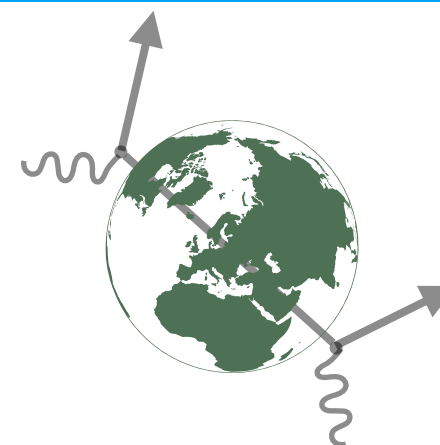


Мини-курс лекций для молодых ученых



# От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

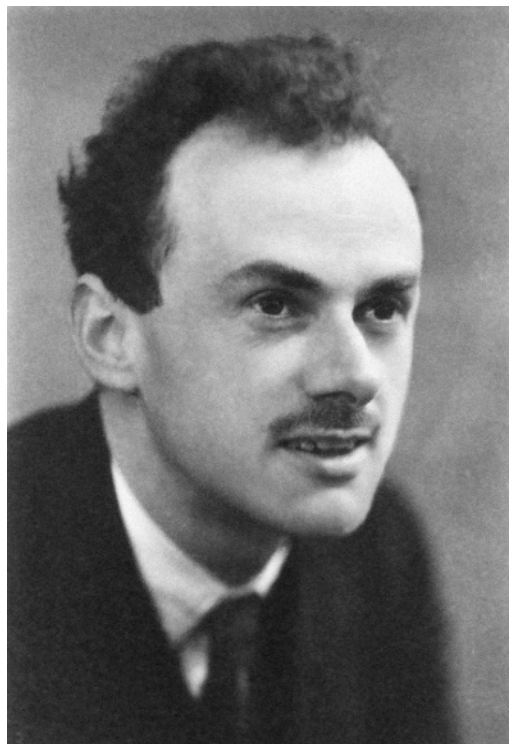
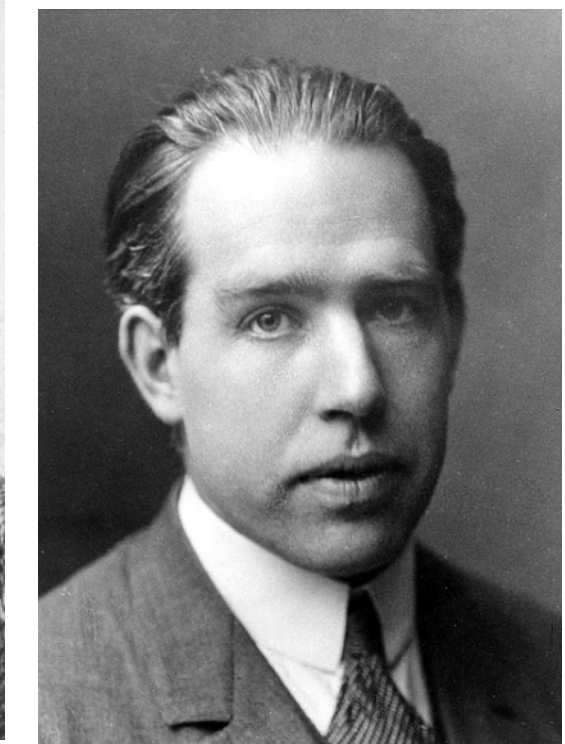
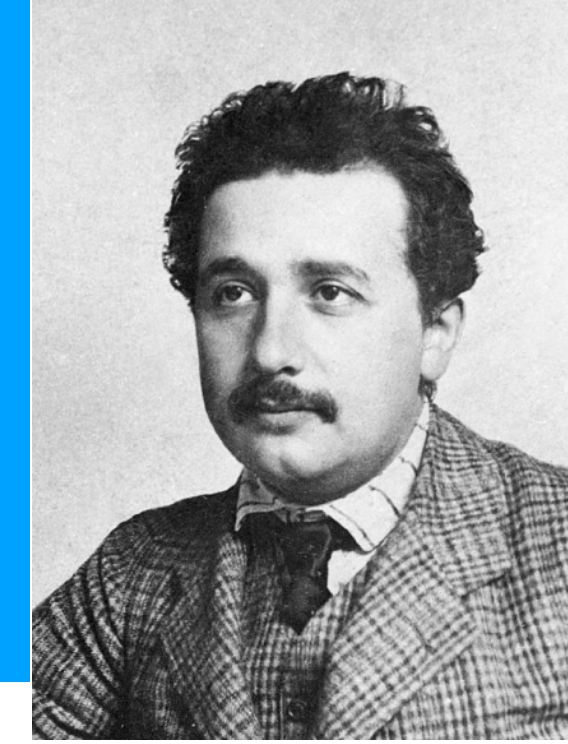
Дмитрий В.Наумов



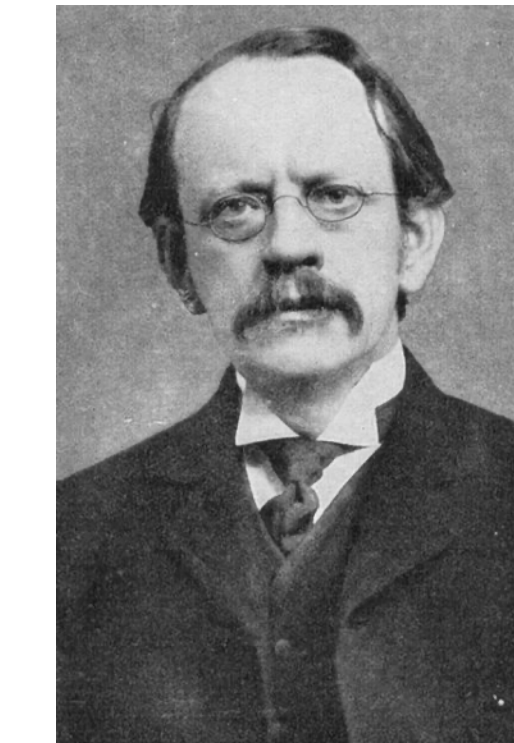
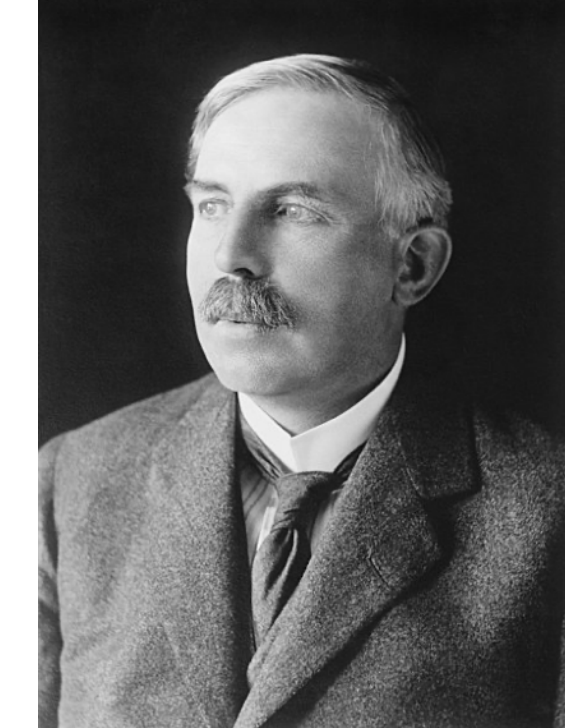
**На предыдущей лекции...**

# Физическая картина мира

К 1930 году



- **Специальная теория относительности**
  - Пространство-время, относительность одновременности, сокращение размеров, эквивалентность массы и энергии
- **Общая теория относительности**
  - Гравитация — это искривление пространства-времени
  - Черные дыры, гравитационные волны
- **Квантовая механика:**
  - Мир атомов и атомных ядер. (+ «ядерные электроны»)
  - Спин
  - Уравнение Дирака
- **Эксперимент:**
  - Электрон, протон, фотон
  - Два взаимодействия: электромагнитное и гравитационное



# Проблемы физической картина мира

К 1930 году.

## ○ **Квантовая механика:**

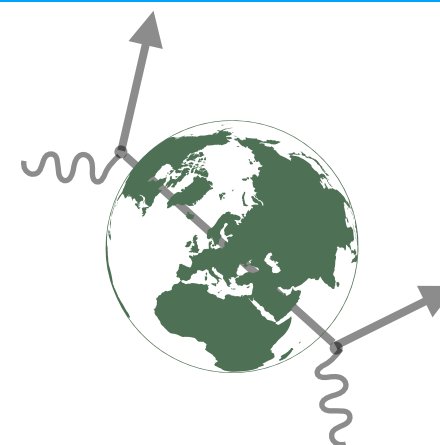
- Несовместимость с СТО и ОТО
- Что описывает уравнение Дирака?!
- Не умеет описывать рождение и уничтожение частиц
- Проблема измерения (коллапс волновой функции, нелокальность, ...)
- Природа силы

## ○ **Эксперимент:**

- Указание на существование новых взаимодействий: сильного и слабого



# Лекция 2. «Квантовая теория поля: бесконечные мучения и глоток надежды»



# Что такое квантовая теория поля?

- **Теория, объединяющая в себе:**
  - Квантовую механику
  - Специальную теорию относительности
  - Классическую теорию поля
- **Квантовая теория поля сегодня:**
  - **Универсальна:** применима к описанию всех известных взаимодействий, за исключением гравитации
  - **Предсказательна:** Точно предсказывает физические явления, подтвержденные экспериментально
  - **Фундаментальна:** лежит в основе Стандартной Модели
  - **Технологична:** разработка новых материалов и технологий (транзисторы, лазеры, сверхпроводники и т.д.)

# Текущие вызовы

- **Квантовая гравитация:**

- Объединение гравитации и КТП — передний край научных исследований

- **Темная энергия и темная материя:**

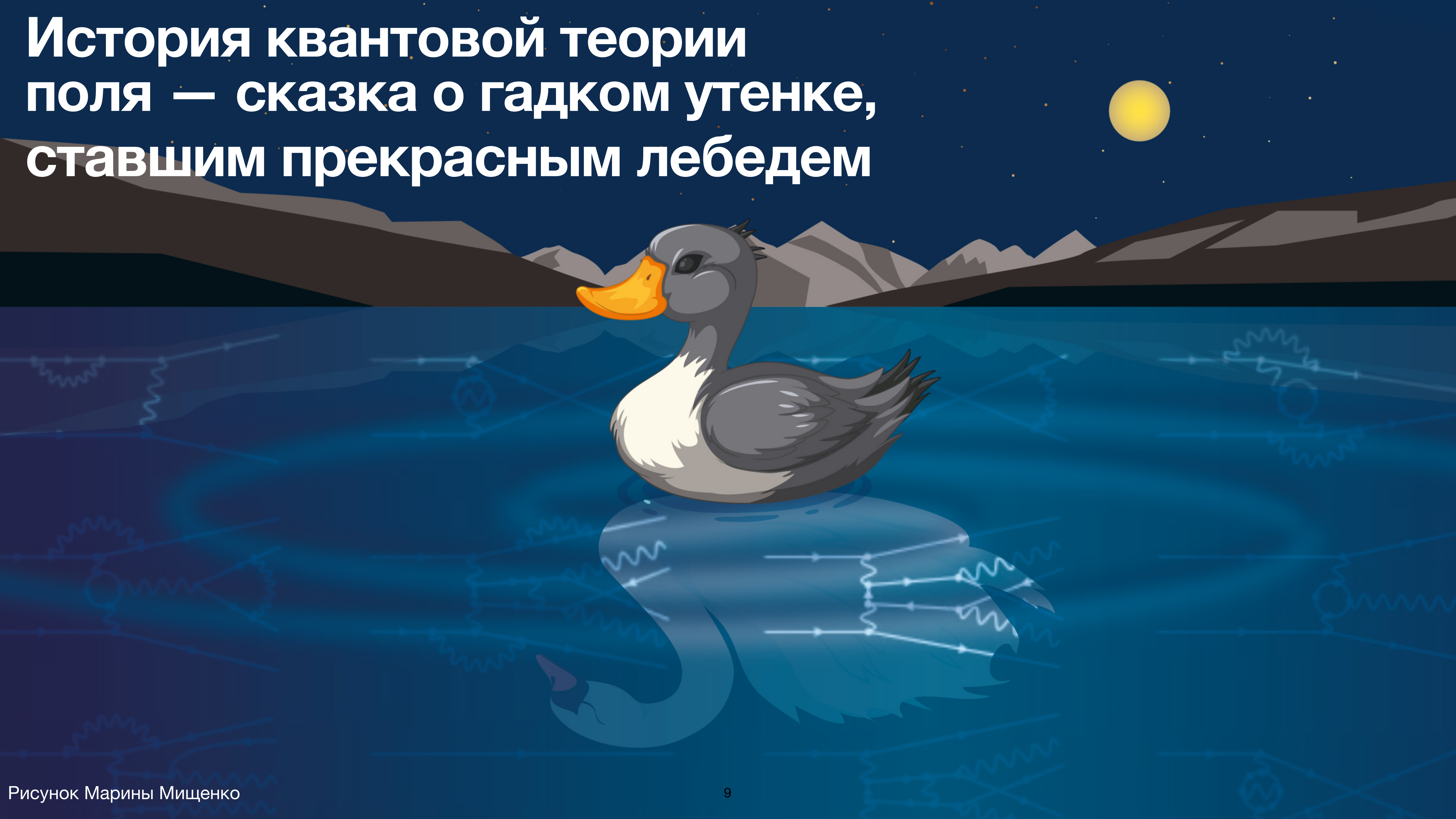
- Загадки современной физики

# История квантовой теории поля — сказка о гадком утенке,





# История квантовой теории поля — сказка о гадком утенке, ставшим прекрасным лебедем



**Что такое физическое поле?**

# Поле = функция пространства-времени

- **Важнейшее отличие поля от волновой функции**
  - Физическое поле может обладать плотностью энергии-импульса, момента импульса и другими физически наблюдаемыми свойствами в каждой точке.

