

# Введение в физику частиц — 1

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon  
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

3-10 ноября 2019 г.



INVESTIGADOR  
FCT





1 Эпоха первопроходцев

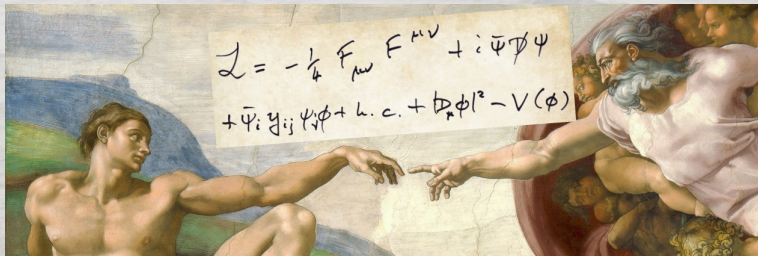
2 Ускорительная революция

3 Как живет микромир

- В макромире фундаментальные законы природы часто скрываются за **несущественными ситуативными подробностями**.
- В микромире мы освобождаем объекты исследования от «шелухи». Нам доступны **исходные строительные кирпичики Вселенной** в чистейшем виде.

Физика частиц позволяет нам **напрямую прикоснуться к фундаментальным законам природы!**

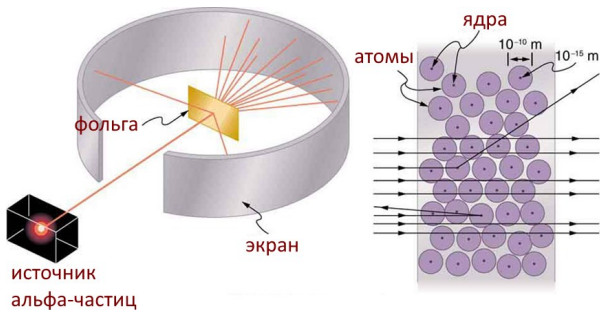
Мы словно читаем **исходный код мироздания**.



# 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:  $\text{МэВ}$  ( $10^6 \text{ эВ}$ );
-  элементарные частицы: **ГэВ** ( $10^9 \text{ эВ}$ ) и **ТэВ** ( $10^{12} \text{ эВ}$ );
  - ▶ масса протона:  $\approx 1 \text{ ГэВ}$ ,
  - ▶ масса бозона Хиггса: **125 ГэВ**,
  - ▶ энергия протонов в LHC: **6,5 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»:

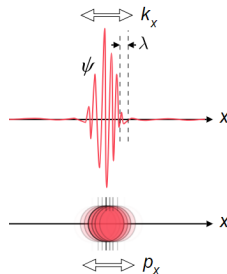
$\lambda = 2\pi\hbar/p$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

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

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

Принципиально новые квантовые явления — спин и тождественность частиц — тоже играют ключевую роль в жизни микромира.



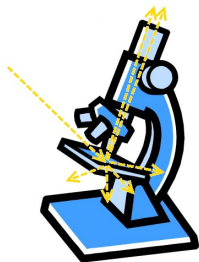


# Как рассмотреть микромир

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

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





1921: Резерфорд предсказал нейтрон

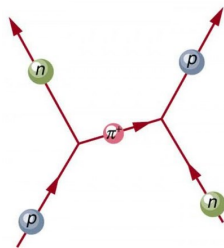
1932: Открытие нейтрона 🏆 Чедвик (1935)

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

🏆 Юкава (1949)

1936: открытие мюонов  $\mu$  — «тяжелых электронов»

1947: открытие  $\pi$ -мезонов 🏆 Пауэлл (1950)

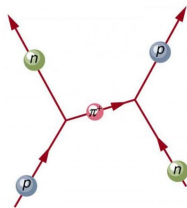
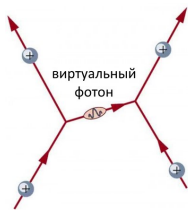


# Квантовая теория поля


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

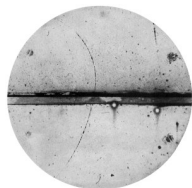
Фундаментальная сущность — **поле**. Частицы — его возмущение.


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



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

 Дирак (1933)

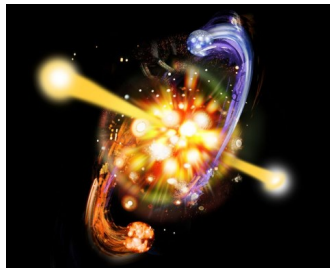
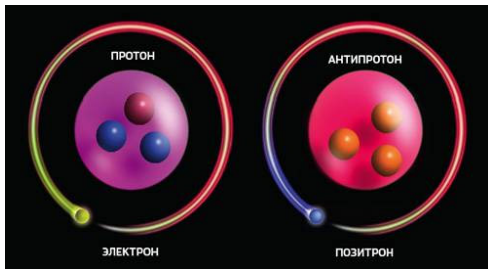


1932: открытие позитрона  Андерсон (1936)

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

1955: открытие антипротона  Сегре, Чемберлен (1959)

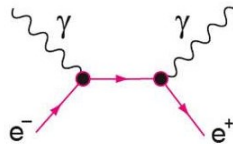
# Антиматерия



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

Существуют ли звезды и галактики из антивещества?

