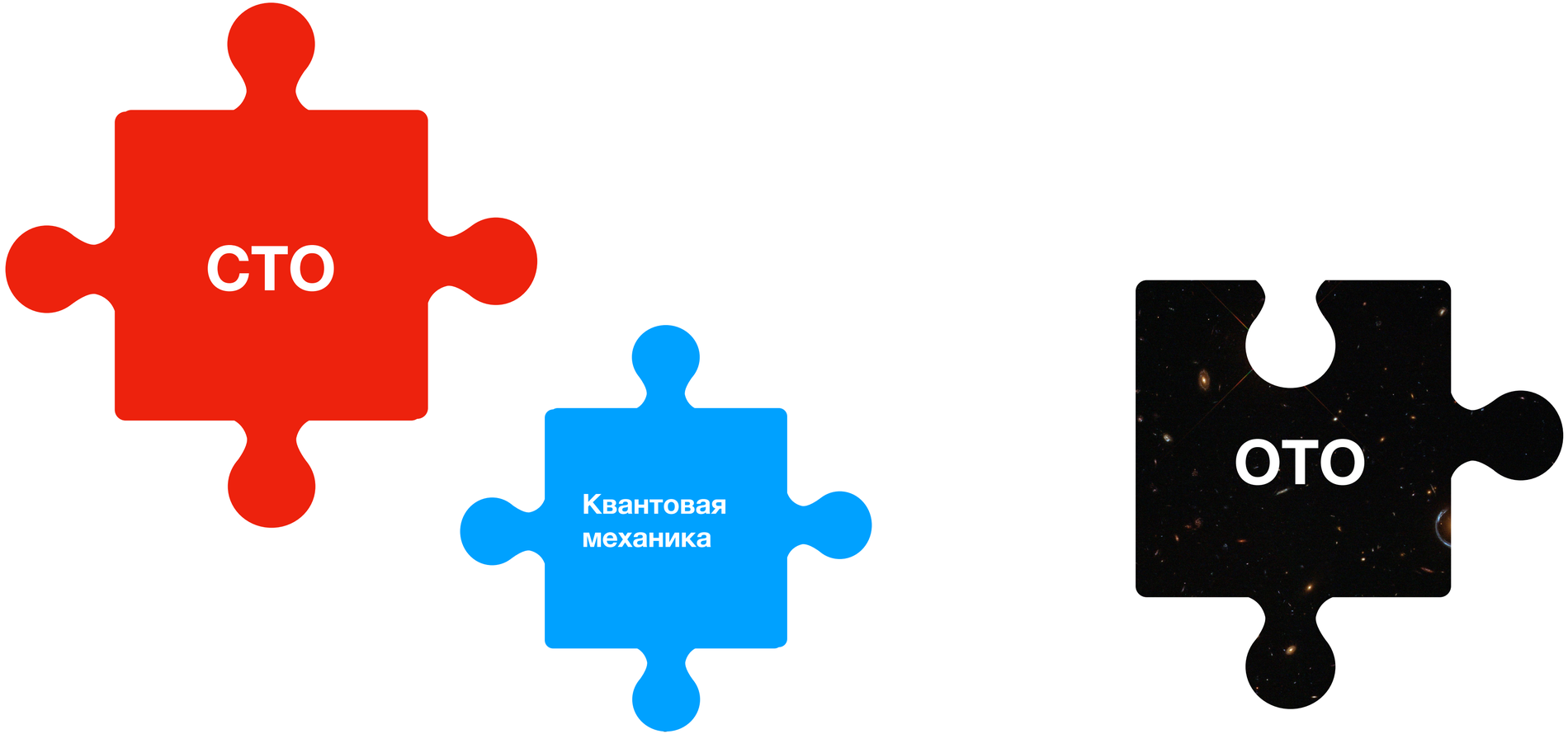
Joint Institute
for Nuclear Research

От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

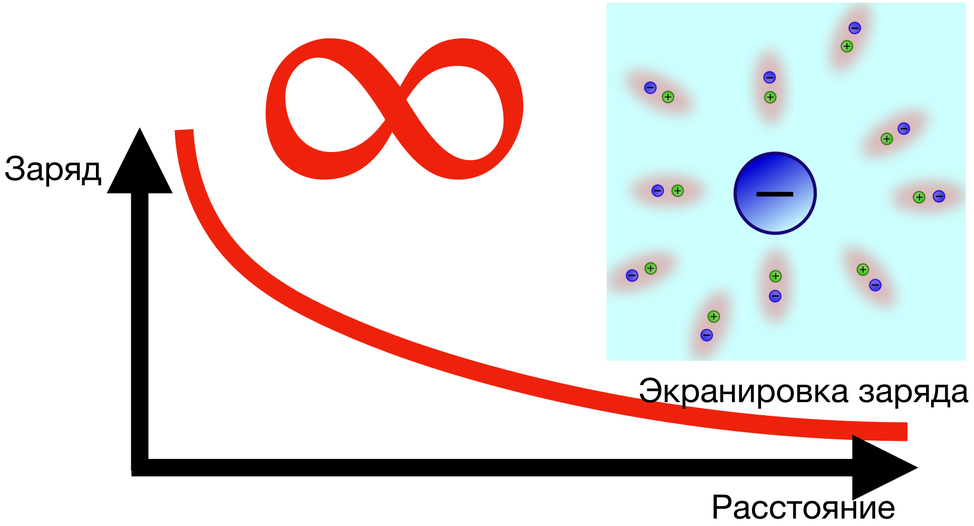
Дмитрий В.Наумов

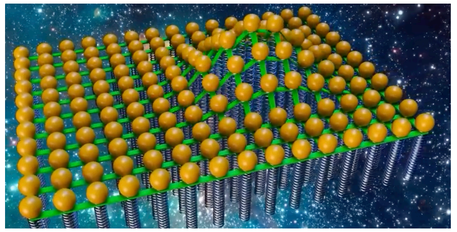
В предыдущих сериях…

Физическая картина к 1930



Физическая картина к 1960





Joint Institute
for Nuclear Research

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

Дмитрий В.Наумов

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

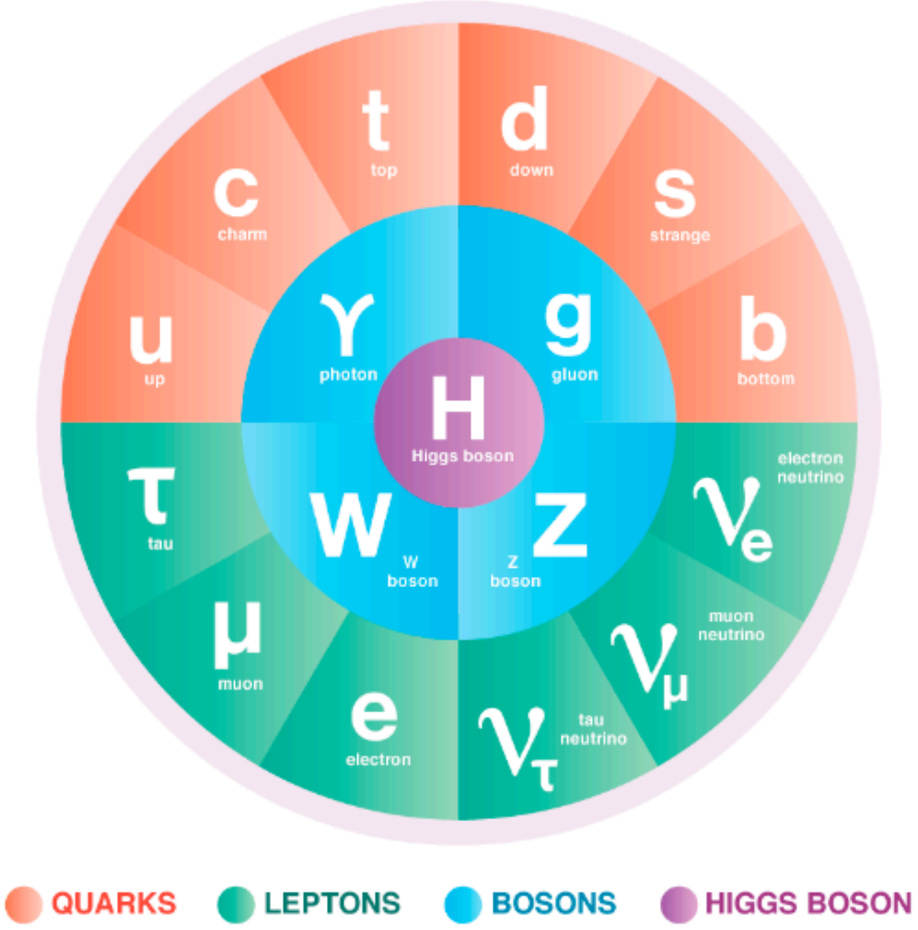
  — ***спонтанное нарушении симметрий***: делает массивными безмассовые поля

  — ***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

$$\mathscr{L} = \sum_k \left(\overline{L}_{k,L} i\hat{D} L_{k,L} + \overline{Q}_{k,L} i\hat{D} Q_{k,L} + \sum_{\psi=\ell,\nu,u,d} \overline{\psi}_{k,R} i\hat{D} \psi_{k,R} \right) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G^i_{\mu\nu} G^{i,\mu\nu}$$

$$+ |D_\mu \varphi|^2 - \frac{\lambda^2}{2} \left(|\varphi|^2 - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

$$- \sum_{k,j} \left(\lambda^\ell_{kj} \overline{L}_{k,L} \ell_{j,R} \varphi + \lambda^\nu_{kj} \overline{L}_{k,L} \nu_{j,R} \varphi_c + \lambda^d_{kj} \overline{Q}_{k,L} d_{j,R} \varphi + \lambda^u_{kj} \overline{Q}_{k,L} u_{j,R} \varphi_c + \text{ э.с.} \right),$$

