Мини-курс лекций

Joint Institute
for Nuclear Research

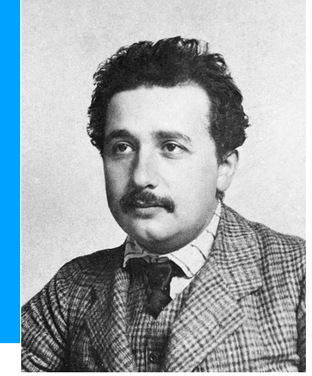
От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

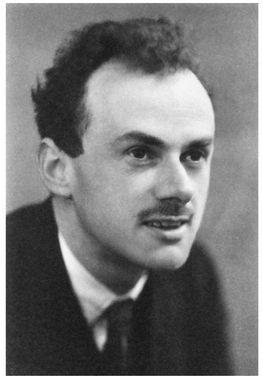
Дмитрий В.Наумов

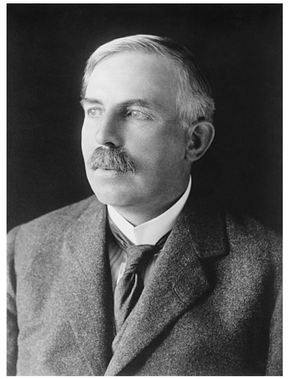
На предыдущей лекции…

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

Joint Institute
for Nuclear Research

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,

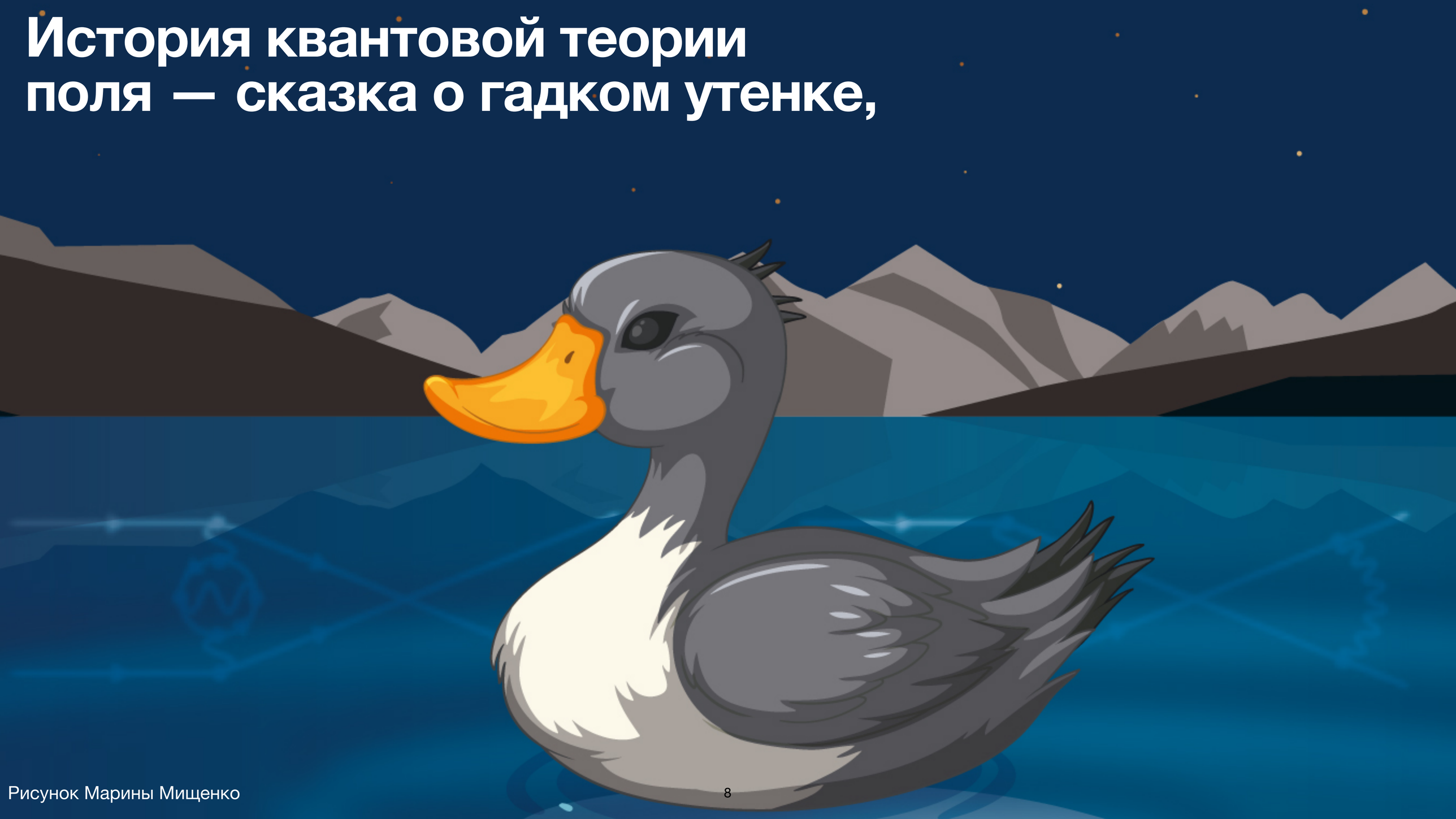


Рисунок Марины Мищенко

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

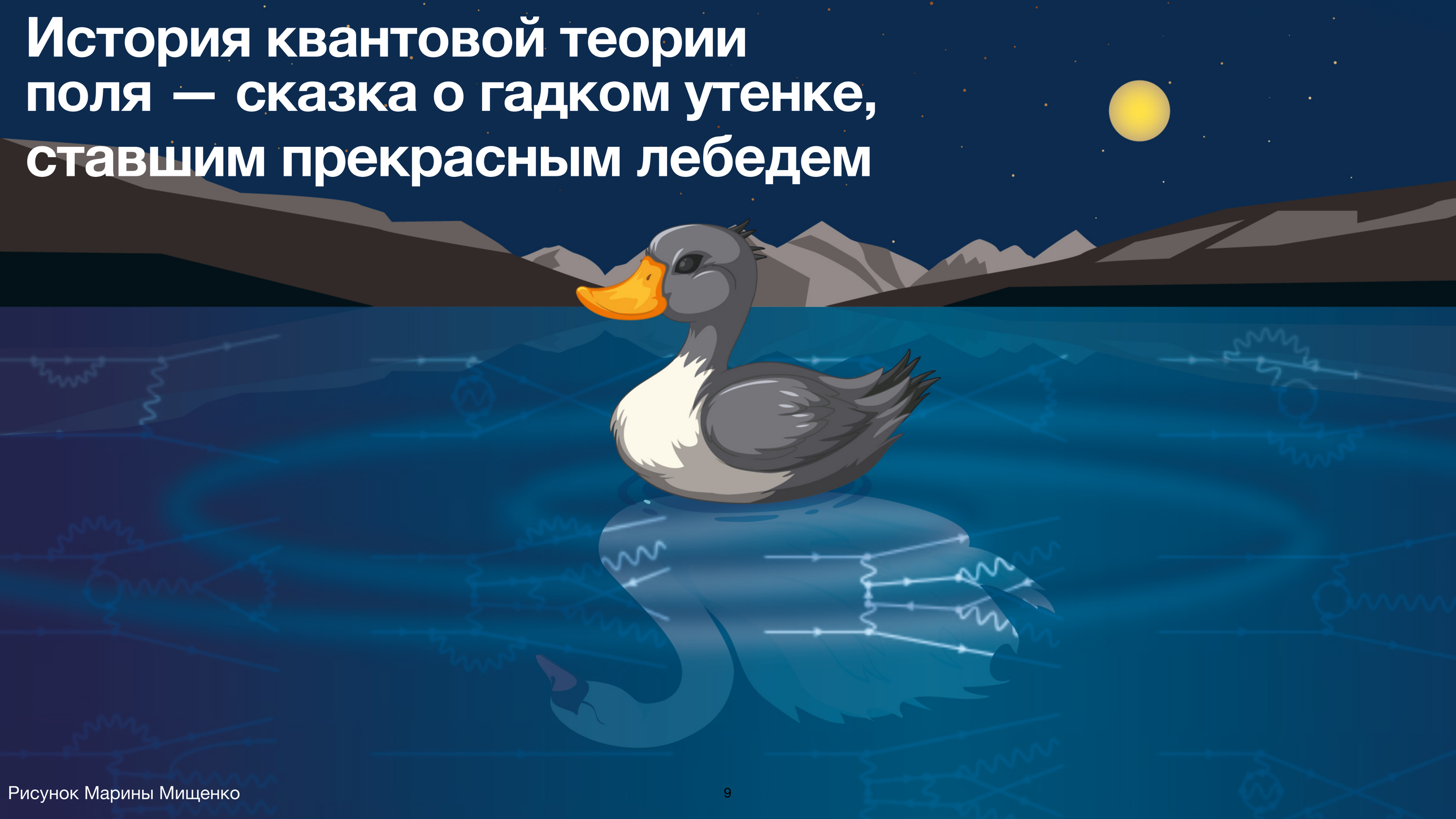


Рисунок Марины Мищенко

Что такое физическое поле?

Поле = функция пространства-времени

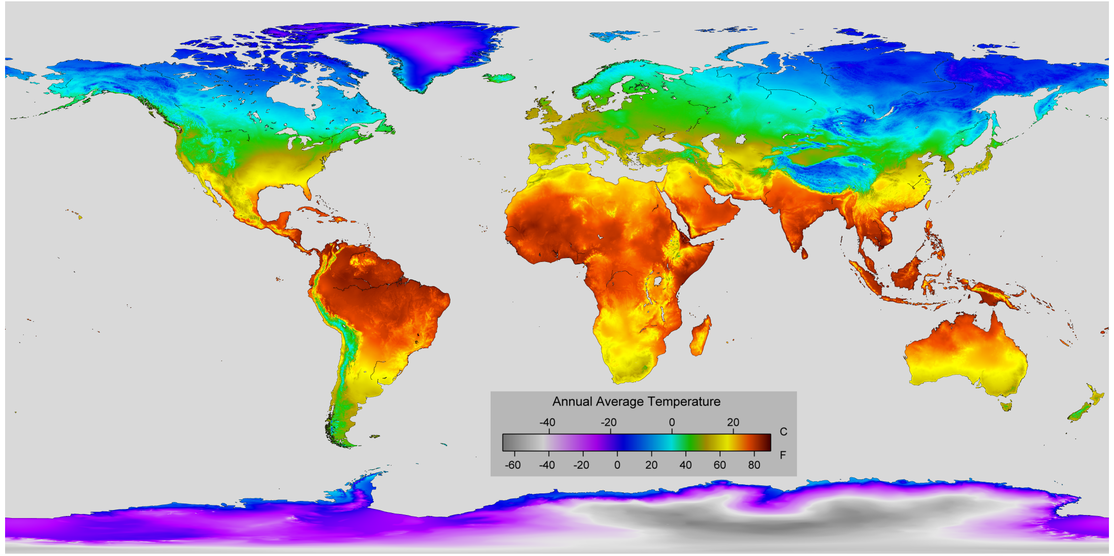
- **Важнейшее отличие поля от волновой функции**

  — Физическое поле может обладать плотностью энергии-импульса, момента импульса и другими физически наблюдаемыми свойствами в каждой точке.

