

Введение в физику частиц — 1

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

4-11 ноября 2018 г.



INVESTIGADOR
FCT



1 Эпоха первопроходцев

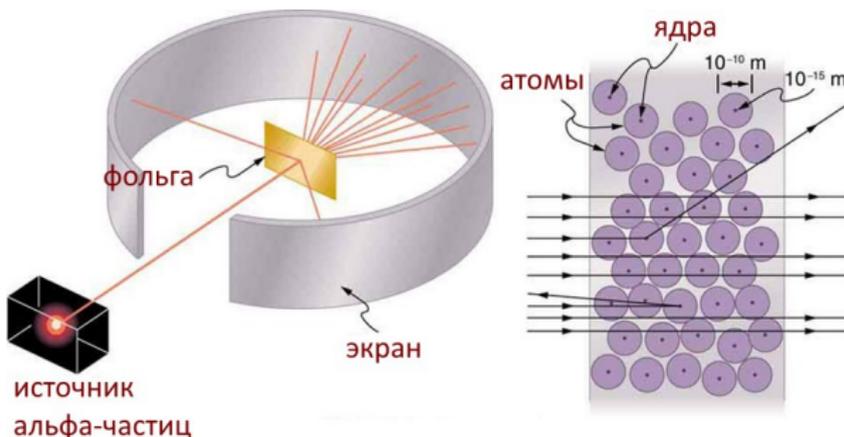
2 Ускорительная революция

3 Как живет микромир

Эпоха первопроходцев

Первые шаги

- 1896: спонтанная радиоактивность
● Беккерель, Пьер и Мария Кюри (1903) ● Резерфорд (1908)
- 1897: катодные лучи → электроны ● Томсон (1906)
- 1911: атомное ядро (эксперимент Резерфорда)
- 1919: искусственная трансмутация элементов



Революция 1: теория относительности

- Скорость света c — предел для любых частиц;
- законы физики одинаковы во всех инерциальных СО.

Важное следствие: **масса — это тоже форма энергии!**



в покое: $E_0 = mc^2$.

в движении: $E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2c^2}$

Для безмассовых частиц: $m = 0 \rightarrow E = pc$.

Осторожно!

В современной физике частиц нет «массы покоя» и «релятивистской массы». Есть просто «масса» — неизменная характеристика частицы.

Единицы измерения

Макроскопические единицы измерения неудобны для микромира:

$$m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad E_H \approx 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

Удобная универсальная единица — **электронвольт (эВ)**.

$$1,78 \cdot 10^{-36} \text{ кг} = 1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

-  атомная физика, оптика: $E \sim 1 \text{ эВ}$;
-  ядерная физика: МэВ (10^6 эВ);
-  элементарные частицы: ГэВ (10^9 эВ) и ТэВ (10^{12} эВ);
 - масса протона: $\approx 1 \text{ ГэВ}$,
 - масса бозона Хиггса: 125 ГэВ ,
 - энергия протонов в LHC: $6,5 \text{ ТэВ}$.

Революция 2: квантовый мир



1920-е годы: рождение квантовой механики



Планк (1918)



Бор (1922)



де Бройль (1929)



Гейзенберг (1932)



Шредингер (1933)



Борн (1954)

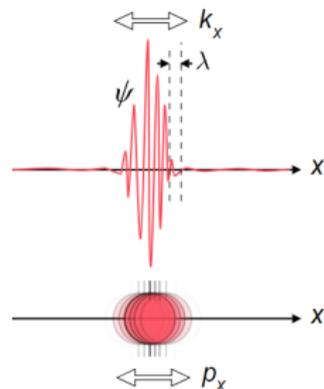
Микромир населен «частицами-волнами»:

$\lambda = 2\pi\hbar/p$, где \hbar — постоянная Планка.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

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

$$\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 0,197 \text{ эВ} \cdot \text{мкм.}$$



Как рассмотреть микромир

Чем мельче объект, тем больше импульс «частицы-осветителя»!

