

Читавшие статью про устройство атомов в «Квантике» №11 за 2018 год знают, что любое вещество состоит всего из трёх типов элементарных частиц – протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны – тяжёлые, гораздо тяжелее электронов. Они образуют ядра атомов, а электроны летают вокруг этих ядер, совсем улететь им не даёт электрическое притяжение протонов: протоны имеют положительный заряд, а электроны – отрицательный, и все частицы с зарядами одного знака отталкиваются друг от друга, а с зарядами разных знаков – притягиваются.

Задача 1. Размер атомного ядра примерно 10^{-15} м,¹ а размер атома – диаметр орбит электронов – примерно 10^{-10} м. Если мы, делая модель атома, в качестве ядра нарисуем ручкой точку размером 1 мм, какого размера нужно рисовать атом? А какого размера получится в таком масштабе модель вируса гриппа? Размер настоящего вируса гриппа – 10^{-7} м.

Внутри атомного ядра протоны и нейтроны – они вместе называются *нуклонами*² – «держатся» друг за дружку ядерными силами. Это совсем не то же самое, что электрические (точнее, электромагнитные) силы. Например, в ядерном взаимодействии протон и нейтрон участвуют «на равных» (в отличие от электромагнитного, ведь у нейтрона электрического заряда нет, а у протона есть). Ядерное взаимодействие иначе называют *сильным*, так что можно сказать: «В ядре действуют сильные силы» – и это не будет бессмысленным повтором.

Эти «сильные силы» действительно очень велики, иначе ядра не удерживались бы и разваливались. Ведь протоны в них все «отпихиваются» друг от друга электрическими силами. К тому же нуклоны в ядре не стоят на месте, а быстро движутся. Попробуйте втроем-вчетвером взяться за руки и начать беспорядочно прыгать и метаться туда-сюда. Удержать друг друга и не расцепить руки будет гораздо сложнее, чем если бы все спокойно водили хоровод.

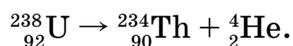
¹ Напомним: $10^{-15} = \frac{1}{10^{15}} = \frac{1}{10 \dots 0}$ – в знаменателе число с 15 нулями.

² От латинского слова nucleus – ядро.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

И всё же иногда сильного взаимодействия не хватает, чтобы удержать ядро, и оно разваливается на части. Это называется *распад ядра*, или *радиоактивный распад*, а элементы, или изотопы (помните, что это?), которые норовят распасться, называются *радиоактивными*. В большинстве атомов вокруг нас ядра устойчивые и никогда не развалятся. Разве что по ядру очень сильно стукнет, например, ещё один протон или нейтрон (это будет вынужденный распад). Они такие стабильные потому, что в них правильное соотношение протонов и нейтронов: у лёгких ядер – протонов и нейтронов примерно поровну, а у тяжёлых – нейтронов чуть больше; чем тяжелее ядро, тем больше доля нейтронов (проверьте по таблице Менделеева). Но ядру вредно быть очень толстым: если протонов в нём совсем много (больше 82), то устойчивой конфигурации уже нет: сколько нейтронов ни клади, ядро развалится.

Если соотношение протонов и нейтронов «неудачное», ядро рано или поздно распадётся. Некоторые, правда, могут перед этим прожить многие миллиарды лет, а другие не проживут и долю секунды. Ядро может развалиться на пару ядер поустойчивей и полегче, но чаще всего от него просто откалывается небольшой кусочек – обычно два протона и два нейтрона, то есть как раз ядро атома гелия. Ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ иначе называется *альфа-частицей*, а распад с испусканием этой частицы – *альфа-распадом*. Вот пример такой ядерной реакции:



Здесь ядро урана превращается в ядро тория.

