

Квантовая физика

Данное методическое пособие написано для одиннадцатиклассников. Оно охватывает следующие темы единого госэкзамена по физике.

- *Гипотеза Планка о квантах. Фотоэффект. опыты А. Г. Столетова. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.*
- *Фотоны. Энергия фотона. Импульс фотона.*
- *Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц. Корпускулярно-волновой дуализм. Дифракция электронов.*
- *Планетарная модель атома. Постулаты Бора. Линейчатые спектры. Лазер.*
- *Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение. Закон радиоактивного распада.*
- *Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы.*
- *Ядерные реакции. Деление и синтез ядер.*

Пособие содержит также некоторый дополнительный материал, не входящий в кодификатор ЕГЭ (но входящий в школьную программу!). Этот материал позволяет лучше понять рассматриваемые темы.

Содержание

1	Фотоэффект	3
1.1	Опыты Столетова	3
1.2	Зависимость фототока от напряжения	4
1.3	Законы фотоэффекта	5
1.4	Трудности классического объяснения фотоэффекта	6
1.5	Гипотеза Планка о квантах	7
1.6	Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта	7
2	Фотоны	10
2.1	Энергия фотона	10
2.2	Импульс фотона	10
2.3	Давление света	11
2.4	Двойственная природа света	12
3	Корпускулярно-волновой дуализм	14
3.1	Гипотеза де Бройля	14
3.2	Дифракция электронов	15
3.3	Соотношение неопределённостей	16

4	Линейчатые спектры	17
4.1	Спектр испускания	17
4.2	Спектр поглощения	18
4.3	Спектральный анализ	19
5	Строение атома	20
5.1	Модель Томсона	20
5.2	Опыты Резерфорда	20
5.3	Планетарная модель атома	21
6	Атом Бора	23
6.1	Постулаты Бора	23
6.2	Атом водорода	25
6.3	Достоинства и недостатки теории Бора	28
7	Лазер	29
7.1	Индукцированное излучение	29
7.2	Инверсная населённость	30
7.3	Трёхуровневая система рубина	31
7.4	Устройство лазера	32
8	Строение ядра	33
8.1	Нуклонная модель ядра	33
8.2	Изотопы	34
9	Радиоактивность	35
9.1	Виды радиоактивных излучений	36
9.2	Радиоактивные превращения	36
9.3	Закон радиоактивного распада	38
10	Энергия связи ядра	40
10.1	Ядерные силы	40
10.2	Атомная единица массы	41
10.3	Удельная энергия связи	43
10.4	Насыщение ядерных сил	44
11	Ядерные реакции	45
11.1	Энергетический выход ядерной реакции	46
11.2	Деление ядер	48
11.3	Цепная ядерная реакция	51
11.4	Термоядерная реакция	51

1 Фотоэффект

Фотоэффект — это выбивание электронов из вещества падающим светом. Явление фотоэффекта было открыто Генрихом Герцем в 1887 году в ходе его знаменитых экспериментов по излучению электромагнитных волн.

Напомним, что Герц использовал специальный разрядник (вibrator Герца) — разрезанный пополам стержень с парой металлических шариков на концах разреза. На стержень подавалось высокое напряжение, и в промежутке между шариками проскакивала искра. Так вот, Герц обнаружил, что при облучении шариков ультрафиолетовым светом проскакивание искры облегчалось!

Герц, однако, был поглощён исследованием электромагнитных волн и не принял данный факт во внимание. Год спустя фотоэффект был независимо открыт русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Тщательные экспериментальные исследования, проведённые Столетовым в течение двух лет, позволили сформулировать основные законы фотоэффекта.

1.1 Опыты Столетова

В своих знаменитых экспериментах Столетов использовал фотоэлемент¹ собственной конструкции. Его схема изображена на рис. 1.

