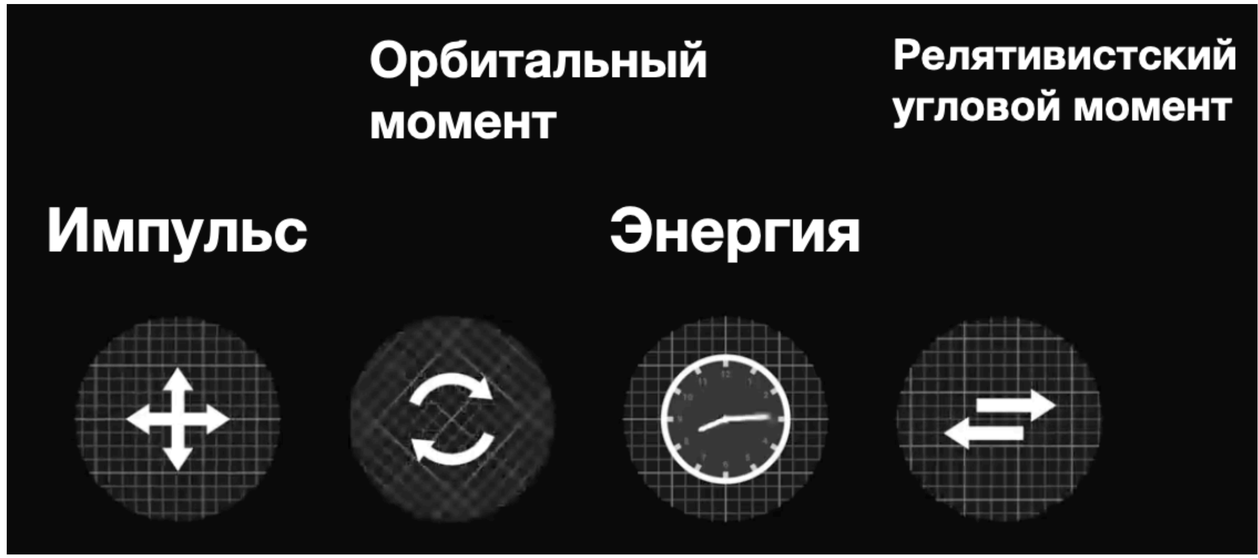
СУПЕРСИММЕТРИЯ

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 ↔ бозон**

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

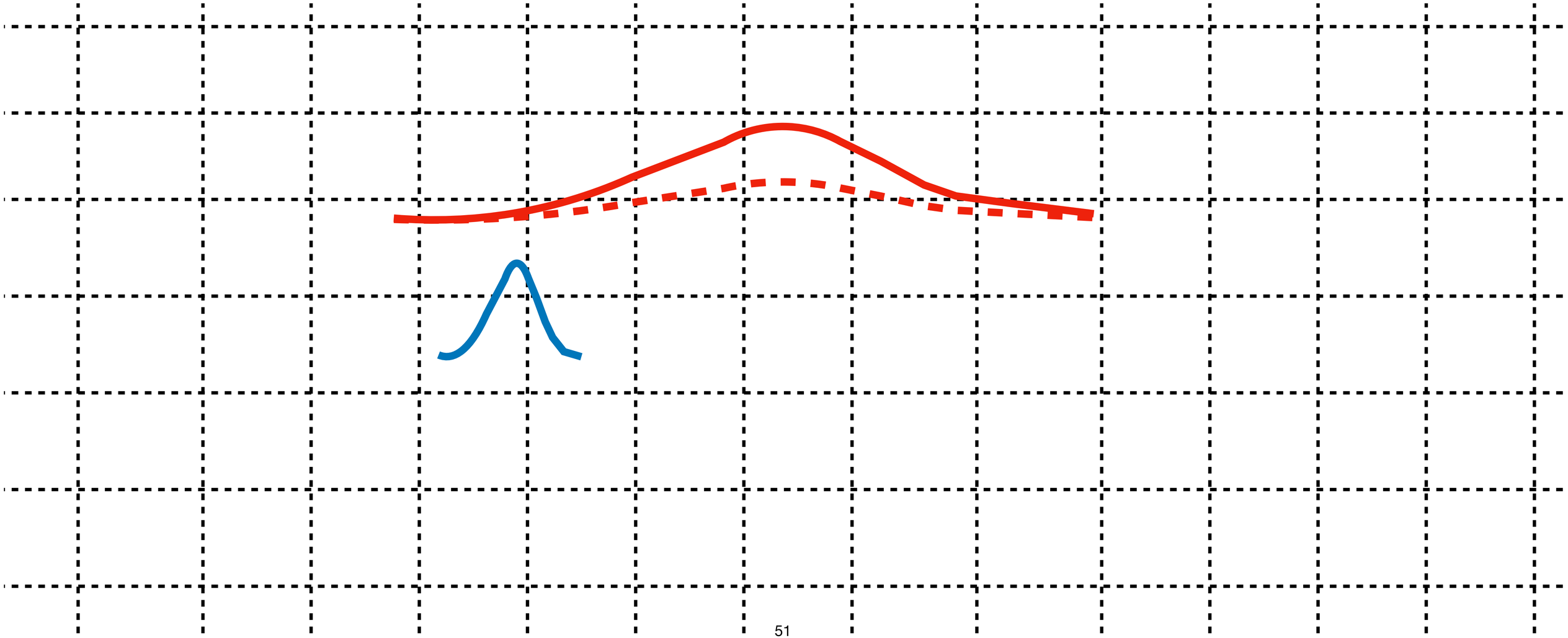
Частица	Суперпартнер
Электрон Спин = 1/2	сэлектрон Спин = 0
Фотон Спин = 1/2	Фотино Спин = 1/2
Хиггс Спин = 0	Хиггсино Спин = 1/2

Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?