Куда подевалась антиматерия??

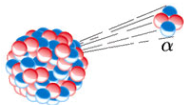


# Ускорительная революция

# Инструменты эпохи первопроходцев

## природная радиоактивность

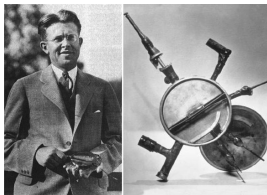
$E \sim$  несколько МэВ;



## циклотрон

1929:  $E \sim 80$  кэВ;

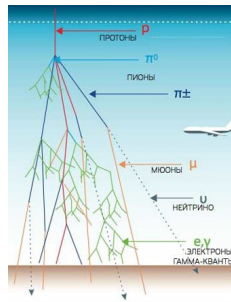
1939:  $E \sim 16$  МэВ;



Лоуренс (1939)

## космические лучи

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



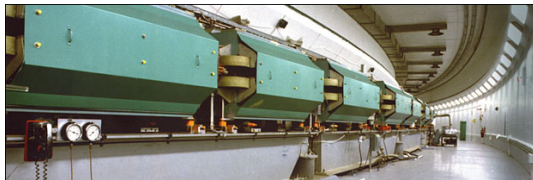
Гесс (1936)




# 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)

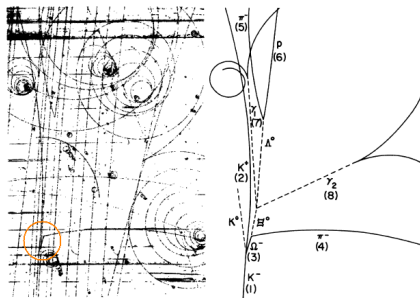
Новые центры: BNL (1947), ЦЕРН (1954), LNF (1955), ОИЯИ (1956), ИЯФ (1958), ИФВЭ (1963)



# Великие ускорительные открытия

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

\*адрон = частица, чувствующая сильное взаимодействие.

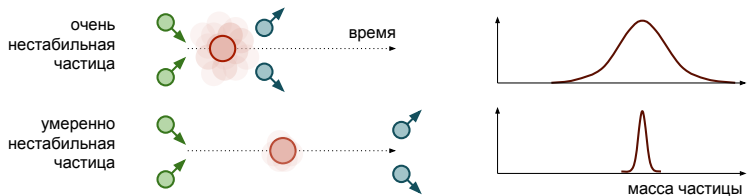


# Резонансы

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 адроны явно **состоят из каких-то «кирпичиков»!**



Хофштадтер (1961)

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  $-1/3$ ).

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

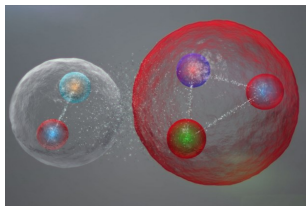
1974: «очарованный» кварк **c** ( $+2/3$ )



Рихтер, Тинг (1976)

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

1995: «топ» кварк **t** ( $+2/3$ ).



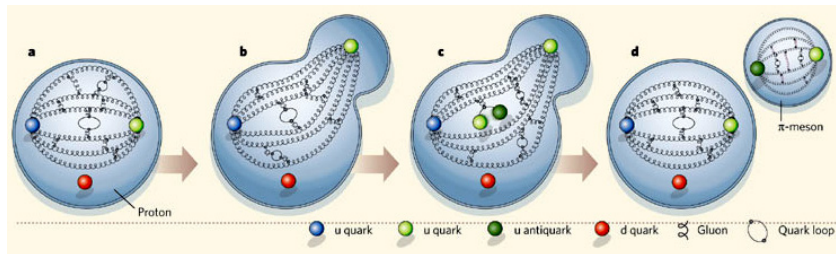
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$95 \text{ MeV}/c^2$	$4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

# Пленение кварков

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

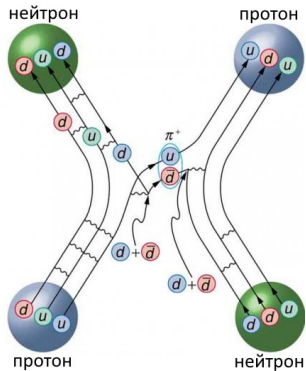
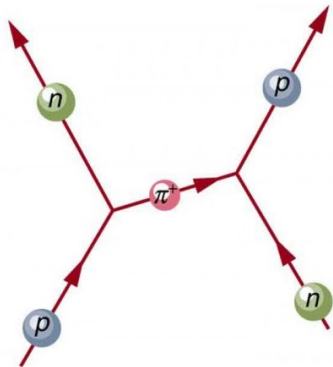
Его переносчики, **глюоны**, чувствуют особый «заряд» кварков — **цвет**.