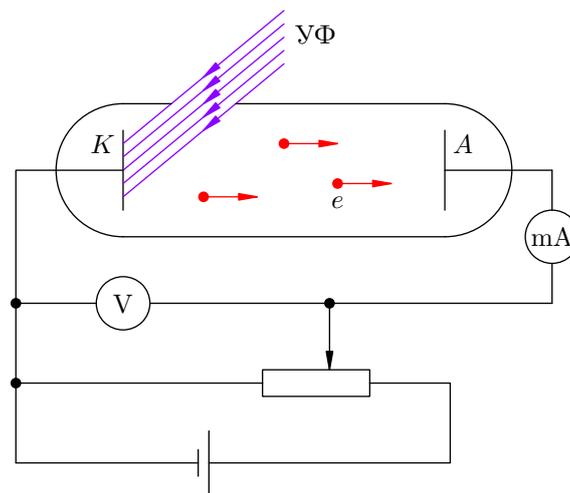


Рис. 1. Фотоэлемент Столетова

В стеклянную колбу, из которой выкачан воздух (чтобы не мешать лететь электронам), введены два электрода: цинковый катод K и анод A . На катод и анод подаётся напряжение, величину U которого можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром V .

Сейчас на катод подан «минус», а на анод — «плюс», но можно сделать и наоборот (и эта перемена знака — существенная часть опытов Столетова). Напряжению на электродах приписывается тот знак, который подан на анод². В данном случае, например, напряжение U положительно.

Катод освещается ультрафиолетовыми лучами $УФ$ через специальное кварцевое окошко, сделанное в колбе (стекло поглощает ультрафиолет, а кварц пропускает). Ультрафиолетовое излучение выбивает с катода электроны e , которые разгоняются напряжением U и летят на анод. Включённый в цепь миллиамперметр mA регистрирует электрический ток. Этот ток называется *фототоком*, а выбитые электроны, его создающие, называются *фотоэлектронами*.

¹ *Фотоэлементом* называется любое устройство, позволяющее наблюдать фотоэффект.

² Поэтому поданное на электроды напряжение U часто называют *анодным напряжением*.

В опытах Столетова можно независимо варьировать три величины: анодное напряжение, интенсивность света и его частоту. Начнём с напряжения.

1.2 Зависимость фототока от напряжения

Меняя величину и знак анодного напряжения, можно проследить, как меняется фототок. График этой зависимости, называемый *характеристикой фотоэлемента*, представлен на рис. 2.

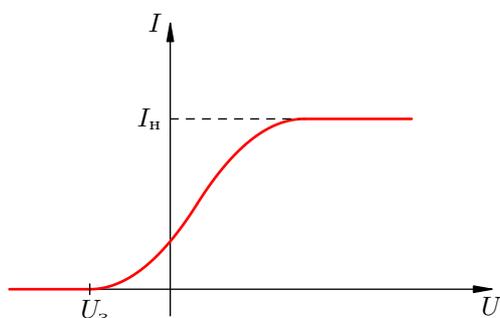


Рис. 2. Характеристика фотоэлемента

Давайте обсудим ход полученной кривой. Прежде всего заметим, что электроны вылетают из катода с различными скоростями и в разных направлениях; максимальную скорость, которую имеют фотоэлектроны в условиях опыта, обозначим v .

Если напряжение U отрицательно и велико по модулю, то фототок отсутствует. Это легко понять: электрическое поле, действующее на электроны со стороны катода и анода, является тормозящим (на катоде «плюс», на аноде «минус») и обладает столь большой величиной, что электроны не в состоянии долететь до анода. Начального запаса кинетической энергии не хватает — электроны теряют свою скорость на подступах к аноду и разворачиваются обратно на катод. Максимальная кинетическая энергия вылетевших электронов оказывается меньше, чем модуль работы поля при перемещении электрона с катода на анод:

$$\frac{mv^2}{2} < eU.$$

Здесь $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — его заряд.

Будем постепенно увеличивать напряжение, т. е. двигаться слева направо вдоль оси U из далёких отрицательных значений.