Фермионное поле

Бозонное поле

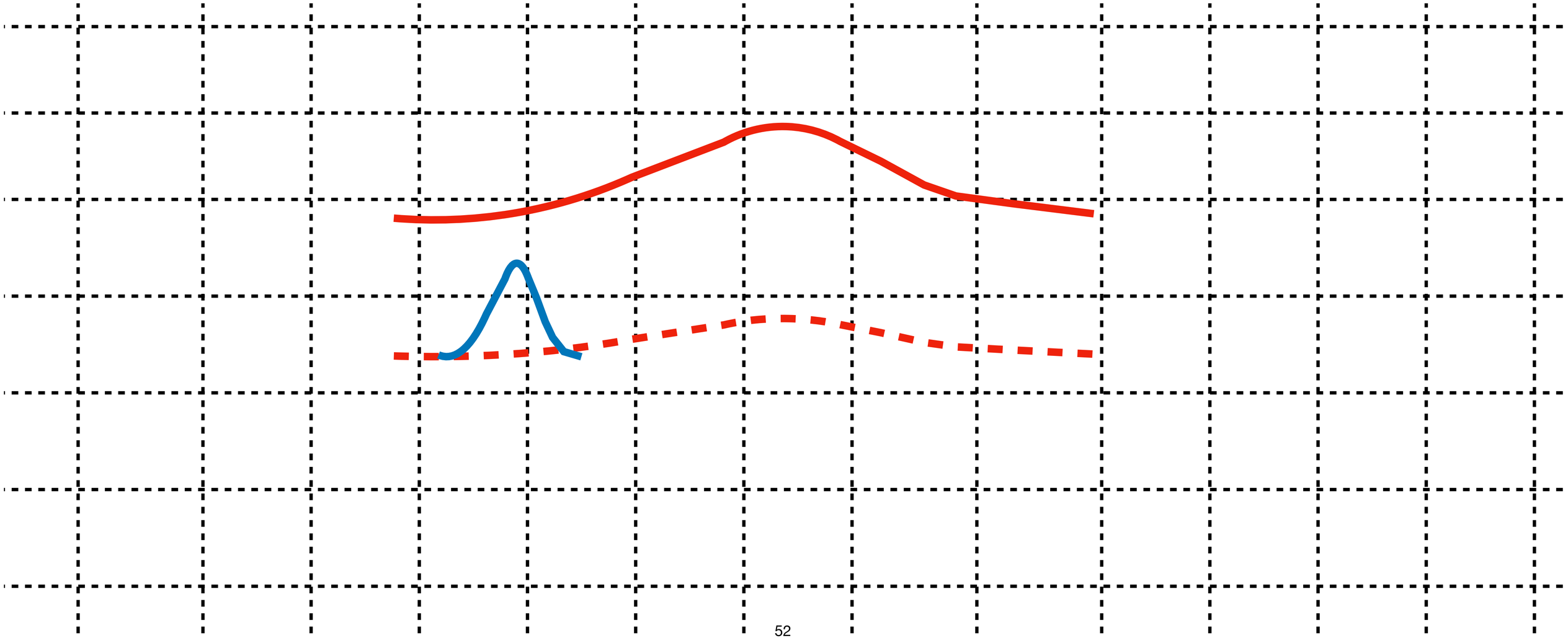


Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?

