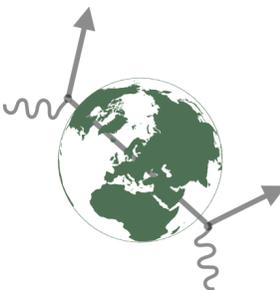




**Трунтова**  
**Любовь Александровна**

30.09.1992 – 22.03.2024

# От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

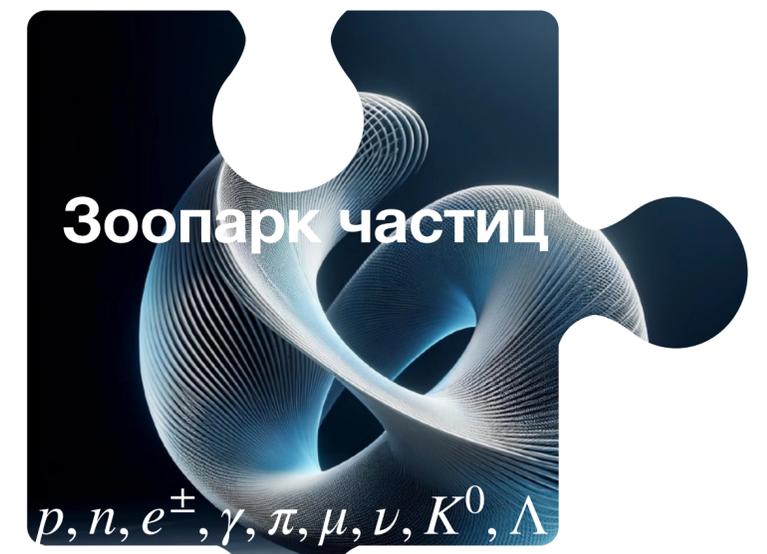
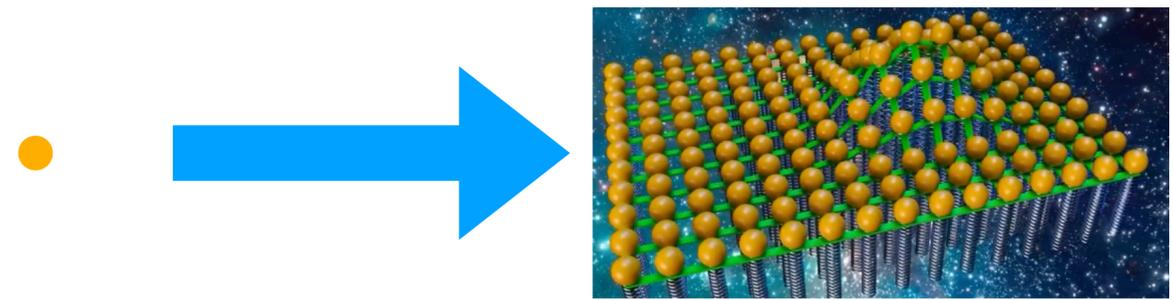
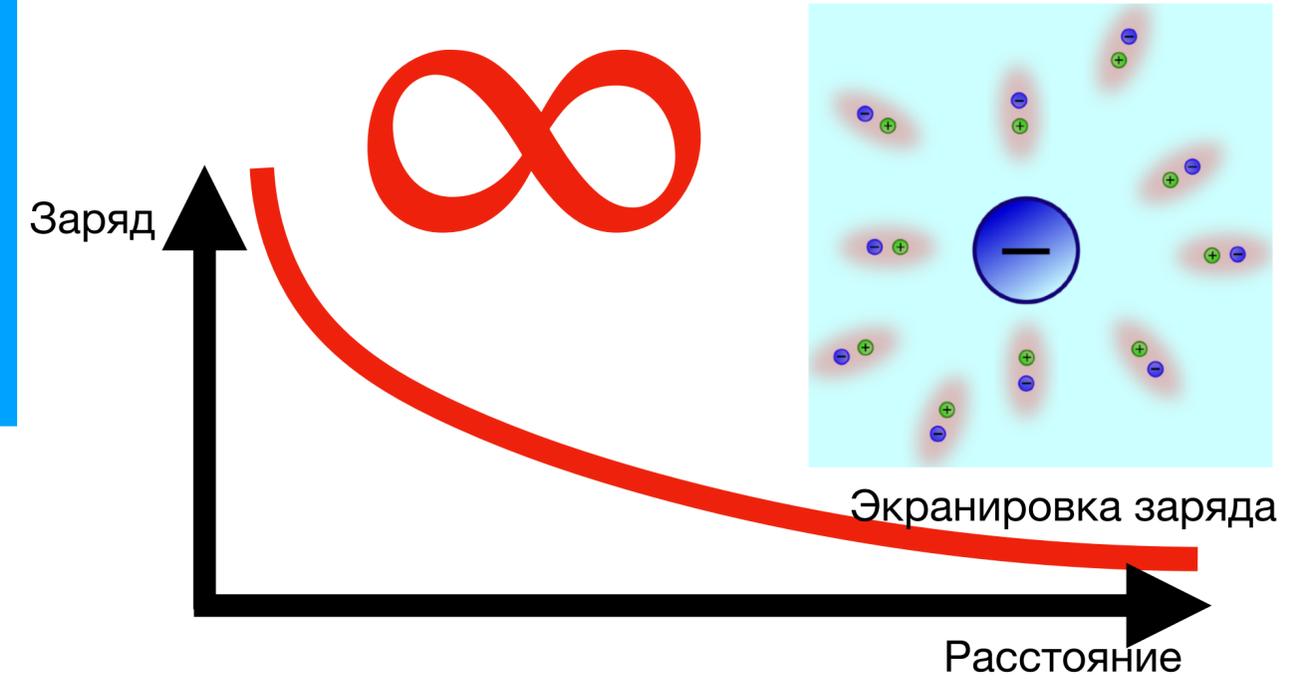


**В предыдущих сериях...**

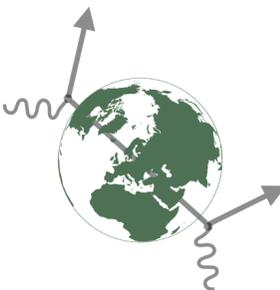
# Физическая картина к 1930



# Физическая картина к 1960



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

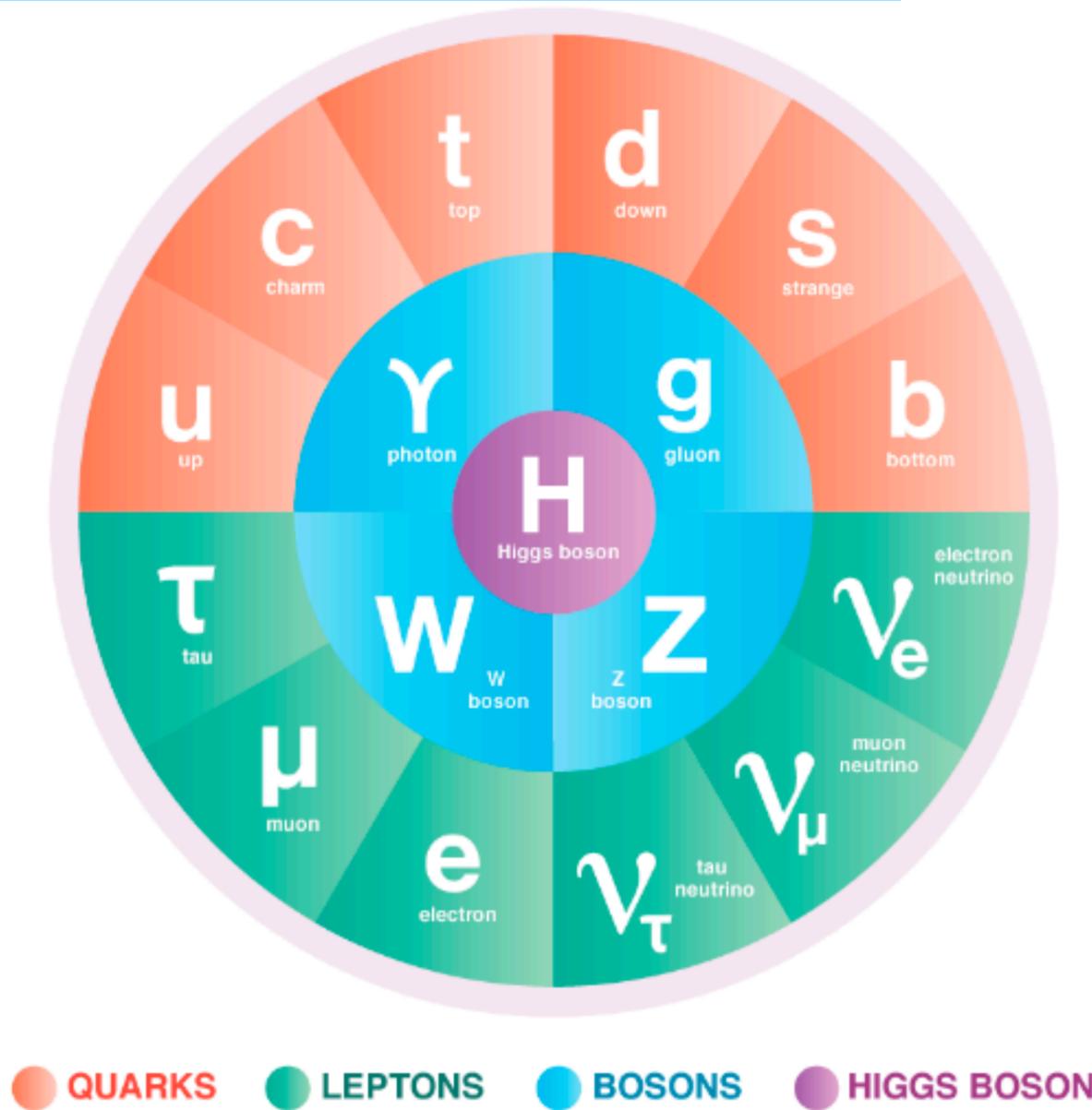


# Что такое Стандартная Модель?

- Модель в рамках квантовой теории поля
  - объединяет **электромагнитное** и **слабое** взаимодействия в **электрослабые** взаимодействия
  - формально объединяет электрослабое и сильное взаимодействия
- Нетривиальные явления
  - **локальные симметрии**: предсказывают нетривиальные взаимодействия полей
  - **спонтанное нарушение симметрий**: делает массивными безмассовые поля
  - **квантовые аномалии**: нарушение классических законов сохранения. Непертурбативная физика
  - **Поле и бозон Хиггса**: центральная проблема физики в течении 45 лет

# Код Вселенной

В картинках



Источник: DOE

# Код Вселенной

## В уравнениях

Лагранжиан Стандартной Модели

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \sum_k \left( \bar{L}_{k,L} i \hat{D} L_{k,L} + \bar{Q}_{k,L} i \hat{D} Q_{k,L} + \sum_{\psi=\ell,\nu,u,d} \bar{\psi}_{k,R} i \hat{D} \psi_{k,R} \right) &- \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^i G^{i,\mu\nu} \\ &+ |D_\mu \varphi|^2 - \frac{\lambda^2}{2} \left( |\varphi|^2 - \frac{v^2}{2} \right)^2 \\ &- \sum_{k,j} \left( \lambda_{kj}^\ell \bar{L}_{k,L} \ell_{j,R} \varphi + \lambda_{kj}^\nu \bar{L}_{k,L} \nu_{j,R} \varphi_c + \lambda_{kj}^d \bar{Q}_{k,L} d_{j,R} \varphi + \lambda_{kj}^u \bar{Q}_{k,L} u_{j,R} \varphi_c + \text{э.с.} \right), \end{aligned}$$

# Код Вселенной

В уравнениях

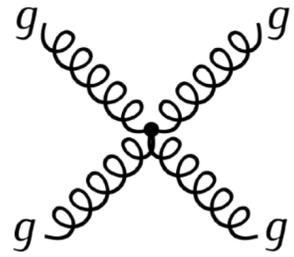
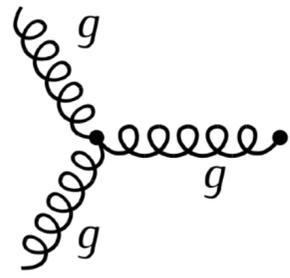
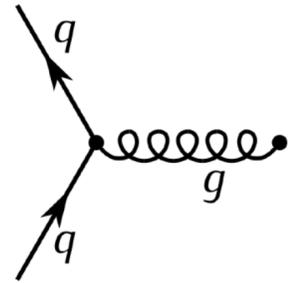
# Код Вселенной

В уравнениях

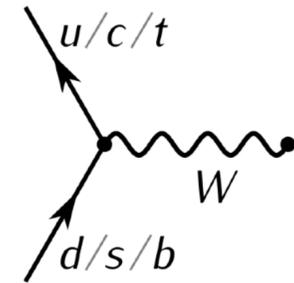
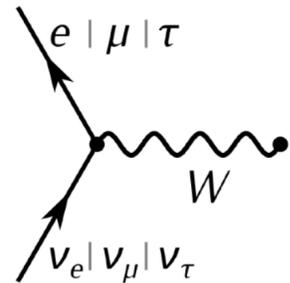
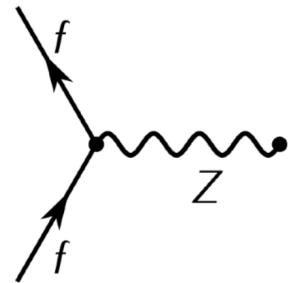
# Код Вселенной