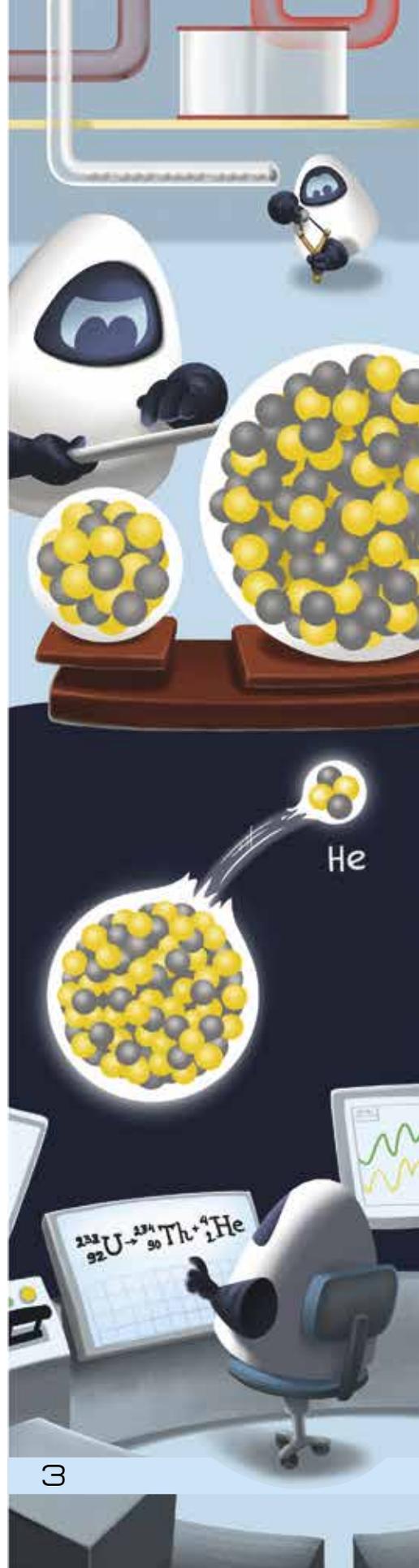
Задача 2. Вспомните, что значат числа, стоящие возле символа элемента, и проверьте, что ни один протон или нейтрон в этом процессе не пострадал.

Задача 3. Напишите реакцию альфа-распада радия (сведения о радиации см. в таблице Менделеева).³

БЕТА-РАСПАД

И вот – чудо. Представьте, берёте вы ядро радиоактивного изотопа – ну, например, цезий-137 –

³ Нам нужен основной изотоп радия, чаще всего встречающийся в природе.



ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

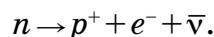


и ждёте, когда оно распадётся. А из него вместо альфа-частицы вылетает электрон! Откуда он взялся в ядре?! Там ведь только протоны и нейтроны!

Тут в игру вступает ещё одна новая сила, про которую мы пока не говорили. Чтобы подчеркнуть её отличие от сильного взаимодействия, её назвали *слабой*. И сама по себе она, действительно, куда слабее. Но слабые могут делать такое, чего не могут сильные.

С этой силой нейтрон в ядре действует... сам на себя и просто превращается в протон и электрон! И ещё в одну очень лёгкую частичку, *антинейтрино*.

Всё верно, и вас не обманывали: нейтрон – элементарная частица, то есть его нельзя разделить на части. Нет у него внутри протона с электроном. Он именно в них *превращается*. Слабые силы превращают одни частицы в другие!⁴ И в ядре им сделать это труднее. А вот когда нейтрон сам по себе, ни с кем не связан сильными силами (говорят: *свободный нейтрон*), он этот фокус проделывает с лёгкостью! В свободном состоянии нейтроны живут только около 15 минут. А потом – распадаются. Вот так:



Здесь у значков протона и электрона написаны их заряды. Суммарный электрический заряд в этом процессе сохраняется: как был ноль, так и остался.

То же может произойти и в ядре, когда в нём слишком много нейтронов. Например, вот так:



Обратите внимание, что масса ядра (число нуклонов в нём) остаётся прежней, а заряд его увеличивает на единицу; просто нейтрон в ядре заменяется на протон. Такие процессы называются *бета-распадом*⁵, а электрон, вылетевший из ядра, – *бета-частицей*.