Код Вселенной

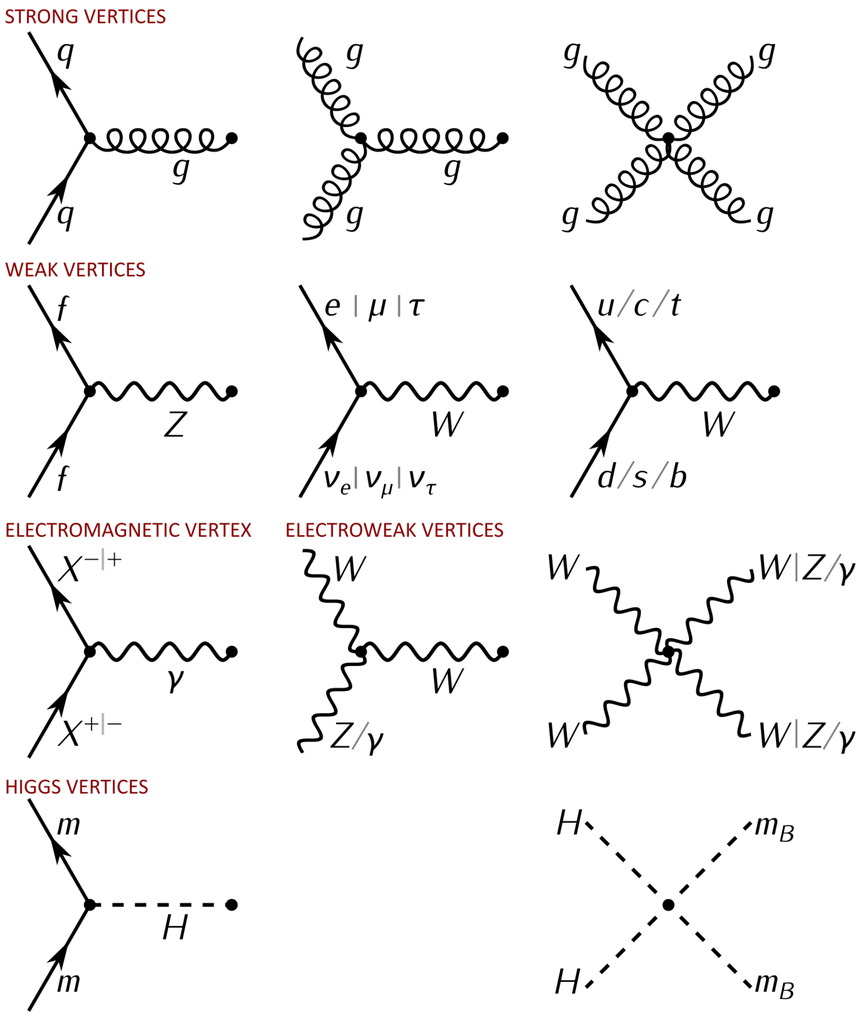
В уравнениях

Код Вселенной

В уравнениях

Код Вселенной

В уравнениях-картинках



1 $-\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu +$
$\frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$

2 $M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$
$\frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu\phi^+\partial_\mu\phi^- - M^2\phi^+\phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu\phi^0\partial_\mu\phi^0 - \frac{1}{2c_w^2}M\phi^0\phi^0 - \beta_h[\frac{2M^2}{g^2} +$
$\frac{2M}{g}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu(W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu(W^+_\mu\partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu\partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu(W^+_\nu\partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\nu\partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu(W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu(W^+_\mu\partial_\nu W^-_\mu -$
$W^-_\mu\partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu(W^+_\nu\partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu\partial_\nu W^+_\mu)] - \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu +$
$\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2(Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) +$
$g^2 s_w^2(A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w[A_\mu Z^0_\nu(W^+_\mu W^-_\nu -$
$W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] -$
$\frac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] -$
$gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) -$
$W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)] + \frac{1}{2}g[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ -$
$\phi^+\partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) +$
$igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) +$
$igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] -$
$\frac{1}{4}g^2\frac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-] - \frac{1}{2}g^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- +$
$W^-_\mu\phi^+) - \frac{1}{2}ig^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- +$
$W^-_\mu\phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- -$
$g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^-$

3 $- \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m_e^\lambda)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m_u^\lambda)u^\lambda_j -$
$\bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m_d^\lambda)d^\lambda_j + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)] +$
$\frac{ig}{4c_w}Z^0_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(\frac{4}{3}s_w^2 -$
$1 - \gamma^5)u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)e^\lambda) +$
$(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa}\gamma^\mu(1 +$
$\gamma^5)u^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}\frac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)] -$

4 $\frac{g}{2}\frac{m_e^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m_d^\kappa(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) +$
$m_u^\lambda(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m_d^\lambda(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m_u^\kappa(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-$
$\gamma^5)u^\kappa_j] - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) -$
$\frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) +$

5 $\bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 -$
$\frac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- -$
$\partial_\mu\bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y -$
$\partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu\bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ -$
$\partial_\mu\bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0 X^0 H] +$
$\frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM[\bar{X}^+ X^0\phi^+ - \bar{X}^- X^0\phi^-] + \frac{1}{2c_w}igM[\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-] +$
$igMs_w[\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+\phi^0 - \bar{X}^- X^-\phi^0]$

Если вам все еще не все понятно…

попробуем обойтись без математики

Поиск единства явлений

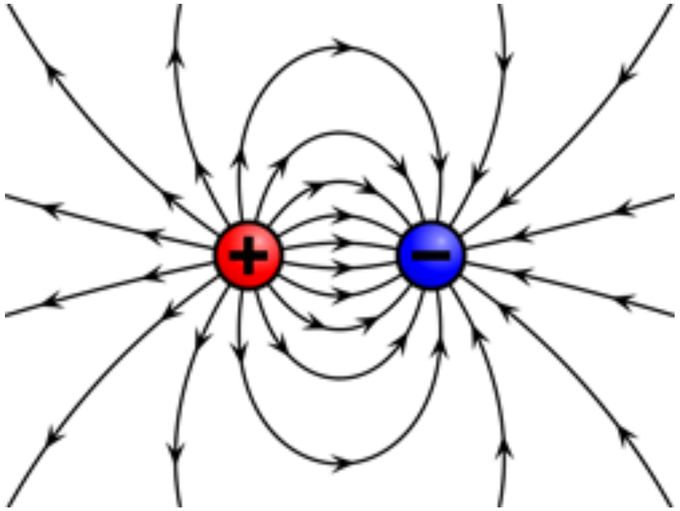
От любопытства к науке

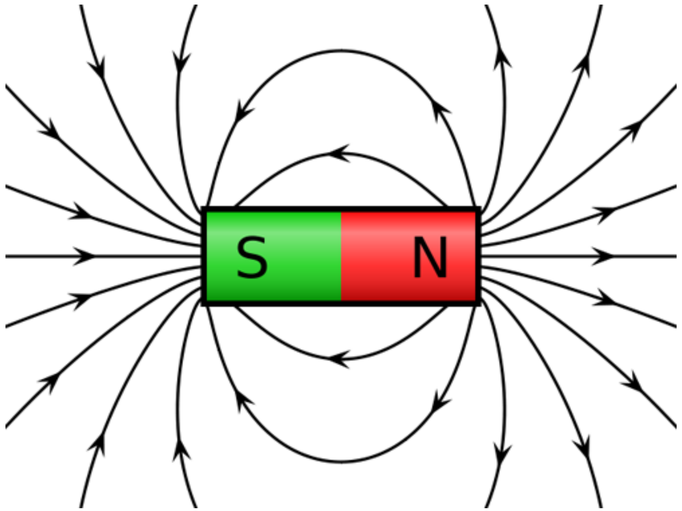
Явления, изменившие наше понимание

- 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

Электромагнетизм

Джеймс Максвелл

Электрическое поле

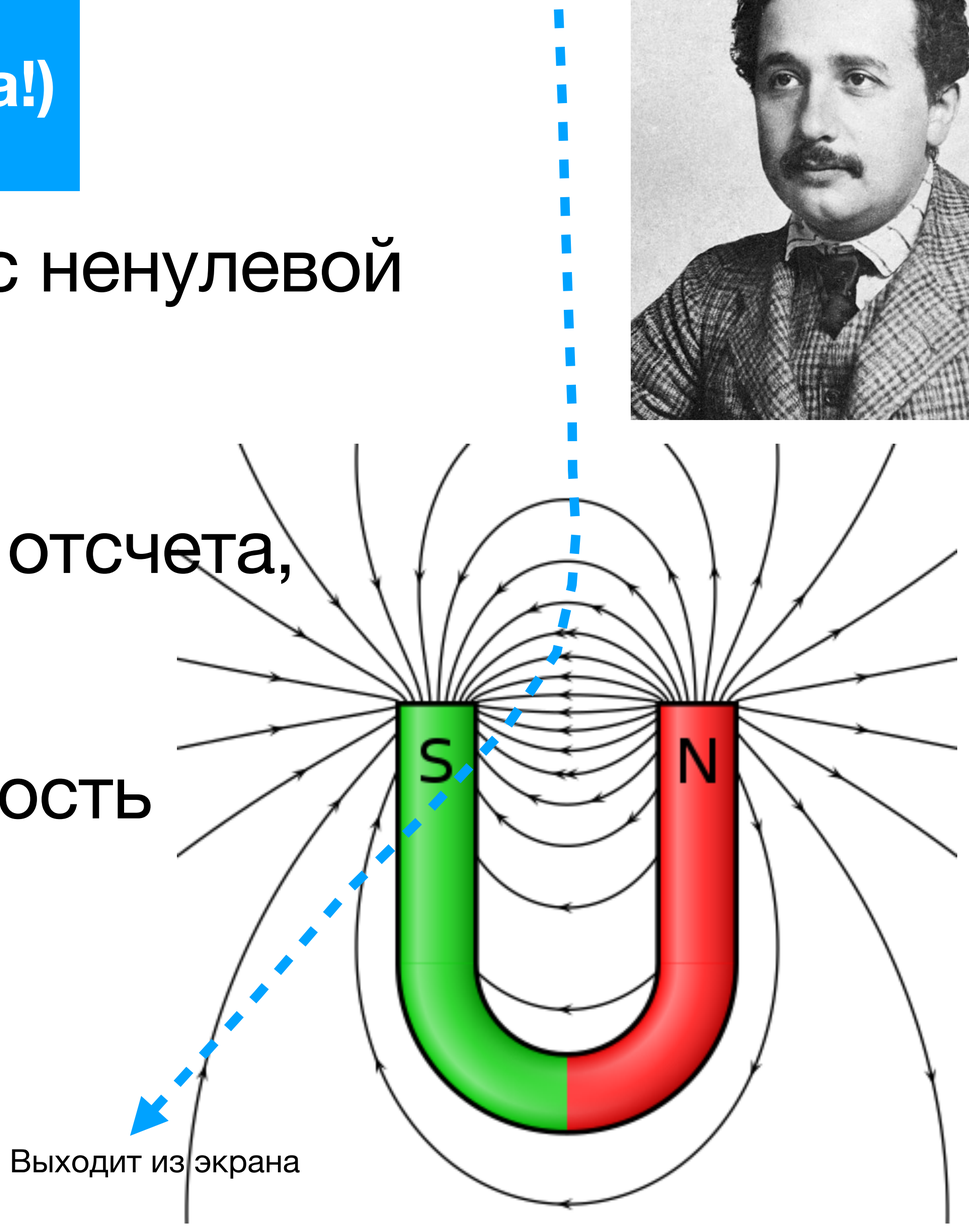
Электромагнитное поле

Магнитное поле

Парадокс Эйнштейна

Мысленный эксперимент (не повторяйте дома!)