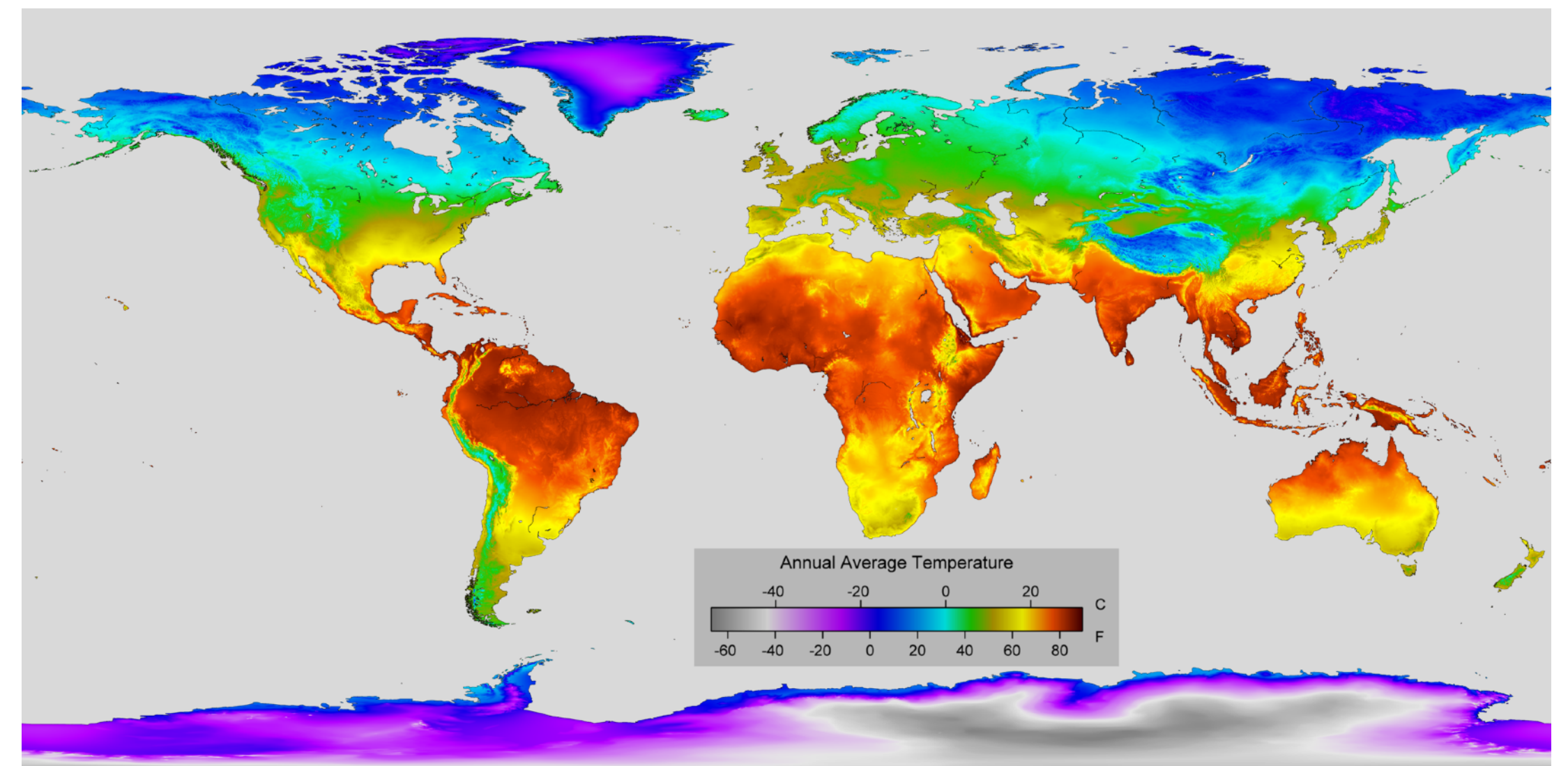
- **Функция:**

- Число
- Вектор
- Тензор
- Спинор

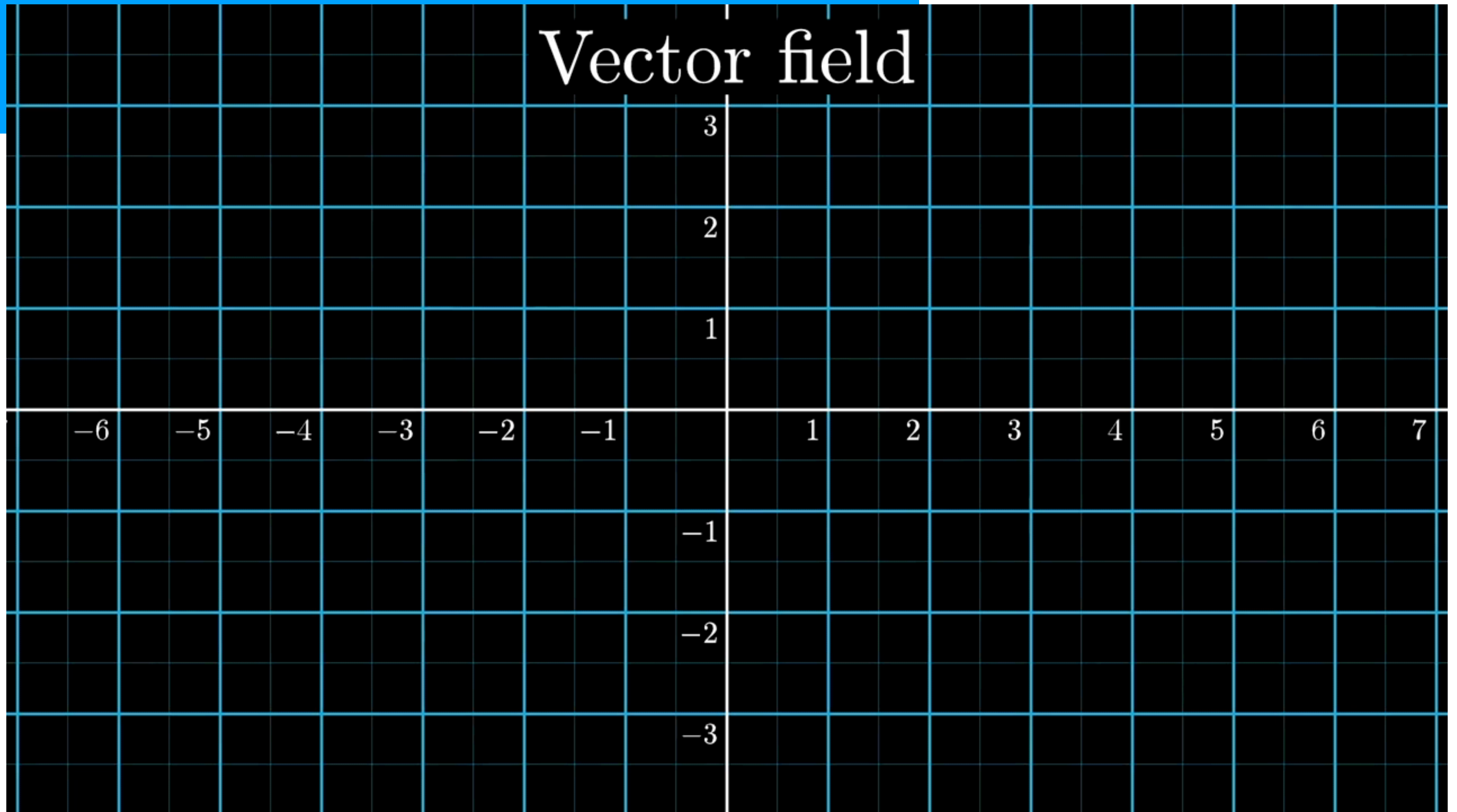
## Поле

- Скалярное
- Векторное
- Тензорное
- Спинорное

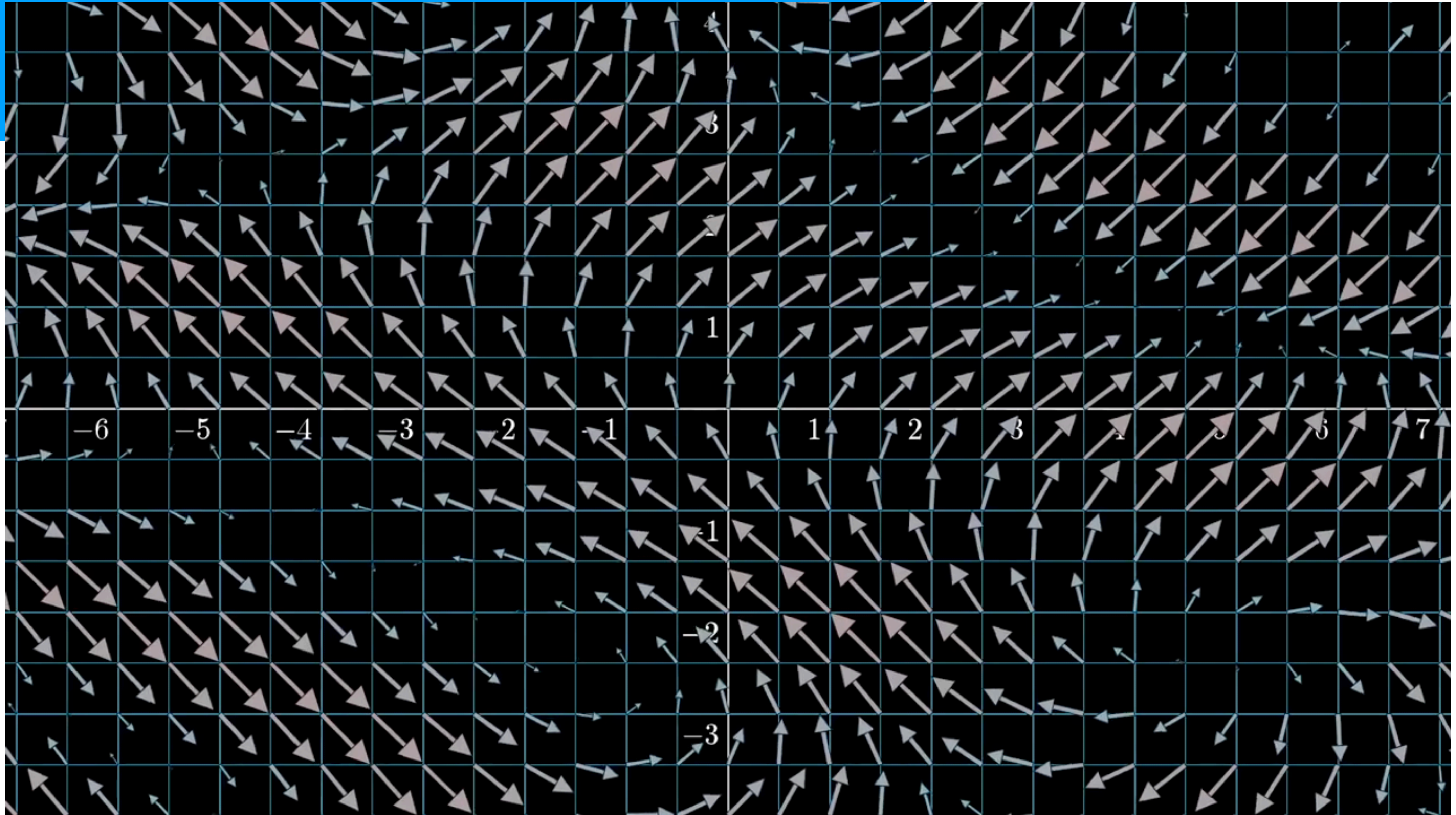
## Пример



# Пример: векторное поле



# Волны поля

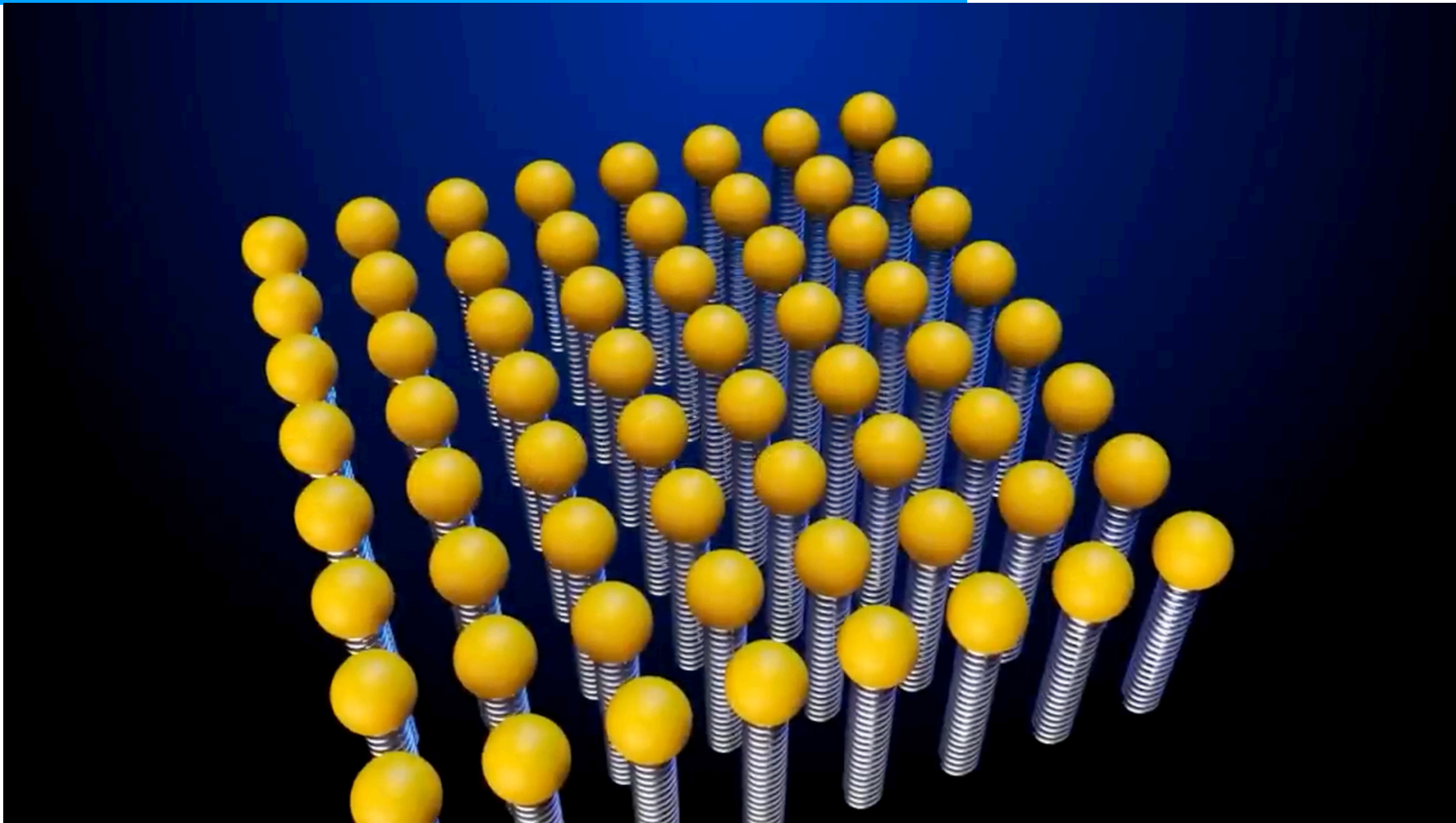


# Квантовое поле

# Ортопедический матрац

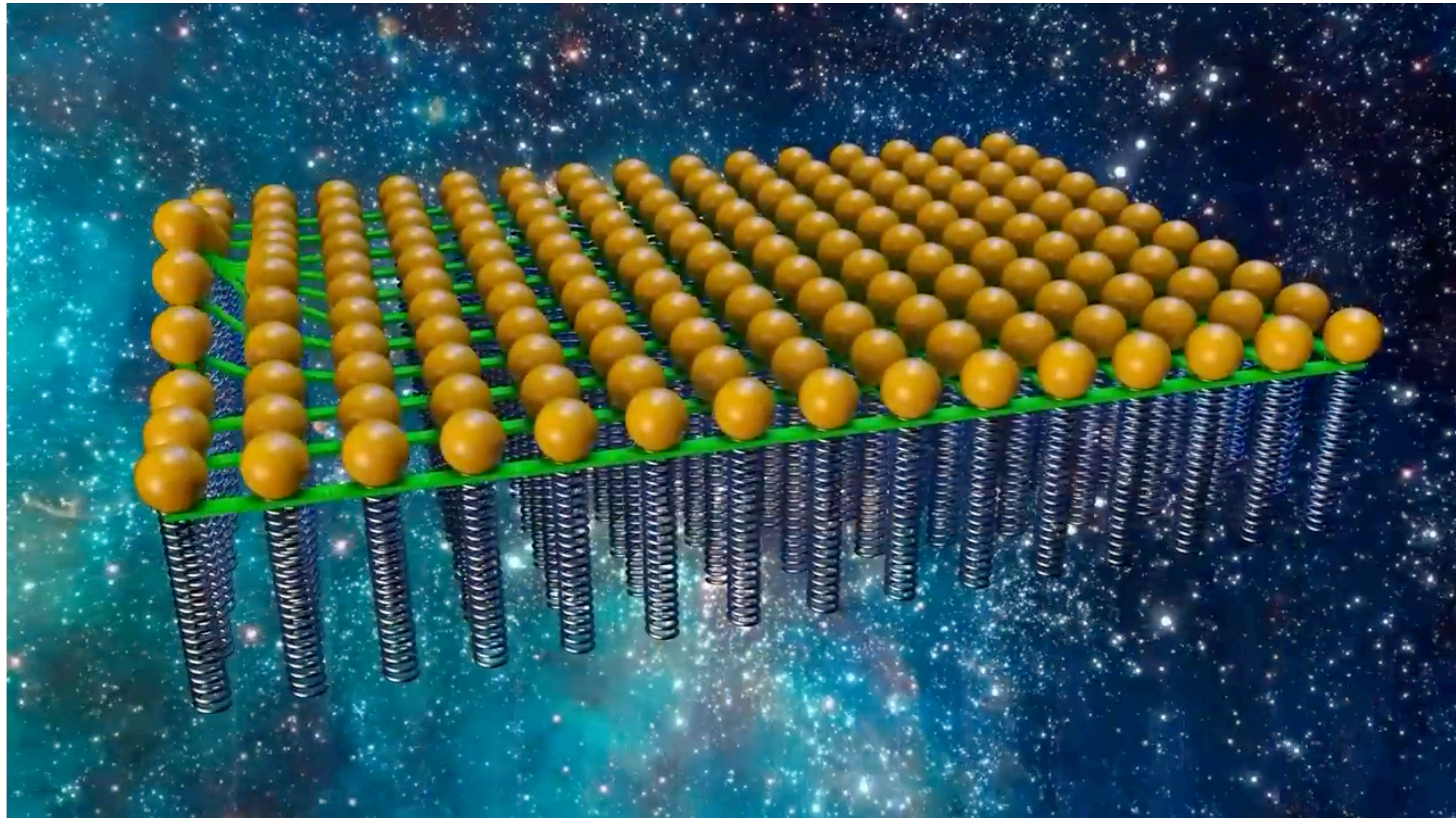
Хорошая аналогия для квантового поля

Квантовый осциллятор  
не знает покоя!