свет

$r \approx 1 \text{ мкм}, p \approx 1 \text{ эВ}$



атом

$r \approx 0,1 \text{ нм}, p > 10 \text{ кэВ}$

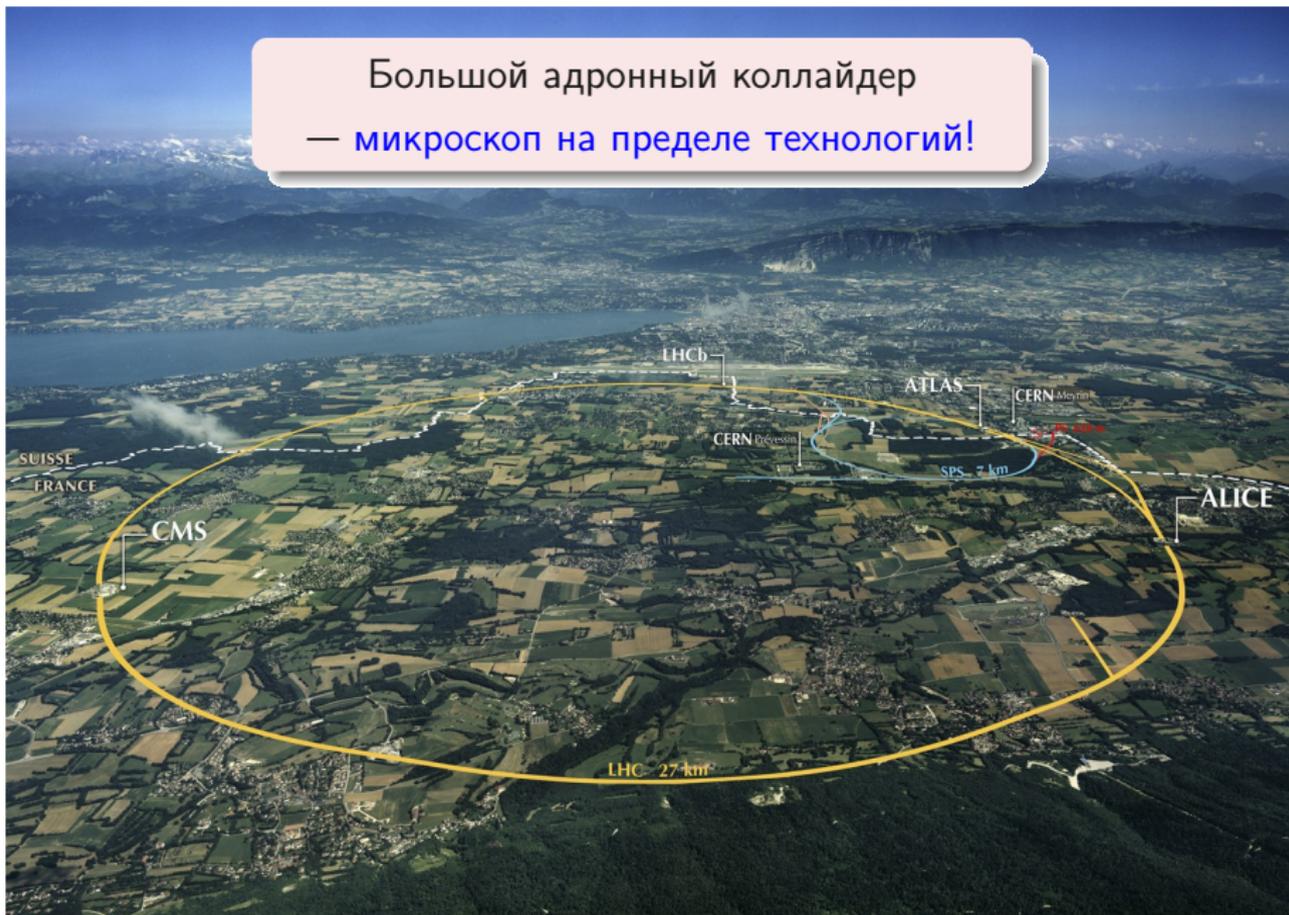


ядро

$r \approx 1 \text{ фм}, p > 1 \text{ ГэВ}$



Большой адронный коллайдер
— микроскоп на пределе технологий!



