

ЯДРА АТОМОВ: ВЫНУЖДЕННОЕ ДЕЛЕНИЕ И ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

Валерия Сирота

В предыдущей статье в «Квантике» №8 за этот год мы выяснили, что происходит с атомными ядрами таких изотопов, у которых «неправильное» соотношение числа протонов и нейтронов. Но чем определяется, какое именно соотношение правильное? И почему нет устойчивых тяжёлых ядер?

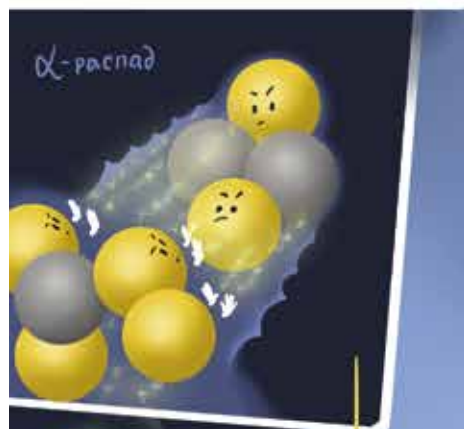
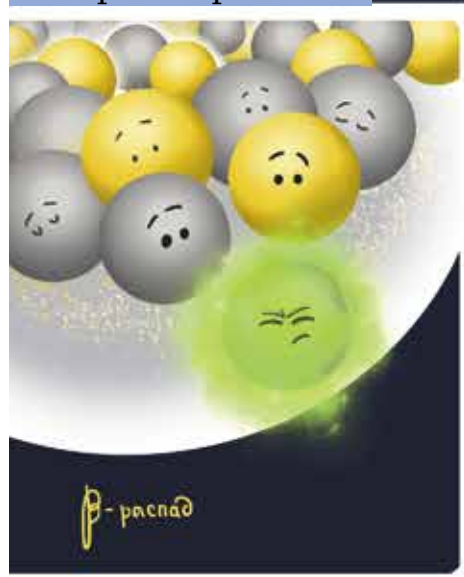
Попробуем ответить (приблизительно, потому что точного ответа на первый из этих вопросов нет даже у специалистов). Причиной распада ядер всегда, конечно, оказывается недостаточно крепкая связь нуклонов, которые держатся друг за дружку ядерными силами. «Отбившийся от стада», недостаточно крепко удерживаемый нейтрон норовит распасться, превратиться в протон с электроном (бета-распад, слабое взаимодействие); а если слишком много протонов, они разламывают ядро на части электрическим отталкиванием (альфа-распад или раскол ядра на крупные части)¹. Но чем же спасёт замена части протонов нейтронами или, наоборот, почему от этого ядро станет более устойчивым? Ведь сильное взаимодействие вроде бы не различает протоны и нейтроны, сильные силы действуют на них одинаково...

Ну, во-первых, это не совсем так. Действительно, ядерные силы между двумя протонами и между двумя нейтронами совершенно одинаковы. Но вот протон к нейтрону притягивается чуть-чуть сильнее, чем одинаковые нуклоны друг к другу.

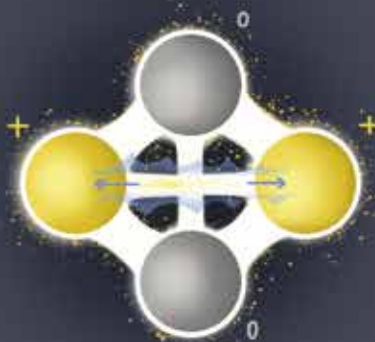
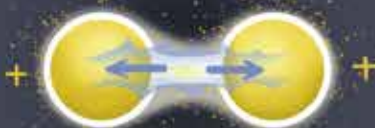
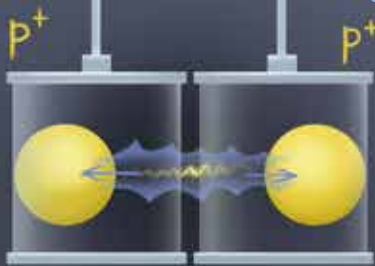
Во-вторых, жизнь нуклонов в ядре организована хоть и гораздо сложнее, но всё-таки похоже на жизнь электронов в атоме: у них тоже есть «этажи» с «комнатами», и в одной комнате могут жить не больше двух нуклонов каждого вида². То есть, например, два протона и два нейтрона ещё прекрасно могут все дружно жить в самой нижней, самой лучшей «комнате» (узнаёте? – это и есть ядро гелия, очень проч-

¹А может быть, один из протонов тоже «воспользуется» слабым взаимодействием и превратится в нейтрон – путём захвата электрона или излучения позитрона.