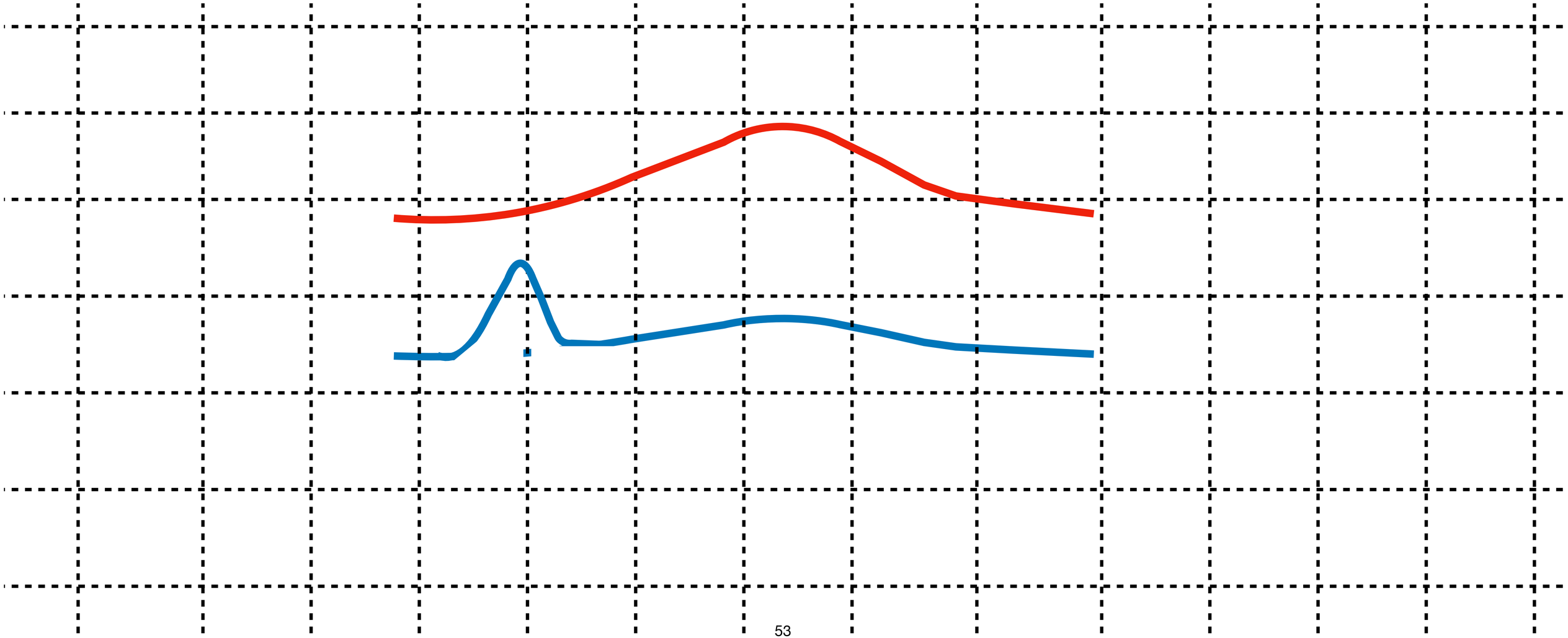
Фермионное поле

Бозонное поле



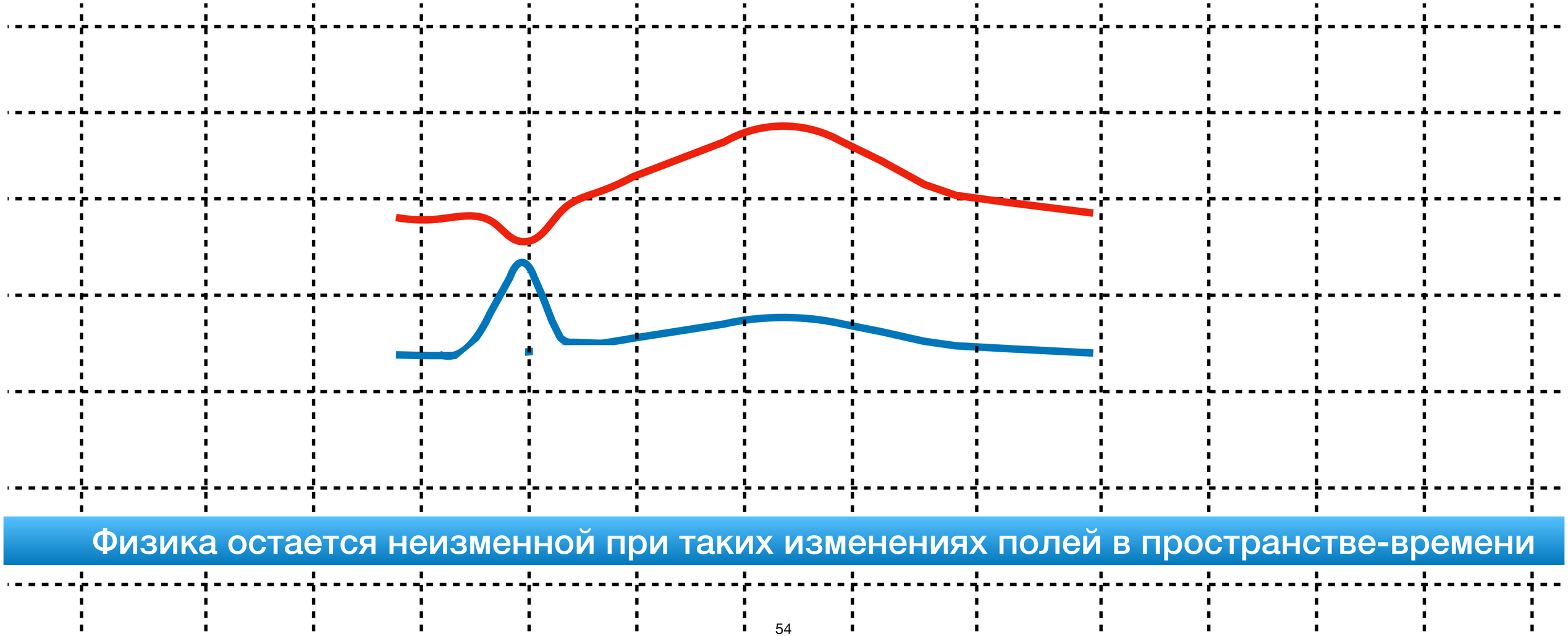
Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?



