

Фундаментальные представления
современной физики:
от взаимодействий элементарных частиц
до структуры и эволюции Вселенной

Лекция 5

Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
- квантовые физические системы в макро- и микромире;
- квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
- релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
- элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- свойства современной Вселенной;
- асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
- тёмная материя и тёмная энергия;
- основные этапы космологической эволюции;
- инфляционная космология;
- астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
- квантовые физические системы в макро- и микромире;
- квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
- релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
- элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- свойства современной Вселенной;
- асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
- тёмная материя и тёмная энергия;
- основные этапы космологической эволюции;
- инфляционная космология;
- астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

Физика элементарных частиц

(приблизительно две лекции)

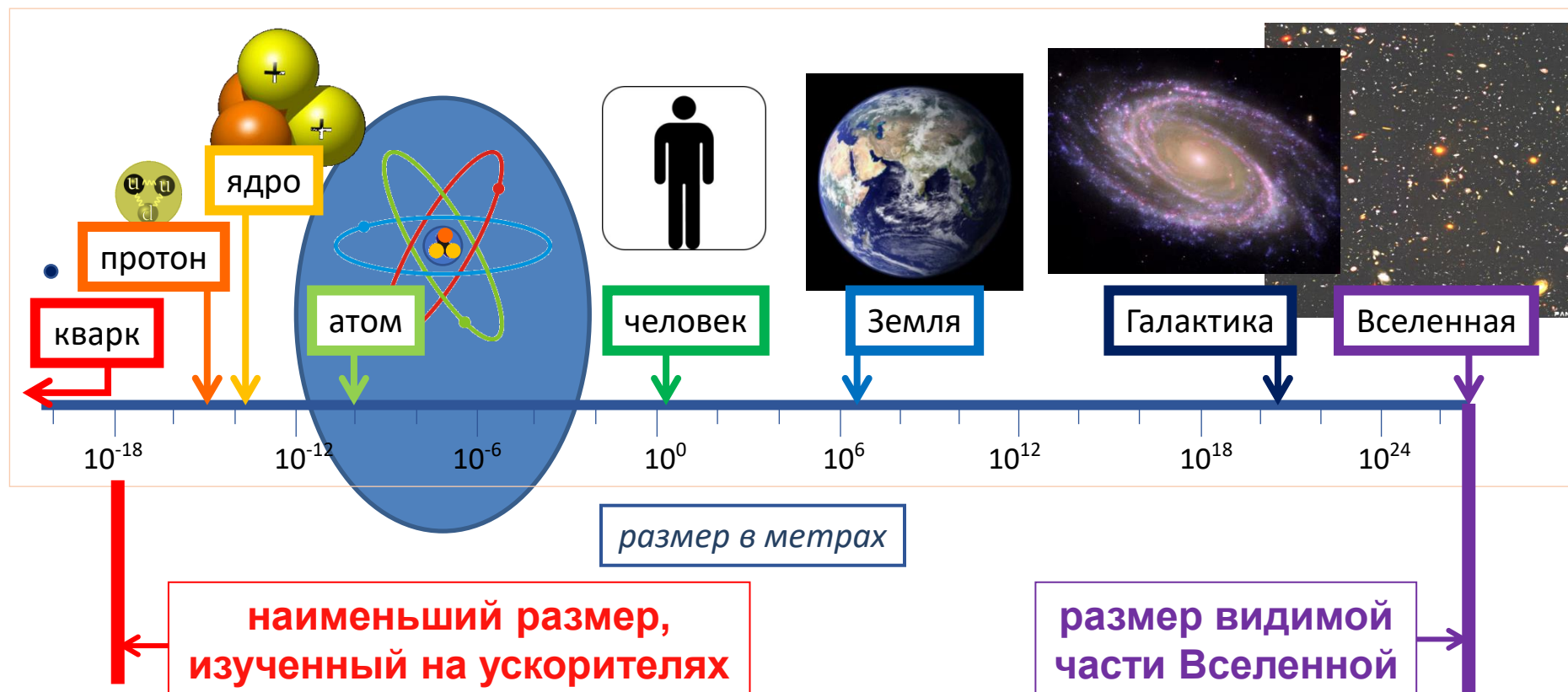
- 1. От квантовой механики к квантовой теории поля.**
- 2. Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.**
- 3. Стандартная модель физики частиц.**
- 4. Симметрии и законы сохранения.**
- 5. Механизм Хиггса и бозон Хиггса.**

Физика элементарных частиц

(приблизительно две лекции)

1. **От квантовой механики к квантовой теории поля.**
2. **Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.**
3. **Стандартная модель физики частиц.**
4. **Симметрии и законы сохранения.**
5. **Механизм Хиггса и бозон Хиггса.**

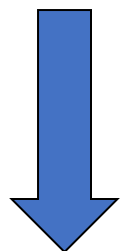
От квантовой механики к квантовой теории поля



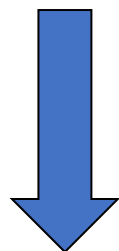
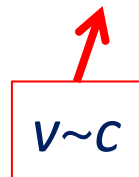
От квантовой механики к квантовой теории поля

Элементарные частицы –

маленькие и **быстро летают!**



нужна
квантовая
механика

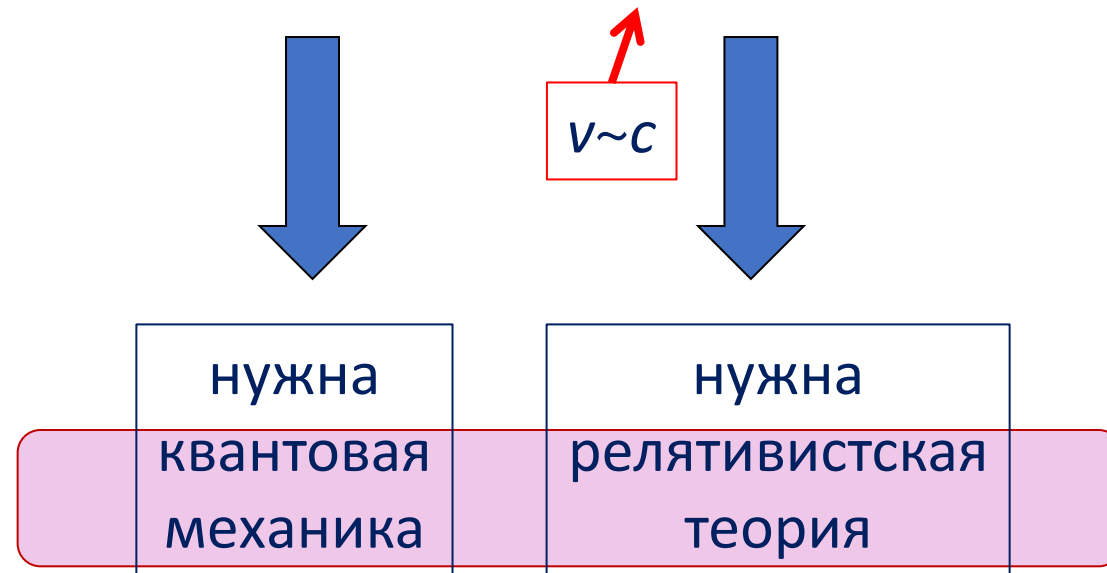


нужна
релятивистская
теория

От квантовой механики к квантовой теории поля

Элементарные частицы –

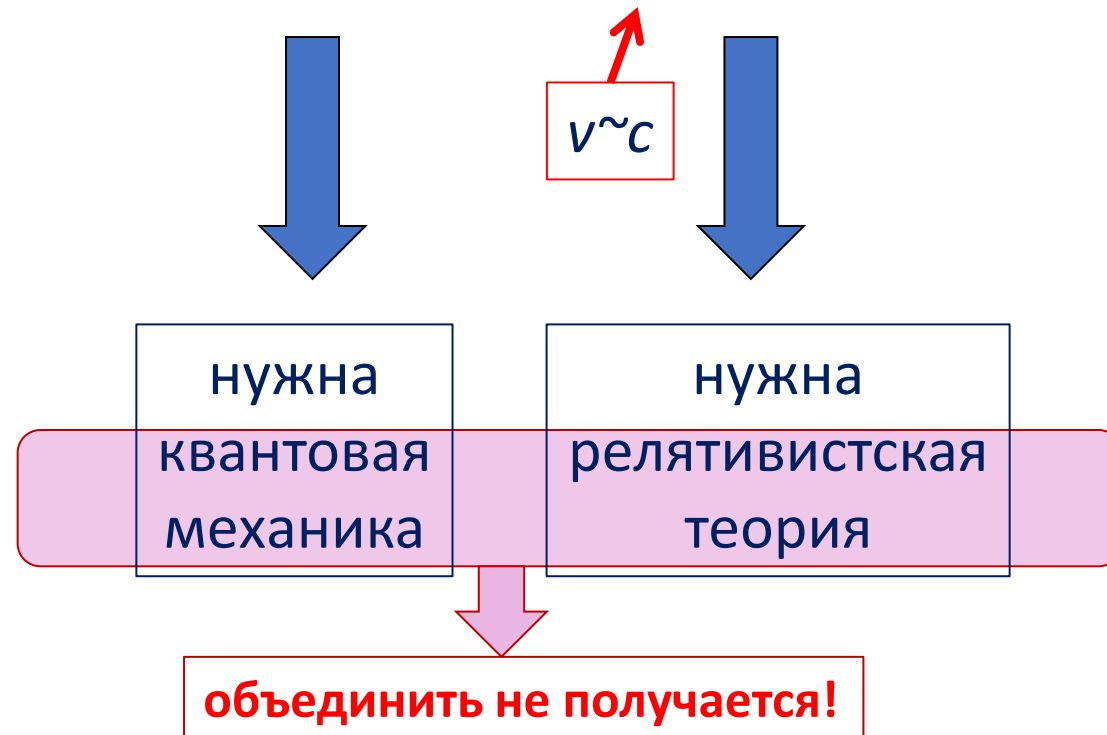
маленькие и **быстро летают!**



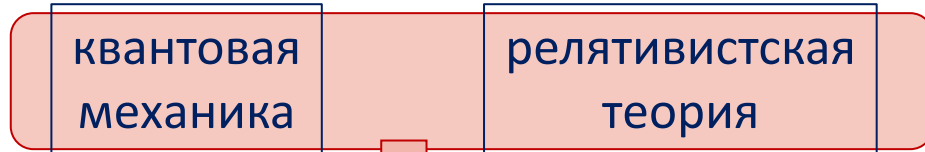
От квантовой механики к квантовой теории поля

Элементарные частицы –

маленькие и **быстро летают!**



От квантовой механики к квантовой теории поля



нерелятивистская классическая механика:

*почему?

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$$

квантовая механика:

$$E \mapsto i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \quad \mathbf{p} \mapsto i\hbar \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}$$

уравнение

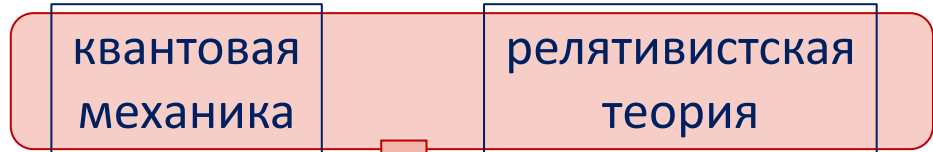
Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \mathbf{x}^2}$$

$$|\Psi|^2$$

интерпретируется как плотность вероятности ≥ 0

От квантовой механики к квантовой теории поля



релятивистская классическая механика:

*почему?

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

квантовая механика:

$$E \mapsto i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \quad \mathbf{p} \mapsto i\hbar \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}$$

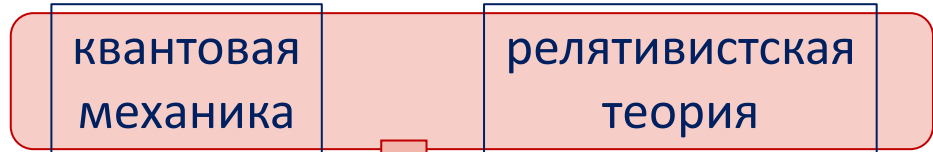
уравнение

Клейна-Гордона-Фока:

$$\hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \hbar^2 c^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \mathbf{x}^2} - m^2 c^4 \Psi$$

нет положительно определенной величины, чтобы интерпретировать как плотность вероятности

От квантовой механики к квантовой теории поля



объединить не получается!

**новый подход:
КВАНТОВОЕ ПОЛЕ**

уравнения похожие, но решения не требуется
интерпретировать как плотность вероятности

От квантовой механики к квантовой теории поля

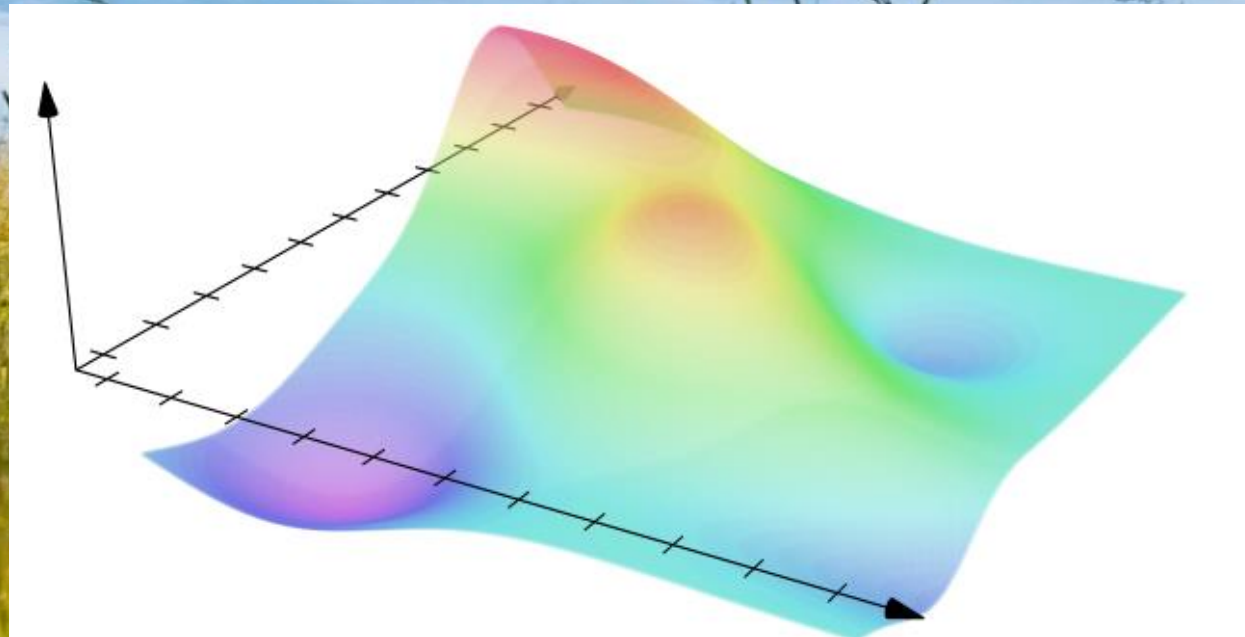
что такое **поле**?



От квантовой механики к квантовой теории поля

что такое поле?