## В уравнениях-картинках

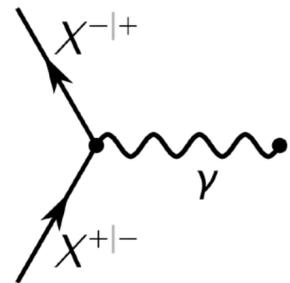
STRONG VERTICES



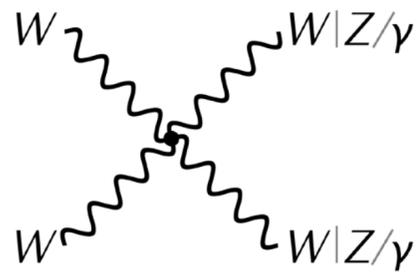
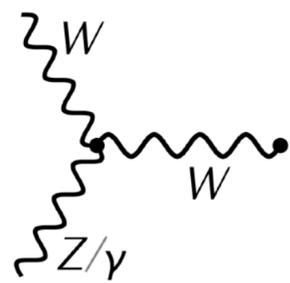
WEAK VERTICES



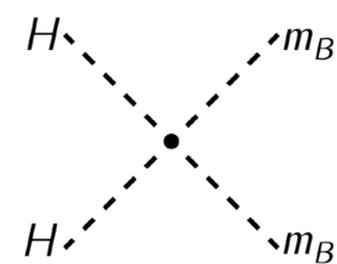
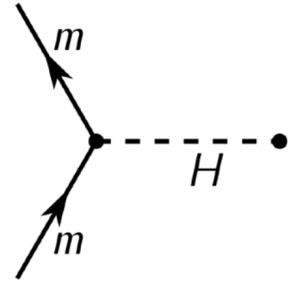
ELECTROMAGNETIC VERTEX



ELECTROWEAK VERTICES



HIGGS VERTICES



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 1 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 2 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 3 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [ -(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) ] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) ] - \\
 4 & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) ] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) ] + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 5 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igMs_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

**Если вам все еще не все  
ПОНЯТНО...**

**попробуем обойтись без математики**

# Поиск единства явлений

# От любопытства к науке

## Явления, изменившие наше понимание

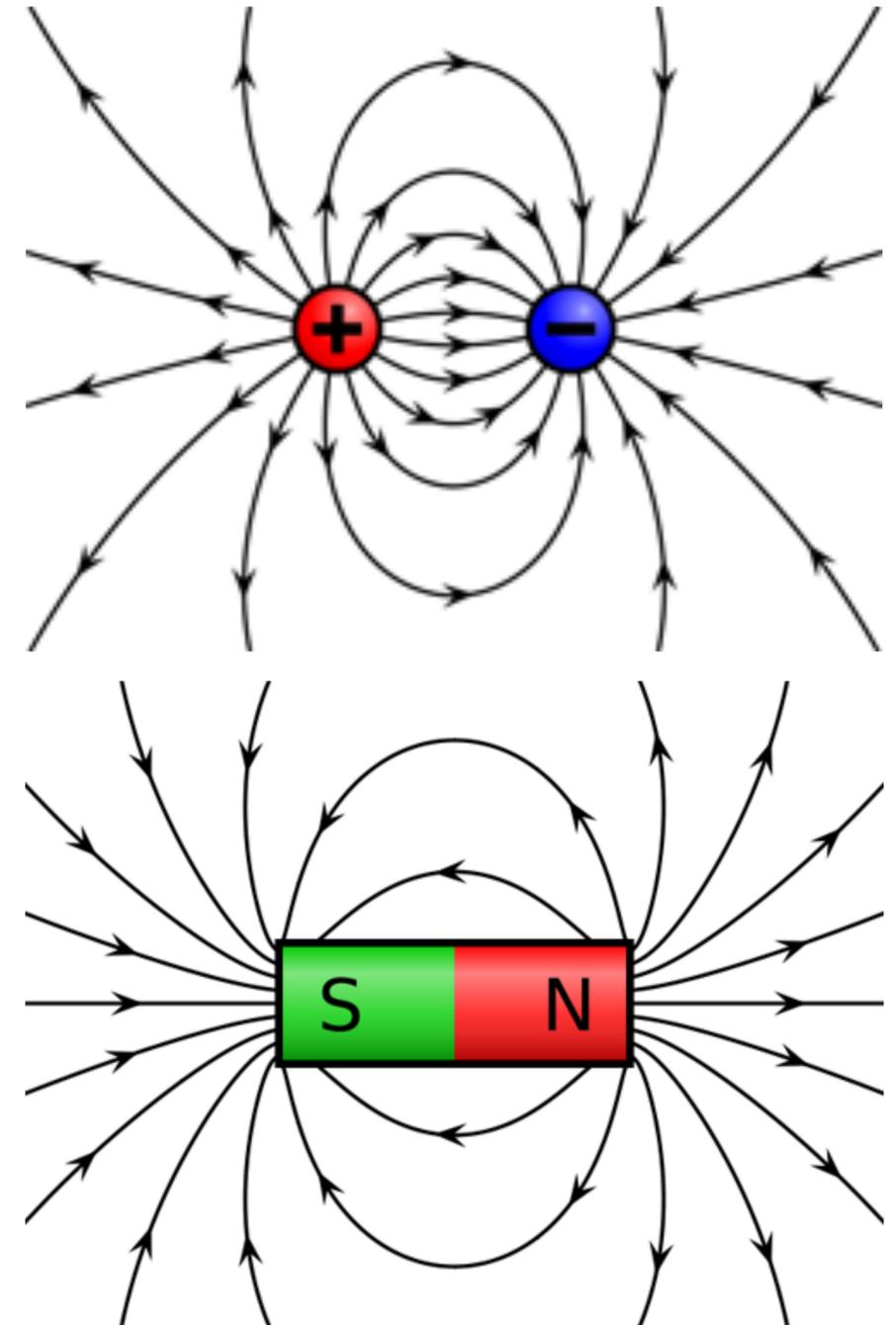
- Гром и молния
- Полярные сияния
- Небесные движения
- Радуга
- Землетрясения и вулканы
- Приливы и отливы
- Времена года
- Затмения
- Поиск ископаемых



# Электричество и магнетизм

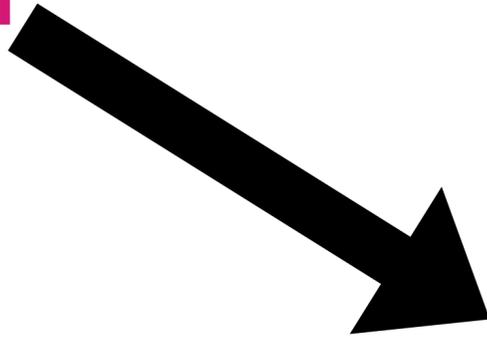
Электрическое поле

Магнитное поле

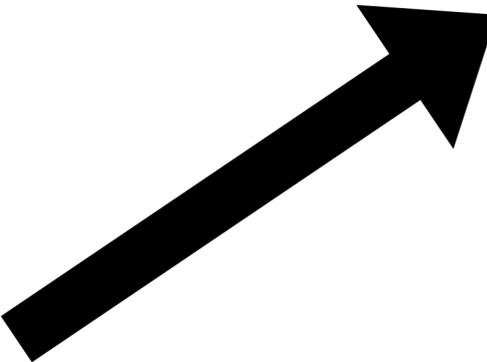


# Электродинамика

Электрическое поле



Магнитное поле



Электромагнитное поле

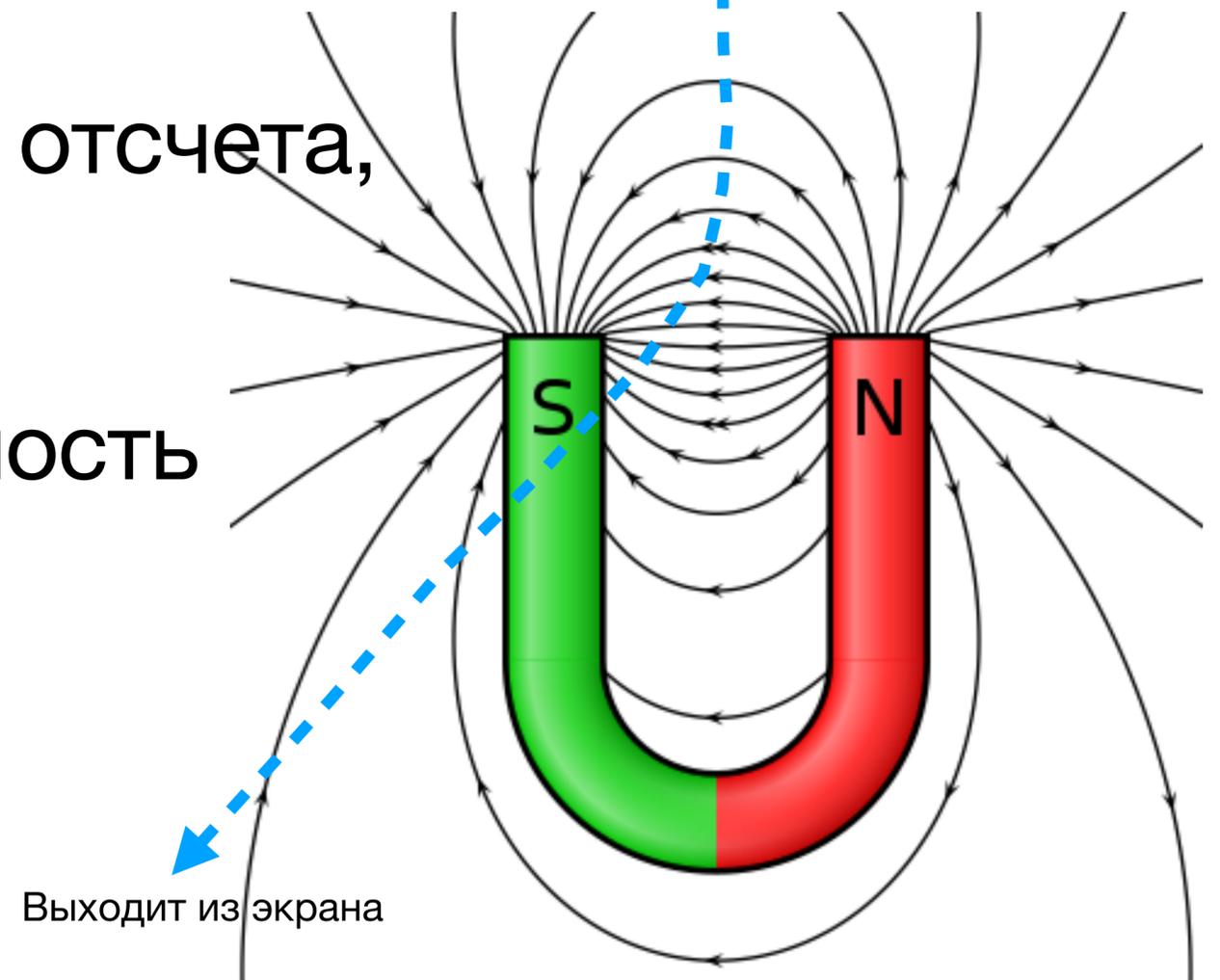


Джеймс Максвелл

# Парадокс Эйнштейна

Мысленный эксперимент (не повторяйте дома!)

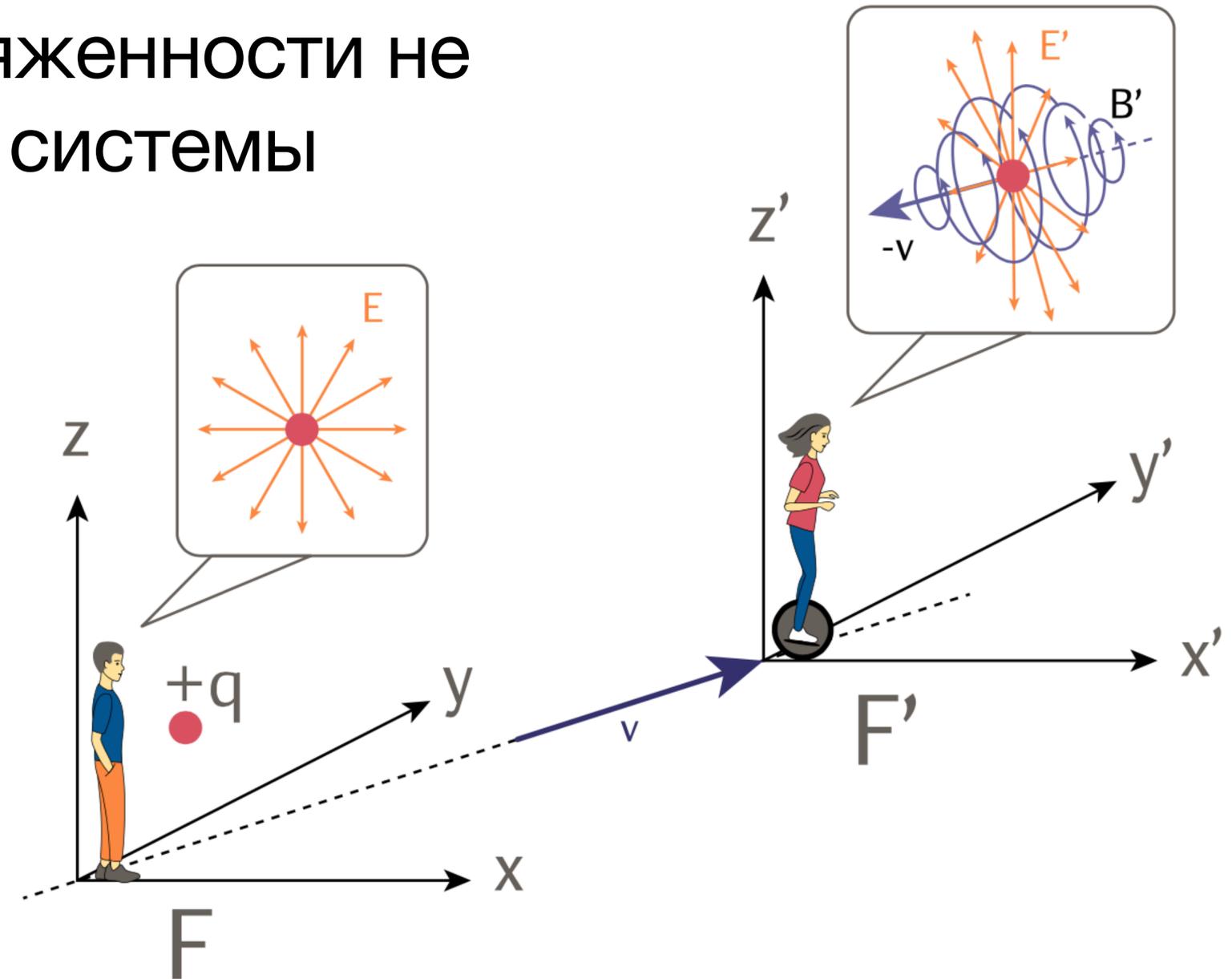
- На электрически заряженную частицу с ненулевой скоростью  $v$  действует сила Лоренца
- Какая сила на нее действует в системе отсчета, движущейся с той же скоростью?
- Электрическая и магнитная напряженность не фундаментальны. Они зависят от системы отсчета!