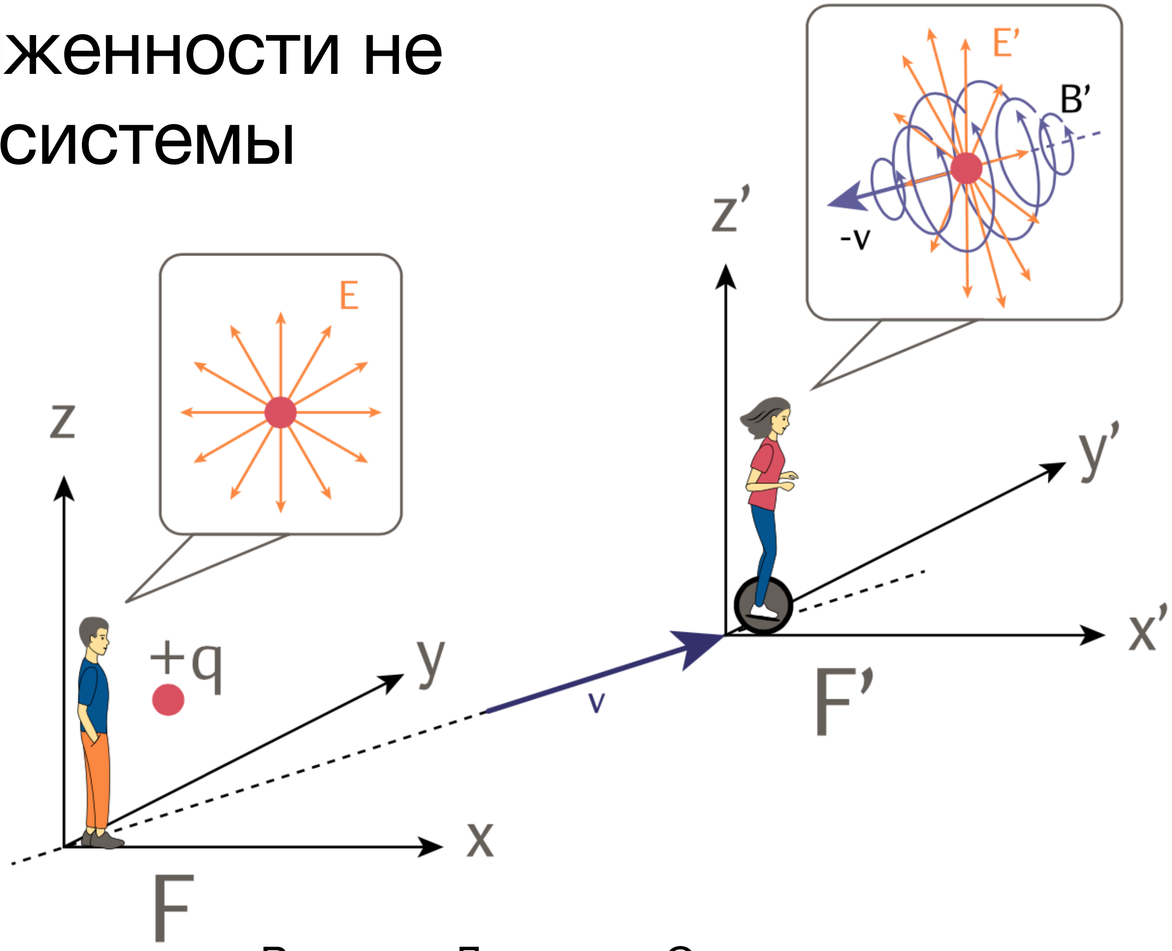
- На электрически заряженную частицу с ненулевой скоростью **v** действует сила Лоренца
- Какая сила на нее действует в системе отсчета, движущейся с той же скоростью?
- Электрическая и магнитная напряженность не фундаментальны. Они зависят от системы отсчета!



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

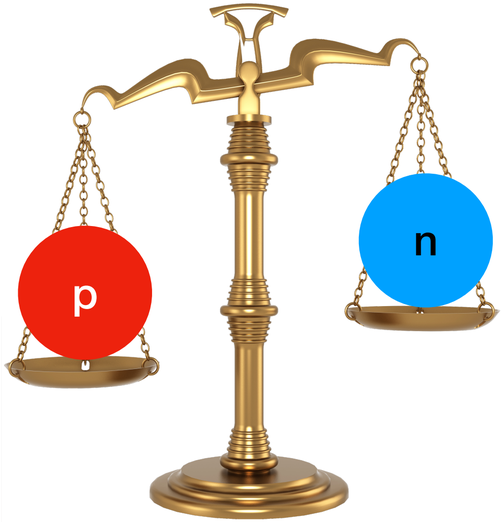
Важность слабых взаимодействий

- «Заводят» производство энергии в Солнце

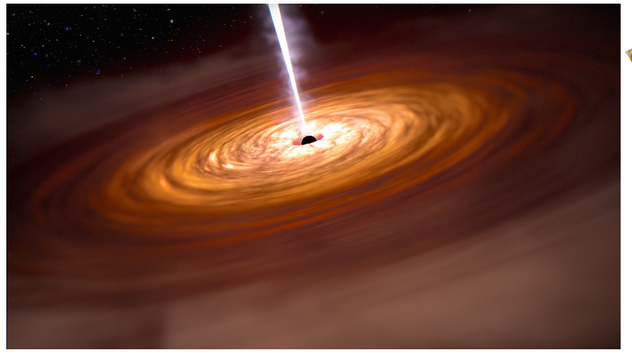
$$p + p \rightarrow {}^{2}\mathrm{D} + e^{+} + \nu_e$$

- Синтез химических элементов в звездах

- Гео-термальная энергия



- Нуклеосинтез в ранней Вселенной



- Нейтринная астрофизика

Электрослабая теория:

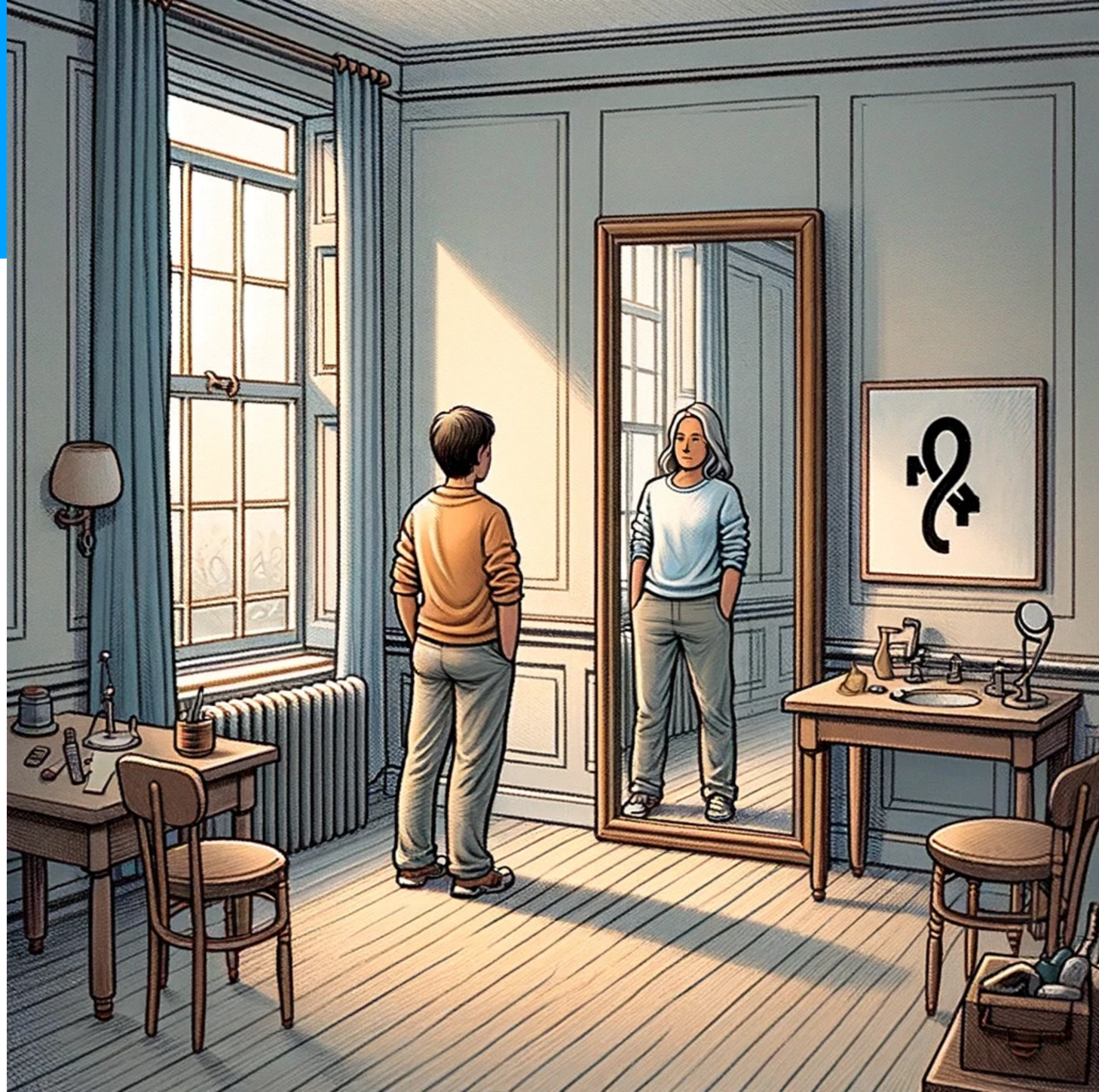
— объединение электромагнитных и слабых взаимодействий

Как это возможно?

Они такие разные…

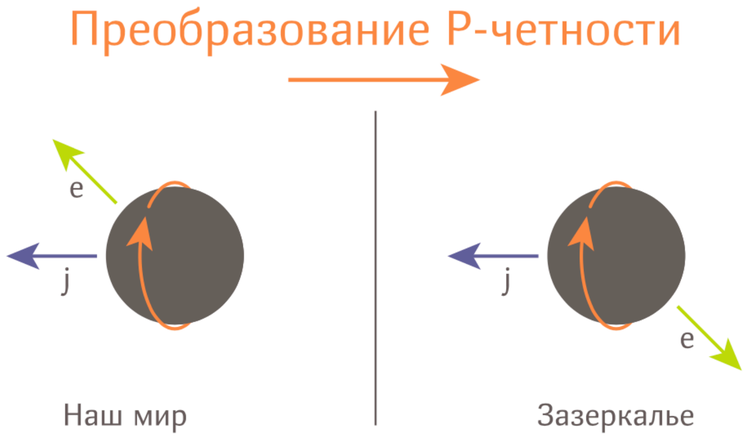
Слабые взаимодействия

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

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

3. Коротко-действующие

$$r \lesssim 1/1000\ r_p$$

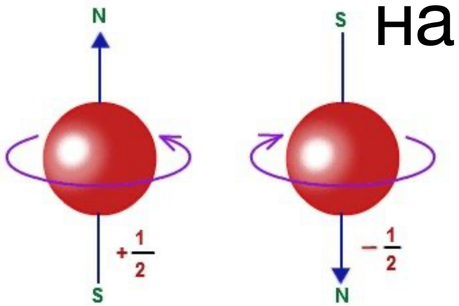
4. Умеют менять тип частиц

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

Что можно сказать про переносчик слабого взаимодействия?