Суперсимметрия

Это симметрия пространства-времени



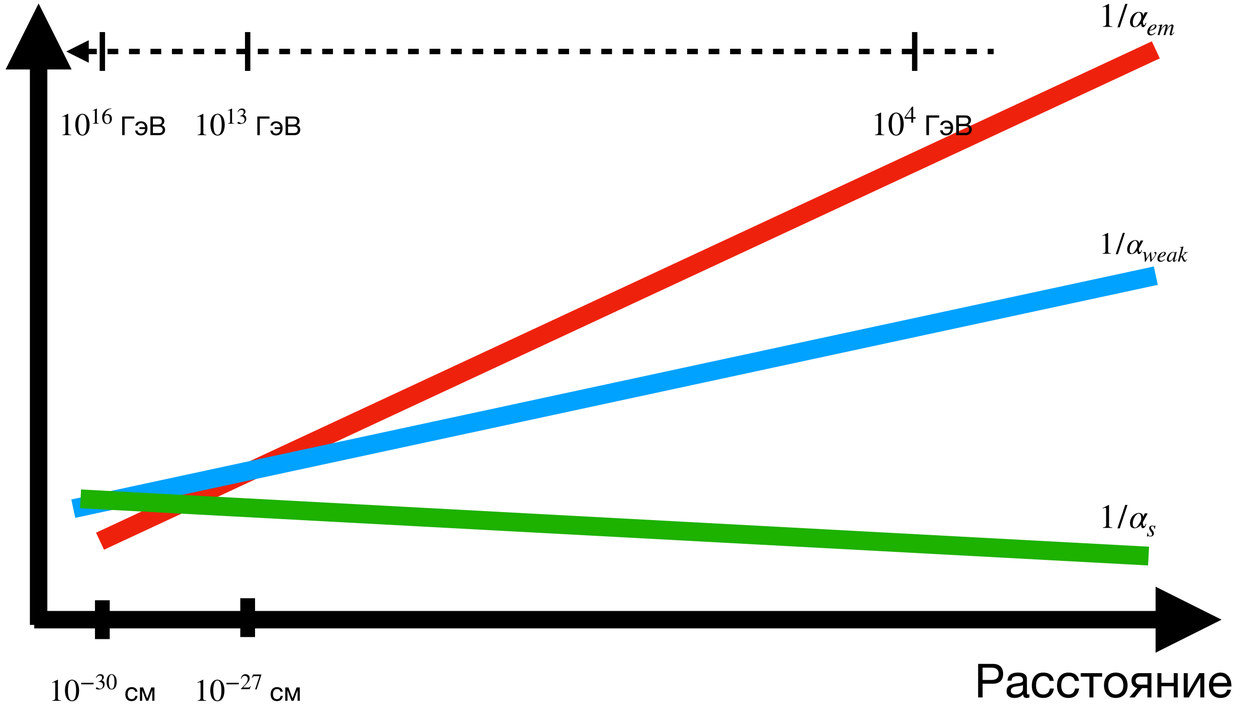
Физика остается неизменной при таких изменениях полей в пространстве-времени

Суперсимметричные надежды

Суперсимметричные надежды

- **Объединение элекрослабых и сильных взаимодействий**

Силы сходятся в одной точке!



Суперсимметричные надежды

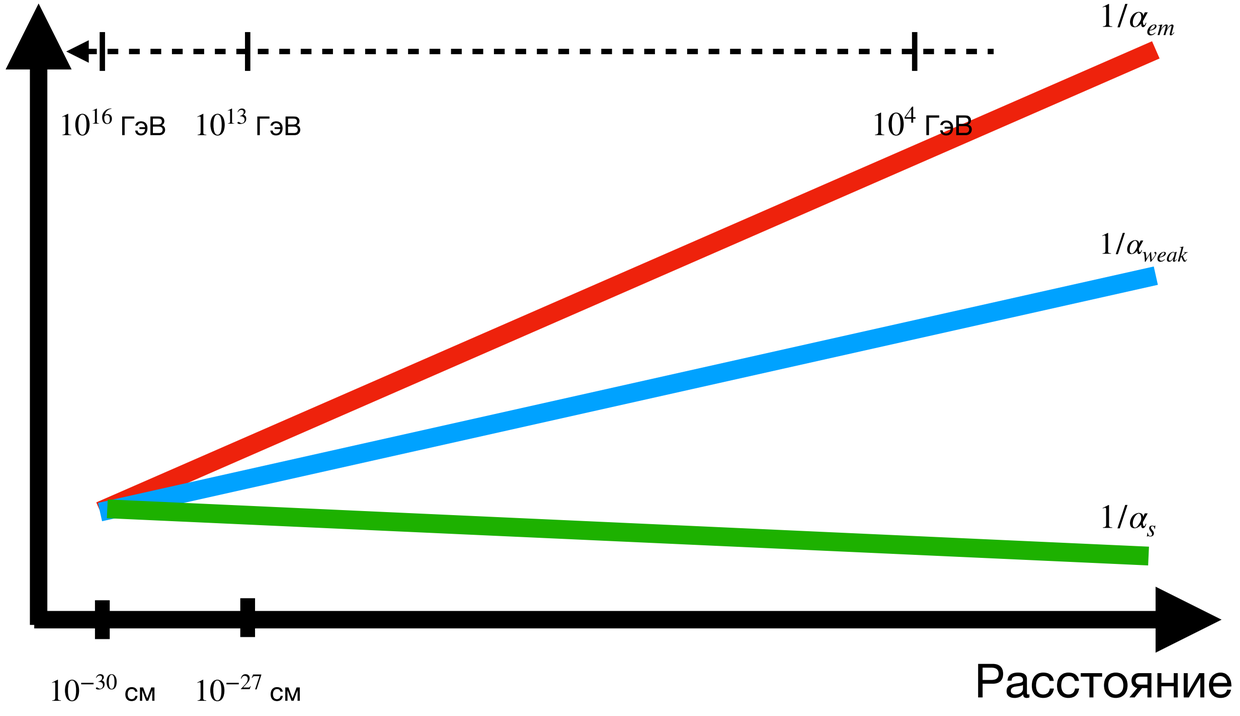
- **Объединение элекрослабых и сильных взаимодействий**