²Этот факт, как и разница между $n-n$ и $p-p$ взаимодействиями – следствие принципа запрета Паули, который мы здесь обсуждать не будем.

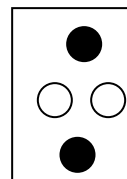


ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ



ное ядро!). А, скажем, один из трёх нейтронов всегда обречён уйти в другую «комнату», на следующий «этаж», и если он будет скучать там наверху один, без протона – ядерных сил не хватит, чтобы его удержать от распада. Впрочем, два нейтрона без протона в одной нижней «комнате» тоже не спасутся от слабого взаимодействия – не бывает ядра из двух нейтронов.

В-третьих, электрические силы убывают с расстоянием. Если расстояние между протонами увеличить в 2 раза, они станут отталкиваться в 4 раза слабее. А если расстояние увеличить в три раза – сила отталкивания уменьшится в 9 раз. И так далее. Так что нейтроны нужны для «разбавления» протонов. В гелии-4, например, два протона находятся «на дальних концах ядра», а два нейтрона – между ними. А в более тяжёлых ядрах протоны и нейтроны образуют пёструю, довольно близкую к шахматной, мозаику.



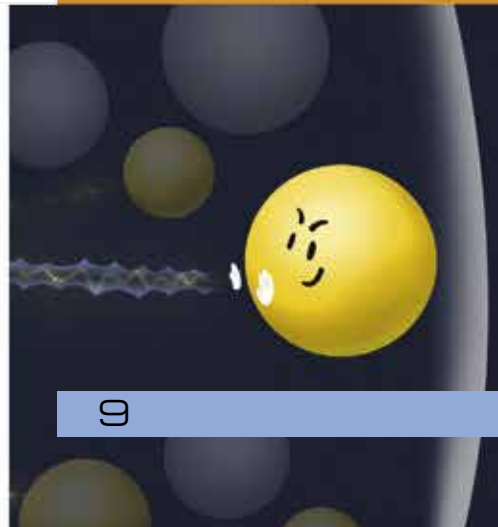
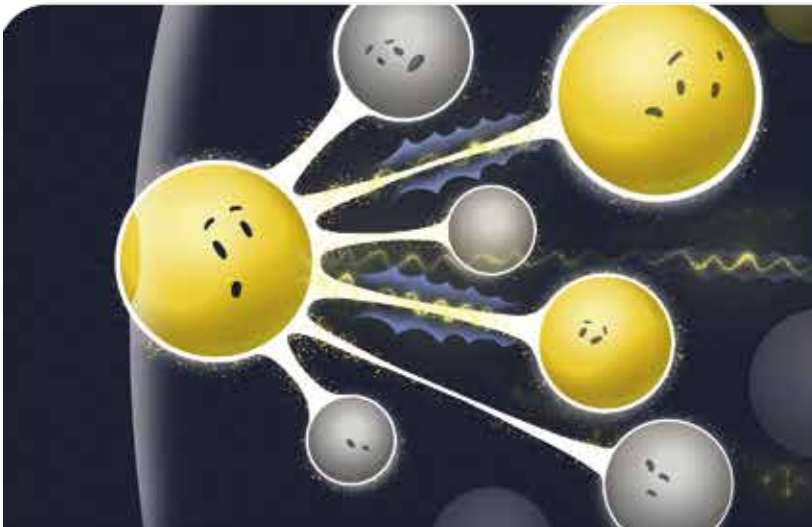
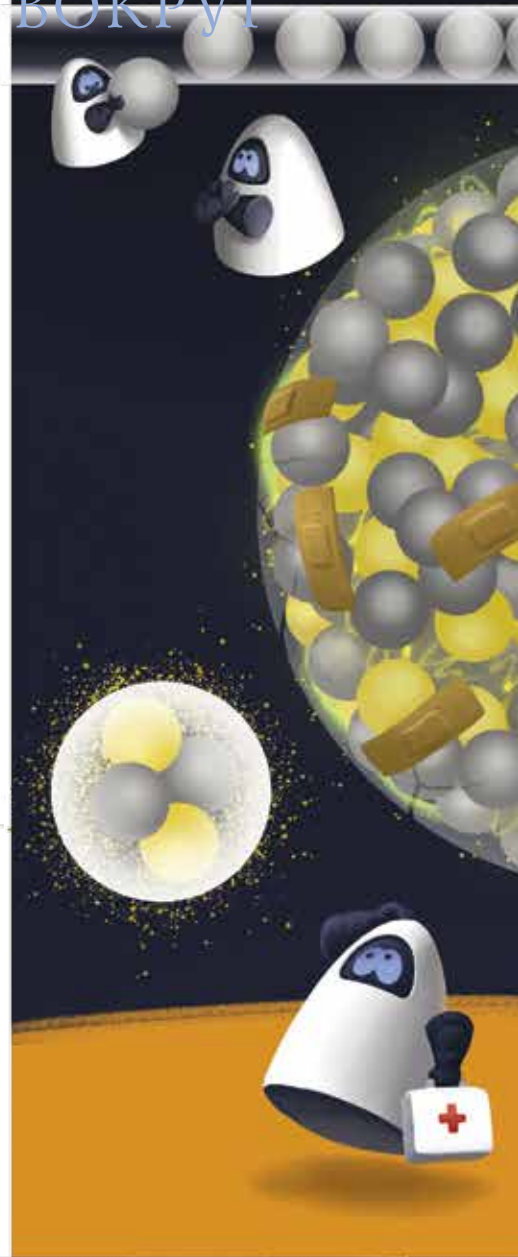
Почему же тогда нельзя при том же количестве протонов взять в два, в три, в пять раз больше нейтронов? Ну и что, что они друг к другу притягиваются слабее, чем к протонам, зато их будет очень много, и все вместе они уж будут крепко друг друга держать... – чем плохо?