Вглубь ядра

1921: Резерфорд предсказал нейтрон

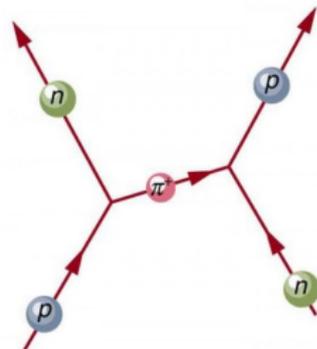
1932: Открытие нейтрона  Чедвик (1935)

1934: Юкава предложил теорию
внутриядерных сильных взаимодействий и
предсказал π -мезоны — частицы-переносчики
ядерных сил с массой 130 МэВ

 Юкава (1949)

1936: открытие π , упс, μ -мезонов (мюонов) — «тяжелых электронов»

1947: открытие π -мезонов  Пауэлл (1950)

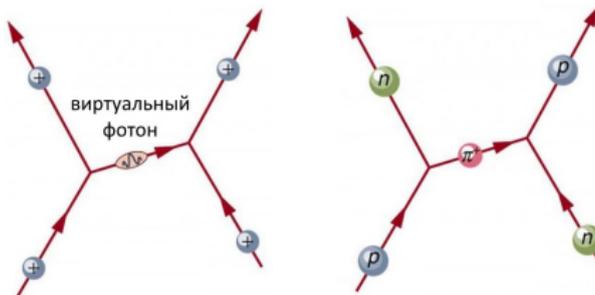


Квантовая теория поля

теория относительности + квантовая механика = **квантовая теория поля**

Фундаментальная сущность — **поле**. Частицы — его возмущение.

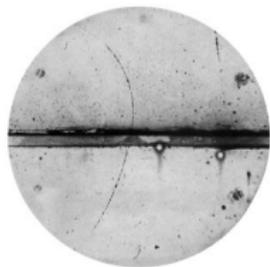
- Нет закона сохранения количества частиц!
Частицы могут рождаться и исчезать.
- **Виртуальная частица** — особое состояние поля, неспособное улететь далеко от источника.



Антиматерия

1928–1930: Дирак построил квантовую электродинамику и предсказал существование **позитрона** e^+ — античастицы **электрона** e^-

 Дирак (1933)

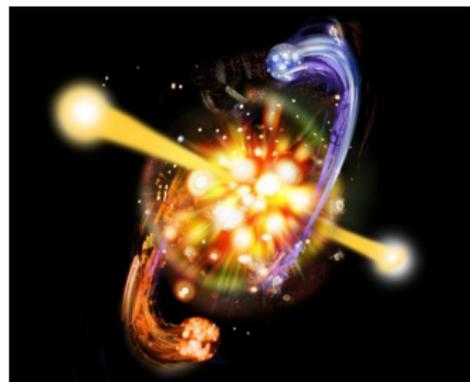
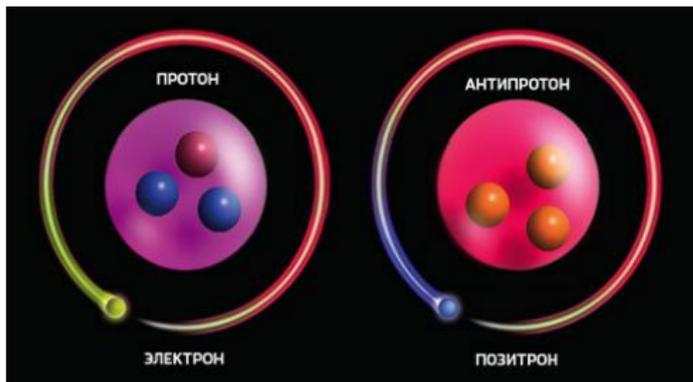


1932: открытие позитрона  Андерсон (1936)

Дмитрий Скобельцын видел следы в 1929 году, но не смог правильно интерпретировать!