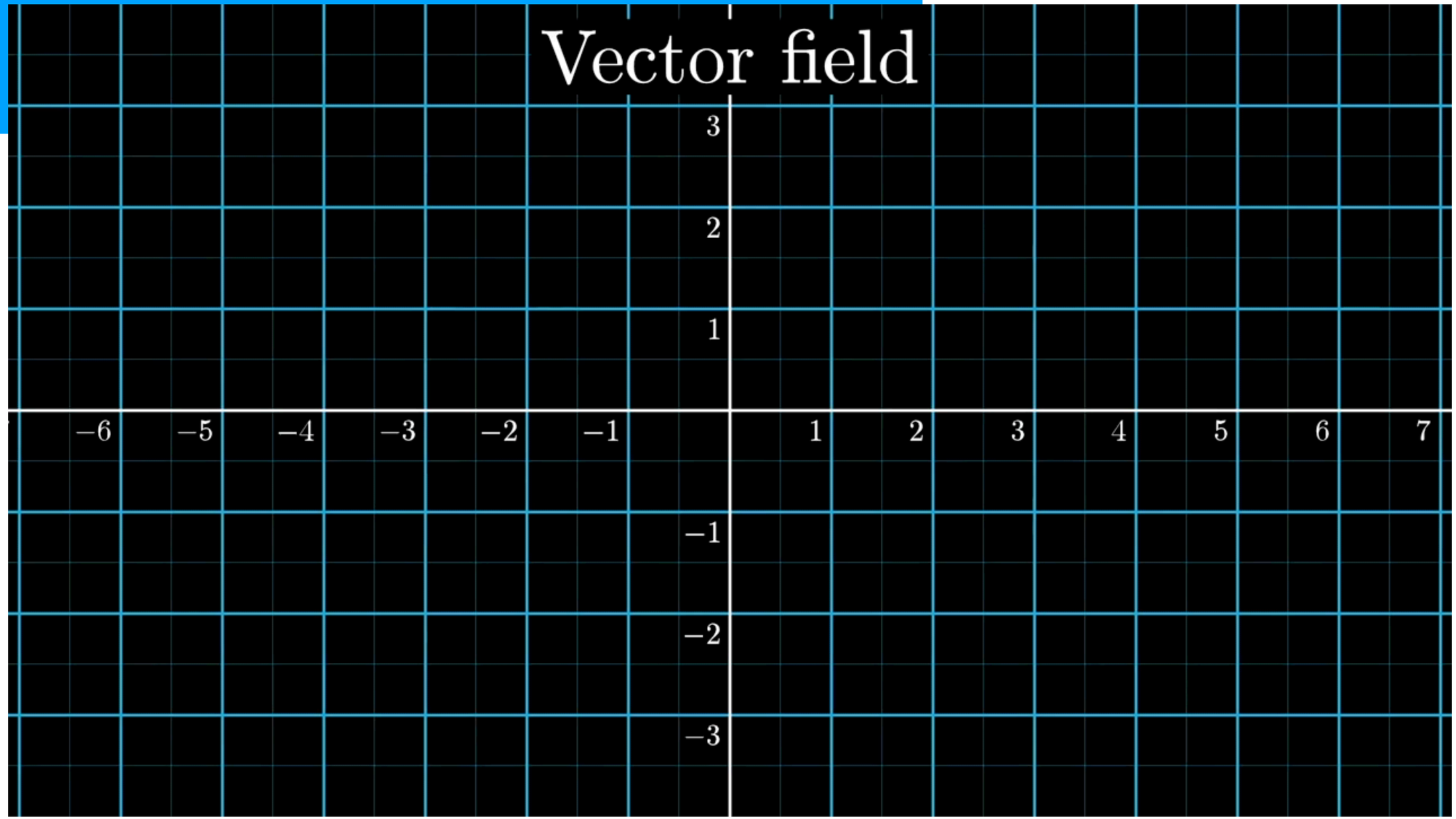
- **Функция:**

	Поле
— Число	Скалярное
— Вектор	Векторное
— Тензор	Тензорное
— Спинор	Спинорное

Пример

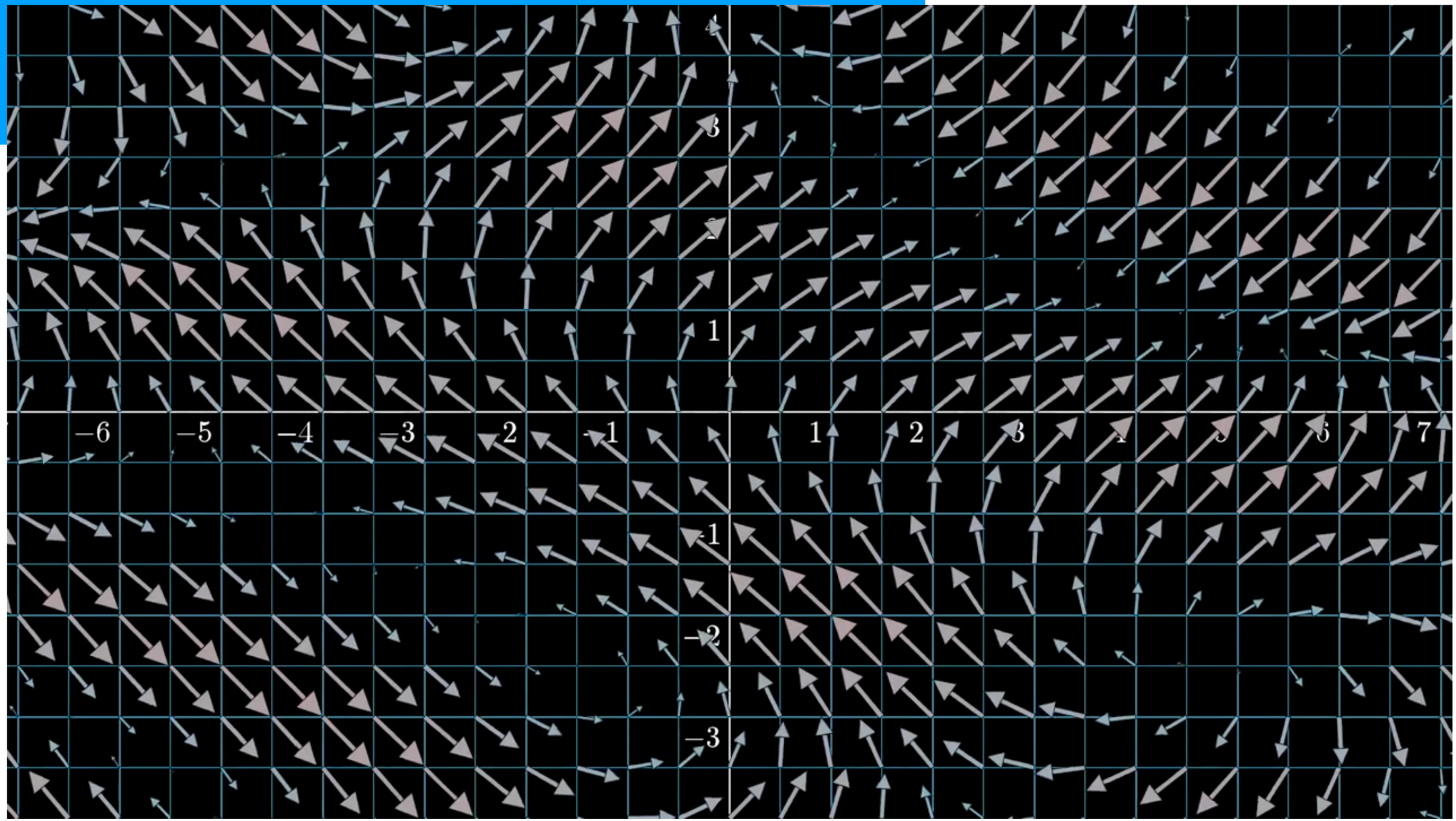


Пример: векторное поле



Адаптировано из 3Blue1Brown

Волны поля



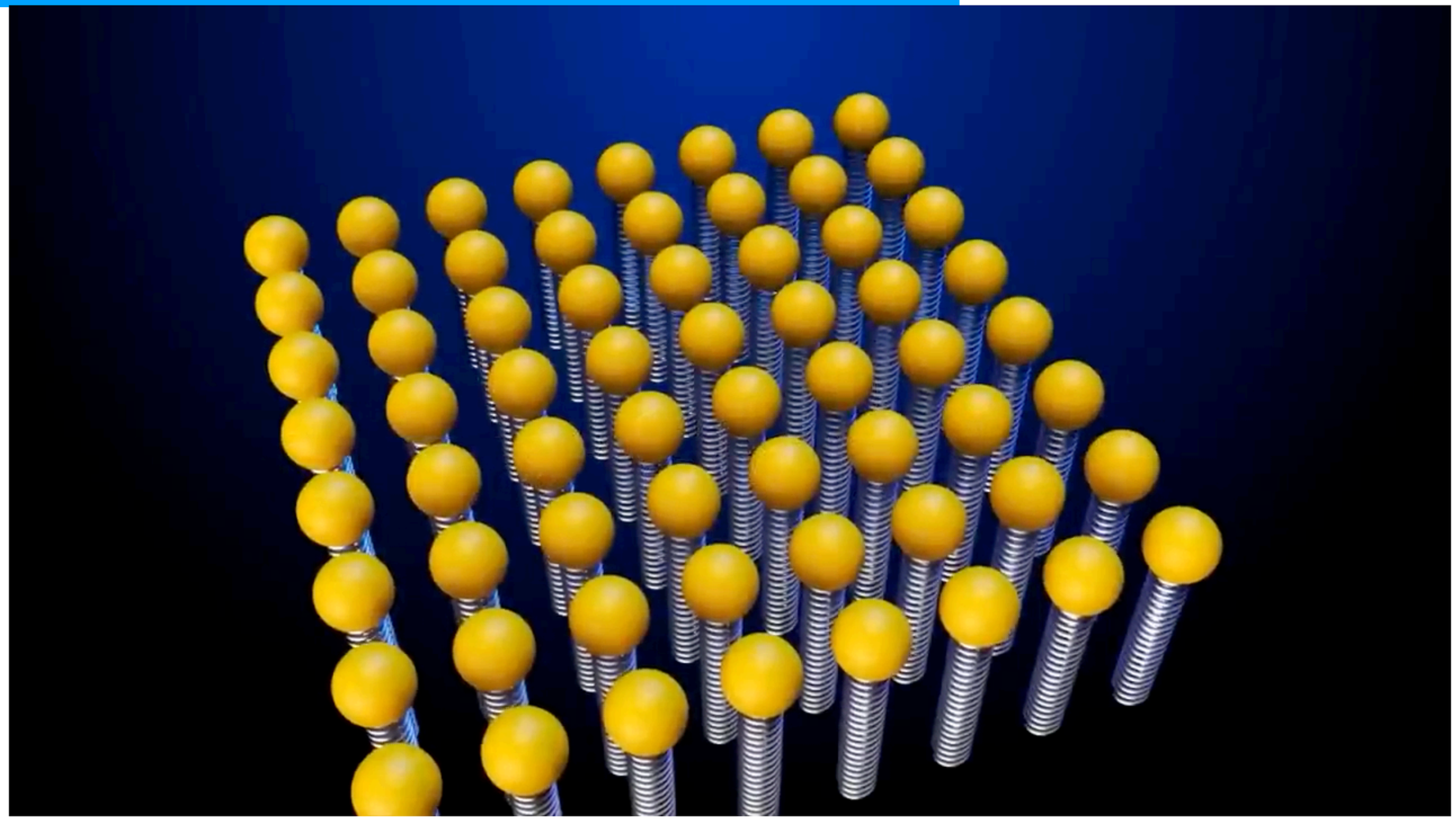
Адаптировано из 3Blue1Brown

Квантовое поле

Ортопедический матрац

Хорошая аналогия для квантового поля

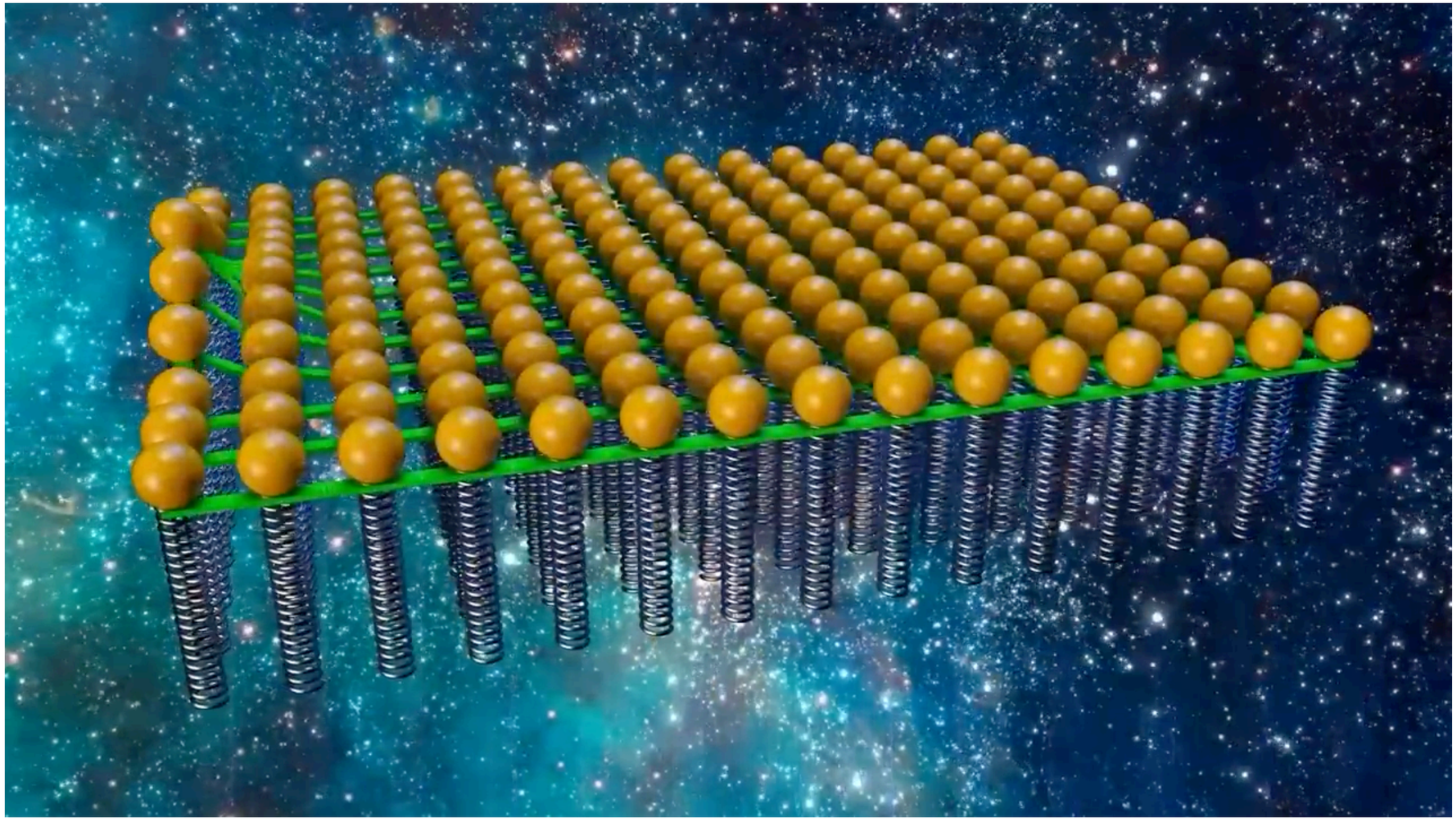
Квантовый осциллятор не знает покоя!