1. В нашем мире и в зазеркалье разные

Взаимодействие зависит от направления спина



2. Слабее электромагнитных примерно в 100 миллионов раз

3. Коротко-действующие

Массивный переносчик

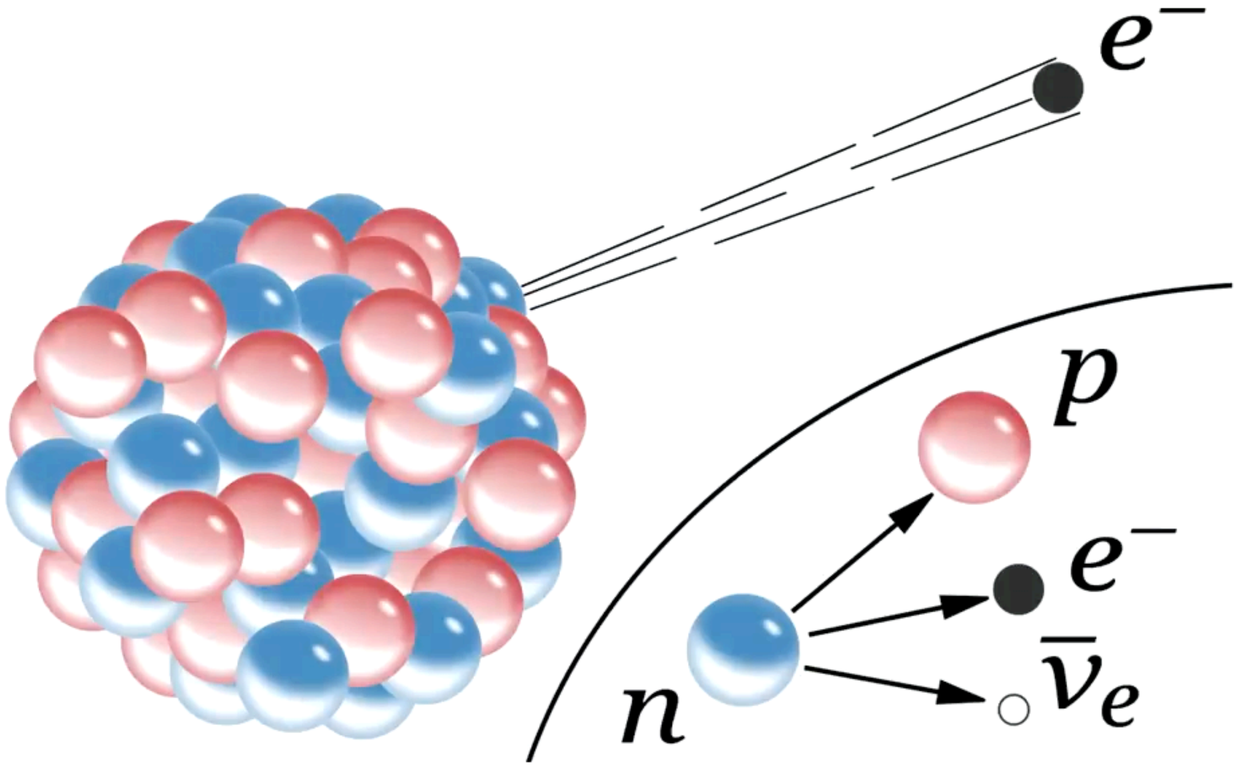
$$M \simeq 100\ m_p$$

4. Умеют менять тип частиц

Электрически заряженный переносчик

Распад нейтрона в КТП

Качественная иллюстрация



Адаптировано из Arvin Ash

Как построить теорию взаимодействий, для которых нет классического аналога?

Две противоречащих друг другу идеи

СИММЕТРИИ

СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИЙ

СИММЕТРИИ

Симметрии — источник законов сохранения

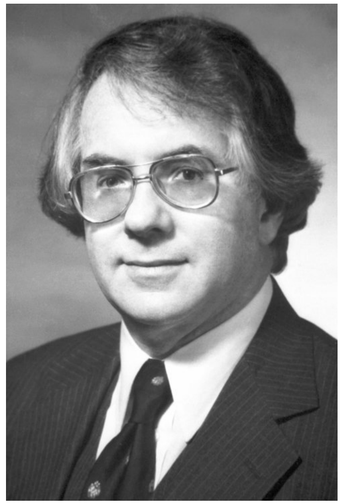
Адаптировано из ScienceClick

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

Абдус Салам и Джордж Ворд (1961)

Первый шаг к объединению

Шелдон Глэшоу (1961)



Ш. Глэшоу. НП 1979

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

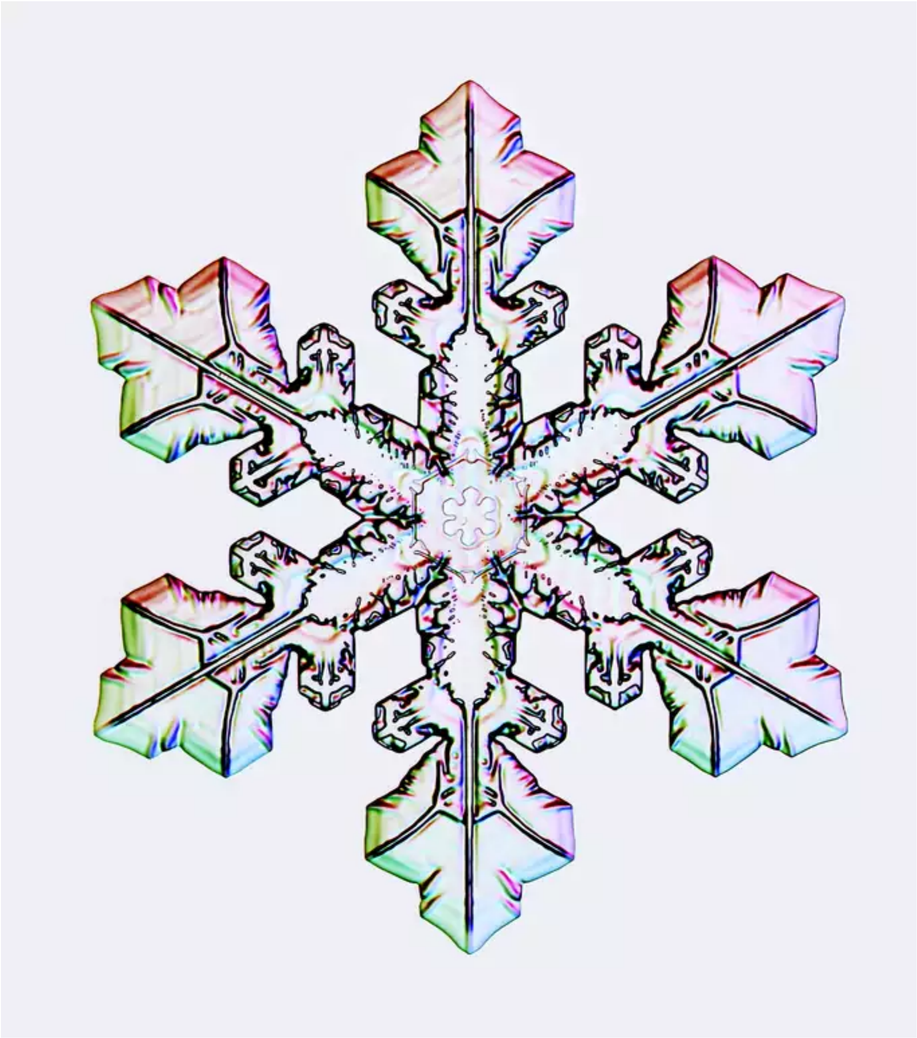
- **Проблемы:**
  - Массивные поля приводили к неустранимым бесконечностям …
  - Массивные поля явно нарушали симметрию!

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

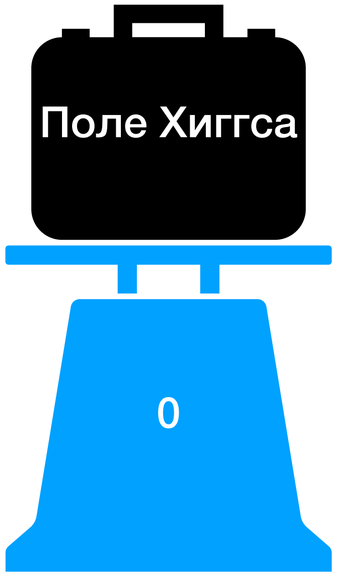
Поле Хиггса заполняет Вселенную.

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

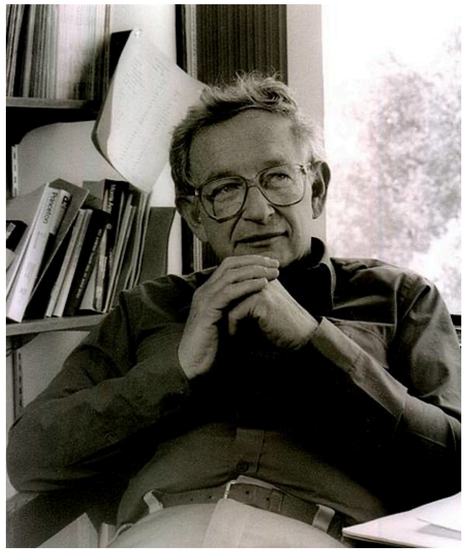
— 1964. Г.С. Гуральник, К. Хаген и Т. Киббл

