

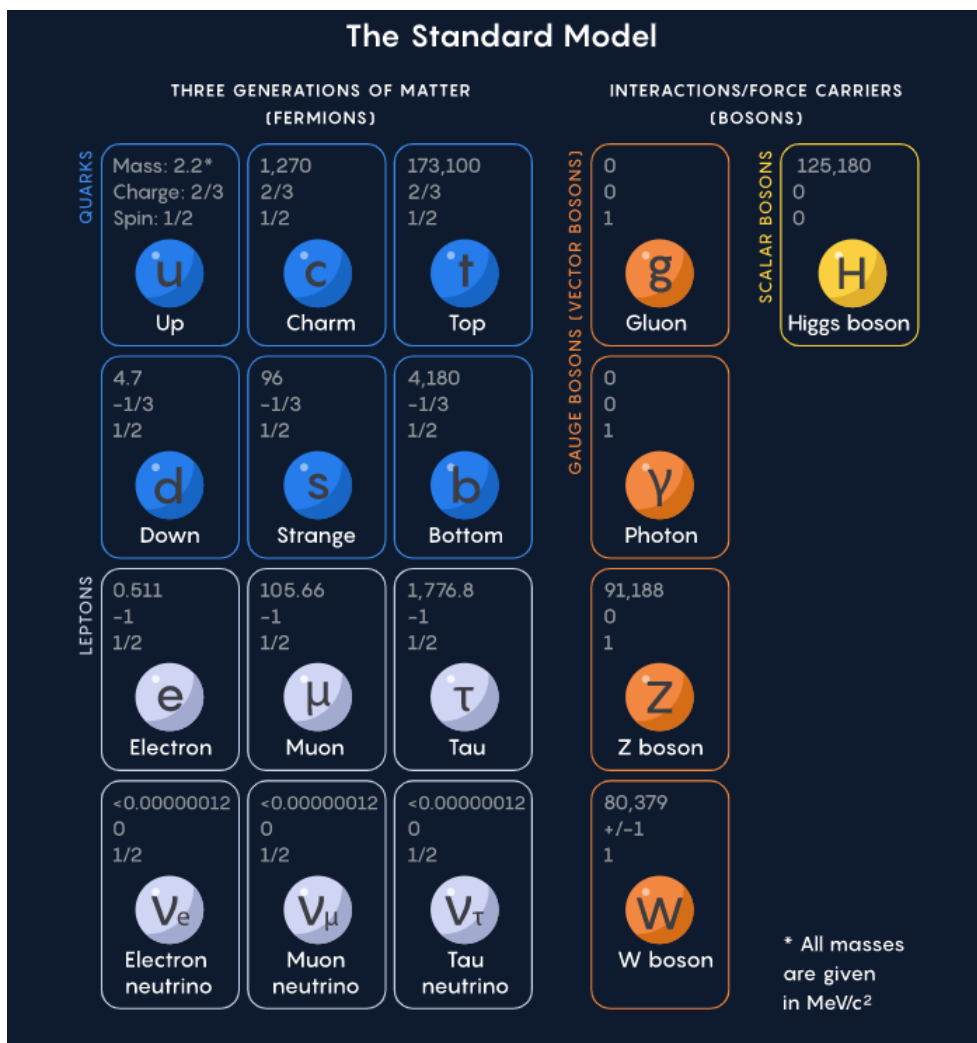
# Новая физика: Обновленная карта всех частиц и фундаментальных сил

Всё в природе возникает из горстки компонентов - элементарных частиц, - которые взаимодействуют друг с другом лишь несколькими способами. В 1970-х годах физики разработали систему уравнений, описывающих эти частицы и взаимодействия. Вместе эти уравнения сформировали лаконичную теорию, известную теперь как **Стандартная модель физики элементарных частиц**.

В Стандартной модели отсутствует несколько частей головоломки (*явно отсутствуют предполагаемые частицы, составляющие темную материю, частицы, передающие силу тяжести, и объяснение массы нейтрино*), но она дает чрезвычайно точную картину почти всех других наблюдаемых явлений.

Тем не менее, для структуры, которая инкапсулирует наше лучшее понимание фундаментального порядка природы, в Стандартной модели все еще отсутствует связная визуализация. Большинство попыток слишком просты, или они игнорируют важные взаимосвязи, или они беспорядочны и неопределимы.