1955: открытие антипротона  Сегре, Чемберлен (1959)

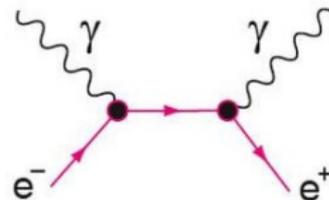
Антиматерия



Материя и антиматерия **аннигилируют** с выделением огромной энергии!

Существуют ли звезды и галактики из антивещества?

Куда подевалась антиматерия??

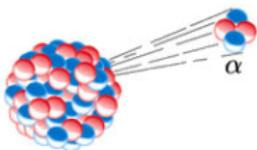


Ускорительная революция

Инструменты эпохи первопроходцев

природная радиоактивность

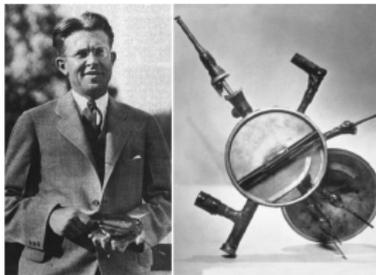
$E \sim$ несколько МэВ;



циклотрон

1929: $E \sim 80$ кэВ;

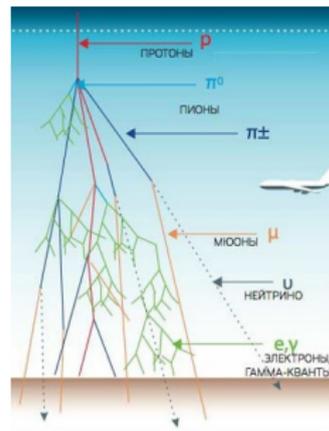
1939: $E \sim 16$ МэВ;



Лоуренс (1939)

космические лучи

природный ускоритель;
запредельные энергии,
но поток $\propto 1/E^{2,7}$.

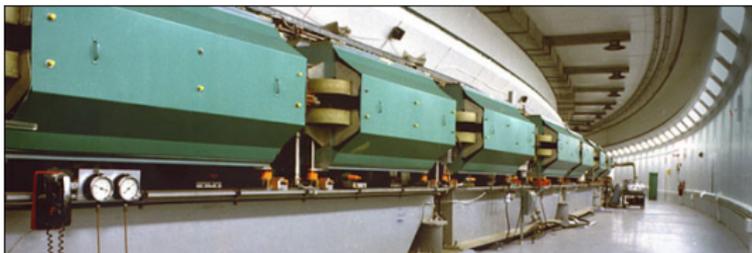


Гесс (1936)

Эра больших ускорителей

40-50-е годы: **бум развития ускорительной техники**: Cosmotron (3,3 ГэВ), Bevatron (6,5 ГэВ), СФ (10 ГэВ), PS (28 ГэВ), AGS (33 ГэВ)

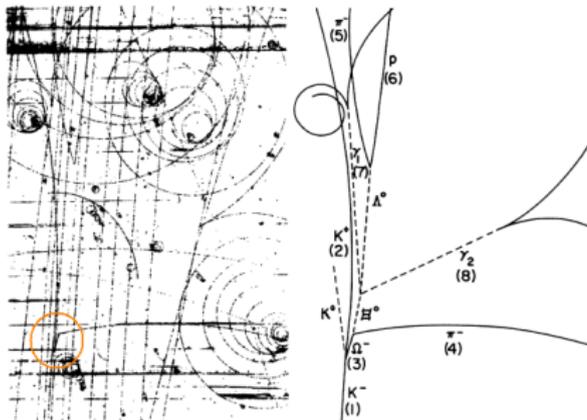
Новые центры: BNL (1947), **ЦЕРН (1954)**, LNF (1955), **ОИЯИ (1956)**, ИЯФ (1958), ИФВЭ (1963)



Великие ускорительные открытия

- 1947: «странные» частицы,
- 1955: антипротон, 1956: антинейтрон,
- 50е-60е: десятки новых адронов*; 🏆 Альварес (1968)

*адрон = частица, чувствующая сильное взаимодействие.