— 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

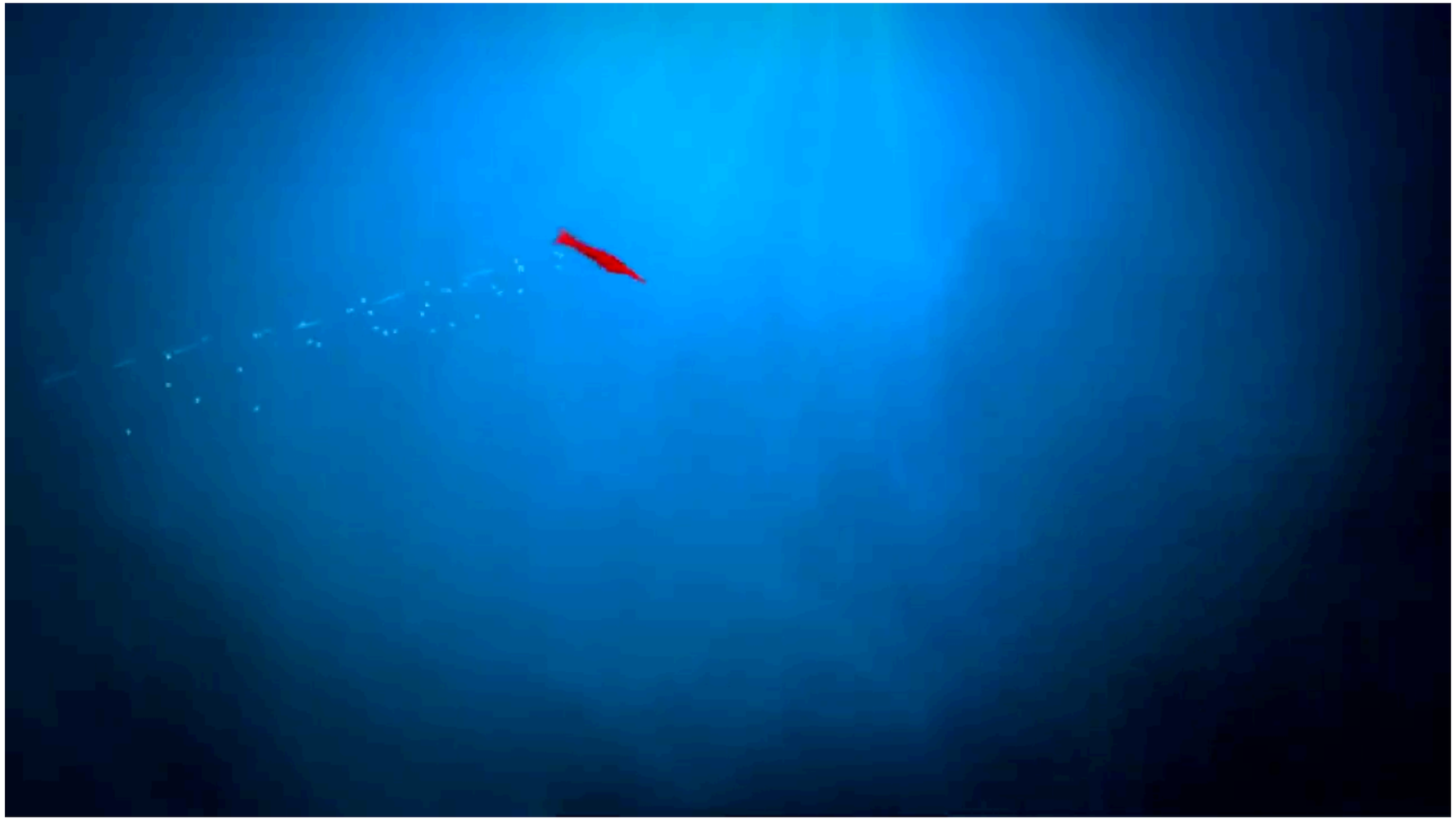
Для биологов

Путь мухи

Анимация Марины Мищенко

Для любителей плавания

Вода — как пример поля Хиггса



Адаптировано из Arvin Ash

Для любителей вечеринок

Сквозь толпу: от Дона Линкольна и TED

Адаптировано из D. Lincoln

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

Адаптировано из YouTube

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

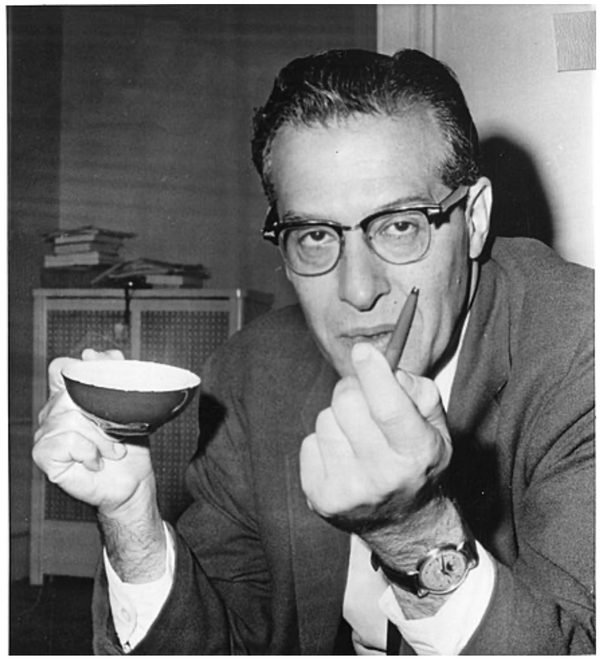
— Второе из них конденсируется и его возбуждение (бозон Хиггса) приобретает массу

— 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

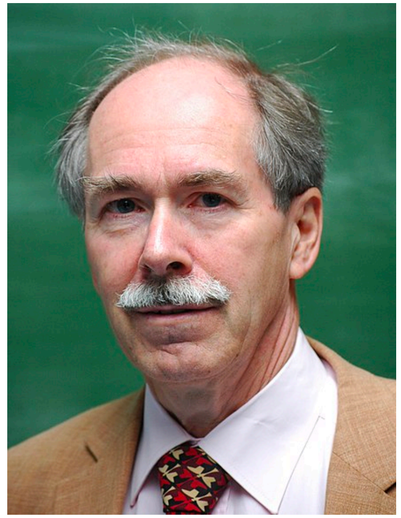
— Электромагнитное поле с массой ноль

— Два электрически заряженных поля $W^{\pm}$ с ненулевой массой

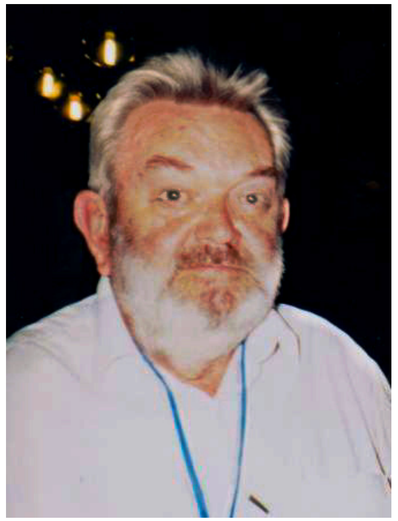
— Электрически нейтральное поле Z^0 с ненулевой массой

— 1971. Джерард ‘т Хоофт и Мартинус Вельтман доказали перенормируемость Стандартной Модели

— 1999. НП ‘т Хоофту и Вельтману «за выяснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий»



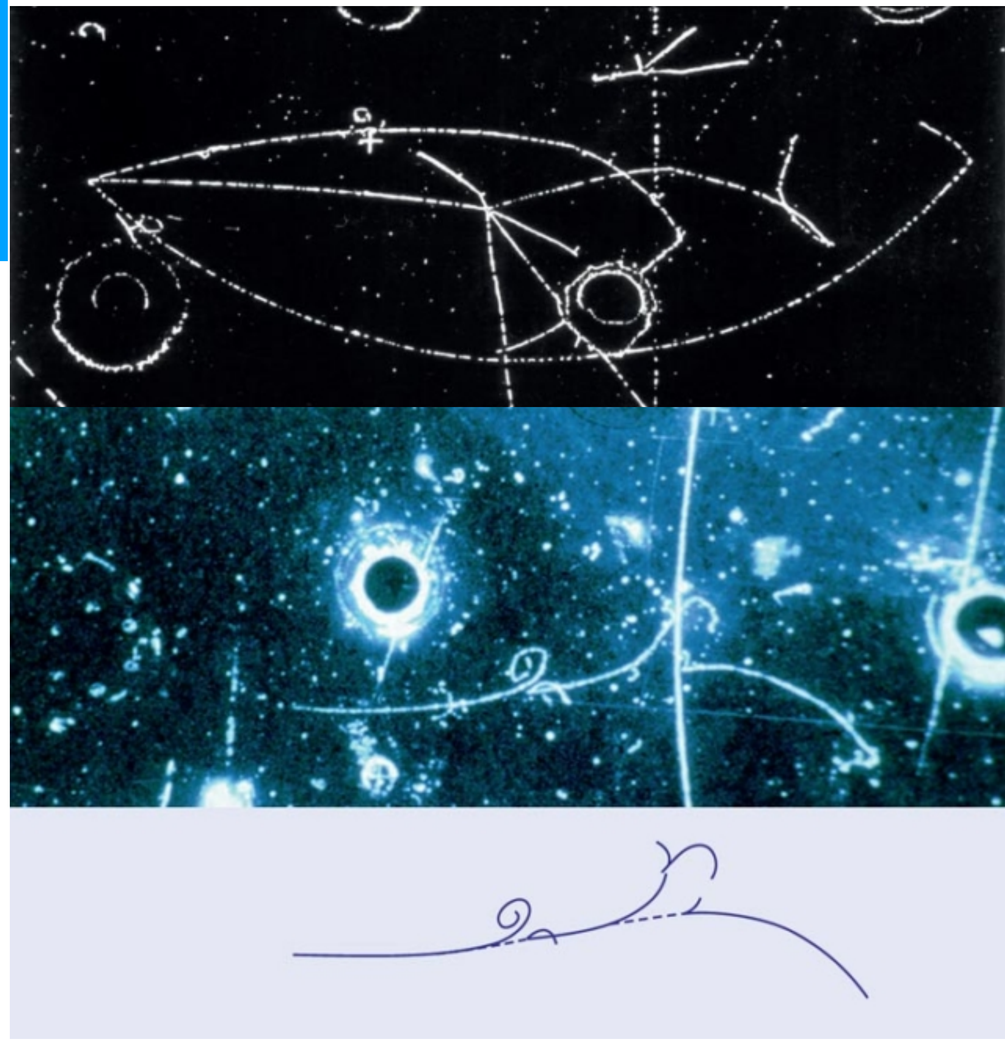
‘т Хоофт



Вельтман

1973. Открытие нейтральных токов

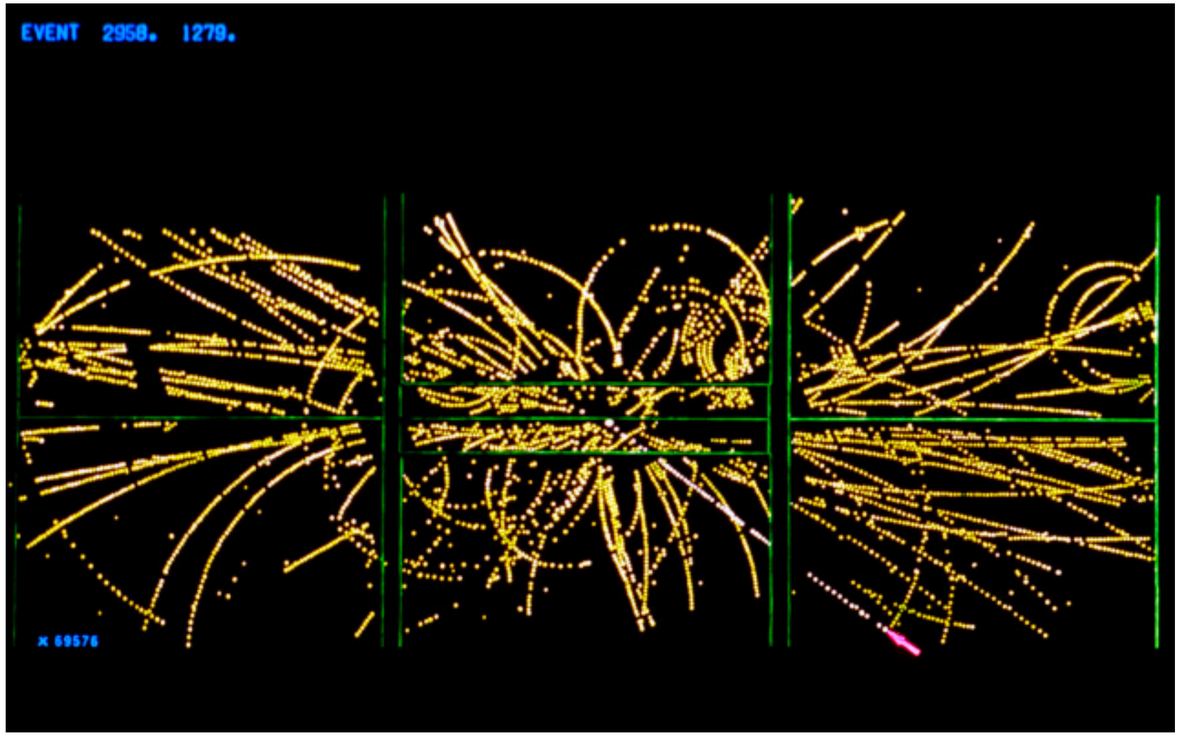
- 19 июля 1973 коллаборация Гаргамель представила первое свидетельство существования нейтрального Z бозона



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.