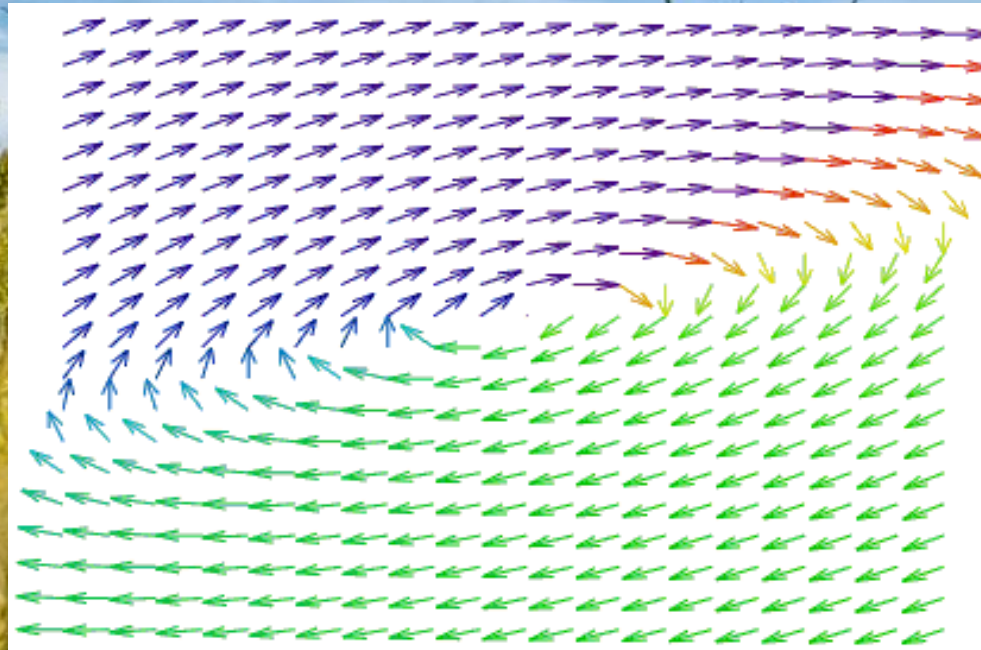
– функция точки пространства
и момента времени, $u(\mathbf{x}, t)$



От квантовой механики к квантовой теории поля

что такое поле?

– функция точки пространства
и момента времени, $u(\mathbf{x}, t)$



От квантовой механики к квантовой теории поля

что такое поле?

– функция точки пространства
и момента времени, $u(\mathbf{x}, t)$

классическая механика:

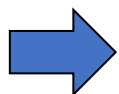
набор «координат» в зависимости от времени

$$q_1(t), q_2(t), q_3(t), \dots q_N(t)$$

классическая теория поля:

номер «координаты» заменяется на точку пространства

$$u(\mathbf{x}, t)$$



система с бесконечным числом степеней свободы

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



- система бесконечного числа квантовых осцилляторов

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



- система бесконечного числа квантовых осцилляторов

$$a^- = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad a^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



□ заменяет описание в терминах
частиц и волн

одно поле,
определенное во всем пространстве-времени, дает
одновременное описание всех частиц
данного типа в Природе

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



- дает вероятностное описание физических процессов

справедливо соотношение неопределенности:

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar$$

От квантовой механики к квантовой теории поля

релятивистская **квантовая теория поля**
описывает частицы и их взаимодействия



□ описывает рождение и
уничтожение частиц в терминах
взаимодействия квантовых полей

Физика элементарных частиц

(приблизительно две лекции)

1. От квантовой механики к квантовой теории поля.
2. **Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.**
3. Стандартная модель физики частиц.
4. Симметрии и законы сохранения.
5. Механизм Хиггса и бозон Хиггса.

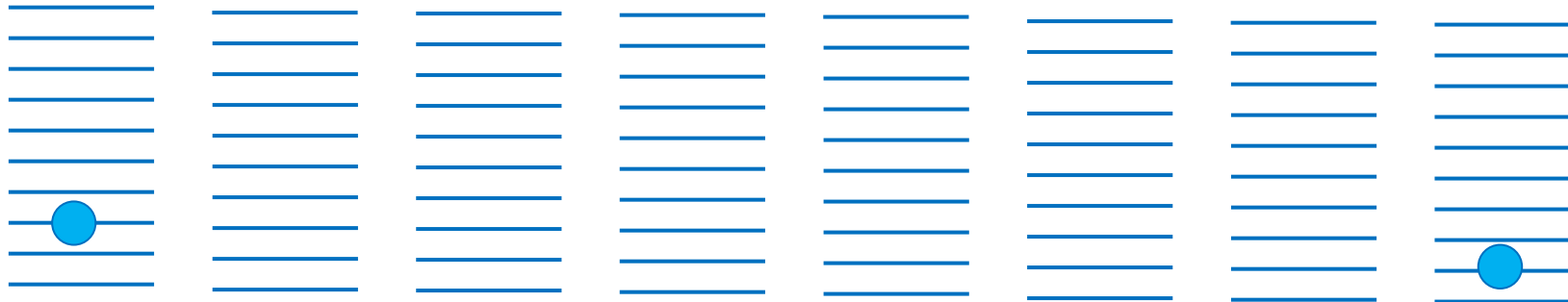
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



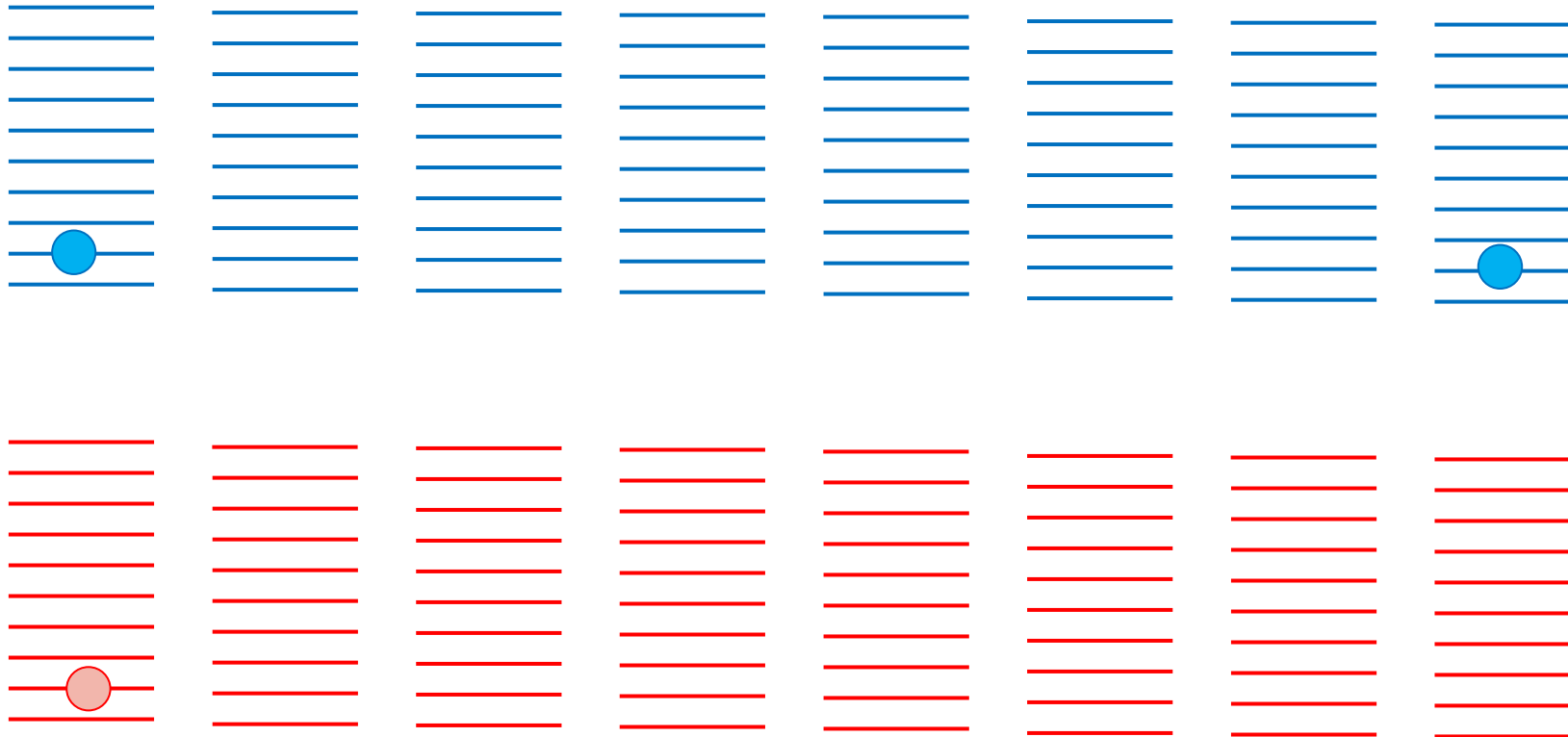
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



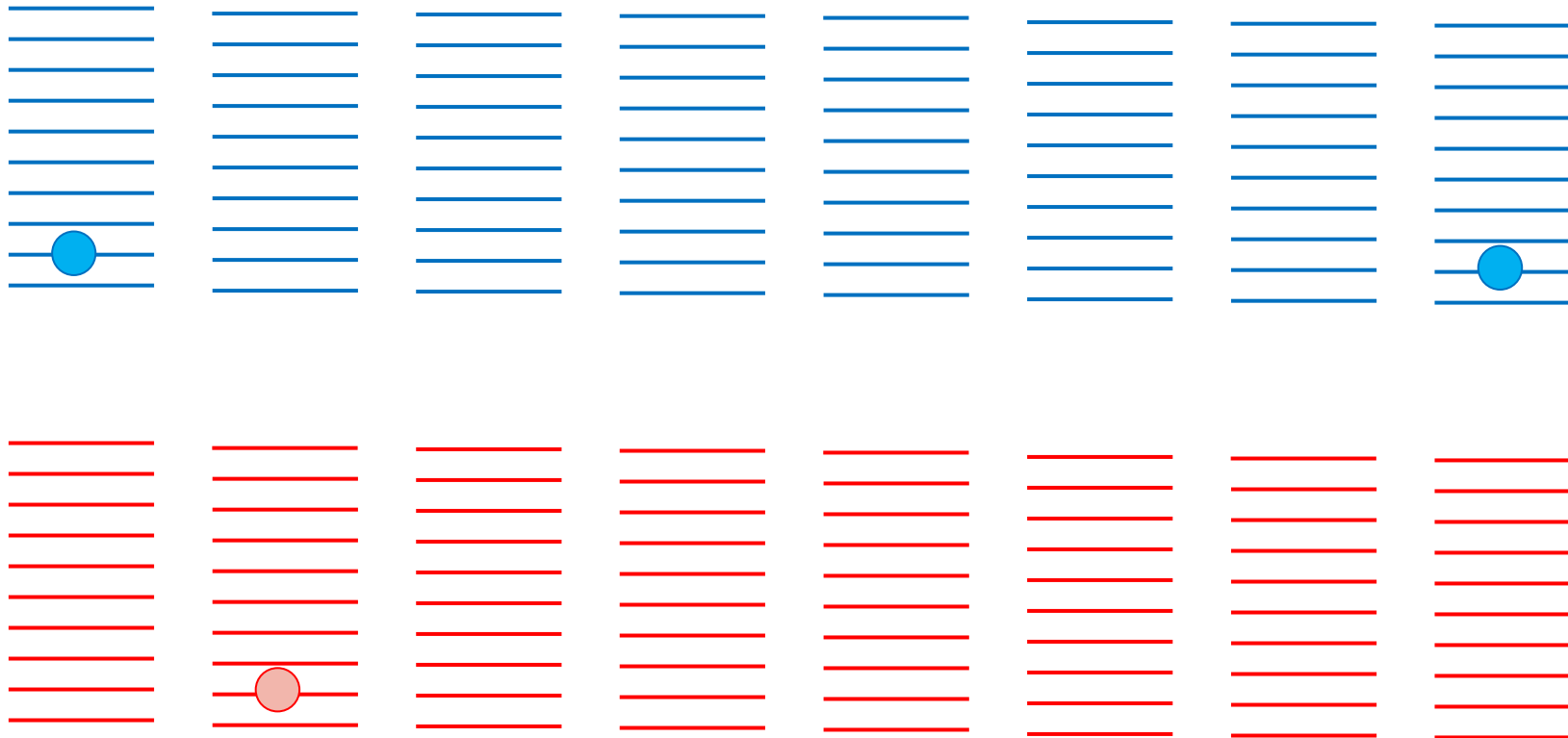
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



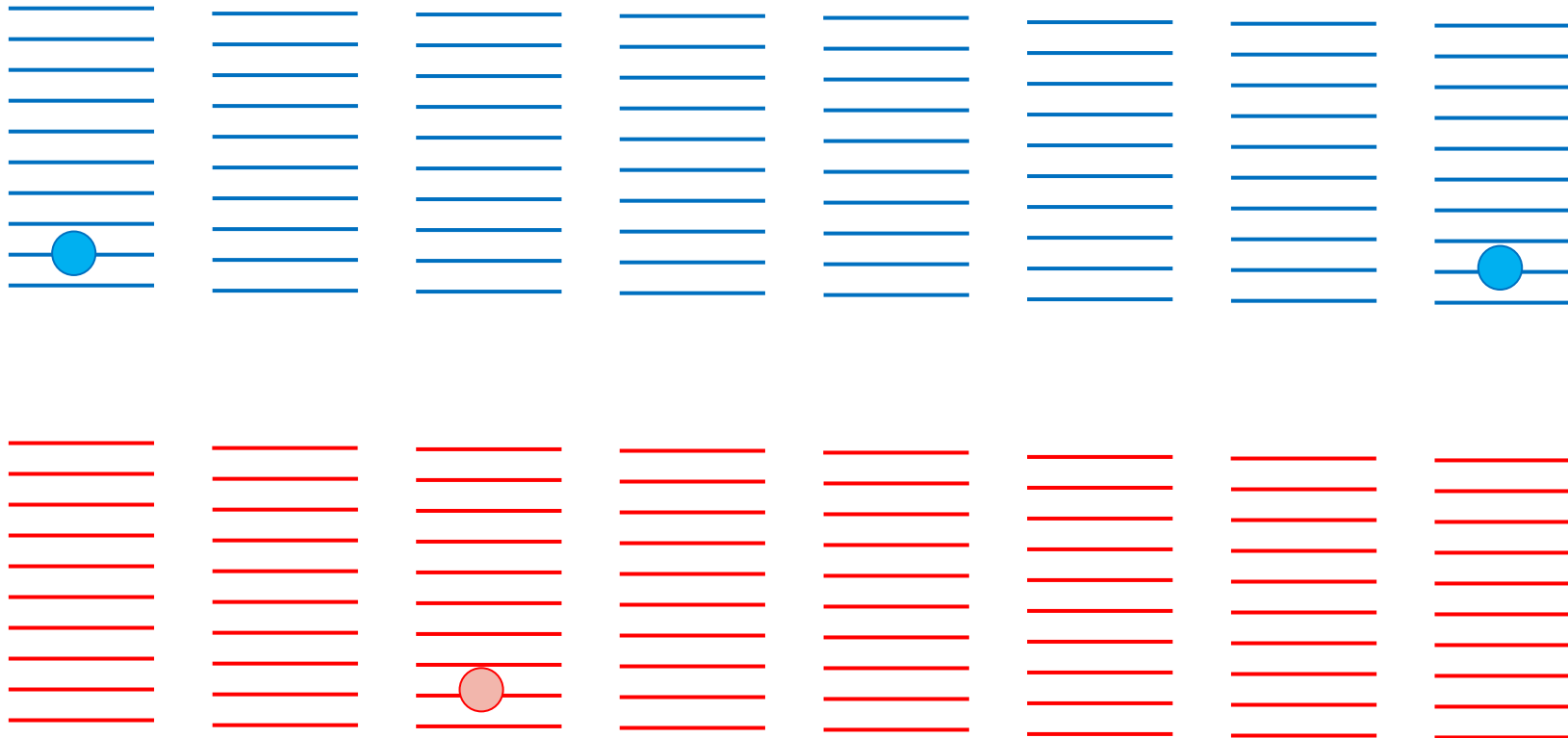
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