  — 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

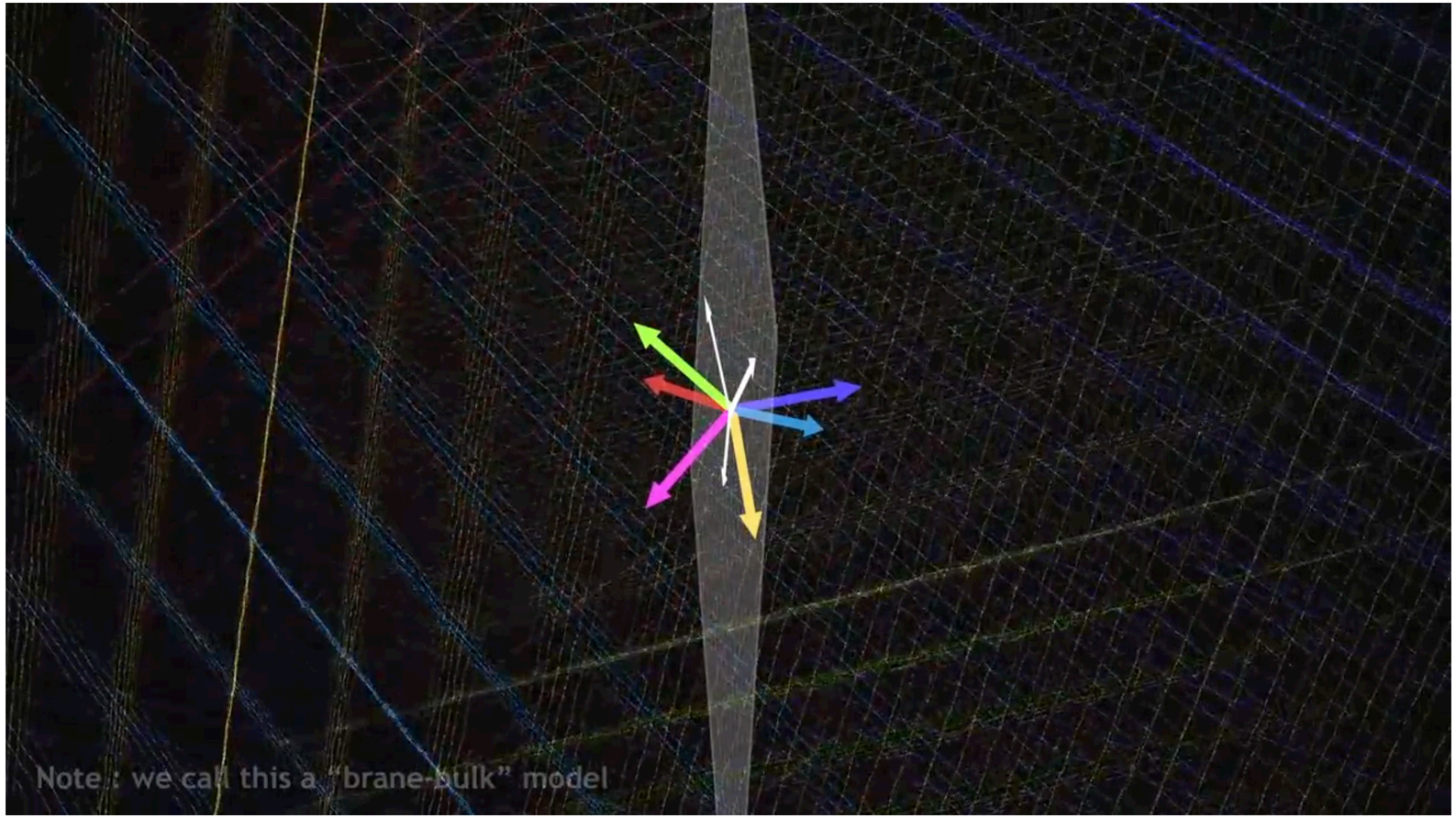
- **Теория внутренне непротиворечива только в $D = 26$**

  — Размерность пространства-времени = 10

Где остальные 6 измерений?

Две возможности

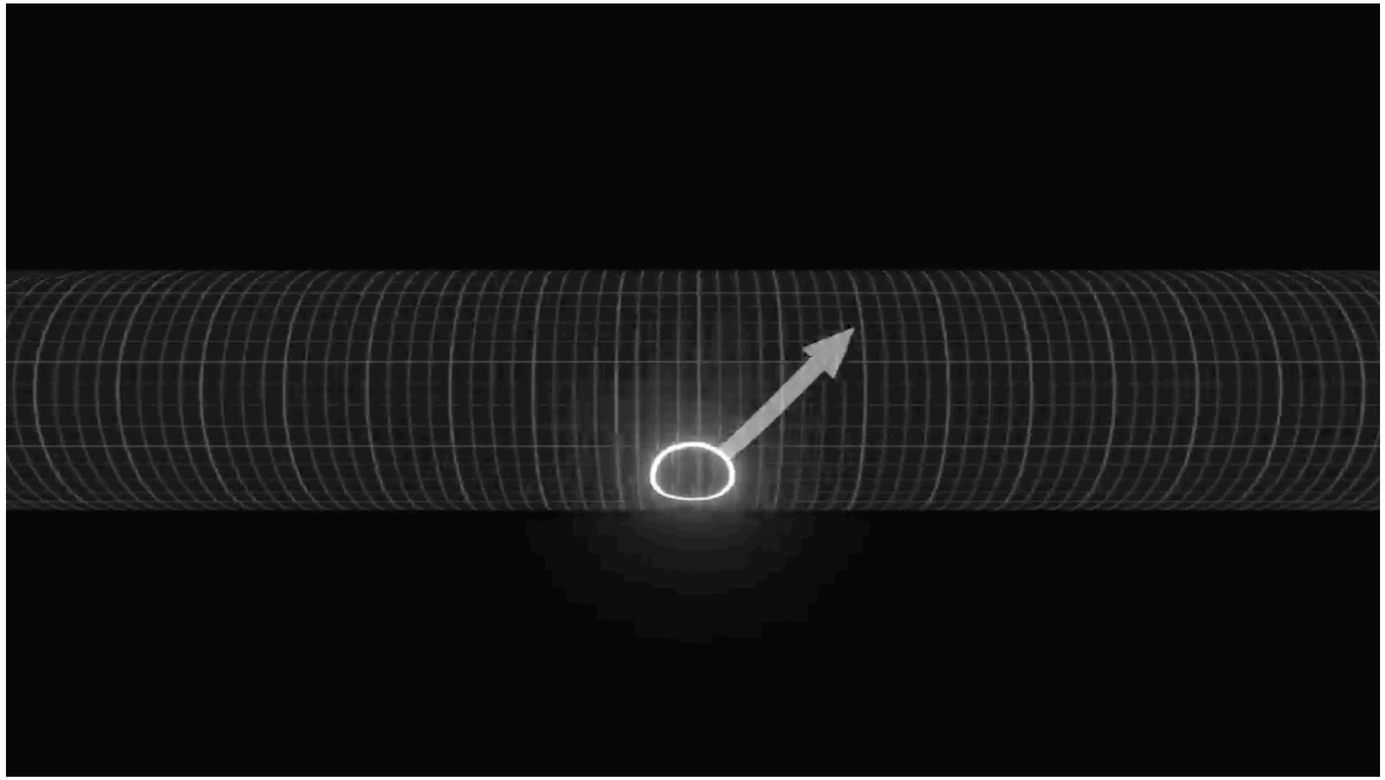
- Наше трехмерное пространство — срез 9-мерного