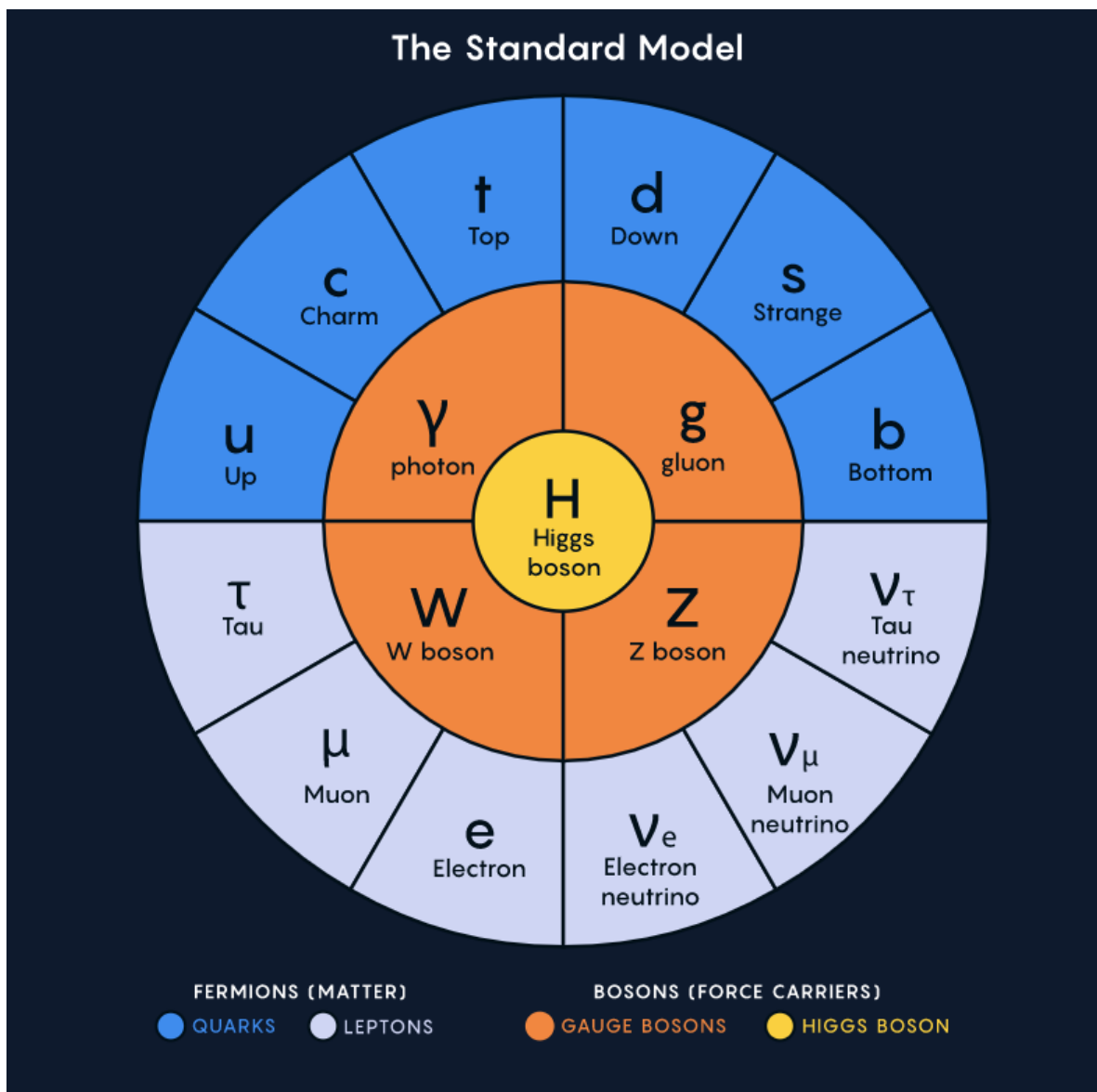
Рассмотрим наиболее распространенную визуализацию, которая показывает периодическую таблицу частиц:



Стандартная модель. Все массы даны в MeV/c<sup>2</sup>.

Этот подход не позволяет понять отношения между частицами. Несущие силу частицы (*а именно фотон, передающий электромагнитную силу; бозоны  $W$  и  $Z$ , передающие слабую силу; и глюоны, передающие сильную силу*), приравниваются к частицам материи, силы которых действуют между - кварками, электронами и им подобным. Кроме того, не учитываются такие ключевые свойства, как «цвет».

Другое представление было разработано в 2013 году:



Фермионы (материя): кварки и лептоны; Бозоны (носители сил): калибровочный бозон, бозон Хиггса.

Хотя эта визуализация правильно подчёркивает центральность **бозона Хиггса** - стержня Стандартной модели, по причинам, объяснённым ниже, - Хиггс помещён рядом с фотоном и глюоном, хотя в действительности Хиггс не влияет на эти частицы. И квадранты круга вводят в заблуждение - подразумевая, например, что фотон связывается только с частицами, которых он касается, что не так.

## Новый подход

**Крис Куингг**, физик элементарных частиц из **Национальной ускорительной лаборатории Ферми** в Иллинойсе, десятилетиями думал о том, как визуализировать Стандартную модель, надеясь, что более мощное визуальное представление поможет познакомить людей с известными частицами

природы и побудить их задуматься о том, как эти частицы могут вписаться в более крупную и полную теоретическую базу. Визуальное представление Куигга больше показывает порядок и структуру, лежащую в основе Стандартной модели. Он называет свою схему представлением «двойного симплекса», потому что каждая из левых и правых частиц природы образует симплекс - обобщение треугольника. Далее приведена схема Куигга с некоторыми дополнительными изменениями.

Давайте построим двойной симплекс с нуля.