# «Частица» = волна поля

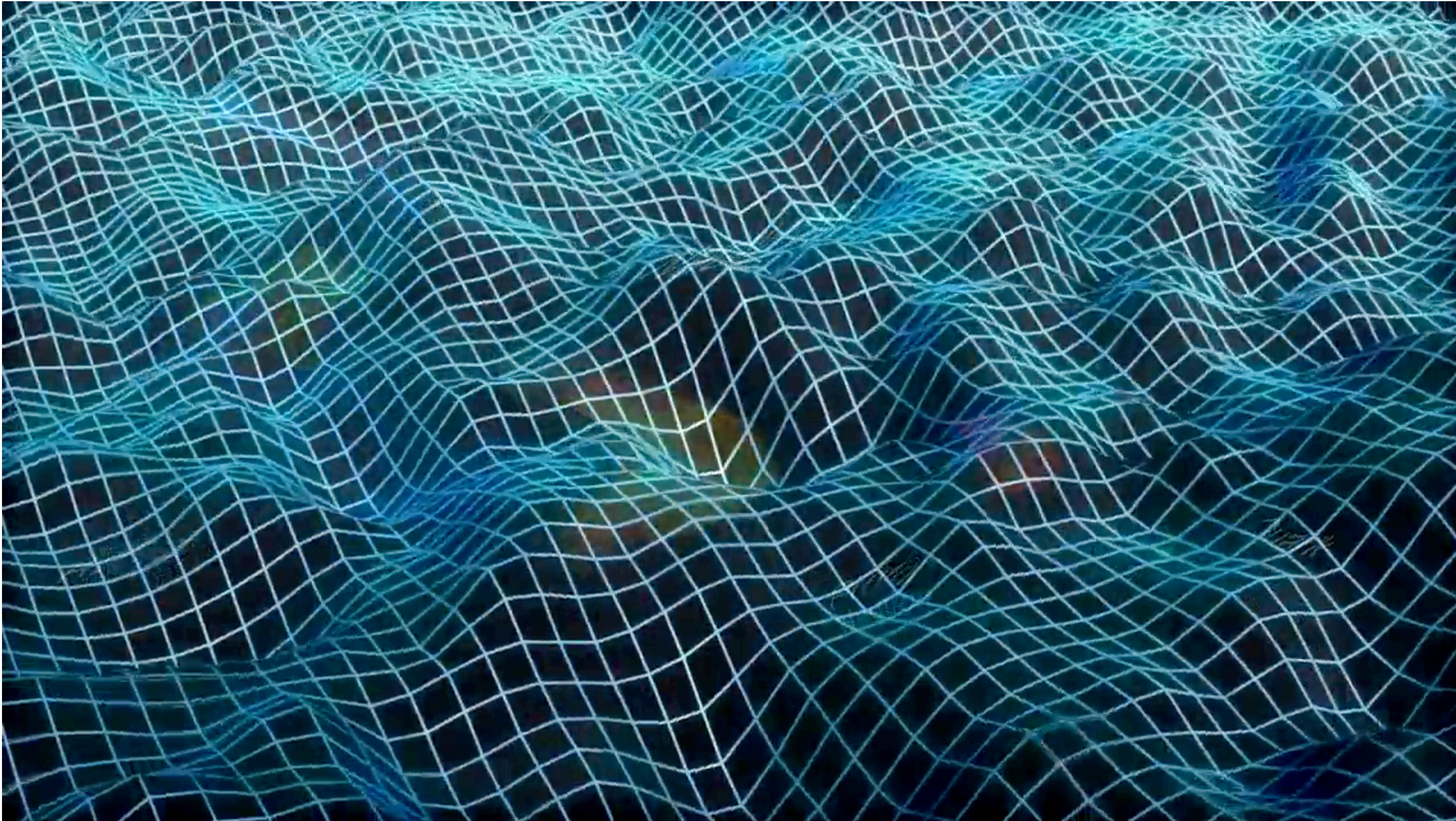
В квантовой теории



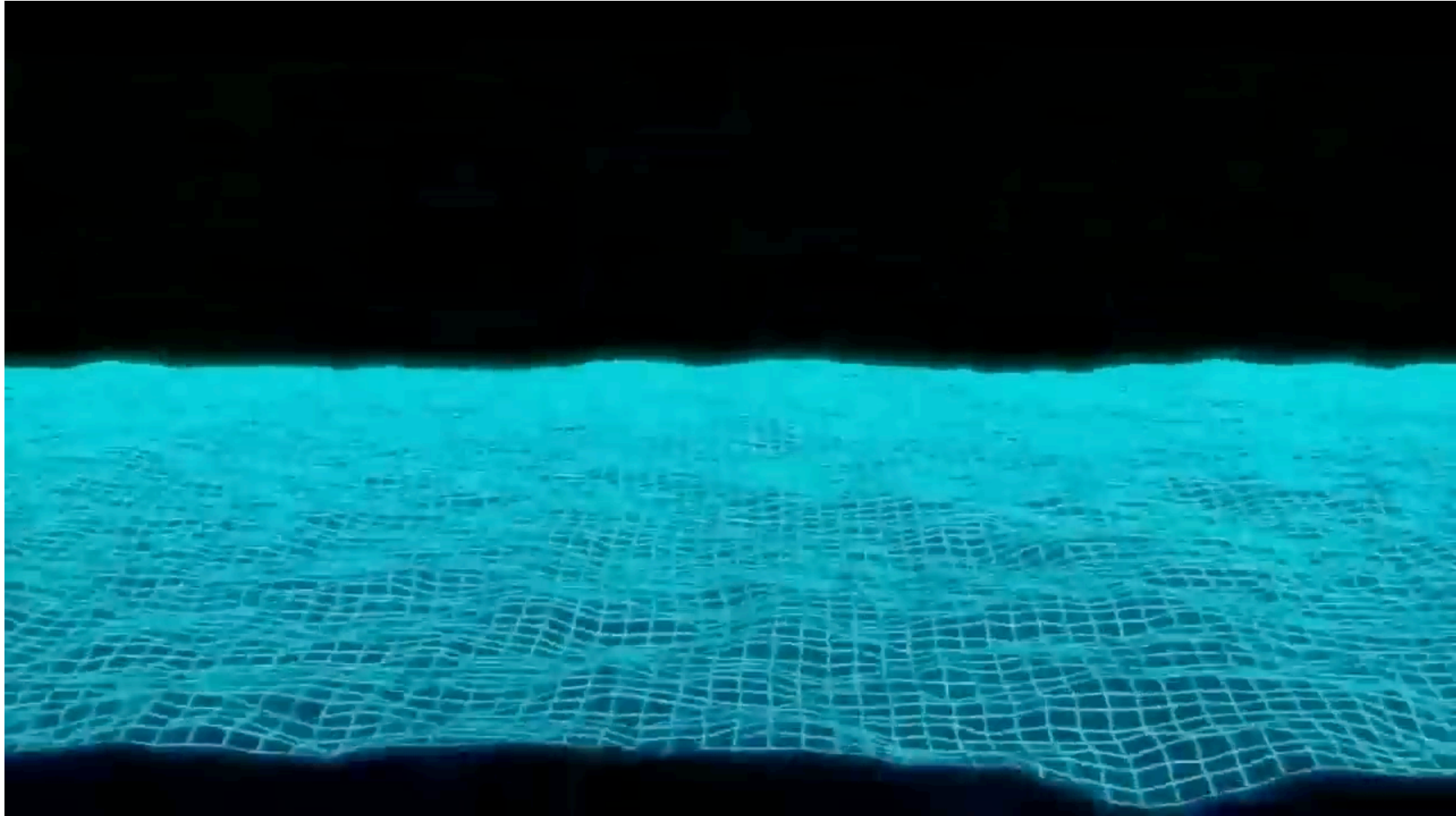


# От матраца к полю

Квантовое поле не бывает в покое



# Число «частиц» может меняться со временем



# «Квантовость» поля

## Число «частиц» дискретно

### ○ Что такое «частица» в квантовой теории поля?

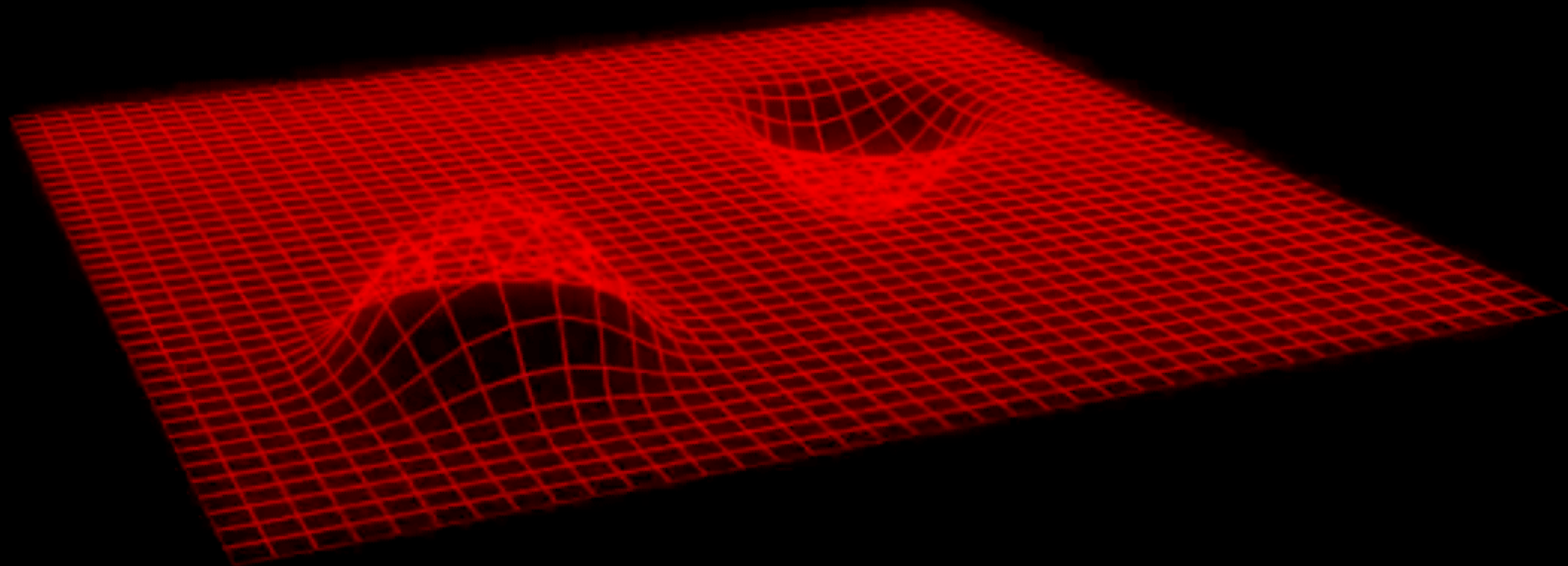
- Это волна с энергией, не меньшей, чем масса частицы:  $E \geq mc^2$
- Если передать полю меньшую энергию, частица не рождается
- Точечной частицы в КТП не существует!

### ○ Поле заполняет всю Вселенную.

- Поле электрона одно во всей Вселенной
- Электронов может быть сколько угодно, если передать полю нужную энергию и не забыть про сохранение электрического заряда
- Поле никогда не бывает в покое. Даже в отсутствии электронов. Как это называется?

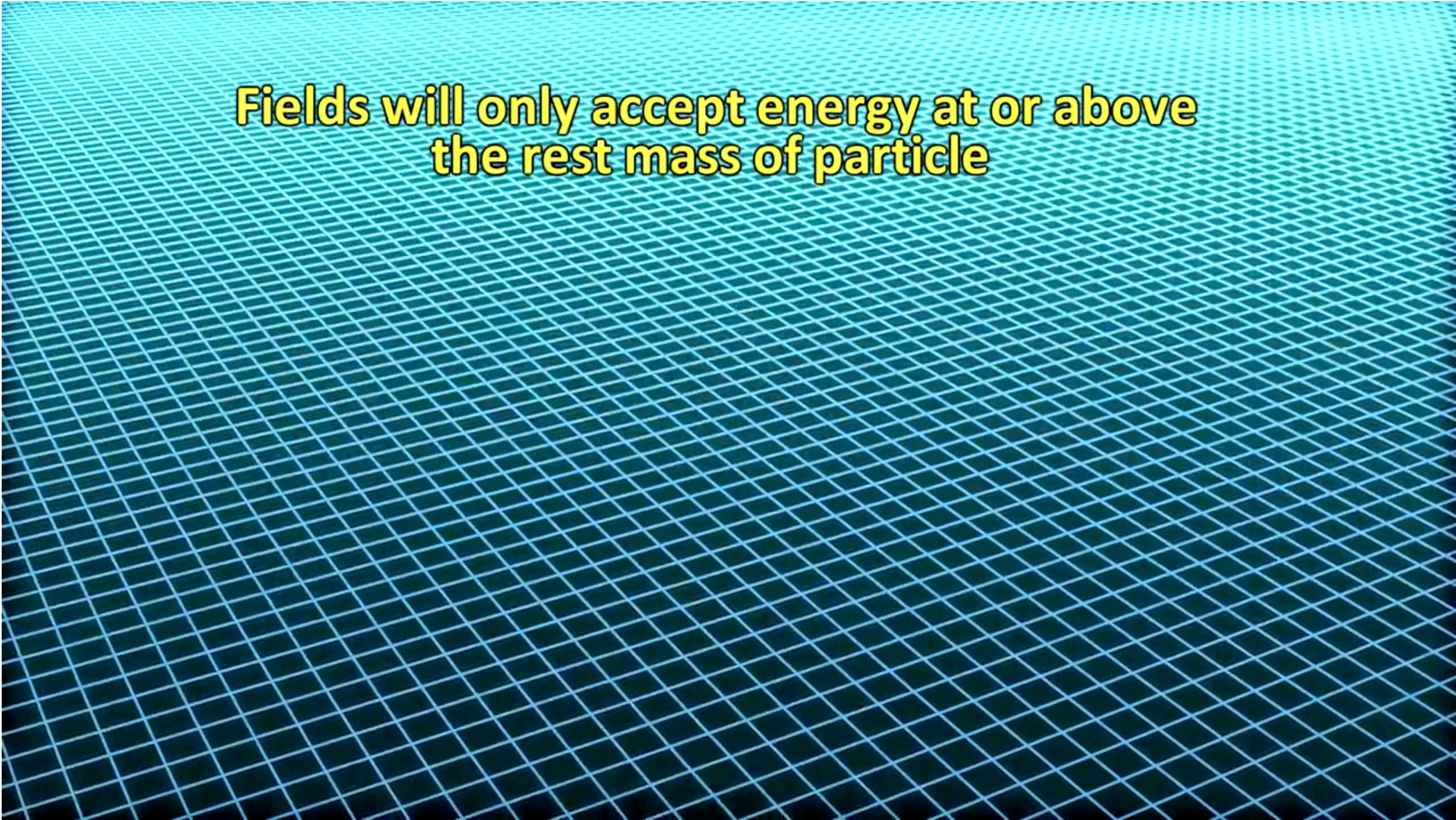
# Виртуальные частицы

Виртуальные частицы рождаются на время  $\Delta t \sim \text{энергия частиц}^{-1}$



# «Квантовость» поля

Число «реальных частиц» дискретно



Fields will only accept energy at or above  
the rest mass of particle

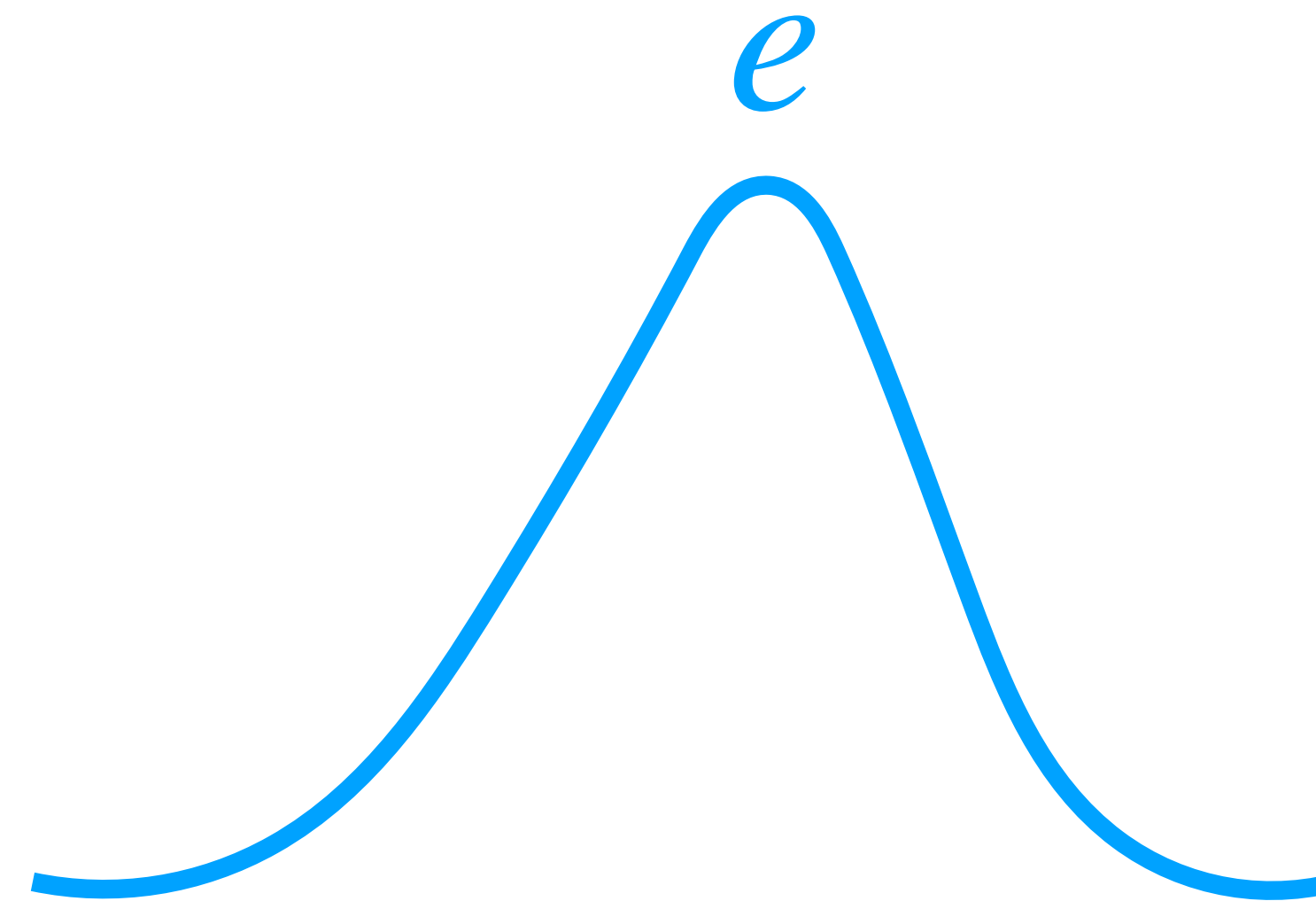
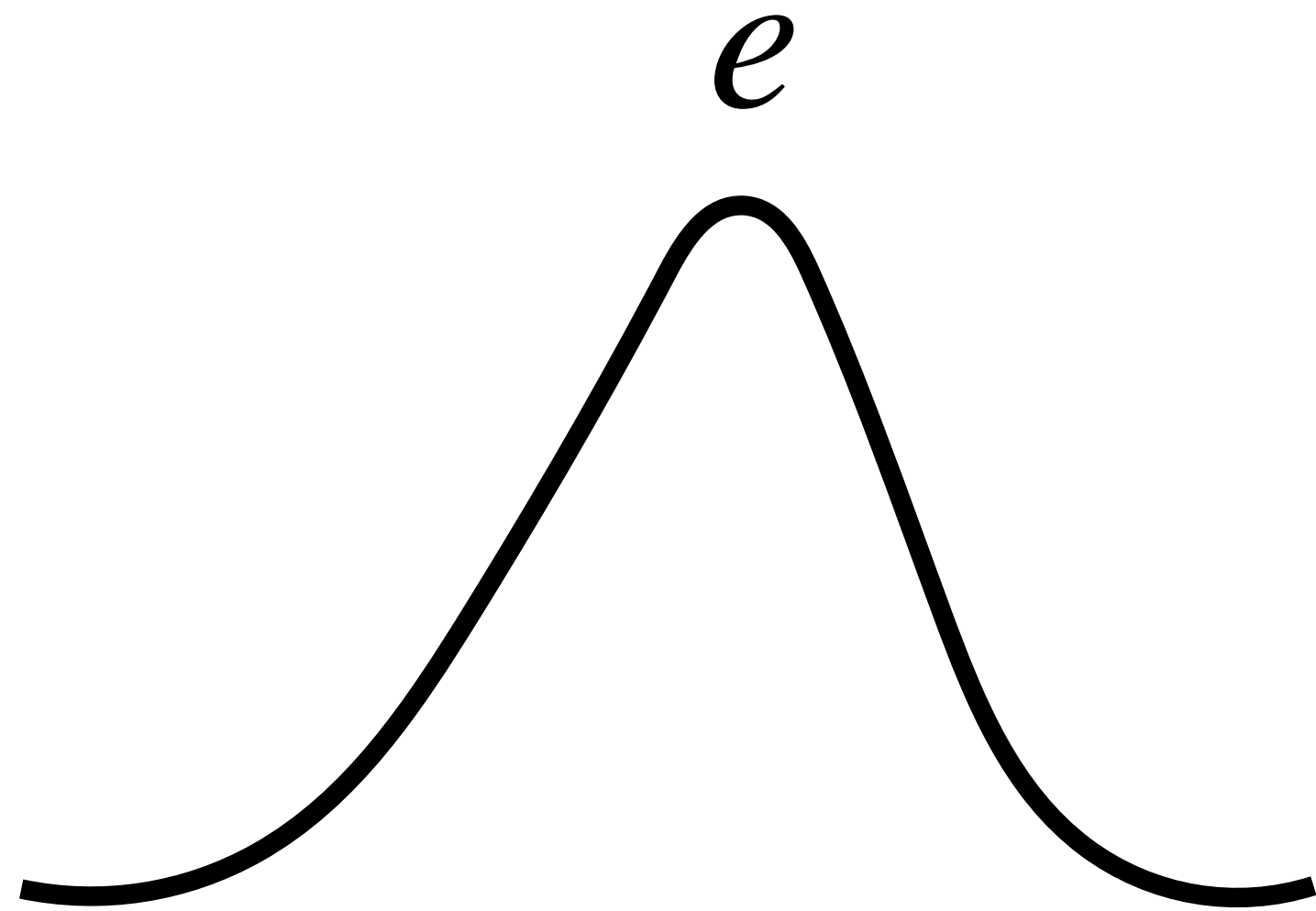
# Природа силы