Адаптировано из Arvin Ash

«Частица» = волна поля

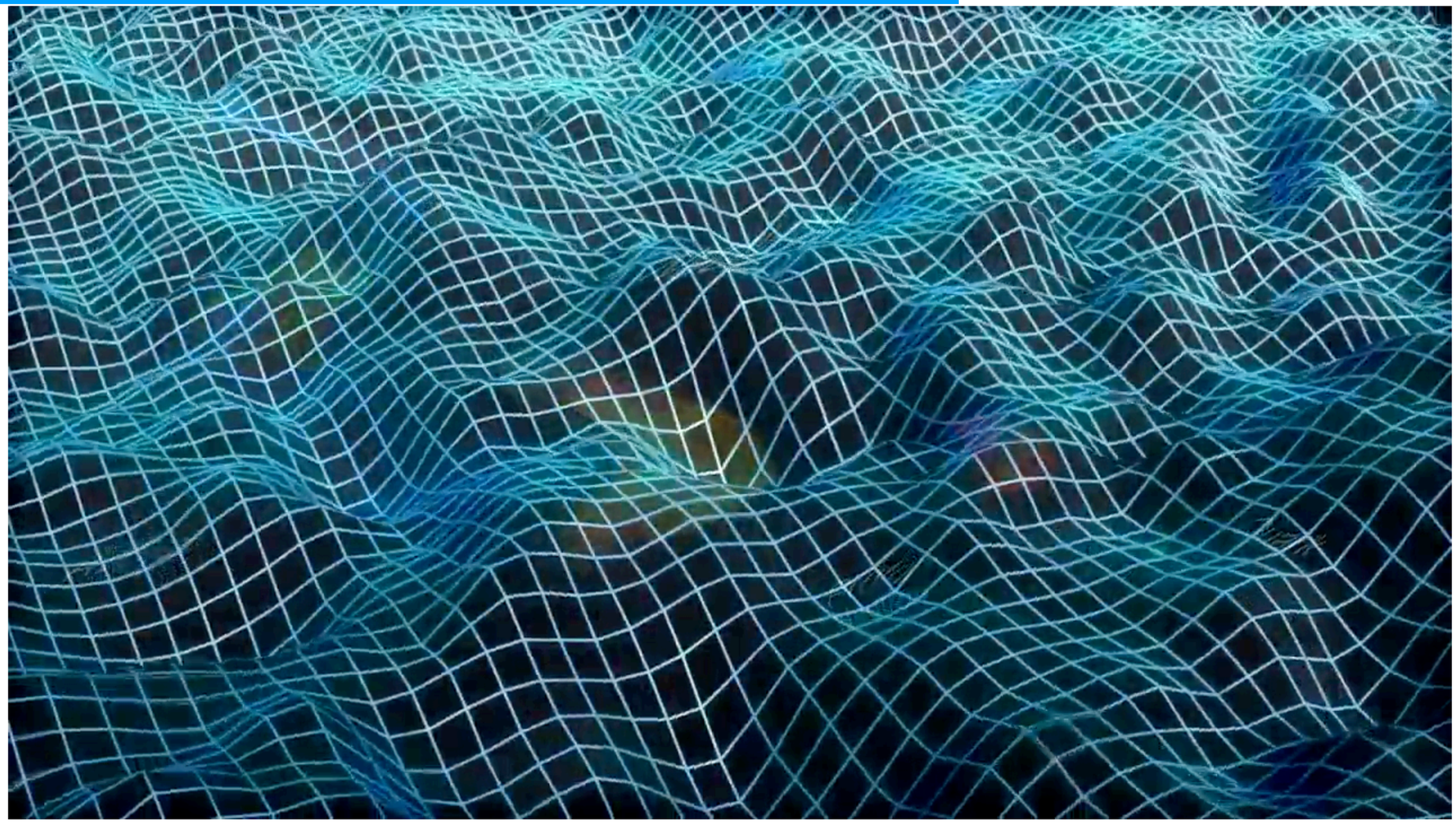
В квантовой теории



Адаптировано из Arvin Ash

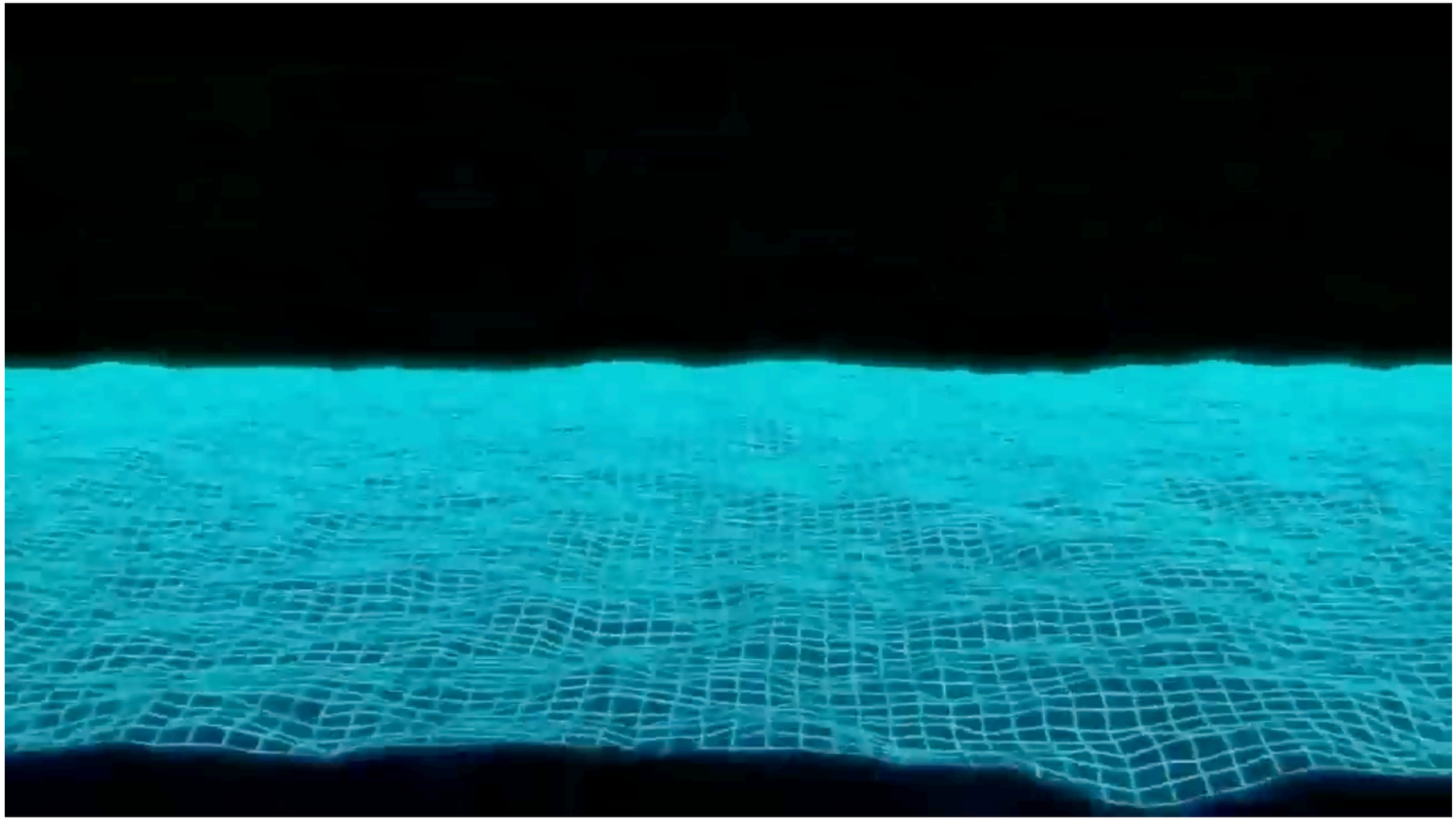
От матраца к полю

Квантовое поле не бывает в покое



Адаптировано из Arvin Ash

Число «частиц» может меняться со временем



Адаптировано из Arvin Ash

«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.**

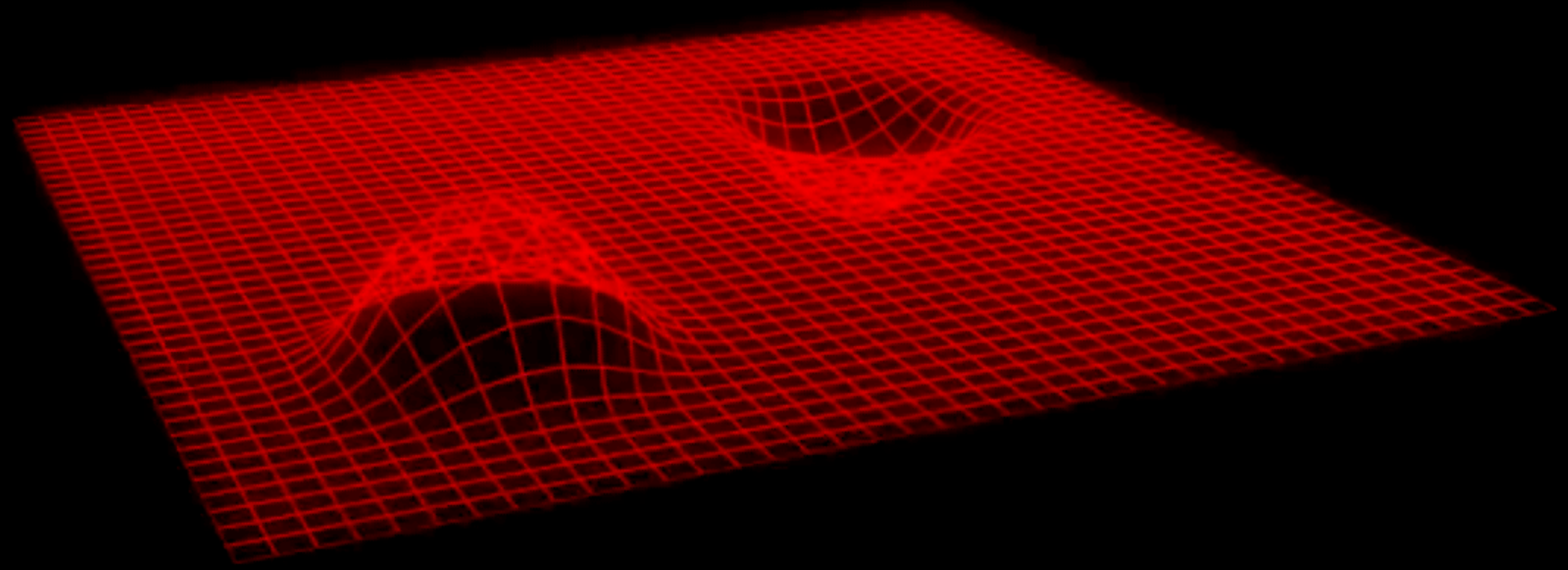
  — Поле электрона одно во всей Вселенной

  — 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

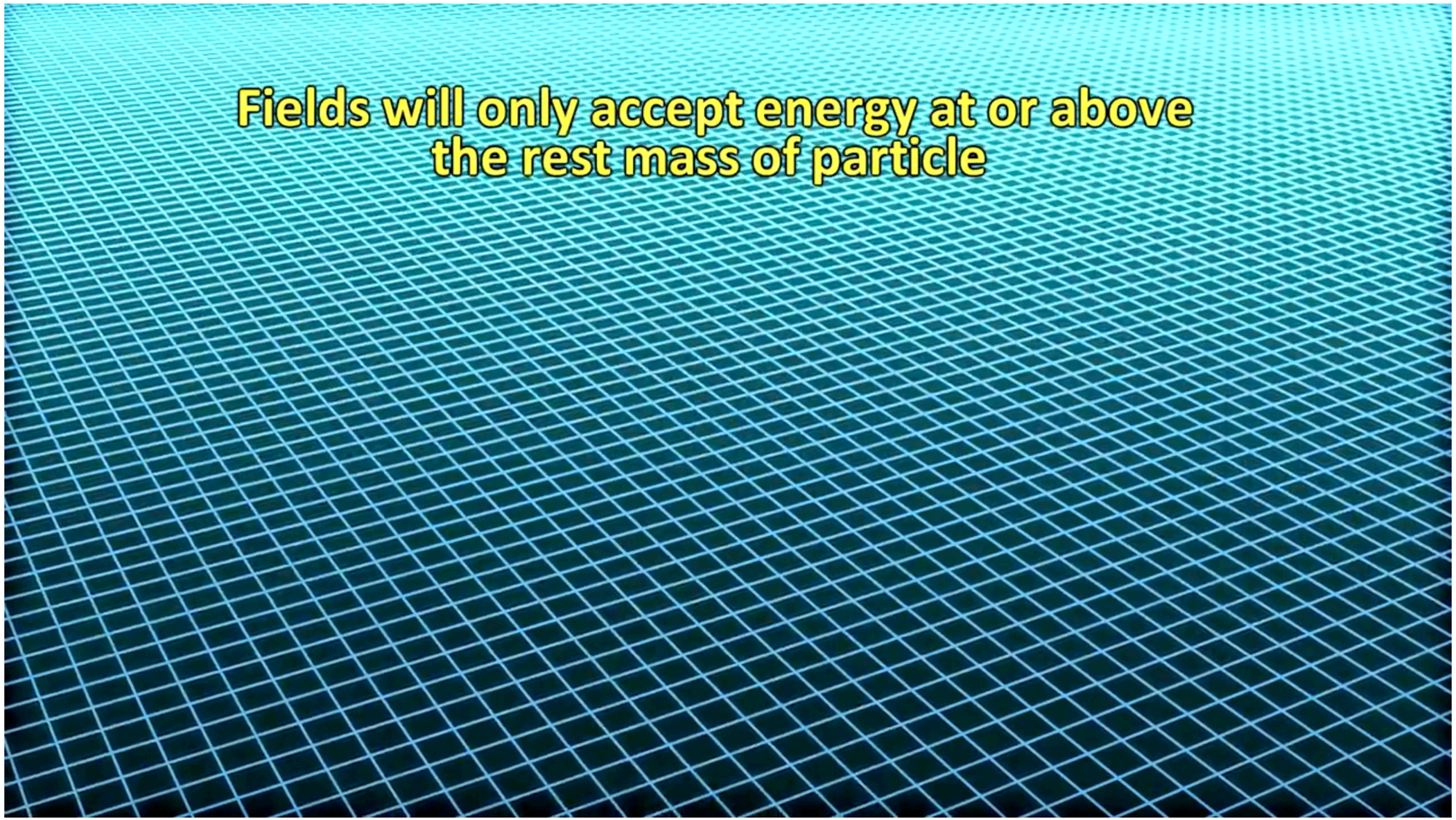
Виртуальные частицы рождаются на время $\Delta t \sim$ энергия частиц$^{-1}$



