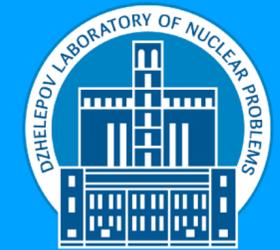
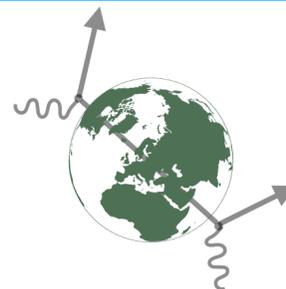


Мини-курс лекций для молодых ученых



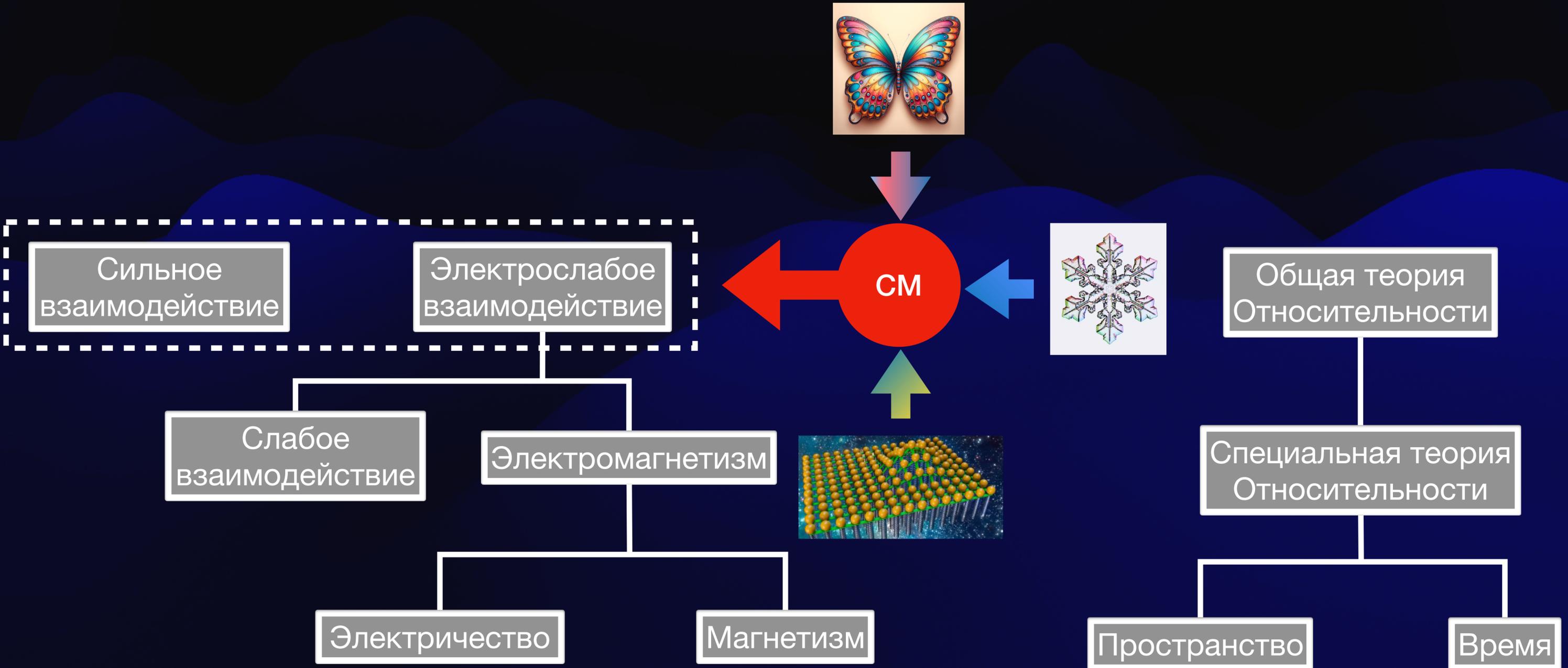
От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

Дмитрий В.Наумов



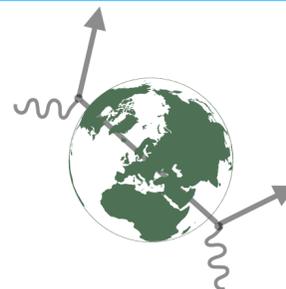
Первые три лекции ...

Физическая картина мира сегодня



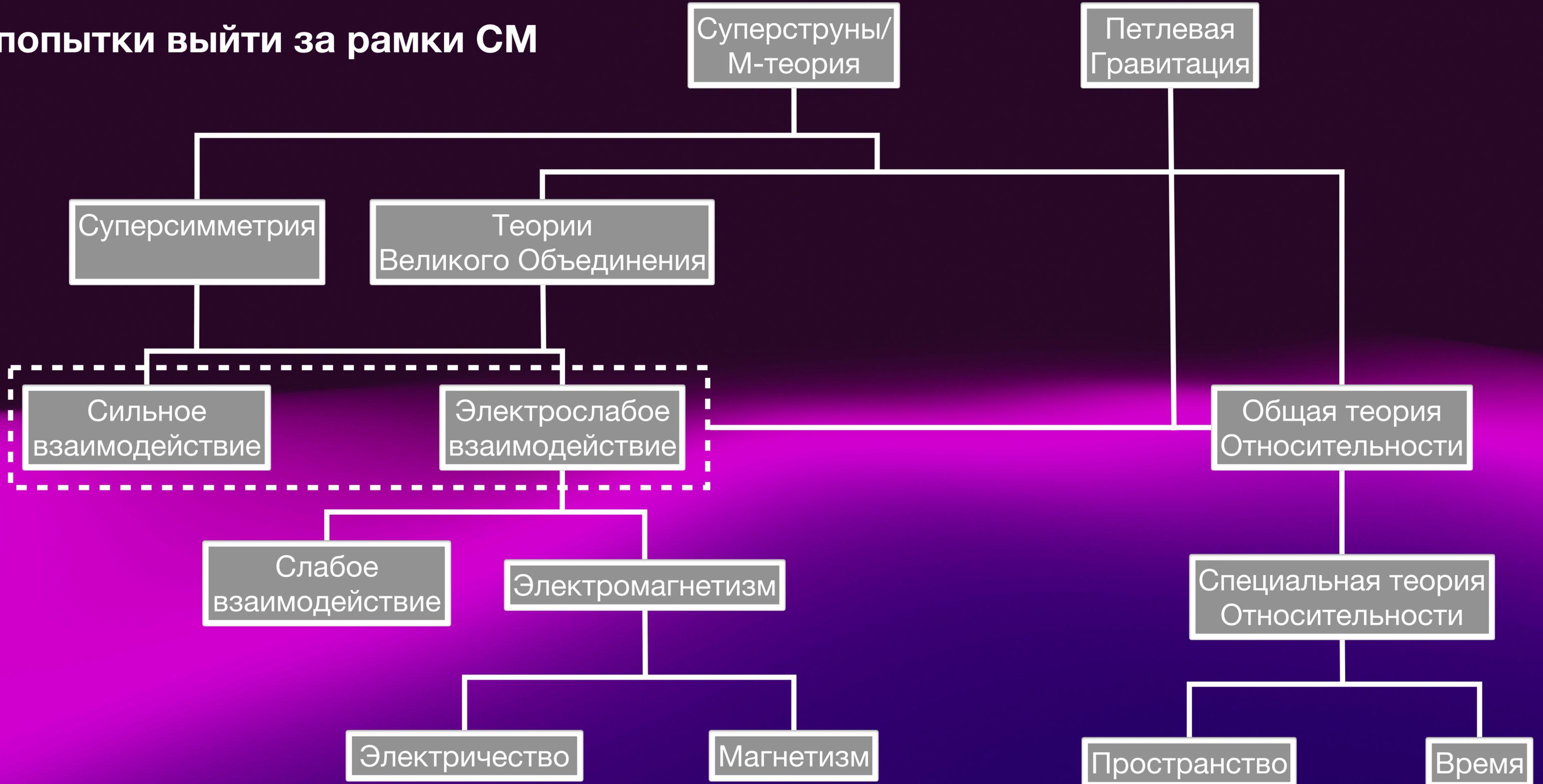


Лекция 4. «За горизонты Стандартной модели: Пути к Новой Физике»



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

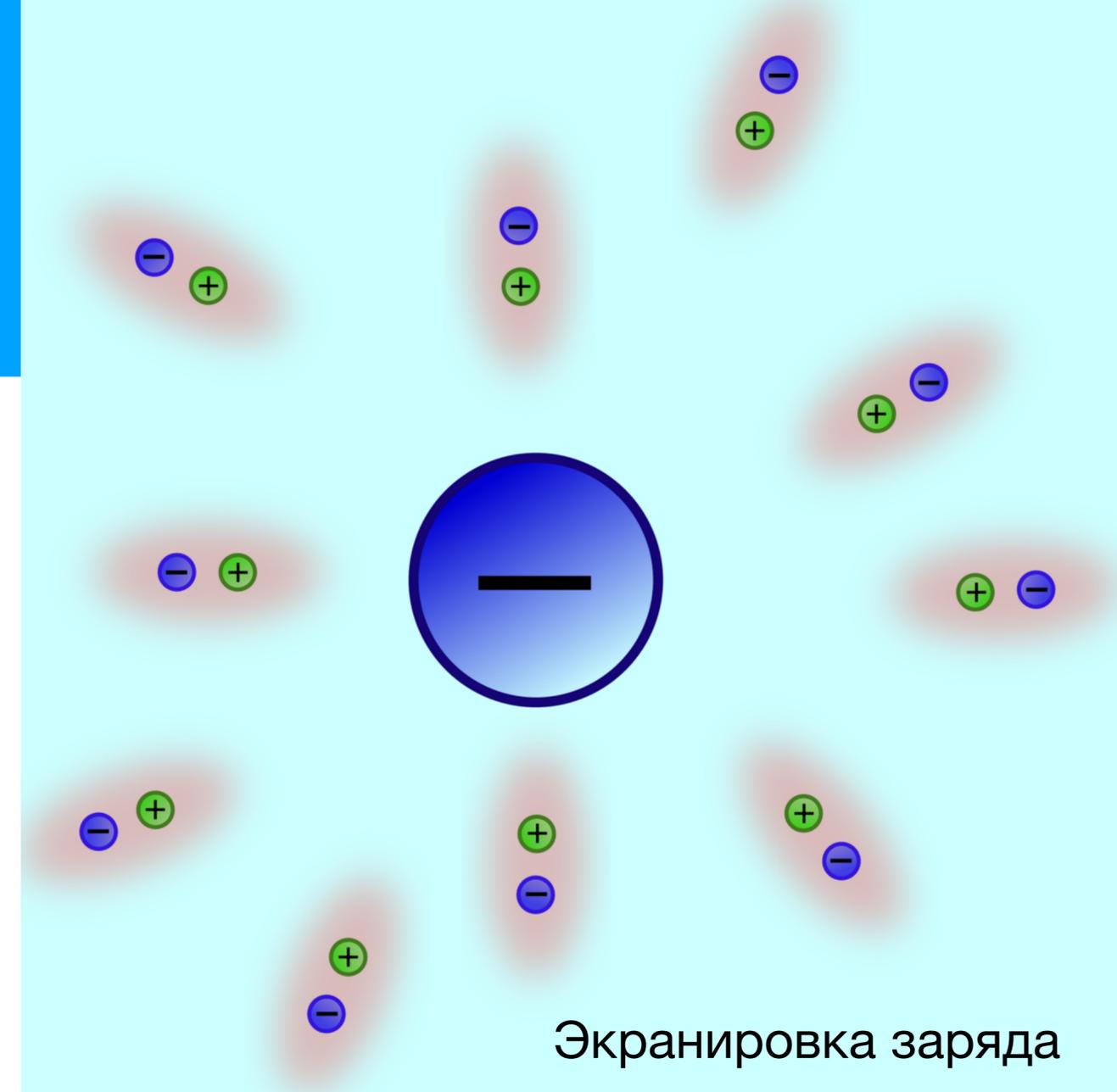
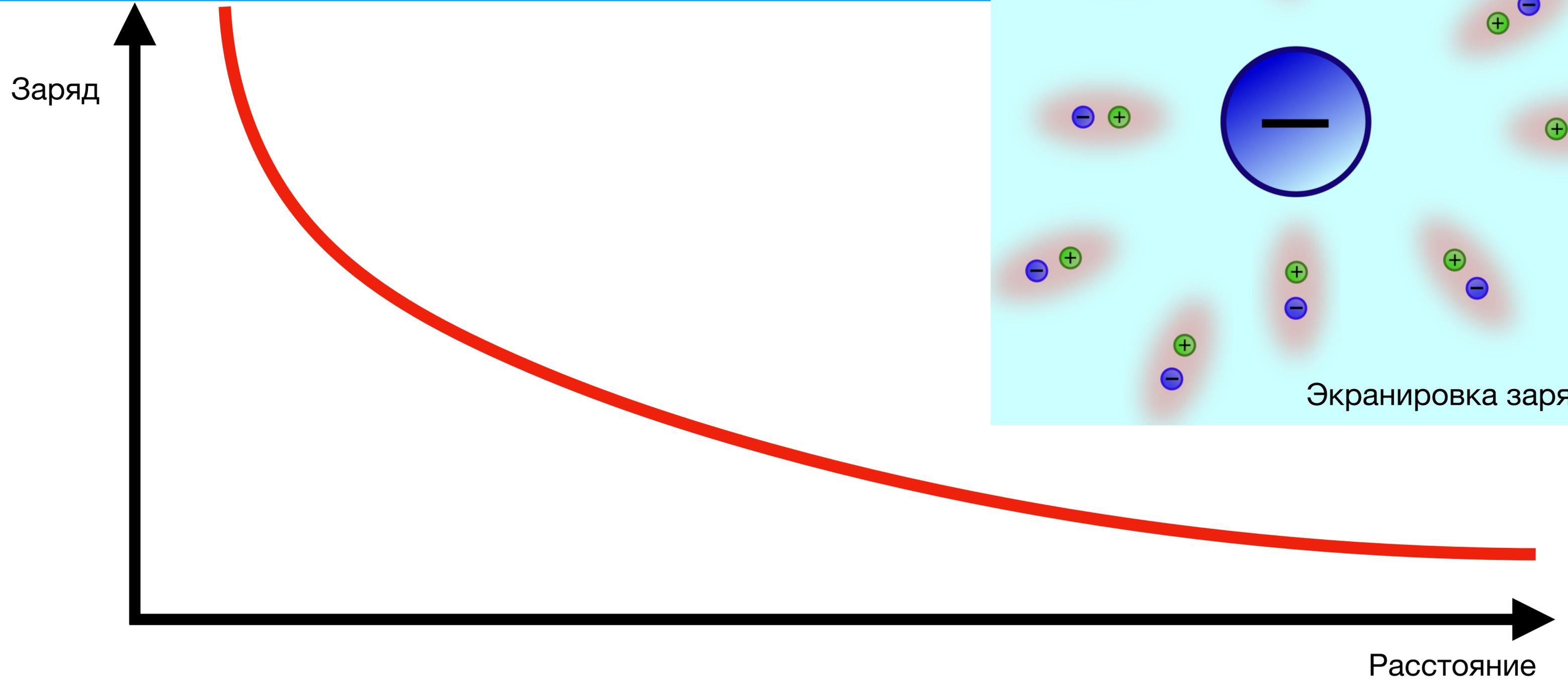
- **Многомерные миры**
- **Струны, Суперструны и Браны**
- **Суперсимметрия**
- **Теория пространства и времени**
- **Единая сила**
- **Эксперименты будущего и что им мешает**