Плохо тем, что ядро получится слишком большое. И вот тут нужно сказать про ещё одно очень важное свойство сильного (да и слабого тоже) взаимодействия: оно короткодействующее. Электрические силы, если отойти в два раза дальше, убывают в 4 раза – с какого расстояния ни начинай: хоть с микрона, хоть с метра... Сильные – тоже ведут себя похожим образом, но только до тех пор, пока расстояния меньше 10^{-15} м (одной тысячемиллиардной миллиметра) – это размер небольшого ядра. А как только расстояние между нуклонами становится больше этой величины, сила притяжения между ними начинает падать со страшной быстротой, и не успеете вы отойти ещё в два раза дальше – она уже уменьшится не в 4, а, скажем, в тысячу раз. То есть если две частицы находятся друг от друга дальше, чем эти самые 10^{-15} м, то сильное взаимодействие между ними практически равно нулю. А электрическое – вовсе нет!

Поэтому добавление каждого нового протона увеличит электрическое отталкивание, действующее на протон «на другом краю ядра», а добавление новых нейтронов, начиная с некоторого их количества, никак не увеличит действующее на него сильное притяжение!

Итак, пока ядро небольшое, добавить к уже готовому устойчивому ядру один протон, может, и можно, но страшно: вдруг новое добавленное отталкивание пересилит новое притяжение, и ядро развалится? А добавить протон вместе с нейтроном – гораздо спокойнее: вдвоём они уж наверно будут притягивать любой дальний протон сильнее, чем отталкивать. И поскольку каждая новая пара протон-нейтрон притягивает чуть сильнее, чем отталкивает, с увеличением числа нуклонов ядро становится только прочнее.

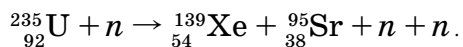
Но это только до тех пор, пока размер ядра не превысит радиус действия сильных сил. А дальше добавление каждого нового протона всё сильнее портит ситуацию: электрическое отталкивание из-за него усиливается, а сильное притяжение уже увеличиться не может, – сколько новых нейтронов ни добавляй, они оказываются слишком далеко! Приходится всё-таки напихивать в ядро всё больше нейтронов, но не чтобы увеличить притяжение, а чтобы хоть чуть-чуть уменьшить отталкивание, «разбавив» протоны нейтронами и отодвинув их подальше друг от друга. Понятно, что это удаётся только отчасти – ведь если протонов мало, нейтроны норовят распасться из-за слабых сил. И чем больше такое «рыхлое» ядро, тем хуже оно держится.