Адаптировано из Arvin Ash

«Квантовость» поля

Число «реальных частиц» дискретно



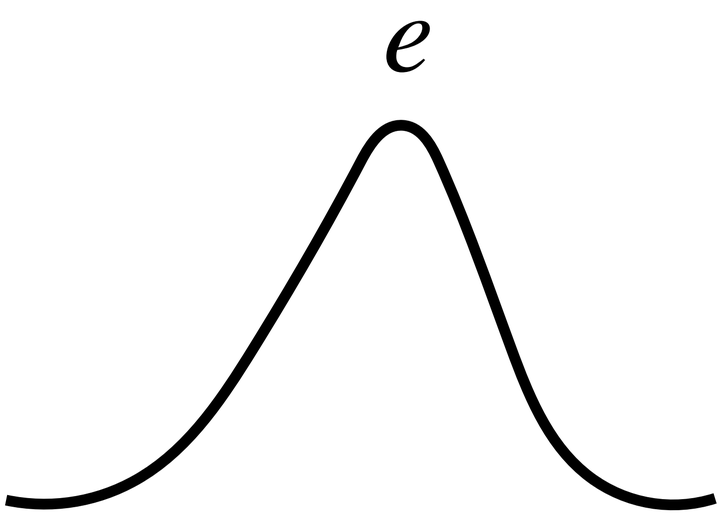
Адаптировано из Arvin Ash

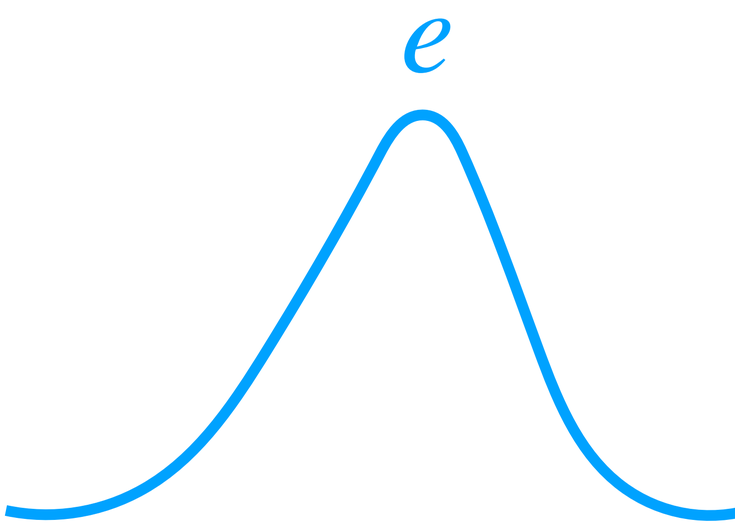
Природа силы

Мастер Йода

Ожидание

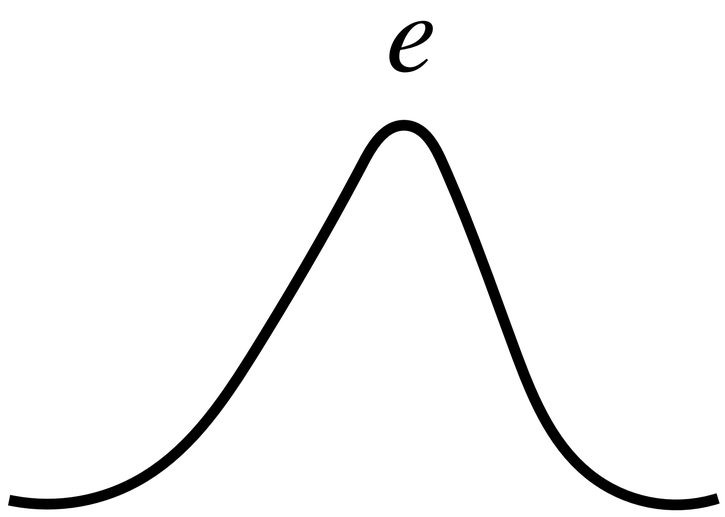
Электроны отталкиваются

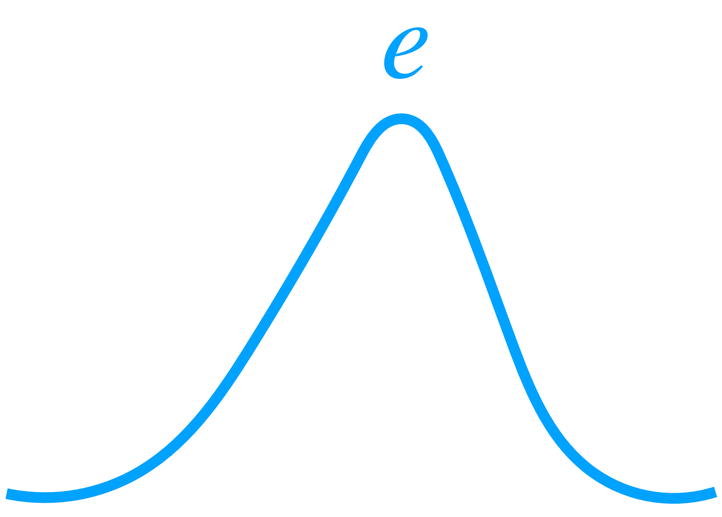




Реальность

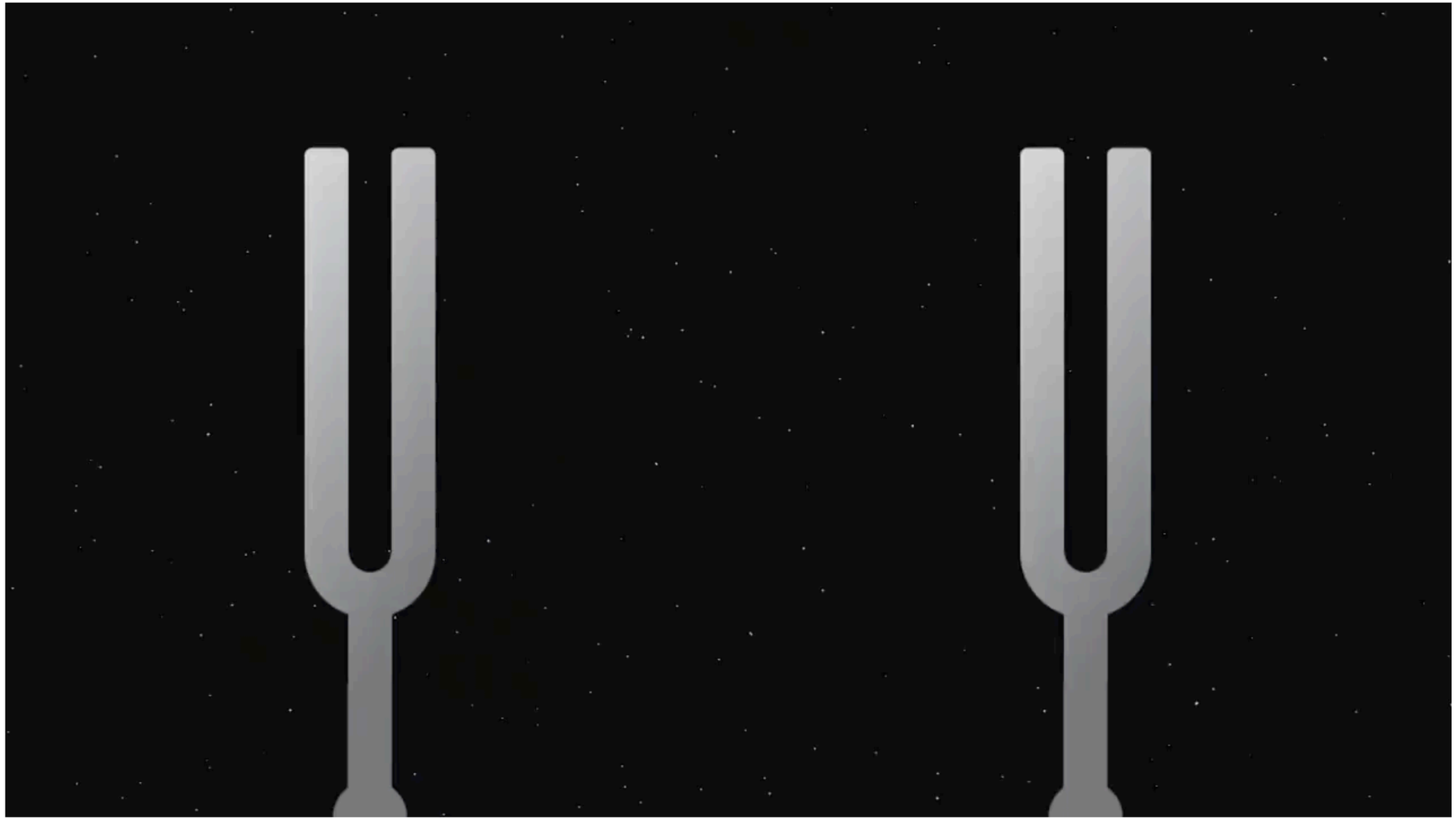
Полный игнор





Почему электроны не чувствуют друг друга?!