Мастер Йода

# Ожидание

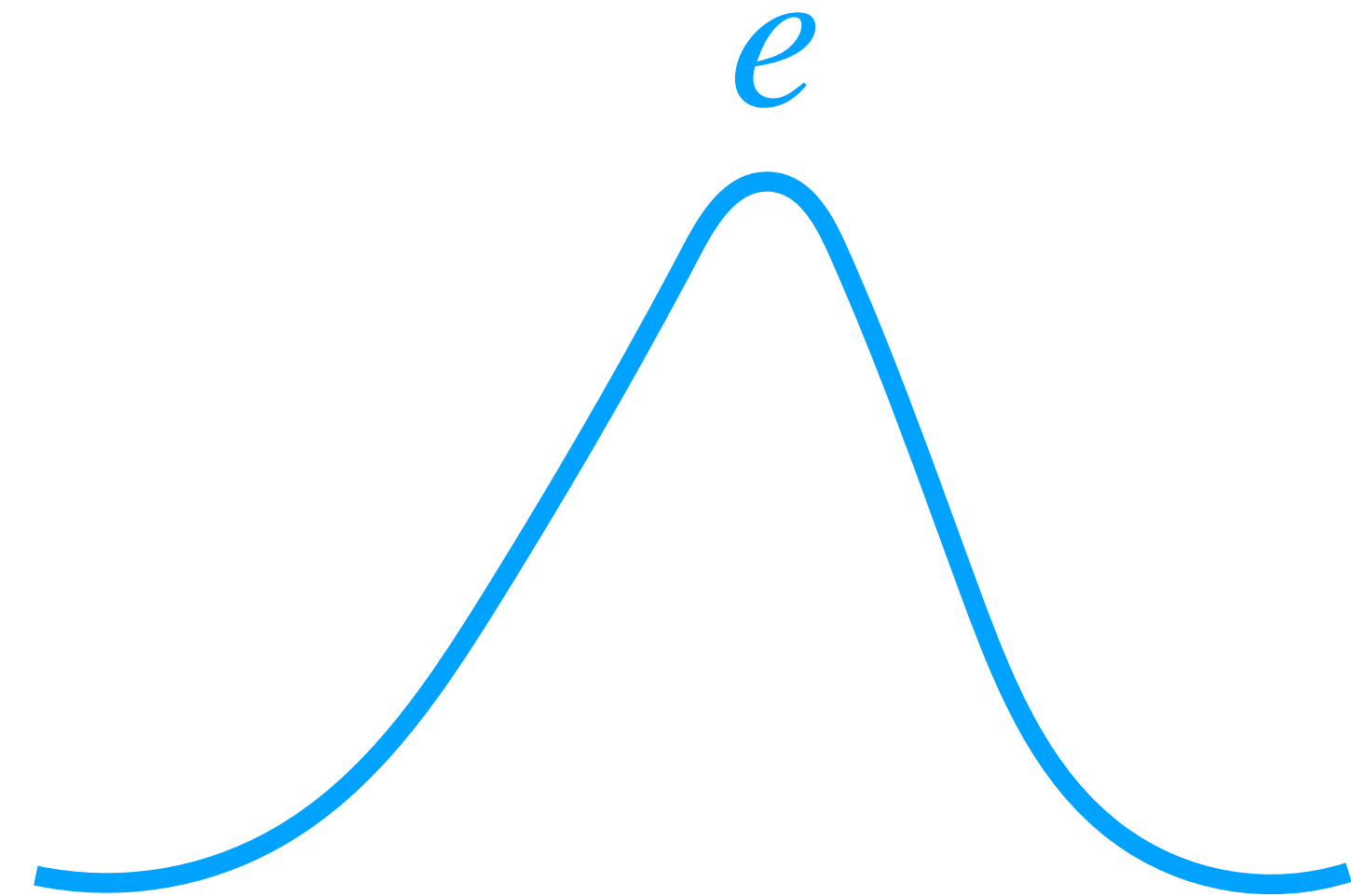
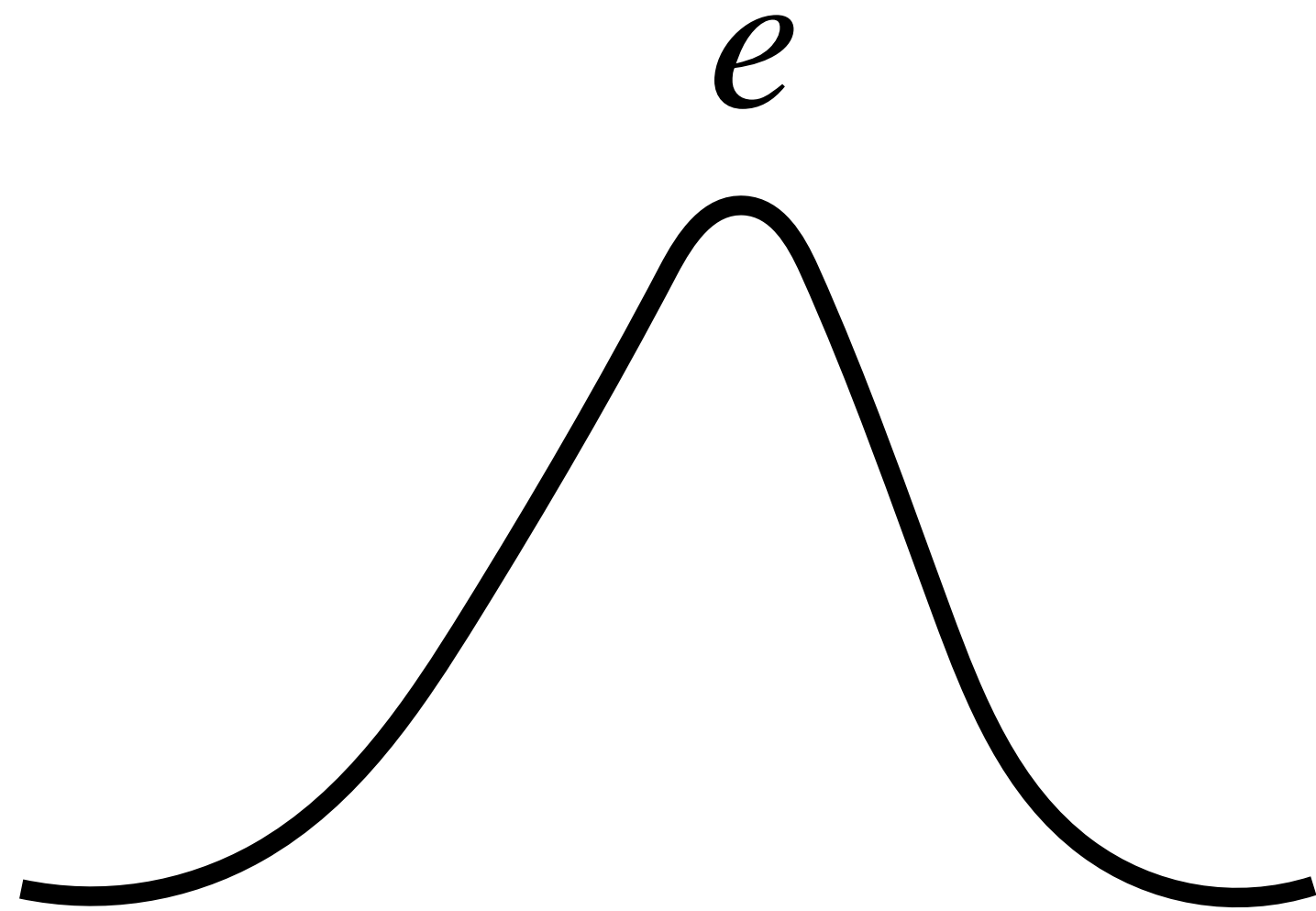
Электроны отталкиваются





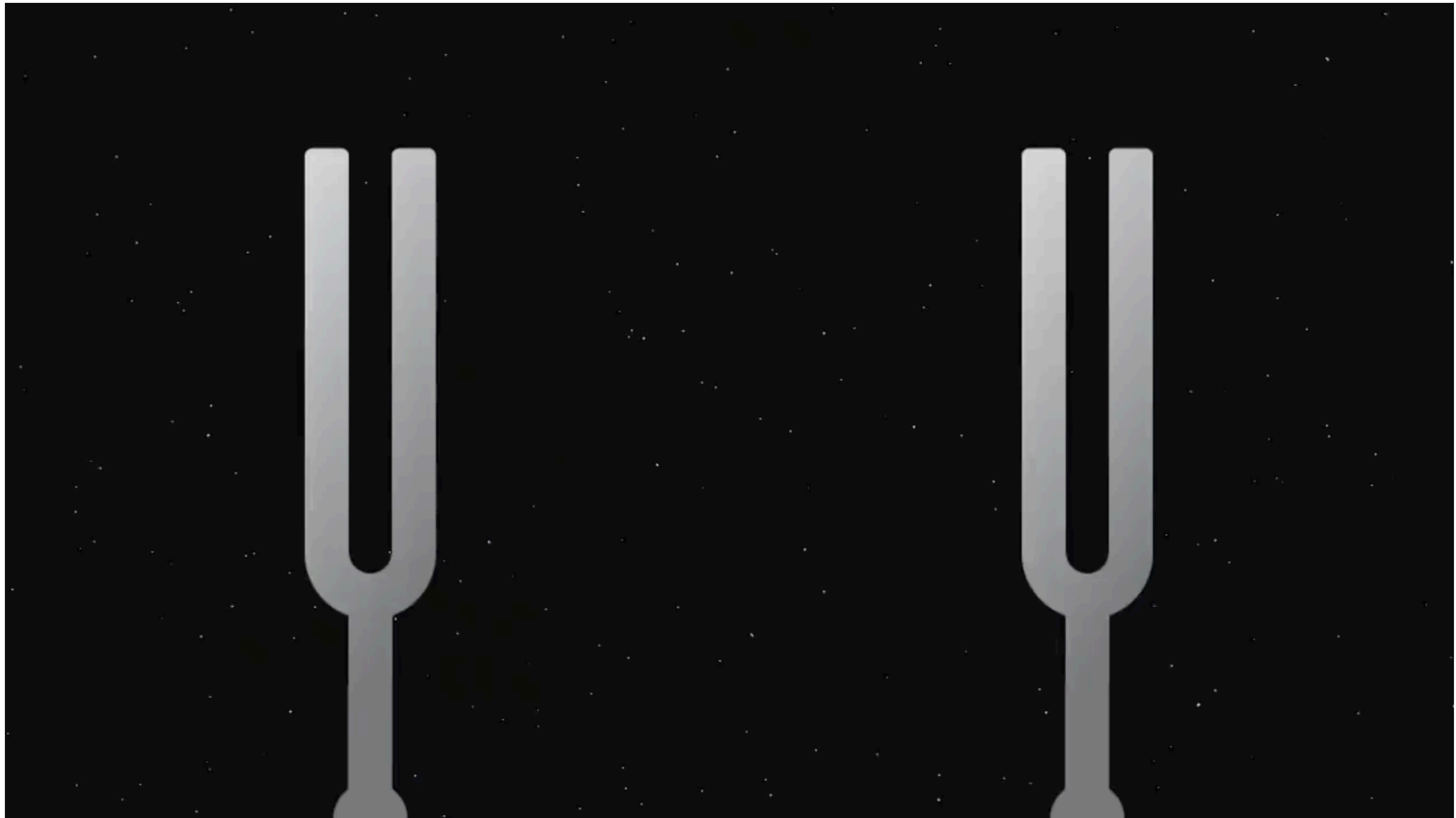
# Реальность

Полный игнор



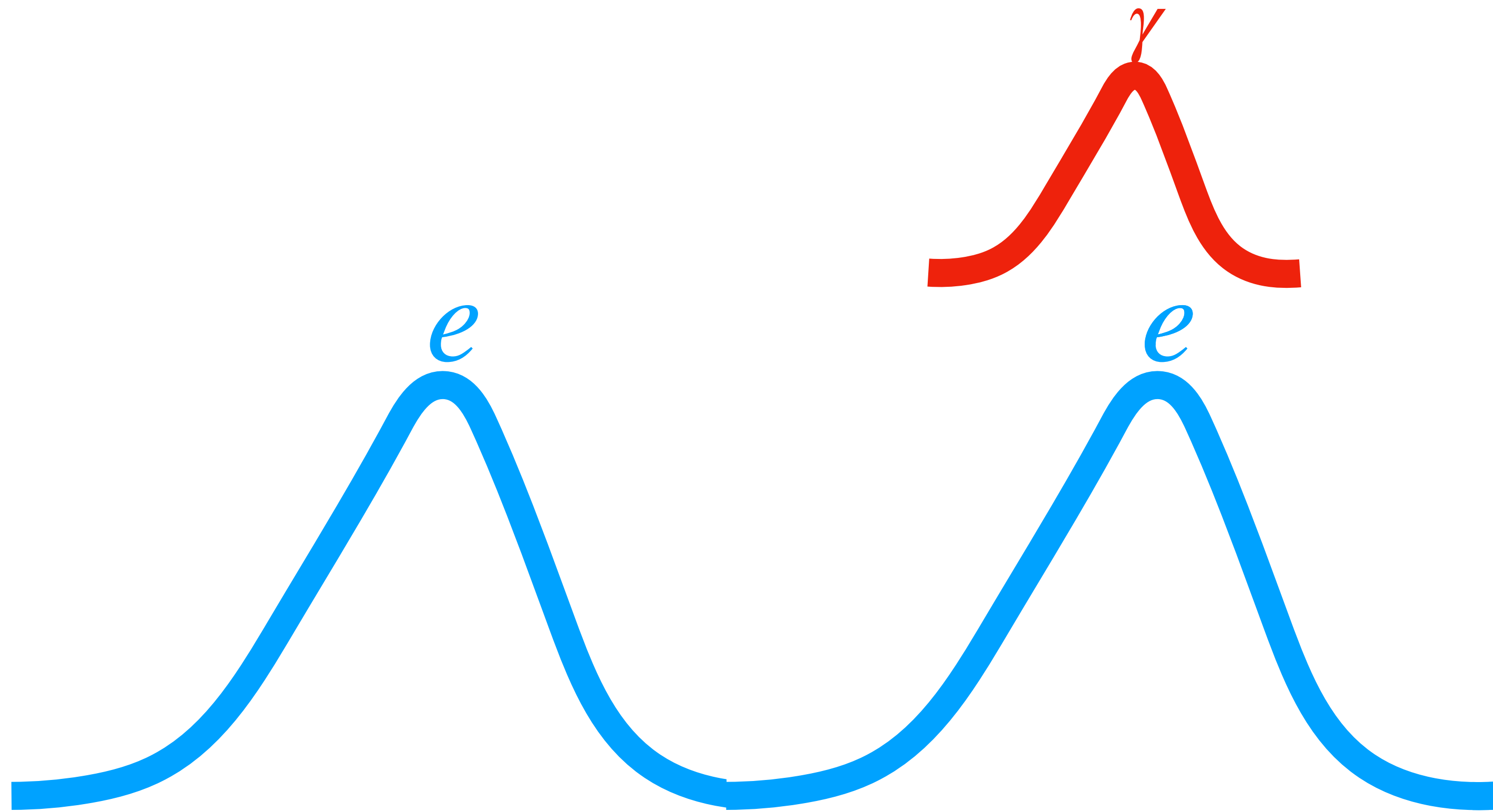
**Почему электроны не чувствуют друг друга?!**

# Две вилки в воздухе



# Для взаимодействия электронов необходимо Электромагнитное поле!

- 1 Поле электрона получает энергию  
 $E \geq m_e c^2$
- 2 Поле электрона может передать часть  
энергии ЭМ полю
- 3 ЭМ поле может вернуть энергию полю  
электрона



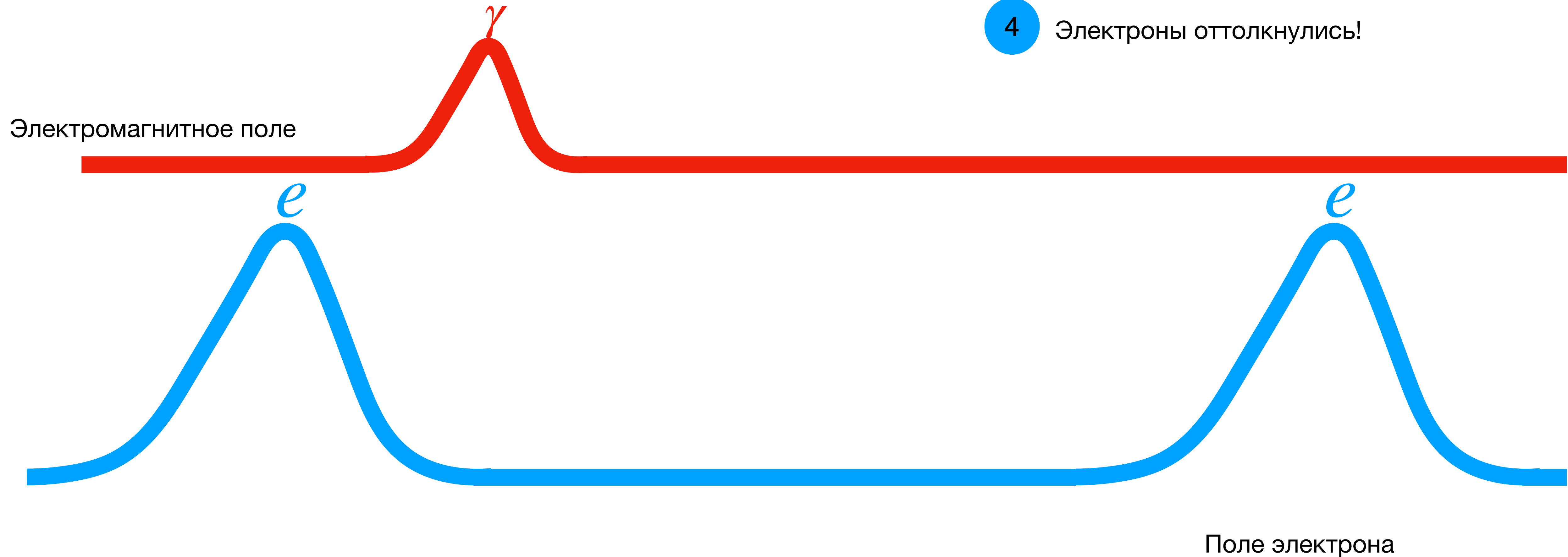
Электромагнитное поле

Поле электрона

# Рассмотрим два электрона

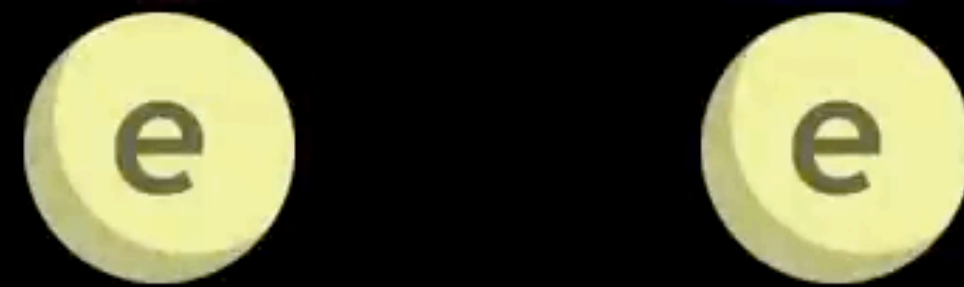
В присутствии электромагнитного поля

- 1 Двигутся на встречу друг другу
- 2 Левый электрон передал часть энергии эм полю
- 3 ЭМ поле вернуло энергию правому электрону
- 4 Электроны оттолкнулись!