Объединение сильных и электрослабых взаимодействий

Бегущие константы в Стандартной Модели

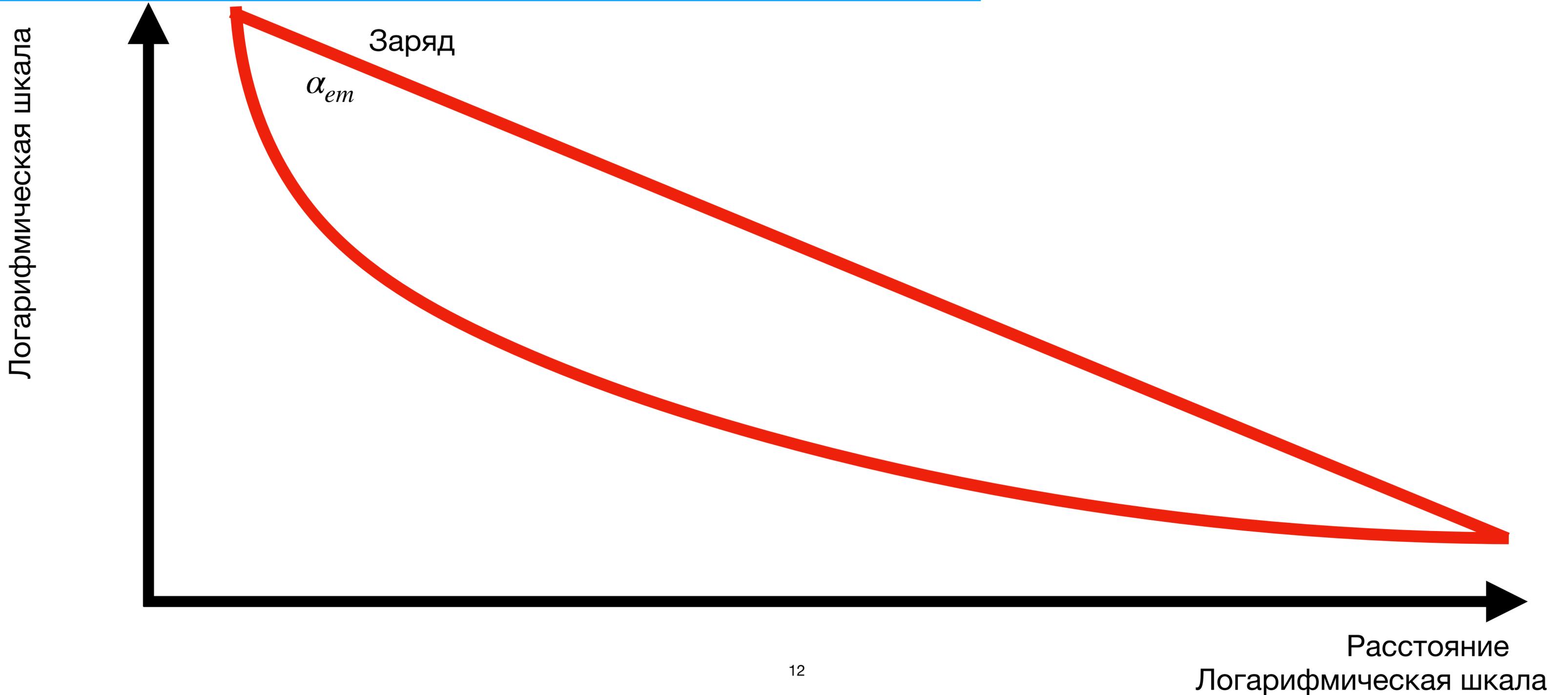
Бегущие константы

Напоминание из Лекции N2



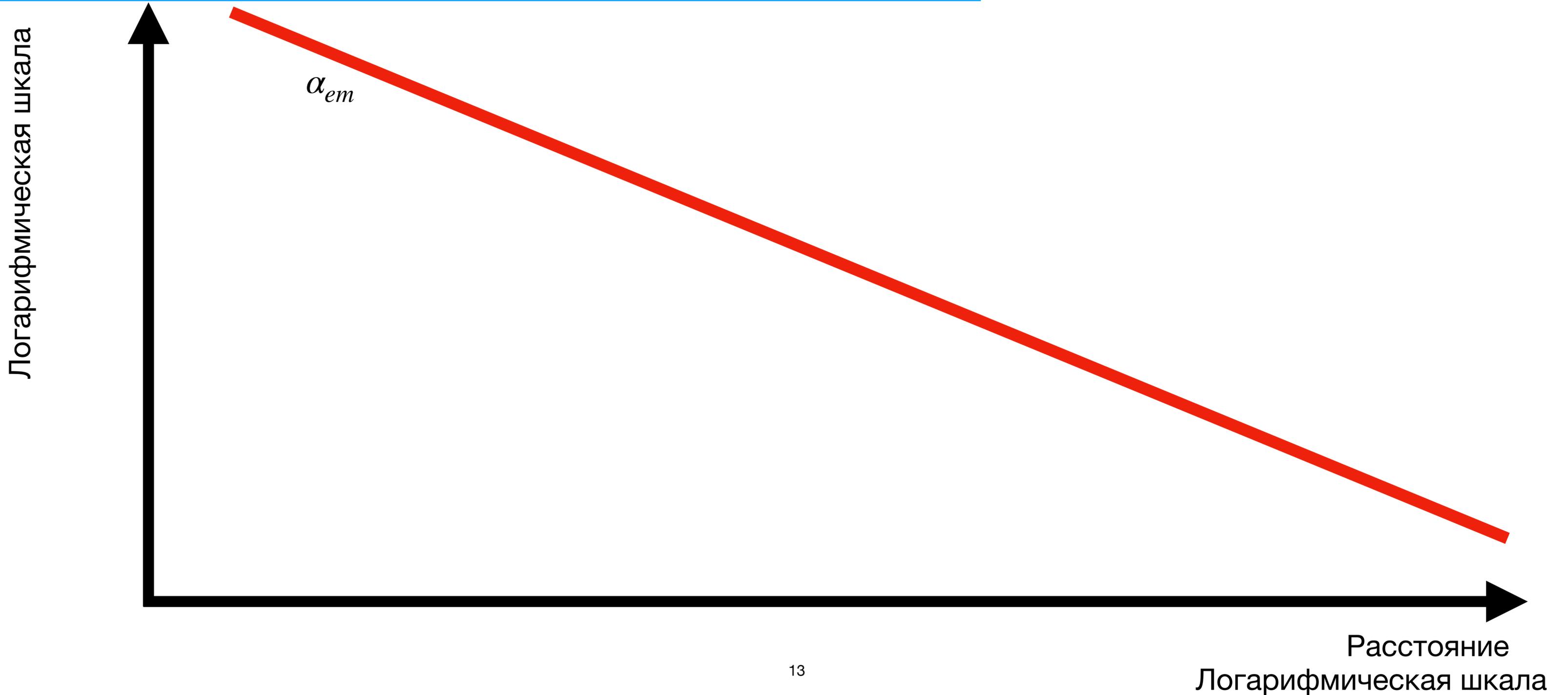
Бегущие константы

Логарифмические оси и переобозначение



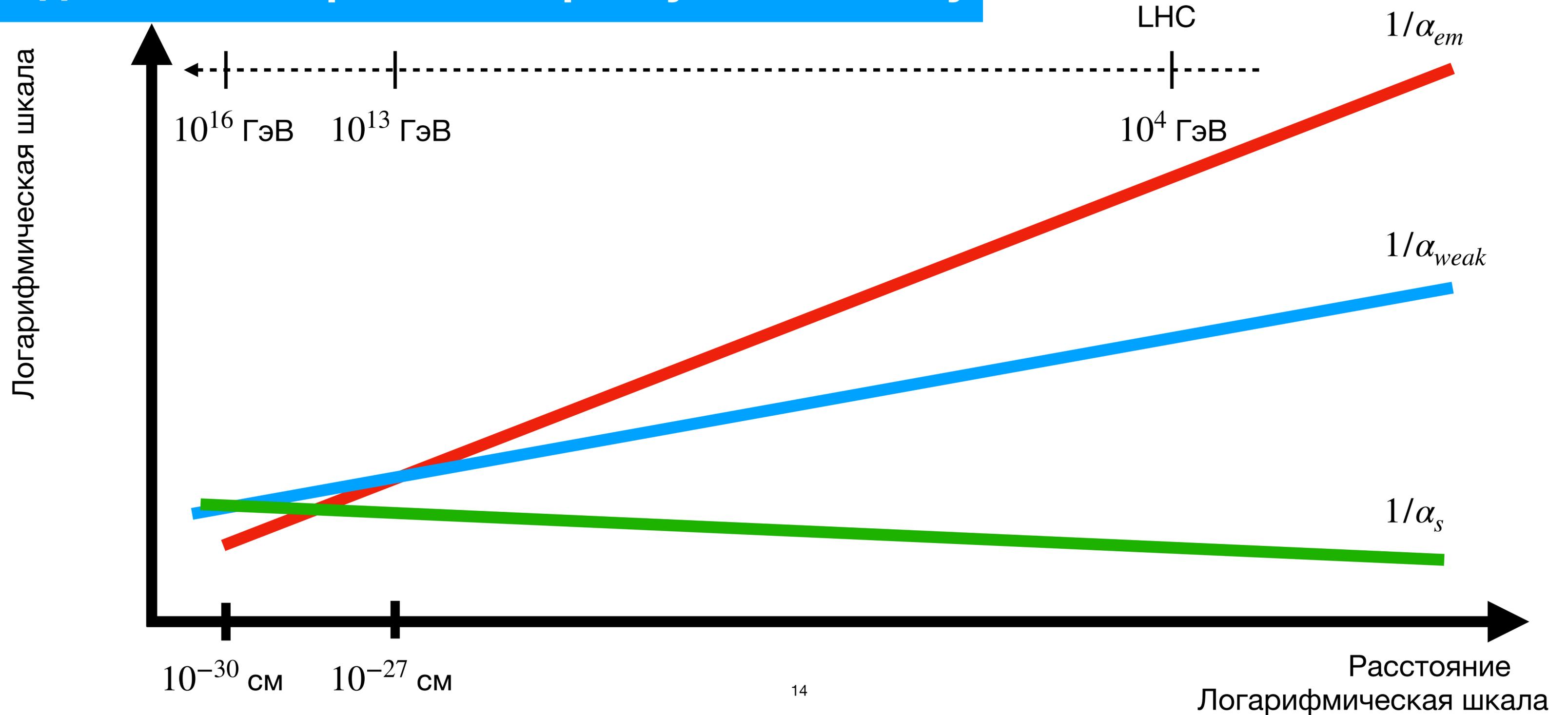
Бегущие константы

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

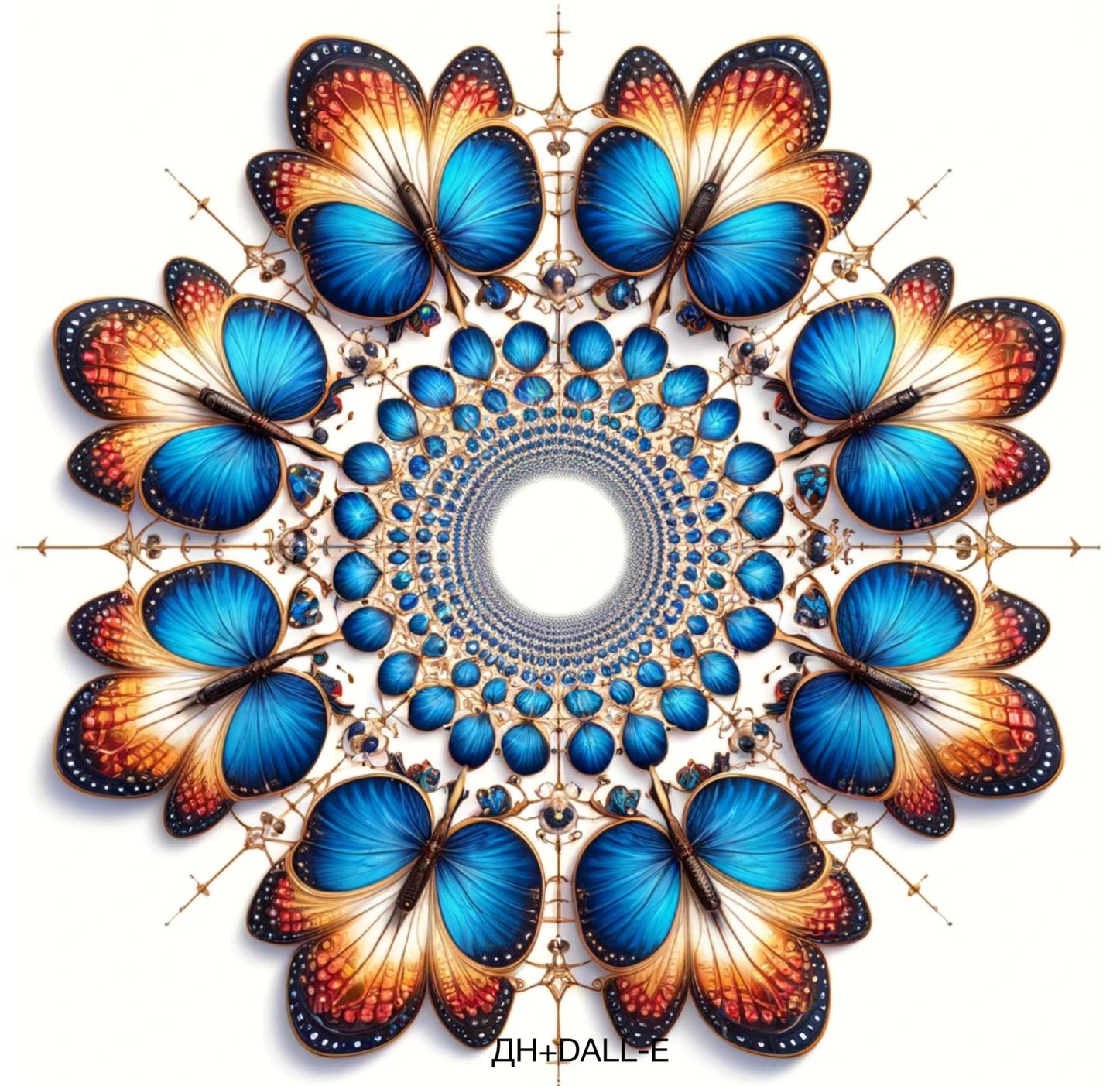
Еще больше симметрии!