Две вилки в воздухе

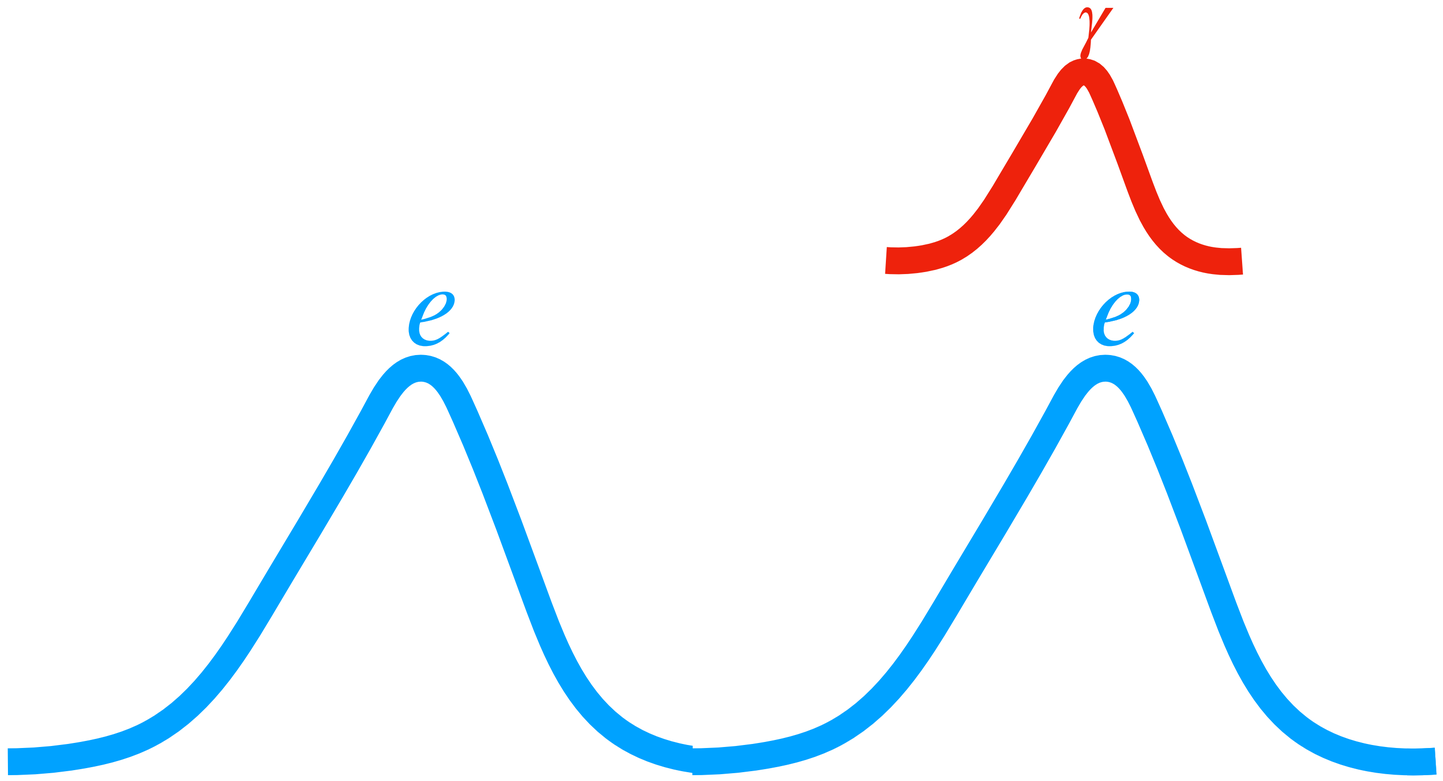


Адаптировано из D.Lincoln

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



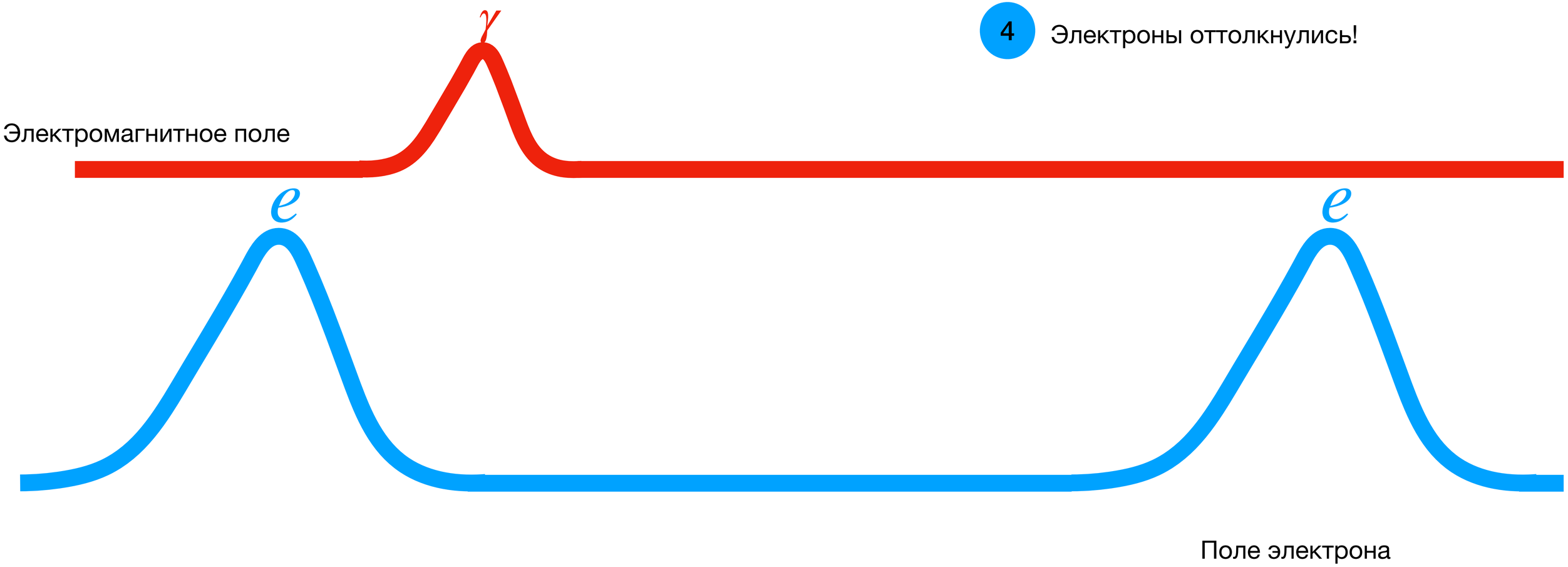
Электромагнитное поле

Поле электрона

Рассмотрим два электрона

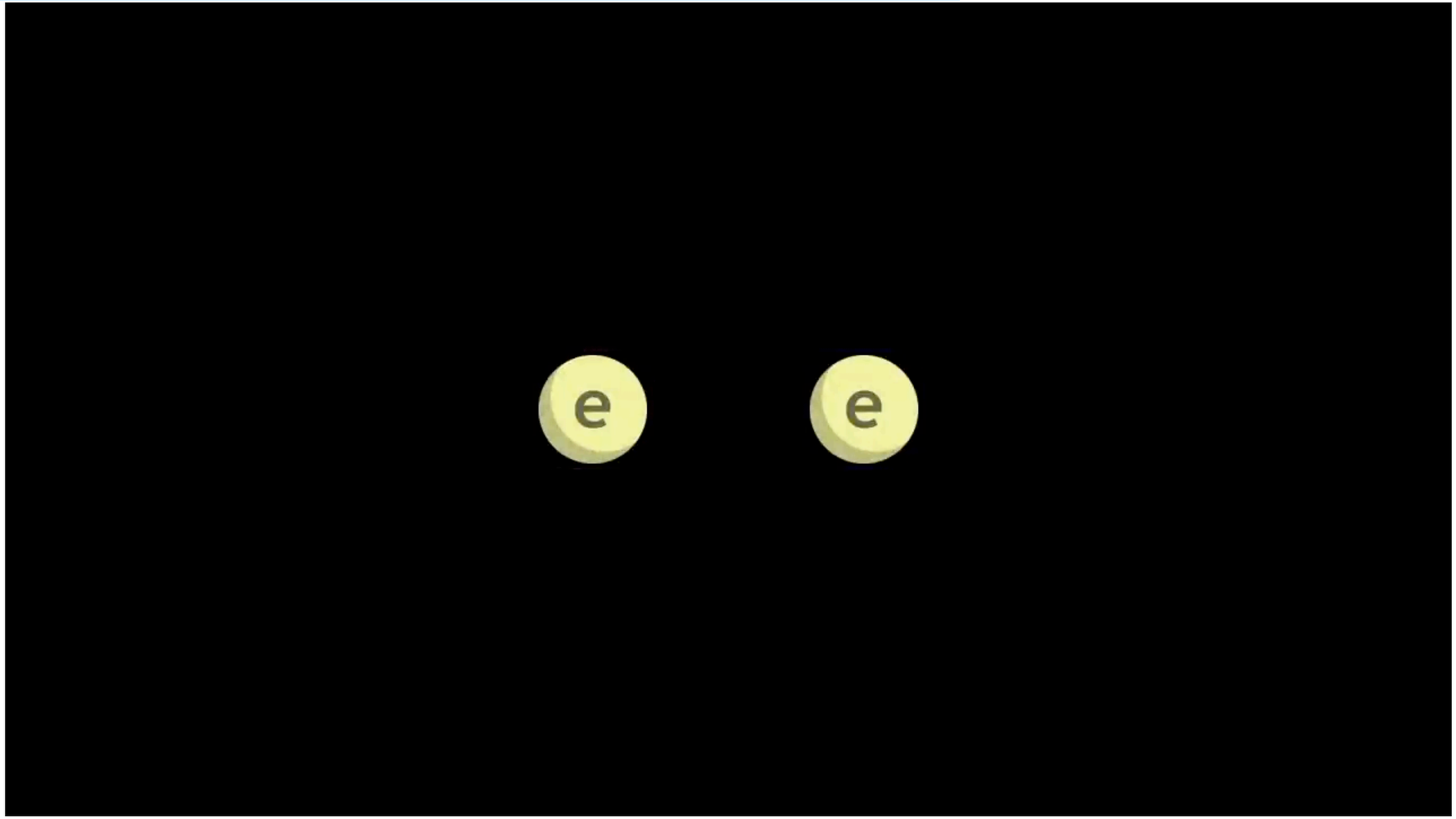
В присутствии электромагнитного поля

1. Движутся 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



Адаптировано из ScienceClick

Сила = результат обмена квантом поля

- **Еще одна революционная идея**

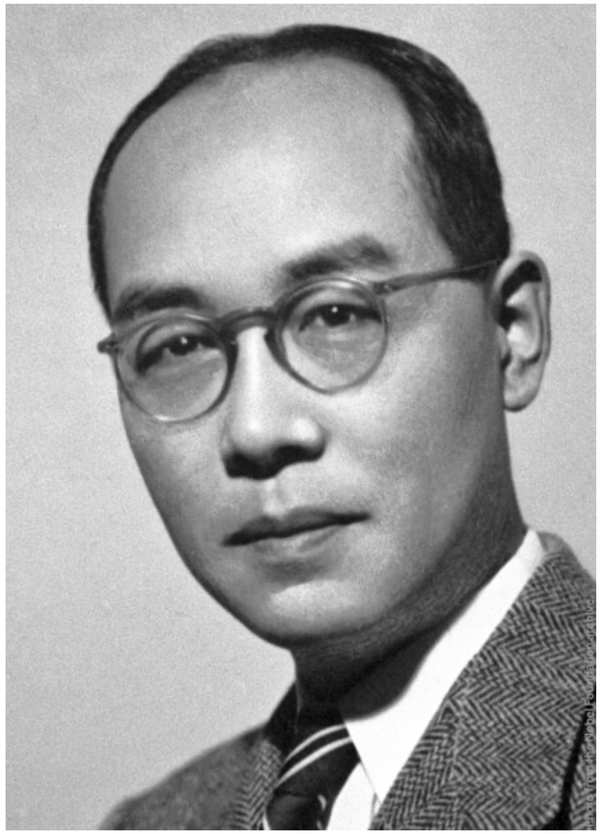
  — Правильно объясняет притяжение и отталкивание как результат квантовой интерференции

  — Потенциал взаимодействия зависит от массы переносчика взаимодействия

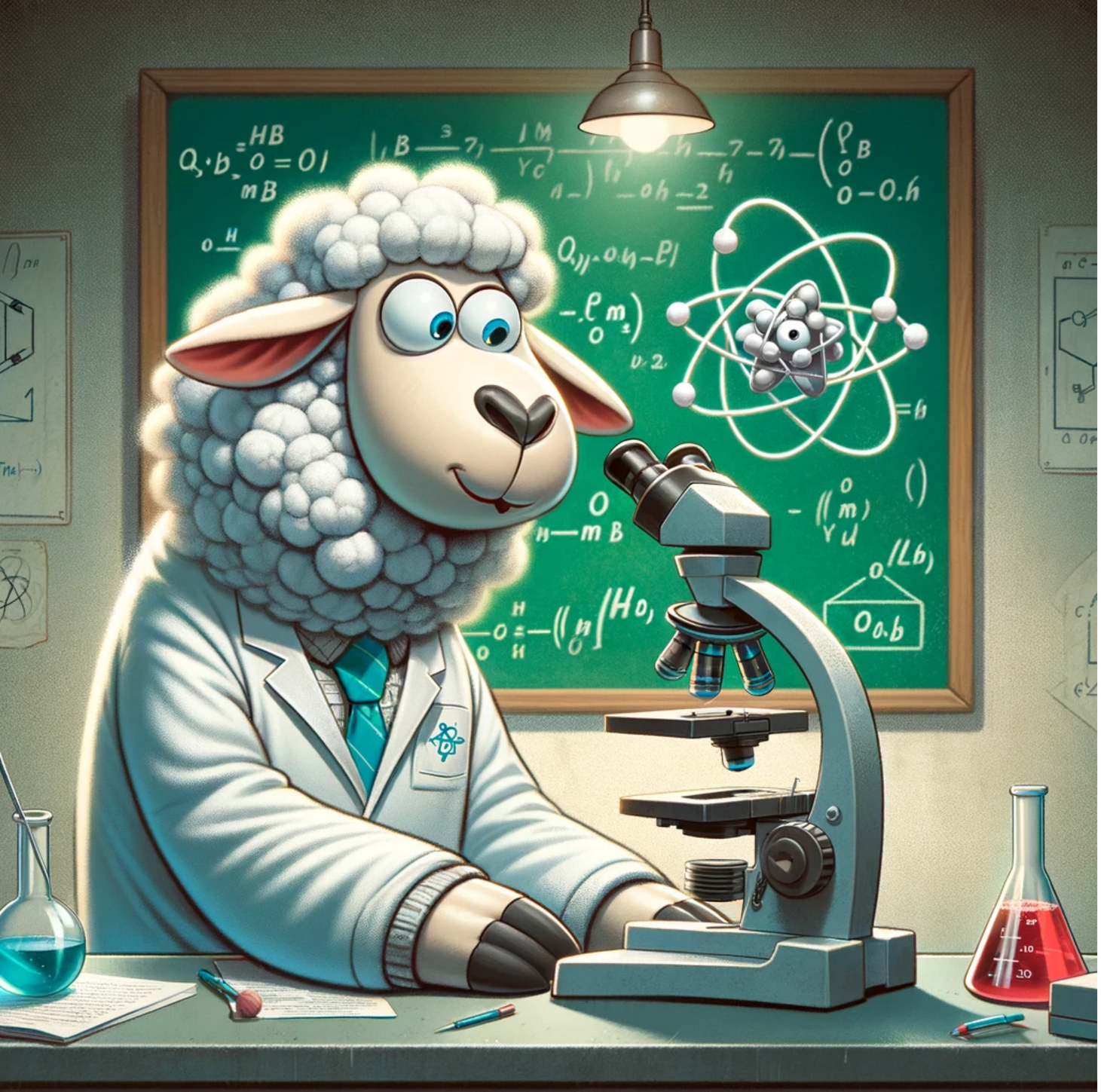
- **Сила взаимодействия зависит от размерности пространства**