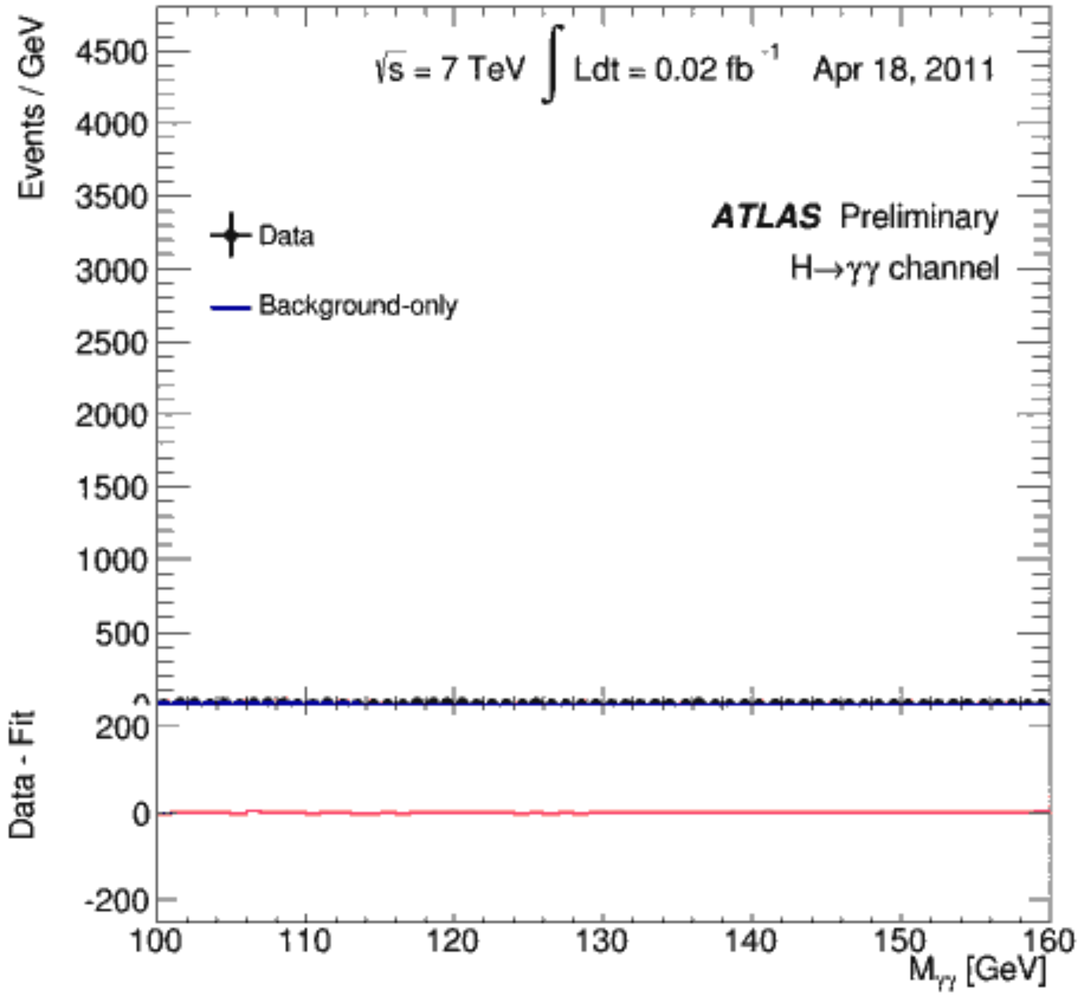
1983. Открытие $W^{\pm}, Z$

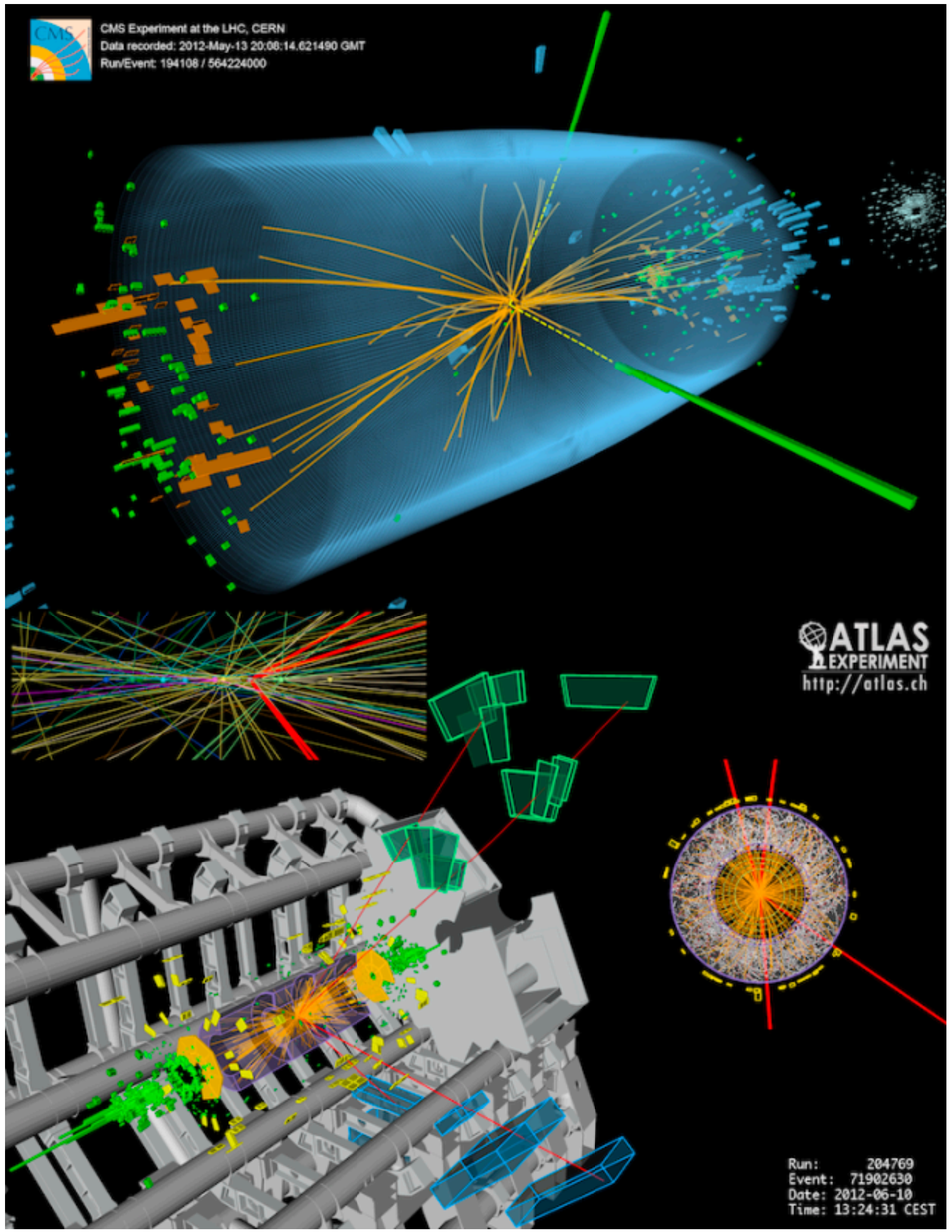
- 1976. Карло Руббиа, Питер МакИнтайр, Давид Кляйн предложили преобразовать ускоритель SPS (Супер Протонный Синхротрон) в коллайдер протон-антипротон
- Саймон ван дер Меер придумал гениальную технологию «стохастического охлаждения», позволившую уменьшить размеры пучков частиц
- 1981. Детекторы UA1, UA2 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

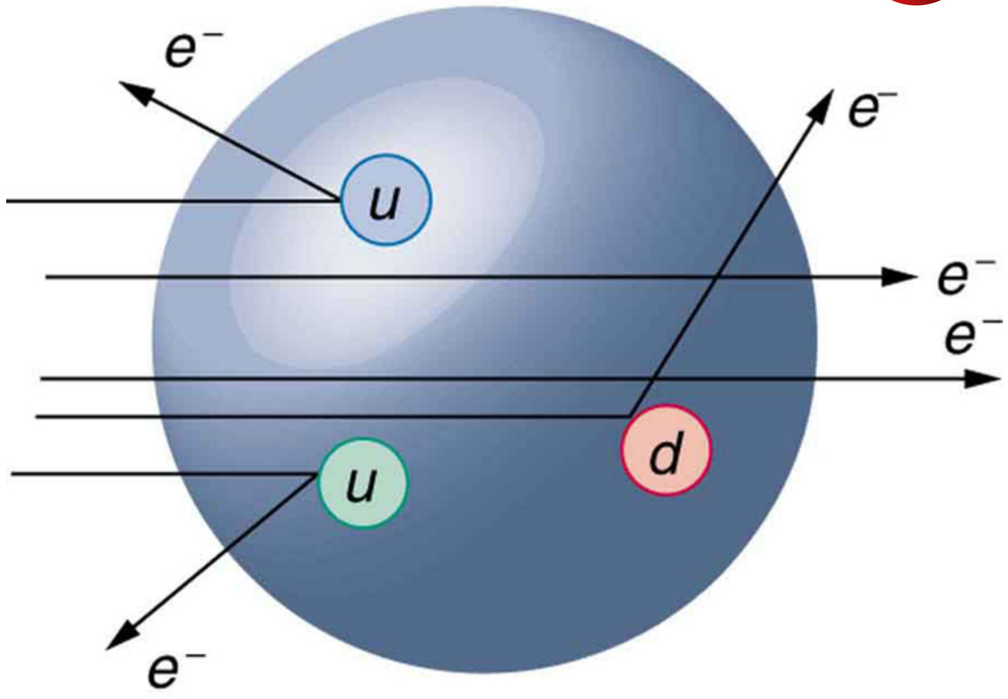
— 1965. Борис Струминский (аспирант Н.Н. Боголюбова) заметил в сноске препринта ОИЯИ, что кварки должны переносить новое квантовое число: $\Omega^{-1} = |sss\rangle$