## Кварки на дне

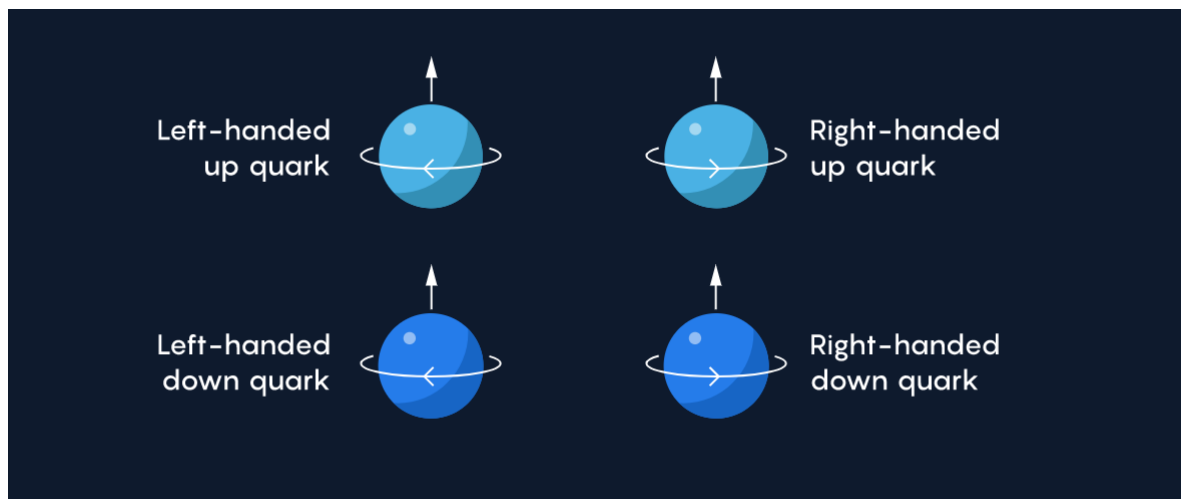
Частицы материи бывают двух основных разновидностей: **лептоны** и **кварки**. (Обратите внимание, что для каждого вида частиц материи в природе существует также частица антивещества, которая имеет ту же массу, но противоположна во всех других отношениях. Как и в других визуализациях Стандартной модели, здесь исключено антивещество, которое образовало бы отдельный, перевернутый двойной симплекс.)

Начнем с кварков и, в частности, с двух типов кварков, из которых состоят протоны и нейтроны внутри атомных ядер. Это верхний кварк, который обладает двумя третями единицы электрического заряда, и нижний кварк с электрическим зарядом  $-1/3$ .



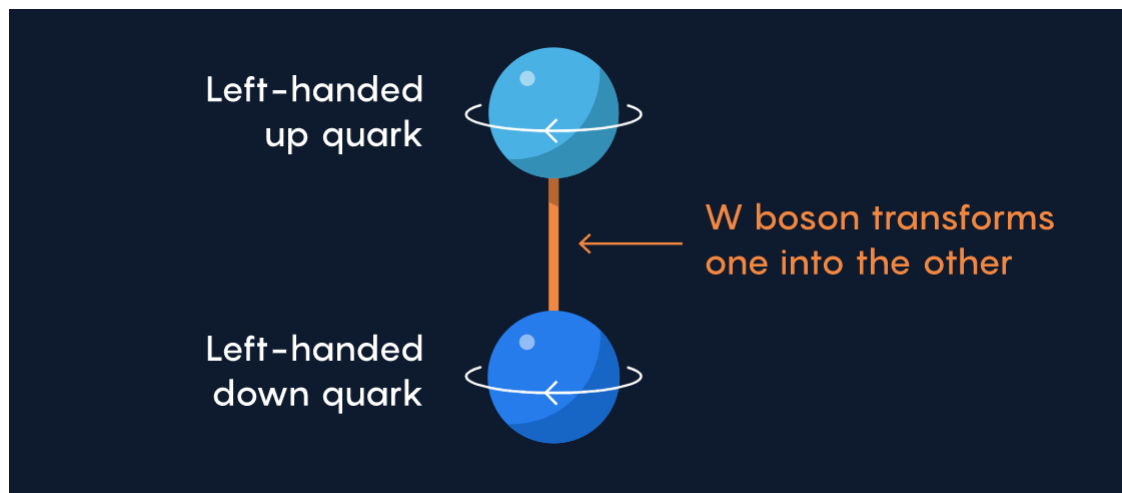
## Верхний и нижний кварки

Верхний и нижний кварки могут быть «левыми» или «правыми» в зависимости от того, вращаются ли они по часовой стрелке или против часовой стрелки относительно направления своего движения.