Поначалу тока по-прежнему нет, но точка разворота электронов становится всё ближе к аноду. Наконец, при достижении напряжения $U_з$, которое называется *задерживающим напряжением*, электроны разворачиваются назад в момент достижения анода (иначе говоря, электроны прибывают на анод с нулевой скоростью). Имеем:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_з. \quad (1)$$

Таким образом, *величина задерживающего напряжения позволяет определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.*

При небольшом превышении задерживающего напряжения появляется слабый фототок. Его формируют электроны, вылетевшие с максимальной кинетической энергией почти точно вдоль оси колбы (т. е. почти перпендикулярно катоду): теперь электронам хватает этой энергии, чтобы добраться до анода с ненулевой скоростью и замкнуть цепь. Остальные электроны, которые имеют меньшие скорости или полетели в сторону от анода, на анод не попадают.

При повышении напряжения фототок увеличивается. Анода достигает большее количество электронов, вылетающих из катода под всё большими углами к оси колбы. Обратите внимание, что фототок присутствует при нулевом напряжении!

Когда напряжение выходит в область положительных значений, фототок продолжает возрастать. Оно и понятно: электрическое поле теперь разгоняет электроны, поэтому всё большее их число получают шанс оказаться на аноде. Однако достигают анода пока ещё не все фотоэлектроны. Например, электрон, вылетевший с максимальной скоростью перпендикулярно оси колбы (т. е. вдоль катода), хоть и развернётся полем в нужном направлении, но не настолько сильно, чтобы попасть на анод.

Наконец, при достаточно больших положительных значениях напряжения ток достигает своей предельной величины I_n , называемой *током насыщения*, и дальше возрастать перестаёт. Почему? Дело в том, что напряжение, ускоряющее электроны, становится настолько велико, что анод захватывает вообще все электроны, выбитые из катода — в каком бы направлении и с какими бы скоростями они не начинали движение. Стало быть, дальнейших возможностей увеличиваться у фототока попросту нет — ресурс, так сказать, исчерпан.

1.3 Законы фотоэффекта

Величина I_n тока насыщения — это, по существу, количество электронов, выбиваемых из катода за одну секунду. Будем менять интенсивность света, не трогая частоту. Опыт показывает, что ток насыщения меняется пропорционально интенсивности света.

Первый закон фотоэффекта. Число электронов, выбиваемых из катода за секунду, пропорционально интенсивности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте).

Ничего неожиданного в этом нет: чем больше энергии несёт излучение, тем ощутимее наблюдаемый результат. Загадки начинаются дальше.

А именно, будем изучать зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты и интенсивности падающего света. Сделать это несложно: ведь в силу формулы (1) нахождение максимальной кинетической энергии выбитых электронов фактически сводится к измерению задерживающего напряжения.

Сначала меняем частоту излучения ν при фиксированной интенсивности. Получается такой график (рис. 3):

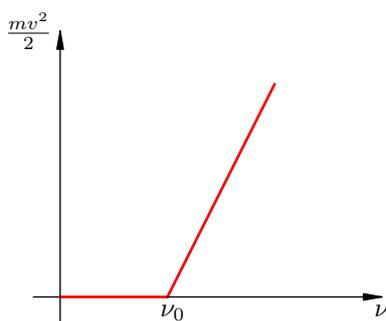


Рис. 3. Зависимость энергии фотоэлектронов от частоты света

Как видим, существует некоторая частота ν_0 , называемая *красной границей фотоэффекта*, разделяющая две принципиально разные области графика. Если $\nu < \nu_0$, то фотоэффекта нет. Если же $\nu > \nu_0$, то максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой.

Теперь, наоборот, фиксируем частоту и меняем интенсивность света. Если при этом $\nu < \nu_0$, то фотоэффект не возникает, какова бы ни была интенсивность! Не менее удивительный факт

обнаруживается и при $\nu > \nu_0$: максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов от интенсивности света не зависит.

Все эти факты нашли отражение во втором и третьем законах фотоэффекта.