- 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

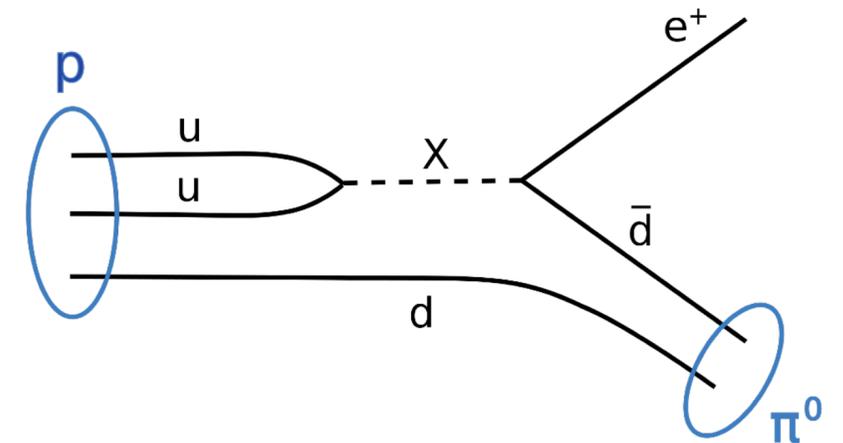
- **24 переносчика взаимодействия**

- На 12 больше, чем в СМ

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

- У них есть и сильные заряды

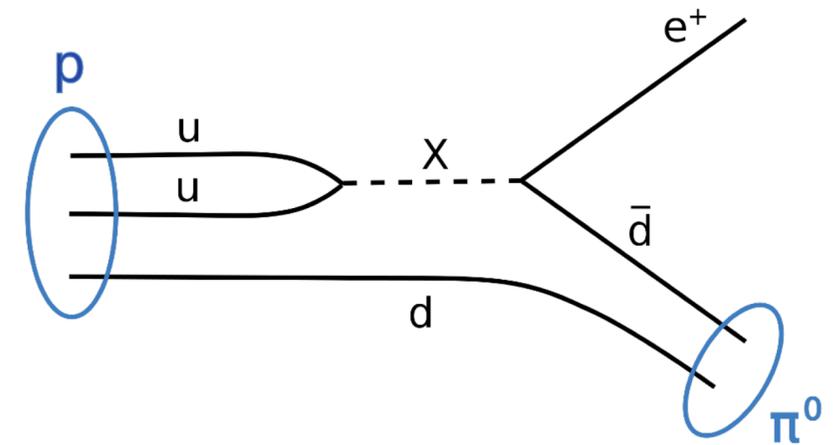
- Предсказывается распад протона



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**

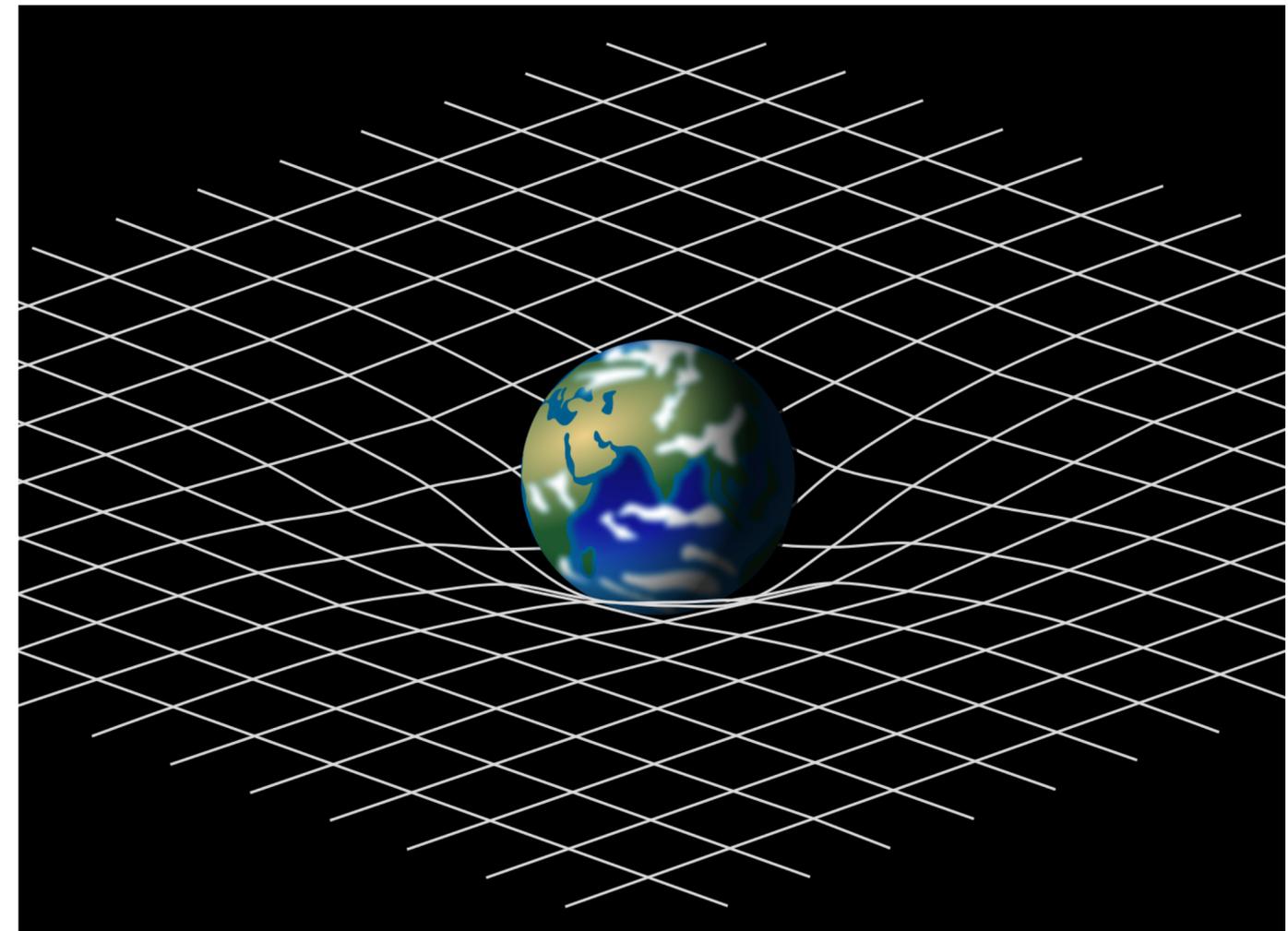
Гравитация

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.

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

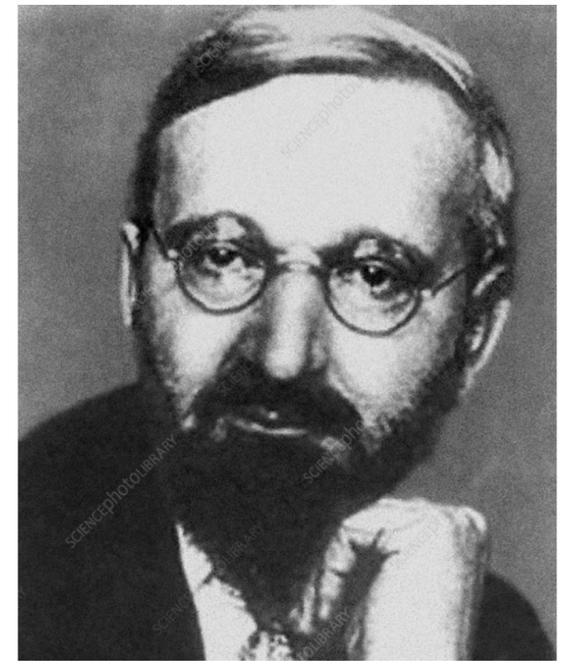
— В 3+1 пространстве: **10** независимых элементов



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

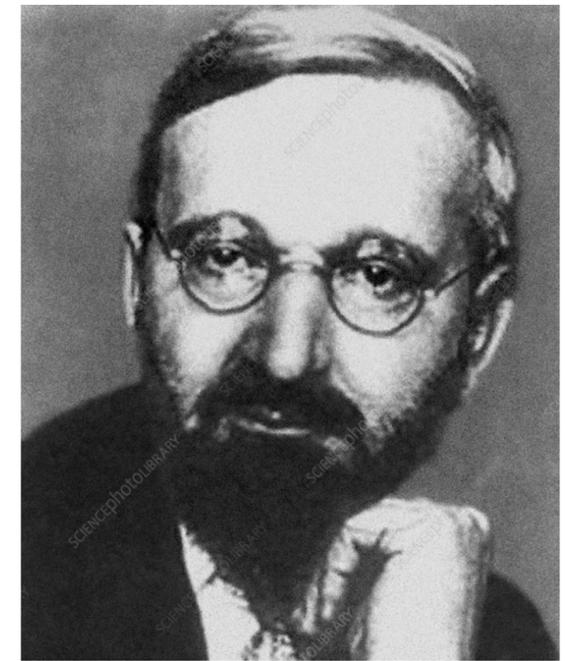
- квантование электрического заряда определяется целыми кратному импульсу в пятом измерении

- **Небольшая проблемка**

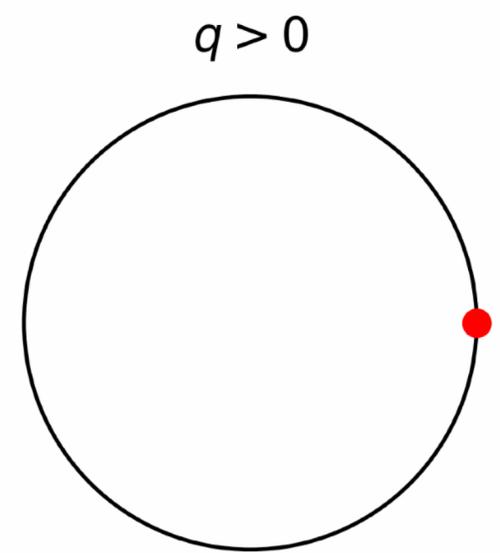
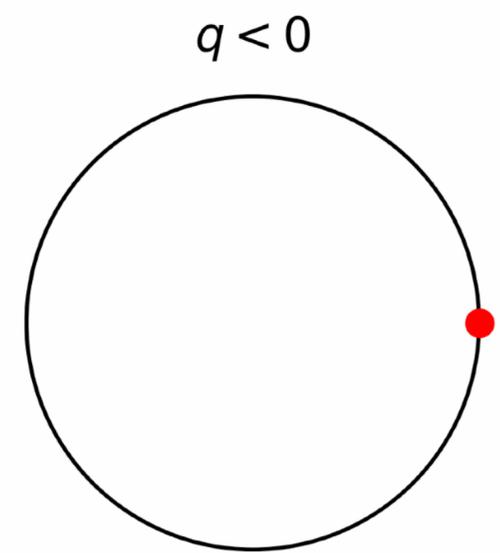
- Масса электрона = 5 кг



Оскар Клейн



Теодор Калуца



Теория Калуца-Клейна

Важные уроки

○ Новые идеи:

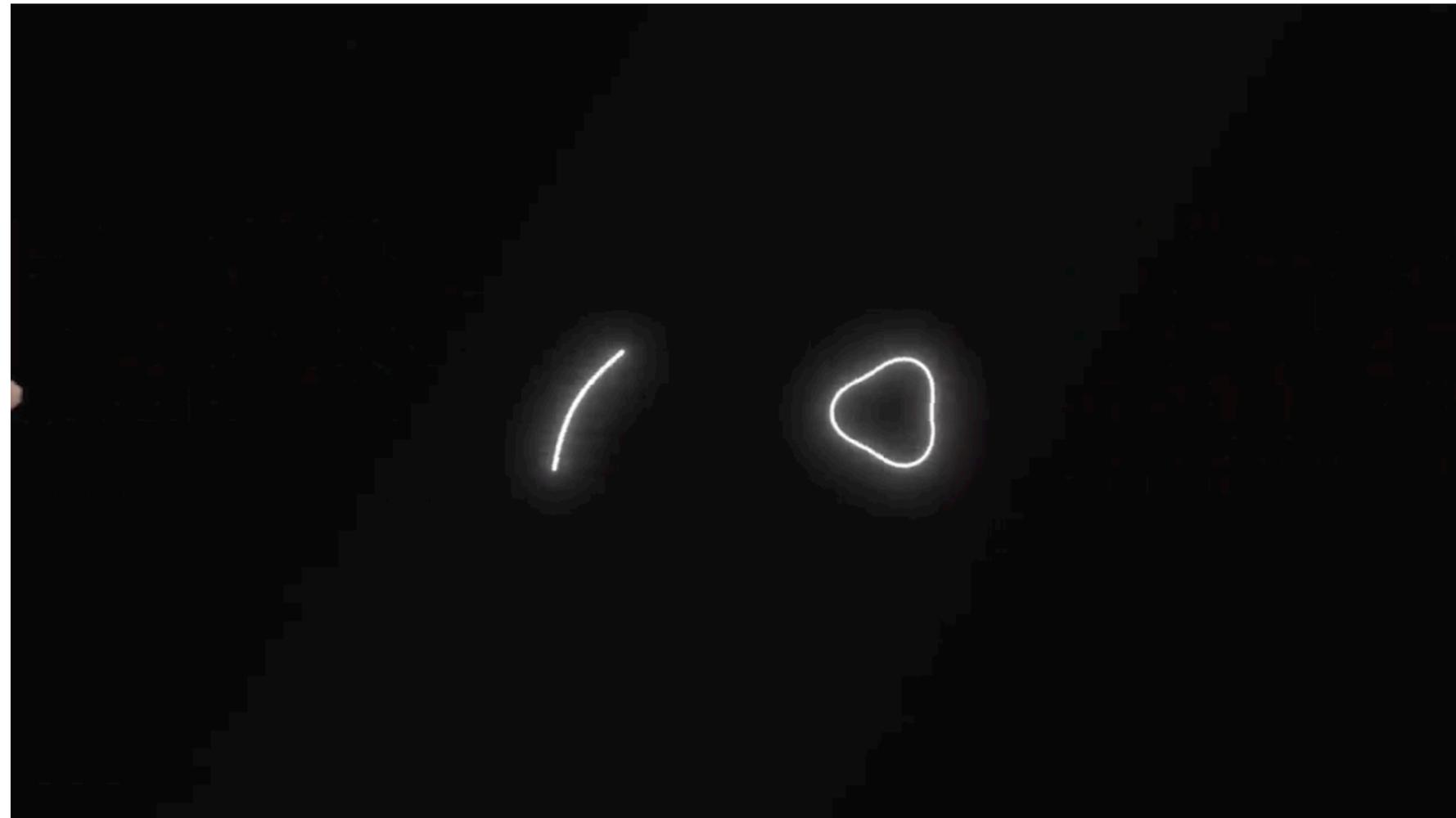
- Мир может иметь размерность пространства-времени больше, чем $3+1$
- Компоненты метрики дополнительных измерений — физические поля в $3+1$
- Дополнительные размерности пространства могут быть компактными
- Основа для многих современных теорий сегодня: суперструны и др.