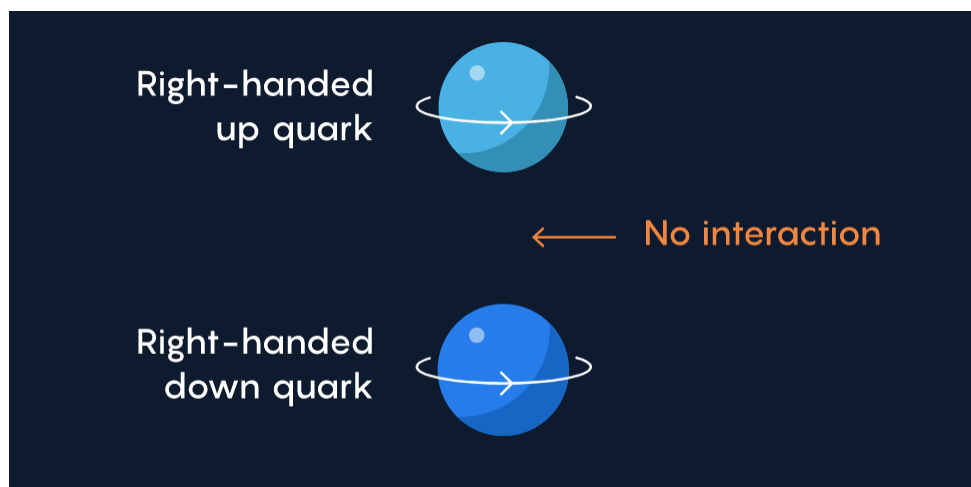


## Слабое изменение

Левосторонние верхние и нижние кварки могут превращаться друг в друга посредством взаимодействия, называемого слабым взаимодействием. Это происходит, когда кварки обмениваются частицей, называемой **W-бозоном**, - одним из носителей слабого взаимодействия с электрическим зарядом +1 или -1. Эти слабые взаимодействия представлены оранжевой линией:

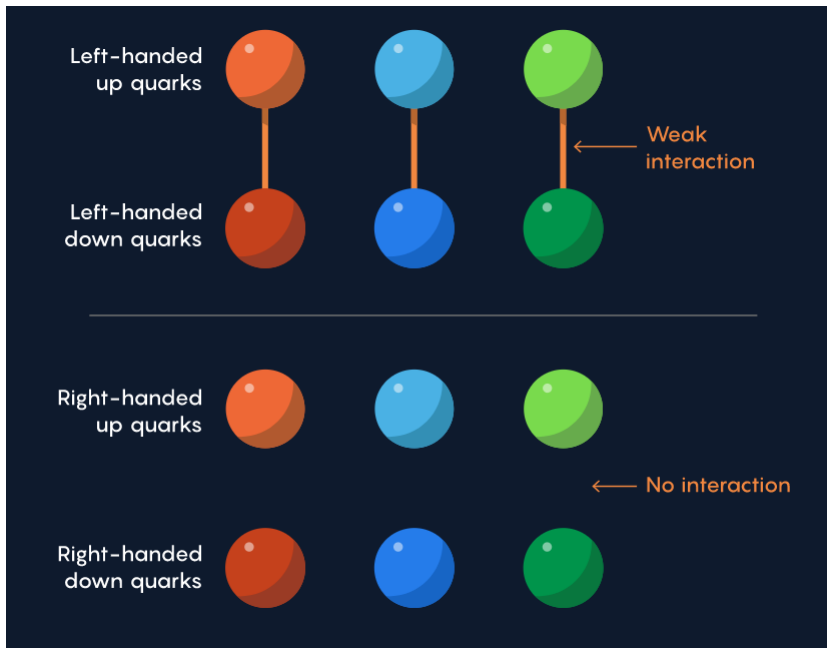


Как ни странно, в природе нет правых W-бозонов. Это означает, что правосторонние верхние и нижние кварки не могут излучать или поглощать W-бозоны, поэтому они не переходят друг в друга.