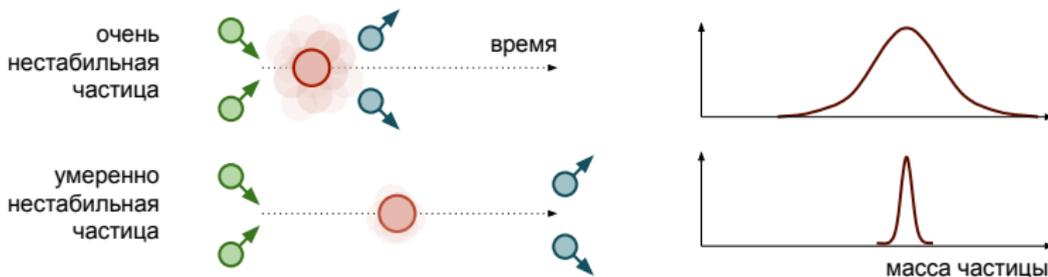


Резонансы

50-е годы: очень короткоживущие адроны, $\tau \sim 10^{-24}$ сек.

Но как вообще их можно заметить??

Соотношение неопределенностей энергия-время: $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$.



Чем нестабильнее частица, тем более «размазана» ее масса.

Кварки

1960-е годы: адронов слишком много!

Прослеживаются закономерности и структура  Хофштадтер (1961)
адроны явно состоят из каких-то «кирпичиков»!

1964: Гелл-Манн, Цвейг — идея **кварков**

 Гелл-Манн (1969)

«верхний» кварк, **u** (заряд $+2/3$),

«нижний» кварк, **d** (заряд $-1/3$),

«странный» кварк, **s** (заряд $-1/3$).

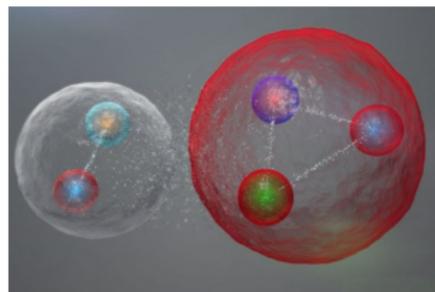
$p = [uud]$, $n = [udd]$, $\pi^+ = [u\bar{d}]$, $\Lambda = [uds] \dots$

1974: «очарованный» кварк **c** ($+2/3$)

 Рихтер, Тинг (1969)

1979: «прелестный» кварк **b** ($-1/3$),

1995: «топ» кварк **t** ($+2/3$).



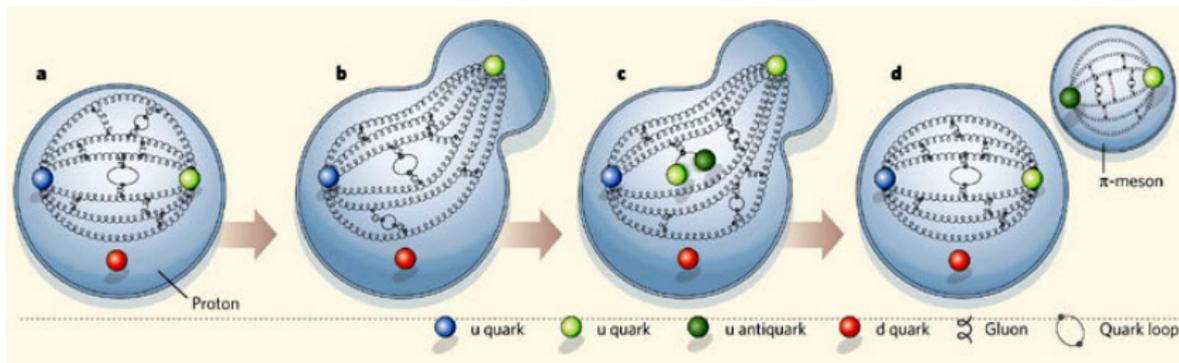
mass →	~2.3 MeV/c ²	~1.275 GeV/c ²	~173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
	u up	c charm	t top
	4.8 MeV/c ²	~95 MeV/c ²	~4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
QUARKS	d down	s strange	b bottom

Пленение кварков

Кварки держатся вместе за счет **сильного взаимодействия**.