# Отталкивание электронов

— результат обмена виртуальными фотонами



# Сила = результат обмена квантом поля

## ○ Еще одна революционная идея

— Правильно объясняет притяжение и отталкивание как результат квантовой интерференции

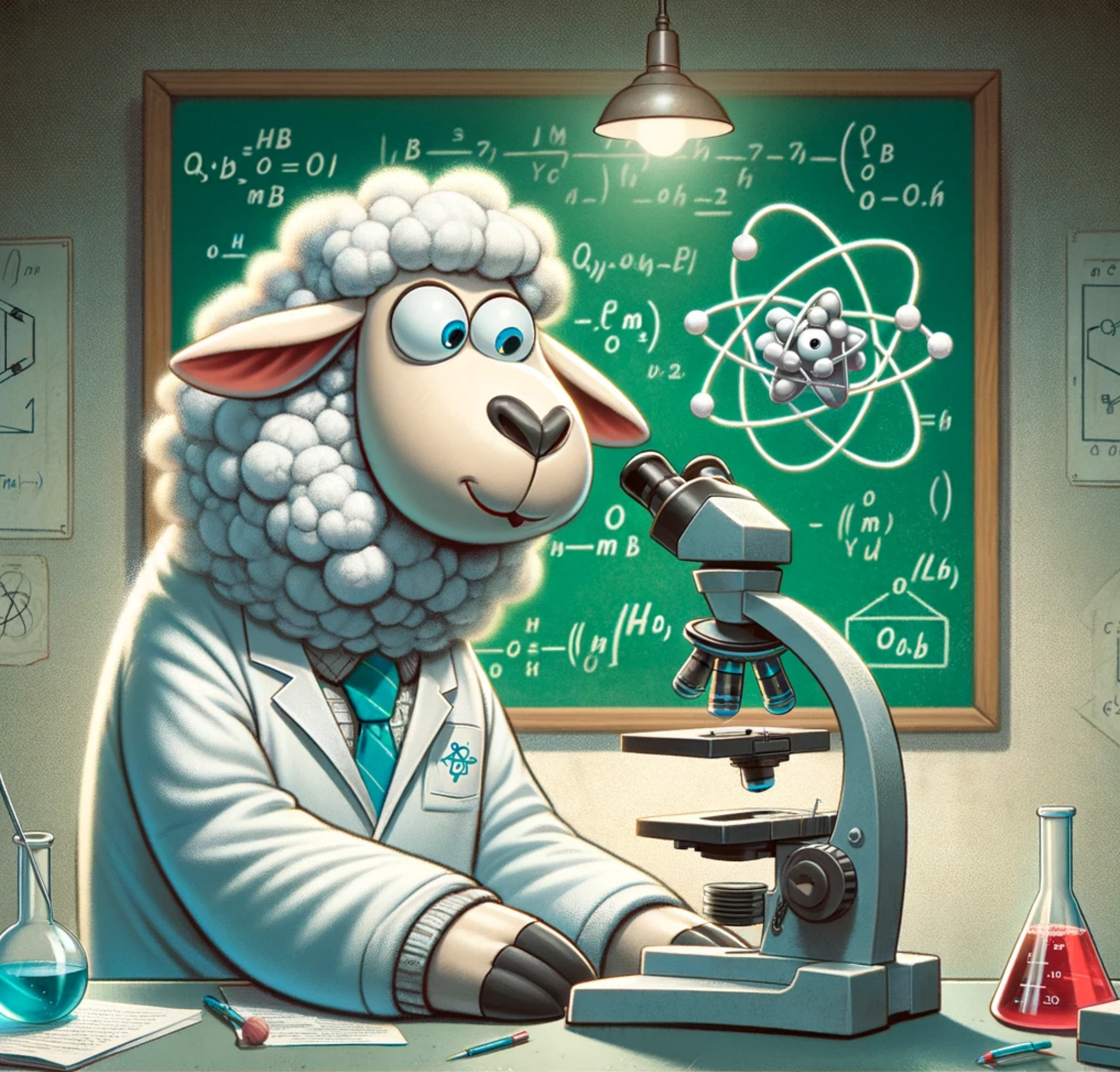
— Потенциал взаимодействия зависит от массы переносчика взаимодействия

## ○ Сила взаимодействия зависит от размерности пространства

	1d	2d	3d
Сила $\propto$	$C$	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$
	$m_\gamma = e^2/\pi$		



Хидеки Юкава. НП 1949



# Лэмбовский сдвиг

«Объяснение Лэмбовского сдвига  
фундаментально изменило характер  
теоретической физики»  
П.А. Дирак

# Атом водорода

## Энергетический спектр

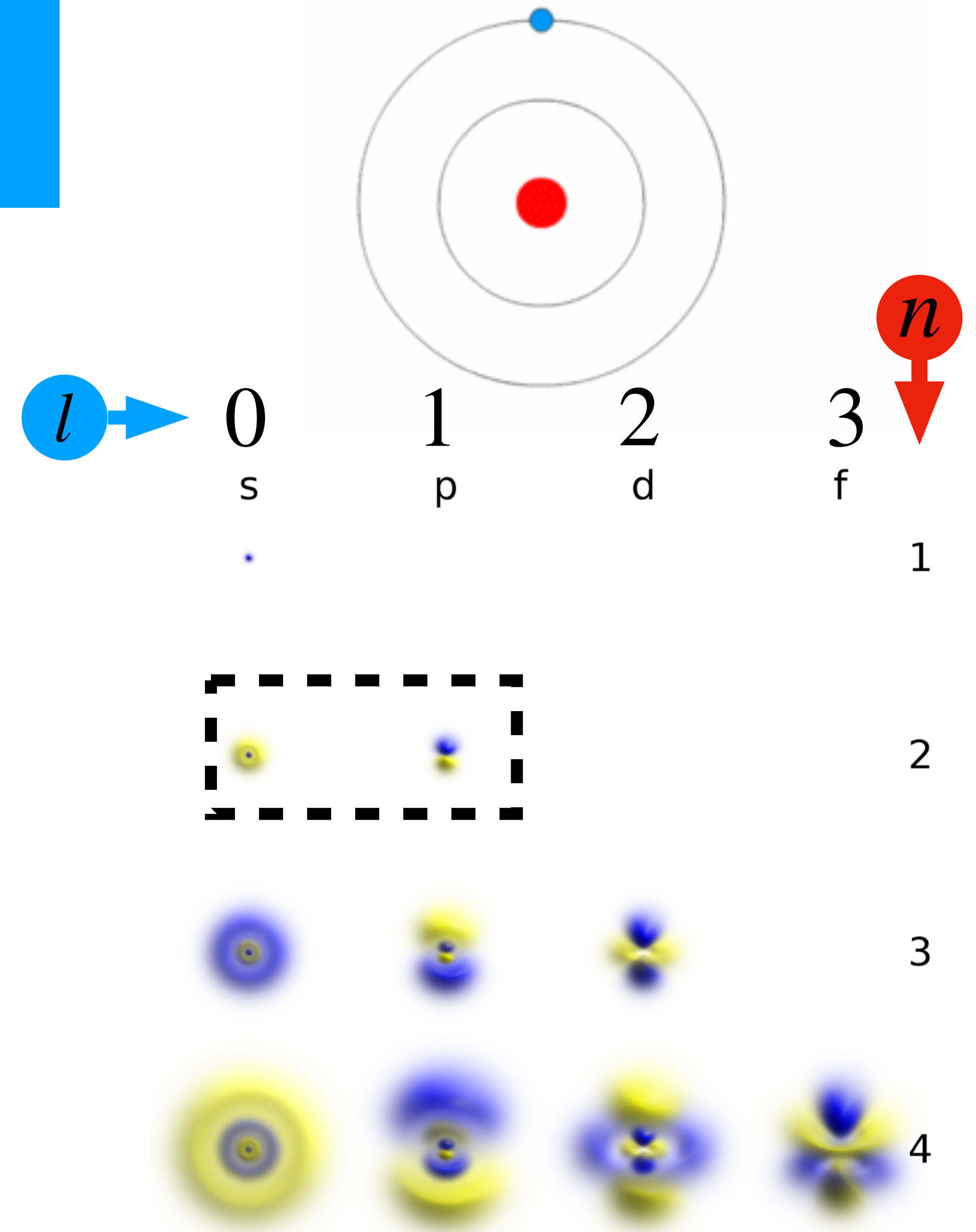
### ○ Согласно квантовой механике

— Волновая функция зависит от трех квантовых чисел  $n, l, m$

— Энергия «орбитали» зависит только от  $n$

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ эВ}}{n^2}$$

— Для  $n = 2$  энергия s- и p-«орбиталей» одинакова





# Атом водорода

## Энергетический спектр

### ○ Согласно квантовой механике

— Для  $n = 2$  энергия s- и p-«орбиталей» одинакова

### ○ Теория Дирака

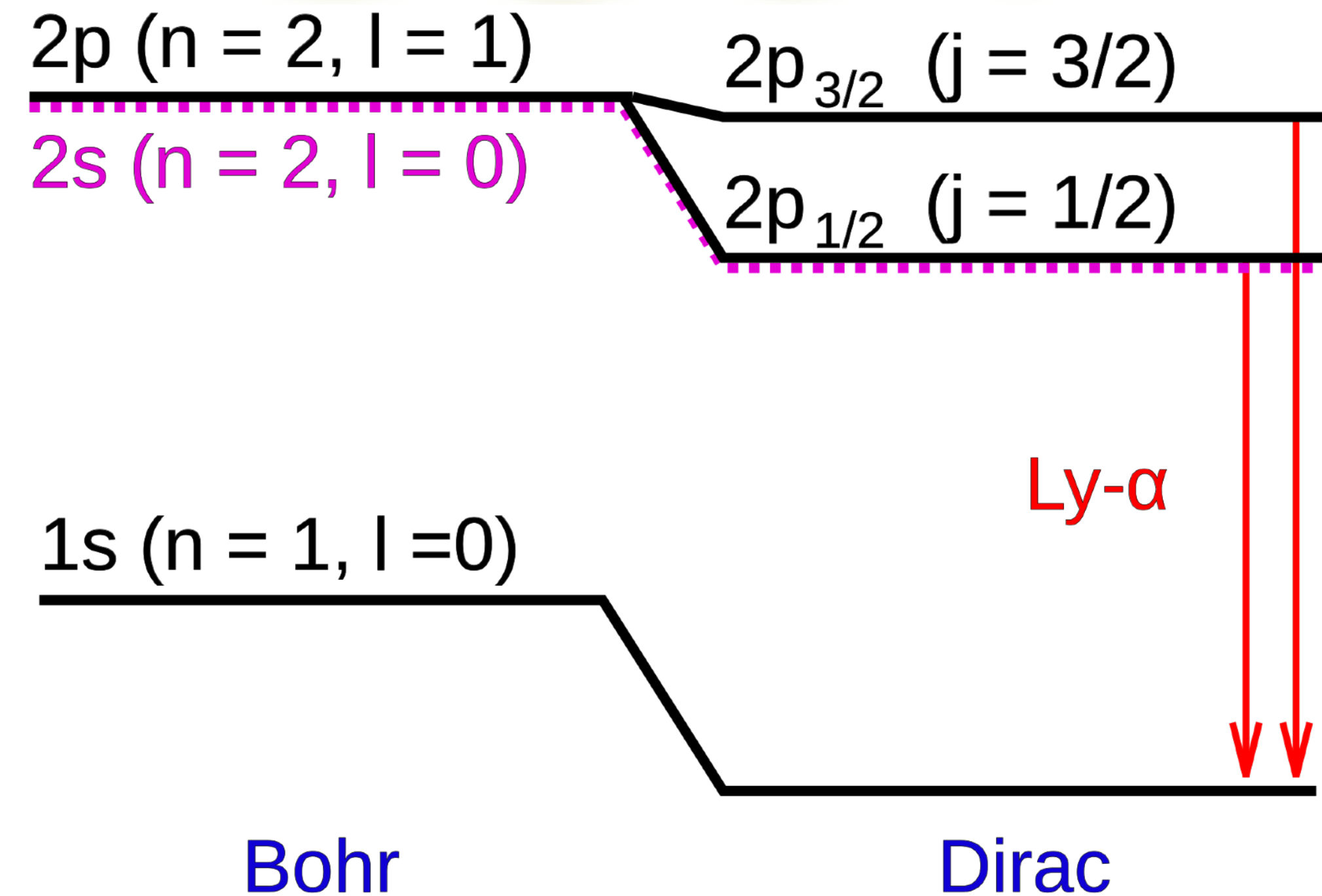
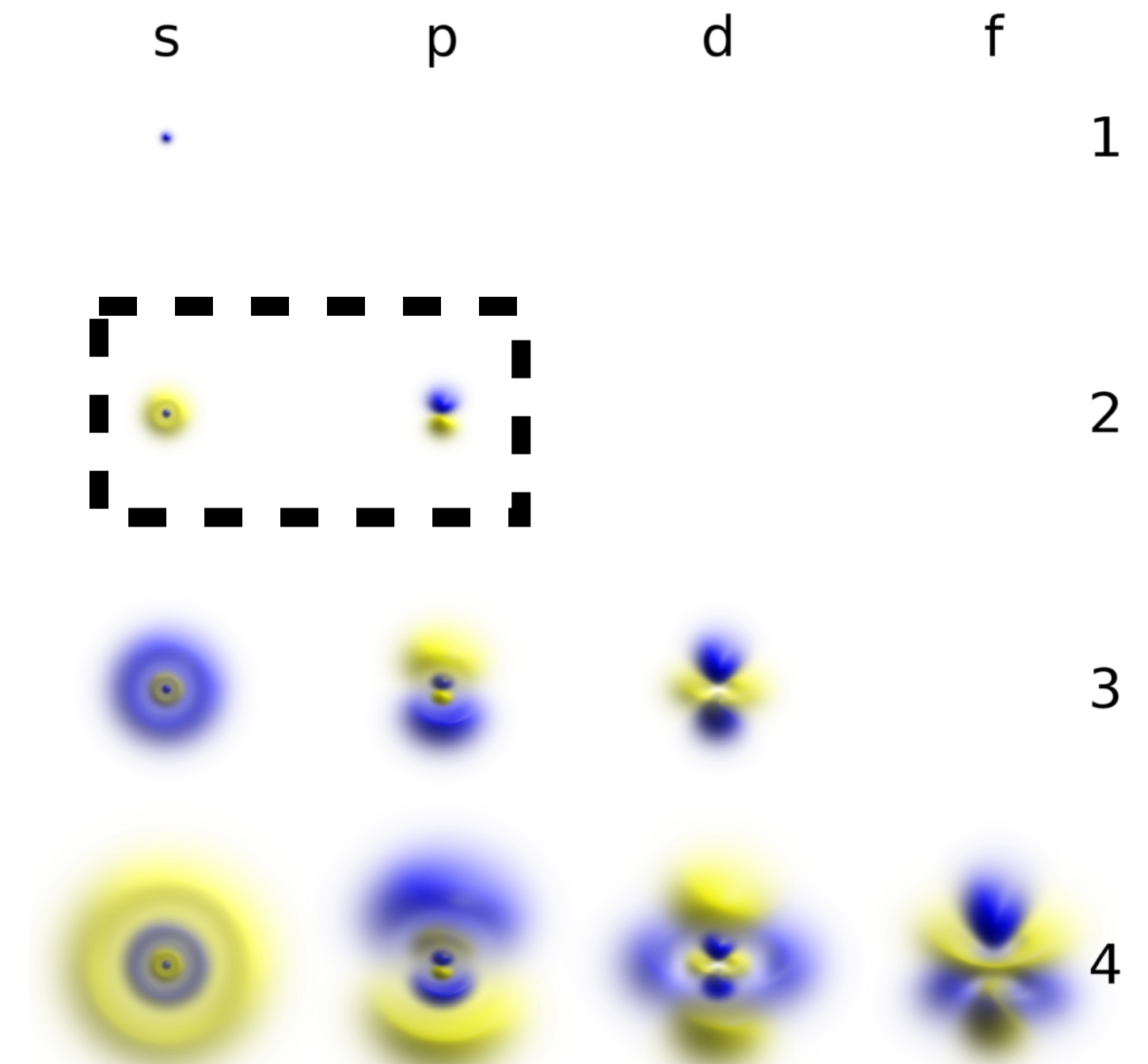
— Энергия зависит от  $n$  и  $j = l \pm 1/2$