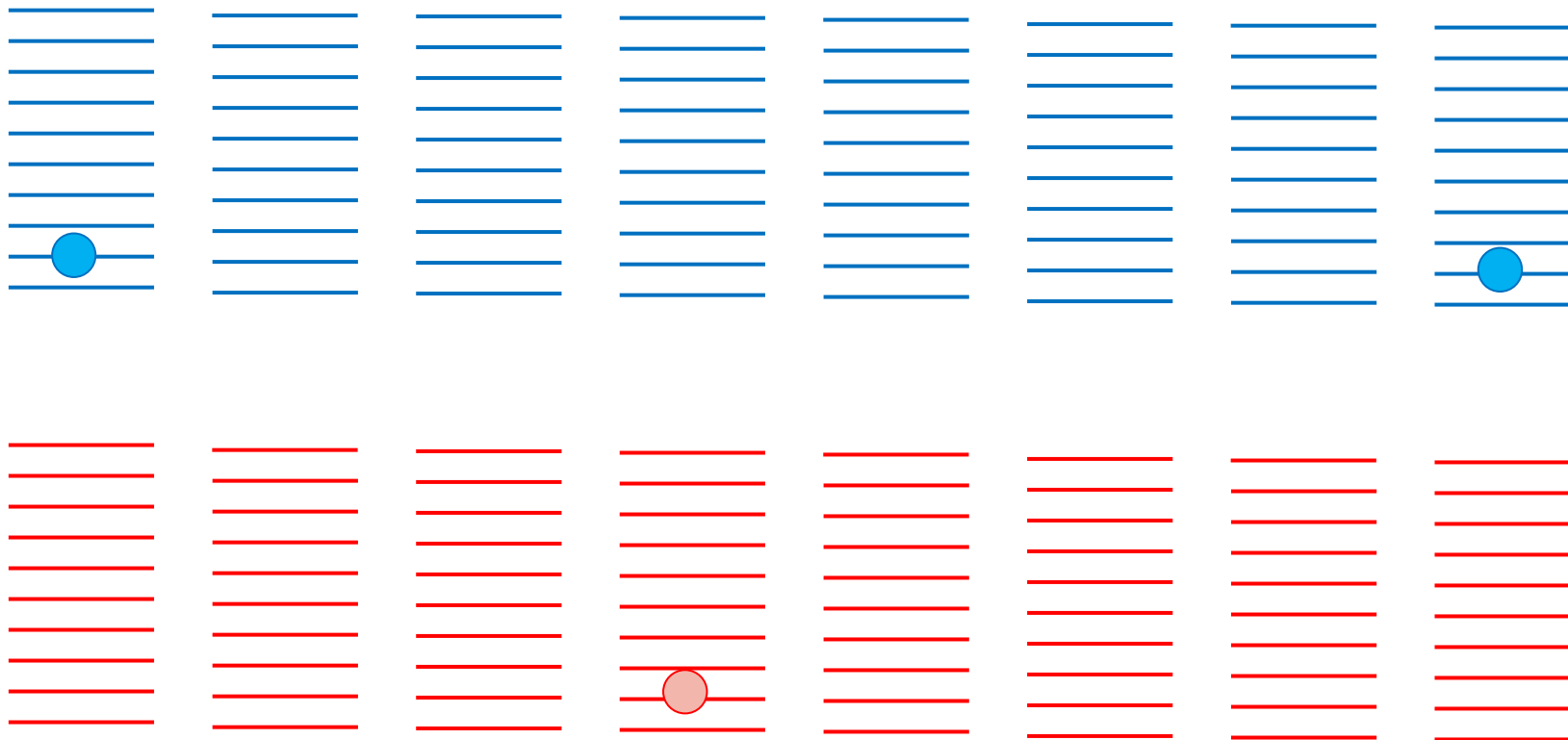
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



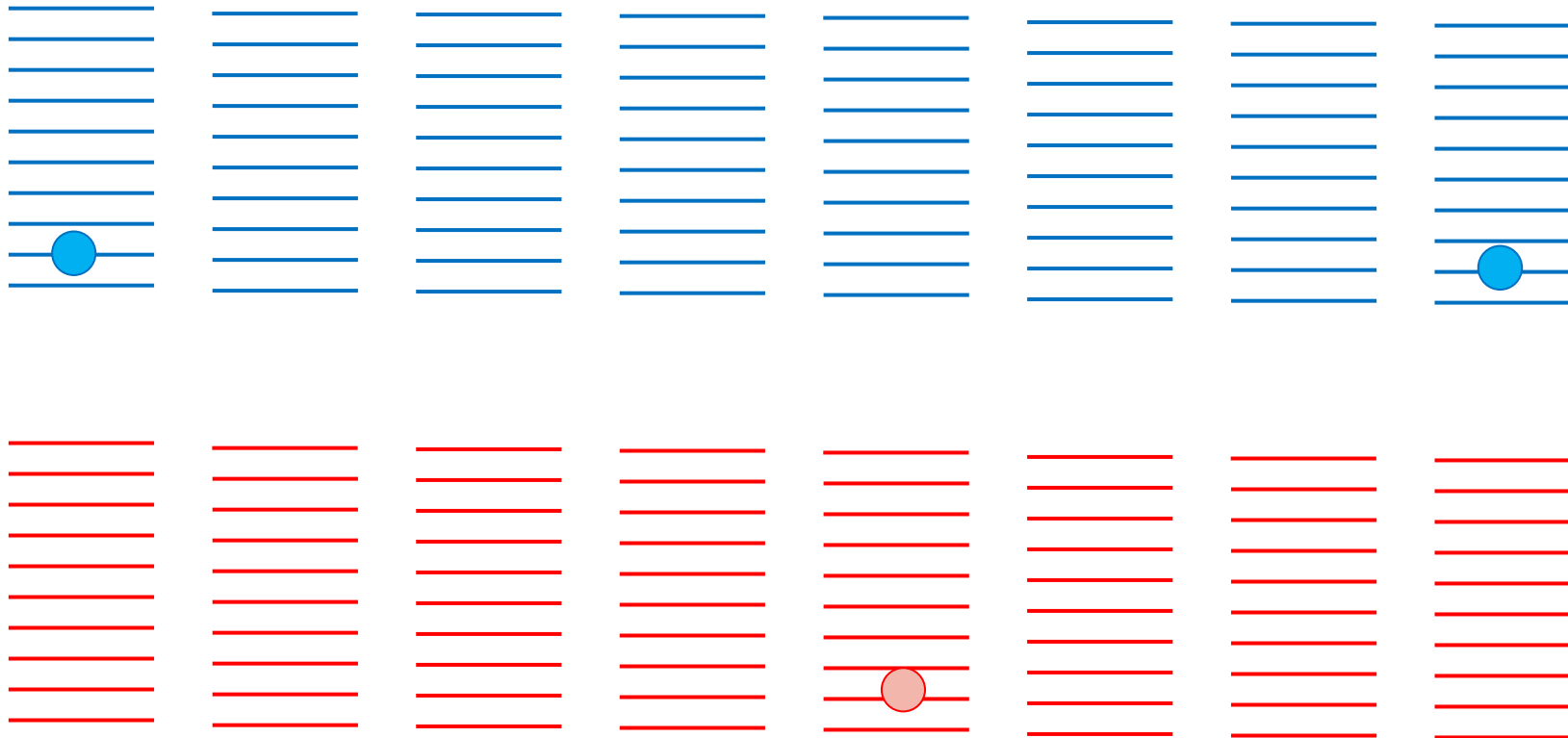
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



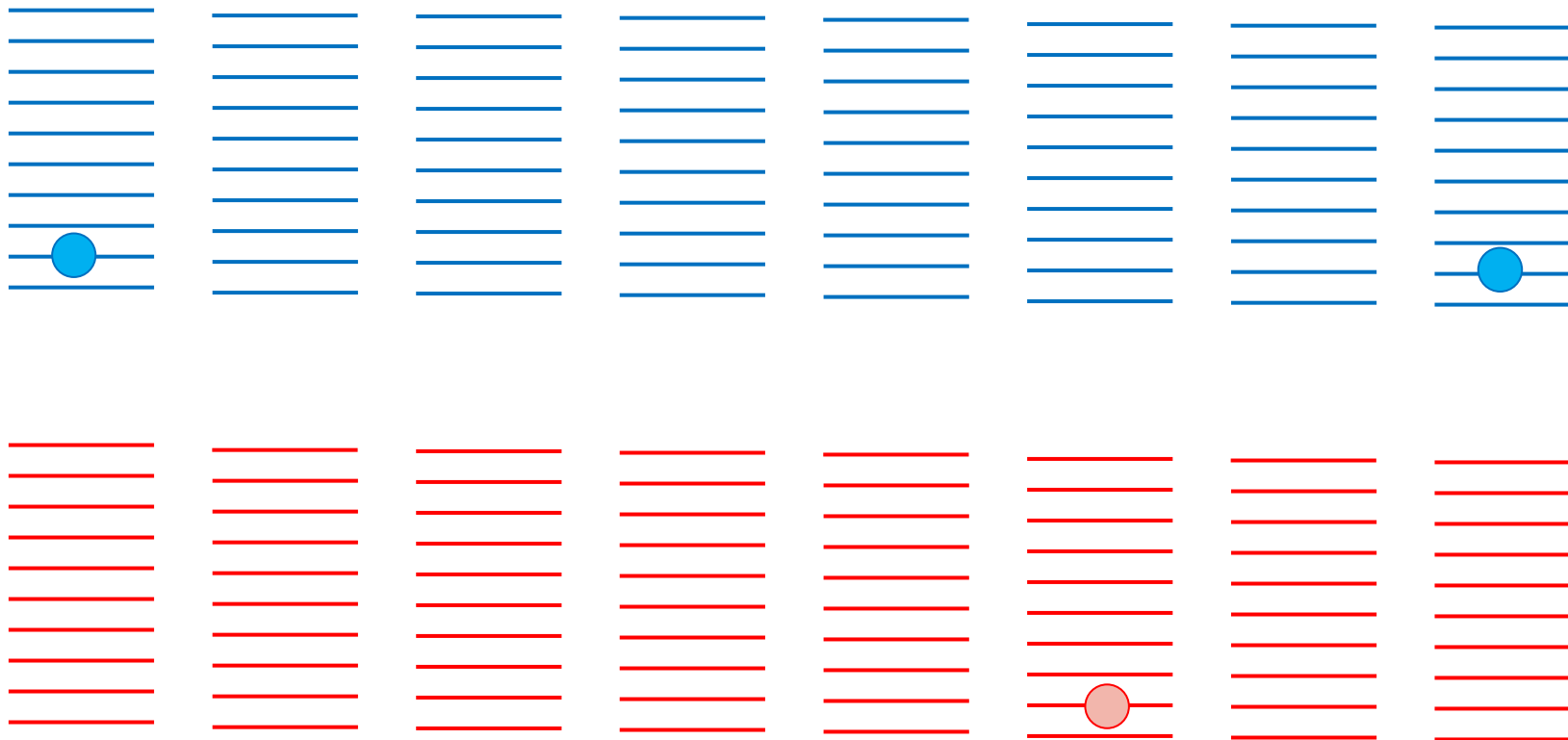
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



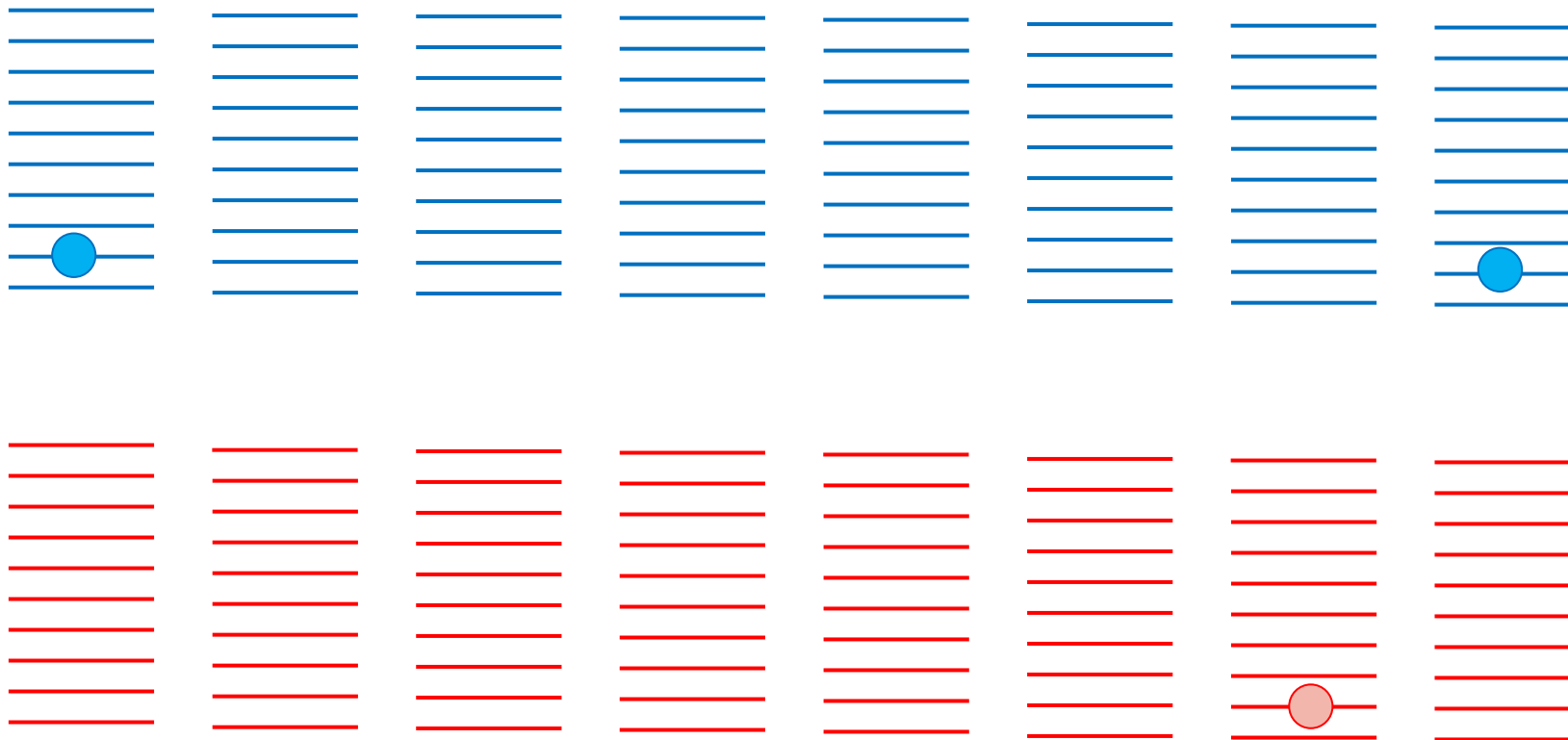
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