# Парадокс Эйнштейна

Объединение дало более глубокое понимание

- Электрическая и магнитная напряженности не фундаментальны. Они зависят от системы отсчета!



«Руслан и Людмила. Электромагнитные опыты» А.С. Пушкин

# Важность слабых взаимодействий

- «Заводят» производство энергии в Солнце

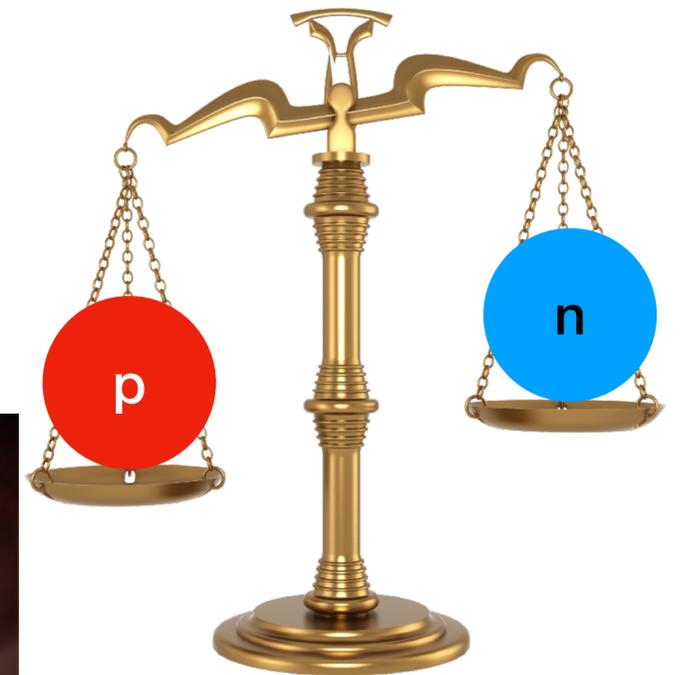


- Синтез химических элементов в звездах

- Гео-термальная энергия



- Нуклеосинтез в ранней Вселенной



- Нейтринная астрофизика



# Электрослабая теория:

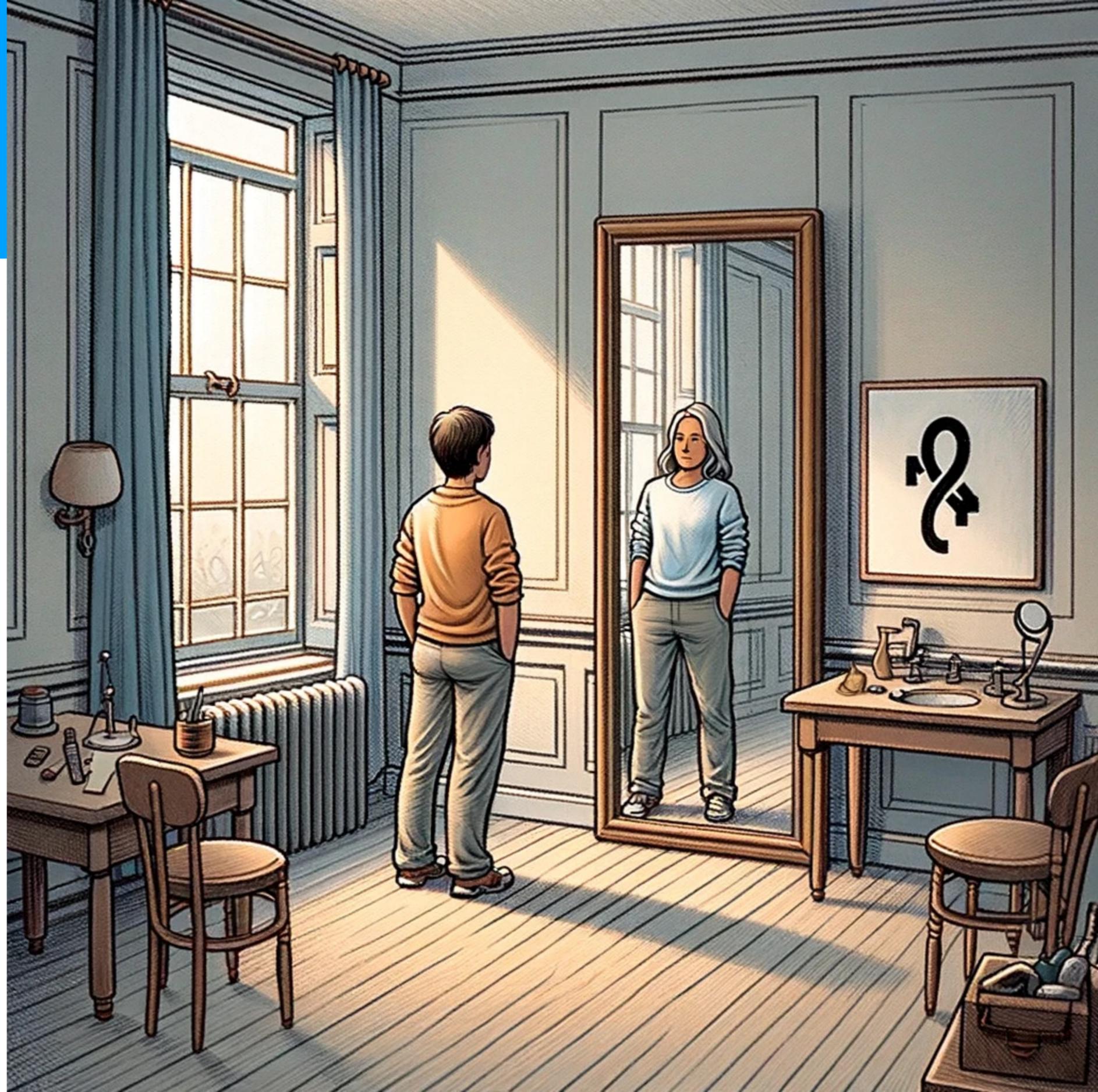
— объединение электромагнитных и слабых взаимодействий

# Как это ВОЗМОЖНО?

Они такие разные...

# Слабые взаимодействия

1. В нашем мире и в зазеркалье разные



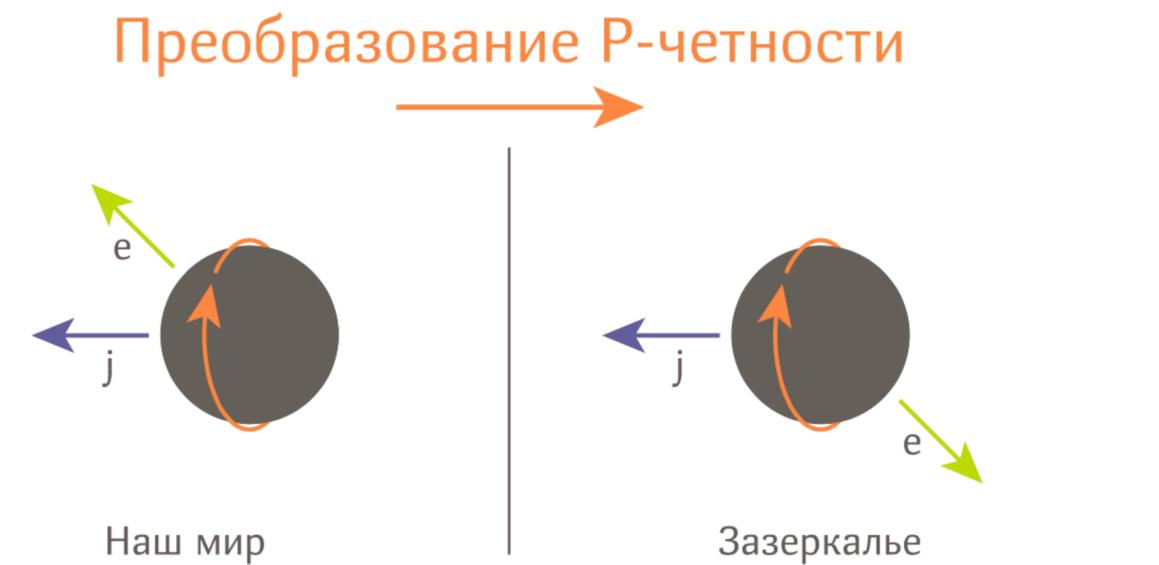
# Слабые взаимодействия

1. В нашем мире и в зазеркалье разные

2. Слабее электромагнитных примерно в 100 миллионов раз

3. Коротко-действующие

4. Умеют менять тип частиц



- Время жизни  $\pi^+$ :  $\simeq 3 \cdot 10^{-8}$  сек
- Время жизни  $\pi^0$ :  $\simeq 10^{-16}$  сек

$$r \lesssim 1/1000 r_p$$

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

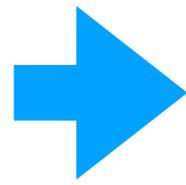
# Что можно сказать про переносчик слабого взаимодействия?

1. В нашем мире и в зазеркалье разные

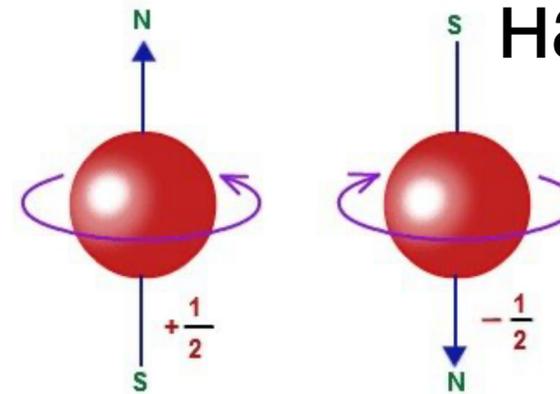
2. Слабее электромагнитных примерно в 100 миллионов раз

3. Коротко-действующие

4. Умеют менять тип частиц

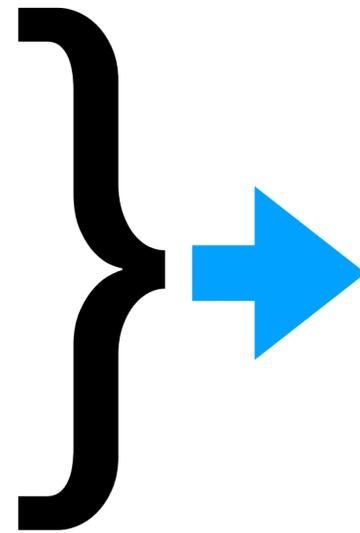


Взаимодействие зависит от направления спина



Массивный переносчик

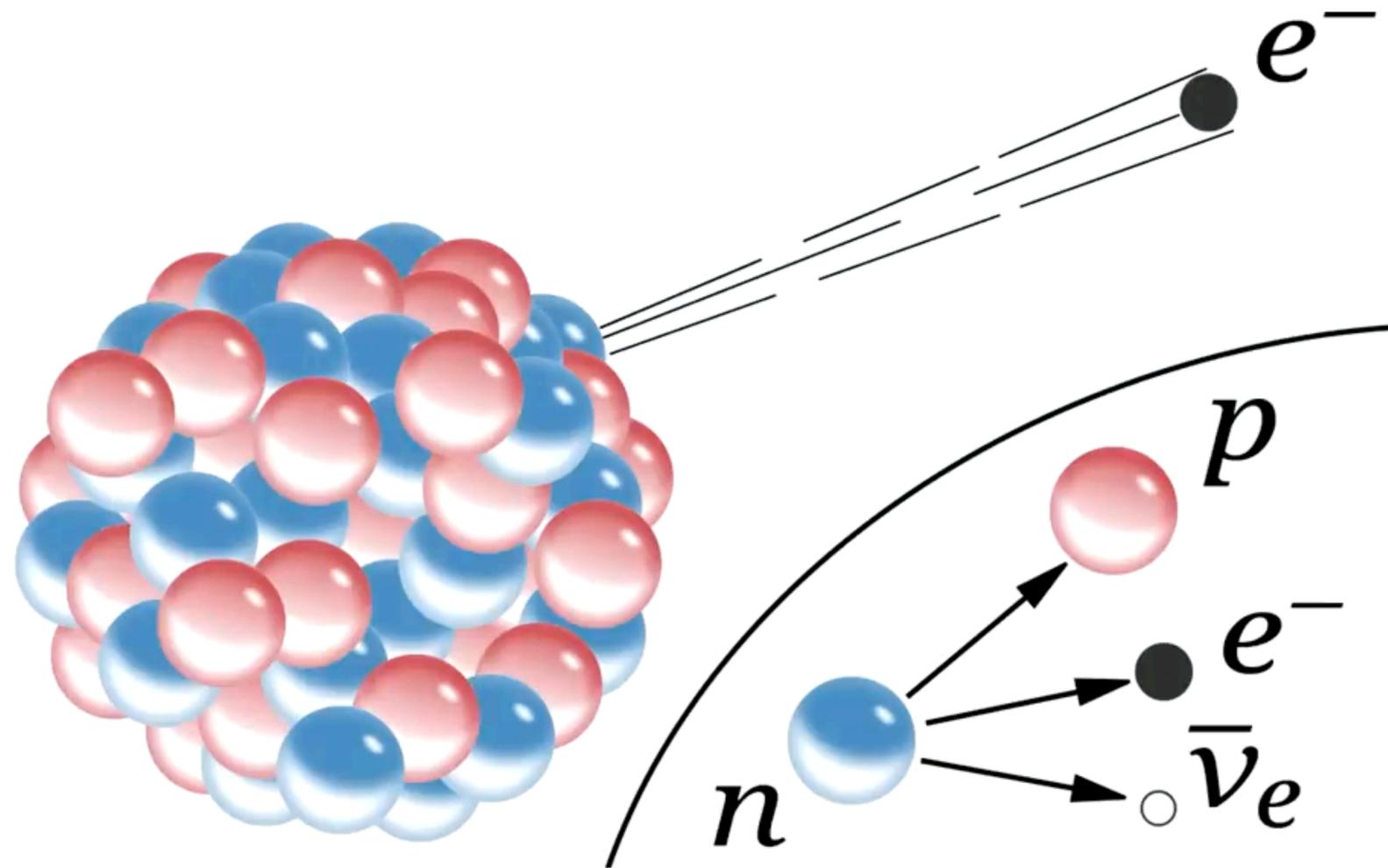
$$M \simeq 100 m_p$$



Электрически заряженный переносчик

# Распад нейтрона в КТП

Качественная иллюстрация



Как построить теорию  
взаимодействий, для  
которых нет  
классического  
аналога?