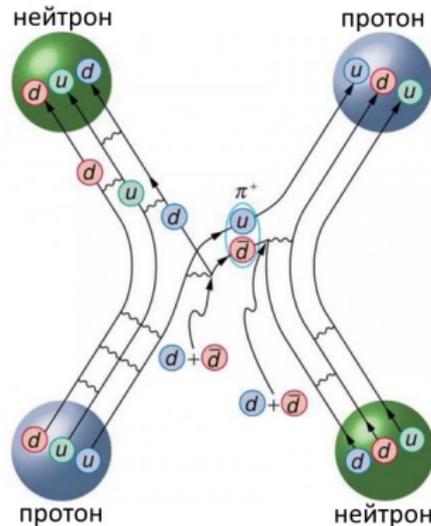
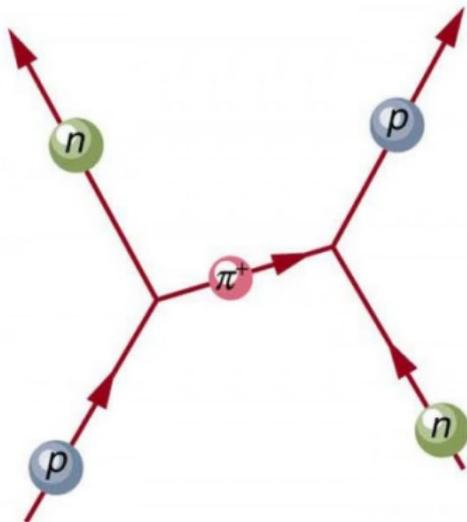
Его переносчики, **глюоны**, чувствуют особый «заряд» кварков — **цвет**.

Самоподдерживающаяся сила: **глюоны чувствуют друг друга!**



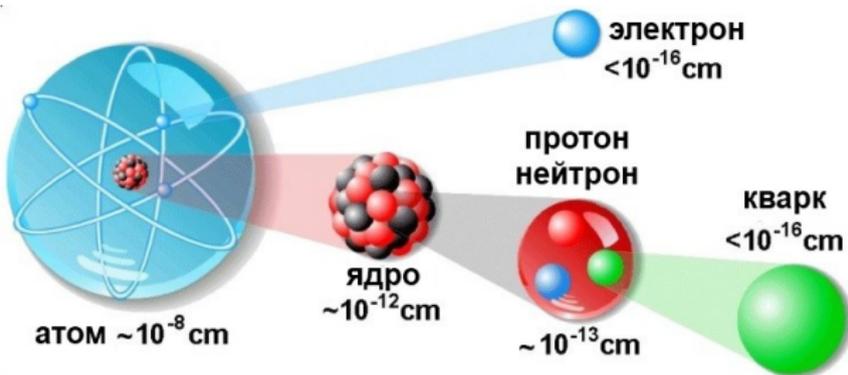
Конфайнмент: кварки навечно пленены внутри адронов!

Ядерные силы: новый взгляд



Как живет микромир

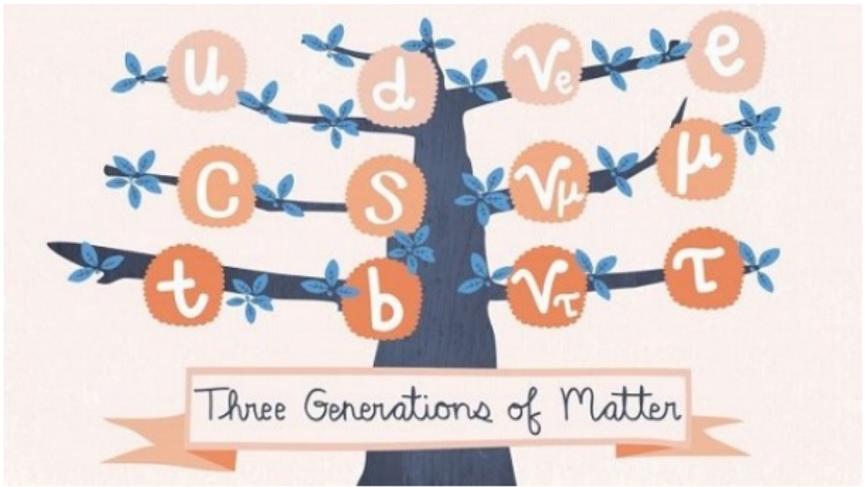
Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны;
- **Сильное:** частицы переносчики — глюоны;
- **Слабое:** частицы переносчики — тяжелые W и Z -бозоны;
- **Гравитация:** для микромира она слишком слаба, **вычеркиваем**.