Адаптировано из ScienceClick

Две возможности

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



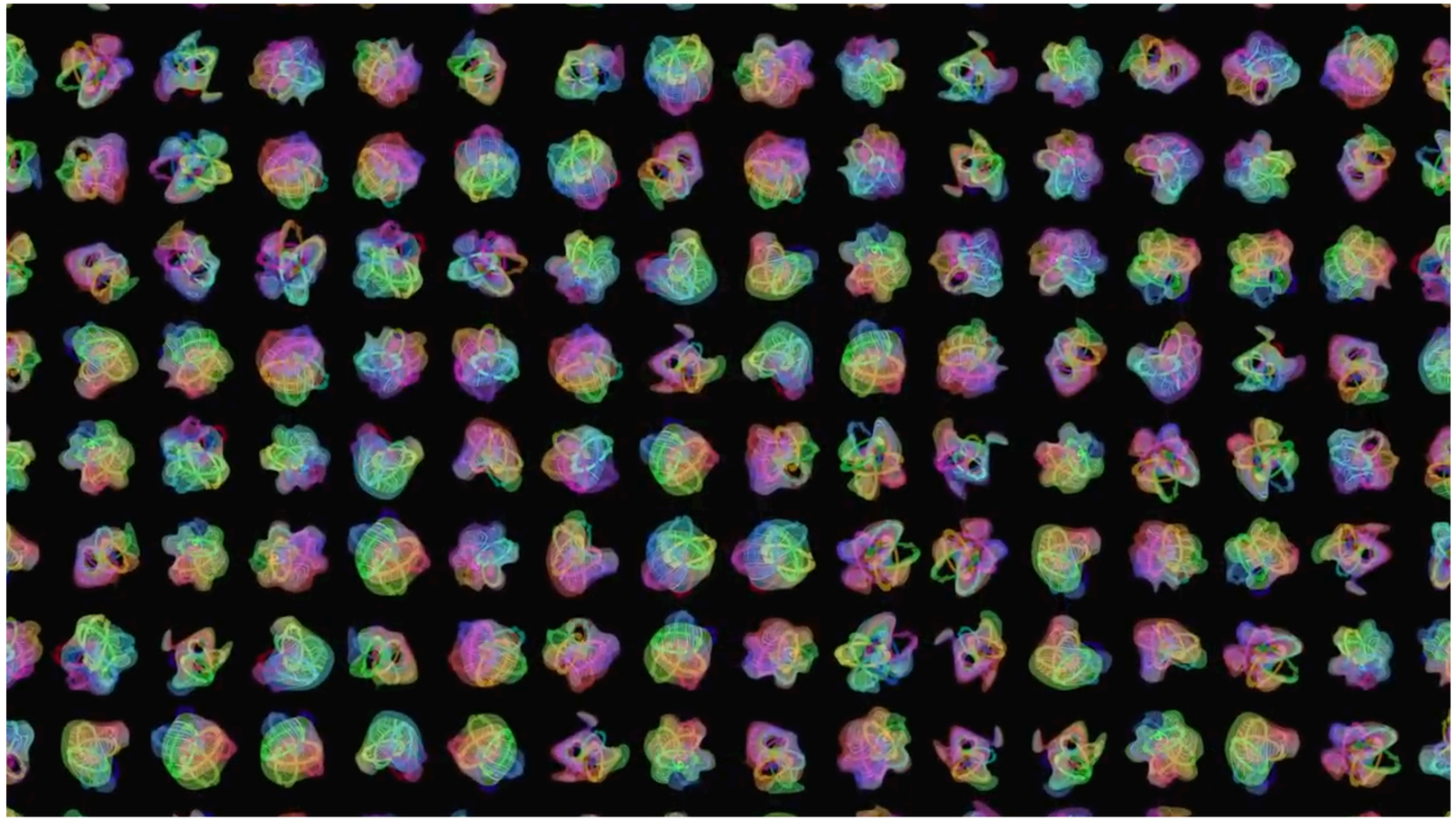
Адаптировано из ScienceClick

Как компактифицировать дополнительные измерения?