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

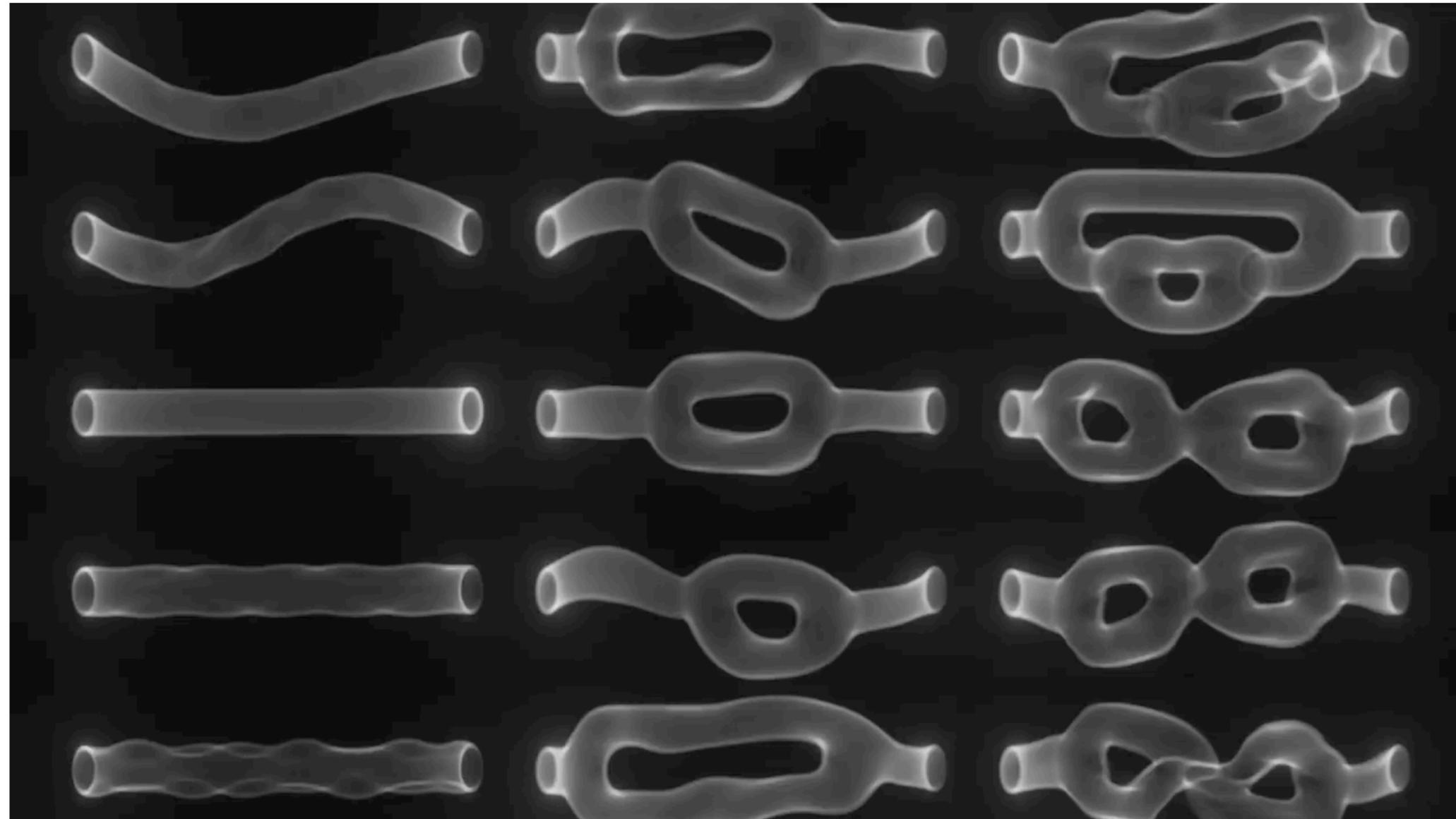


Гармонии Вселенной. Струнная симфония



Взаимодействия струн

- Диаграммы Фейнмана становятся объемными
- В силу топологии диаграмм, из них исчезают бесконечности!
- Включение гравитона в квантовую теорию больше не проблема



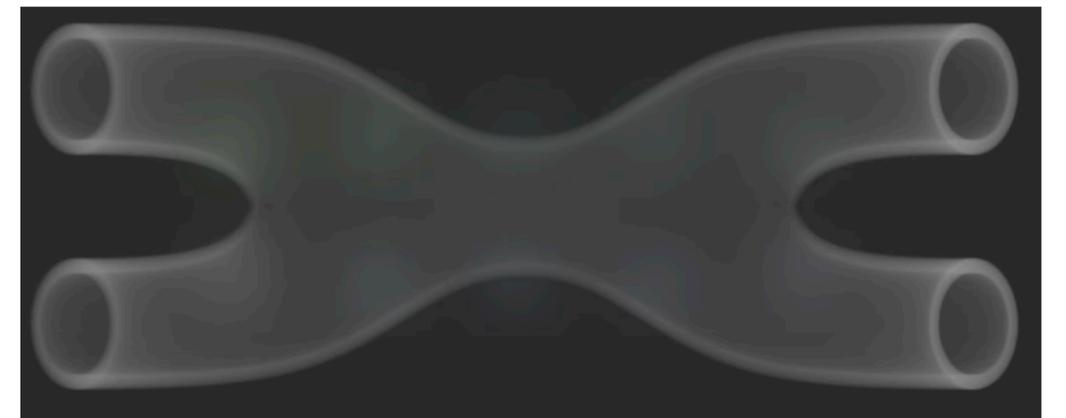
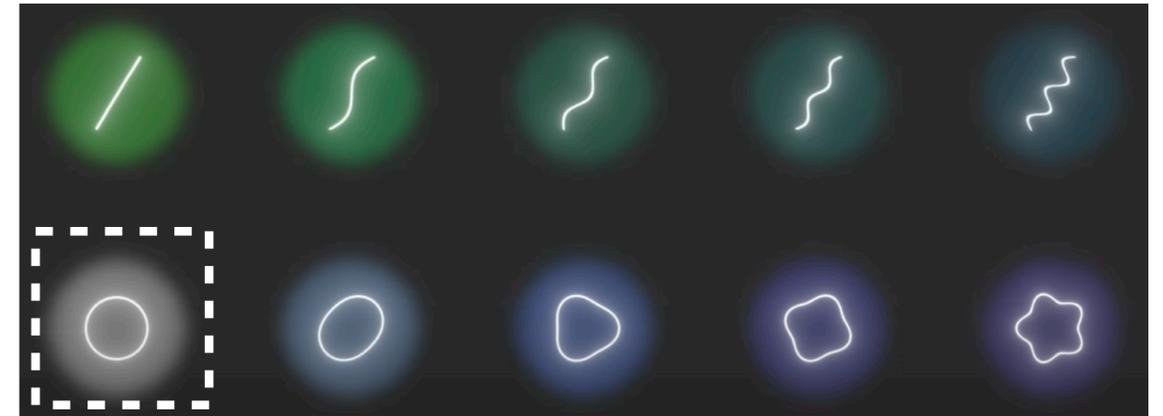
Теория струн

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

**Теория струн = теория
квантовой гравитации**

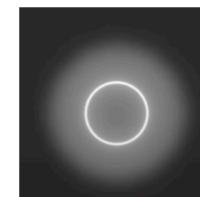
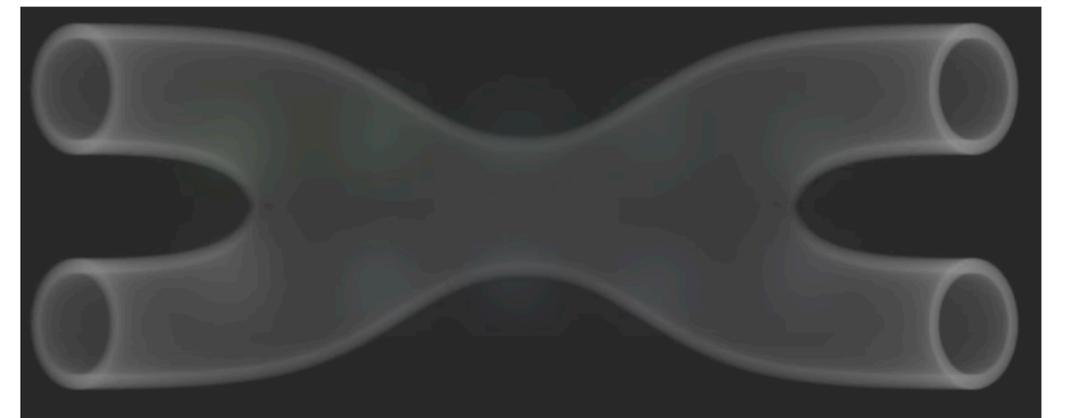
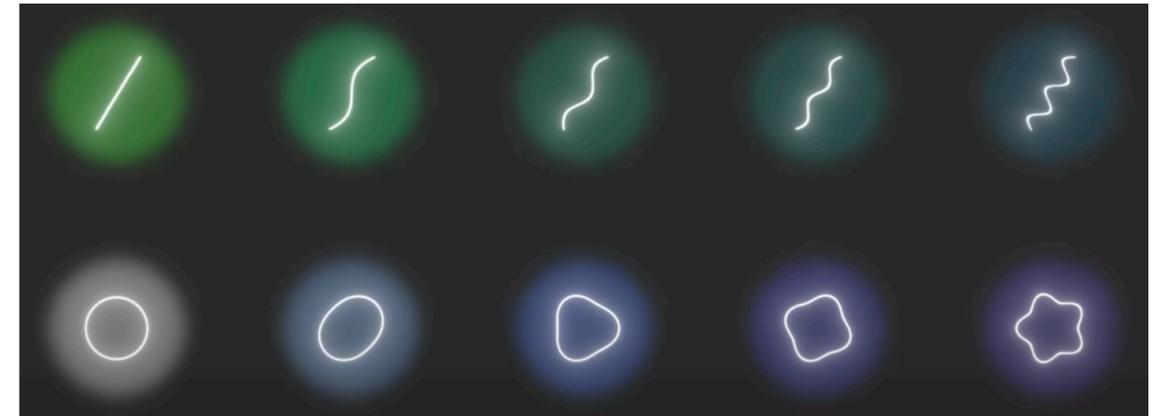
К этому слайду теория струн выглядит перспективной

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

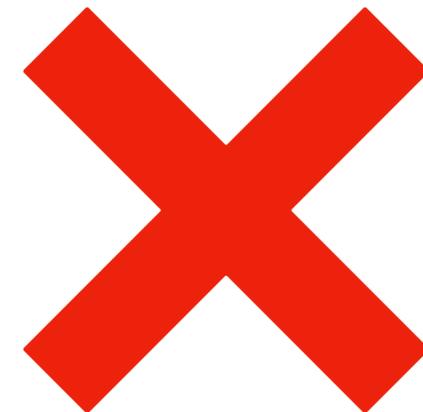
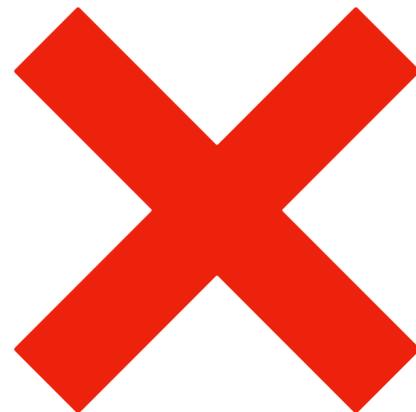
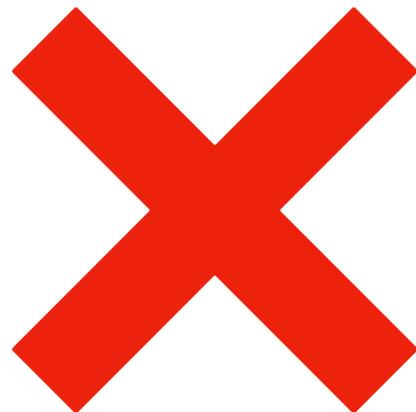