Задача 4. Что получится при бета-распаде изотопа водорода – трития ${}^3_1\text{H}$? Какое уравнение реакции?

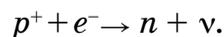
НЕЙТРИНО И АНТИНЕЙТРИНО

Что же, все нейтроны распадутся когда-нибудь и их больше не будет? Нет. Во-первых, сильное

⁴ Как именно происходит это превращение, понять с помощью наших обычных представлений невозможно, но физики умеют посчитать, что получается, написав определённые уравнения.

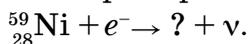
⁵ Альфа – первая буква греческого алфавита, а бета – вторая. Эти два вида распада – самые частые.

взаимодействие мешает распаду, и в стабильных ядрах нейтроны надёжно защищены. Во-вторых, бывает, что протон в нестабильном ядре ухитряется «подцепить» слабыми силами электрон (например, из того же атома), и вдвоём они превращаются в нейтрон:



Попутно образуется другая частица – *нейтрино* (уже без анти-, поэтому над её значком нет чёрточки). Она, как и антинейтрино, до того *лёгкая*, что её массу до сих пор не смогли измерить. Как и электрон, она не участвует в сильных взаимодействиях. Но и в электромагнитном взаимодействии она тоже не участвует! Только слабые да ещё гравитационные силы (которых никому не избежать) действуют на нейтрино. Из-за этого нейтрино очень мало взаимодействуют с остальным веществом. Огромное их количество каждую секунду протыкает Землю насквозь, не замечая её и ничего по дороге не нарушая. Их очень трудно изучать – поди поймай частицу, которая проходит незамеченной через любую ловушку...

Задача 5. Такой вариант слабого взаимодействия в ядре – с поглощением электрона – называется *электронным захватом*. Например:



Впишите сами, какое при этом получилось ядро.

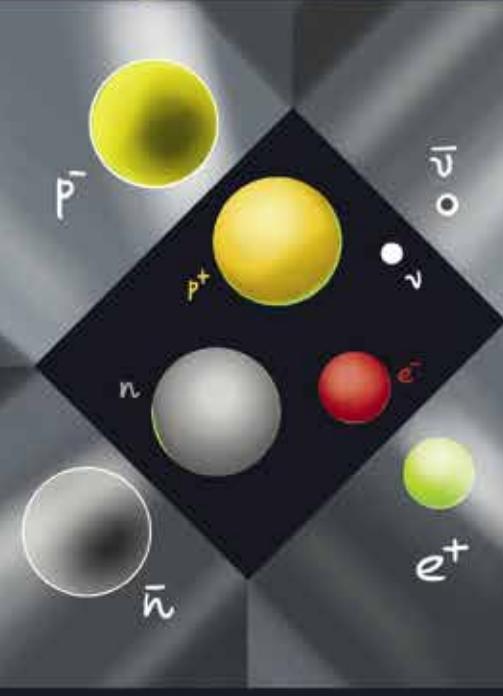
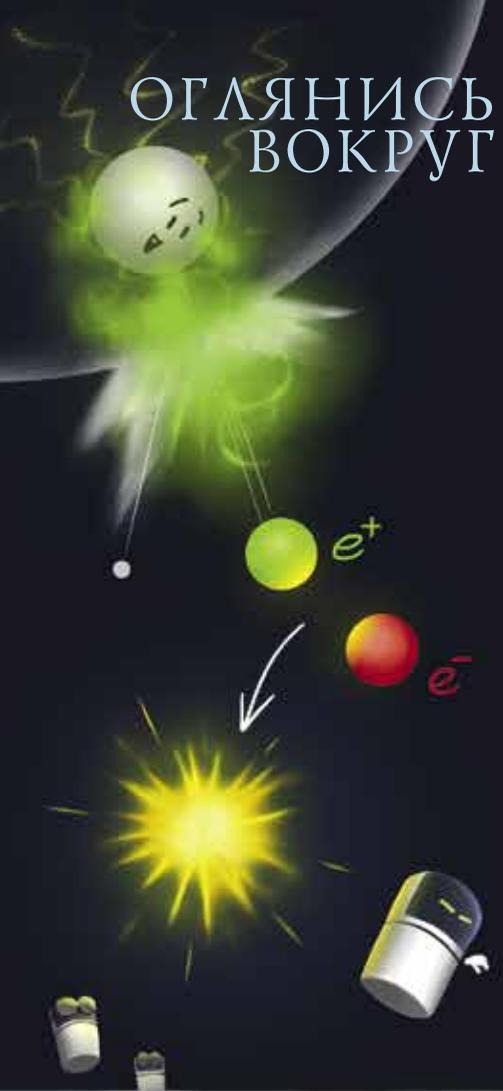
ДРУГИЕ «АНТИ-»