Второй закон фотоэффекта. *Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.*

Третий закон фотоэффекта. *Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота света ν_0 , при которой фотоэффект ещё возможен. При $\nu < \nu_0$ фотоэффект не наблюдается ни при какой интенсивности света.*

1.4 Трудности классического объяснения фотоэффекта

Как можно было бы объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики и волновых представлений о свете?

Известно, что для вырывания электрона из вещества требуется сообщить ему некоторую энергию A , называемую *работой выхода* электрона. В случае свободного электрона в металле это работа по преодолению поля положительных ионов кристаллической решётки, удерживающего электрон на границе металла. В случае электрона, находящегося в атоме, работа выхода есть работа по разрыву связи электрона с ядром.

В переменном электрическом поле световой волны электрон начинает совершать колебания. И если энергия колебаний превысит работу выхода, то электрон будет вырван из вещества.

Однако в рамках таких представлений невозможно понять второй и третий законы фотоэффекта. Действительно, почему кинетическая энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности излучения? Ведь чем больше интенсивность, тем больше напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, тем больше сила, действующая на электрон, тем больше энергия его колебаний и с тем большей кинетической энергией электрон вылетит из катода. Логично? Логично. Но эксперимент показывает иное.

Далее, откуда берётся красная граница фотоэффекта? Чем «провинились» низкие частоты? Казалось бы, с ростом интенсивности света растёт и сила, действующая на электроны; поэтому даже при низкой частоте света электрон рано или поздно будет вырван из вещества — когда интенсивность достигнет достаточно большого значения. Однако красная граница ставит жёсткий запрет на вылет электронов при низких частотах падающего излучения.

Кроме того, неясна *безынерционность* фотоэффекта. Именно, при освещении катода излучением сколь угодно слабой интенсивности (с частотой выше красной границы) фотоэффект начинается *мгновенно* — в момент включения освещения. Между тем, казалось бы, электронам требуется некоторое время для «расшатывания» связей, удерживающих их в веществе, и это время «раскачки» должно быть тем больше, чем слабее падающий свет. Аналогия такая: чем слабее вы толкаете качели, тем дольше придётся их раскачивать до заданной амплитуды. Выглядит опять-таки логично, но опыт — единственный критерий истины в физике! — этим доводам противоречит.

Так на рубеже XIX и XX столетий в физике возникла тупиковая ситуация: электродинамика, предсказавшая существование электромагнитных волн и великолепно работающая в диапазоне радиоволн, отказалась объяснять явление фотоэффекта.

Выход из этого тупика был найден Альбертом Эйнштейном в 1905 году. Он предложил простое уравнение, описывающее фотоэффект. Все три закона фотоэффекта оказались следствиями уравнения Эйнштейна.

Главная заслуга Эйнштейна состояла в отказе от попыток истолковать фотоэффект с позиций классической электродинамики. Эйнштейн привлёк к делу смелую гипотезу о квантах, высказанную Максом Планком пятью годами ранее.

1.5 Гипотеза Планка о квантах

Классическая электродинамика отказалась работать не только в области фотоэффекта. Она также дала серьёзный сбой, когда её попытались использовать для описания излучения нагретого тела (так называемого теплового излучения).

Суть проблемы состояла в том, что простая и естественная электродинамическая модель теплового излучения приводила к бессмысленному выводу: любое нагретое тело, непрерывно излучая, должно постепенно потерять всю свою энергию и остыть до абсолютного нуля. Как мы прекрасно знаем, ничего подобного не наблюдается.

В ходе решения этой проблемы Макс Планк высказал свою знаменитую гипотезу.

Гипотеза о квантах. *Электромагнитная энергия излучается и поглощается не непрерывно, а отдельными неделимыми порциями — квантами. Энергия кванта пропорциональна частоте излучения:*

$$E = h\nu. \quad (2)$$

Соотношение (2) называется *формулой Планка*, а коэффициент пропорциональности h — *постоянной Планка*.