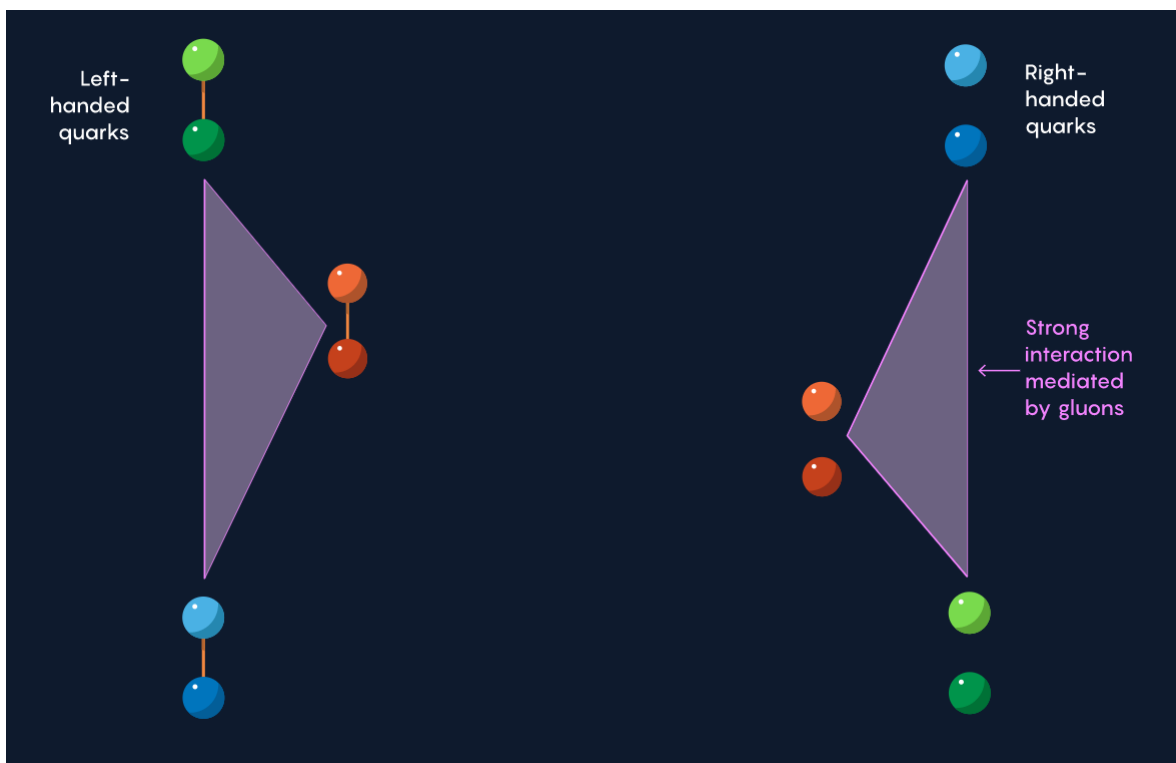
## Яркие цвета

Кварки также обладают зарядом, называемым цветом. Кварк может иметь заряд красного, зеленого или синего цвета. Цвет кварка делает его чувствительным к сильному взаимодействию.



Сильное взаимодействие связывает кварки разных цветов вместе в составные частицы, такие как **протоны** и **нейтроны**, которые являются «бесцветными» и не имеют чистого цветового заряда.

Кварки переходят из одного цвета в другой, поглощая или испуская частицы, называемые **глюонами**, носителями сильного взаимодействия. Эти взаимодействия образуют стороны треугольника. Поскольку глюоны сами обладают цветным зарядом, они постоянно взаимодействуют друг с другом, а также с кварками. Взаимодействия между глюонами заполняют треугольник.

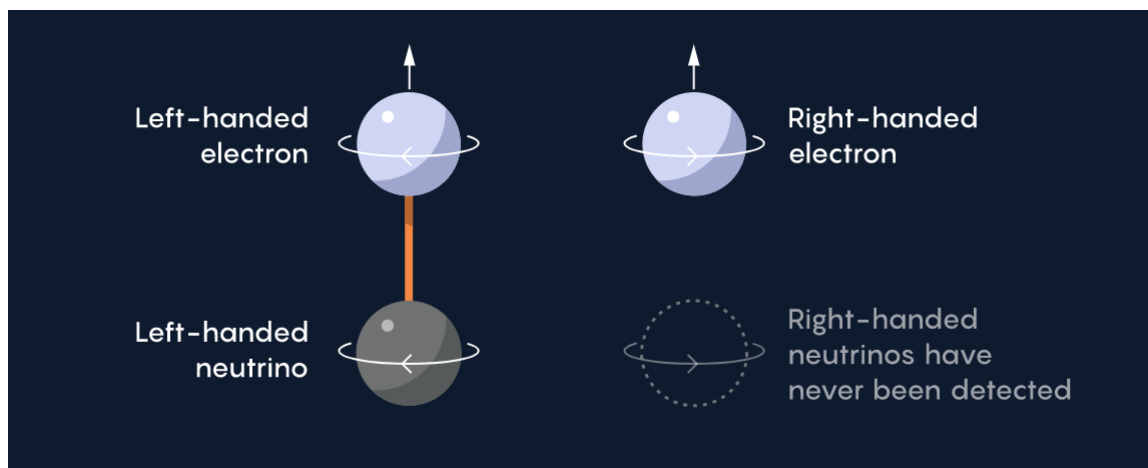


## Больше Материи

Теперь обратимся к **лептонам**, другому типу частиц материи. Лептоны бывают двух типов: **электроны**, которые имеют электрический заряд -1, и **нейтрино**, которые электрически нейтральны.



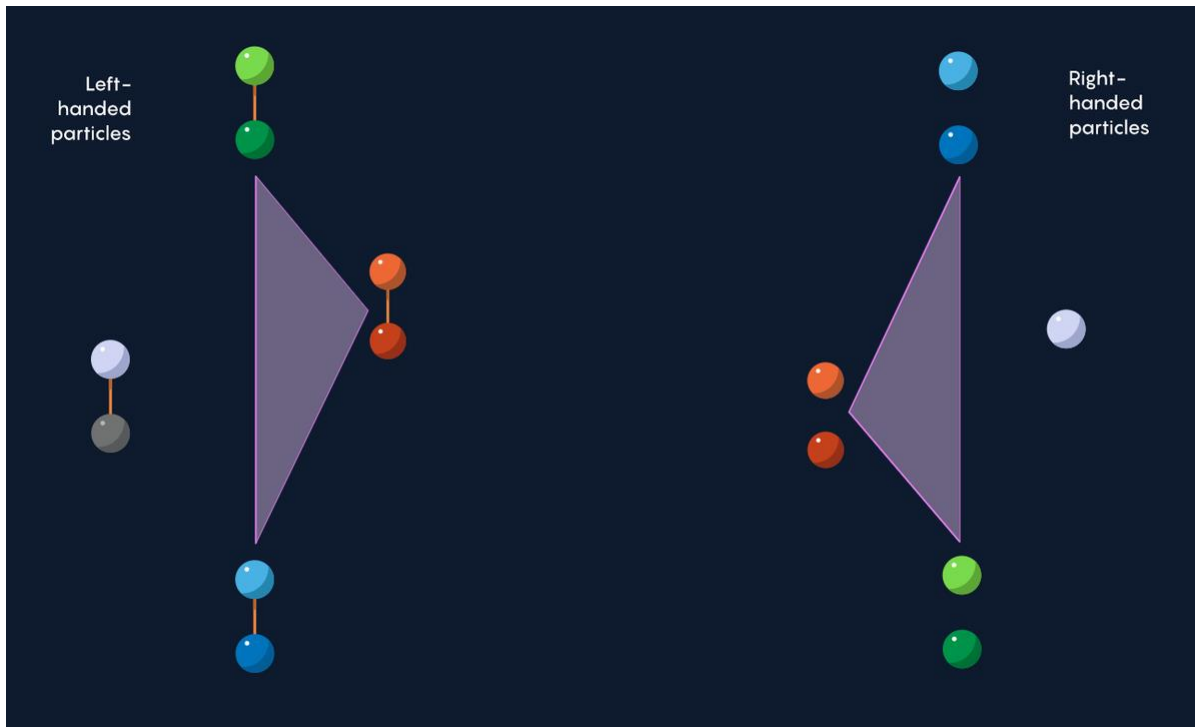
Как и в случае левосторонних верхних и нижних кварков, левые электроны и нейтрино могут превращаться друг в друга посредством слабого взаимодействия. Однако правые нейтрино в природе не наблюдались.