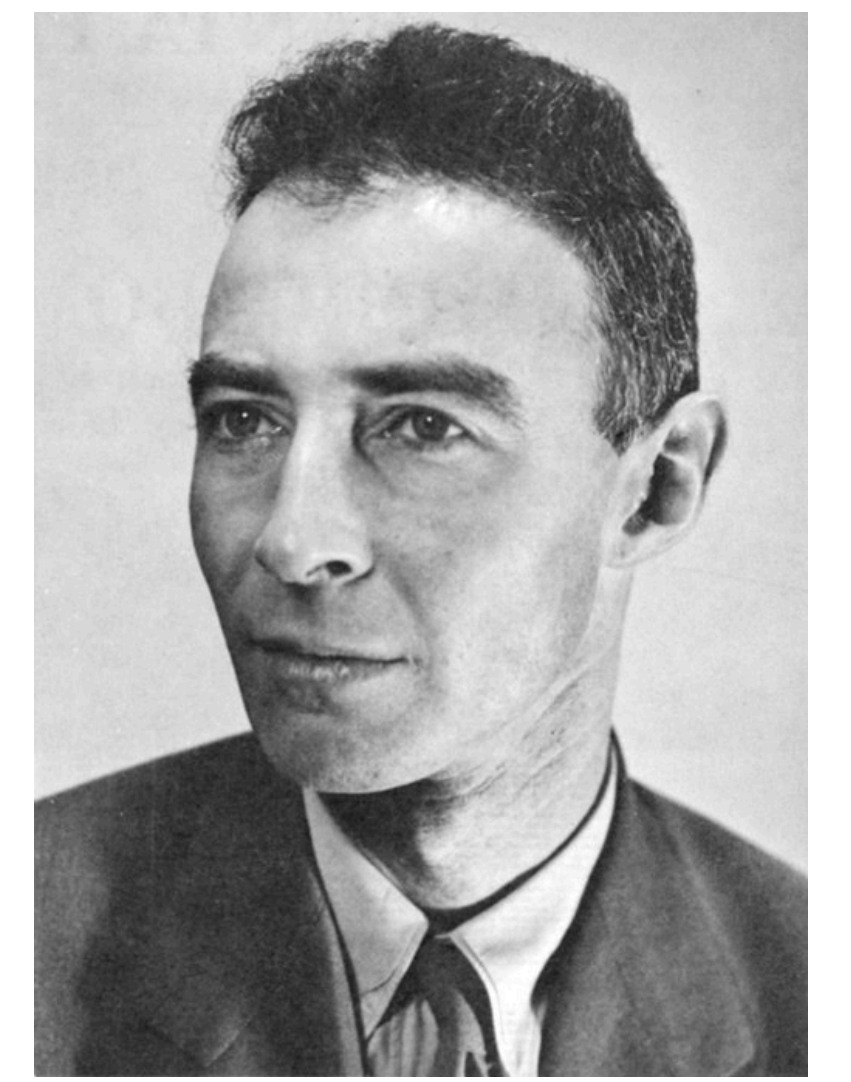
— Предсказывает тонкая структура спектра, наблюдающаяся экспериментально

— Энергия уровней предсказывается одинаковой:

$$2S_{1/2} : \quad n = 2, l = 0, j = 1/2$$

$$2P_{1/2} : \quad n = 2, l = 1, j = 1/2$$





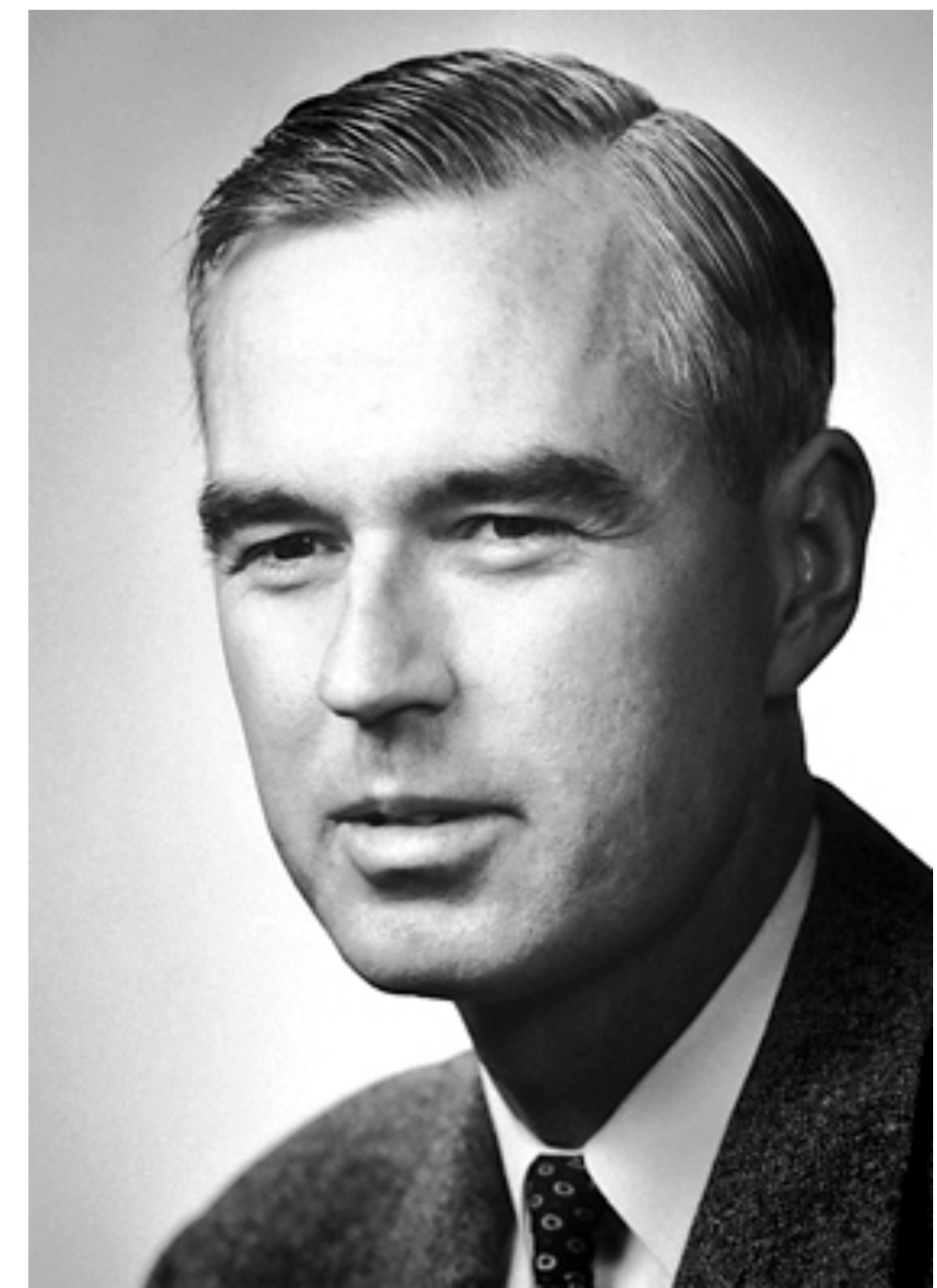
Роберт Оппенгеймер

# Конференция на шелтерском острове (Нью-Йорк). 1947

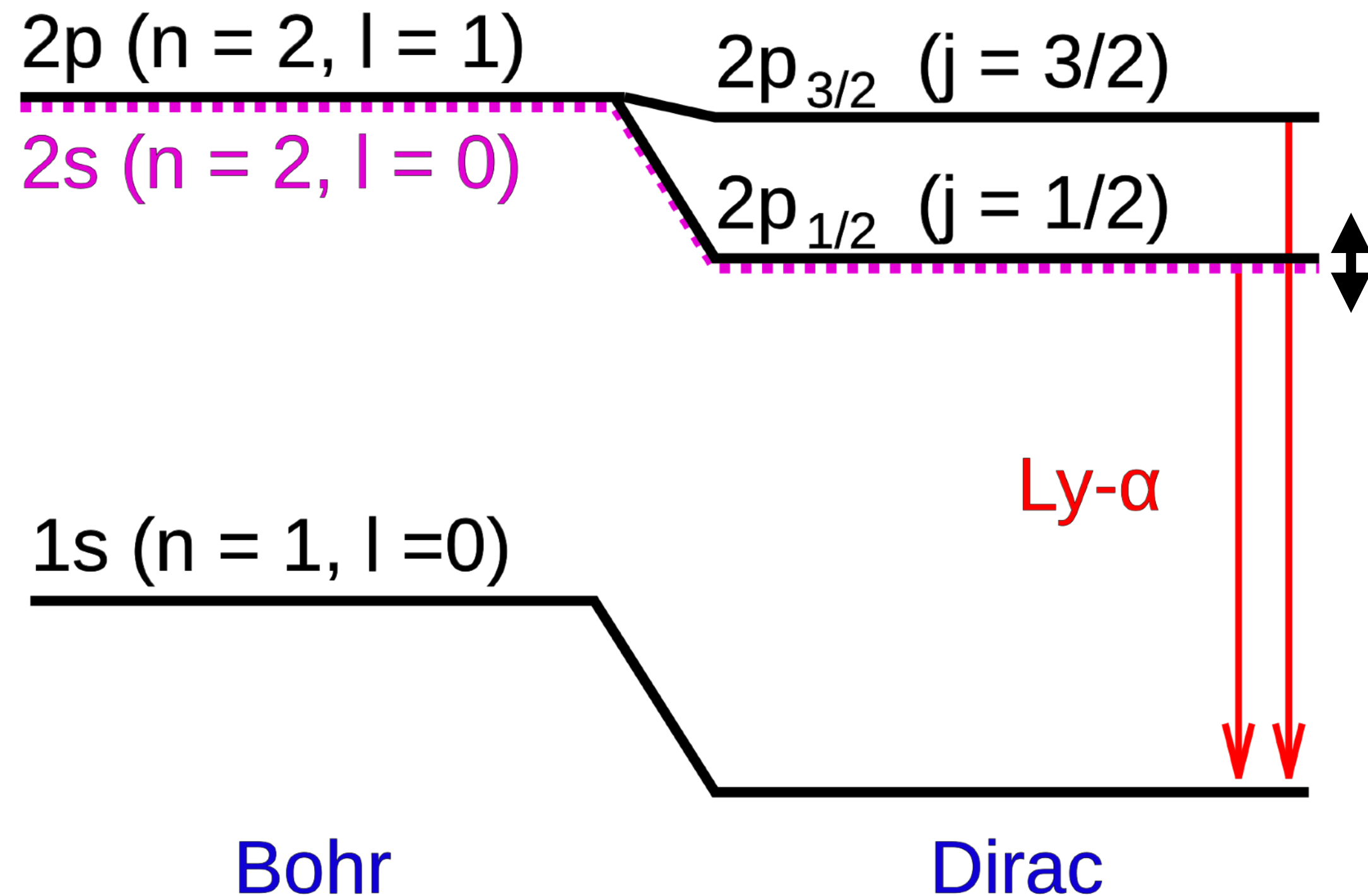
# Лэмб и Ризерфорд

## Революционный эксперимент

- Если мы не понимаем атом водорода, то что мы вообще понимаем?!



Уиллис Лэмб. НП 1955



- Эксперимент

$$E(2S_{1/2}) - E(2P_{1/2}) = 4 \cdot 10^{-6} \text{ эВ}$$

- Теория Дирака

$$E(2S_{1/2}) - E(2P_{1/2}) = 0$$

# ЭТО ВЫЗОВ!

Лэмб, Пайс, Фейнман,  
Фешбах, Швингер



# Качественное объяснение (Велтон)

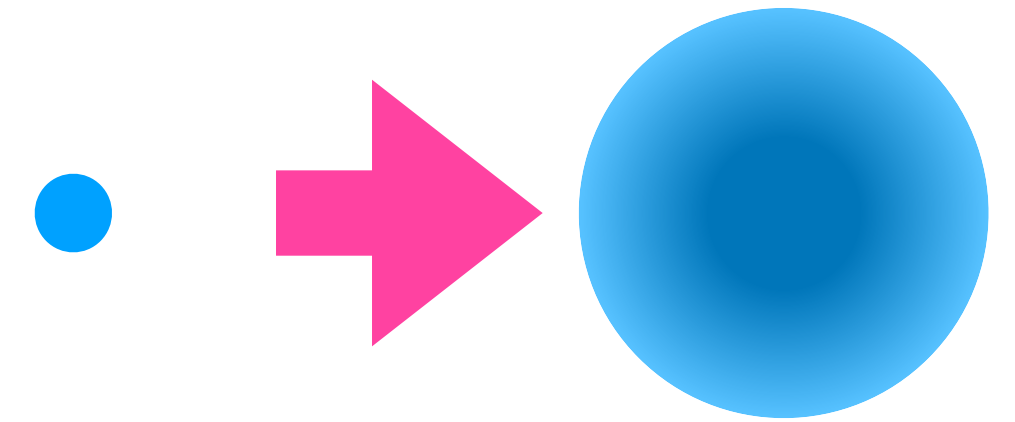
## Лэмбовского сдвига

### ○ Электрон и его взаимодействие с вакуумом

— Электрон подвергается влиянию электромагнитного поля в вакууме, которое не знает покоя (квантовый осциллятор).

— Средний квадрат смещения  $\langle \delta \mathbf{r}^2 \rangle \neq 0$ , хотя среднее смещение  $\langle \delta \mathbf{r} \rangle \neq 0$

— Заряд электрона размывается в пространстве с радиусом  $\sqrt{\langle \delta \mathbf{r}^2 \rangle}$



### ○ Атомное ядро

— Почти не меняет свой размер из-за огромной массы

### ○ Влияние на энергетические уровни

— При  $l = 1$  (2P уровень):  $\psi(0) = 0$ , поэтому «размывание» электрона не оказывает влияние

— При  $l = 0$  (2S уровень):  $\psi(0) \neq 0$ , уменьшение притяжения между электроном и ядром приводит к увеличению энергии уровня.

**Есть только небольшая  
проблема...**

# Квантовая теория поля

Приводит к абсурдному результату

$$\langle \delta r^2 \rangle = \infty$$

# Сказка о гадком утенке





# Бесконечные мучения и глоток надежды

# Собственная энергия электрона бесконечна

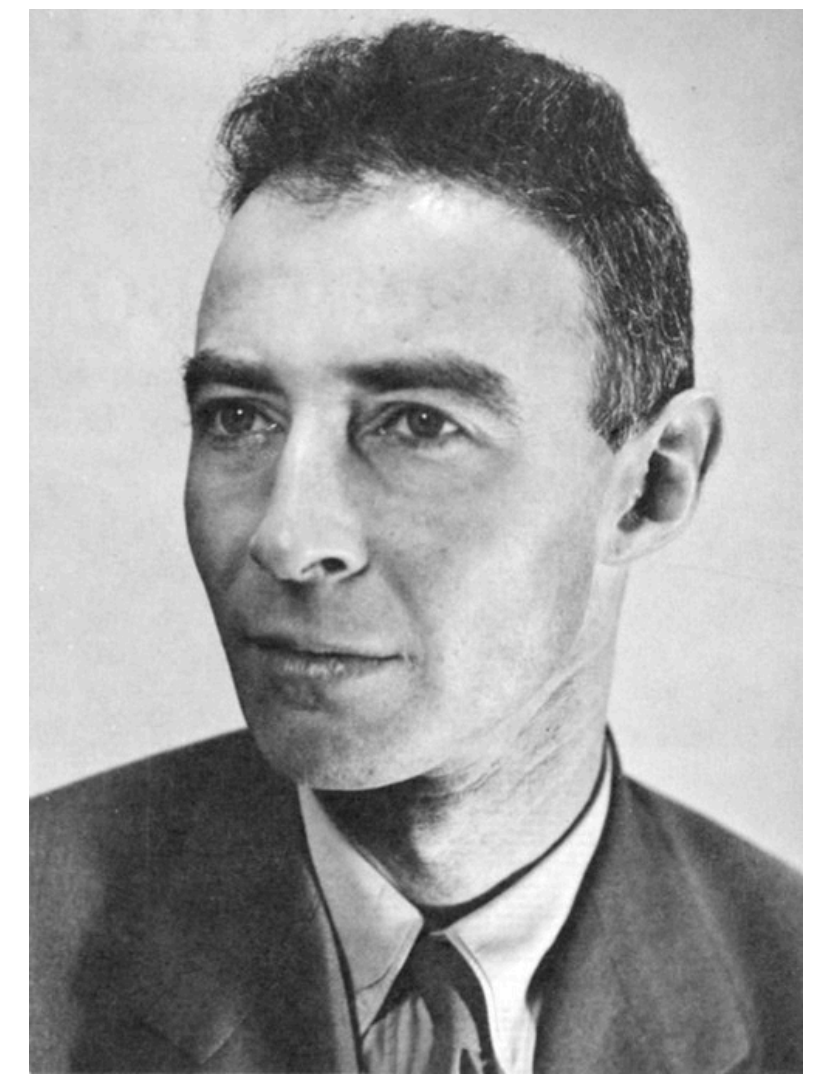
В квантовой теории поля

- **Уровни энергии атома и частоты поглощения/  
излучения бесконечны!**

— Роберт Оппенгеймер (1930)

- **Десятилетия теоретики мирились с бесконечностями в  
квантовой теории поля**

— Стокгольмский синдром: с ними невозможно, без них непривычно



Роберт Оппенгеймер

# Глоток надежды

## Рассуждения Бете

- **Свободный электрон:**  $m_e^{free} = \infty$

— Квантовая теория поля предсказывает бесконечно большой вклад электромагнитного вакуумного поля в массу свободного электрона. Почему наблюдаемая масса электрона конечна мы не знаем. Ну и пусть!

- **Электрон в атоме:**  $m_e^{bound} = \infty$

— Наверное масса электрона в атоме будет предсказана также бесконечной.

- **Разница масс конечна:**  $m_e^{free} - m_e^{bound} \neq \infty$

— Возможно, разница масс свободного и связанного электрона будет конечной.

- **Это позволило Бете вычислить Лэмбовский сдвиг**

— В поезде по пути с конференции. Статья: 3 страницы. 12 формул. Начало теории перенормировок



Ганс Бете

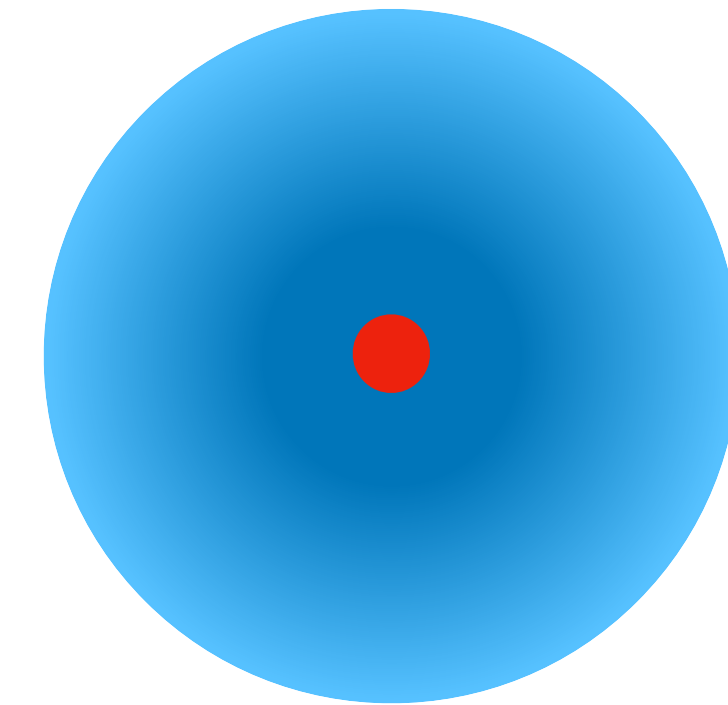
# И ЧеТамКак?

