



ЕЩЁ ДАЛЬШЕ В МИКРОМИР: КВАРКИ

*Когда ядро кувалдой разбиваешь,
добыть пытаешься в нём какой-нибудь нейтрон –
оттуда вдруг со страшным скрипом выползает
частица анти-сигма-минус-гиперон.*

Из физфаковской песни

Эта статья для тех, кто читал про элементарные частицы и ядерные реакции в «Квантиках» №8 и №9 за 2019 г. Раз вы уже так много узнали, нужно признаться вам ещё кое в чём. До сих пор у нас так получалось, что всё на свете состоит из протонов, нейтронов (объединённых в атомные ядра) и электронов. И это правда – почти. Всё вещество, с которым мы привыкли иметь дело, всё, что мы видим вокруг, действительно именно из них и состоит. Но всё же это не единственные на свете виды элементарных частиц. Если хорошенько поискать, найдутся и другие. И этих видов очень много! Если очень сильно стукнуть по ядру «кувалдой», оттуда элементарные частицы так и посыпятся. Всякие-разные мезоны, гипероны, совсем недолго живущие резонансы... Откуда они все берутся в ядре, если их там не было? И как стукнуть по ядру кувалдой? Точнее, что взять вместо кувалды, чтобы по такому маленькому ядру попасть?

На первый вопрос постараемся ответить чуть позже, а пока начнём со второго. В прошлой статье мы обсуждали атомные реакторы: там для разбивания ядер используют нейтроны. Это нужно для создания цепной реакции: среди осколков ядер много нейтронов, а отсутствие электрического заряда даёт им возможность спокойно «подобраться» к ядру – электрическое отталкивание не мешает. Но это годится, когда требуется много не очень сильных столкновений – ведь непрочные ядра урана или плутония и так готовы развалиться, только подтолкни. А нам нужно пусть всего несколько, но так, чтобы уж стукнуть так стукнуть! Для этого нейтроны не годятся: их, опять-таки из-за отсутствия заряда, очень трудно разогнать до большой скорости. Только если нагреть до каких-то совсем уж гигантских температур, но с таким нагретым веществом очень трудно справиться.

Да и лететь они тогда будут куда попало, могут попасть совсем не в те ядра, в которые мы хотели... Гораздо лучше для этой цели иметь дело с протонами. Их удобно разгонять – достаточно просто поместить их в электрическое поле. Для этого нужно, грубо говоря, взять две параллельные металлические пластины и присоединить их проводами к полюсам батарейки – вот между пластинами и готово электрическое поле. Только батарейка для наших целей нужна очень мощная. Управлять пучком заряженных частиц тоже удобно: их легко заставить повернуть с помощью магнита. Когда пучок протонов готов, можно обстрелять им какую-нибудь мишень; часть протонов пролетит мимо, но некоторые ударятся в ядра мишени.

Но тут надо сказать, что когда протон очень быстрый, он не ударяется (говорят: рассеивается) обо всё ядро целиком, а влетает в ядро и стучается об один какой-то из его протонов или нейтронов. А раз так, можно сделать ещё лучше: не обстреливать неподвижную мишень быстрыми протонами, а разогнать два пучка частиц и направить навстречу друг другу! То-то сильный получится удар! Особенно если взять один пучок протонов, а другой – антипротонов. Помните? – У антипротонов заряд отрицательный, и электрическое отталкивание не будет мешать ему и встречному протону подлететь друг к другу поближе. Даже наоборот, электрическое притяжение поможет.

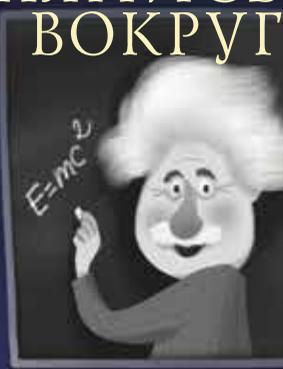
Такие установки, в которых разгоняются заряженные частицы (можно и электроны разгонять, не обязательно протоны), называются *ускорителями*. А установки, в которых разогнанные частицы сталкиваются друг с другом, называются *ускорителями на встречных пучках*, или *коллайдерами*: to collide по-английски – сталкиваться.