	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

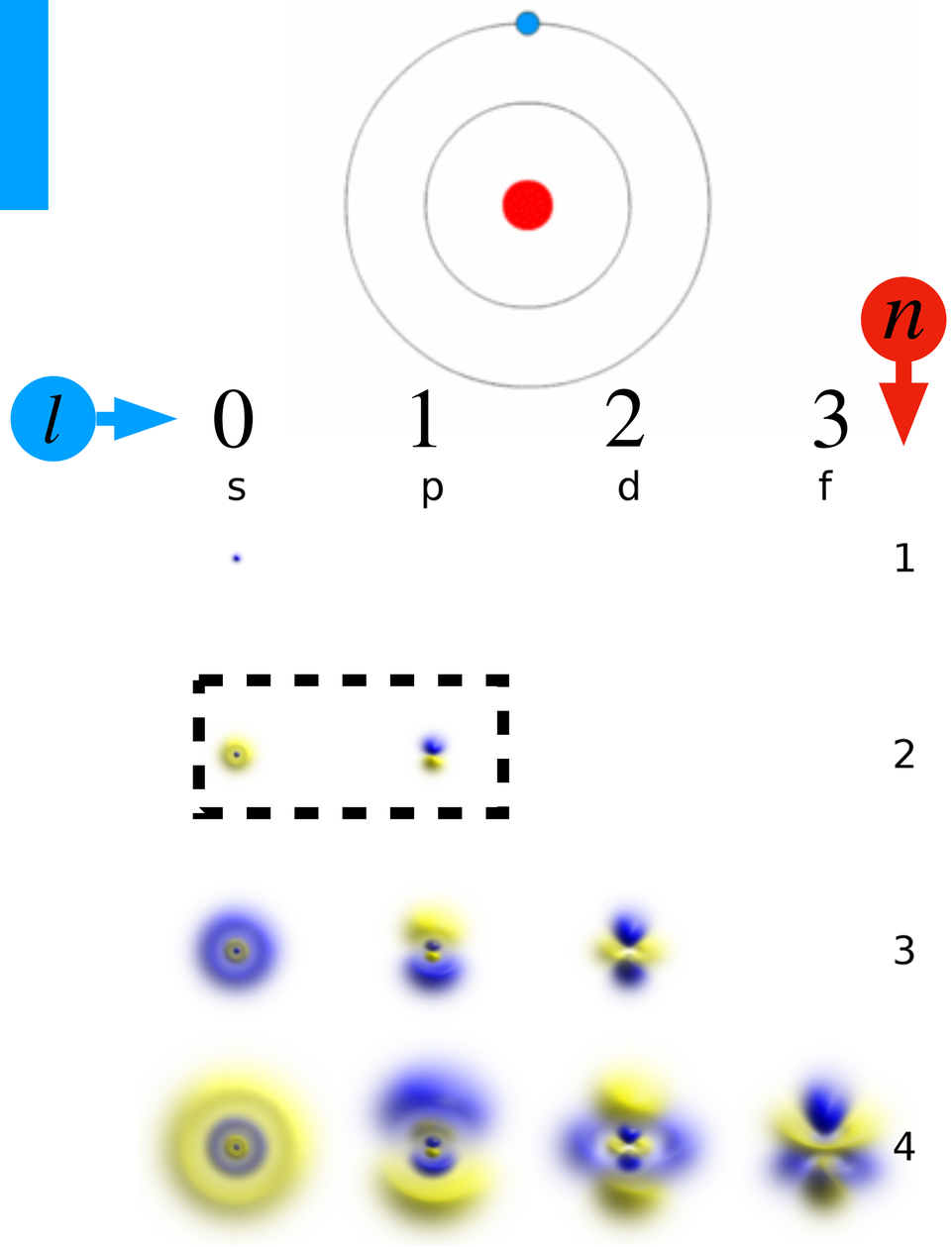
Атом водорода

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



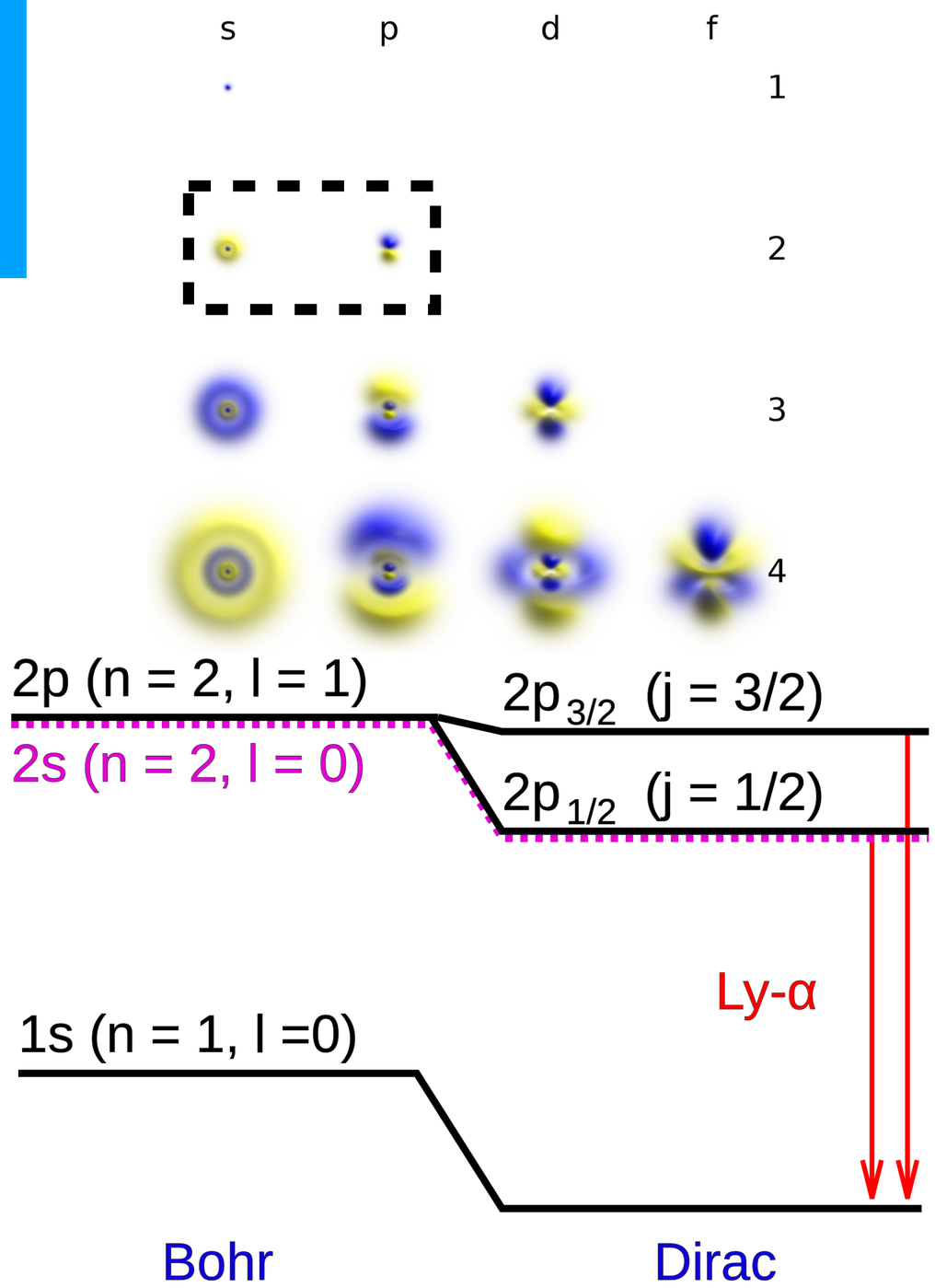
Атом водорода

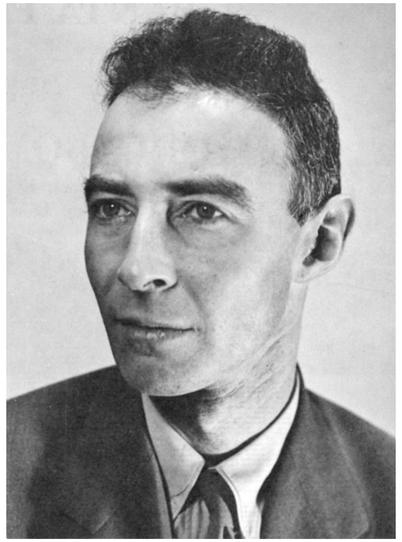
Энергетический спектр

- **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:

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

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





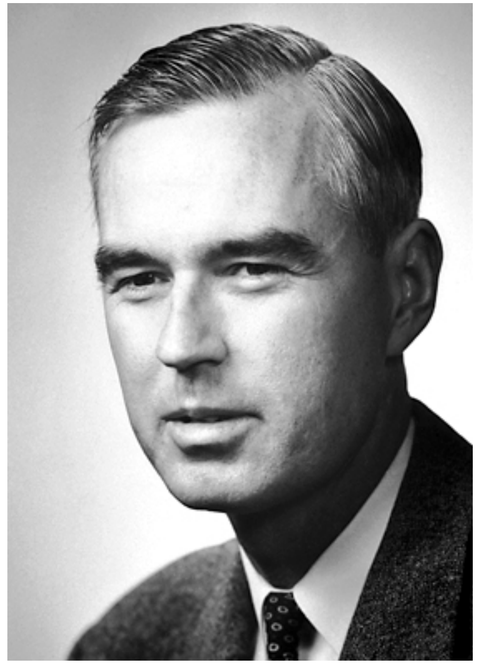
Роберт Оппенгеймер

Конференция на шелтерском острове (Нью-Йорк). 1947

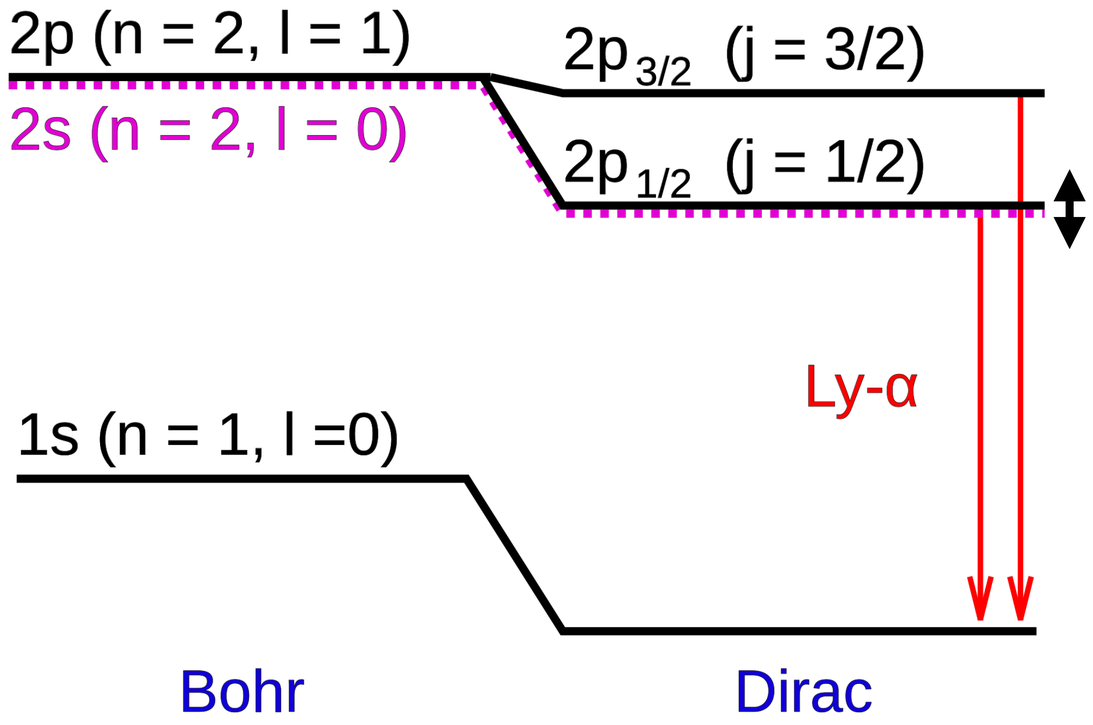
Лэмб и Ризерфорд

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

Источник рисунков на слайде: википедия

Качественное объяснение
(Велтон)

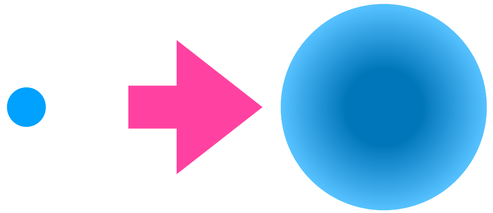
Лэмбовского сдвига

- **Электрон и его взаимодействие с вакуумом**

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

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

— 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

$$\langle \delta \mathbf{r}^2 \rangle = \infty$$

Сказка о гадком утенке

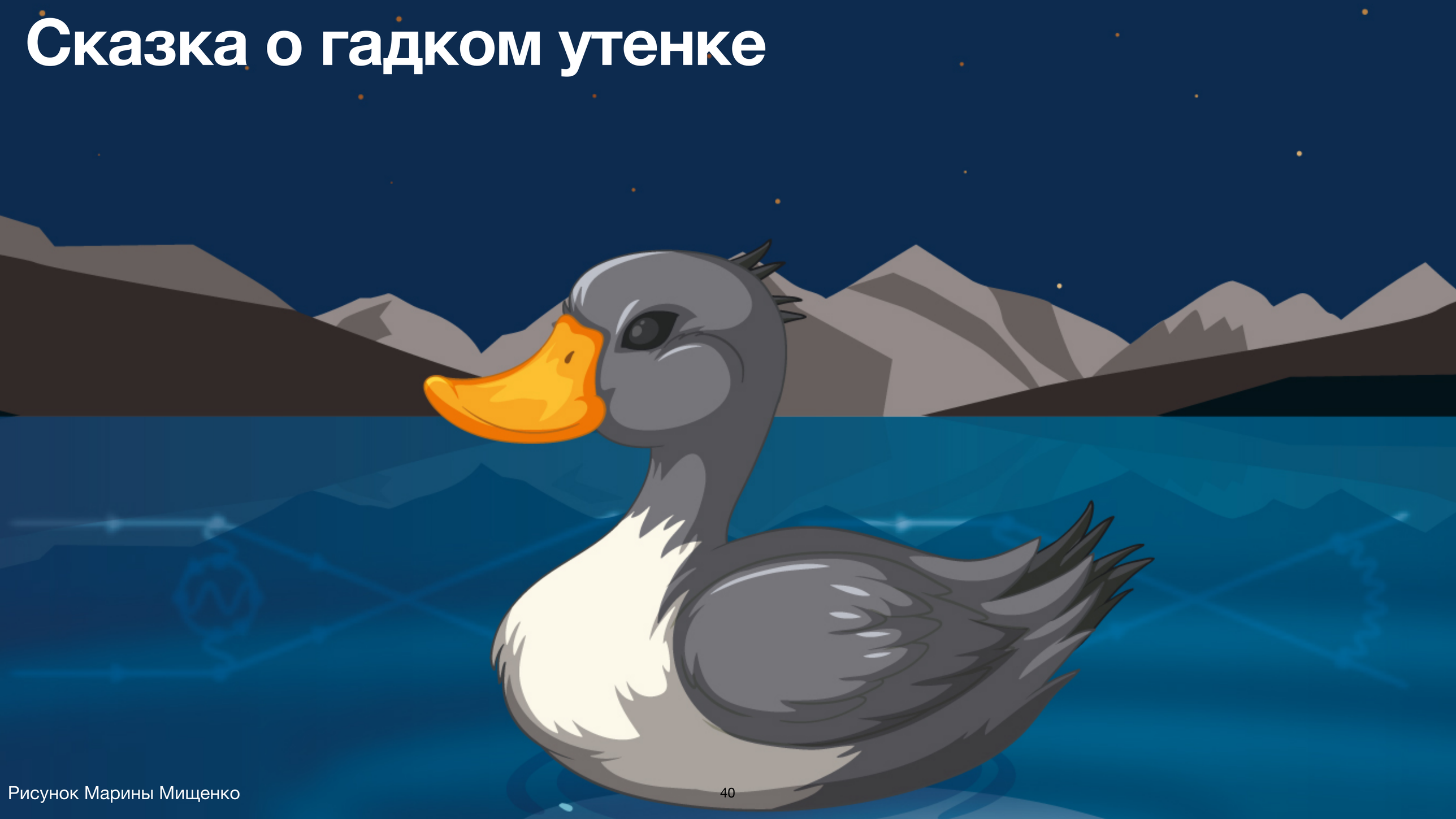
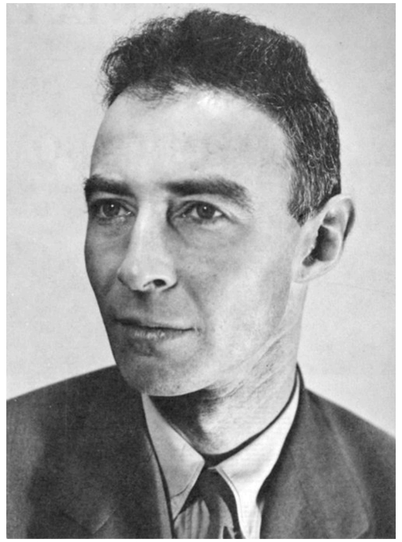


Рисунок Марины Мищенко

Бесконечные мучения и глоток надежды

Собственная энергия электрона бесконечна

В квантовой теории поля



Роберт Оппенгеймер

- **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

Глоток надежды

Рассуждения Бете

Ганс 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.

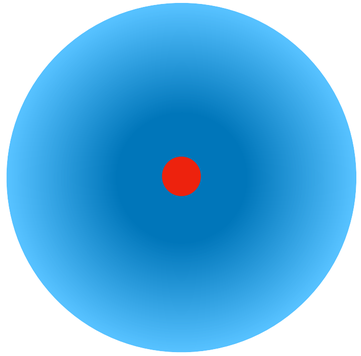
- **Это позволило Бете вычислить Лэмбовский сдвиг**

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

И ЧеТамКак?