К этому слайду теория струн выглядит перспективной

- 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

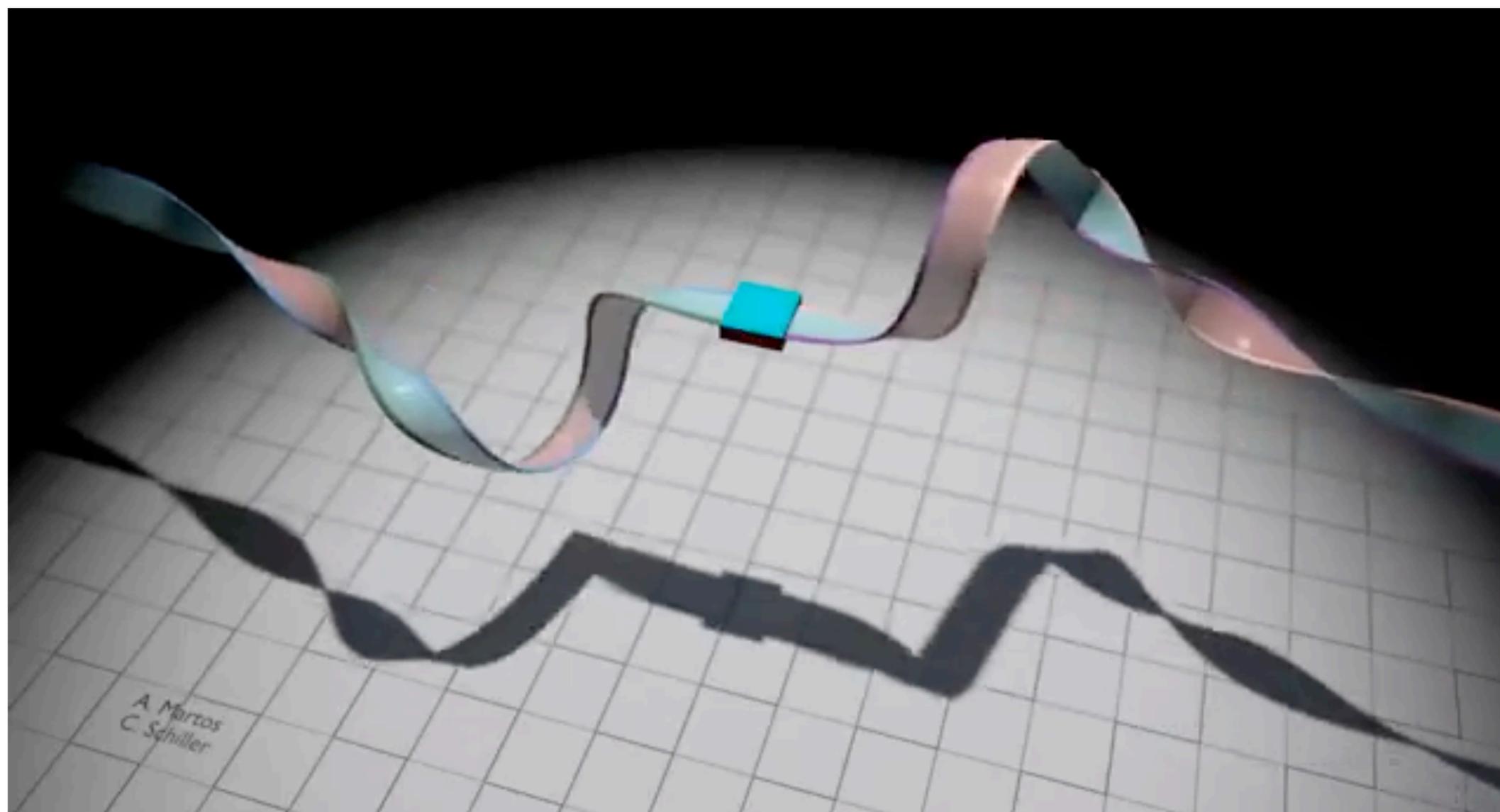
- **Все струны бозоны (частицы с целым спином).**
 - Нет фермионов (частицы с полуцелым спином). А это вся материя Вселенной
- **Теория предсказывает тахион**
 - Частица с мнимой массой $m \sim \sqrt{-1}$ и сверхсветовой скоростью
- **Теория внутренне непротиворечива только в $D = 26$**
 - Размерность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

Но что такое фермион?



Внимание! Эксперимент!

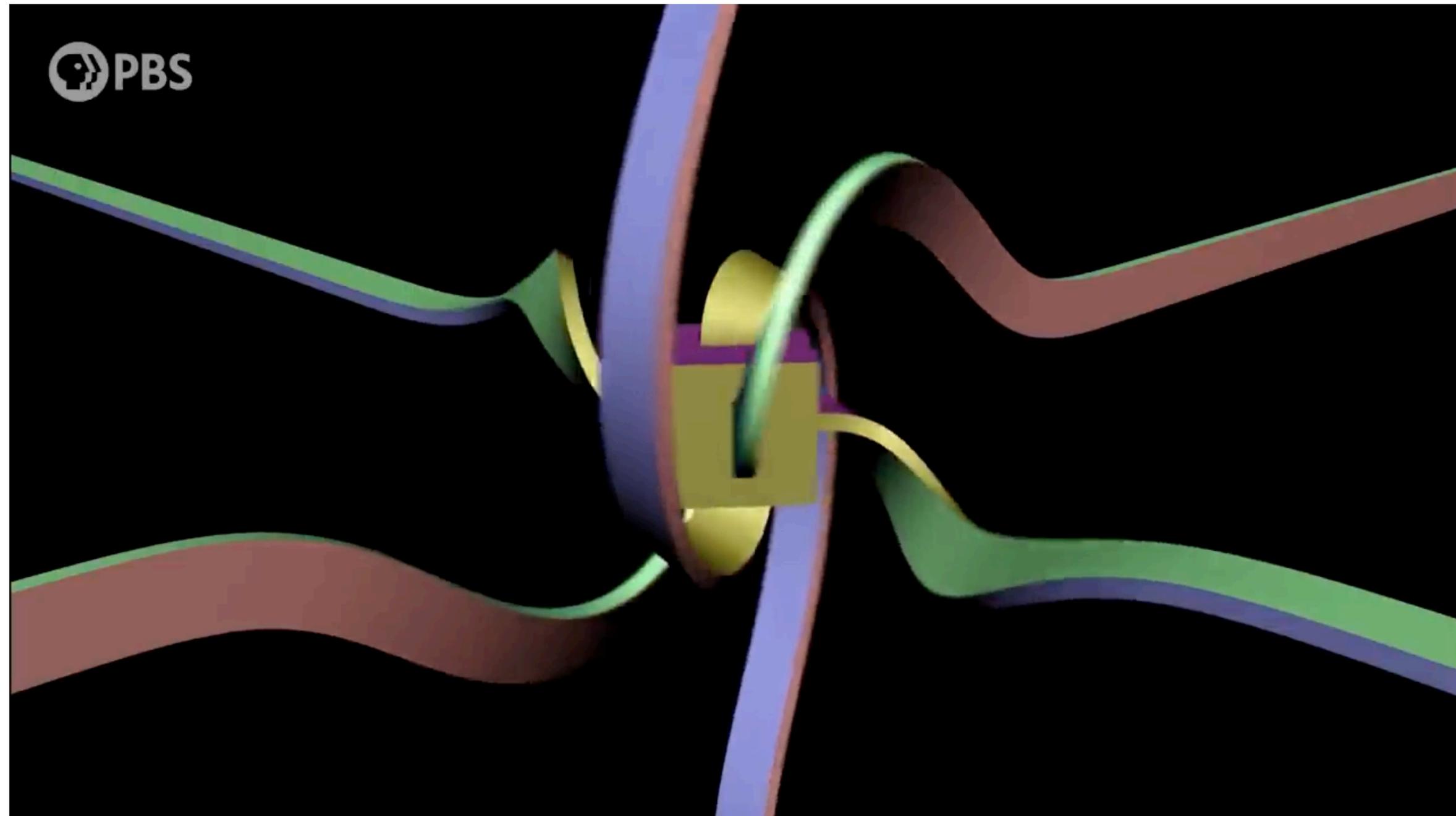
Трюк Дирака



Механическая аналогия для фермиона

Оборот на 720 градусов возвращает систему к прежнему состоянию

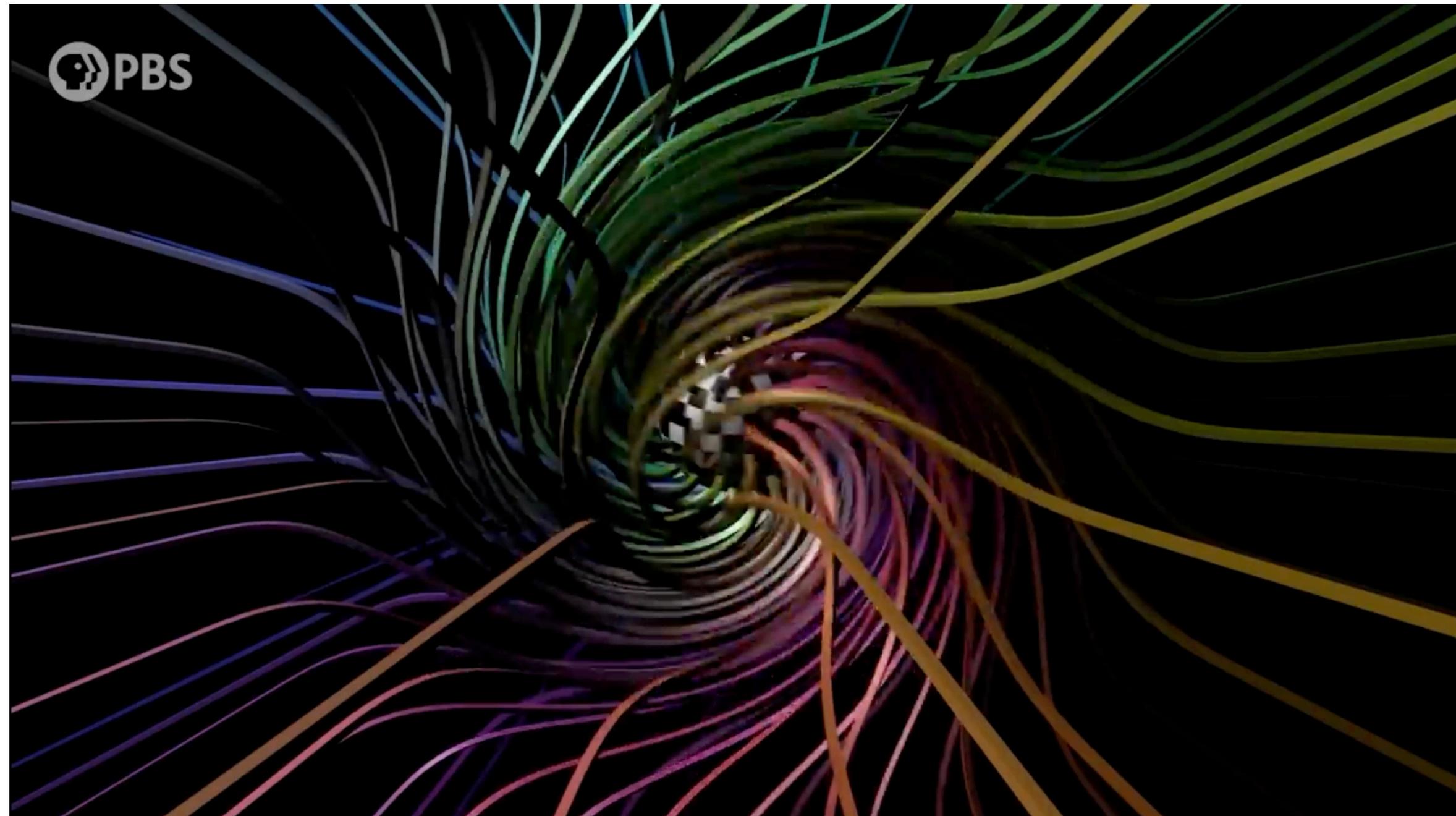
Кубик/шарик может крутиться бесконечно долго и никогда не запутается



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

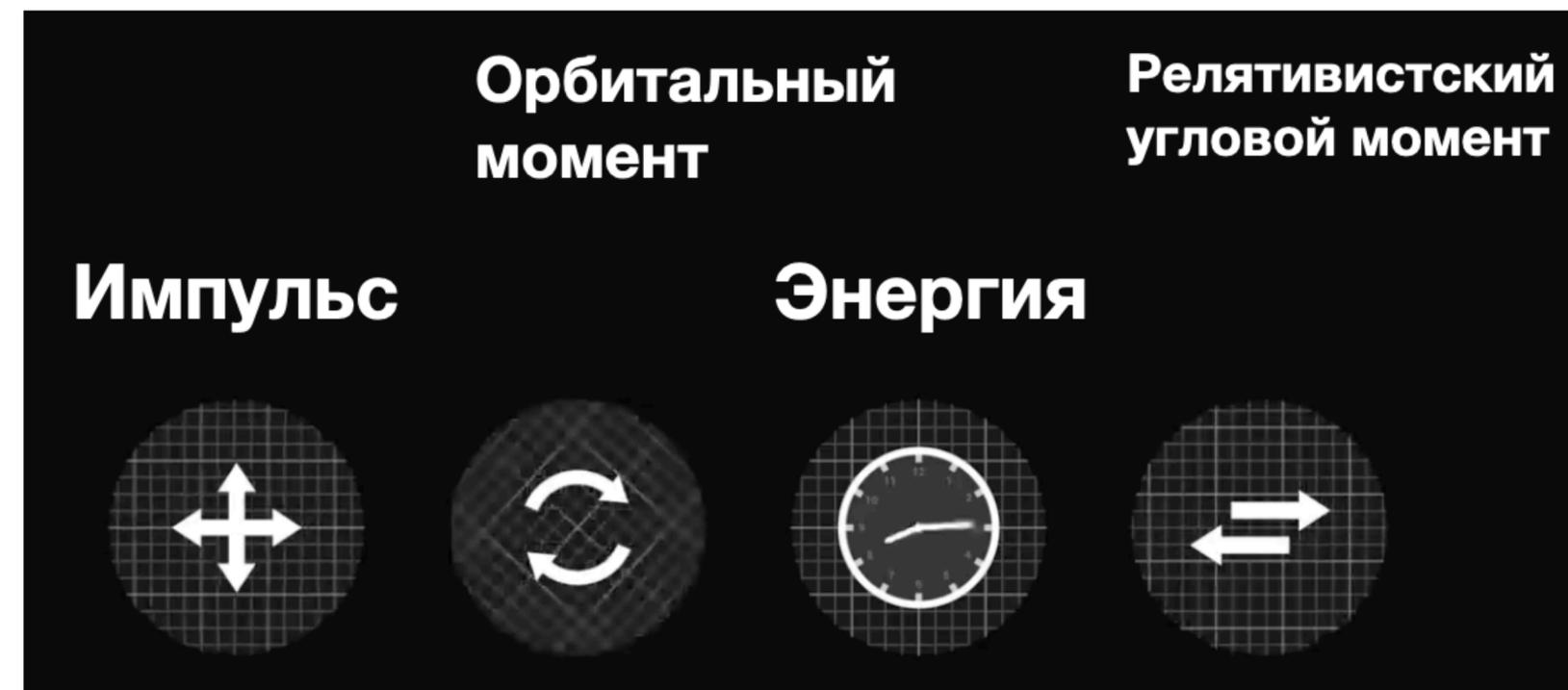
1971: Ж.Л. Жерве, Б. Сакита

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

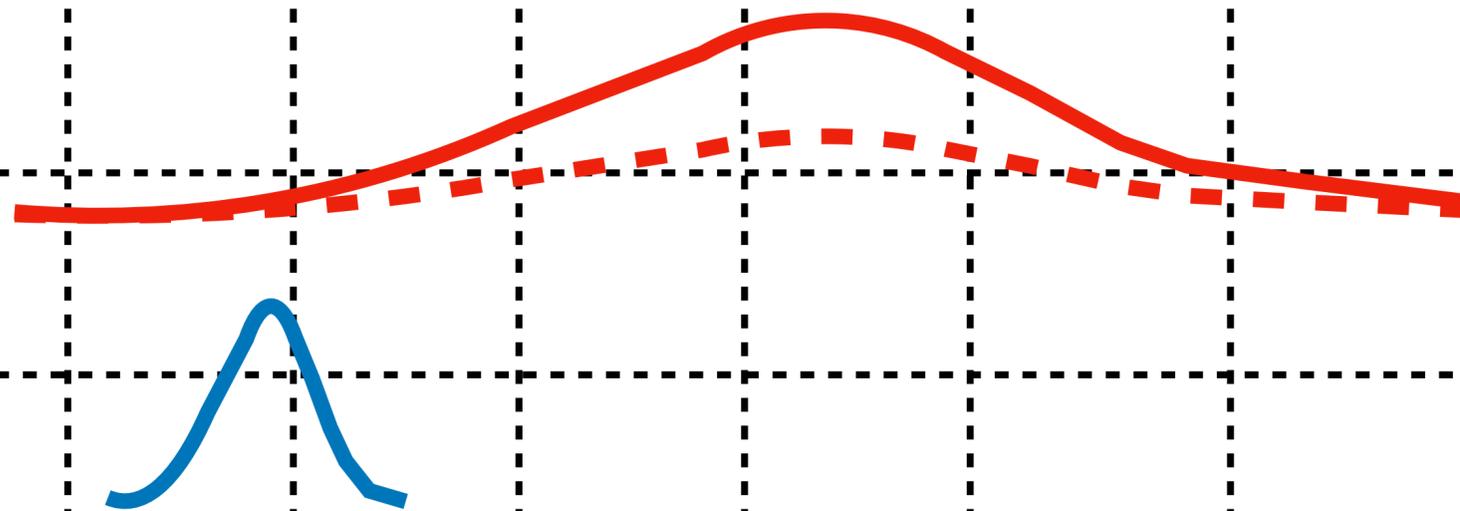
— Необходимо, чтобы для каждой частицы (поля) существовал партнер с точно такими же свойствами, но другим спином (отличающимся на $1/2$)

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?