# Две противоречащих друг другу идеи

**СИММЕТРИИ**

**СПОНТАННОЕ  
НАРУШЕНИЕ  
СИММЕТРИЙ**

**СИММЕТРИИ**



# Симметрии — источник законов сохранения

Импульс



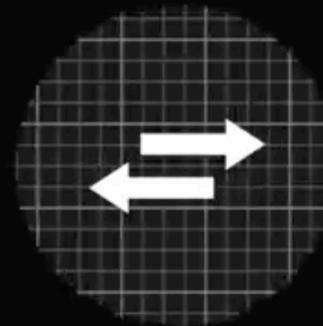
Орбитальный  
момент



Энергия



Релятивистский  
угловой момент



**«Если симметрии — источник законов сохранения, возможно, и вид взаимодействия определяется ими?»»**

**Абдус Салам и Джордж Ворд (1961)**

# Первый шаг к объединению

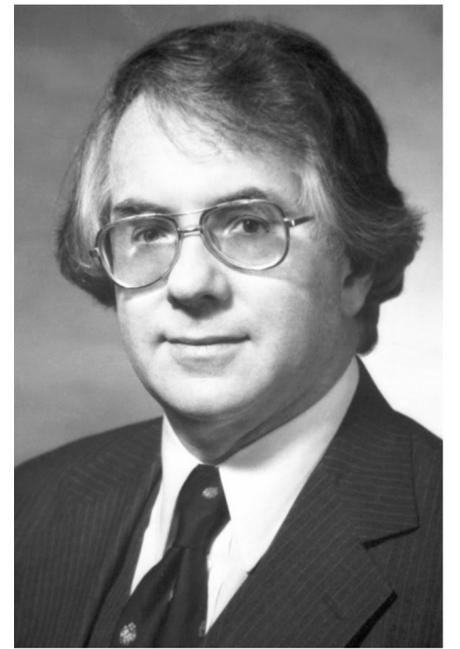
Шелдон Глэшоу (1961)

## ○ Электрослабая теория:

- Электромагнитное поле с массой ноль
- Два электрически заряженных поля  $W^{\pm}$  с ненулевой массой
- Электрически нейтральное поле  $Z^0$  с ненулевой массой

## ○ Проблемы:

- Массивные поля приводили к неустранимым бесконечностям ...
- Массивные поля явно нарушали симметрию!



Ш. Глэшоу. НП 1979

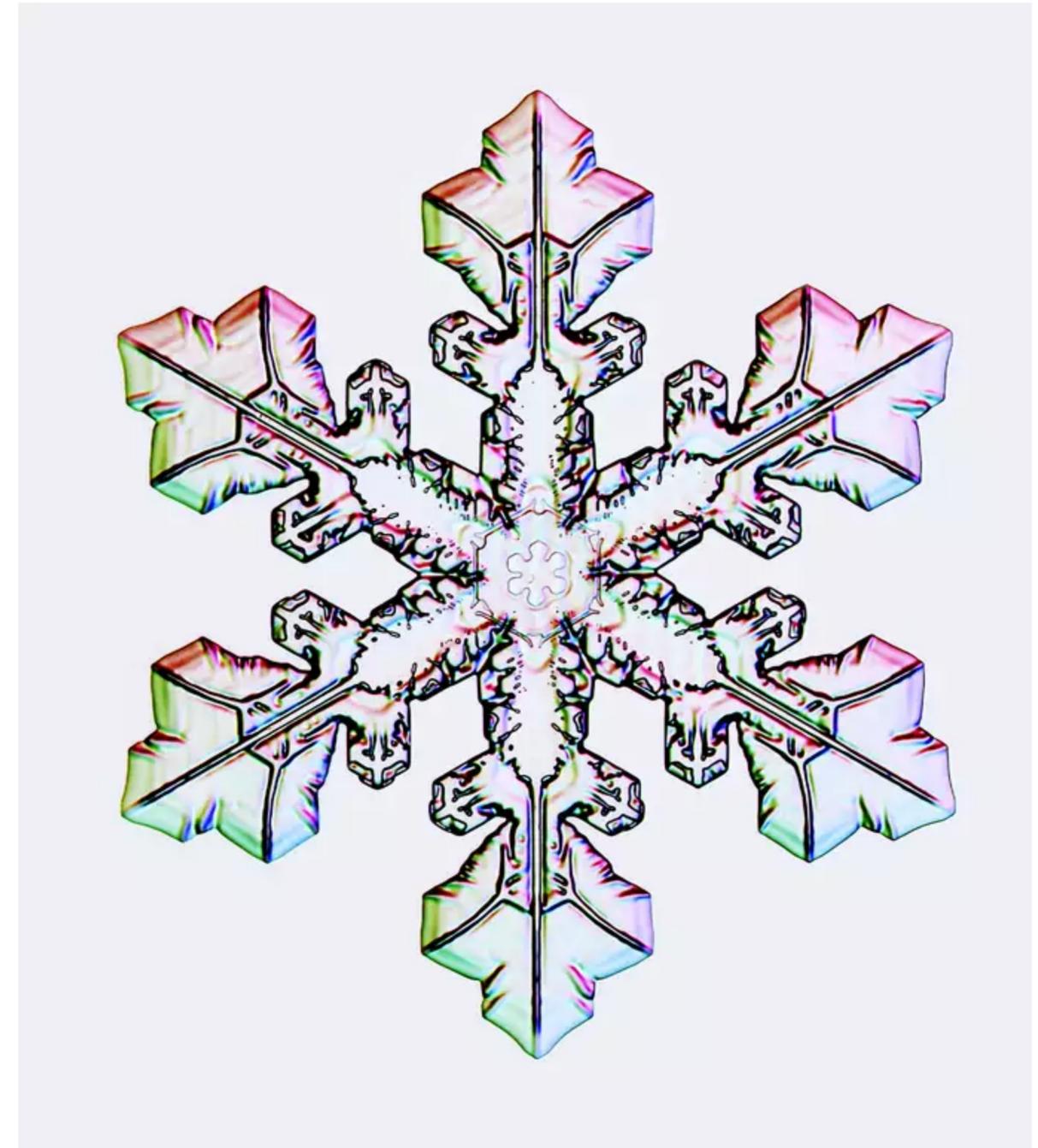
Ученик Швингера

**СПОНТАННОЕ  
НАРУШЕНИЕ  
СИММЕТРИЙ**



# Переход жидкости в лед

Пример спонтанного нарушения симметрии



Самая маленькая снежинка: 475 молекул воды.  
Science **337** no. 6101, 529-1532

# Механизм Хиггса

# Механизм Хиггса

Поле Хиггса заполняет Вселенную.

## 1. Симметрия не нарушена:

- Все поля с нулевой массой
- Бесконечности устранимы
- Среднее значение поля Хиггса равно нулю



## 2. Симметрия нарушена:

- У некоторых полей ненулевая масса
- Бесконечности устранимы
- Среднее значение поля Хиггса отлично от нуля



# Механизм Хиггса

## Кто его придумал?

— 1960. Йоитиро Намбу

— 1962. Ф. Андерсон

— 1964. Р. Браут и Ф. Энглерт

— 1964. Г.С. Гуральник, К. Хаген и Т. Киббл

— 1964. П. Хиггс

Статья отклонена в Physics Letters. Принята в PRL с добавлением о существовании бозона Хиггса

— 1965. А. Мигдал и А. Поляков (студенты).

Опубликовано в 1966 из-за задержки редакции ЖЭТФ



Ф. Андерсон. НП 1977



П. Хиггс. НП 2013

# Качественные объяснения механизма Хиггса

Трудно объяснить без уравнений

# Объяснения для разных аудиторий

- 1. Для биологов**
- 2. Для любителей плавания**
- 3. Для любителей вечеринок**
- 4. Для любителей сверхпроводимости**