Огромное число способов

Оценка: 10^{500}

- **Многообразия Калаби-Яо**



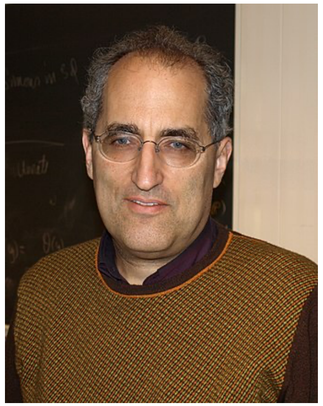
Адаптировано из ScienceClick

Краткая история теории суперструн

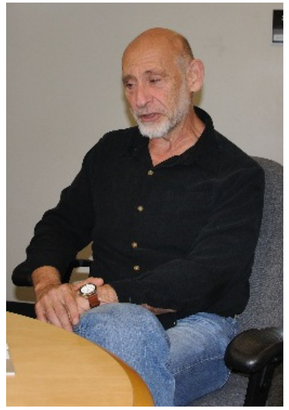
Краткая история суперструн

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 не найдена

Кризис теории струн

Петлевая квантовая теория гравитации

Революционная идея

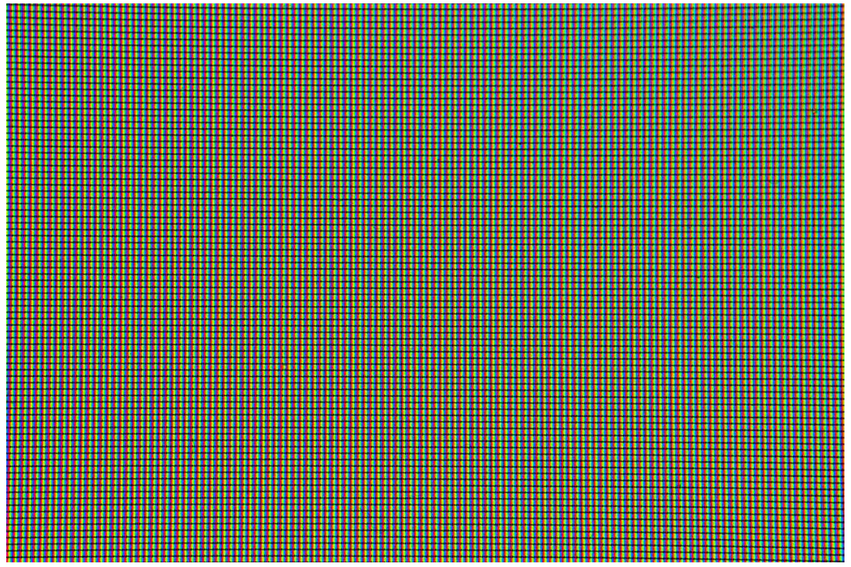
Пространство = квантовый объект

Абэй Аштекар

Карло Ровелли

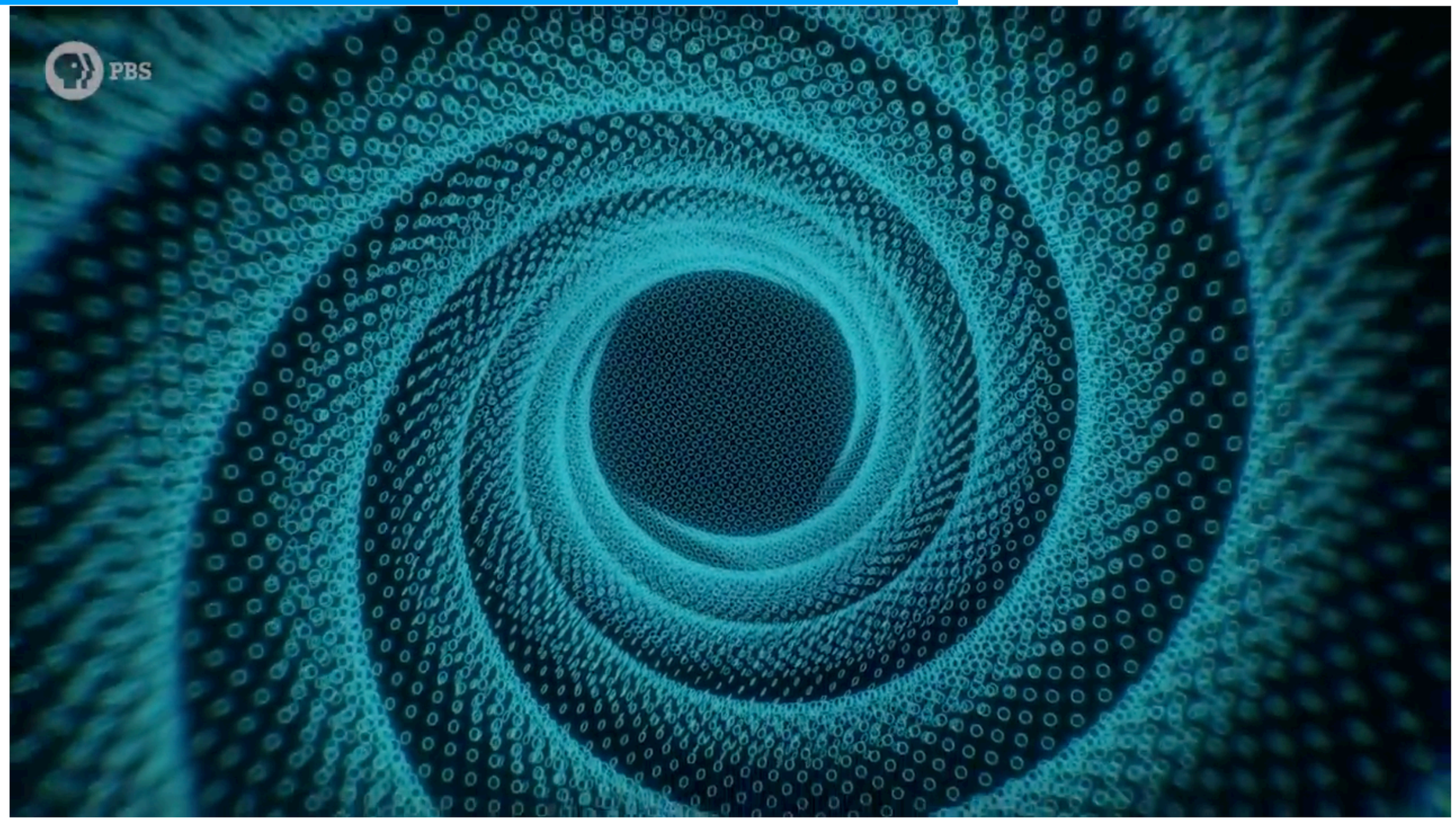
Ли Смолин