А протон может превратиться в нейтрон? Сам по себе – не может. Потому что нейтрон тяжелее протона. Как раз на массу электрона и ещё на маленькую чуточку. Более тяжёлая вещь в более лёгкие может превратиться, а наоборот – нет. Зато если протон в ядре, ему могут помочь соседи-нуклоны: вместо недостающей массы они отдают свою энергию, из-за чего просто будут помедленнее носиться по ядру да поближе прижмутся друг к дружке. Для прочности ядра это даже очень полезно. Но совсем не каждое ядро на такое способно, а только такое «рыхлое», у которого запас энергии достаточно большой. Обычно это как раз ядра с лишними протонами – или, говоря иначе, с недостатком нейтронов. Угадайте, почему...⁶

⁶ Ответ – в следующей статье, в следующем номере «Квантика».

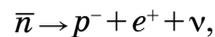


ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ



Художник Мария Усеинова

И на что же распадается протон, если ему помогают? Он, конечно, превратится в нейтрон, но ведь надо ещё деть куда-то положительный электрический заряд. И вот на сцене появляется ещё одна элементарная частица! Это «антиэлектрон», масса у него как у электрона, а электрический заряд – такой же по величине, но обратный по знаку – положительный. У всех элементарных частиц есть свои античастицы – и у протона, и даже у нейтрона. Каждая античастица участвует во всех тех же взаимодействиях и реакциях, что и её пара, но с приставкой «анти»: например, антинейтрон распадается на антипротон, антиэлектрон и анти-антинейтрино, то есть просто нейтрино:



а антипротон с антиэлектроном могут превратиться в антинейтрон. Могли бы быть антиатомы, антипланеты и антилюди на них, но, похоже, такого нигде нет. Антиматерии – всех этих античастиц – в природе очень-очень мало. И долго они не живут. И вот почему: стóит античастице встретить парную ей частицу – бац! – происходит яркая вспышка, и обе они исчезают. Это называется красивым словом *аннигиляция*. А антиэлектрон называется красивым словом *позитрон*⁶.

Так что же там наше рыхлое ядро с кучей лишней энергии и страдающим от скуки протоном? Он может распасться вот так:



Это *позитронный*, или *бета-плюс распад*. Например, такое происходит с ядрами изотопов $^{15}_8\text{O}$, $^{11}_6\text{C}$, $^{121}_{53}\text{I}$.

Задача 6. Напишите сами, что получается из этих ядер при позитронном распаде.

Теперь мы узнали более или менее всё, что может случиться с атомным ядром. А заодно обнаружили кучу новых элементарных частиц: только что было три – и вот их уже восемь... Но если такое изобилие вас пугает, можно утешаться тем, что всё, что мы видим вокруг себя, всё-таки состоит из атомов с вполне стабильными ядрами и только из трёх типов элементарных частиц – протонов, нейтронов и электронов.

Контрольная задача. Заполните пропуски и определите тип реакций: $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$; $? + e^- \rightarrow ^{235}_{92}\text{U} + ?$; $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{210}_{82}\text{Pb} + ?$; $^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{13}_6\text{C} + ? + ?$; $^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{208}_{81}\text{Tl} + ?$.

⁶ От слова positive – положительный.