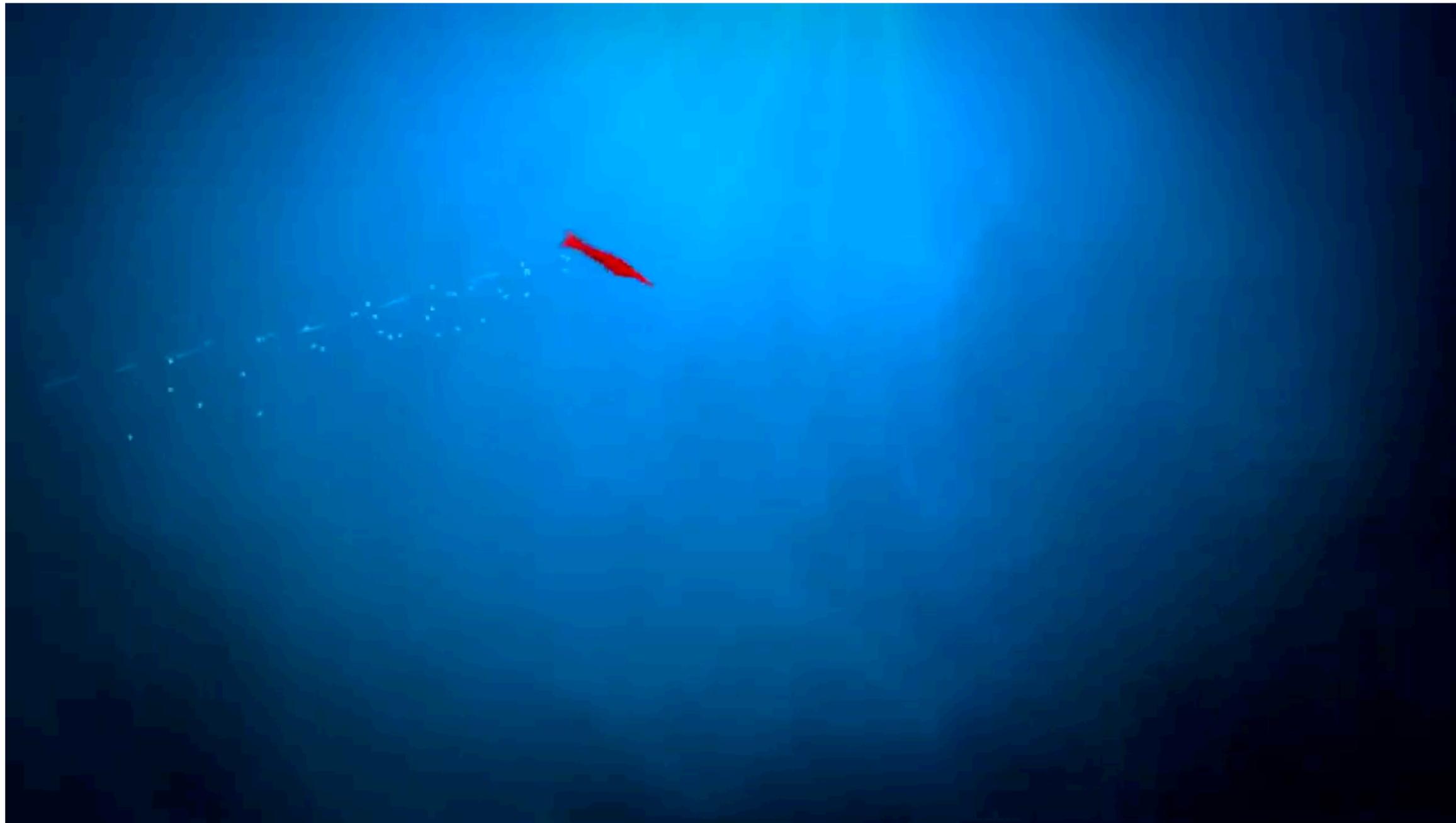
# Для биологов

## Путь мухи



# Для любителей плавания

Вода — как пример поля Хиггса



# Для любителей вечеринок

Сквозь толпу: от Дона Линкольна и TED



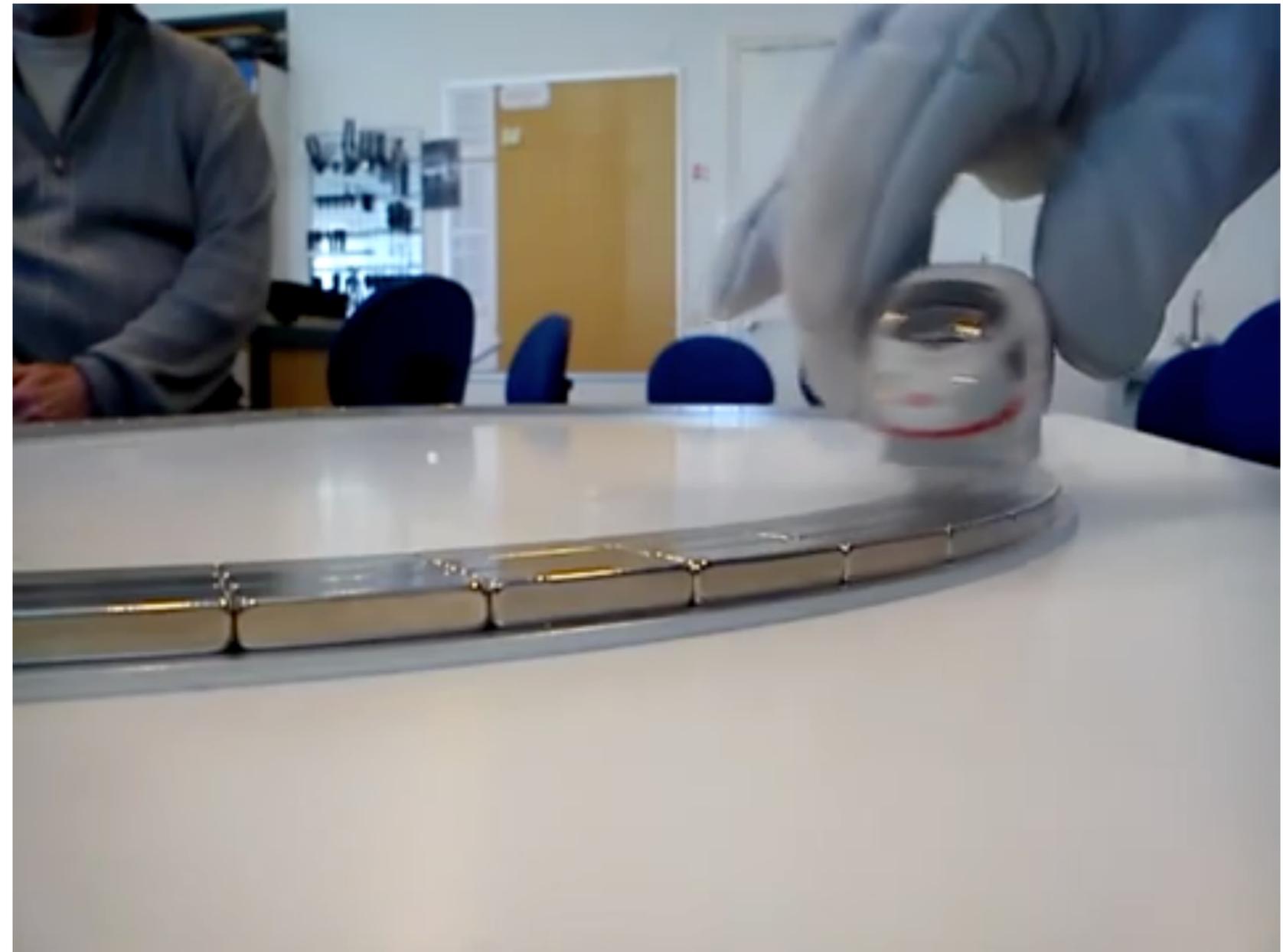
# Для любителей сверхпроводимости

## Эффект Мейсснера

— Куперовские пары — аналог поля Хиггса

— Фотон в сверхпроводнике приобретает массу, поэтому не проникает внутрь

— Рождение куперовской пары — аналог бозона Хиггса



# Точные формулировки для тех, кого путают аналогии

## Нужны четыре (!) поля Хиггса

### Два безмассовых, электрически заряженных поля

- Не конденсируются.
- Превращаются в третью степень свободы  $W^\pm$  бозонов, что делает тех массивными

### Два безмассовых, электрически нейтральных поля

- Первое из них не конденсируется.
- Оно превращается в третью степень свободы  $Z^0$  бозона, что делает его массивным
- Второе из них конденсируется и его возбуждение (бозон Хиггса) приобретает массу
- Оно дает массы фермионам (лептонам и кваркам)

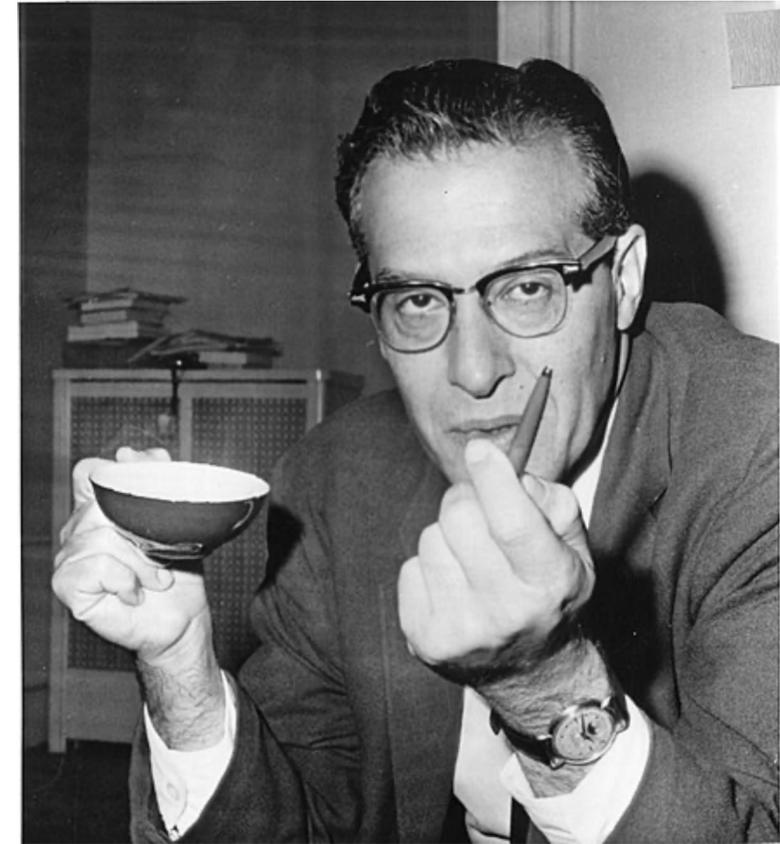
Не выпадешь  
из них?



# Ю. Швингер

## Изгнание из Гарварда

- 73 диссертации защищены под его руководством
- 4 его ученика стали Нобелевскими лауреатами
- В 1972 году, подвергшись критике со стороны коллег, Швингер покинул Гарвард ради UCLA
- Следующему хозяину его офиса в Гарварде он оставил пару старой обуви с запиской «think you can fill these»
- Его офис занял Стивен Вайнберг



# Создание электрослабой теории

# Стандартная Модель

Стивен Вайнберг, Абдус Салам (1967)

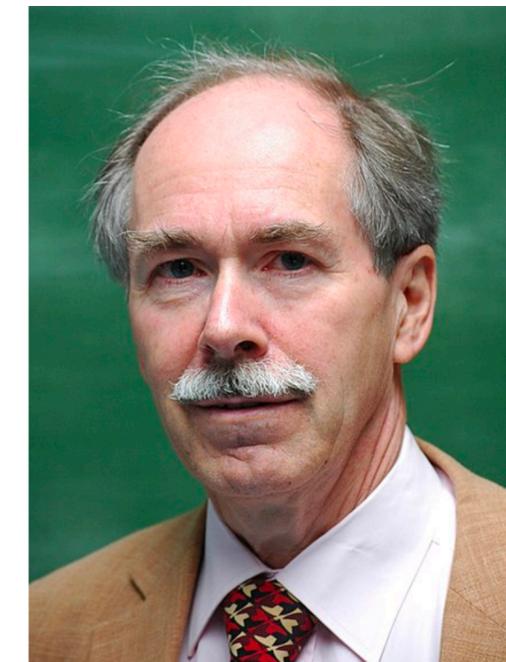


С. Вайнберг. НП 1979

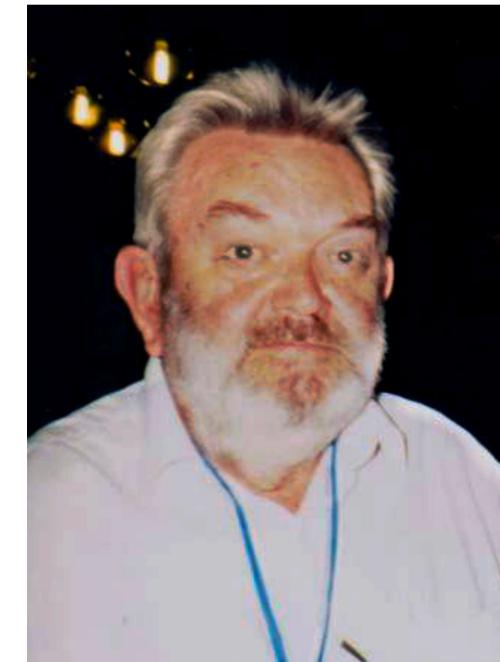


А. Салам. НП 1979

- Электромагнитное поле с массой ноль
- Два электрически заряженных поля  $W^{\pm}$  с ненулевой массой
- Электрически нейтральное поле  $Z^0$  с ненулевой массой
- 1971. Джерард 'т Хоофт и Мартинус Вельтман доказали перенормируемость Стандартной Модели
- 1999. НП 'т Хоофту и Вельтману «за выяснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий»