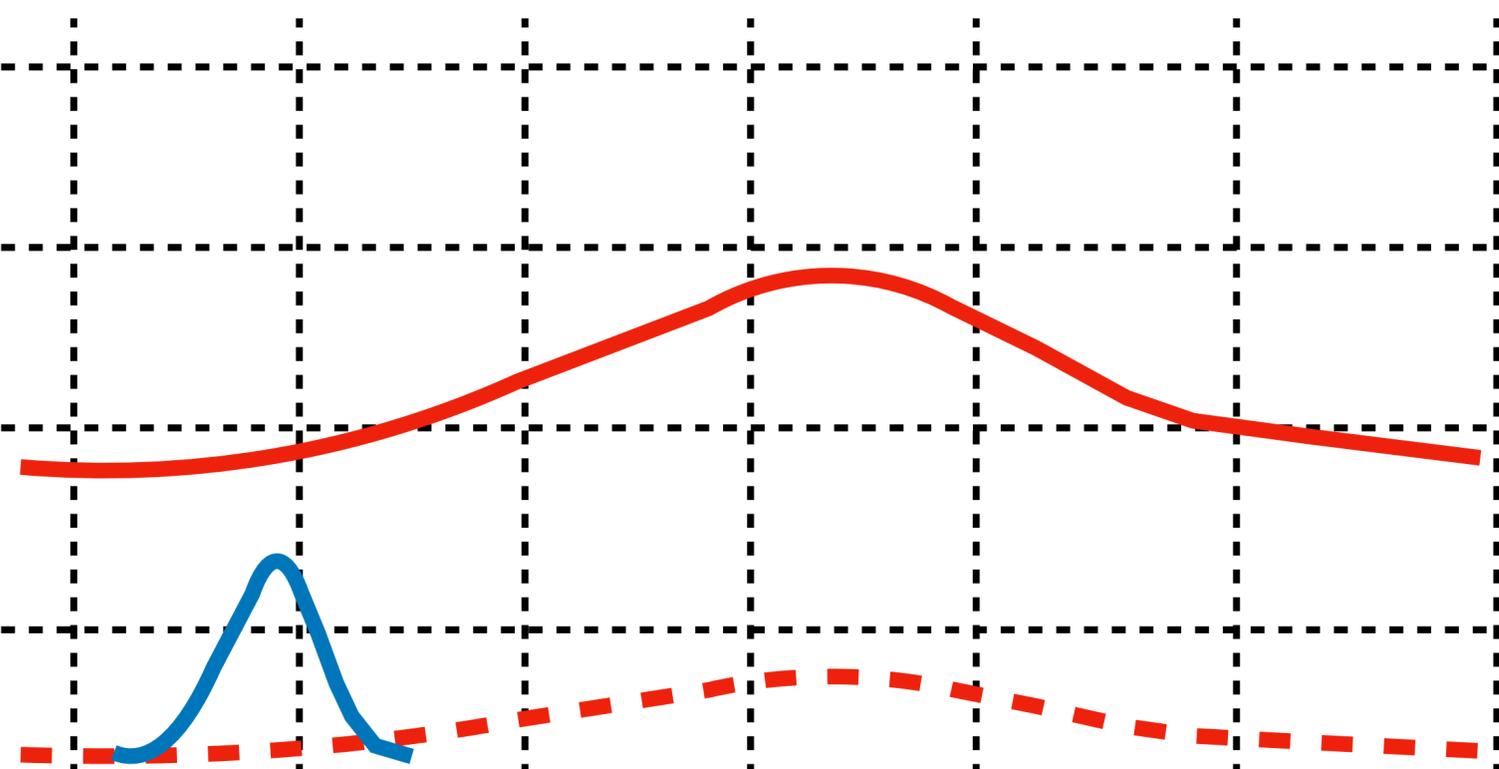
— Фермионное поле
— Бозонное поле



Почему суперсимметрия

— симметрия пространства-времени?

— Фермионное поле
— Бозонное поле



Почему суперсимметрия

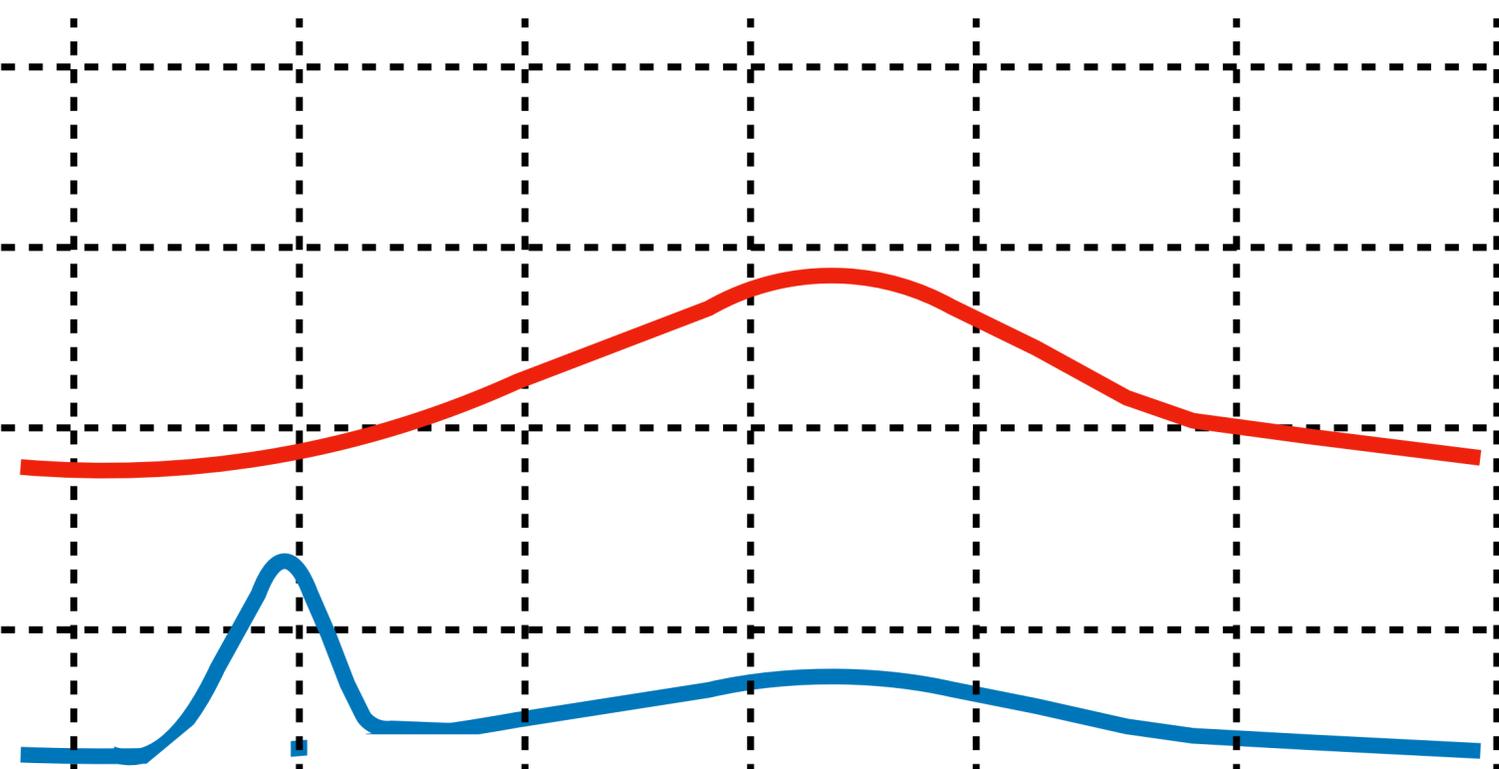
— симметрия пространства-времени?



Фермионное поле



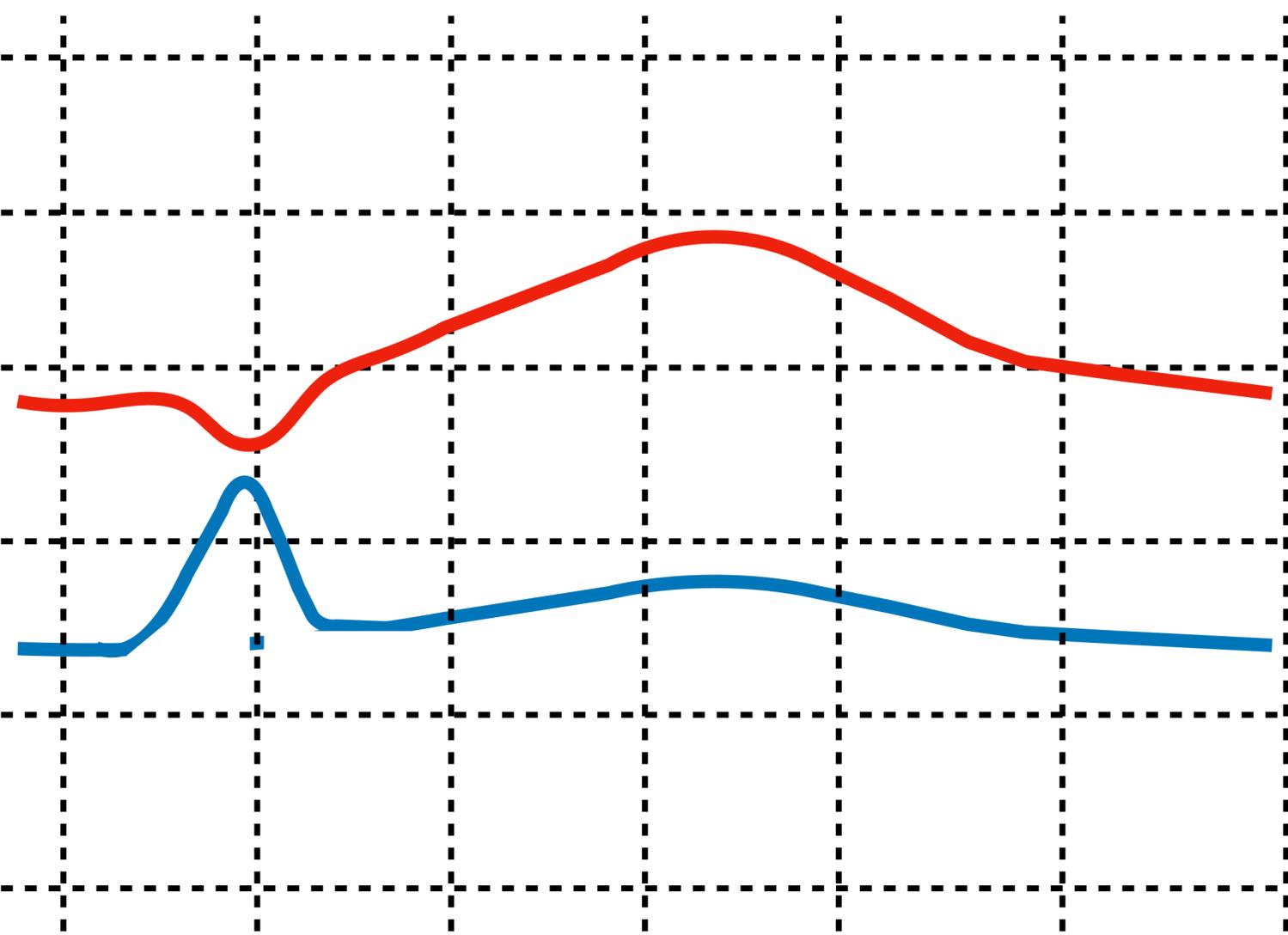
Бозонное поле



Суперсимметрия

Это симметрия пространства-времени

— Фермионное поле
— Бозонное поле



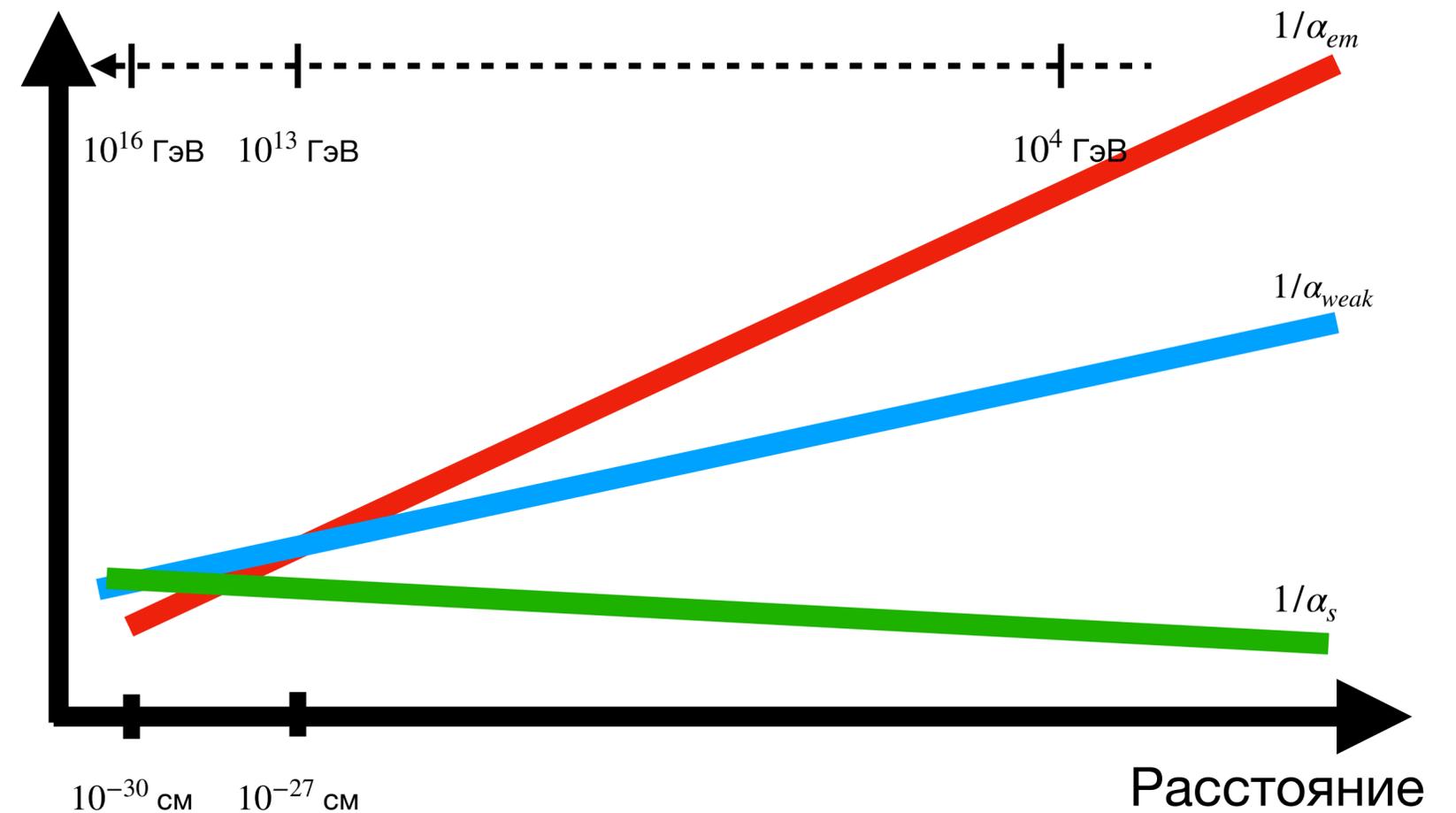
Физика остается неизменной при таких изменениях полей в пространстве-времени

Суперсимметричные надежды

Суперсимметричные надежды

○ Объединение электрослабых и сильных взаимодействий

Силы сходятся в одной точке!