## С размазкой электрона

### ○ «Размазка точечного» электрона:

—  $\sqrt{\langle \delta r^2 \rangle} \simeq 386$  радиусов протона

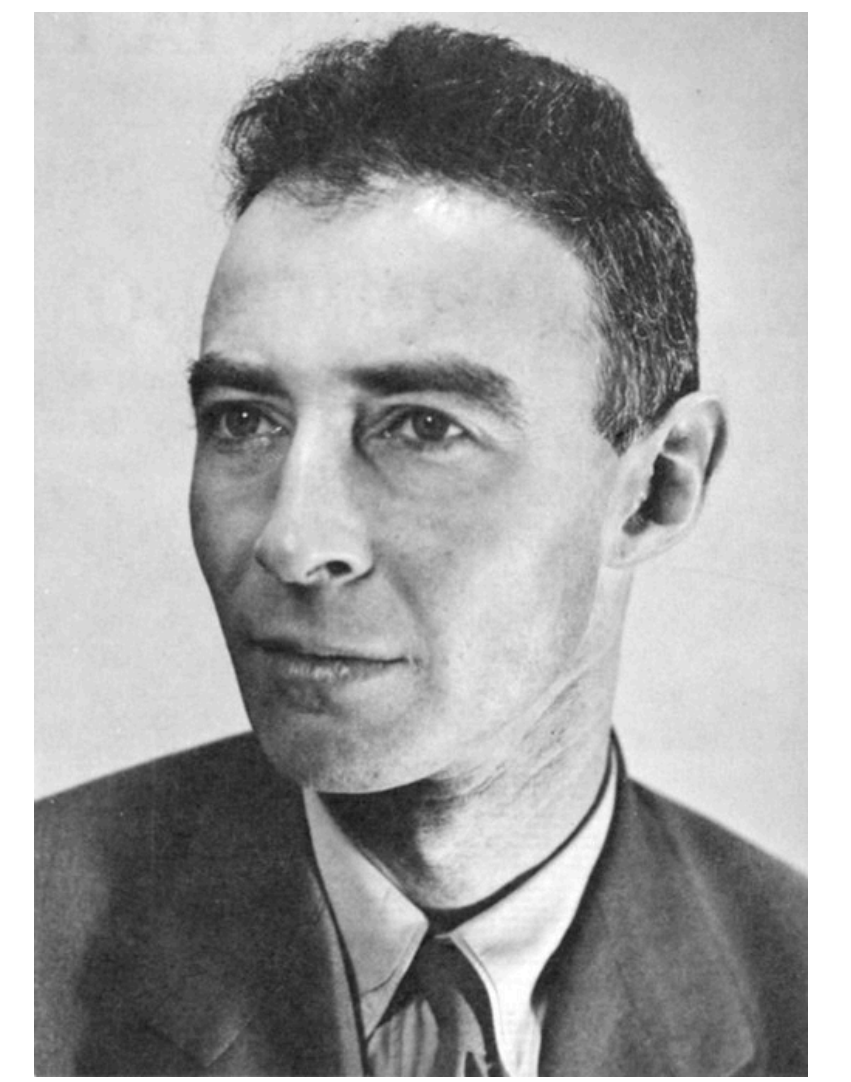
— Это комптоновская длина **волны** электрона



«У меня есть  
уравнение. А у Вас?»

Дирак Фейнману при первой встрече





Роберт Оппенгеймер

# Конференция в Поконо (Пенсильвания). 1948

Нильс Бор, Оге Бор, Энрико Ферми, Уиллис Лэмб, Исидор Раби, Эдвард Теллер, Поль Дирак, Абрагам Пайс и др.

Юлиан Швингер и Ричард Фейнман

# Ожидание триумфа

## Швингера и Фейнмана

### ○ Ю. Швингер: доклад на целый день

- о его развитии квантовой электродинамики
- Первое вычисление аномального магнитного момента электрона



### ○ Р. Фейнман: первое упоминание диаграмм Фейнмана

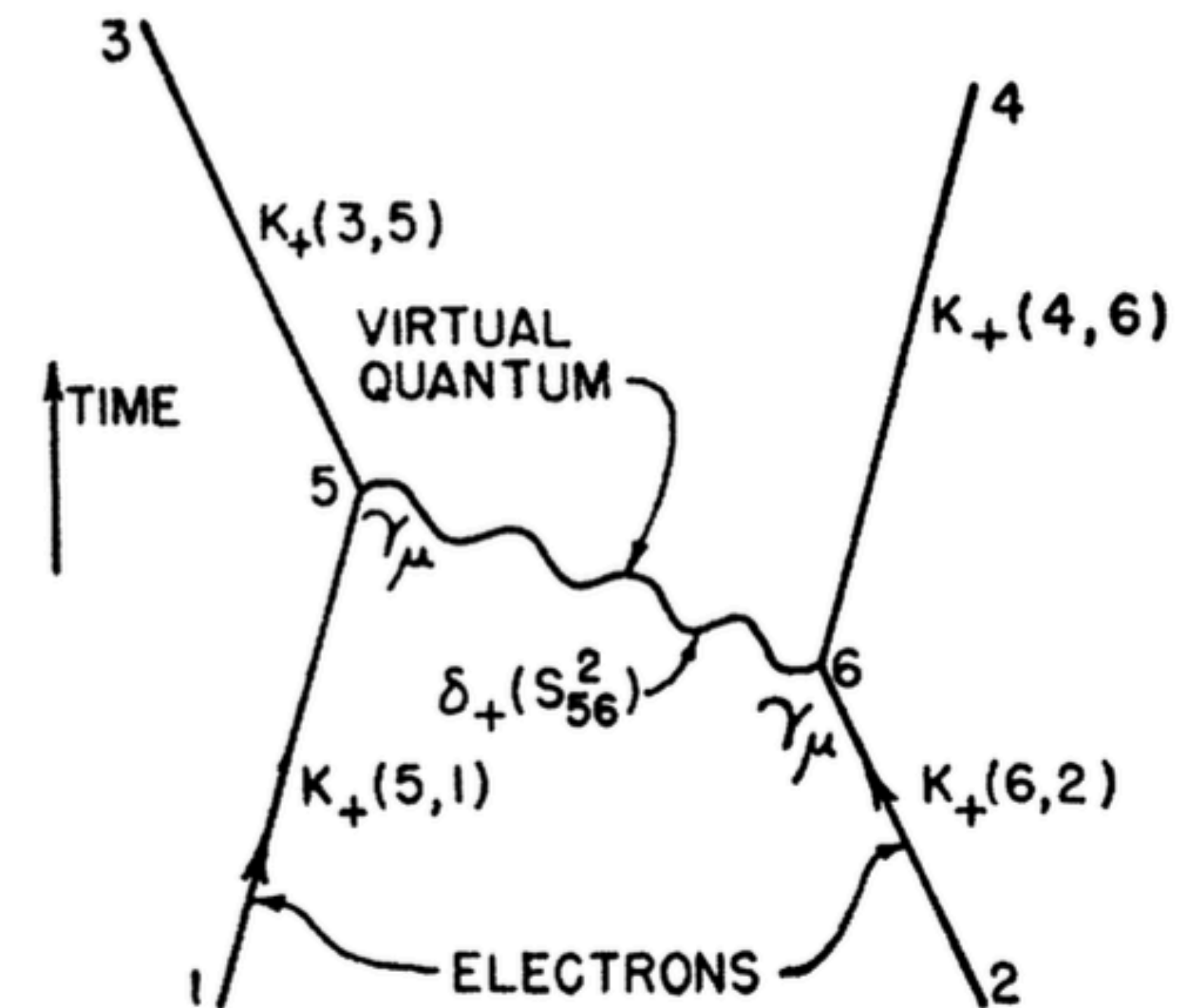
- Своя версия квантовой электродинамики
- Полный провал



Ричард Фейнман  
(Лос Аламос ID)



Юлиан Швингер



Из статьи Фейнмана (1949)

# В игру вступает Фримен Дайсон

Великий математик, физик и генератор идей

## ○ Теории Швингера и Фейнмана

- Внешне очень разные. Но приводят к одинаковым результатам
- Дайсон доказал, что оба подхода следуют из квантовой теории поля

## ○ Дайсон едет в Принстон

- Холодный душ
- Молодежь консервативнее стариков
- Пять семинаров
- Фейнман снова герой

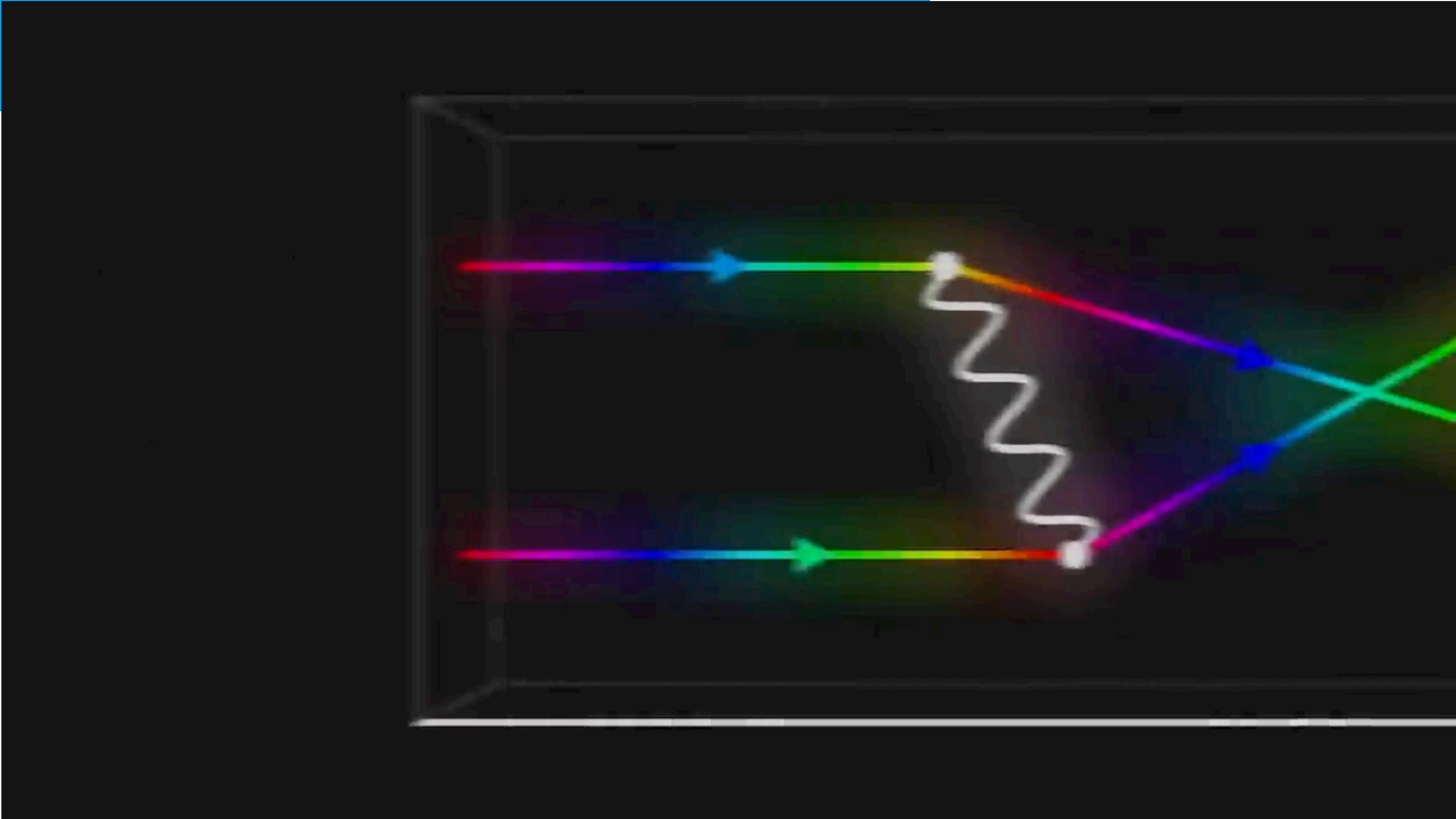


Фримен Дайсон

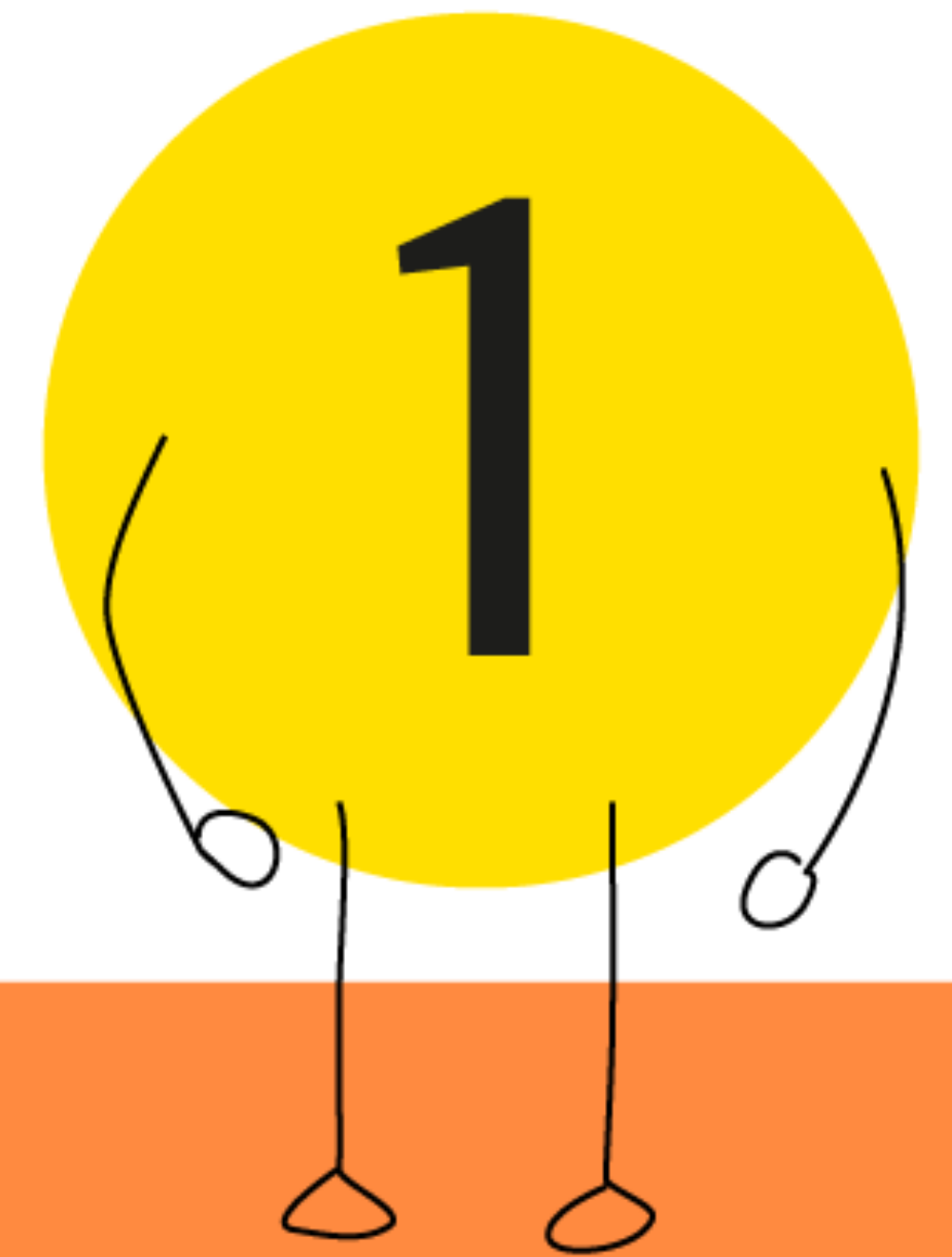
НП 1965: Швингер, Фейнман, Томонага «за фундаментальные работы по квантовой электродинамике»