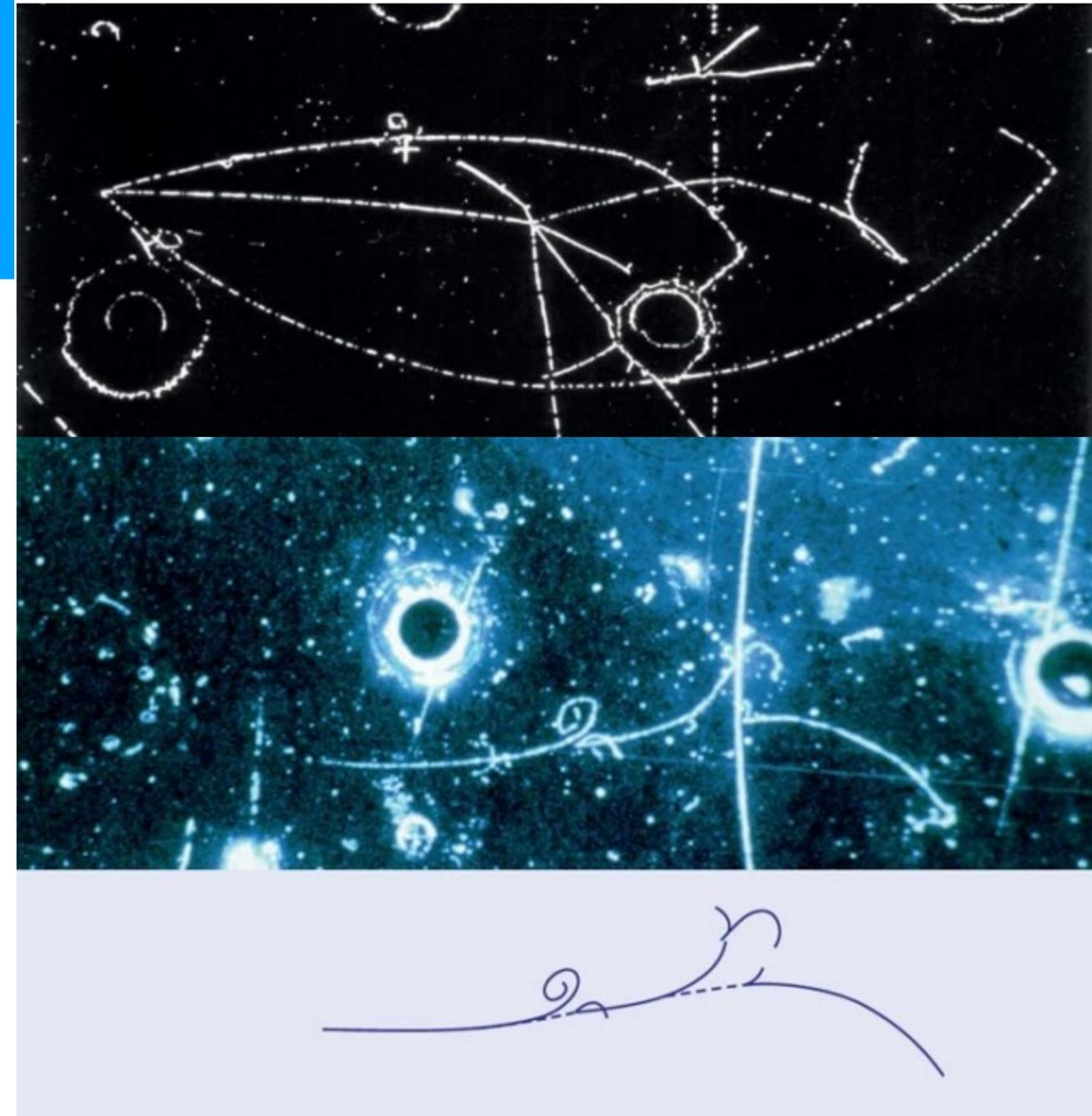
'т Хоофт



Вельтман

# 1973. Открытие нейтральных ТОКОВ

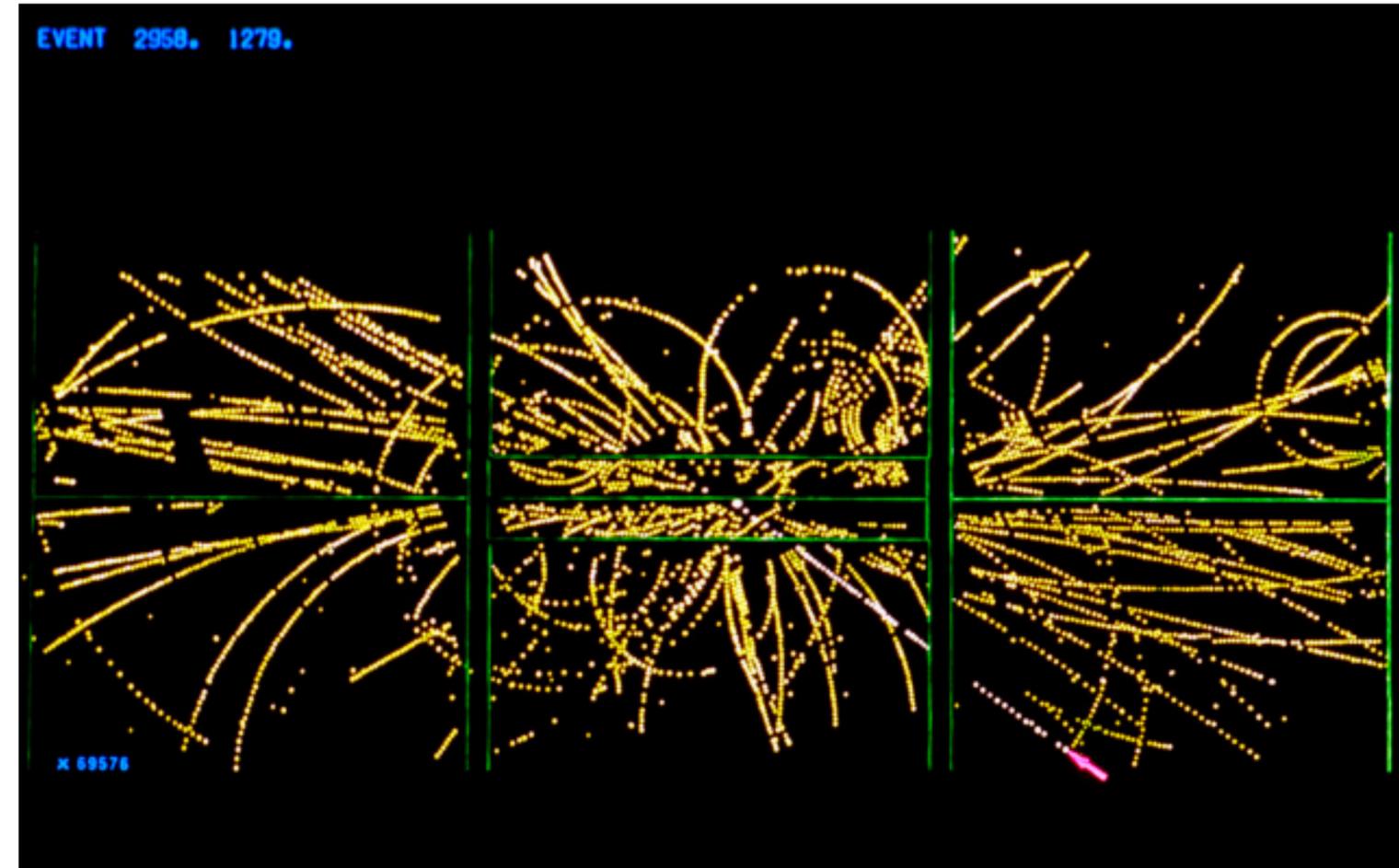
- о 19 июля 1973 коллаборация Гаргамель представила первое свидетельство существования нейтрального  $Z$  бозона



Верхний рисунок: Нейтринное взаимодействие с нейтральным током, приводящее к появлению адронов. Взаимодействие нейтрино слева производит три вторичные частицы, которые идентифицируются как адроны. Заряженного лептона не наблюдается. Нижний рисунок: первое событие лептонного нейтрального тока, обнаруженное пузырьковой камерой Гаргамель. Антинейтрино, приходящее слева, отбрасывает электрон вперед, создавая характерный ливень электрон-позитронных пар. Источник рисунков – википедия.

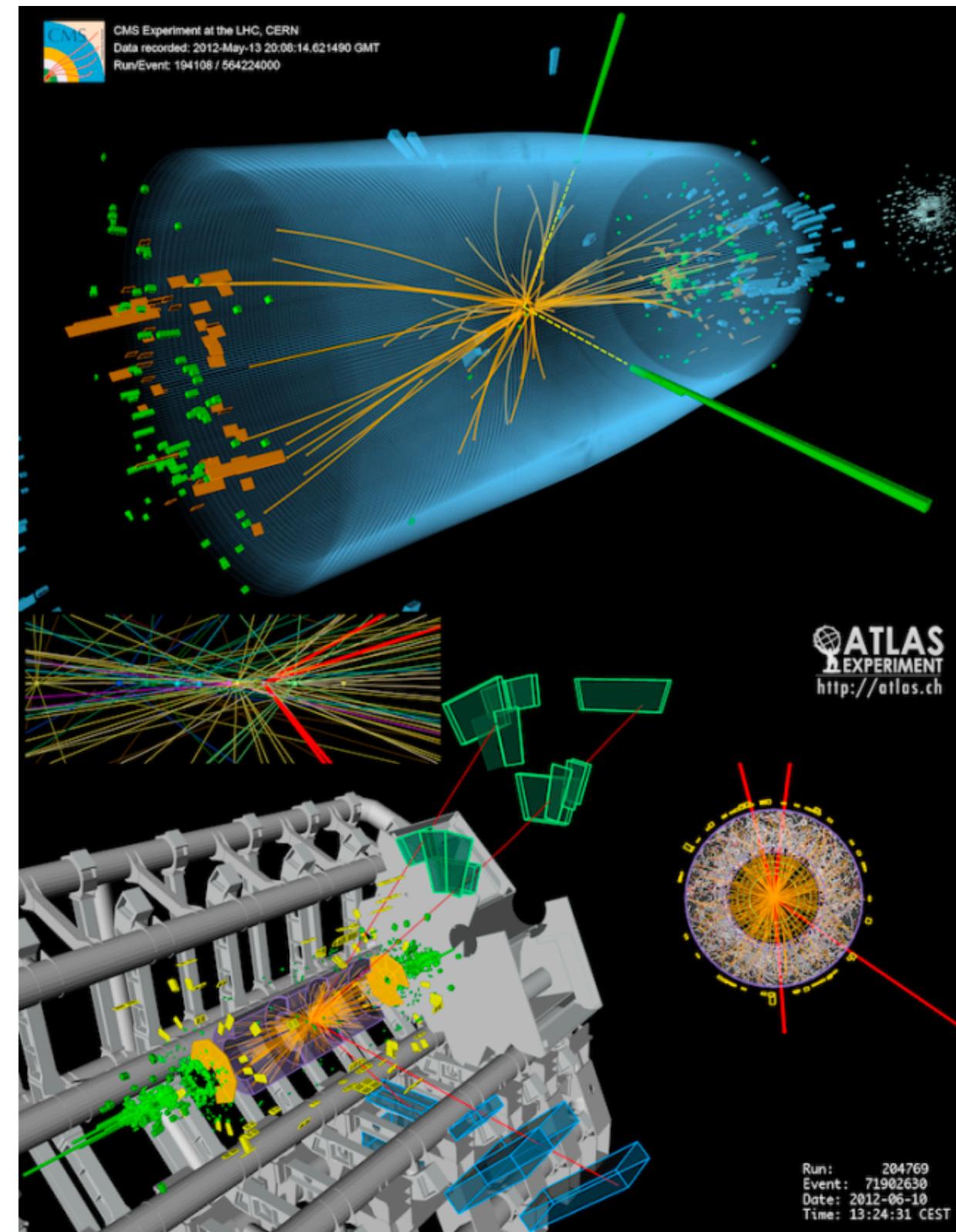
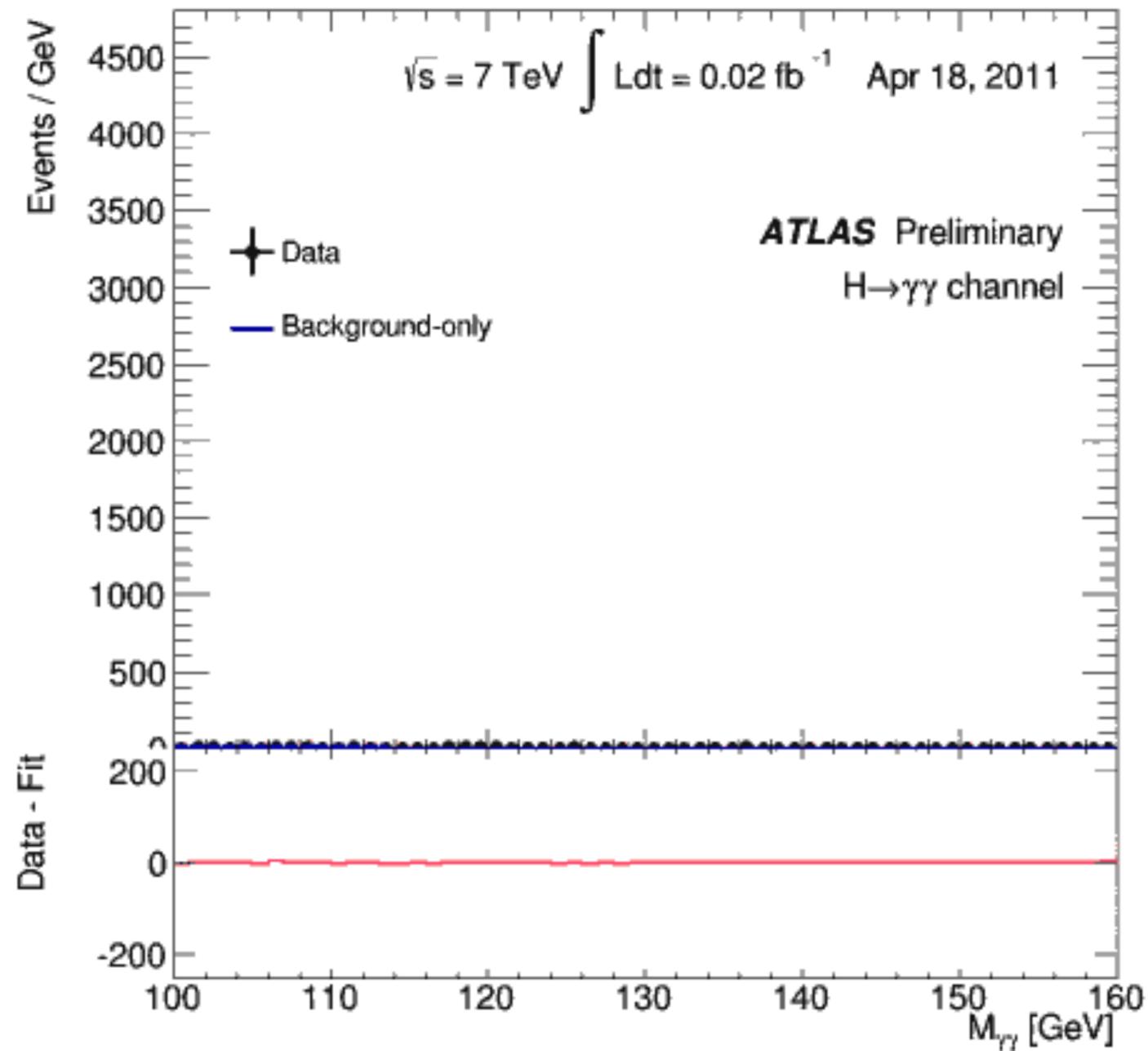
# 1983. Открытие $W^{\pm}$ , $Z$

- 1976. Карло Руббиа, Питер МакИнтайр, Давид Кляйн предложили преобразовать ускоритель SPS (Супер Протонный Синхротрон) в коллайдер протон-антипротон
- Саймон ван дер Меер придумал гениальную технологию «стохастического охлаждения», позволившую уменьшить размеры пучков частиц
- 1981. Детекторы UA1, UA2 начали охоту за переносчиками слабого взаимодействия
- 1984. НП Руббиа и Ван дер Мееру



Первое прямое наблюдение  $W$  бозона в UA1 (1982). ЦЕРН

# 2012. Открытие бозона Хиггса

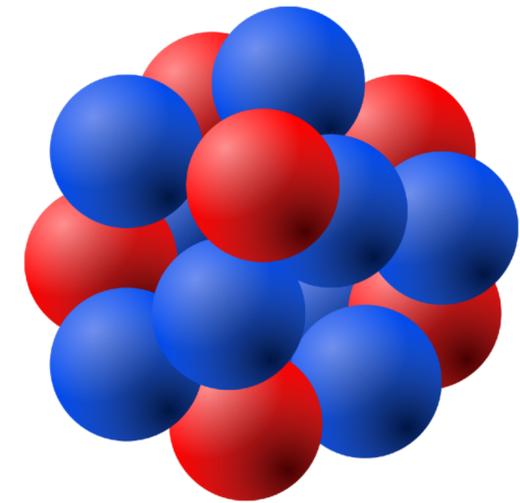


Рождение и распад бозона Хиггса в столкновениях протонов на БАК. ЦЕРН

# Квантовая хромодинамика — теория сильных взаимодействий

# Атомное ядро: протоны и нейтроны

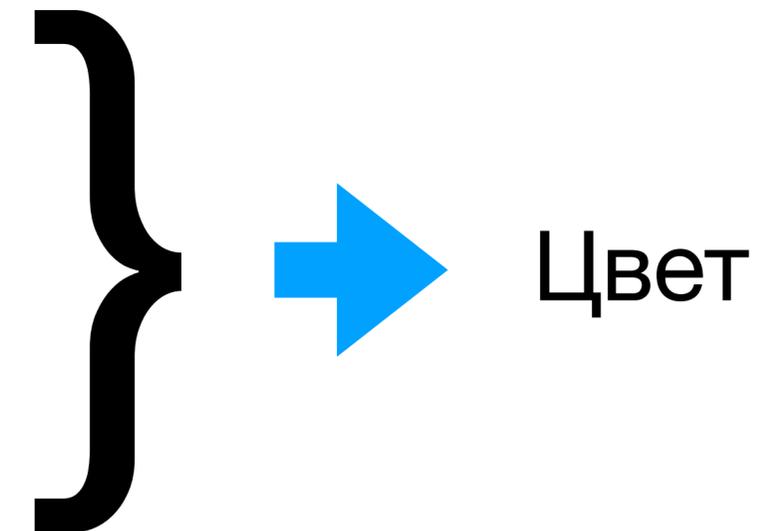
Протоны и нейтроны состоят из кварков



- В 1950х открыто огромное число сильно-взаимодействующих частиц — адронов
- 1961. Гелл-ман и Нееман отсортировали все адроны по группам: «восьмеричный путь»
- 1963. Гелл-ман и Цвейг ввели «кварки» как строительные кирпичики. Дробный заряд!