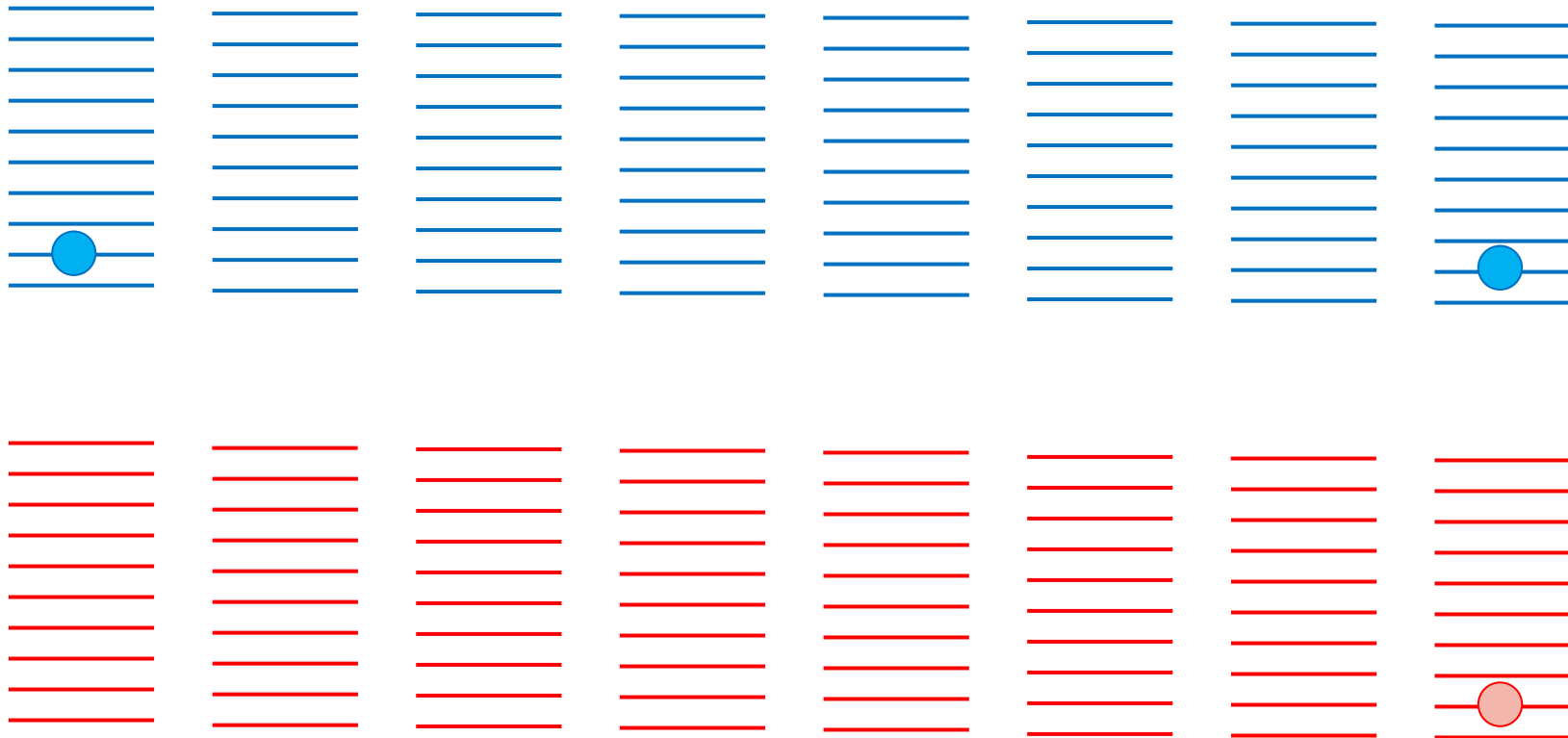
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



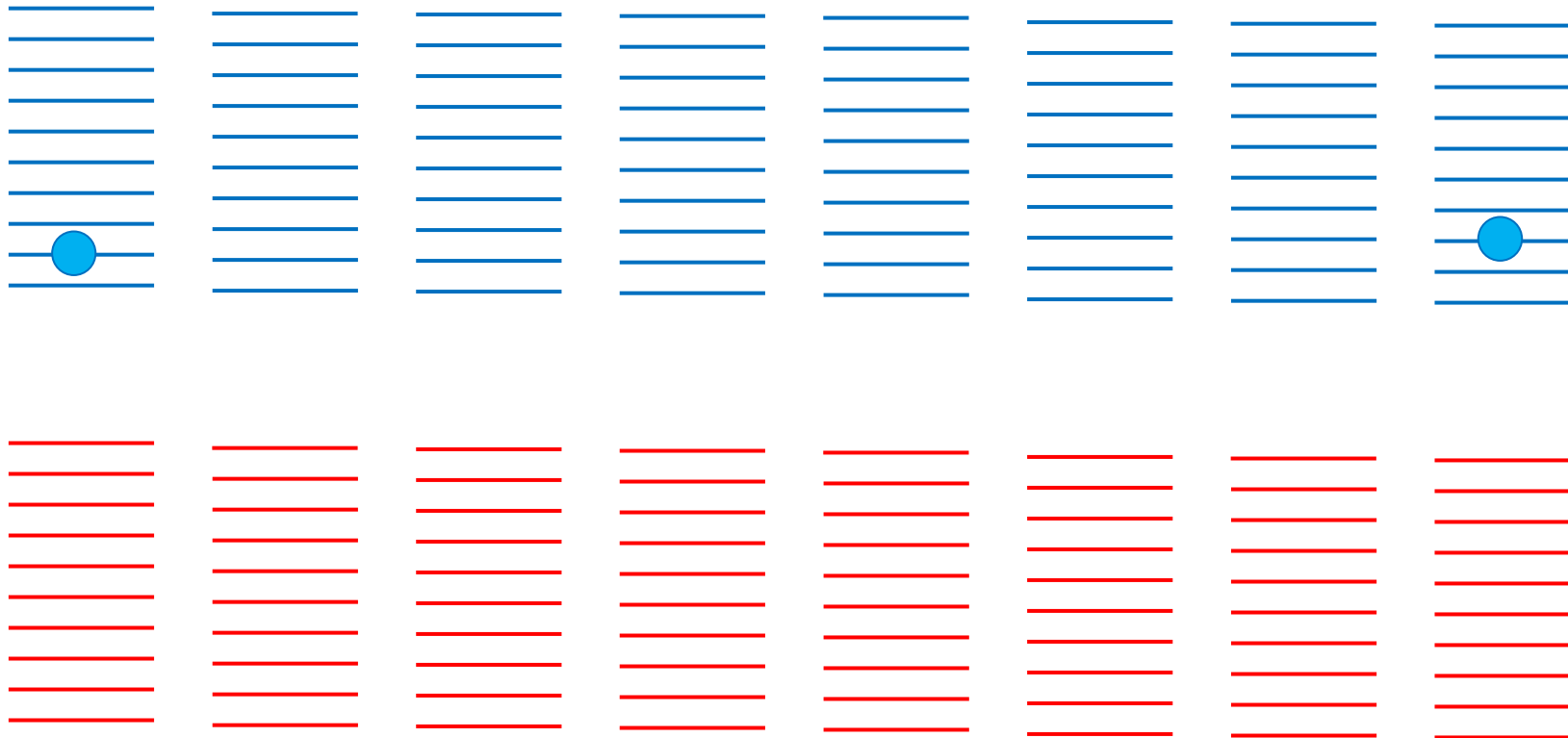
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов

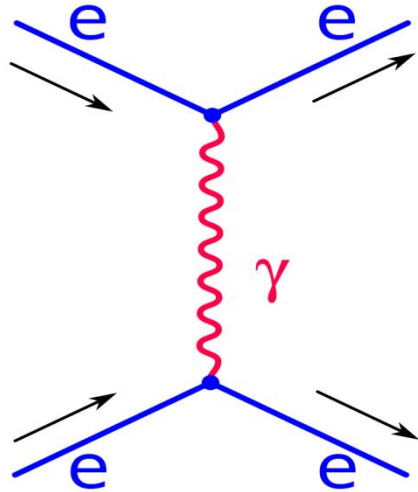


Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц

- взаимодействие
в терминах осцилляторов



Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц



диаграммы Фейнмана

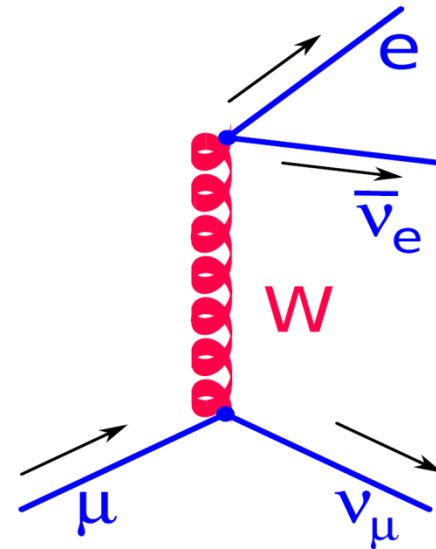
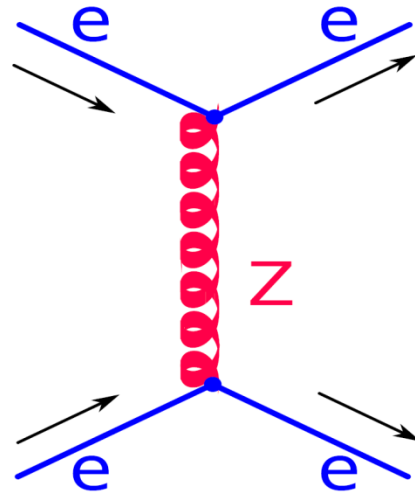
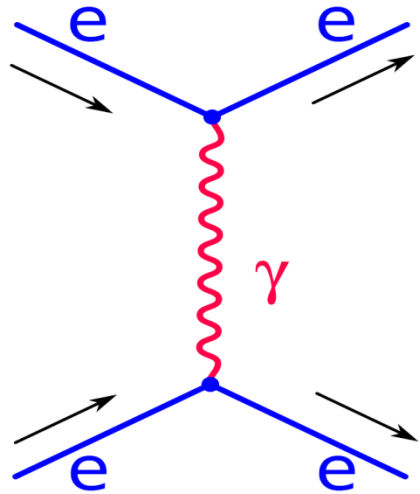
□ графическое выражение формул, по которым считается
вероятность процесса

правила Фейнмана: определенные выражения соответствуют
линиям, вершинам и диаграмме в целом



□ графическое выражение процессов
взаимопревращения частиц

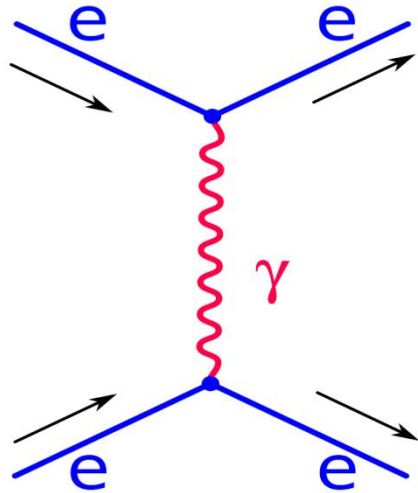
Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц



Электроны рассеиваются за счет рождения и поглощения фотона γ или Z -бозона

Мюон распадается, рождая W -бозон, а тот превращается в электрон и нейтрино

Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц



частицы **реальные**
и частицы **виртуальные**

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

физически наблюдаемые частицы
(начальные, конечные состояния)

$$E^2 \neq \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

только во внутренних линиях
(промежуточные состояния)

Физика элементарных частиц

(приблизительно две лекции)

1. От квантовой механики к квантовой теории поля.
2. Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.
3. **Стандартная модель физики частиц.**
4. Симметрии и законы сохранения.
5. Механизм Хиггса и бозон Хиггса.

Стандартная модель физики частиц



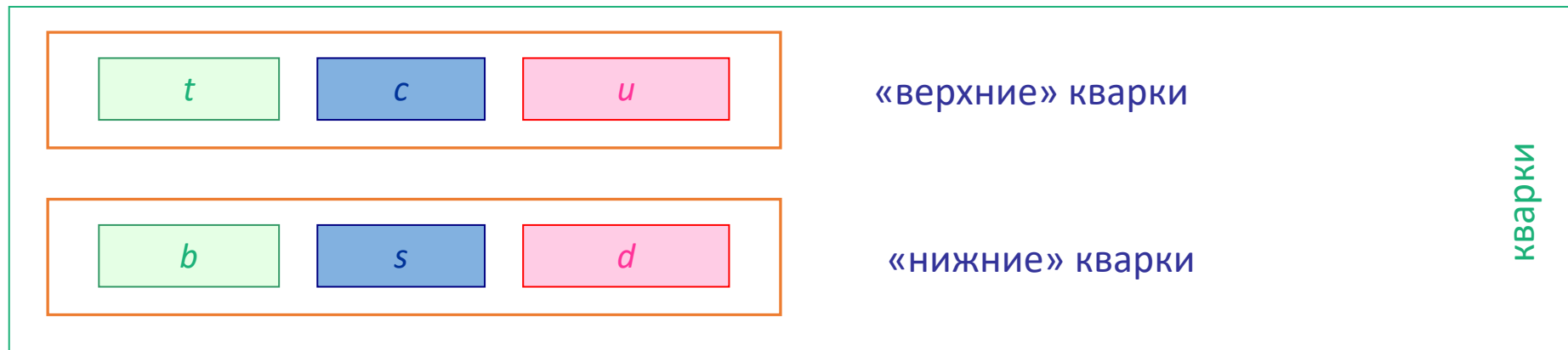
- описывает элементарные частицы и их взаимодействия
- сформулирована в 1970-е годы
- предсказания проверены экспериментально
- все частицы обнаружены (*последняя в 2012 году*)
- согласуется со всеми коллайдерными экспериментами
- содержит 19 свободных параметров
(*с весьма странными значениями*)
- экспериментально доказано, что не полна
(*не описывает массы нейтрино и ряд результатов астрофизики*)

Стандартная модель физики частиц



- описывает элементарные частицы
и их взаимодействия

Стандартная модель физики частиц : элементарные частицы



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц :

замечание

- Фундаментальное соотношение релятивистской физики:

$$E = mc^2$$

В столкновениях частиц при высоких энергиях могут рождаться новые тяжёлые частицы (если они есть в природе)

Единица измерения энергии = массы:

$$1 \text{ ГэВ} \approx \text{масса протона} \cdot c^2$$

$$1 \text{ ТэВ} = 1000 \text{ ГэВ}$$

$$c = 1 \text{ в дальнейшем, } E = mc^2 = m.$$

Масса наиболее тяжёлой известной элементарной частицы — t -кварка $m_t = 173.5 \text{ ГэВ}$

Стандартная модель физики частиц :

замечание

- Фундаментальное соотношение квантовой физики:

$$\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar$$

p = импульс ($= E/c$ при высоких энергиях),
 x = длина.