- 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



Петлевая гравитация

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

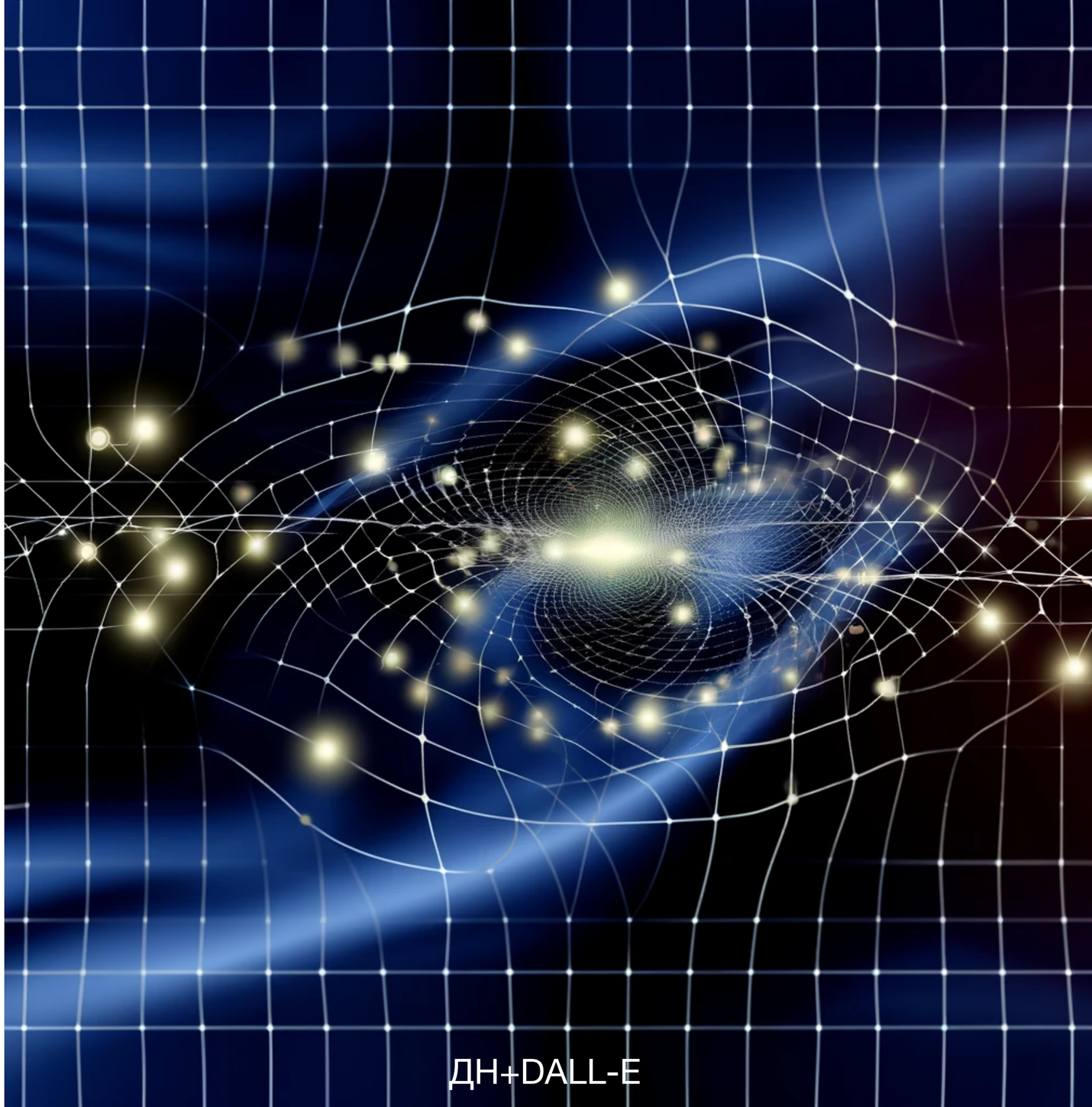


Адаптировано из PBS

Петлевая квантовая гравитация

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

ВРЕМЯ



Петлевая квантовая гравитация

Время

- Время — возникающее (эмерджентное) понятие

—Цепочке квантовых взаимодействий можно поставить в соответствие цепочку смежных областей пространства-времени

Фабрика Вселенной

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?