Суперсимметричные надежды

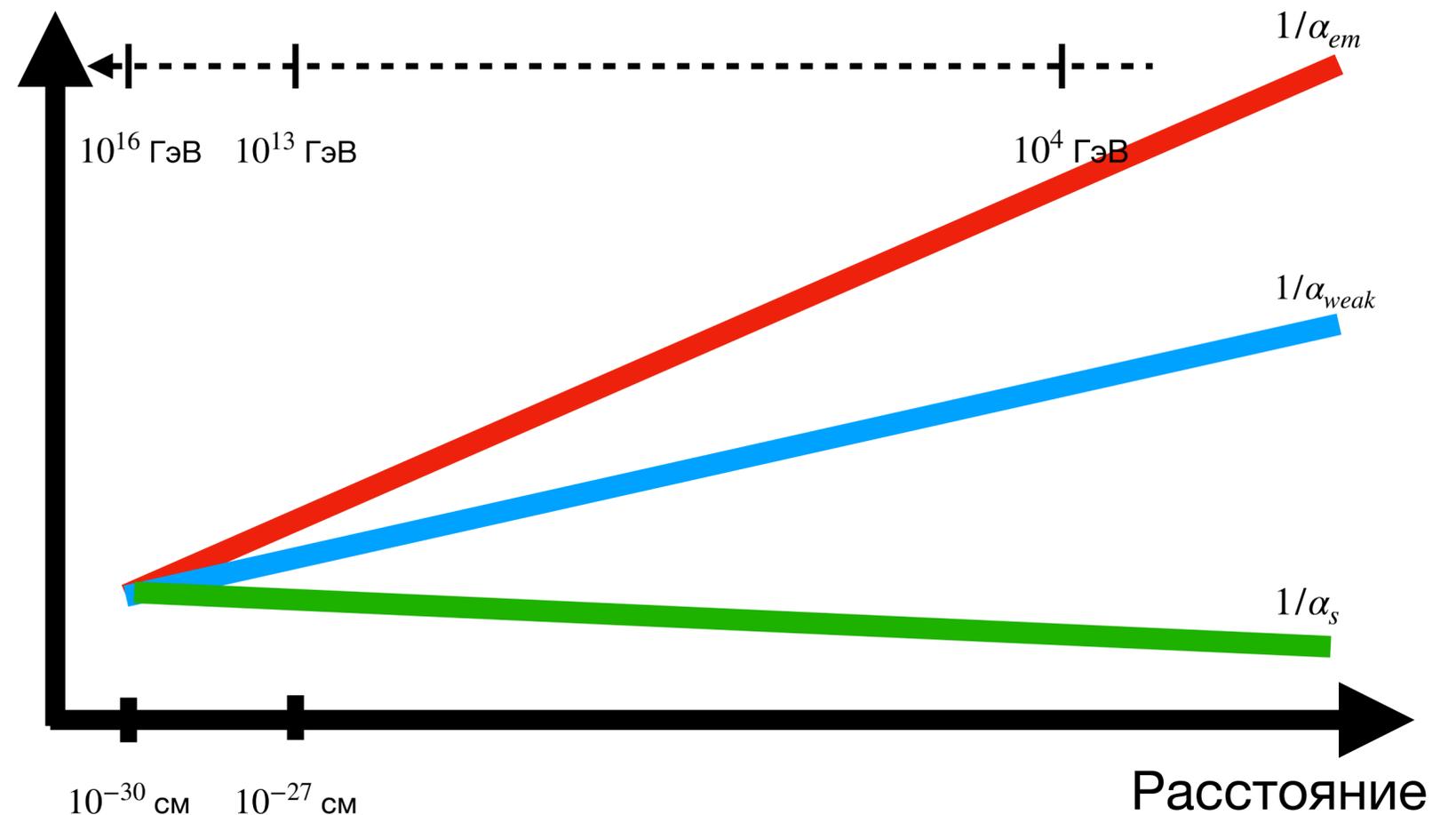
○ Объединение электрослабых и сильных взаимодействий

— 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 $D = 26$**

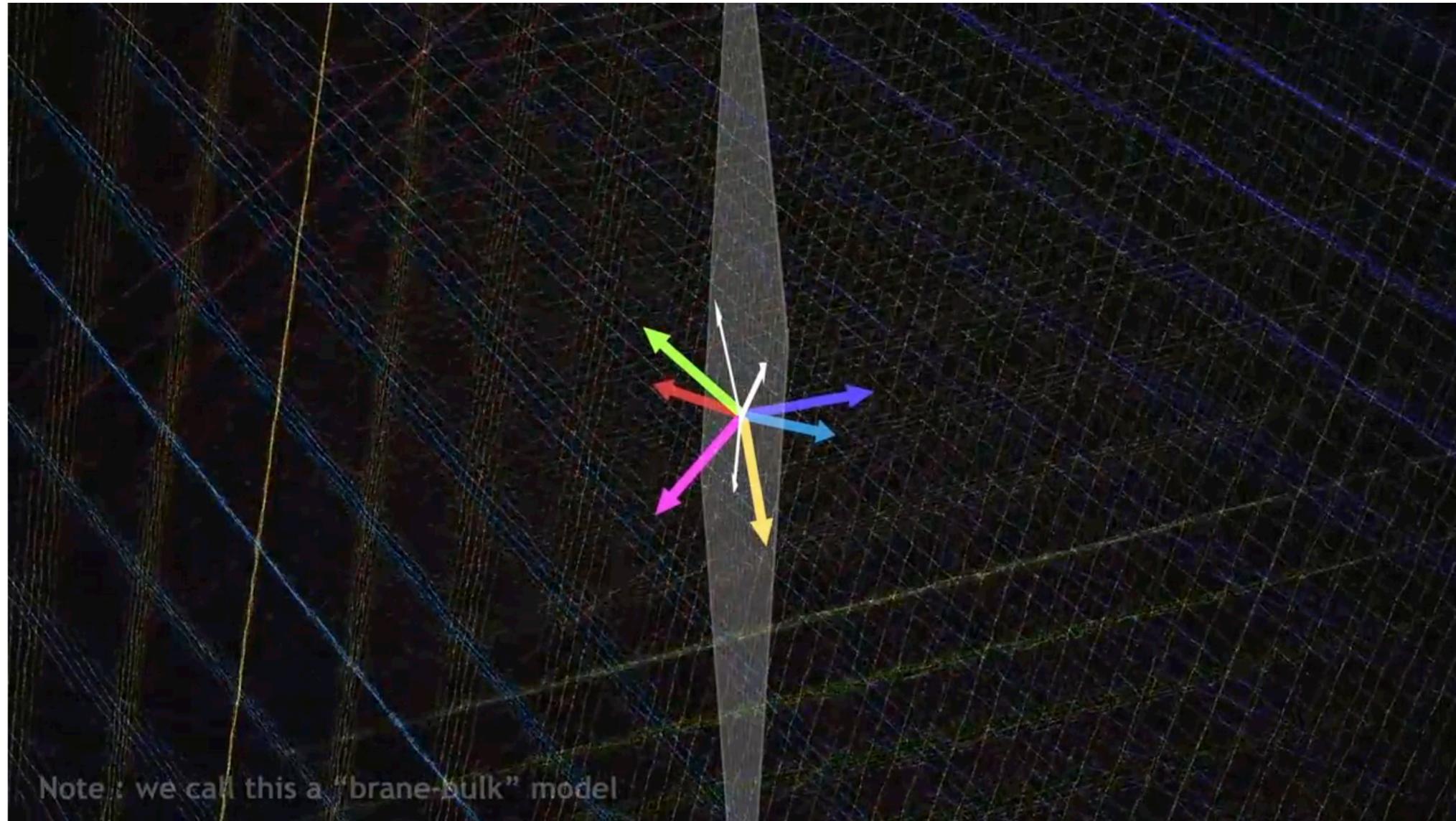
— Размерность пространства-времени = 10



Где остальные 6 измерений?