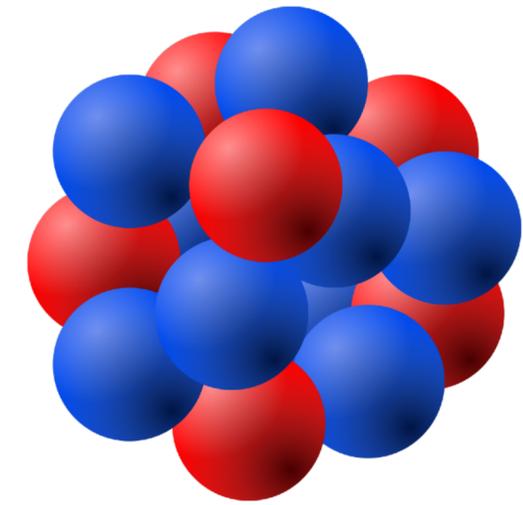
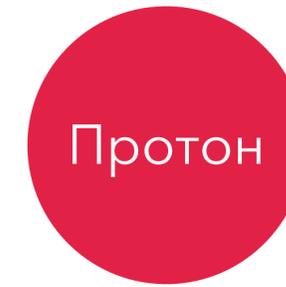
— 1964-1965. Гринберг, Хан и Намбу предположили, что кварки должны переносить еще одно квантовое число:  $\Delta^{++} = |uuu\rangle$ . Они предположили существование глюонов

— 1965. Борис Струминский (аспирант Н.Н. Боголюбова) заметил в сноске препринта ОИЯИ, что кварки должны переносить новое квантовое число:  $\Omega^{-1} = |sss\rangle$

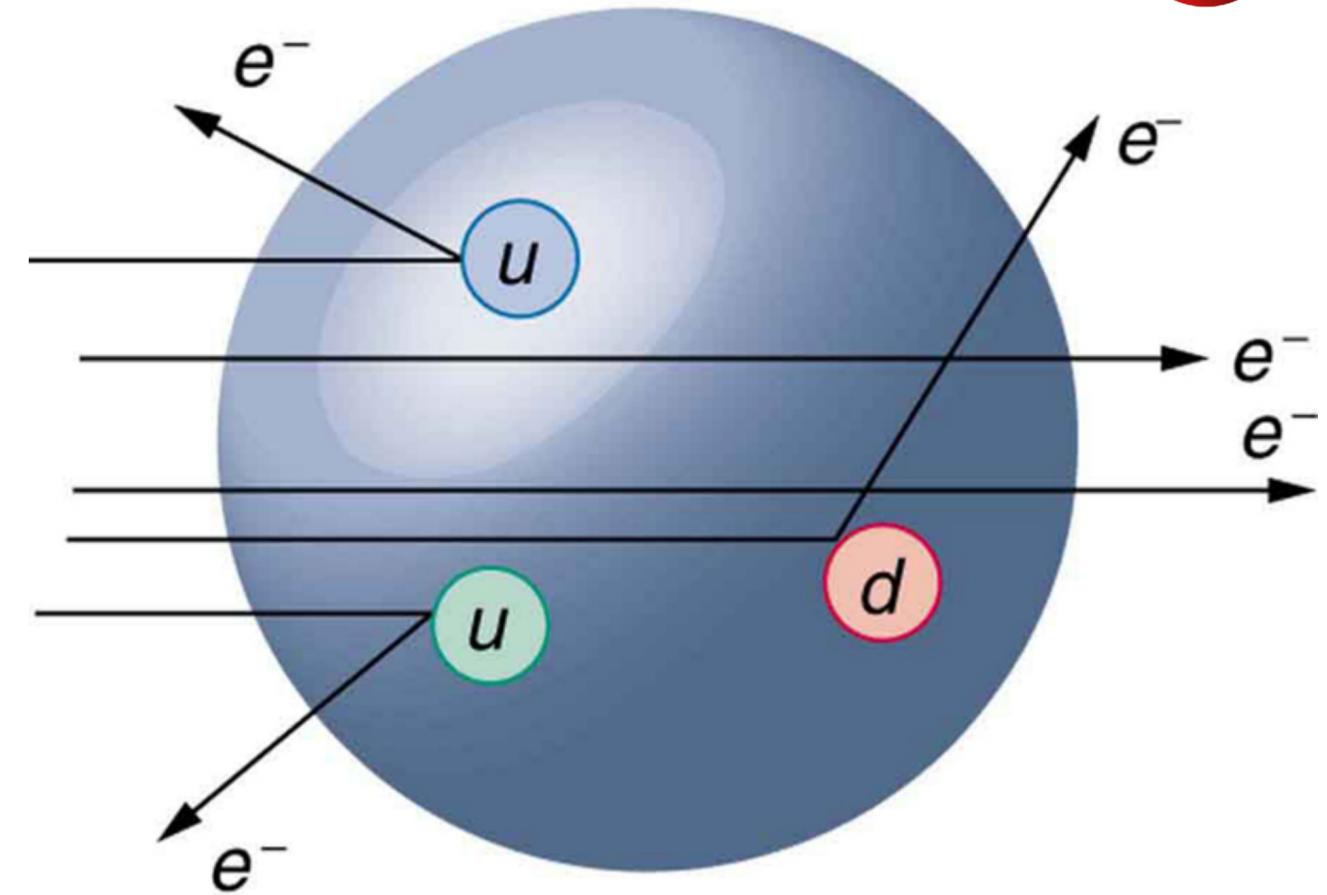


# Атомное ядро: протоны и нейтроны

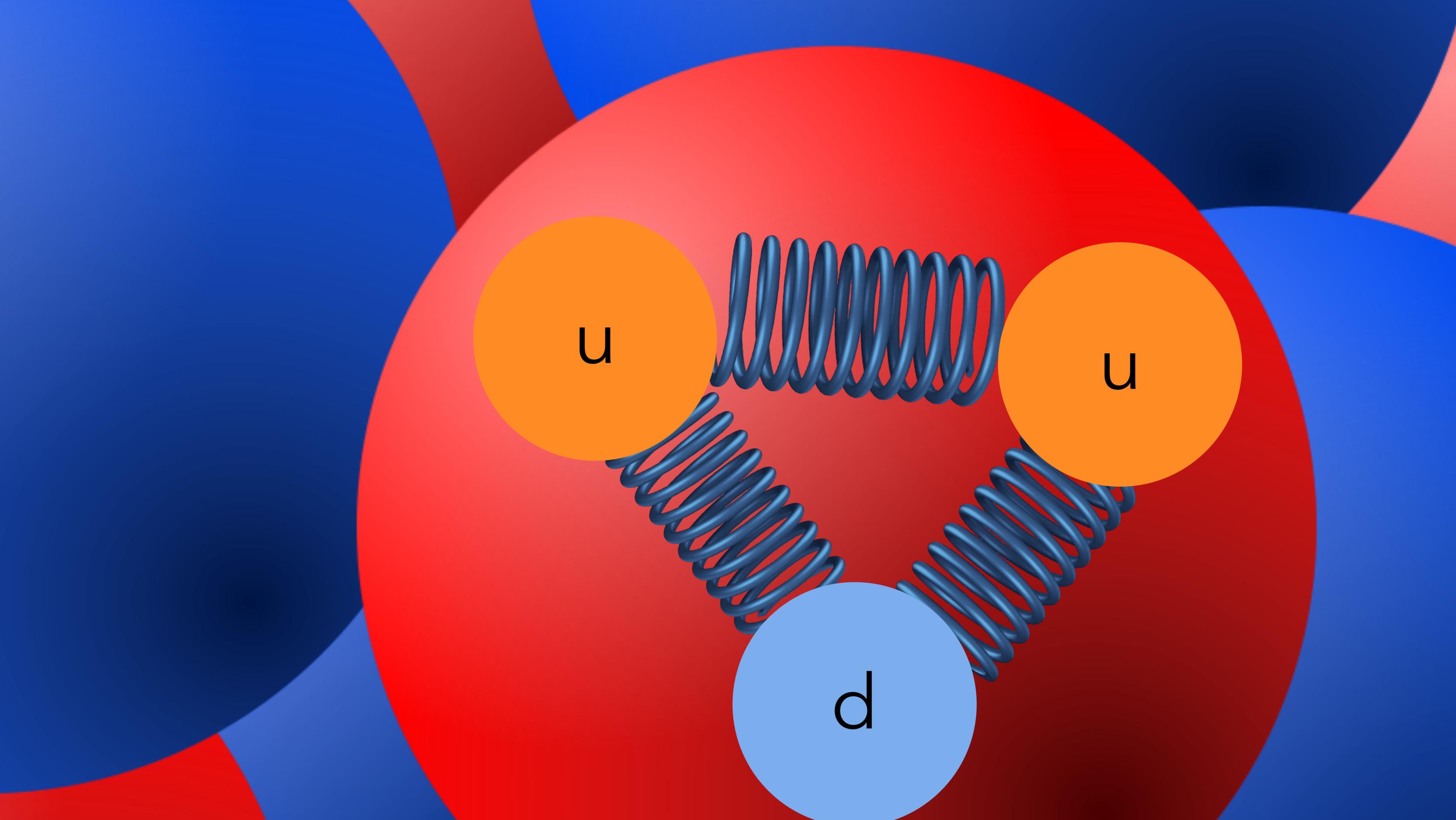
Протоны и нейтроны состоят из кварков



1968: SLAC (США), электроны 20 ГэВ →  
точечные частицы внутри протона



Proton

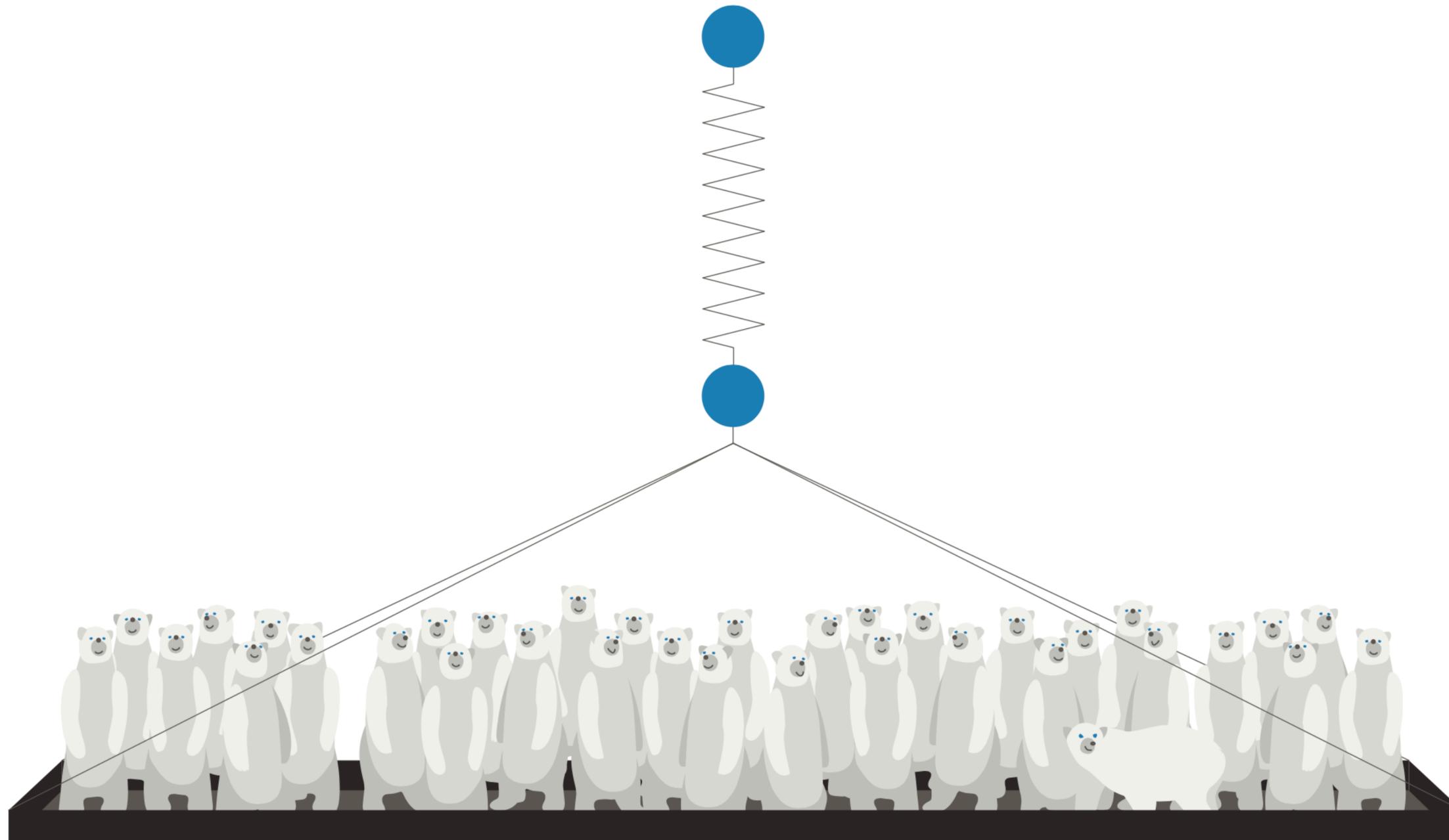


u

u

d

# Сила притяжения двух кварков равна весу сорока полярных медведей



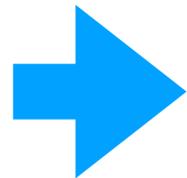
# Кварки и глюоны

— 1973. Фрич, Леутвиллер и Гелл-ман, основываясь на идее локальной симметрии, разработали КХД