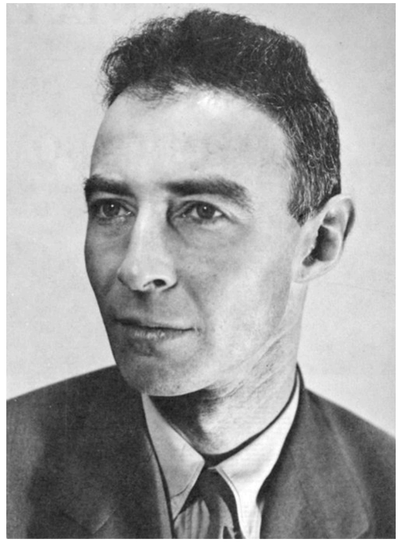
С размазкой электрона

- **«Размазка точечного» электрона:**
  - $\sqrt{\langle \delta \mathbf{r}^2 \rangle} \simeq 386$ 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

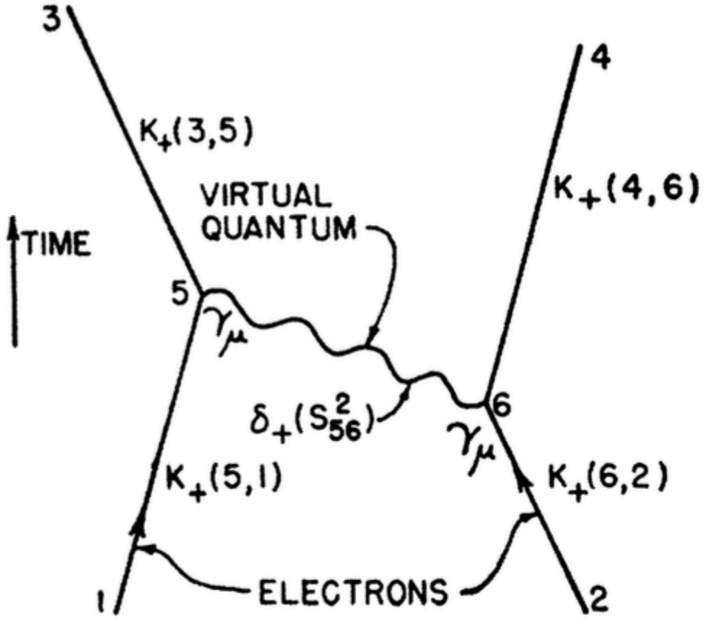
Швингера и Фейнмана

- **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

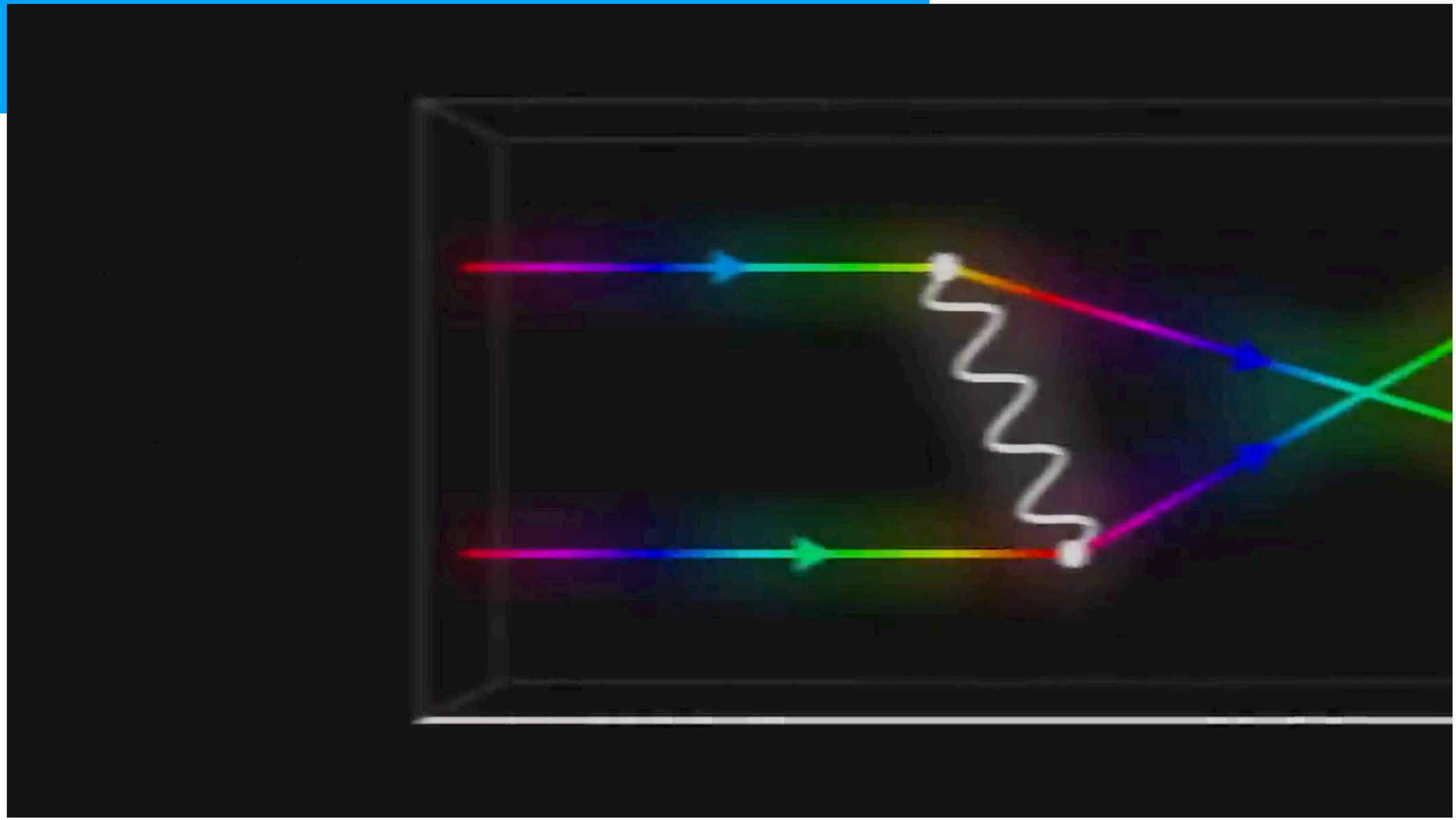
Великий математик, физик и генератор идей

- **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



Адаптировано из ScienceClick

Бесконечности под контролем

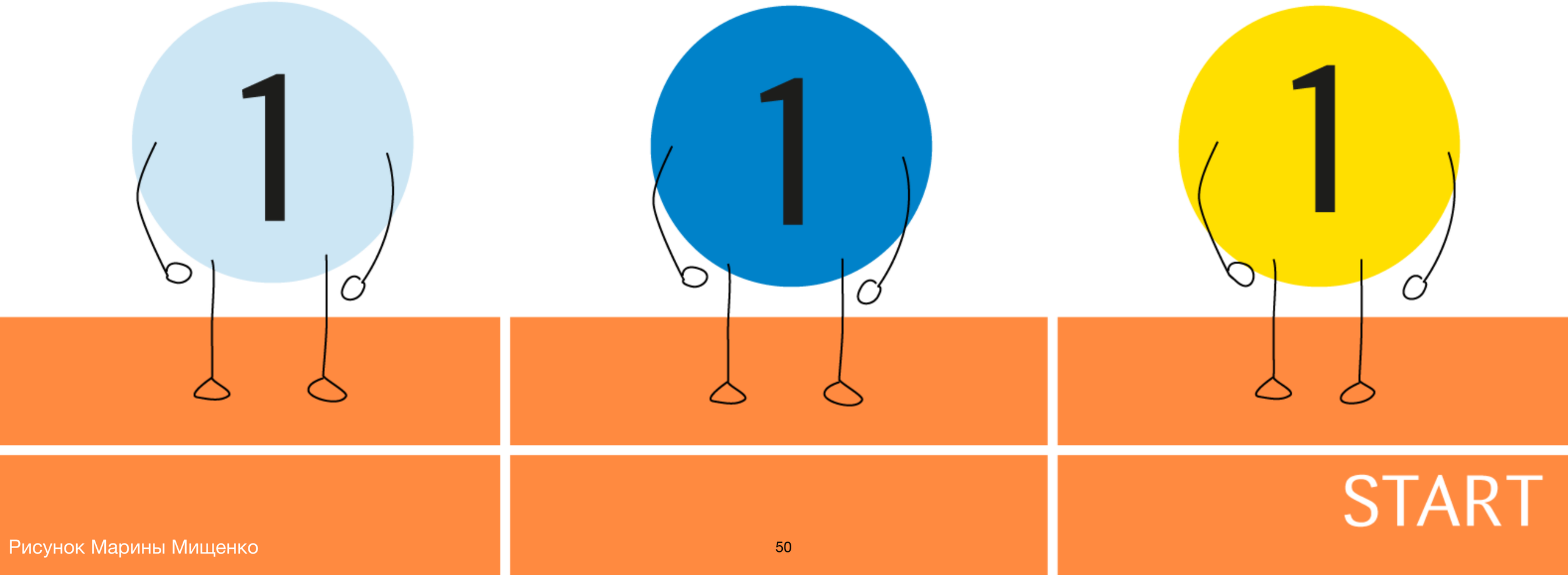
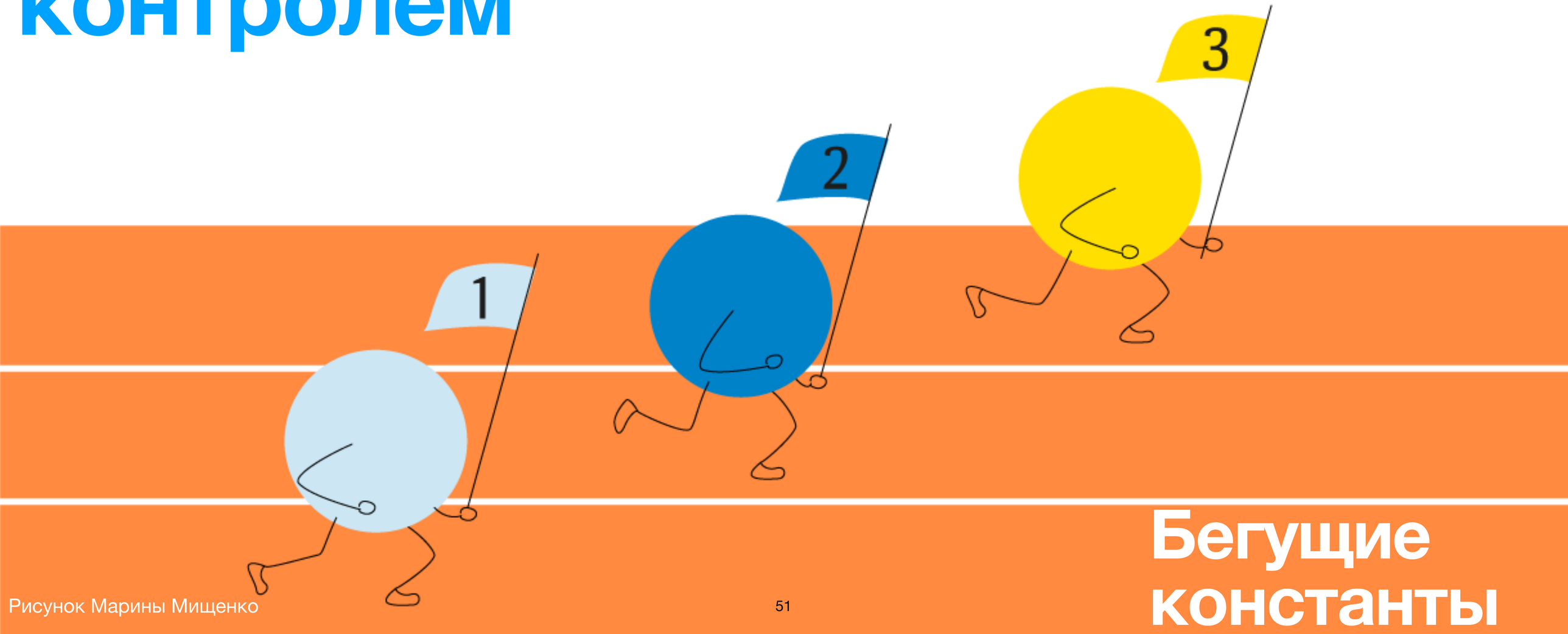


Рисунок Марины Мищенко

Бесконечности под контролем



Бегущие константы

Рисунок Марины Мищенко

Работа с бесконечностями

- **Открытие ренорм-группы (1953)**

  — Эрнст Штукельберг

  — М. Гелл-Ман, Лоу

- **Главные выводы:**

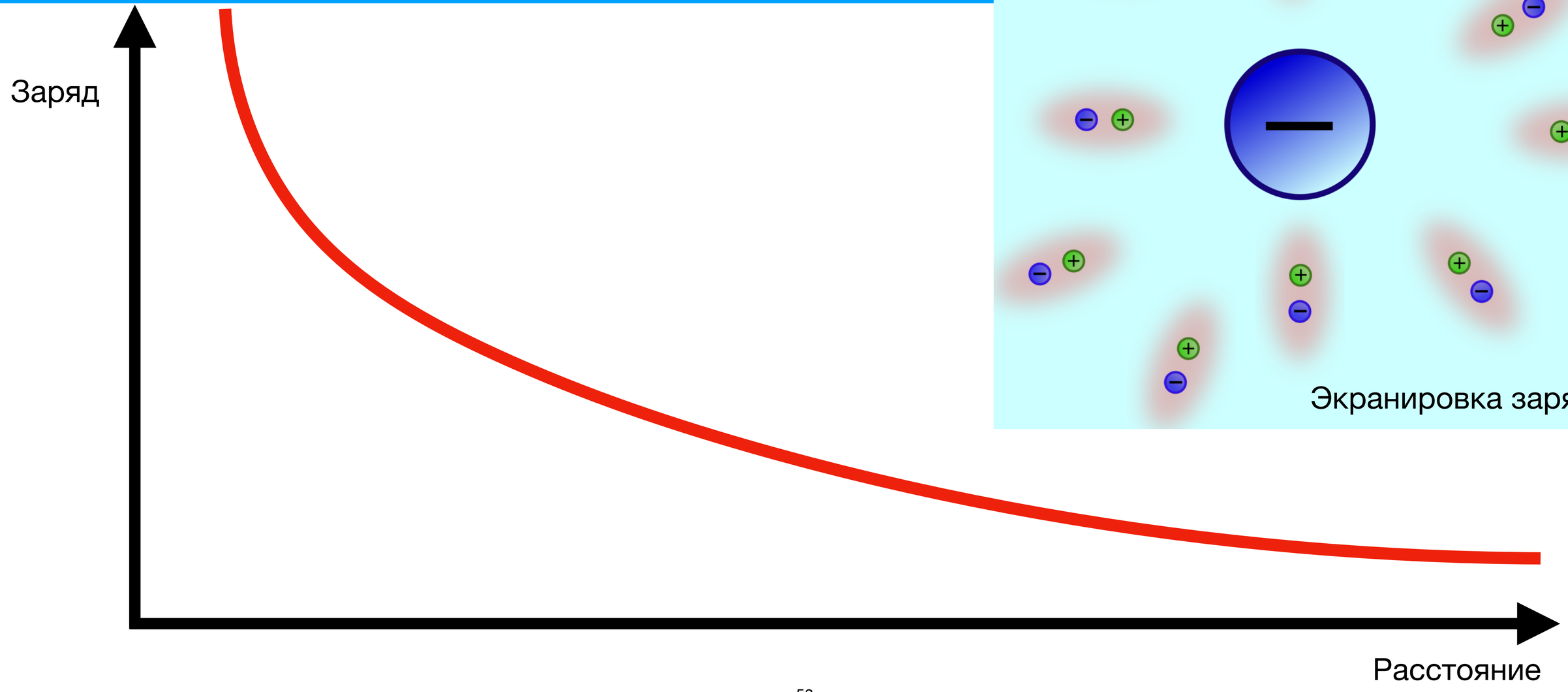
  — Константные значения электрического заряда и массы электрона не совместимы с КТП