Три поколения фермионов



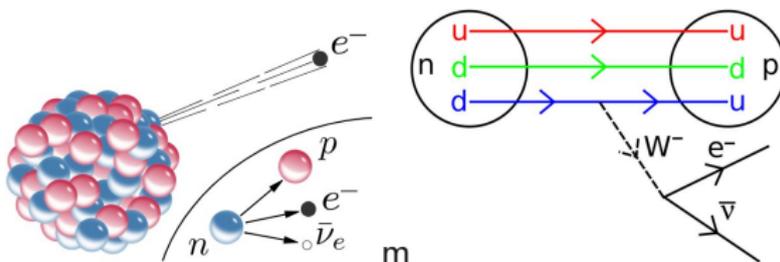
Частицы из 2 и 3-го поколения тяжелые и нестабильные.

Откуда взялись три поколения?? — до сих пор неизвестно!

Особенность слабого взаимодействия

Слабое взаимодействие — единственное, **способное менять тип частиц!**

Бета-распад нейтрона: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e \Rightarrow d \rightarrow ue^- \bar{\nu}_e$.



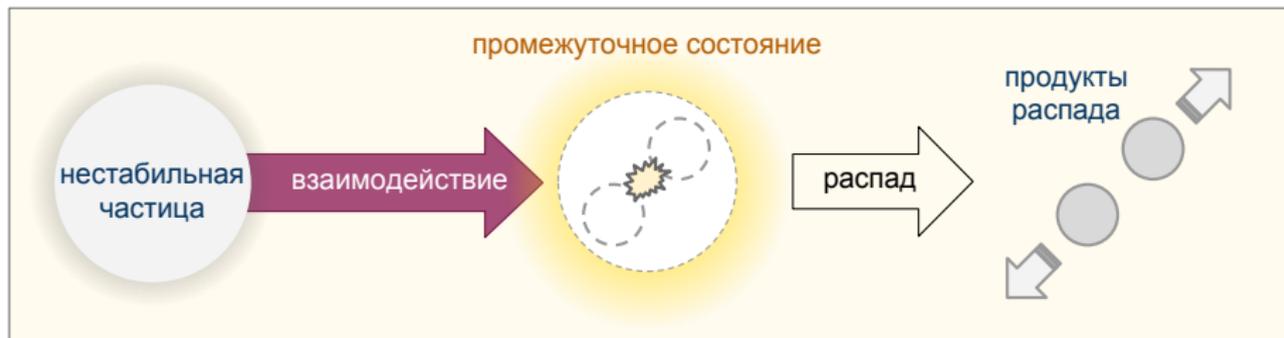
Нейтрино — уникальные, сверхлегкие, сверхпроникающие частицы, чувствуют только слабое взаимодействие.

 Ледерманн, Шварц, Стейнбергер (1988)  Райнес (1995)

 Дэвис, Кошиба (2002)  Каджита, Макдональд (2015)

Как происходит распад адрона

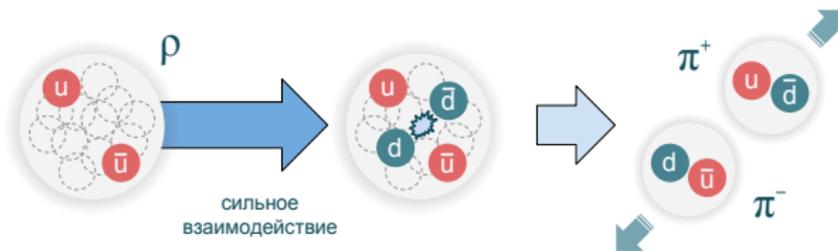
Внутри адрона постоянно «бурлят» виртуальные частицы.