Высокие энергии (импульсы) \iff малые расстояния:

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}$$

Энергии **1 ТэВ** соответствует масштаб расстояний
 10^{-17} см

NB: размер протона = 10^{-13} см

- Взаимодействия на малых расстояниях r происходят редко, вероятность $\propto r^2$

Стандартная модель физики частиц :

замечание

Энергия $E \iff$ Масса $M \sim E \iff$ Расстояние $r \sim 1/E \iff$
Интенсивность взаимодействия $\propto 1/E^2$

Масштабы длин и энергий,
характеризующие известные взаимодействия:

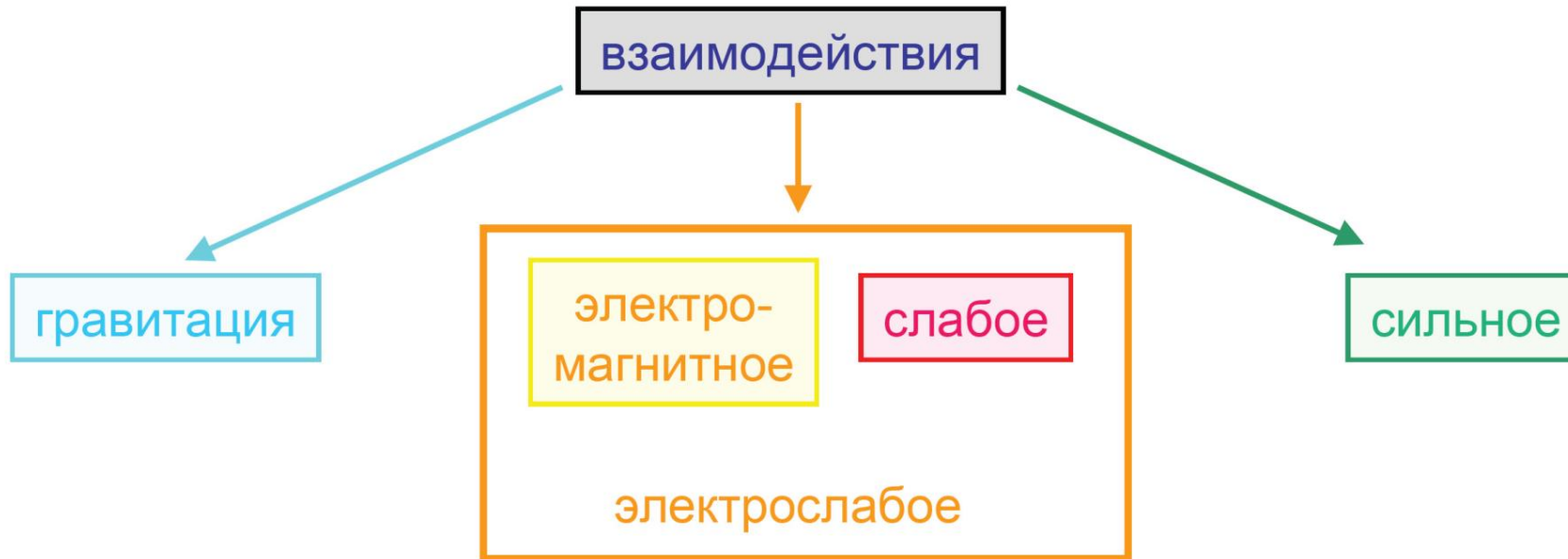
- Электромагнитные взаимодействия: $r = \infty$
(и это хорошо!)
- Сильные (ядерные) взаимодействия: $r \sim 10^{-13}$ см,
 $E \sim 1$ ГэВ (масса протона)
- Слабые взаимодействия: $r \sim 10^{-16}$ см, $E \sim 100$ ГэВ (масса W -бозона)
- Гравитационные взаимодействия: $E = M_{Pl} \sim 10^{19}$ ГэВ
(масштаб энергий квантовой гравитации)

Стандартная модель физики частиц :

замечание

Чтобы открыть новые тяжелые частицы и новые взаимодействия на сверхмалых расстояниях, нужны пучки частиц высокой энергии и высокой интенсивности (светимости)

Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



Стандартная модель физики частиц :

взаимодействия – силы между частицами

слабое

сильное

электро-
магнетизм

гравитация

Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

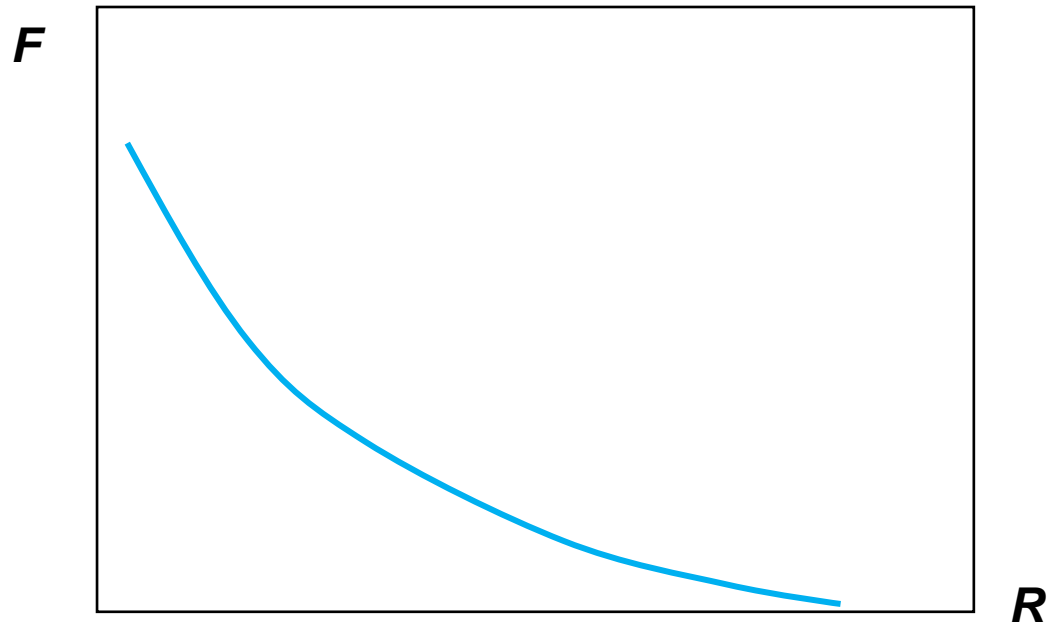
слабое

сильное

электро-
магнетизм

гравитация

$$\sim 1/R^2$$



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

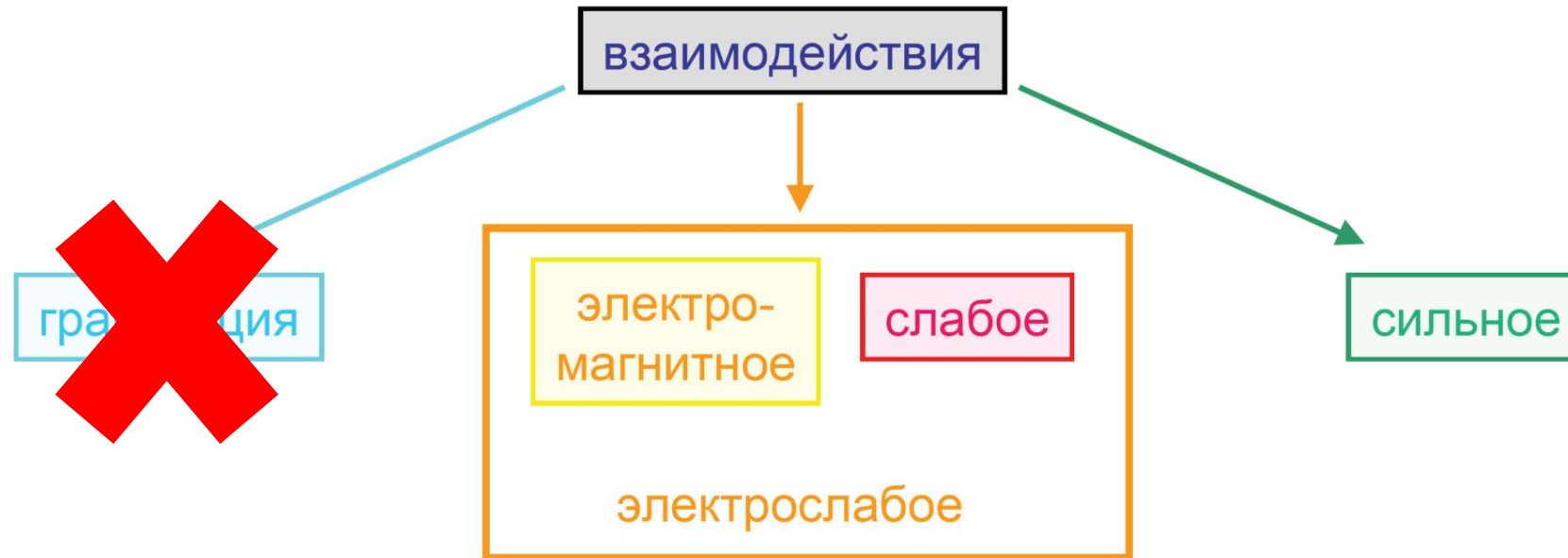
гравитационное взаимодействие:

гравитация

$$\sim 1/R^2$$

- существенно на **больших расстояниях**,
где квантовые эффекты пренебрежимо малы
- становится сильным на планковских масштабах:
энергия $\sim 10^{19}$ ГэВ
расстояние $\sim 10^{-35}$ м
- **не** описывается квантовой теорией поля
- самосогласованное описание квантовой гравитации
отсутствует

Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

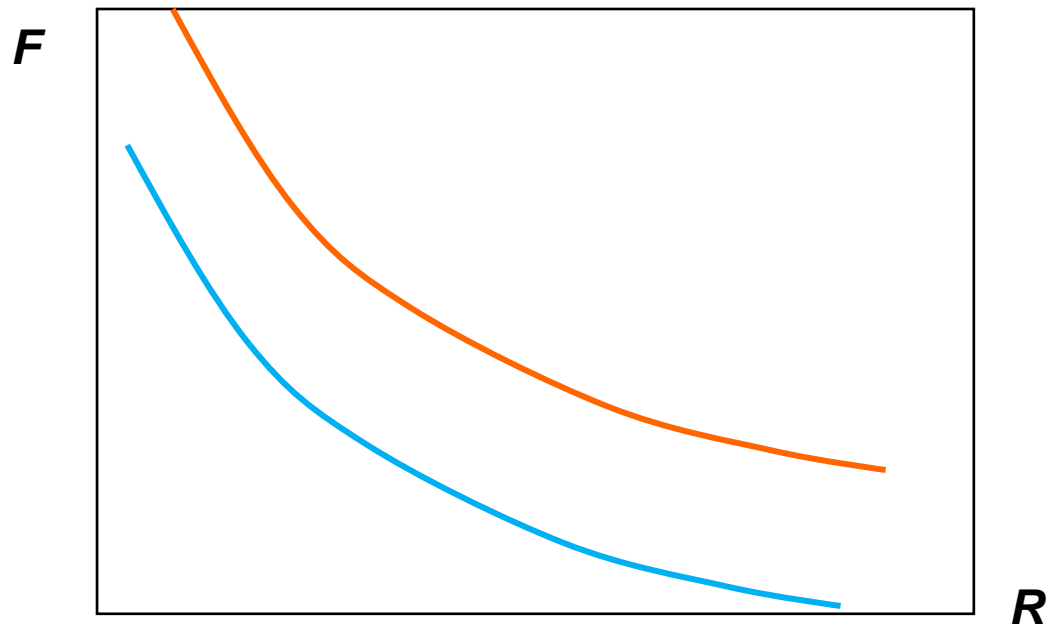
слабое

сильное

электро-
магнетизм
 $\sim 1/R^2$

гравитация

$\sim 1/R^2$



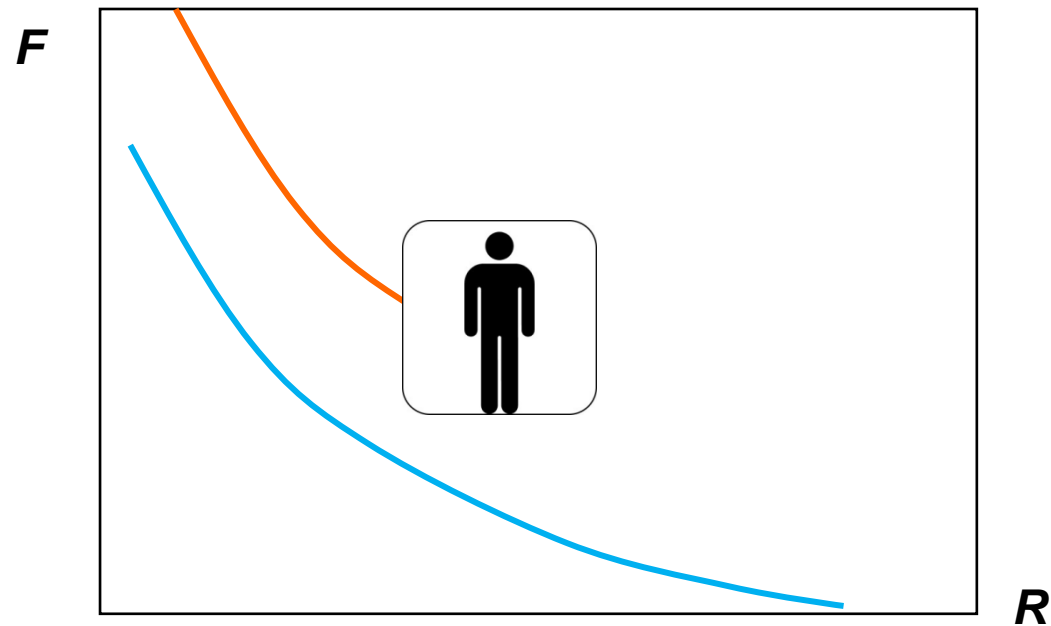
Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое

сильное

электро-
магнетизм
 $\sim 1/R^2$

гравитация
 $\sim 1/R^2$

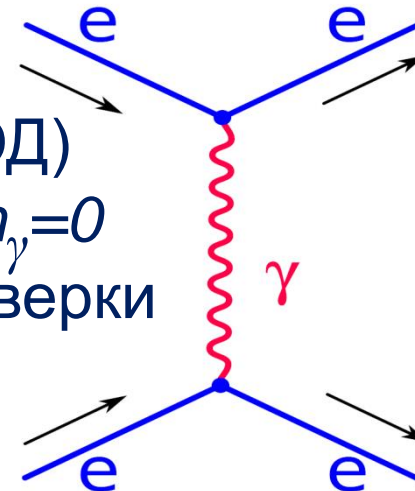


Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

электромагнитное
взаимодействие:

электро-
магнетизм
 $\sim 1/R^2$

- существенно на **промежуточных расстояниях**
(определяет структуру атомов)
- описывается квантовой теорией поля
(**квантовая электродинамика, КЭД**)
- переносчик взаимодействия – фотон, $m_\gamma=0$
- прецизионные экспериментальные проверки
(точность $\sim 10^{-12}$)