— Конфаймент

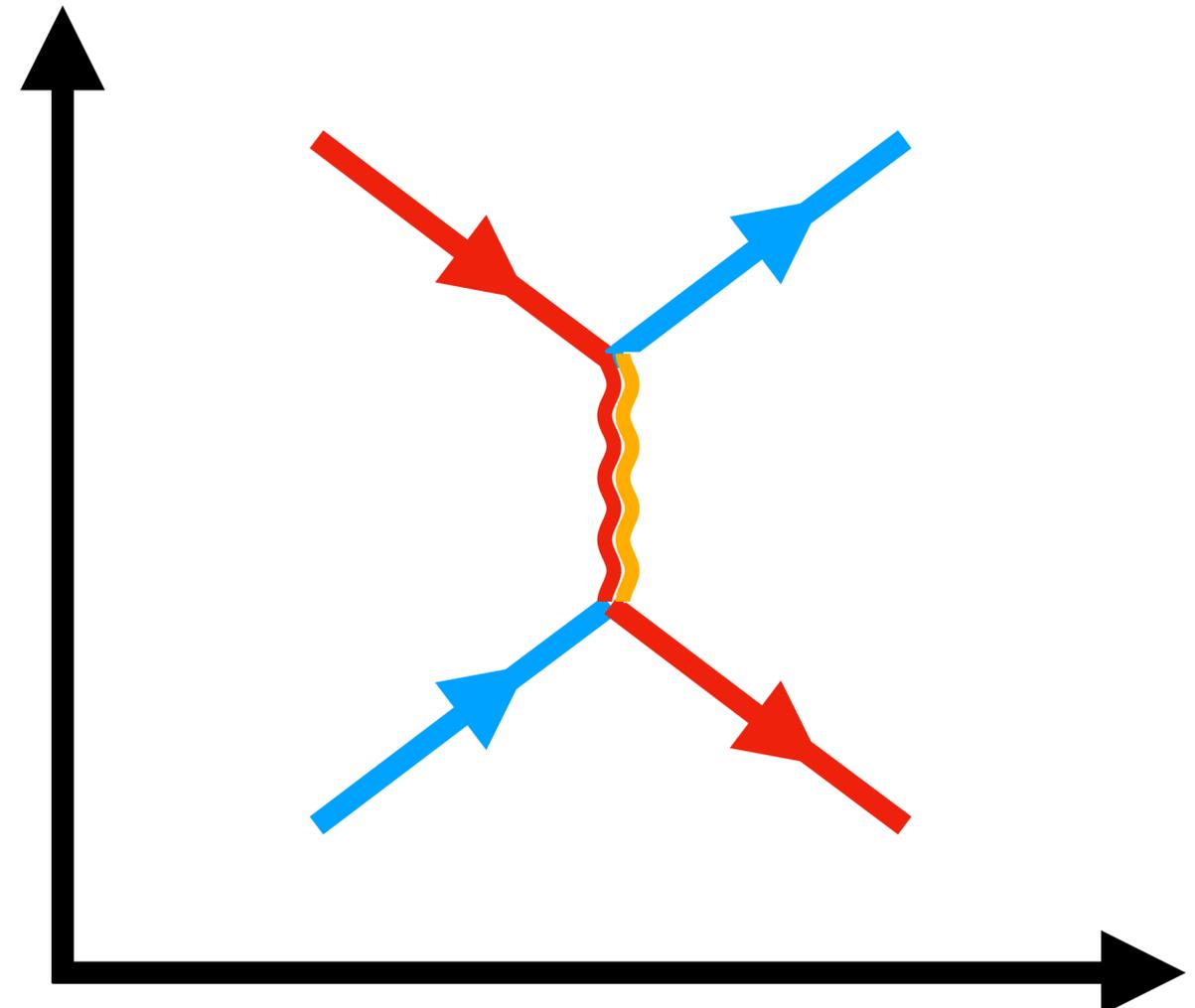
— Асимптотическая свобода

— Киральный конденсат



Свойства КХД

Расстояние

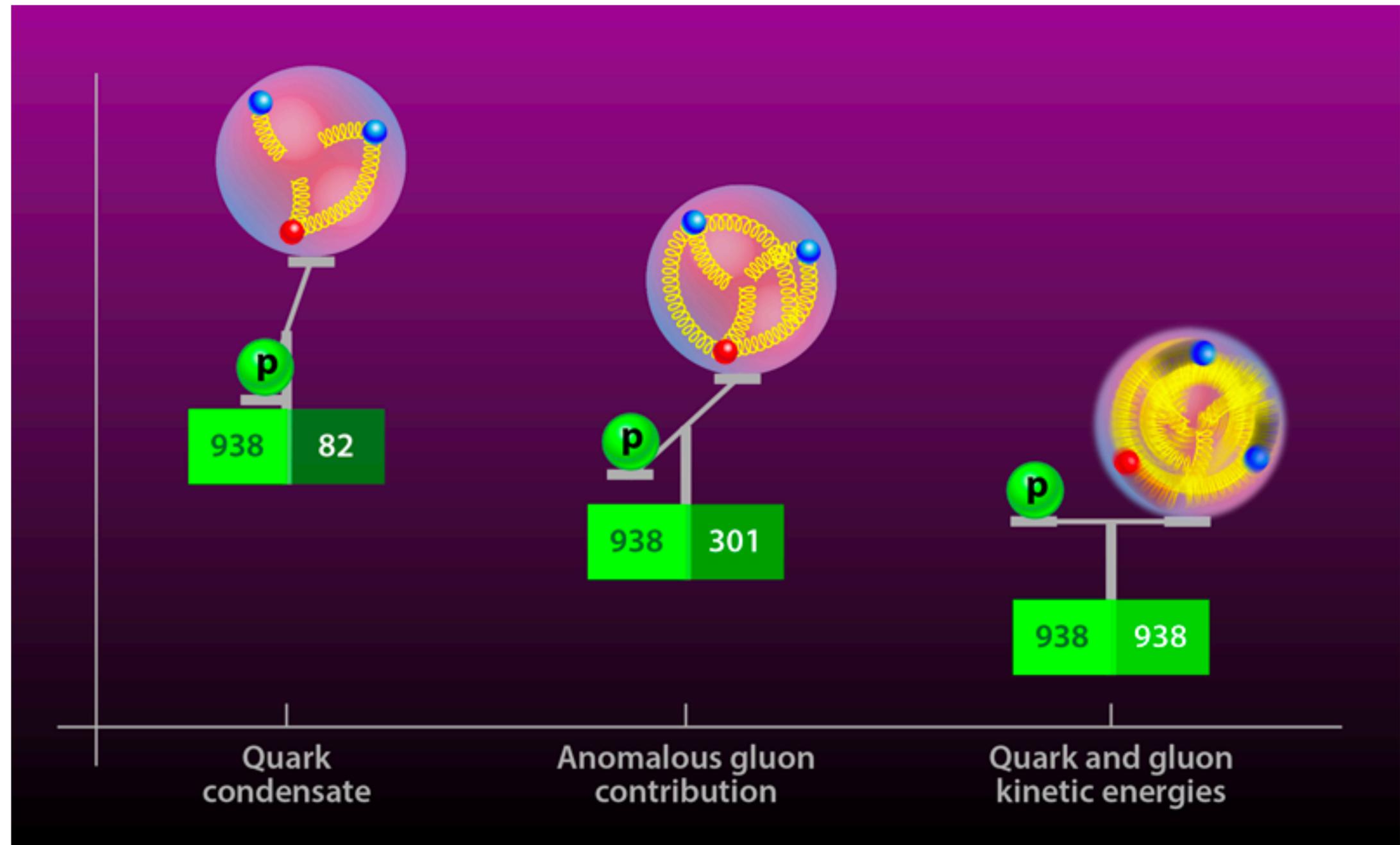


Время

# Что определяет массу протона?

## КХД на решетке

- 9% кварковый конденсат
- 32% кинетическая энергия кварков
- 37% энергия глюонного поля
- 23% аномальный глюонный вклад

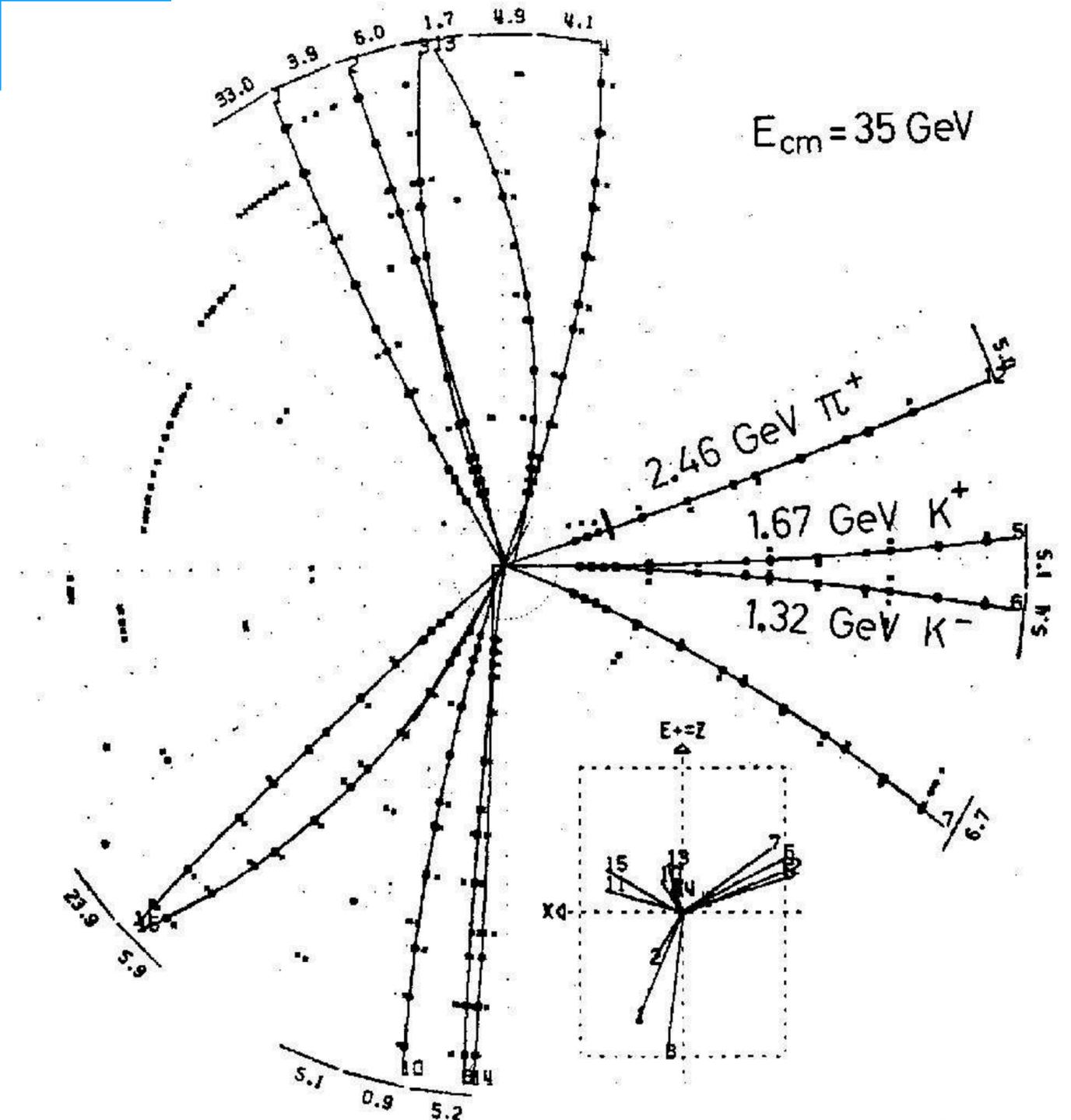


# 1974. Открытие $J/\psi$

- 1974. Физики из Брукхэвенской Национальной лаборатории и Стэнфордского университета объявили об открытии новой частицы  $J/\psi$ , состоящей из очарованных кварков  $c\bar{c}$
- Использовалась гелиевая пузырьковая камера
- Открытие имело огромное значение, утвердив кварковую модель и КХД

# 1979. Открытие глюонов

- о 1979. Глюон был открыт в DESY на ускорителе PETRA



3-струйное событие в TASSO@PETRA

# Физическая картина сегодня

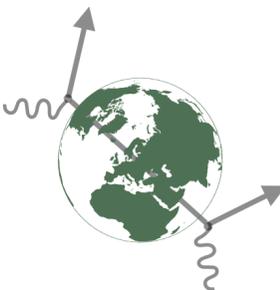
## ○ Стандартная модель. Успехи

- Электрослабая теория + КХД
- Материя: кварки и лептоны
- Переносчики взаимодействия: фотоны,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , глюоны
- Поле Хиггса и спонтанное нарушение симметрии
- Описывает все данные на Земле

## ○ Стандартная модель. Трудности

- Электрослабое и сильное взаимодействия не объединены
- Не включает квантовую гравитацию
- Не описывает барионную асимметрию, темные материю и энергию

# Лекция 4. «За горизонты Стандартной модели: Пути к Новой Физике»



# Дополнительные материалы

# КХД на решетке

## Вычисление масс адронов