Принятие этой гипотезы позволило Планку построить теорию теплового излучения, прекрасно согласующуюся с экспериментом. Располагая известными из опыта спектрами теплового излучения, Планк вычислил значение своей постоянной:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (3)$$

Успешность гипотезы Планка наводила на мысль, что законы классической физики неприменимы к малым частицам вроде атомов или электронов, а также к явлениям взаимодействия света и вещества. Подтверждением данной мысли как раз и послужило явление фотоэффекта.

1.6 Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Гипотеза Планка говорила о дискретности *излучения* и *поглощения* электромагнитных волн, то есть о прерывистом характере взаимодействия света с веществом. При этом Планк считал, что *распространение* света — это непрерывный процесс, происходящий в полном соответствии с законами классической электродинамики.

Эйнштейн пошёл ещё дальше: он предположил, что *свет в принципе обладает прерывистой структурой: не только излучение и поглощение, но также и распространение света происходит отдельными порциями — квантами, обладающими энергией $E = h\nu$.*

Планк рассматривал свою гипотезу лишь как математический трюк и не решился опровергнуть электродинамику применительно к микромиру. Физической реальностью кванты стали благодаря Эйнштейну.

Кванты электромагнитного излучения (в частности, кванты света) стали впоследствии называться *фотонами*. Таким образом, свет состоит из особых частиц — фотонов, движущихся в вакууме со скоростью c . Каждый фотон монохроматического света, имеющего частоту ν , несёт энергию $h\nu$.

Фотоны могут обмениваться энергией и импульсом³ с частицами вещества; в таком случае мы говорим о *столкновении* фотона и частицы. В частности, происходит столкновение фотонов с электронами металла катода.

Поглощение света — это поглощение фотонов, то есть *неупругое* столкновение фотонов с частицами (атомами, электронами). Поглощаясь при столкновении с электроном, фотон передаёт ему свою энергию. В результате электрон получает кинетическую энергию мгновенно, а не постепенно, и именно этим объясняется безынерционность фотоэффекта.

³Об импульсе фотона речь пойдёт в следующем разделе.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта есть не что иное, как закон сохранения энергии. На что идёт энергия фотона $h\nu$ при его неупругом столкновении с электроном? Она расходуется на совершение работы выхода A по извлечению электрона из вещества и на придание электрону кинетической энергии $mv^2/2$:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (4)$$

Слагаемое $mv^2/2$ оказывается *максимальной* кинетической энергией фотоэлектронов. Почему максимальной? Этот вопрос требует небольшого пояснения.

Электроны в металле могут быть свободными и связанными. Свободные электроны «гуляют» по всему металлу, связанные электроны «сидят» внутри своих атомов. Кроме того, электрон может находиться как вблизи поверхности металла, так и в его глубине.

Ясно, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона получится в том случае, когда фотон попадёт на свободный электрон в поверхностном слое металла — тогда для выбивания электрона достаточно одной лишь работы выхода.

Во всех других случаях придётся затрачивать дополнительную энергию — на вырывание связанного электрона из атома или на «протаскивание» глубинного электрона к поверхности. Эти лишние затраты приведут к тому, что кинетическая энергия вылетевшего электрона окажется меньше.

Замечательное по простоте и физической ясности уравнение (4) содержит в себе всю теорию фотоэффекта. Давайте посмотрим, какое объяснение получают законы фотоэффекта с точки зрения уравнения Эйнштейна.

1. Число выбиваемых электронов пропорционально числу поглощённых фотонов. С увеличением интенсивности света количество фотонов, падающих на катод за секунду, возрастает. Стало быть, пропорционально возрастает число поглощённых фотонов и, соответственно, число выбитых за секунду электронов.
2. Выразим из формулы (4) кинетическую энергию:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A.$$

Действительно, кинетическая энергия выбитых электронов линейно растёт с частотой и не зависит от интенсивности света.

Зависимость кинетической энергии от частоты имеет вид уравнения прямой, проходящей через точку $(A/h, 0)$. Этим полностью объясняется ход графика на рис. 3.