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое

$$\sim e^{-A R}$$

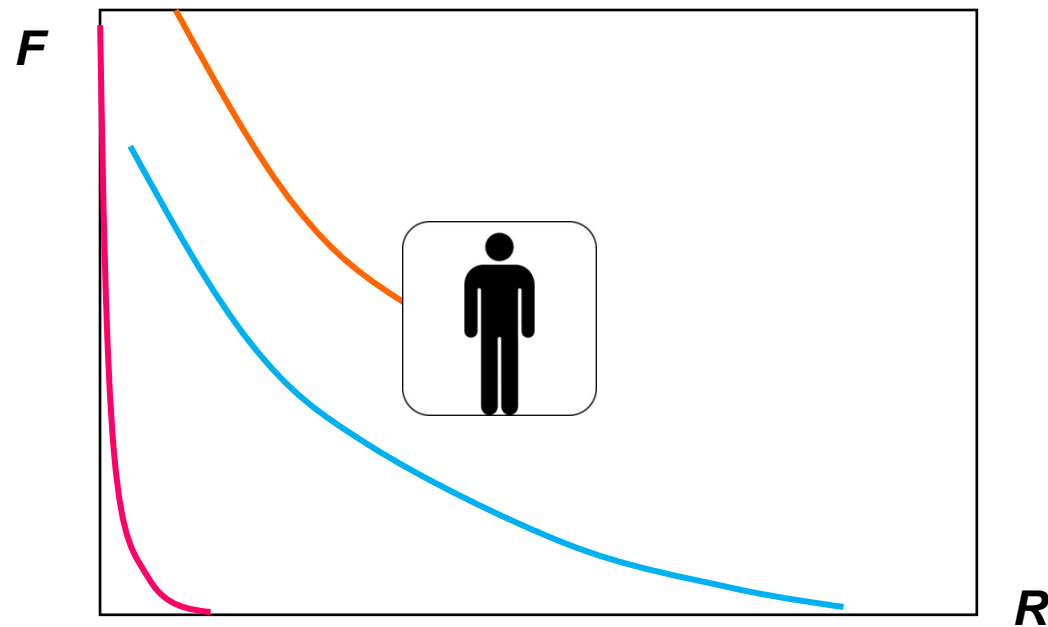
сильное

электро-
магнетизм

$$\sim 1/R^2$$

гравитация

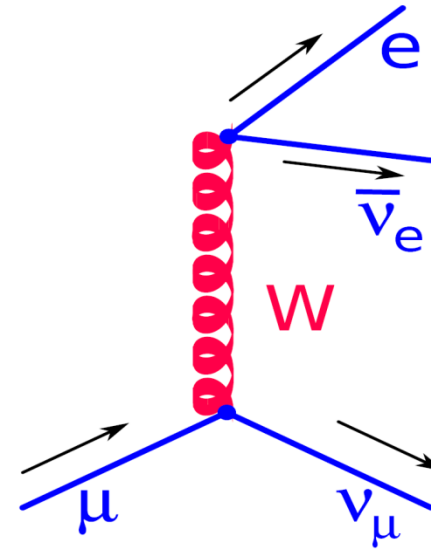
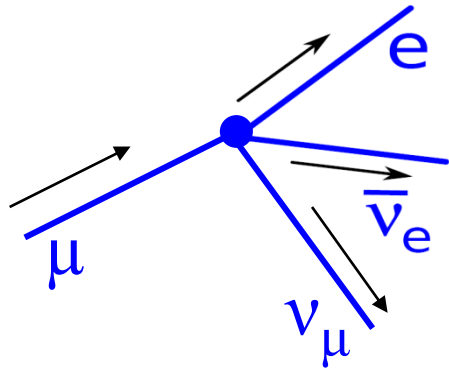
$$\sim 1/R^2$$



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое
 $\sim e^{-AR}$

слабое
взаимодействие:



$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}, \quad E = mc^2$$



короткодействие
||
тяжелые переносчики

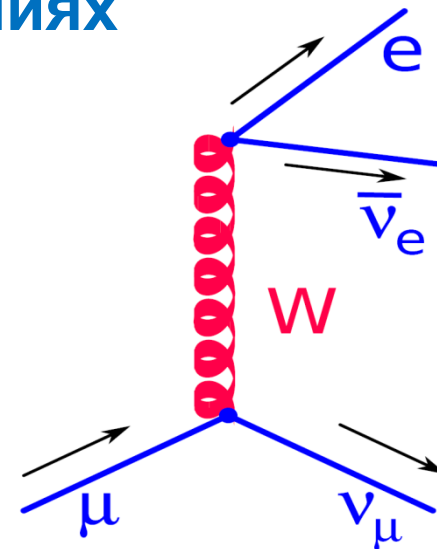
Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое

$$\sim e^{-A R}$$

слабое
взаимодействие:

- существенно на **сверхмалых расстояниях**
- описывается квантовой теорией поля
- не похоже на электродинамику
- переносчики взаимодействия – бозоны W^\pm , Z^0 , $m \sim 90$ ГэВ



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое

$$\sim e^{-A R}$$

сильное

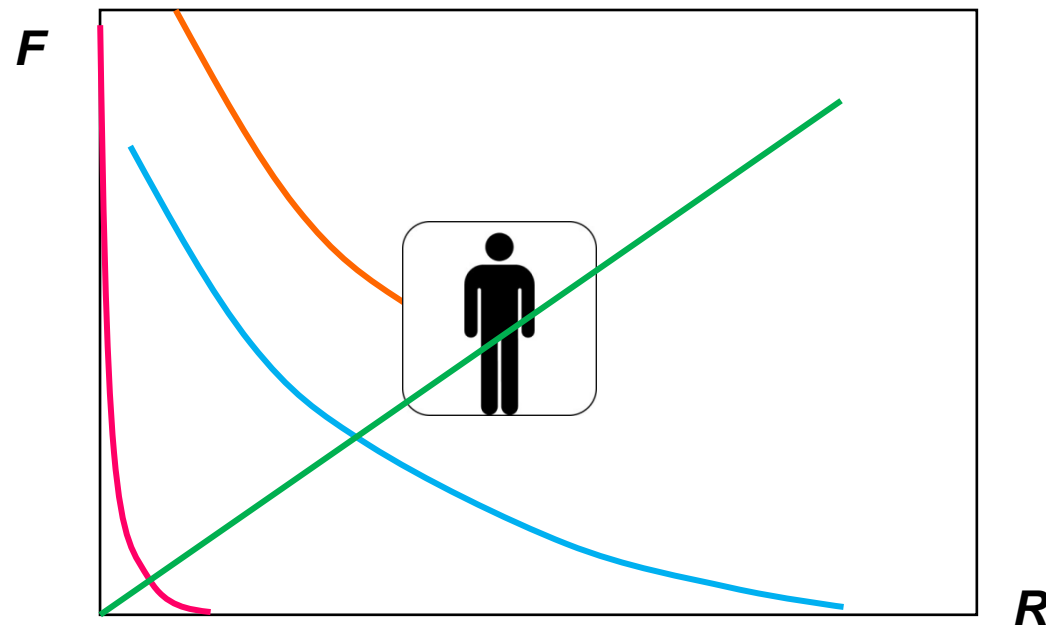
$$\sim R$$

электро-
магнетизм

$$\sim 1/R^2$$

гравитация

$$\sim 1/R^2$$



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами

слабое

$$\sim e^{-A R}$$

сильное

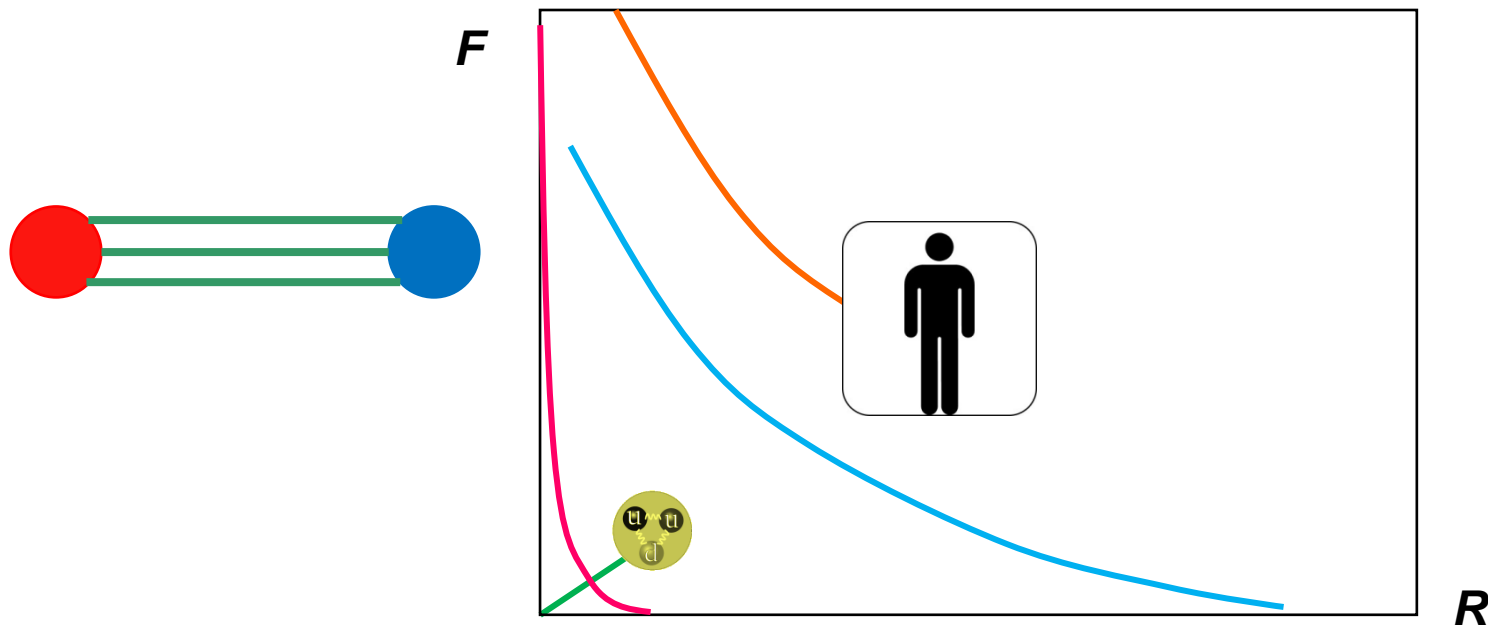
$$\sim R$$

электро-
магнетизм

$$\sim 1/R^2$$

гравитация

$$\sim 1/R^2$$



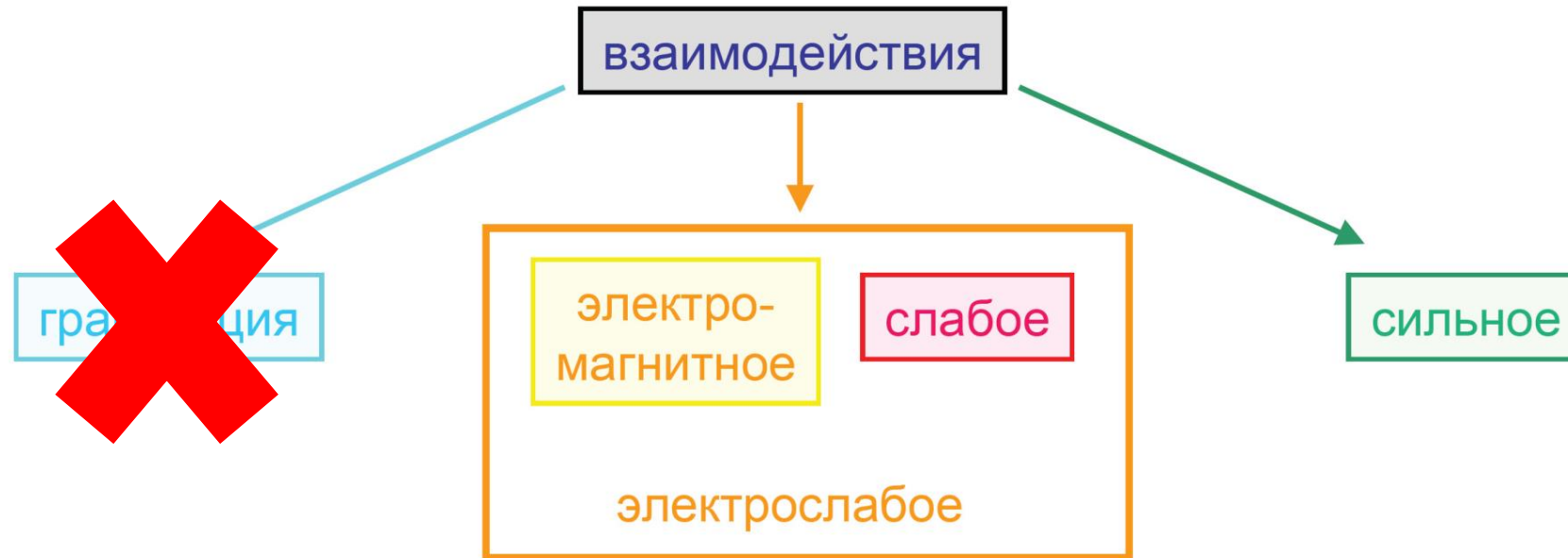
Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



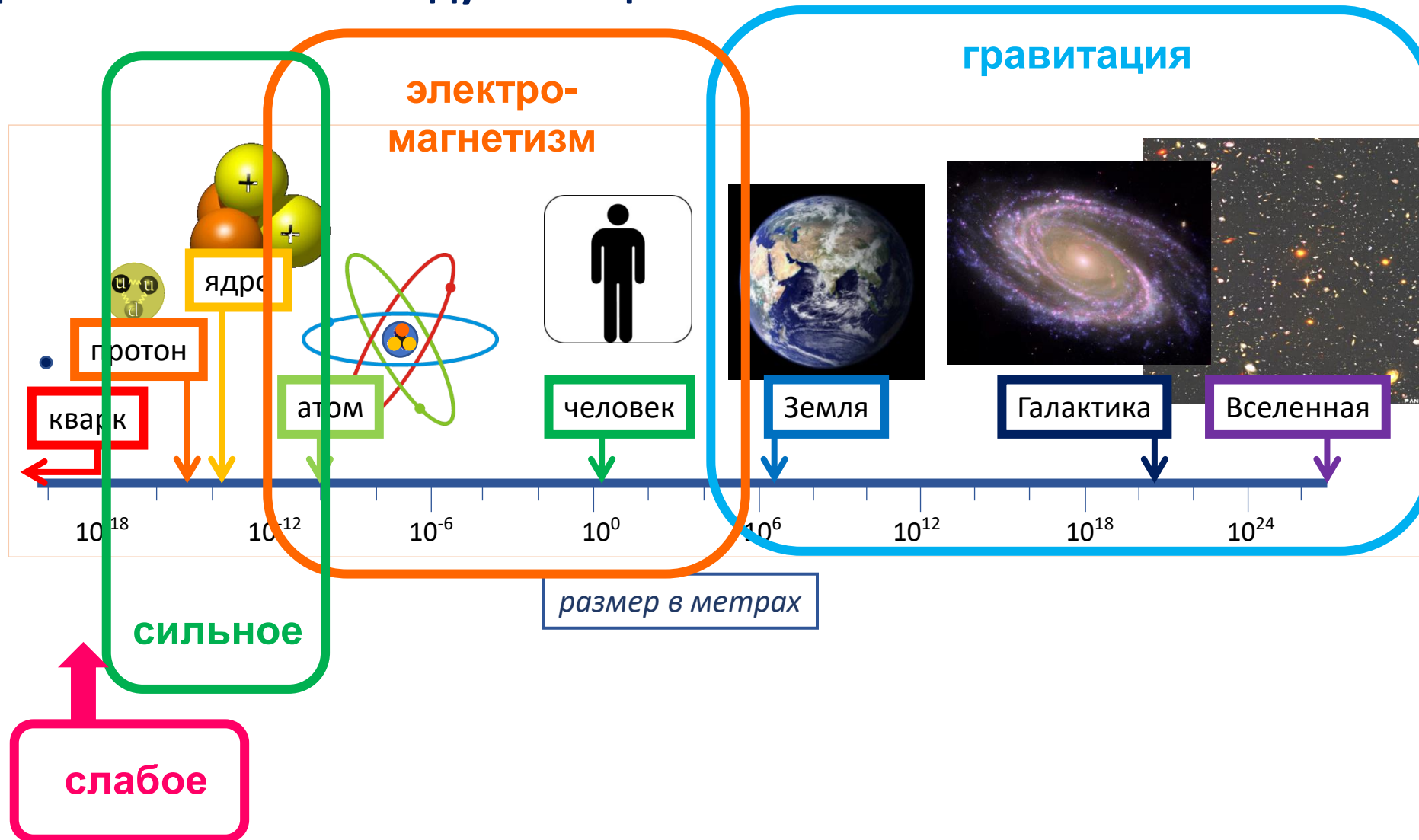
**сильное
взаимодействие:**

- существенно на **(субъ)ядерных расстояниях**
- описывается квантовой теорией поля –
квантовой хромодинамикой (**КХД**)
- переносчики взаимодействия – **глюоны**, $m=0$
- растет с расстоянием (связанные состояния - **адроны**)
[мезоны $q\bar{q}$, барионы qqq]
- технические трудности теоретического описания
в режиме сильной связи