Обратите внимание, что лептоны не обладают цветным зарядом и не взаимодействуют посредством сильного взаимодействия; это главная особенность, которая отличает их от кварков.

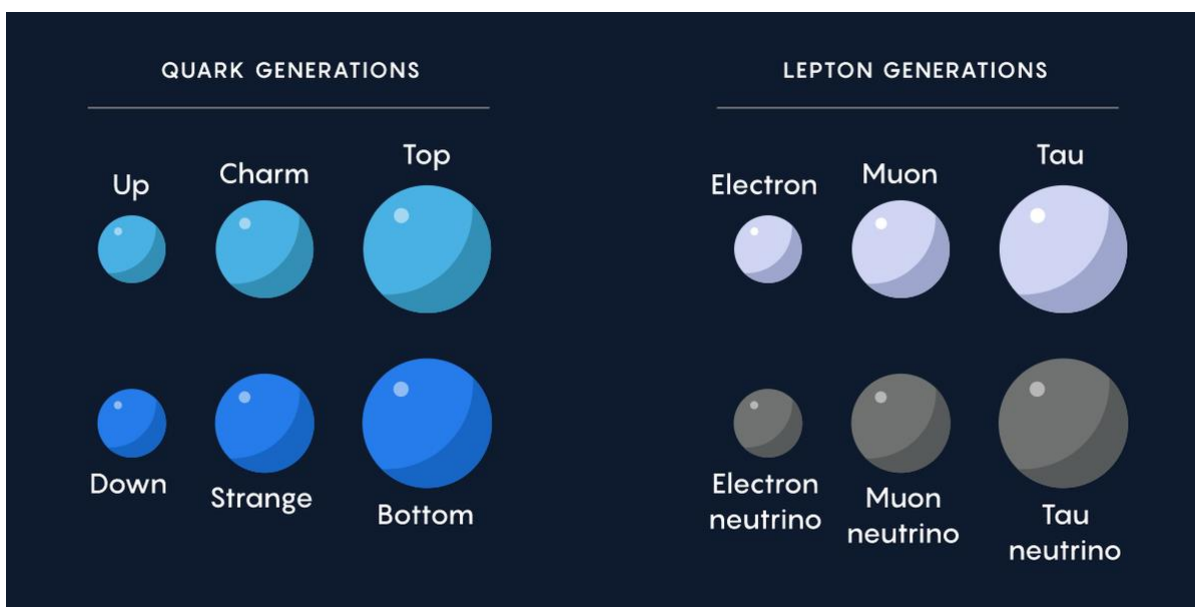
## Симплексный скелет

Объединив то, что описано до сих пор, мы получаем левосторонние частицы слева, а правые частицы показаны справа. Они образуют основной скелет двойного симплекса Куигга.