Ну хорошо, стукнем мы очень сильно протоном по антипротону (или по протону или нейтрону в ядре) – что же при этом произойдёт? А вот что: во все стороны полетит куча протонов, антипротонов и новых, незнакомых нам пока частиц. Откуда они все там взялись? Ответ такой: родились.

Мы привыкли к закону сохранения массы: материя просто исчезнуть не может. Если игрушка про-



ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ



пала – значит, она или её обломки лежат где-нибудь под шкафом. Даже если вода из стакана исчезла, мы понимаем, что она испарилась, и масса водяных паров в воздухе увеличилась на столько же, на сколько уменьшилась масса воды. Закон сохранения массы прекрасно работает в окружающей нас природе, но не годится, когда скорости близки к скорости света.

В этом случае сохранения массы уже нет; есть только сохранение энергии. И если энергии достаточно много, можно «из ничего» (на самом деле как раз «из энергии») делать что-то, например частицы. А масса – это только один из видов энергии, один из способов её хранения. Вам, возможно, попадалась на глаза красивая формула Эйнштейна: $E = mc^2$. Она как раз об этом. С этой точки зрения, частица – это всего лишь определённый, хорошо упакованный кусок энергии. Правда, просто взять и сделать из ничего одну частицу нельзя. Есть всё-таки ещё другие ограничения – другие законы сохранения. Например, должен сохраняться электрический заряд. Поэтому сделать один протон нельзя. А вот пару протон-антипротон – пожалуйста! Если, конечно, достаточно энергии.

Чтобы породить при столкновении новую пару протон-антипротон, надо разогнать уже имеющиеся частицы «батарейкой» напряжением в миллиард (!) вольт. Пару электрон-позитрон породить гораздо легче, ведь они в 2000 раз легче протона – поэтому хватит «батарейки» в полмиллиона вольт. Самый мощный из существующих Большой адронный коллайдер на границе Швейцарии и Франции имеет «разгонную батарейку» напряжением в 7 тысяч миллиардов вольт! Так что при столкновении рождаются не одна-две, а сотни и тысячи частиц.

Некоторые из них легче протонов, другие – во много раз тяжелее. Одни заряжены, другие нет. Их открыто уже больше 300. Но все частицы, из которых состоит материя, кроме уже известных нам протонов, электронов и их античастиц, да ещё нескольких совсем-совсем легких, – нестабильны, то есть распадаются (превращаются во что-то другое) через короткое время. Для нейтрона это время, как

вы, может быть, помните из прошлой статьи, около 15 минут. Для всех остальных частиц – намного меньше, это крошечные доли секунды.

Но как же теперь быть? Только мы решили, что всё на свете состоит всего из трёх сортов элементарных «кирпичиков» – а их, оказывается, снова целый зоопарк. Как в них разбираться?

Физики и тут придумали, как выйти из положения. Оказывается, всё это множество элементарных частиц состоит всего из нескольких видов ещё более элементарных частиц¹.

А именно, все обнаруженные частицы можно разделить на две группы – *лептоны* и *адроны*². Лептонов всего 12, и они ни из чего уже больше не состоят (по крайней мере, мы сейчас так думаем). Из них мы уже знакомы с четырьмя – электрон, нейтрино и их античастицы, позитрон и антинейтрино. Есть ещё *мюон* и *таон* (*тау-лептон*), похожие на электрон и имеющие такой же заряд, но более тяжёлые, и два соответствующих типа нейтрино – мюонное и тау. Плюс их античастицы. Все они не участвуют в сильных взаимодействиях, но участвуют в слабых – то есть в превращениях частиц друг в друга.

ЛЕПТОНЫ

→ Масса →			Заряд (1 – заряд протона)
e^- электрон	μ^- мюон	τ^- тау-лептон, таон	
ν_e (электронное) нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау-нейтрино	0

И ещё античастицы: e^+ , μ^+ , τ^+ – заряд +1, $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$ – антинейтрино, заряд 0. Массы нейтрино неизвестны, есть только ограничения сверху.

А что же остальные, адроны, которых несколько сотен? Вот они все состоят из... *кварков*.

Кварков тоже всего 12, как и лептонов, и тоже половина из них – антикварки. Остаётся 6. И они тоже подразделяются, как и лептоны, на три пары,

¹ Они называются *фундаментальными*.

² Есть ещё несколько особых частиц – переносчиков взаимодействия. Здесь мы их обсуждать не будем.



ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

которые по свойствам похожи друг на друга, а отличаются массой. В каждой паре один из кварков имеет заряд плюс $2/3$ заряда электрона (!), а другой – минус $1/3$. У антикварков, как всегда, всё ровно наоборот.

КВАРКИ: их обозначения, английские и русские названия и заряды

u $+2/3$ up, верхний	s $-1/3$ strange, странный	b $-1/3$ bottom или beauty, прелестный, красивый
d $-1/3$ down, нижний	c $+2/3$ charm, очарованный	t $+2/3$ top или truth, истинный

(Цветная линия показывает порядок возрастания массы. Обратите внимание, что заряды более тяжёлого и более лёгкого кварков в первом столбце «перепутаны» по сравнению с остальными столбцами.)

Вот новости! До сих пор у нас дробных зарядов не было... И не будет! Кварки могут комбинироваться только в такие сочетания, в которых их суммарный заряд (в единицах заряда электрона) целый. И только в таких сочетаниях их можно наблюдать в природе. Эти сочетания и есть элементарные частицы; хоть они и состоят из кварков, но отдельный кварк из них выделить нельзя, невозможно разделить элементарную частицу на кусочки. Поэтому они всё-таки элементарные, несмотря на их внутреннюю структуру.

Удивительное свойство «пленения» кварков внутри частицы называется *конфайнментом*. Во всех уже изученных нами взаимодействиях чем дальше частицы оказываются друг от друга, тем слабее сила, притягивающая их друг к другу (или отталкивающая). А у кварков наоборот – чем дальше они отодвигаются друг от друга, тем сильнее притягиваются! И наоборот: чем ближе они друг к другу прижимаются, тем слабее взаимодействуют. Как и почему такое получается, пока не очень понятно.

Частицы, состоящие из двух кварков, называются *мезонами*. Точнее, они состоят из кварка и антикварка, иначе не получится целый заряд. Например, $u\bar{d}$ – это π^+ -мезон (читается: пи-плюс). Все частицы, имеющие s -кварк (или его антикварк), называются *странными*, имеющие c -кварк – *очарованными*, имеющие b -кварк – *прелестными*.



Задача 1. А из каких кварков состоит античастица π^+ -мезона – π^- -мезон? Из чего состоит K^+ -мезон, если он самый лёгкий из странных мезонов, а заряд у него +1?

Адроны из трёх кварков называются *барионами*. Самый лёгкий барион – как раз протон: это комбинация *uud*.

Задача 2. Второй нестранный адрон – это нейтрон. Из каких кварков состоит он? Бывает ли анти-нейтрон?

Задача 3. *Гиперонами* называют странные, но не очарованные (и тем более не прелестные) барионы. Сигма-гипероны – лёгкие. Индекс плюс или минус (или ноль) в обозначении и названии адрона соответствует знаку заряда. Что же такое анти-сигма-минус-гиперон? Отличается ли он от сигма-плюс-гиперона?

Бывают ещё *тетра-* и *пентакварки*, состоящие из четырёх и пяти кварков. Но это уже совсем экзотика.

Кварки участвуют в сильном взаимодействии – собственно, их конфайнмент это как раз проявление сильного взаимодействия. И уж там, внутри адрона, это взаимодействие действительно сильное – его энергия во много раз больше энергии, заключённой в самих кварках. Из-за этого масса любого адрона много больше массы составляющих его кварков. Сильное взаимодействие, которое удерживает протоны и нейтроны в ядре, – это всего лишь жалкие «хвостики» тех сил, которые бушуют внутри них самих. И в слабом взаимодействии кварки тоже участвуют – иначе как бы могли в нём участвовать сделанные из них адроны? Легко догадаться, что уже знакомый нам по прошлой статье распад нейтрона – это превращение *d*-кварка в *u*-кварк: $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$.

Теория кварков прекрасно объясняет многочисленные виды новых частиц, рождающихся в столкновениях при очень высоких энергиях. К сожалению, для понимания того, что творится в атомных ядрах при обычных «ядерных» энергиях – например, для понимания, как именно устроены ядерные силы или какие именно ядра устойчивы, а какие нет и почему, – она не очень помогает. Во всяком случае, и в «кварковой» теории, и в «обычной» ядерной физике ещё куча неотгаданных загадок. Подрастайте, некоторые из них вас дождутся!