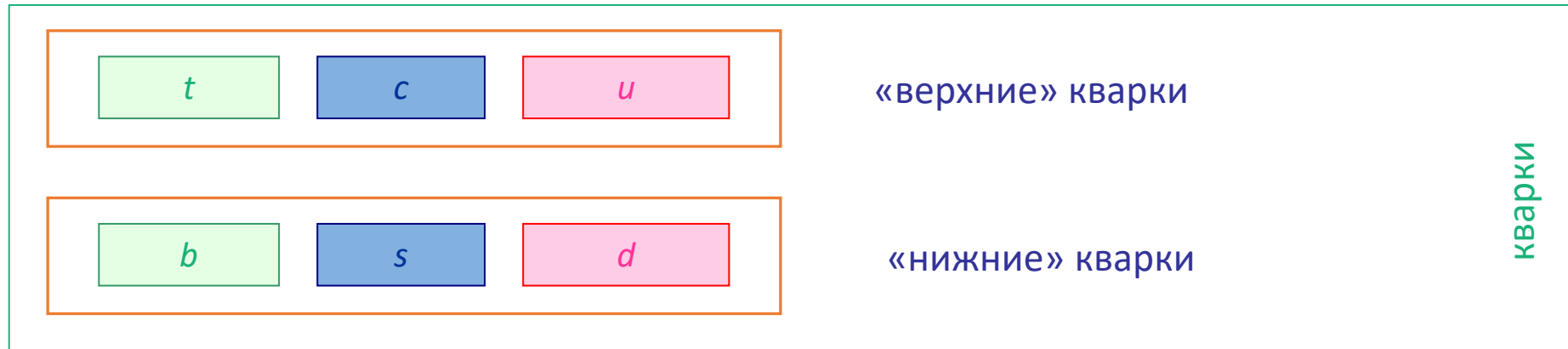
Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



Стандартная модель физики частиц : взаимодействия – силы между частицами



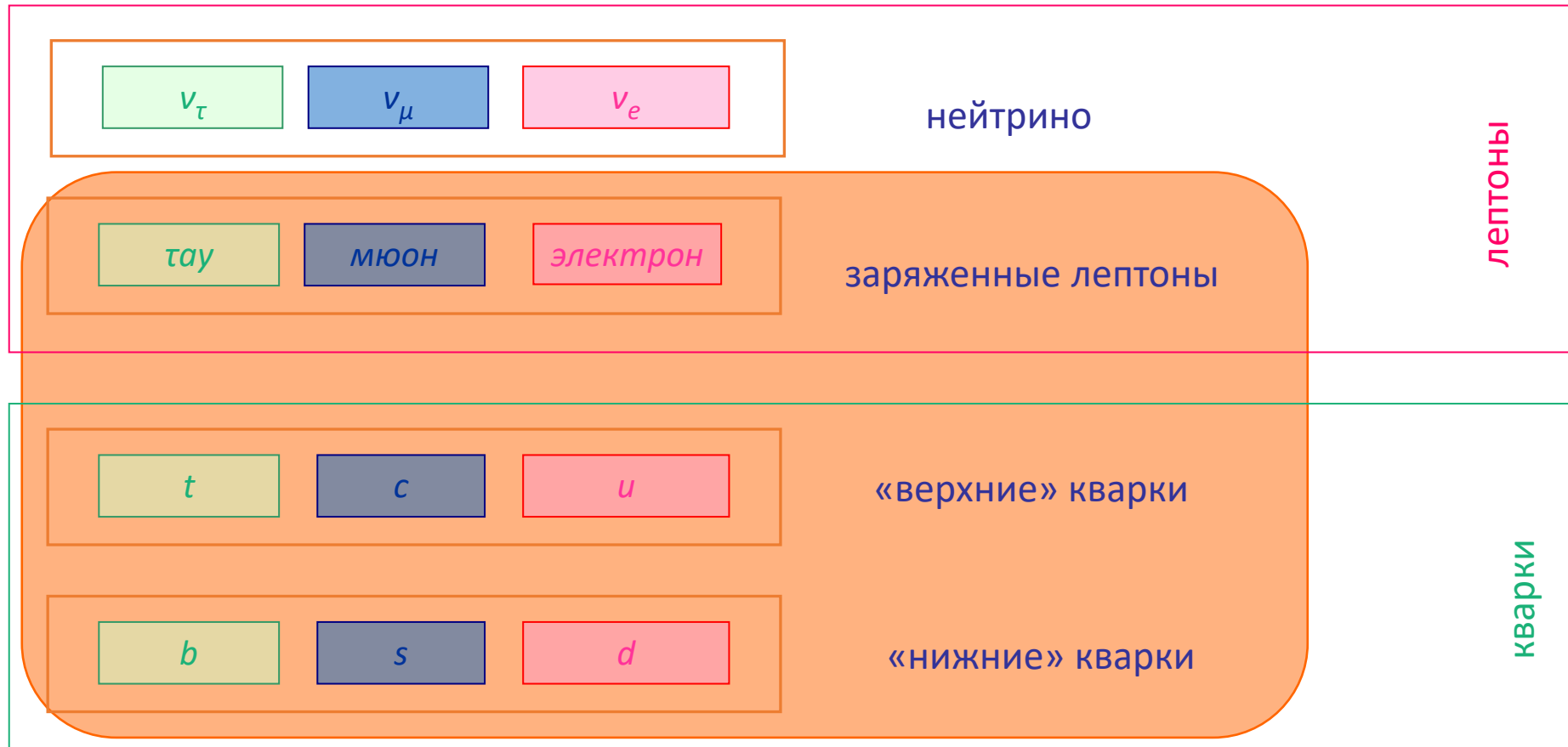
Стандартная модель физики частиц : элементарные частицы



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц : элементарные частицы, **электромагнетизм**

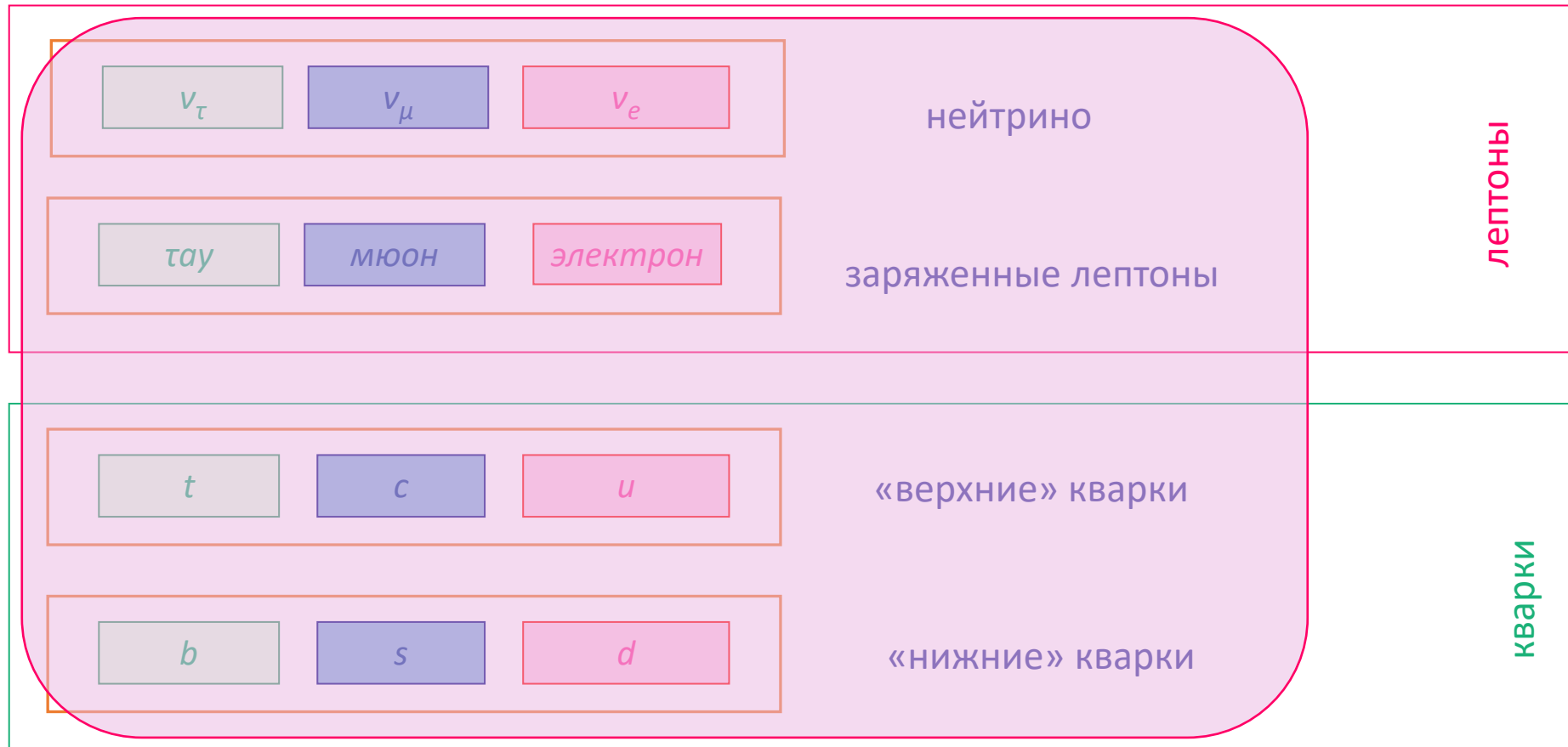


частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц :

элементарные частицы, **слабое взаимодействие**

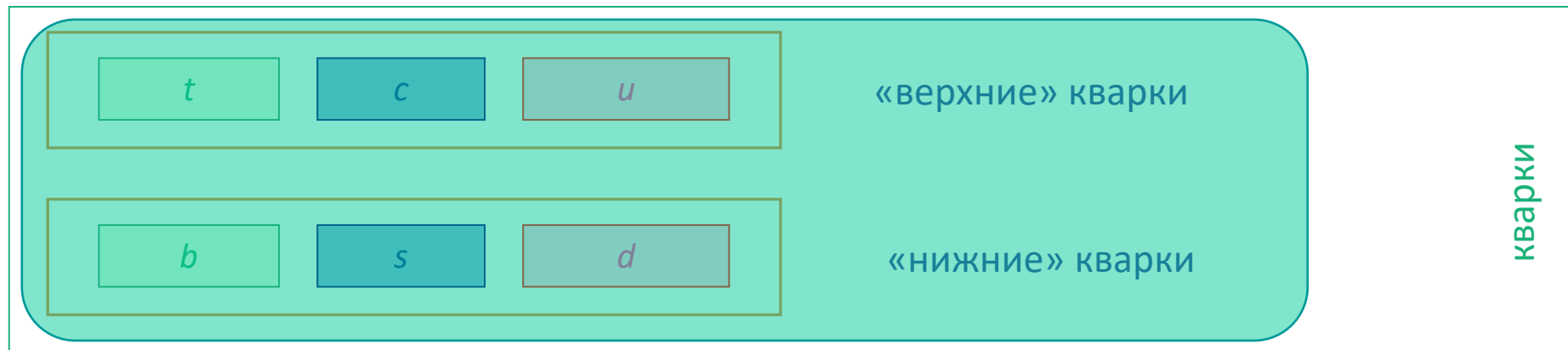
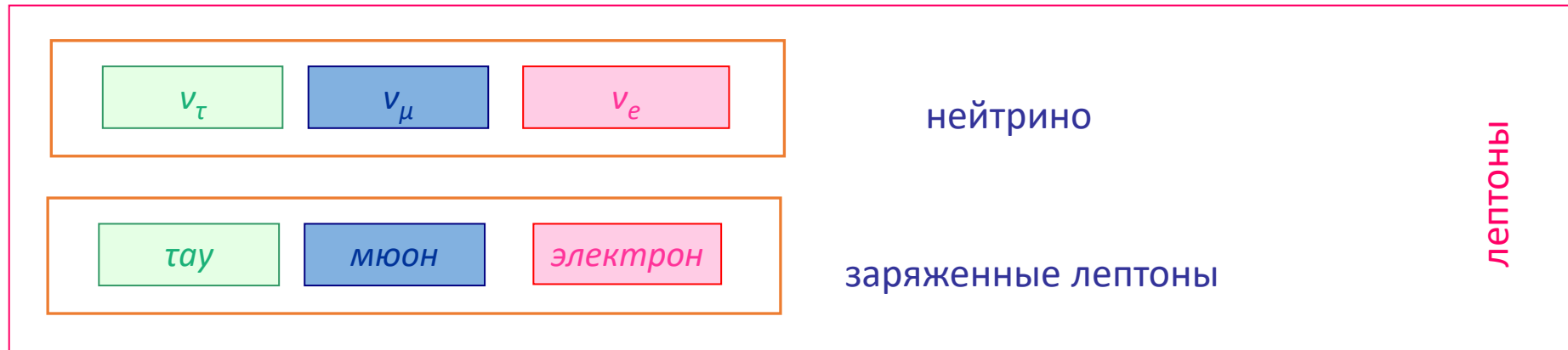


частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц :

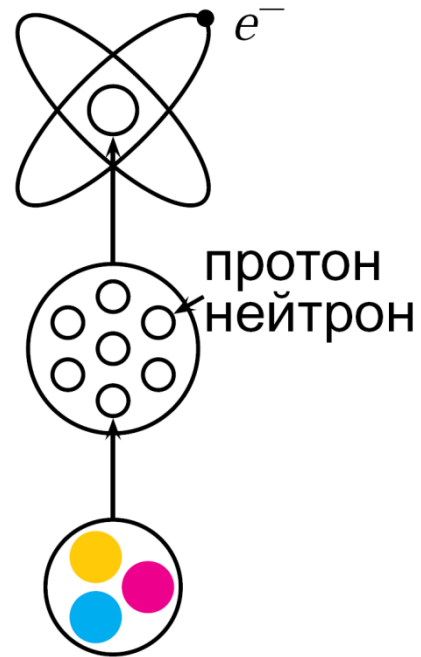
элементарные частицы, сильное взаимодействие



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц: частицы, встречающиеся в быту