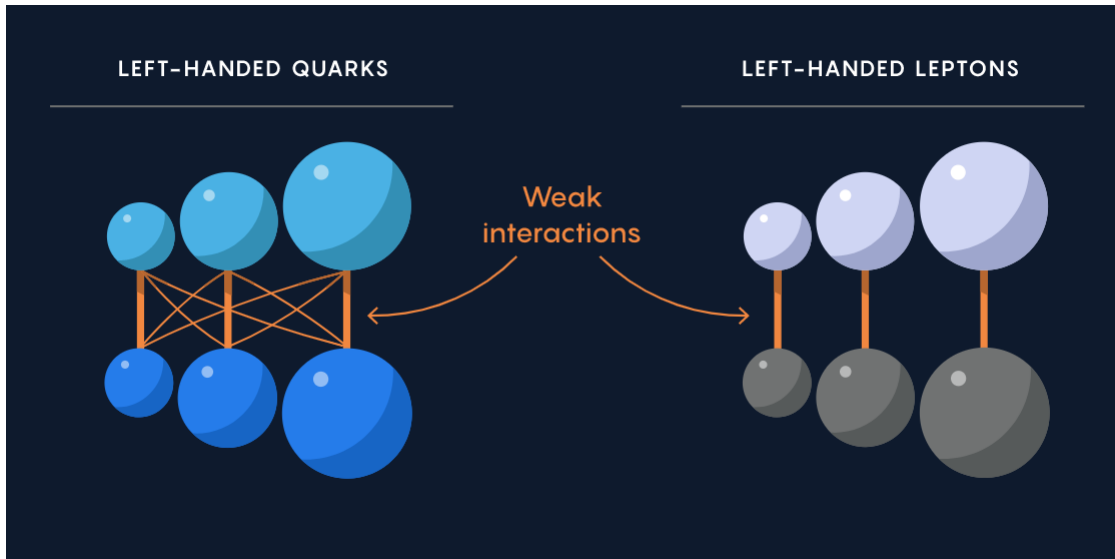
## Три поколения

Теперь усложнение: по неизвестным причинам существуют три прогрессивно более тяжелые, но в остальном идентичные версии каждого типа частиц материи. Например, наряду с верхним и нижним кварком есть **очарованный** и **странный кварк** и, нечто еще тяжелее, **t-кварк** (сокращение от *top-кварк*, англ. *top quark*) и **b-кварк** (сокращение от *bottom-кварк*, англ. *bottom quark*). То же самое и с лептонами: наряду с электронным и электронным нейтрино существуют **мюон** и **мюонное нейтрино**, а также **тау-** и **тау-нейтрино**. (Обратите внимание, что нейтрино имеют небольшие, но неизвестные массы).



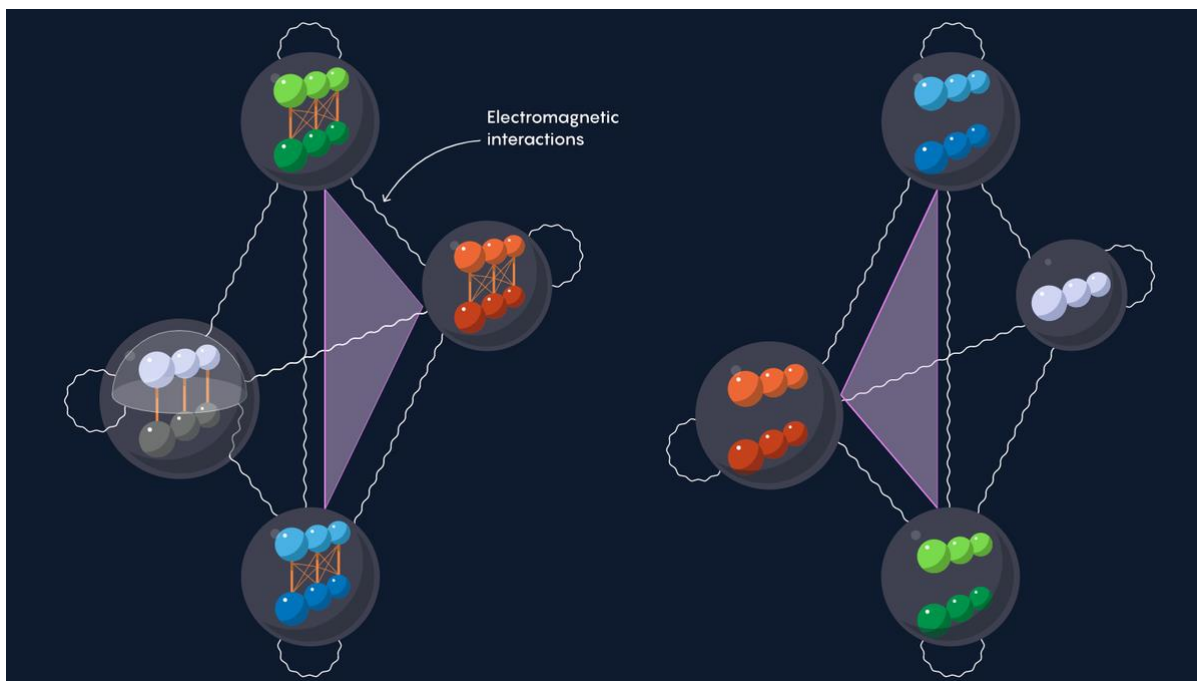
Все эти частицы обитают в углах двойного симплекса. Обратите внимание, что между левыми кварками разных поколений происходит небольшое слабое взаимодействие, так что верхний кварк

может иногда выплывать  $W^-$  + **-бозон** и становится, например, странным кварком. Не было замечено, что лептоны разных поколений взаимодействуют таким образом.