Из всей этой истории люди научились извлекать большую практическую пользу – а также большой вред... Дело в том, что, когда большое и непрочное ядро разваливается на более прочные части, высвобождается энергия. Это вообще случается, когда какая-то вещь меняет своё положение на более надёжное и устойчивое. Например, если книжка упала со стола на пол – раздаётся хлопок: это энергия, выделившаяся при падении книжки, передалась воздуху и создала звуковую волну. К сожалению, эта энергия может ещё потратиться на разрывание листов бумаги. Вода в водопаде так разгоняется при падении, что её энергии хватает на вращение тяжёлых турбин гидроэлектростанции. Вот и энергию, выделяющуюся при радиоактивном распаде, можно использовать. Это и делается в ядерных реакторах: энергия распадающихся ядер нагревает воду, вращает турбины, создаёт электрический ток или приводит в действие двигатель подводной лодки...

Только вот ждать, когда ядра сами собой распадутся, людям неудобно: работа реактора ведь тогда будет не очень предсказуемой. Поэтому непрочным ядрам, которые так, может, прожили бы ещё десяток миллионов лет, помогают распасться, легонько стукая по ним нейтроном. Это – вынужденное деление. А чтобы процесс удобно было контролировать, да к тому же не пришлось всё время добывать нейтроны для обстрела, выбирают такие ядра, в которых при вынужденном делении образуются новые свободные нейтроны. Например, подходит изотоп урана-235:



Видите – в ядро попал один нейтрон, а после распада вылетело уже два. Да ещё оба осколка – нестабильные изотопы, при их распаде ещё пара нейтронов может вылететь. Высвобождающиеся при реакции нейтроны попадают в следующее ядро, вызывая его деление. Это называется *цепной реакцией*. Регулируя количество (и скорость) летающих по реактору нейтронов, можно управлять его работой – увеличивать или уменьшать количество распадов. Тот же принцип цепной реакции деления, только без особенного контроля, работает и в атомной бомбе.

Тяжёлые ядра, распадаясь, выделяют энергию, потому что переходят в более устойчивое состояние – в виде меньших ядер с более плотной и прочной упаковкой. Но у лёгких ядер, как мы видели, наоборот – чем больше ядро, тем прочнее. Поэтому энергию можно получать и при соединении – слиянии – лёгких ядер. И даже такой способ гораздо эффективнее – при той же массе топлива энергии выделяется намного больше. Вот только реализовать этот способ гораздо сложнее: если тяжёлые ядра и сами по себе распадаются (им надо только помочь и немного их «организовать»), то лёгкие ядра сами по себе не соединяются – им мешает электрическое отталкивание, ведь у них заряд одного знака. Чтобы «слиться», им надо сначала сблизиться друг с другом на очень маленькое расстояние, на котором начнут действовать ядерные (сильные) силы. Для этого их надо очень сильно разогнать друг навстречу другу. Разогнать и столкнуть пару ядер – для нас не проблема, но нужно, чтобы таких пар было много... Такое возможно, только если очень сильно нагреть вещество (до десятков или сотен миллионов градусов!). А справляться с такой температурой мы не умеем – в какой контейнер положить такое горячее топливо, чтобы не расплавились стенки?... Да и контролировать ситуацию при такой температуре очень трудно. Поэтому пока человечество научилось использовать энергию термоядерного синтеза только в водородной бомбе. Но, может быть, ещё научимся...

То, что пока не получается у людей, прекрасно удаётся звёздам! Там ведь как раз подходящая температура и очень много лёгких ядер. Собственно, звёзды – это гигантские термоядерные реакторы, в которых происходит синтез гелия из водорода, углерода из гелия, железа из углерода... Они оттого и светятся – это выделяется освобождающаяся при ядерных реакциях энергия. А попутно в небольших количествах образуются – за компанию – и более тяжёлые ядра. Все ядра атомов тяжелее гелия образовались в звёздах! Так что вещество, из которого все мы состоим, когда-то было в недрах какой-то звезды...

Художник Мария Усеинова