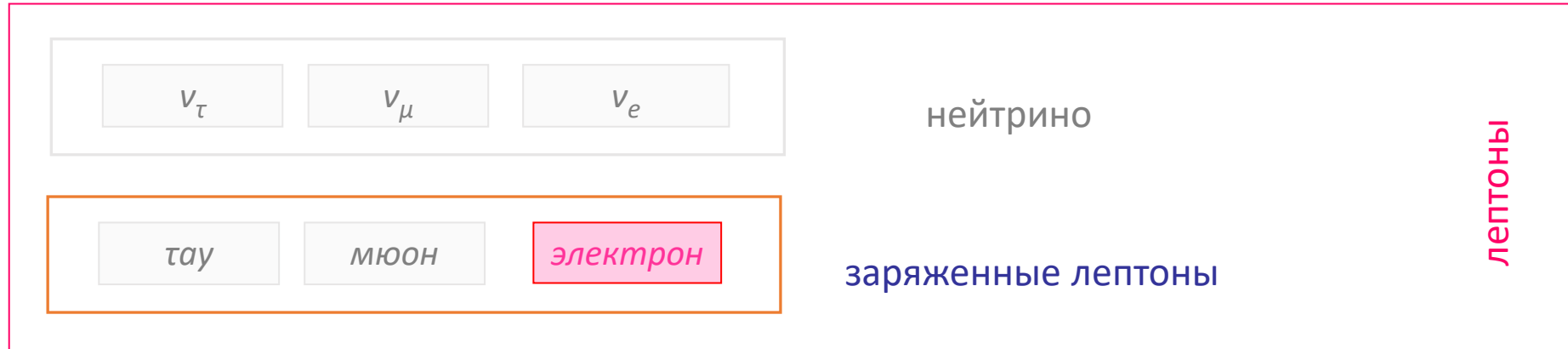


электрон

протон, нейтрон
 $p=uud, n=udd$

фотон

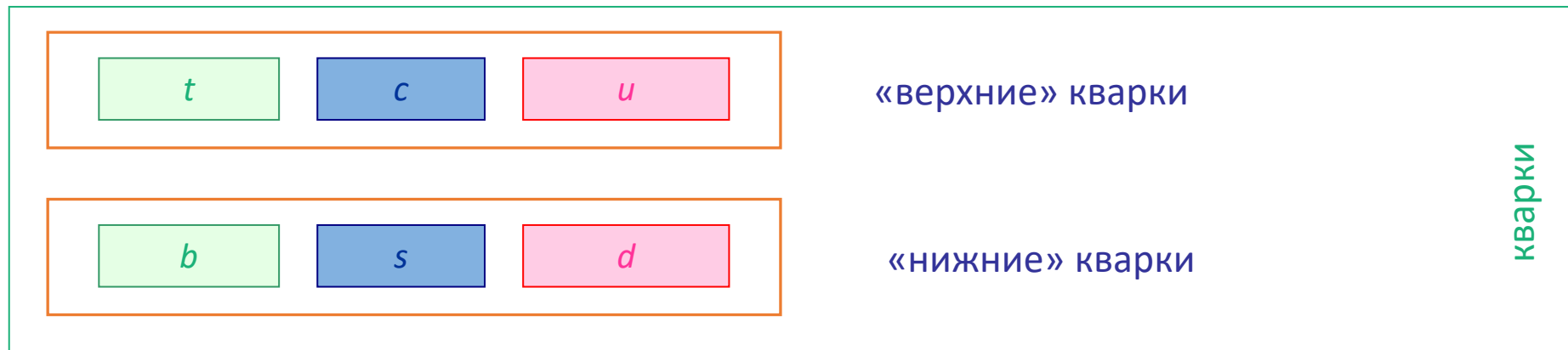
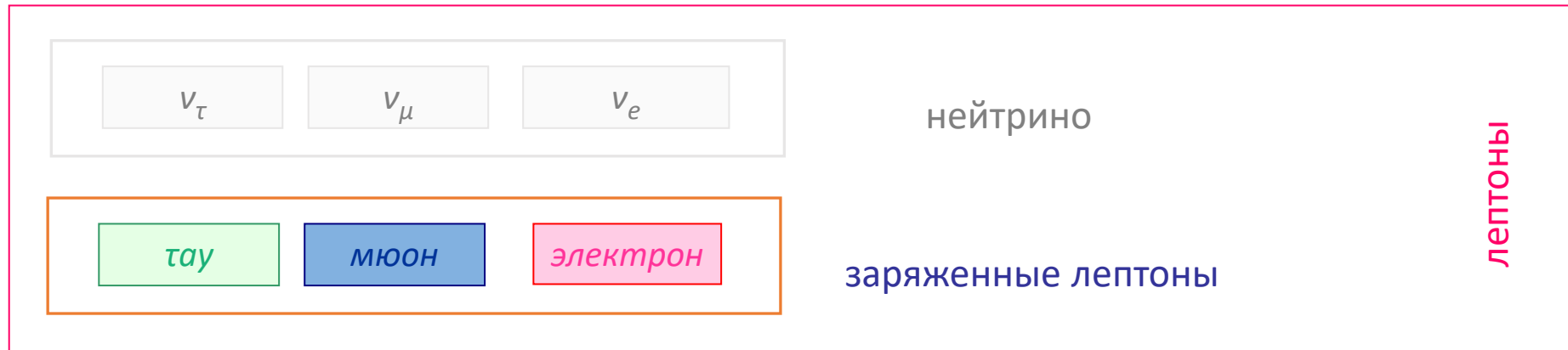
Стандартная модель физики частиц: частицы, встречающиеся в быту



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц: три поколения



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

Стандартная модель физики частиц: три поколения

отличаются только массами

<i>тау</i> 1777 МэВ	<i>мюон</i> 106 МэВ	<i>электрон</i> 0.511 МэВ
------------------------	------------------------	------------------------------

заряженные лептоны

<i>t</i> 171000 МэВ	<i>c</i> 1270 МэВ	<i>u</i> 2 МэВ
------------------------	----------------------	-------------------

«верхние» кварки

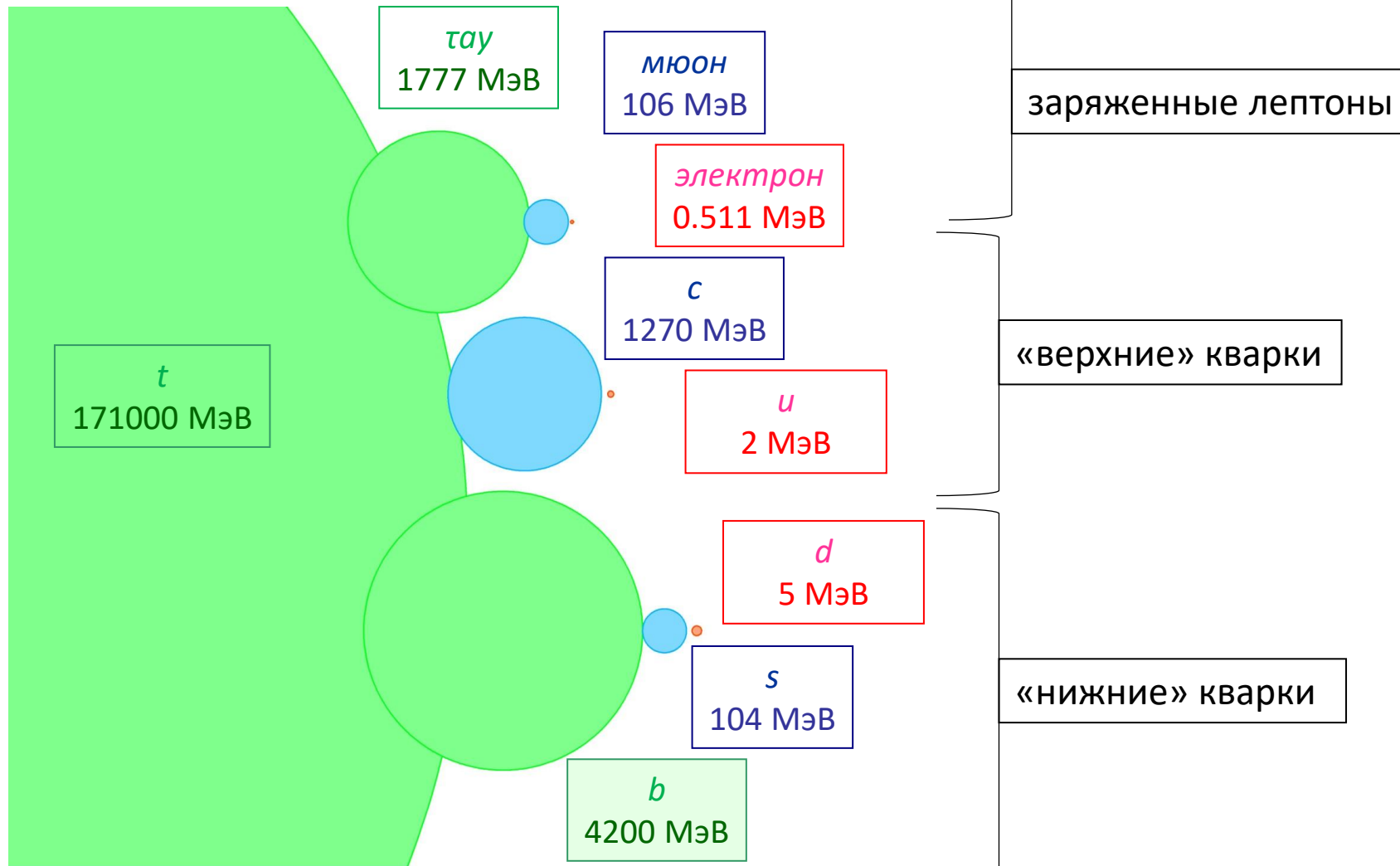
<i>b</i> 4200 МэВ	<i>s</i> 104 МэВ	<i>d</i> 5 МэВ
----------------------	---------------------	-------------------

«нижние» кварки

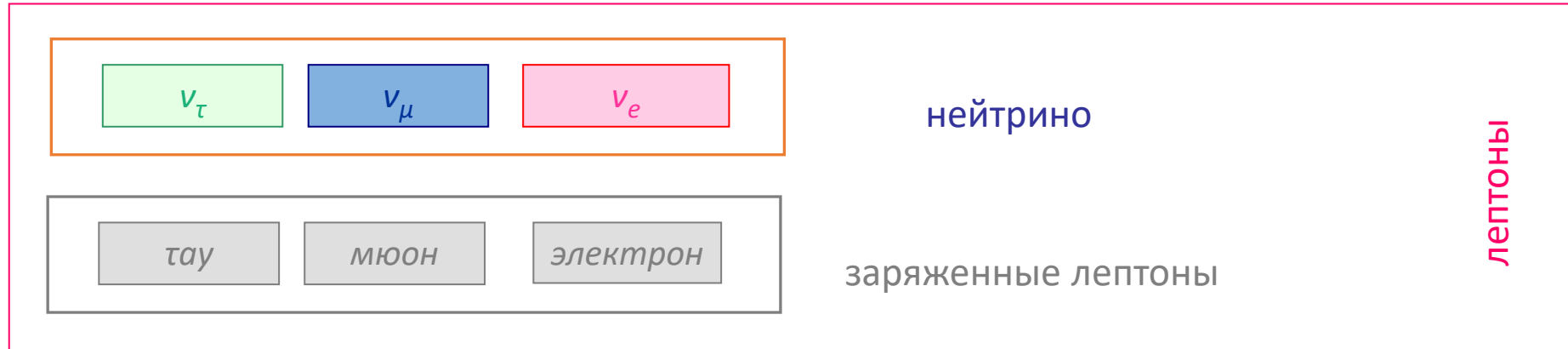
$$1 \text{ МэВ} = 1.8 \times 10^{-27} \text{ г}$$

Стандартная модель физики частиц: три поколения

отличаются только массами



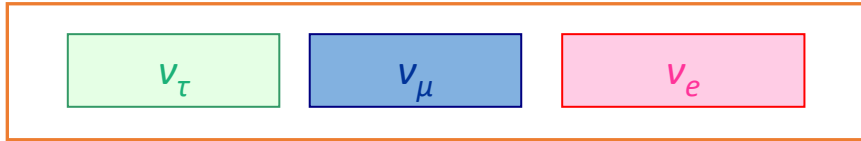
Стандартная модель физики частиц: нейтрино



частицы – переносчики взаимодействий:
электрослабого: фотон, W^+ , W^- , Z
сильного: глюоны

бозон Хиггса

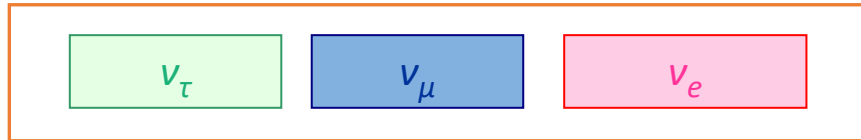
Стандартная модель физики частиц: нейтрино



нейтрино

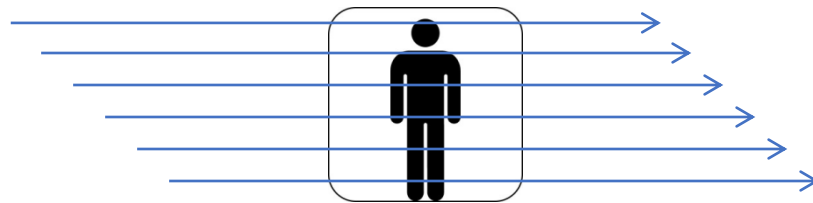
- испытывают только слабое взаимодействие, поэтому практически не регистрируются
- масса близка к нулю (не измерена)

Стандартная модель физики частиц: нейтрино



нейтрино

- испытывают только слабое взаимодействие, поэтому практически не регистрируются
- масса близка к нулю (не измерена)

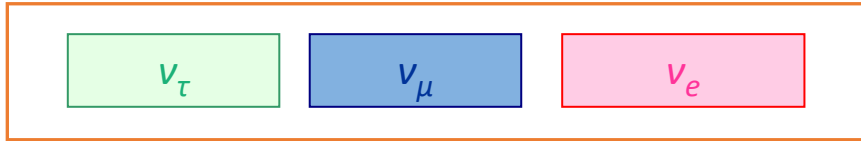


*каждую секунду через меня
пролетают незамеченными
 $\sim 10^{14}$ штук нейтрино...*

“не поймаешь нейтрино за бороду и не посадишь в пробирку”

[В.С. Высоцкий, 1964]

Стандартная модель физики частиц: нейтрино



нейтрино

- испытывают только слабое взаимодействие, поэтому практически не регистрируются
- масса близка к нулю (не измерена)

[подробнее о нейтрино – в лекции 10]

Литература по теме

«Физика элементарных частиц» (лекции 5-6)

1. В. Белокуров, Д. Ширков. *Теория взаимодействий частиц.*
2. Р. Фейнман. *КЭД – странная теория света и вещества.*
3. Л. Окунь. *Физика элементарных частиц.*
4. С. Троицкий. *Нерешенные проблемы физики элементарных частиц.* Успехи физических наук, **182** (2012) 77–103.
5. В. Рубаков. *К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса.* Успехи физических наук, **182** (2012) 1017–1025.
6. С. Коулмен. *Тайная симметрия: введение в теорию спонтанного нарушения симметрии и калибровочных полей,* в сборнике «Квантовая теория калибровочных полей».
7. Материалы портала elementy.ru .
8. П. Трэверс. *Мэри Поппинс.*

презентации и список литературы – на сайте:

http://ppc.inr.ac.ru/crossfac_2013.php