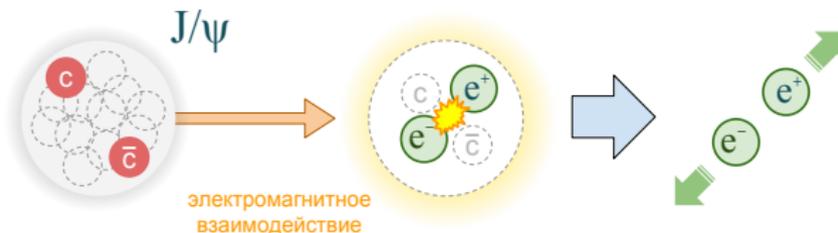
Чем интенсивнее взаимодействие, тем быстрее идет распад!

Быстрые распады

Сильные распады: $\tau \sim 10^{-24}$ с

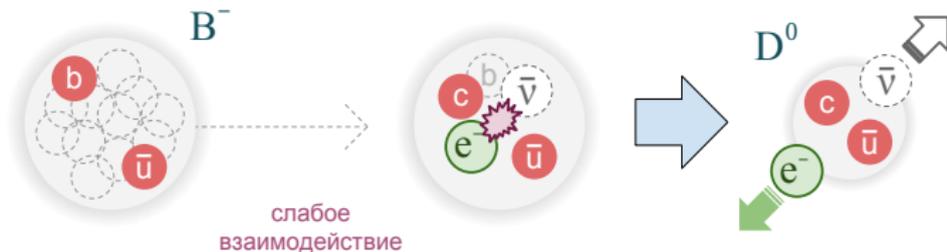


Электромагнитные распады: $\tau \sim 10^{-18} - 10^{-22}$ с

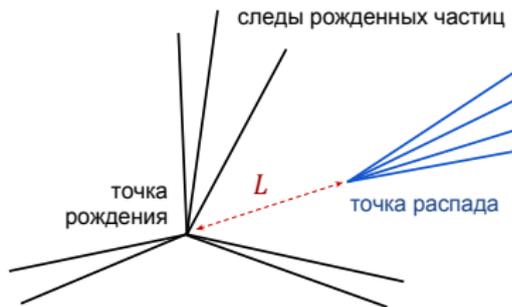


Слабые распады

Слабые распады: $\tau \sim 10^{-12}$ и больше (вплоть до 15 минут у нейтрона)

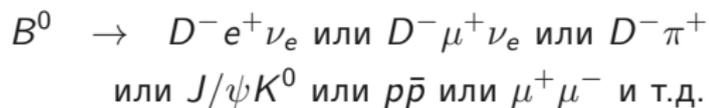


Адрон пролетает до распада
макроскопическую **дистанцию!**



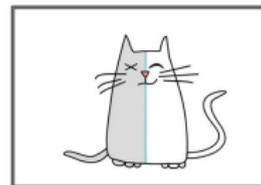
Варианты распада

У адрона есть много вариантов распада:



Он находится **одновременно во всех возможных состояниях**, пока мы не поймем продукты распада.

Schrödinger's Cat



Невозможно заранее предсказать распад
в каждом конкретном случае!

Но мы можем теоретически вычислить **вероятность** того или иного канала — и ее мы можем сравнить с экспериментом.

Надо **повторить эксперимент миллиарды раз** и сосчитать, сколько раз случился нужный распад → отсюда и получится вероятность.

Следующие две лекции

- **Лекция 2:** от описательной физики частиц — к **Стандартной модели** и ее проблемам;
- **Лекция 3:** как проверяют Стандартную модель и ищут Новую физику на **Большом адронном коллайдере**.