3. Для того, чтобы начался фотоэффект, энергии фотона должно хватить как минимум на совершение работы выхода: $h\nu \geq A$. Наименьшая частота ν_0 , определяемая равенством

$$h\nu_0 = A,$$

как раз и будет красной границей фотоэффекта. Как видим, красная граница фотоэффекта $\nu_0 = A/h$ определяется только работой выхода, т. е. зависит лишь от вещества облучаемой поверхности катода.

Если $\nu < \nu_0$, то фотоэффекта не будет — сколько бы фотонов за секунду не падало на катод. Следовательно, интенсивность света роли не играет; главное — хватает ли отдельному фотону энергии, чтобы выбить электрон.

Уравнение Эйнштейна (4) даёт возможность экспериментального нахождения постоянной Планка. Для этого надо предварительно определить частоту излучения и работу выхода материала катода, а также измерить кинетическую энергию фотоэлектронов.

В ходе таких опытов было получено значение h , в точности совпадающее с (3). Такое совпадение результатов двух независимых экспериментов — на основе спектров теплового излучения и уравнения Эйнштейна для фотоэффекта — означало, что обнаружены совершенно новые «правила игры», по которым происходит взаимодействие света и вещества. В этой области классическая физика в лице механики Ньютона и электродинамики Максвелла уступает место *квантовой физике* — теории микромира, построение которой продолжается и сегодня.

2 ФОТОНЫ

В результате исследования явлений, связанных с взаимодействием света и вещества (тепловое излучение и фотоэффект), физики пришли к выводу, что свет состоит из отдельных порций энергии — *фотонов*. Излучение света, его распространение и поглощение происходит строго этими порциями.

Фотоны обладают энергией и импульсом и могут обмениваться ими с частицами вещества (скажем, с электронами или атомами). Как вы помните, такой обмен импульсом и энергией мы называем *столкновением* фотона и частицы.

При упругом столкновении фотон меняет направление движения — свет рассеивается. При неупругом столкновении фотон поглощается отдельной частицей или совокупностью частиц вещества — так происходит поглощение света.

Словом, фотон ведёт себя как частица и поэтому — наряду с электроном, протоном и некоторыми другими частицами — причислен к разряду *элементарных частиц*.

2.1 Энергия фотона

Выражение для энергии фотона с частотой ν мы уже знаем:

$$E = h\nu. \quad (5)$$

Часто бывает удобно работать не с обычной частотой ν , а с циклической частотой $\omega = 2\pi\nu$. Тогда вводят другую постоянную Планка «аш с чертой»:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Выражение (5) для энергии фотона примет вид:

$$E = \hbar\omega.$$

Фотон движется в вакууме со скоростью света c и потому является *релятивистской* частицей: описывая фотон, мы должны привлекать формулы теории относительности. А там имеется такая формула для энергии тела массы m , движущегося со скоростью v :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

Если предположить, что $m \neq 0$, то формула (6) приводит к бессмысленному заключению: энергия фотона должна быть бесконечной. Чтобы избежать этого противоречия, остаётся признать, что *масса фотона равна нулю*. Формула (6) позволяет сделать и более общий вывод: *только безмассовая частица может двигаться со скоростью света*.

2.2 Импульс фотона

Обладая энергией, фотон должен обладать и импульсом. Действительно, важнейшая формула теории относительности даёт связь энергии и импульса частицы:

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4. \quad (7)$$

Для фотона, имеющего нулевую массу, эта формула сводится к простому соотношению:

$$E = pc.$$

Отсюда для импульса фотона получаем:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}. \quad (8)$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.

Учитывая, что отношение c/ν есть длина волны λ , формулу (8) можно переписать так:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (9)$$

В видимом диапазоне наименьшими значениями энергии и импульса обладают фотоны красного света — у них самая маленькая частота (и самая большая длина волны). При движении в сторону фиолетового участка спектра энергия и импульс фотона линейно возрастают с частотой.