$\Rightarrow$ Цвет

Атомное ядро: протоны и нейтроны

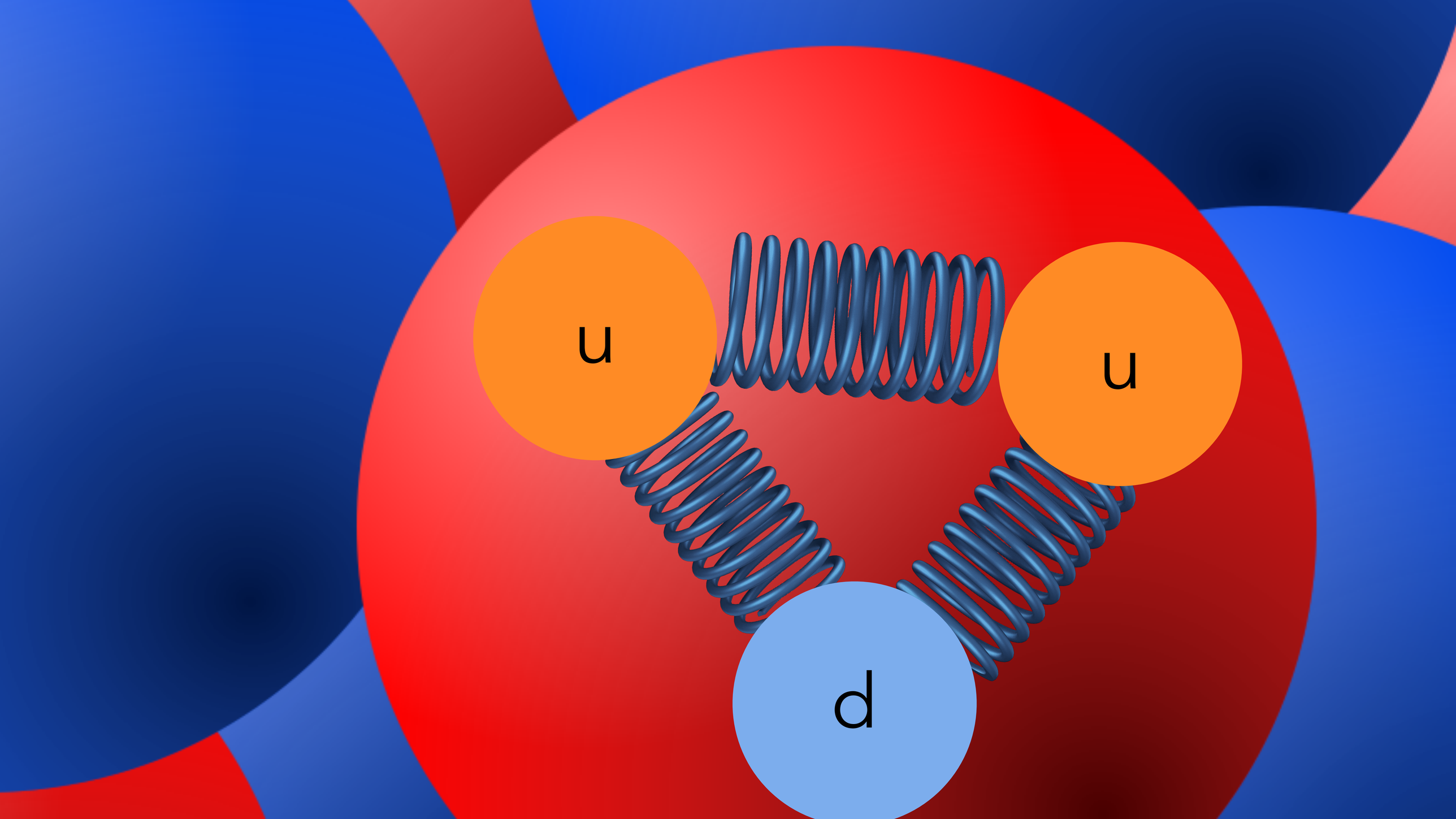
Протоны и нейтроны состоят из кварков

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



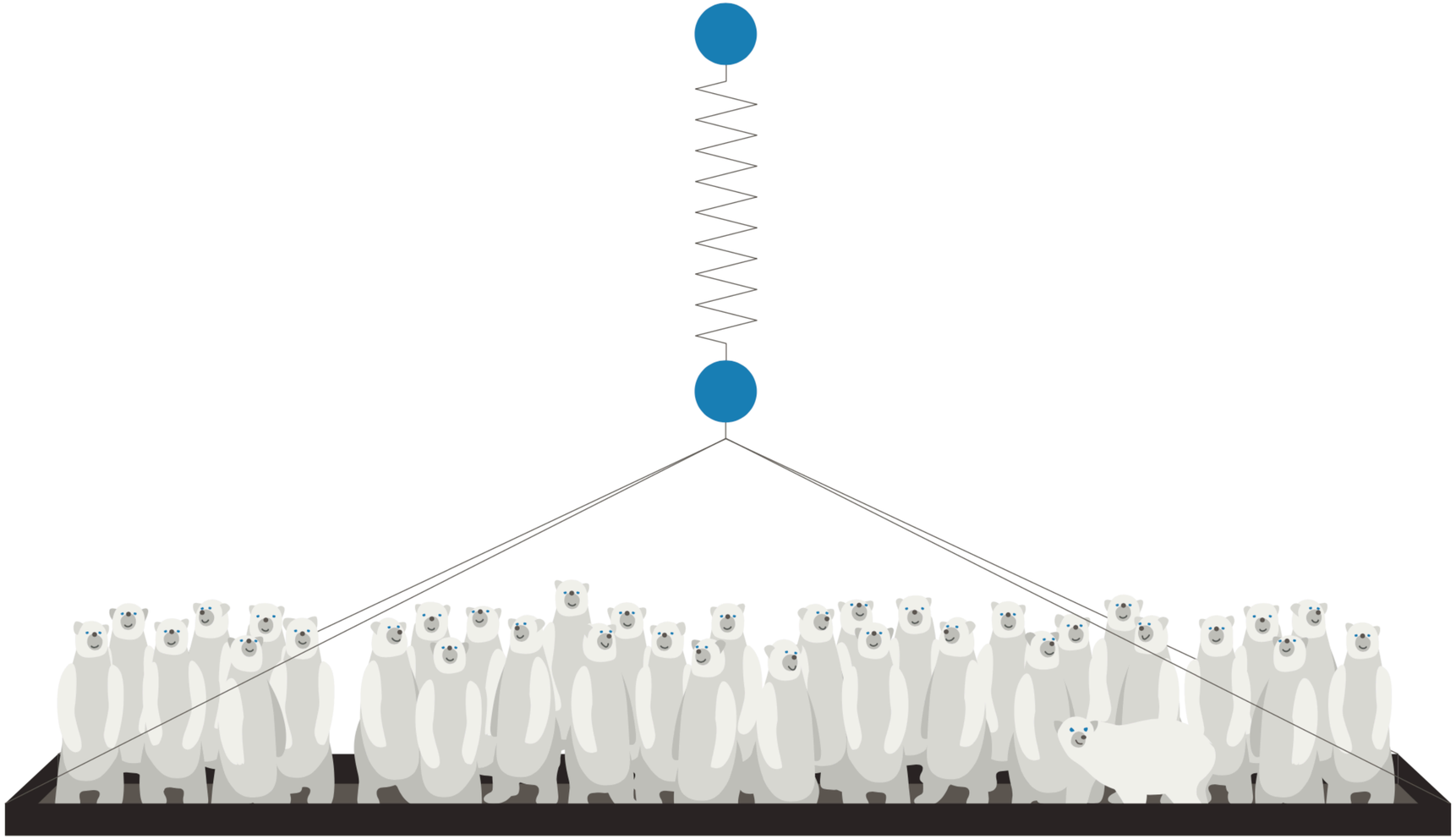
Proton

Источник рисунков на слайде: википедия


u
u
d

Сила притяжения двух кварков равна

весу сорока полярных медведей



Кварки и глюоны

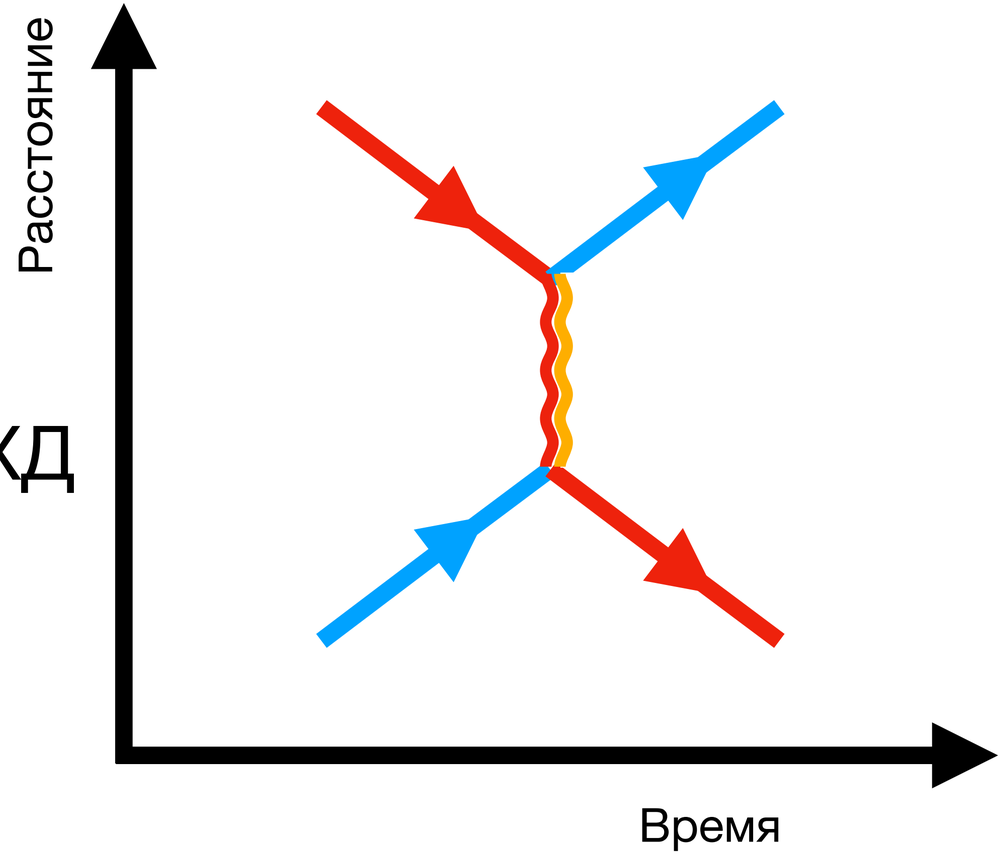
— 1973. Фрич, Леутвиллер и Гелл-ман, основываясь на идее локальной симметрии, разработали КХД

— Конфаймент

— Асимптотическая свобода

— Киральный конденсат

Свойства КХД



Что определяет массу протона?