# Диаграммы Фейнмана

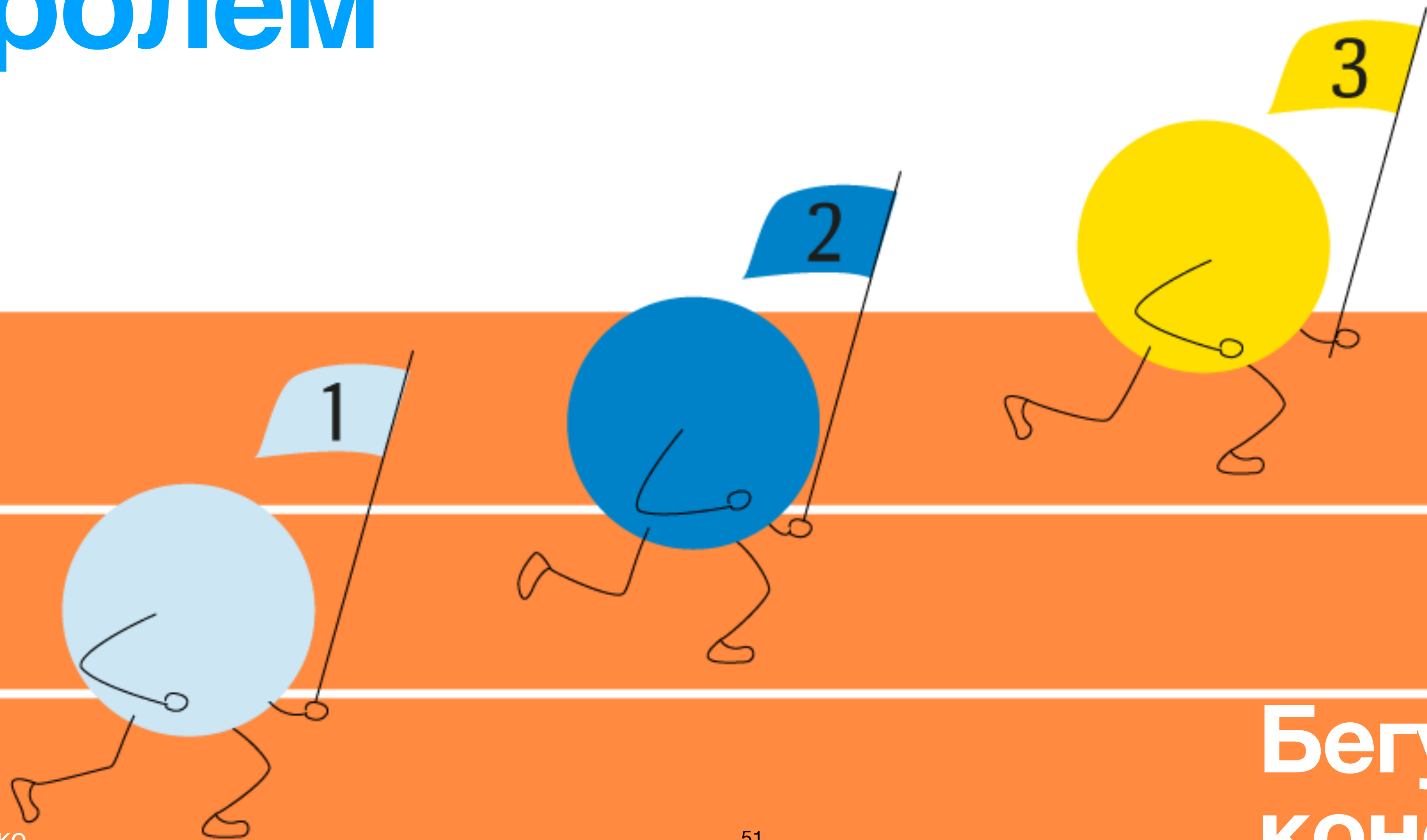


# Бесконечности под контролем



START

# Бесконечности под контролем



Бегущие  
**КОНСТАНТЫ**

# Работа с бесконечностями

- **Открытие ренорм-группы (1953)**

- Эрнст Штукельберг
- М. Гелл-Ман, Лоу

- **Главные выводы:**

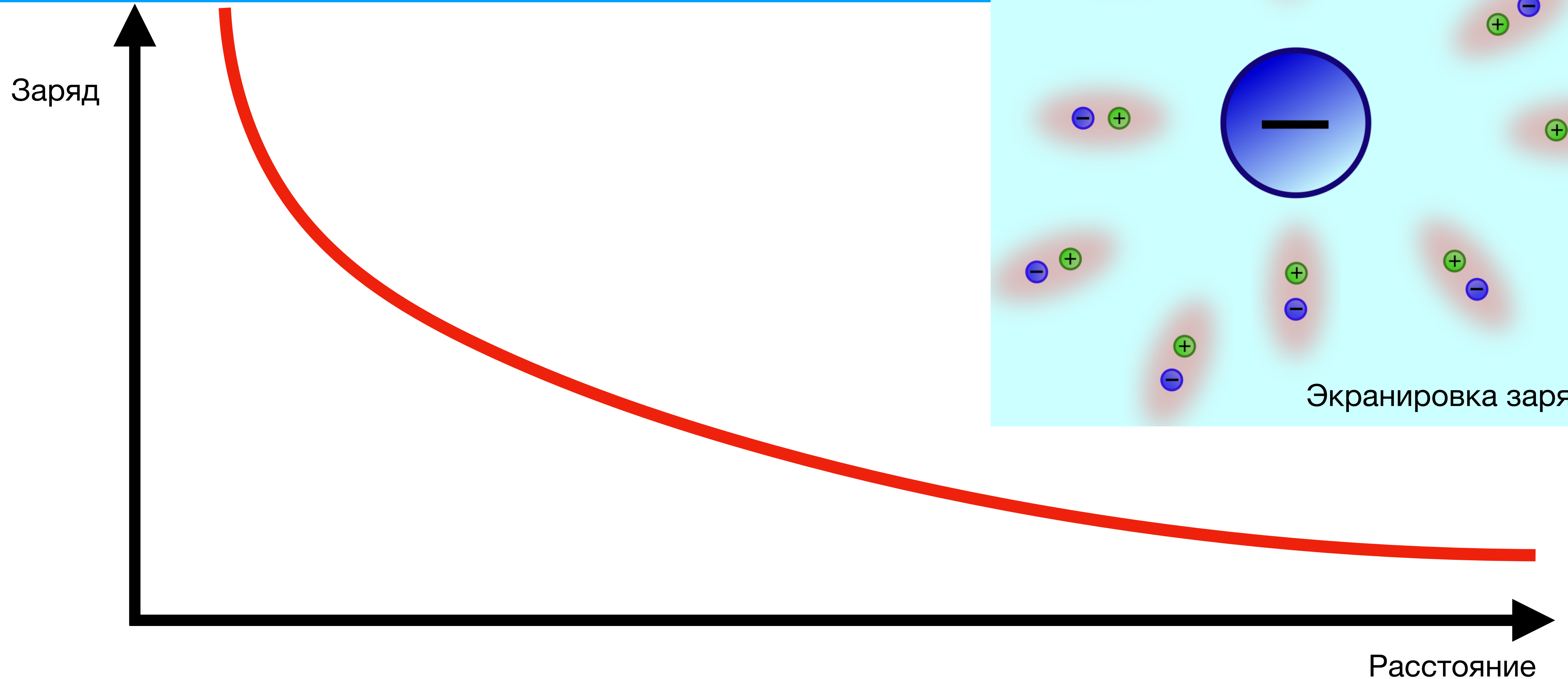
- Константные значения электрического заряда и массы электрона не совместимы с КТП
- Заряд и масса зависит от расстояния между взаимодействующими электронами



Мюррей Гелл-ман

# Бегущие константы

Рождение виртуальных пар  $e^+e^-$ ,  
экранировка заряда



# Физическая картина к 1960

## ○ Теория

- Квантовая электродинамика — первый успешный пример квантовой теории поля
- Контроль бесконечностей в КТП
- «Бегущие» константы

## ○ Эксперимент

- Открыто множество новых частиц:  $p, n, e^{\pm}, \gamma, \pi, \mu$
- Открыты «странные» частицы:  $K^0, \Lambda, \dots$
- Открыто нейтрино.
- Четыре взаимодействия: электромагнитное, **слабое**, **сильное** и гравитационное

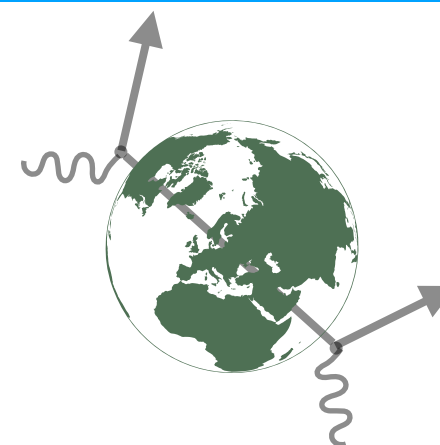
# Физическая картина к 1960

## Новые вызовы

- **Как построить теорию слабых и сильных взаимодействий?**
- **Как упорядочить «зоопарк» сильно-взаимодействующих частиц и разнообразие их свойств?**
- **Как объединить взаимодействия?**



# Лекция 3. «Стандартная модель: самое успешное соединение противоречий»





# Дополнительные материалы

# Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- Волна электрона в движении

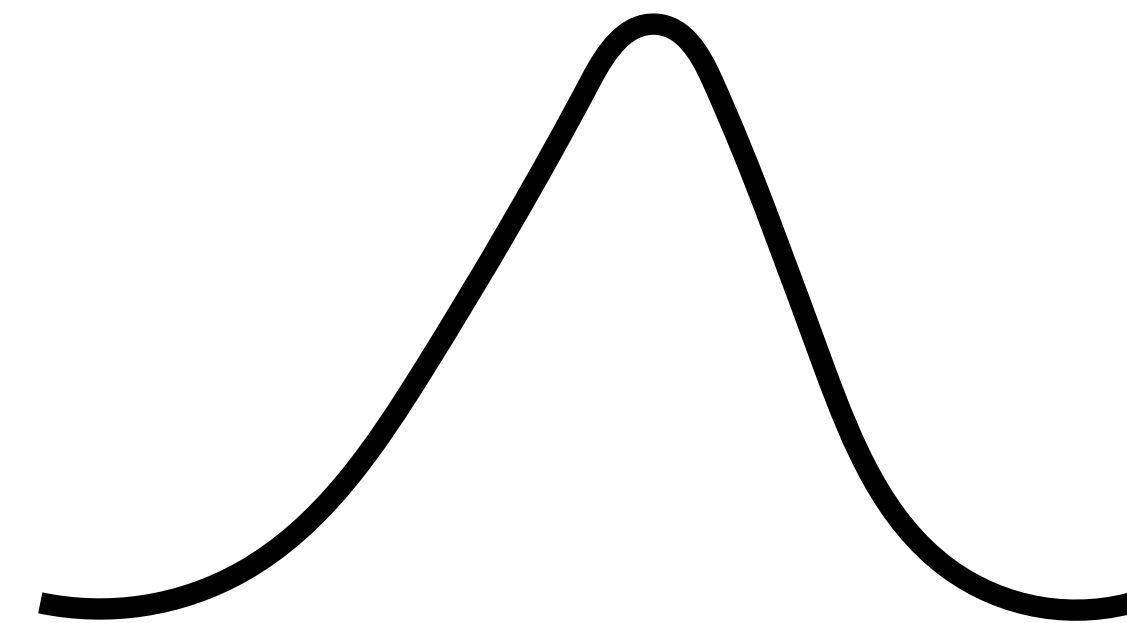


Координата

# Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- Волна электрона в движении

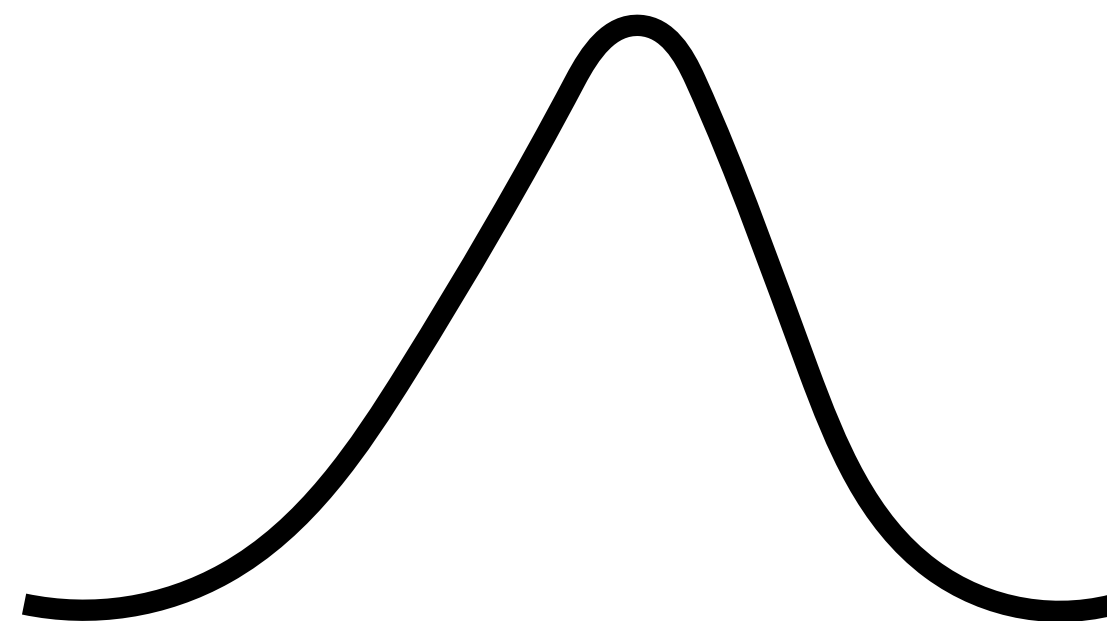


Координата

# Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- Волна электрона в покое



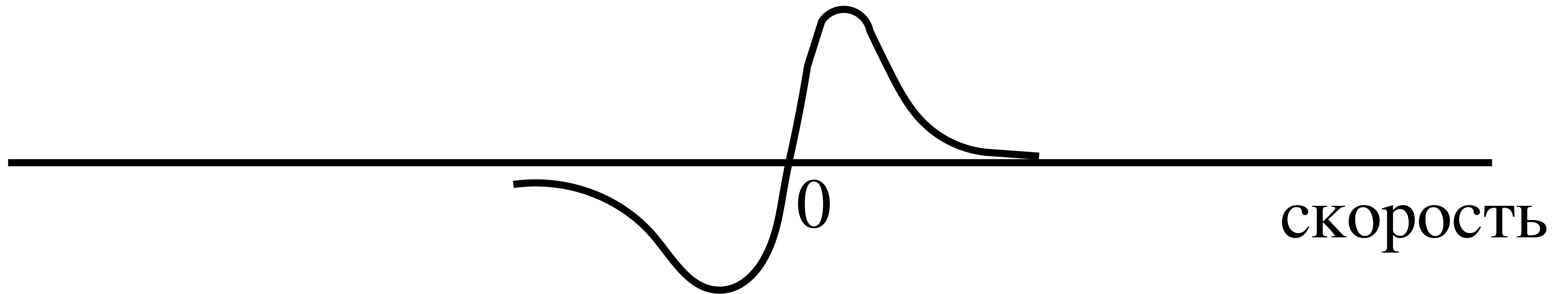
0

скорость

# Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

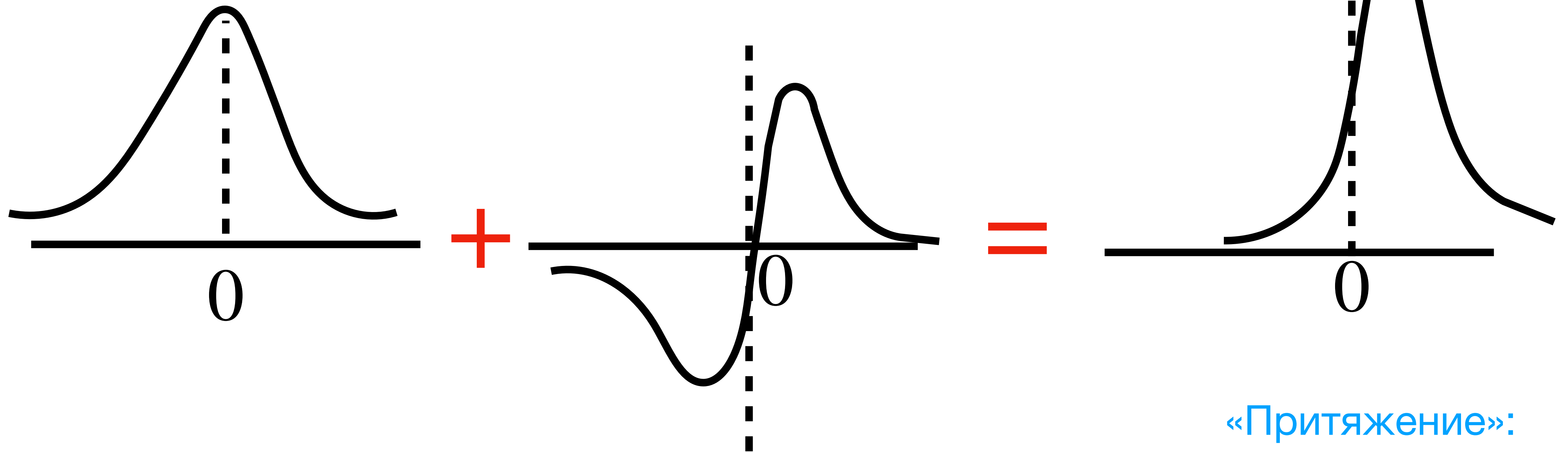
- Волна электрона после взаимодействия



# Притяжение и отталкивание

## В квантовой теории поля

- Интерференция двух волн: без взаимодействия и после взаимодействия

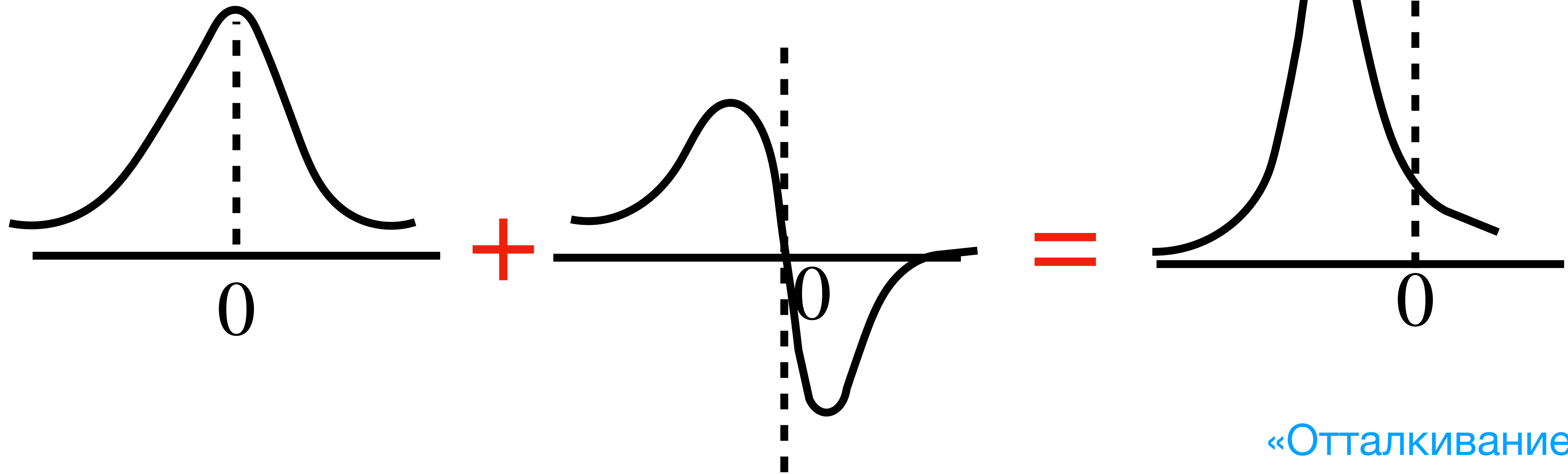


«Притяжение»:  
электрон  
движется вправо

# Притяжение и отталкивание

## В квантовой теории поля

- Интерференция двух волн: без взаимодействия и после взаимодействия



«Отталкивание»:  
электрон  
движется вправо