2.3 Давление света

Свет оказывает давление на освещаемую поверхность. Такой вывод был сделан Максвеллом из теоретических соображений и получил экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах П. Н. Лебедева. Если понимать свет как поток фотонов, обладающих импульсом, то можно легко объяснить давление света и вывести формулу Максвелла.

Предположим, что на некоторое тело падает свет частоты ν . Лучи направлены перпендикулярно поверхности тела; площадь освещаемой поверхности равна S (рис. 4).

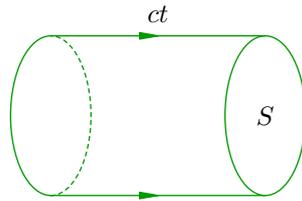


Рис. 4. Давление света

Пусть n — концентрация фотонов падающего света, то есть число фотонов в единице объёма. За время t на нашу поверхность попадают фотоны, находящиеся внутри цилиндра высотой ct . Их число равно:

$$N = nV = nSct.$$

При падении света на поверхность тела часть световой энергии отражается, а часть — поглощается. Пусть r — коэффициент отражения света; величина $r < 1$ показывает, какая часть световой энергии отражается от поверхности. Соответственно, величина $1 - r$ — это доля падающей энергии, поглощаемая телом.

Как мы теперь знаем, энергия света пропорциональна числу фотонов. Поэтому можно написать, какое количество фотонов (из общего числа N) отразится от поверхности, а какое — поглотится ею:

$$N_{\text{отр}} = rN, \quad N_{\text{погл}} = (1 - r)N.$$

Импульс каждого падающего фотона равен $p = h\nu/c$. Поглощённый фотон испытывает неупругое столкновение с телом и передаёт ему импульс p . Отражённый фотон после упругого столкновения меняет направление своего импульса на противоположное, и поэтому импульс, переданный телу отражённым фотоном, равен $2p$.

Таким образом, от каждого фотона, входящего в световой поток, тело получает некоторый импульс. Вот простая и очевидная причина того, что свет оказывает давление на освещаемую поверхность.

Суммарный импульс, полученный телом от N падающих фотонов, равен:

$$P = 2p \cdot N_{\text{отр}} + p \cdot N_{\text{погл}} = 2prN + p(1 - r)N = (1 + r)pN.$$

На нашу поверхность S действует сила F , равная импульсу, полученному телом в единицу времени:

$$F = \frac{P}{t} = (1 + r)p \frac{N}{t} = (1 + r) \frac{h\nu}{c} \frac{nSct}{t} = (1 + r)h\nu nS.$$

Давление света есть отношение этой силы к площади освещаемой поверхности:

$$p_{\text{света}} = \frac{F}{S} = (1 + r)h\nu n. \quad (10)$$

Выражение $h\nu n$ имеет простой физический смысл: будучи произведением энергии фотона на число фотонов в единице объёма, оно равно энергии света в единице объёма, то есть объёмной плотности энергии w . Тогда соотношение (10) приобретает вид:

$$p_{\text{света}} = (1 + r)w.$$

Это и есть формула для давления света, теоретически выведенная Максвеллом (в рамках классической электродинамики) и экспериментально проверенная в опытах Лебедева.

2.4 Двойственная природа света

В результате рассмотрения всей совокупности оптических явлений возникает естественный вопрос: что же такое свет? Непрерывно распределённая в пространстве электромагнитная волна или поток отдельных частиц — фотонов? Теория и эксперименты приводят к заключению, что оба ответа должны быть утвердительными.

1. Явления интерференции и дифракции света, характерные для любых волновых процессов, не оставляют сомнений в том, что свет есть форма волнового движения материи. Таким образом, мы должны признать: да, *свет имеет волновую природу*, свет — это электромагнитная волна.
2. Однако явления взаимодействия света и вещества (например, фотоэффект) указывают на то, что свет ведёт себя как поток отдельных частиц. Эти частицы — фотоны — ведут, так сказать, самостоятельную образ жизни, обладают энергией и импульсом, участвуют во взаимодействиях с атомами и электронами. Излучение света — это рождение фотонов. Распространение света — это движение фотонов в пространстве. Отражение и поглощение света — это соответственно упругие и неупругие столкновения фотонов с частицами вещества.