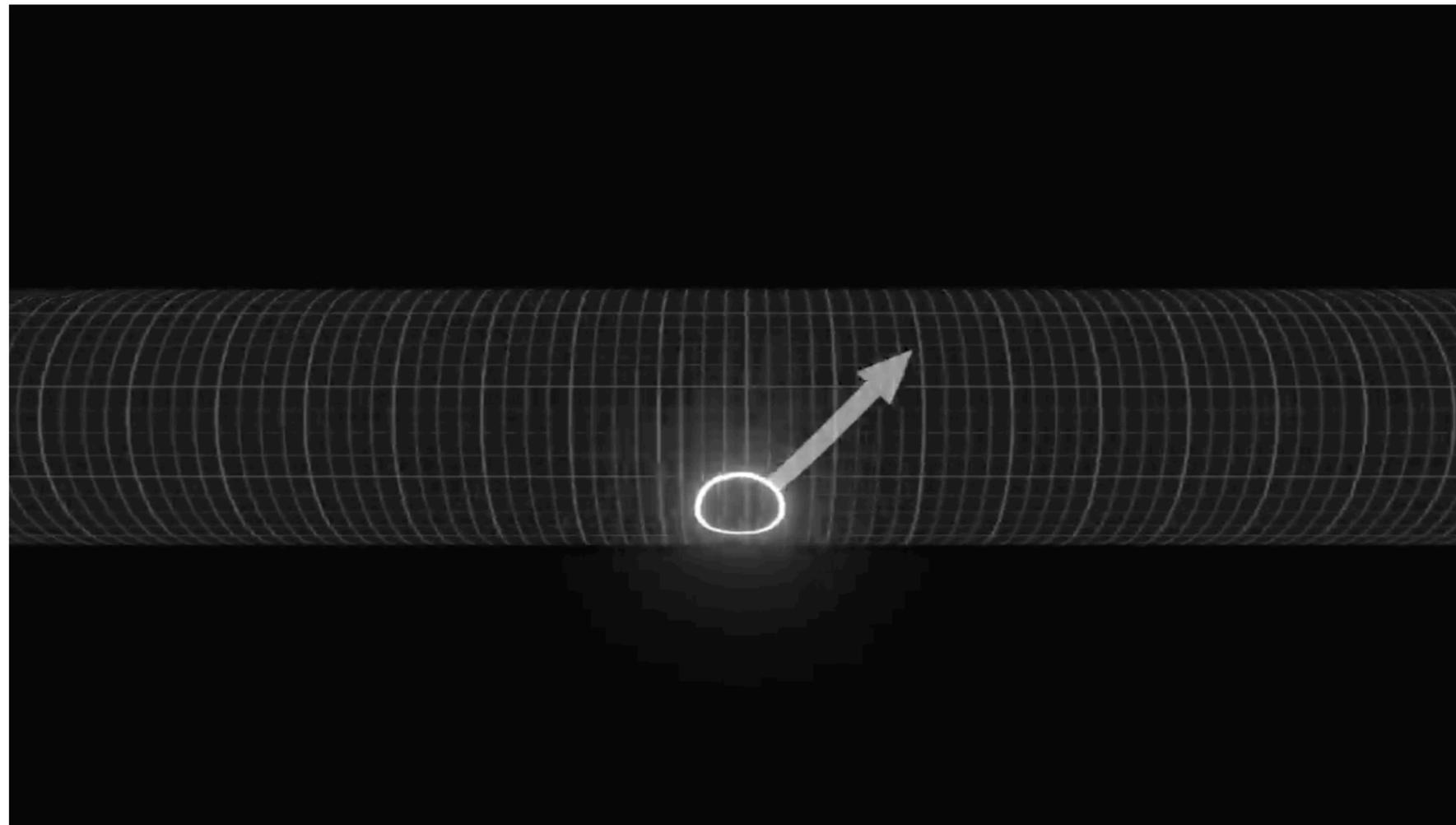
Две возможности

- Наше трехмерное пространство — срез 9-мерного



Две возможности

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

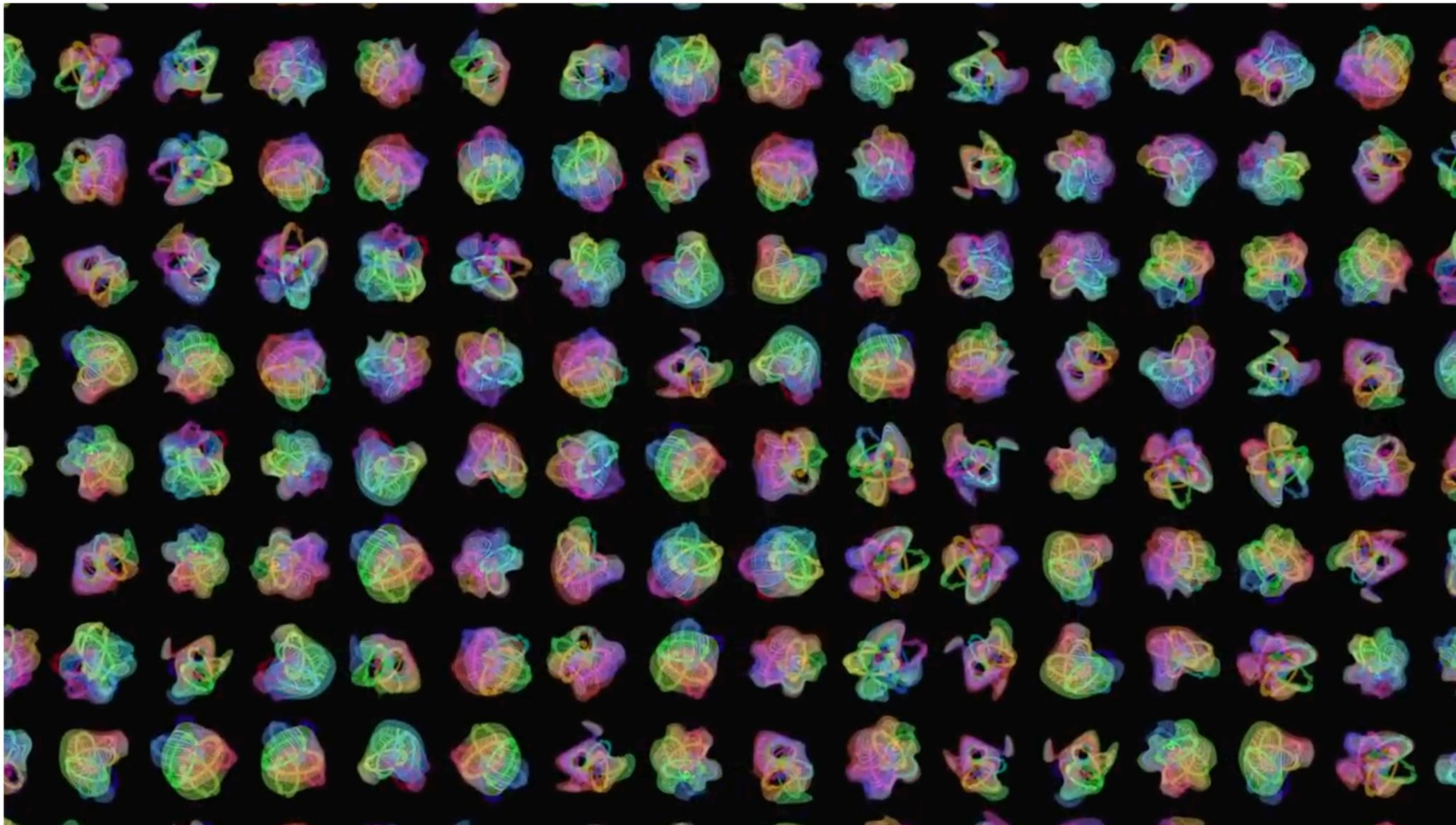


**Как компактифицировать
дополнительные измерения?**

Огромное число способов

Оценка: 10^{500}

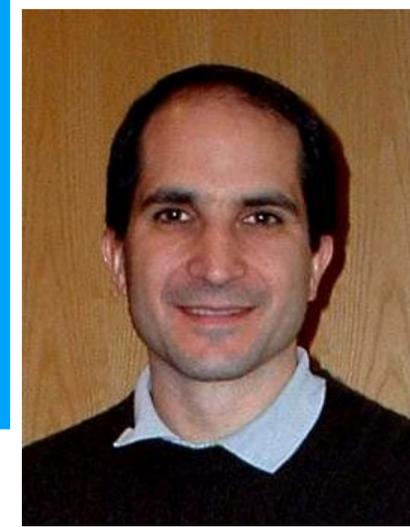
- Многообразия Калаби-Яо



Краткая история теории суперструн

Краткая история суперструн

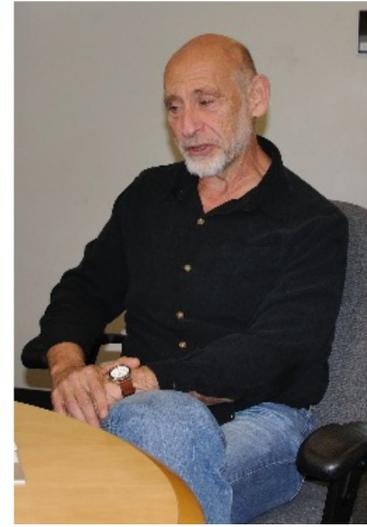
Очень краткая и очень неполная!



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



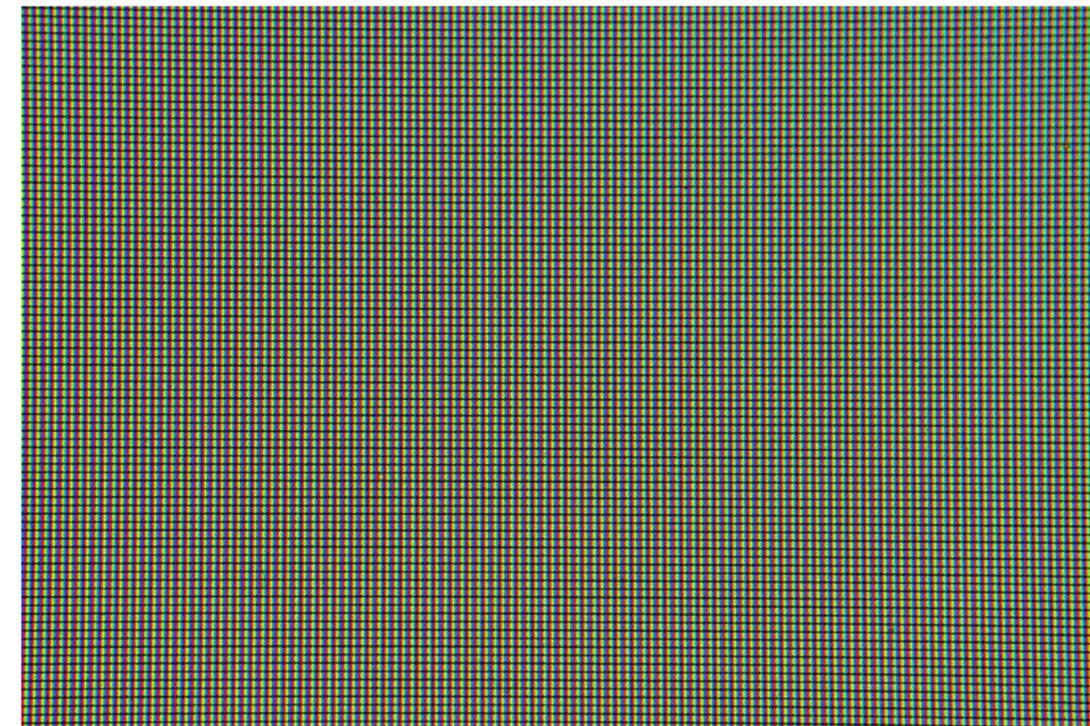
Абэй Аштекар



Карло Ровелли

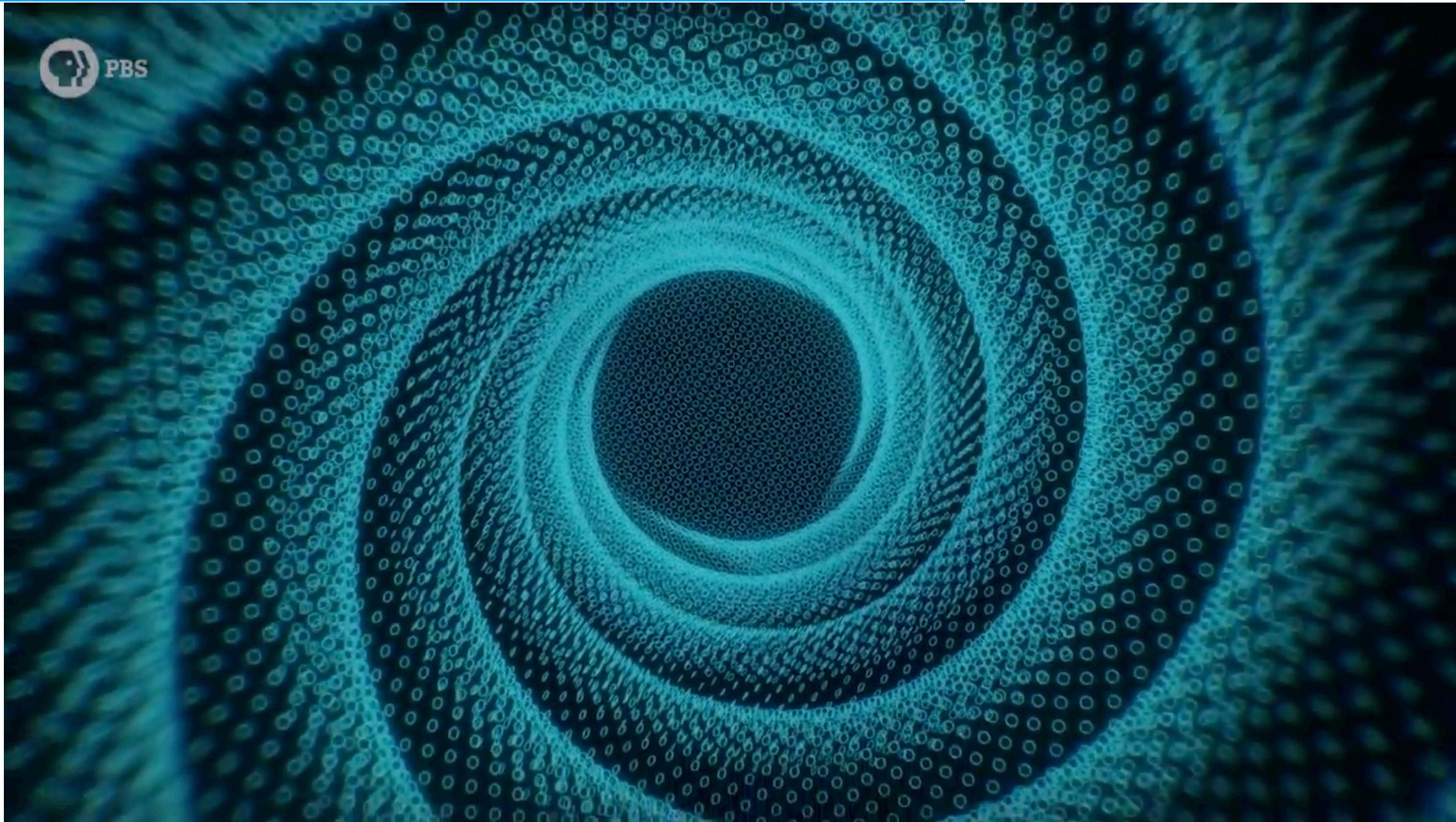


Ли Смолин



Петлевая гравитация

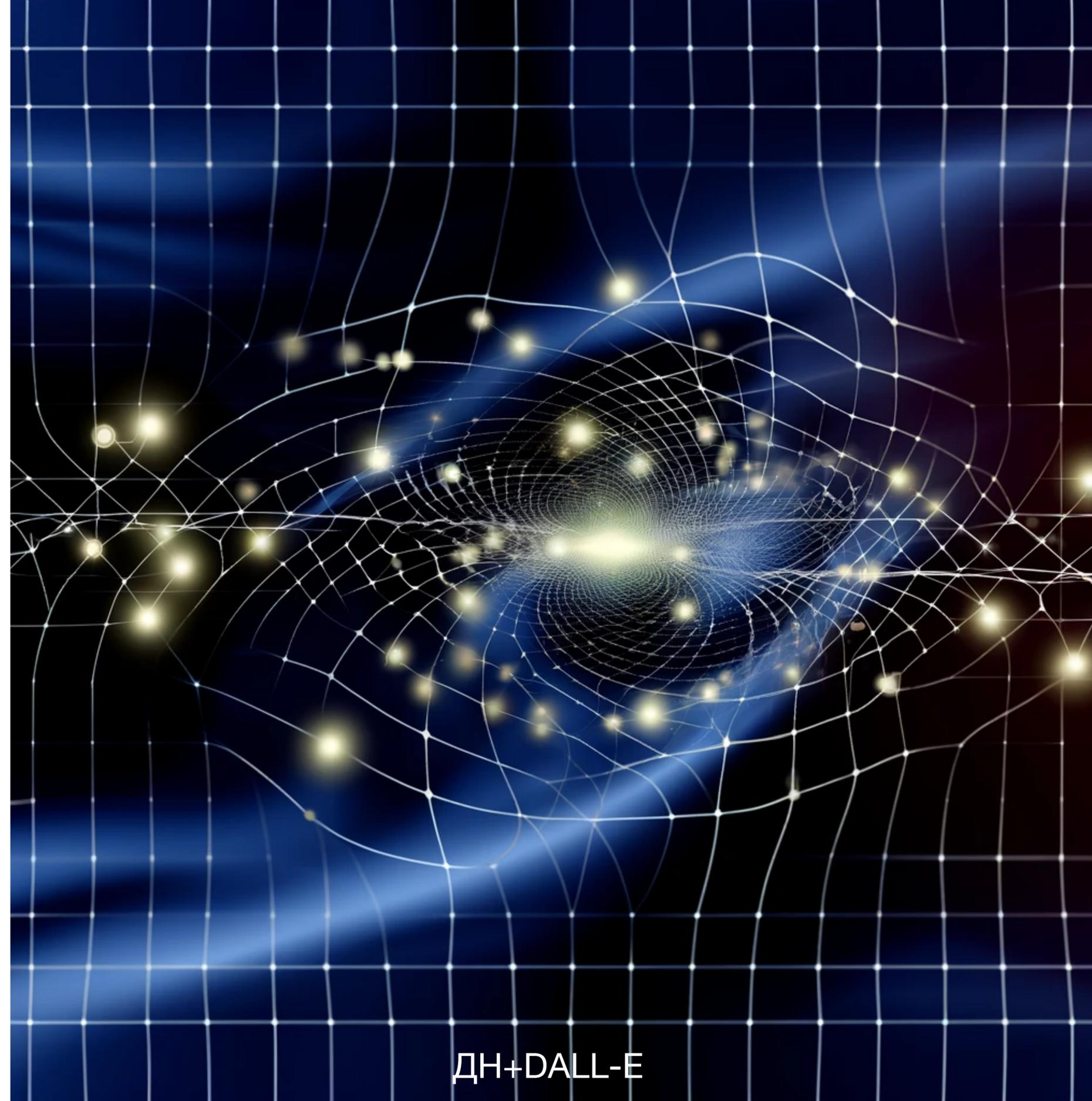
Любая геометрия как свитер, перчатки и
т.д. из петель



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?**