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



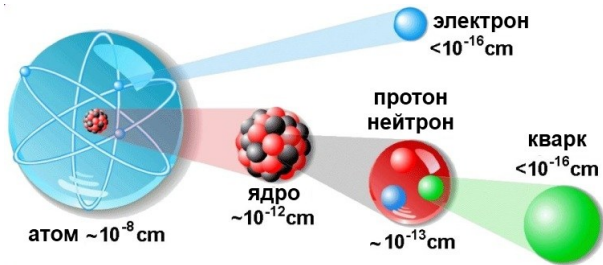
**Конфайнмент:** кварки навечно пленены внутри адронов!

# Ядерные силы: новый взгляд



# Как живет микромир

# Устройство материи

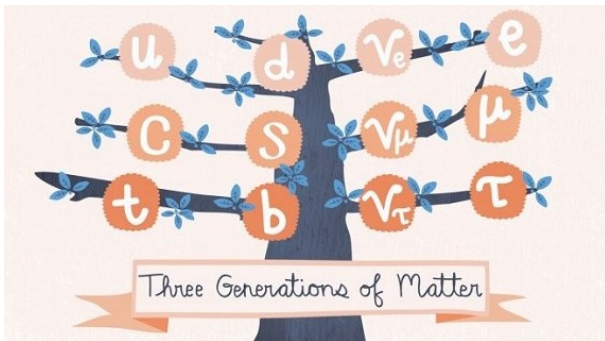


Фундаментальные взаимодействия:

- **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



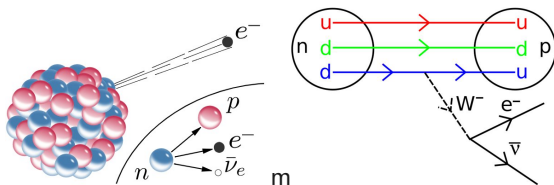
Частицы из 2 и 3-го поколения тяжелые и нестабильные.

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

# Особенность слабого взаимодействия

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

Бета-распад нейтрона:  $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e \Rightarrow d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$ .



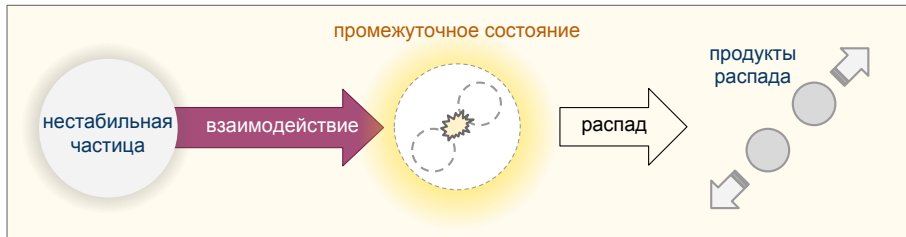
**Нейтрино** — уникальные, сверхлегкие, сверхпроникающие частицы, чувствуют только слабое взаимодействие.

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

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

# Как происходит распад адрона

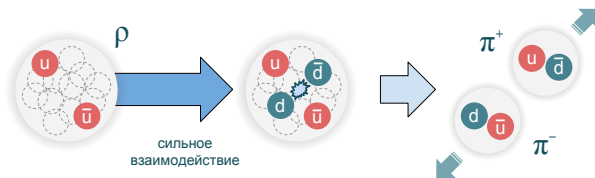
Внутри адрона постоянно «бурлят» виртуальные частицы.



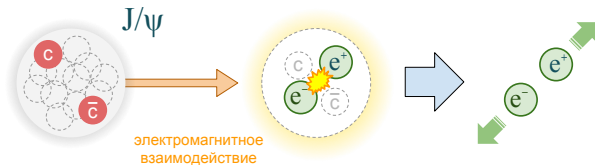
Чем интенсивнее взаимодействие, тем быстрее идет распад!

# Быстрые распады

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

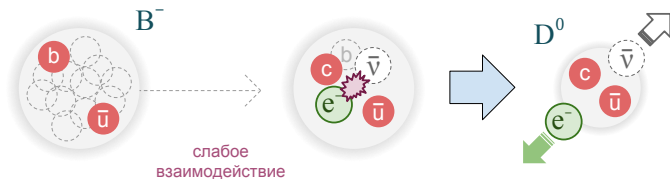


Электромагнитные распады:  $\tau \sim 10^{-18} - 10^{-22}$  с

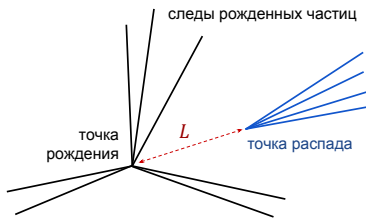


# Слабые распады

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



Адрон пролетает до распада  
макроскопическую дистанцию!



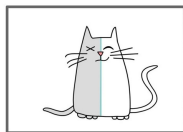
# Варианты распада

У адрона есть много вариантов распада:

$$B^0 \rightarrow D^- e^+ \nu_e \text{ или } D^- \mu^+ \nu_e \text{ или } D^- \pi^+ \\ \text{или } J/\psi K^0 \text{ или } p\bar{p} \text{ или } \mu^+ \mu^- \text{ и т.д.}$$

Он находится **одновременно во всех возможных состояниях**, откуда мы не поймаем 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**.