## Силы и заряд

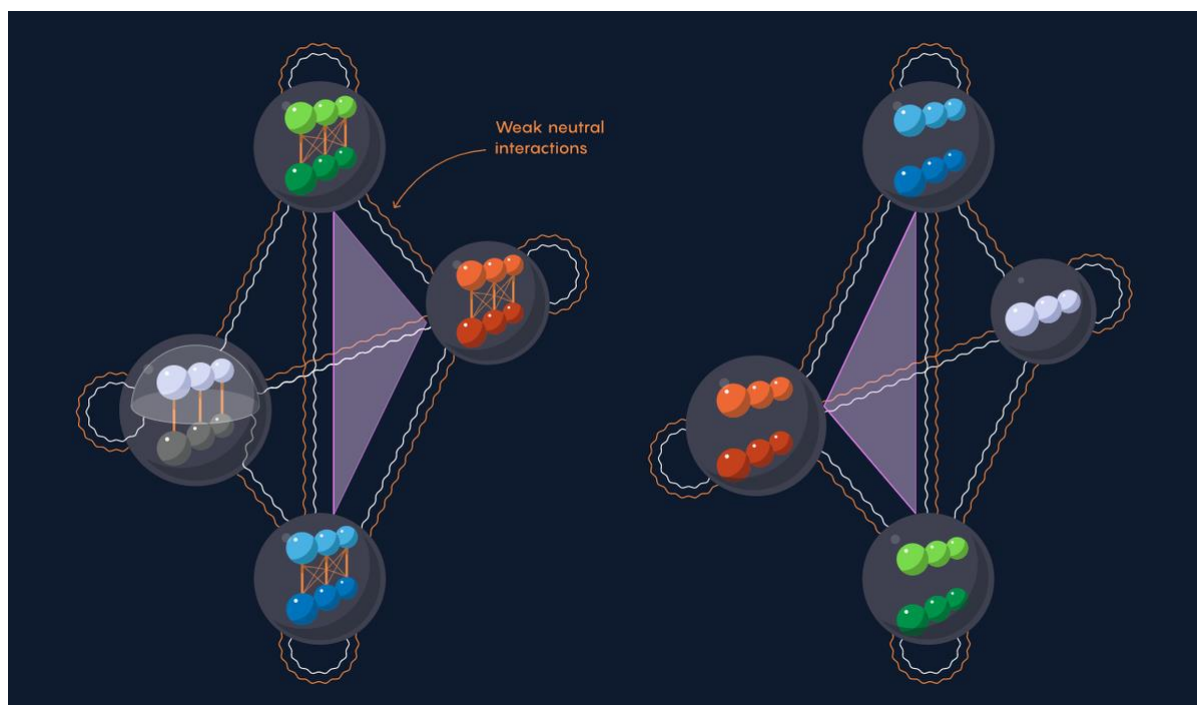
Как еще частицы взаимодействуют друг с другом? Мы уже упоминали, что многие частицы вещества имеют электрический заряд - фактически все, кроме нейтрино. Наличие электрического заряда означает, что эти частицы чувствительны к электромагнитной силе. Они взаимодействуют друг с другом, обмениваясь фотонами, носителями электромагнитной силы. Здесь представлены электромагнитные взаимодействия в виде волнистых линий, соединяющих заряженные частицы друг с другом. Обратите внимание, что эти взаимодействия не превращают частицы друг в друга; в этом случае частицы просто ощущают толчок или притяжение.



Слабое взаимодействие немного сложнее, чем предполагалось ранее. Помимо бозонов  $W^+$  и  $W^-$  - электрически заряженных носителей слабого взаимодействия - существует также нейтральный носитель слабого взаимодействия, называемый бозоном  $Z^0$ . Частицы могут поглощать или испускать



Z0-бозоны без изменения идентичности. Как и в случае электромагнитных взаимодействий, эти «слабые нейтральные взаимодействия» просто вызывают потерю или усиление энергии и импульса. Слабые нейтральные взаимодействия представлены здесь оранжевыми волнистыми линиями.



Электромагнитные и слабые нейтральные взаимодействия происходят и между противоположно направленными частицами, но для ясности здесь пропущены линии, пересекающие один симплекс с другим.

Неслучайно слабые нейтральные взаимодействия очень похожи на электромагнитные. И слабые, и электромагнитные силы происходят из единой силы, существовавшей в первые моменты существования Вселенной, называемой **электрослабым взаимодействием**.

Когда Вселенная остыла, произошло событие, известное как нарушение электрослабой симметрии, разделившее силы на две части. Это событие ознаменовалось внезапным появлением распространяющегося по всему пространству поля, известного как **поле Хиггса**, которое связано с частицей, называемой **бозоном Хиггса**, - последним фрагментом нашей головоломки.

## Появляется Хиггс

**Бозон Хиггса** - это стержень Стандартной модели и ключ к пониманию того, почему двойное симплексное расположение имеет смысл. Когда поле Хиггса возникло в ранней Вселенной, оно соединило левые и правые частицы друг с другом, одновременно наделяя частицы тем свойством, которое мы называем массой. *(Обратите внимание, что нейтрино имеет массу, но его происхождение остается загадкой, поскольку оно происходит от какого-то механизма, отличного от Хиггса).*

Когда частица, такая как электрон, движется в пространстве, она постоянно взаимодействует с бозонами Хиггса - возбуждениями поля Хиггса. Когда левосторонний электрон сталкивается с бозоном Хиггса, электрон может от ricoшетить от него в новом направлении и стать правым, затем врезаться в другого Хиггса и снова стать левым, и так далее. Эти взаимодействия замедляют электрон, и именно это мы подразумеваем под «массой».

В общем, чем больше частица взаимодействует с бозоном Хиггса, тем больше у нее массы. Более того, частые взаимодействия с бозонами Хиггса делают эти массивные частицы квантовыми смесями левых и правых.

Теперь все это можно объединить в новую "Стандартную модель физики элементарных частиц" ([ссылка на 3D модель](#)).