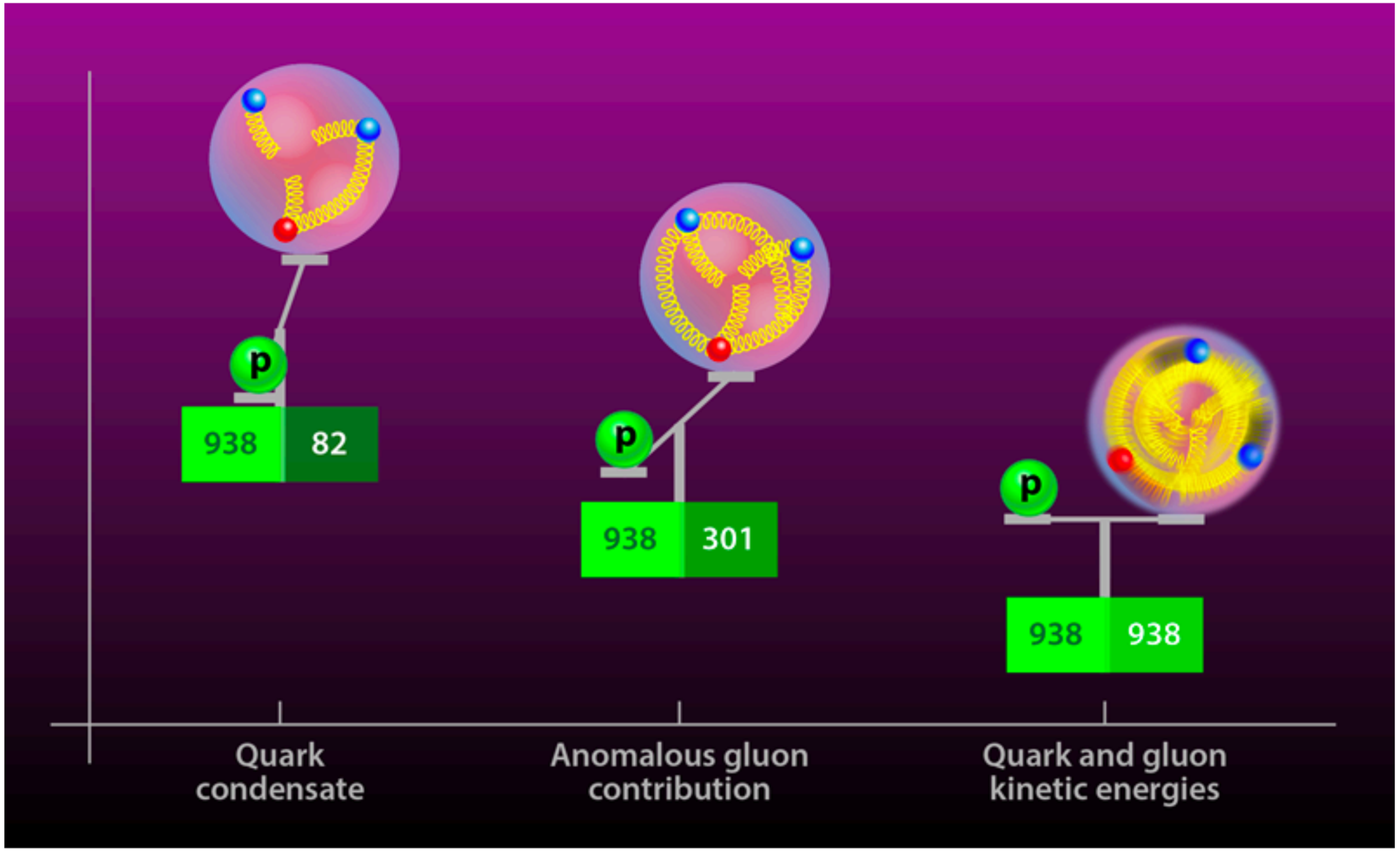
КХД на решетке

— 9% кварковый конденсат

— 32% кинетическая энергия кварков

— 37% энергия глюонного поля

— 23% аномальный глюонный вклад

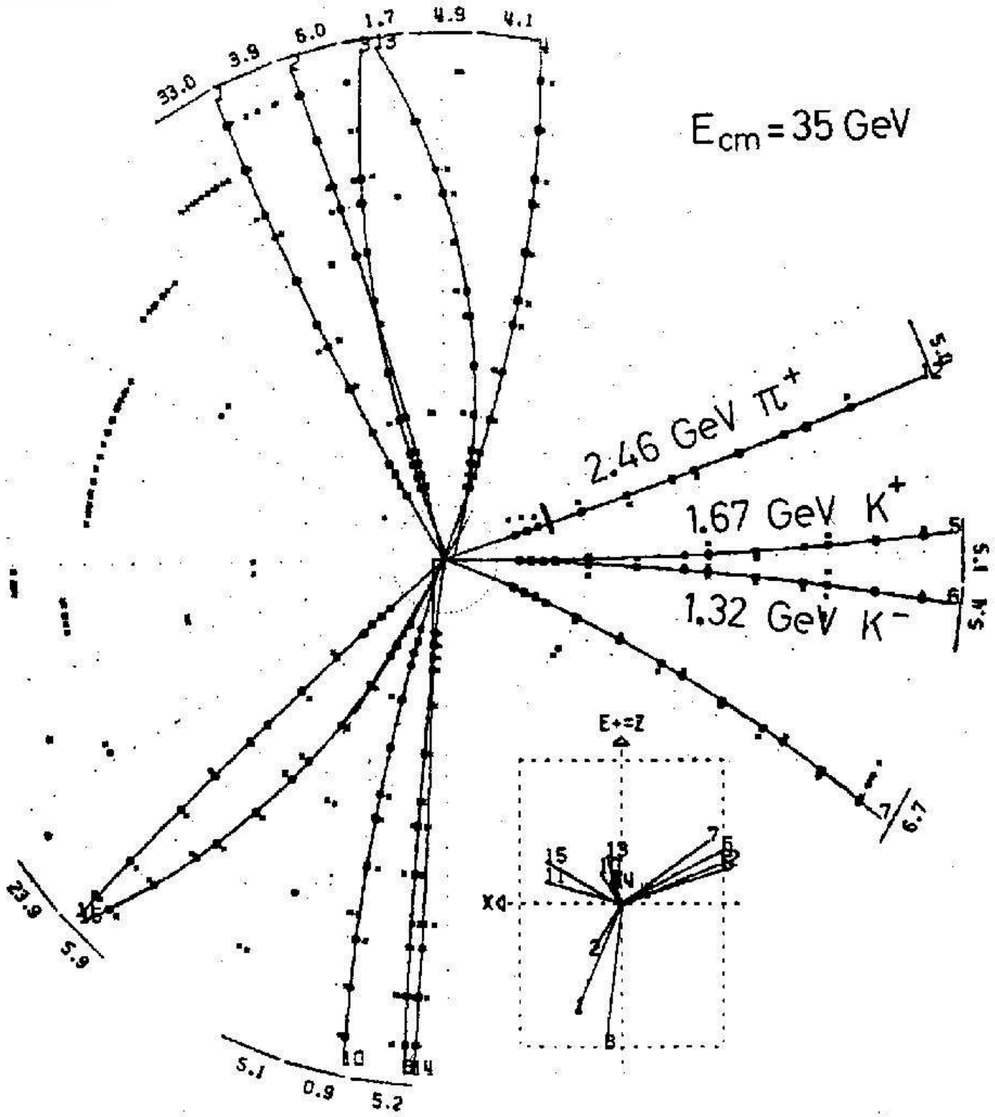


1974. Открытие J/ψ

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

1979. Открытие глюонов

- 1979. Глюон был открыт в DESY на ускорителе PETRA



3-струйное событие в TASSO@PETRA

Физическая картина сегодня

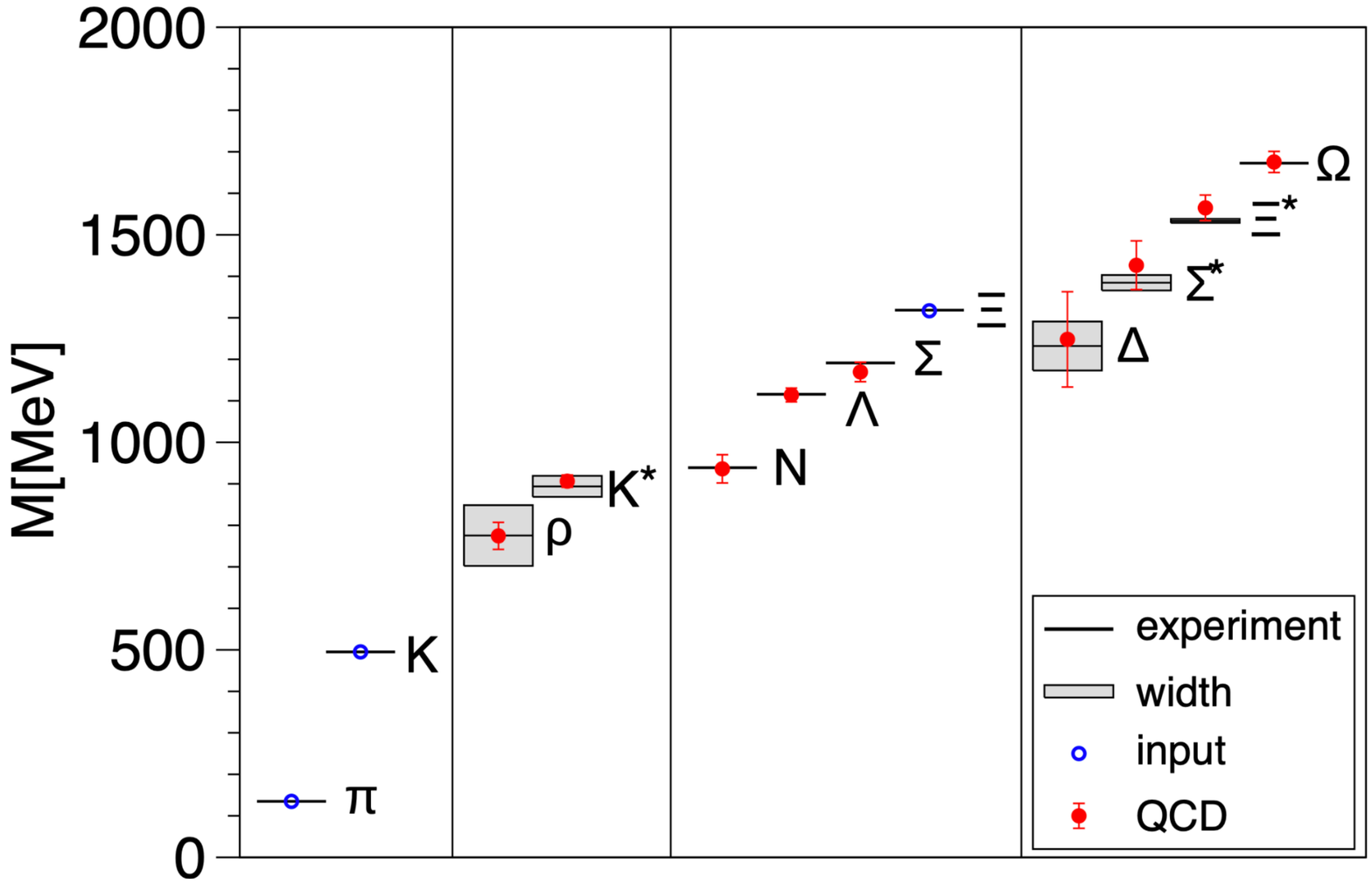
- **Стандартная модель. Успехи**
  - Электрослабая теория + КХД
  - Материя: кварки и лептоны
  - Переносчики взаимодействия: фотоны, $W^{\pm}, Z^{0}$, глюоны
  - Поле Хиггса и спонтанное нарушение симметрии
  - Описывает все данные на Земле
- **Стандартная модель. Трудности**
  - Электрослабое и сильное взаимодействия не объединены
  - Не включает квантовую гравитацию
  - Не описывает барионную асимметрию, темные материю и энергию

Joint Institute
for Nuclear Research

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

Дмитрий В.Наумов

Дополнительные материалы

КХД на решетке

Вычисление масс адронов