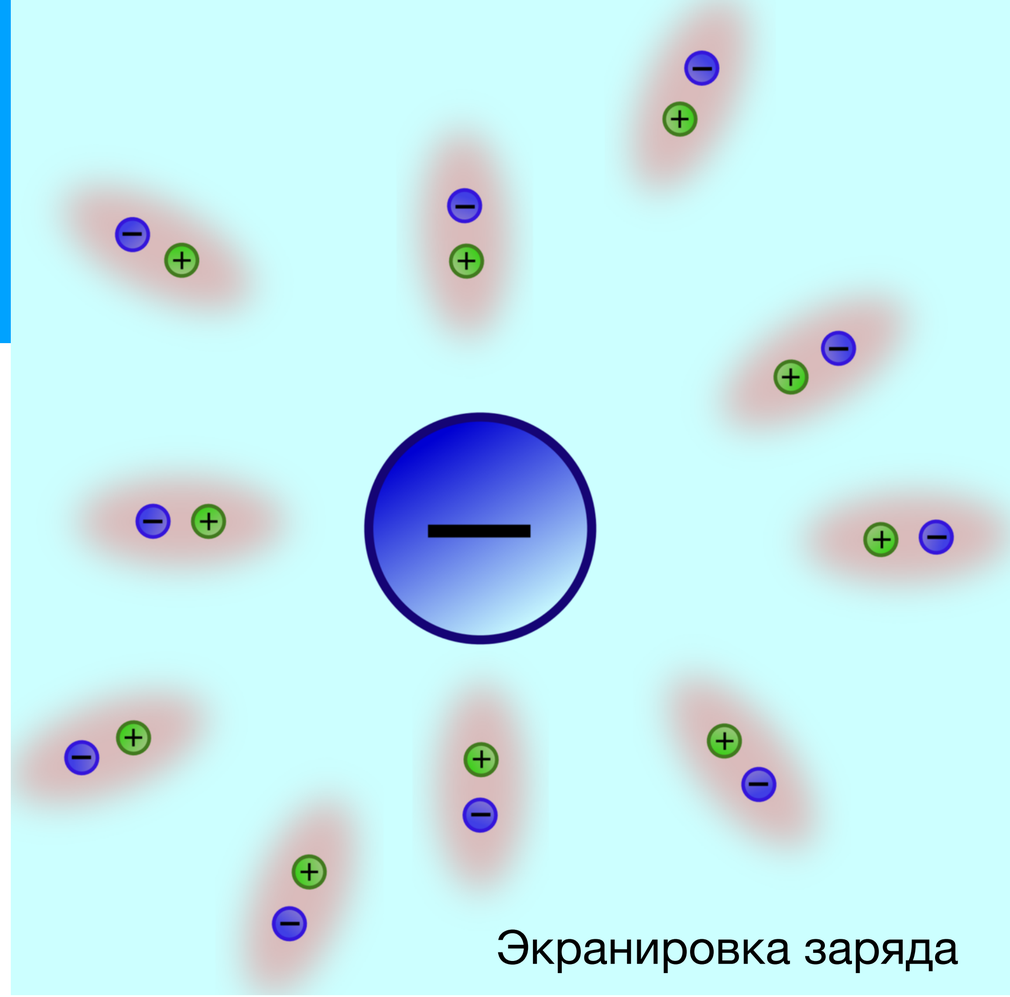
  — Заряд и масса зависит от расстояния между взаимодействующими электронами

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: $K^0, \Lambda, \ldots$
  - Открыто нейтрино.
  - Четыре взаимодействия: электромагнитное, **слабое, сильное** и гравитационное

54

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?

55

Joint Institute
for Nuclear Research

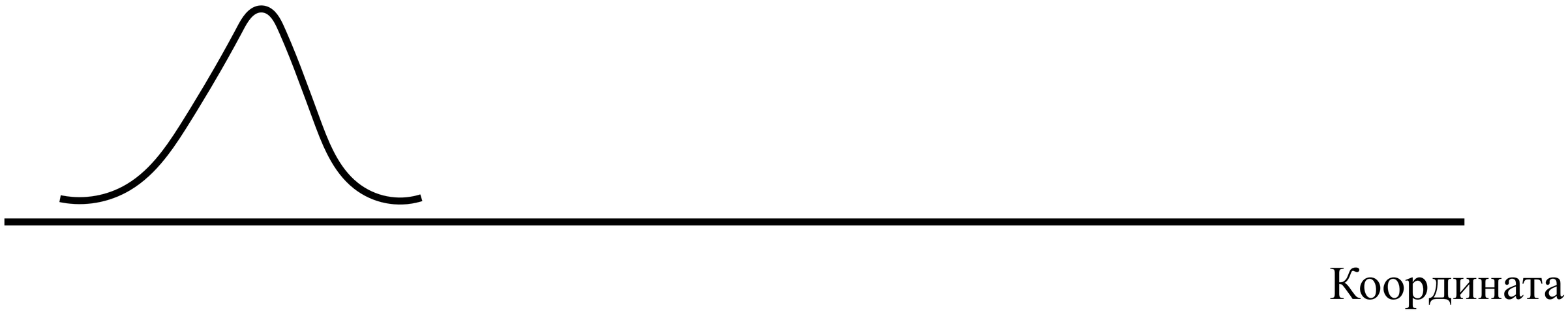
Лекция 3. «Стандартная модель: самое успешное соединение противоречий»

Дополнительные материалы

Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- **Волна электрона в движении**



Притяжение и отталкивание

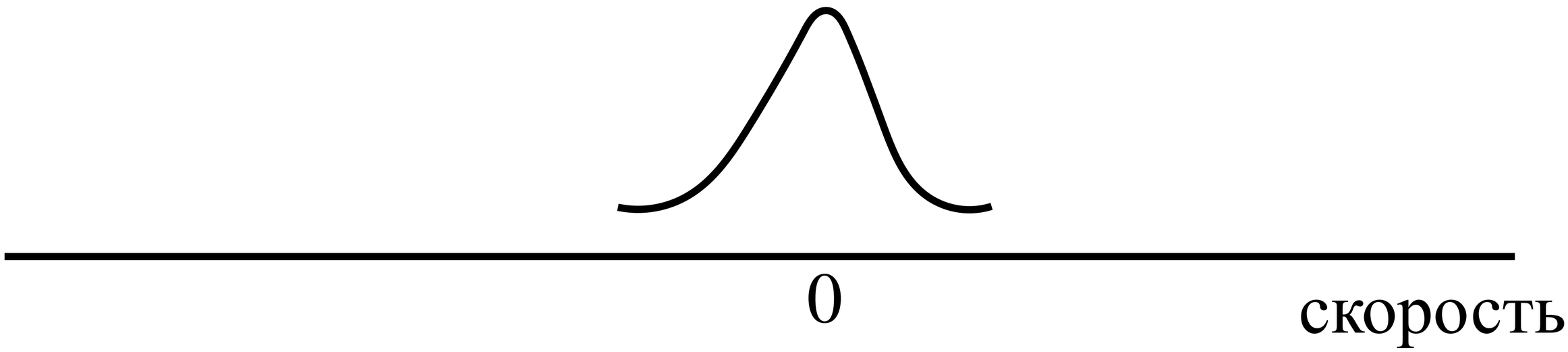
В квантовой теории поля

- **Волна электрона в движении**

Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

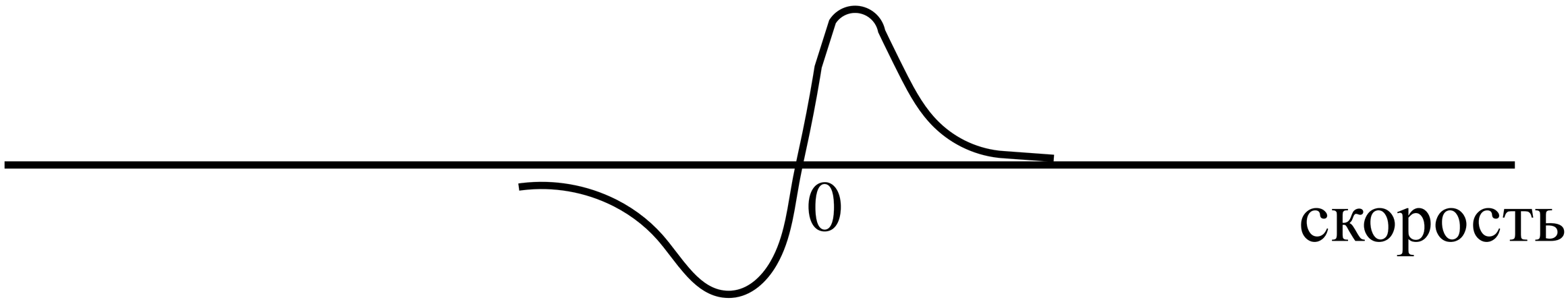
- **Волна электрона в покое**



Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

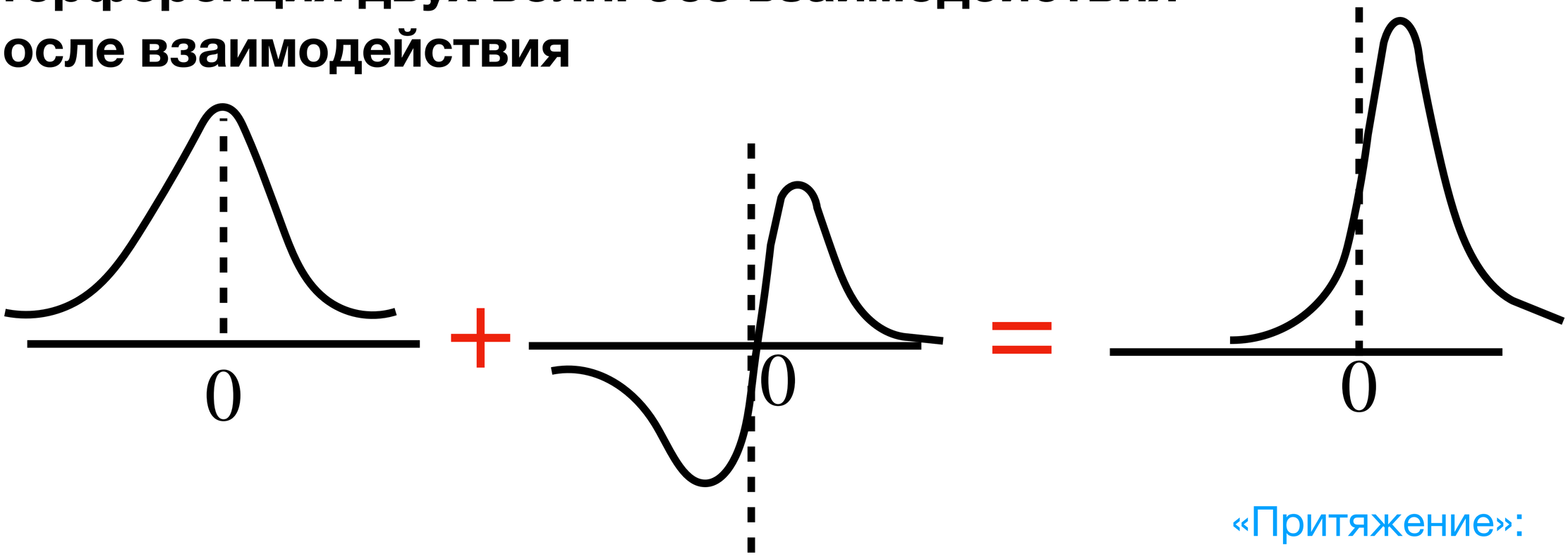
- **Волна электрона после взаимодействия**



Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- **Интерференция двух волн: без взаимодействия и после взаимодействия**

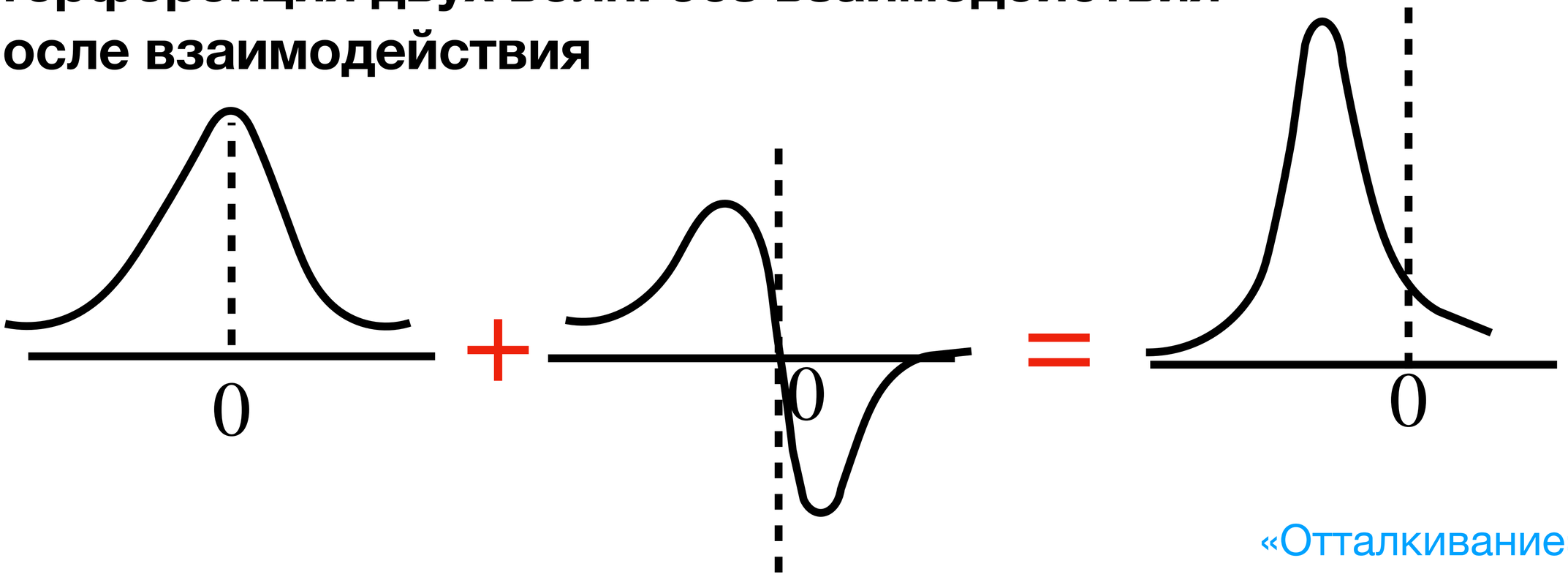


«Притяжение»: электрон движется вправо

Притяжение и отталкивание

В квантовой теории поля

- **Интерференция двух волн: без взаимодействия и после взаимодействия**



«Отталкивание»: электрон движется вправо