Все попытки истолковать указанные явления излучения и поглощения света в рамках волновых представлений классической физики окончились неудачей. Оставалось лишь согласиться с тем, что *свет имеет корпускулярную⁴ природу*, свет — это совокупность фотонов, мчащихся в пространстве.

Таким образом, свет имеет двойственную, *корпускулярно-волновую* природу — он может проявлять себя то так, то эдак. В одних явлениях (интерференция, дифракция) на передний план выходит волновая природа, и свет ведёт себя в точности как волна. Но в других явлениях (фотоэффект) доминирует корпускулярная природа, и свет ведёт себя подобно потоку частиц.

⁴От латинского слова *corpusculum* — маленькое тельце, частица.

Странно всё это, не правда ли? Но что поделать — так устроена природа. Мы, люди, живём среди макроскопических тел, и наше воображение оказалось не способным полноценно представить себе явления микромира.

Природа, однако, неизмеримо шире и богаче того, что может вместить в себя человеческое воображение. Признав это и руководствуясь не столько собственным воображением, сколько наблюдениями, результатами экспериментов и весьма изощрённой математикой, люди начали успешно создавать квантовую теорию микроскопических явлений и процессов.

О некоторых парадоксальных на первый взгляд — но тем не менее подтверждённых экспериментально! — выводах квантовой теории мы поговорим в следующем разделе.

3 Корпускулярно-волновой дуализм

*Корпускулярно-волновой дуализм*⁵ — это физический принцип, утверждающий, что любой объект природы может вести себя и как частица, и как волна.

С первым проявлением этого принципа мы столкнулись в предыдущем листке, когда говорили о двойственной, корпускулярно-волновой природе света. В явлениях интерференции и дифракции свет демонстрирует свою волновую природу. В явлении фотоэффекта свет выступает как дискретный поток частиц — фотонов.

Является ли свет каким-то особым объектом нашего мира, таким, что подобный дуализм присущ только ему? Или, быть может, корпускулярно-волновой дуализм — это свойство вообще всех материальных объектов, просто впервые обнаружен он был для света?

3.1 Гипотеза де Бройля

Идея об универсальной двойственности корпускулярных и волновых свойств всех объектов природы была впервые высказана Луи де Бройлем (в 1924 году) в качестве гипотезы о волновых свойствах частиц.

Итак, мы знаем, что свету с частотой ν и длиной волны λ соответствуют частицы — фотоны, обладающие энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h/\lambda$. Де Бройль, в сущности, постулировал обратное.

Гипотеза де Бройля. *Движению каждой частицы соответствует распространение некоторой волны. Частота и длина этой волны определяются энергией и импульсом частицы:*

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad \lambda = \frac{h}{p}. \quad (11)$$

Точно так же, любой волне с частотой ν и длиной волны λ отвечают частицы с энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h/\lambda$.

Чтобы лучше осмыслить гипотезу де Бройля, давайте обсудим дуализм «волна–частица» на примере электромагнитного излучения.

В случае электромагнитных волн мы имеем следующую закономерность. По мере увеличения длины волны всё легче наблюдать волновые свойства излучения и всё труднее — корпускулярные. И наоборот, чем меньше длина волны, тем ярче выражены корпускулярные свойства излучения и тем труднее наблюдать его волновые свойства. Изменение соотношения корпускулярных и волновых свойств хорошо прослеживается при движении по известной вам шкале электромагнитных волн.

- *Радиоволны.* Длины волн здесь настолько велики, что корпускулярные свойства излучения практически не проявляются. Волновые свойства в этом диапазоне абсолютно доминируют.

Длины волн могут составлять несколько метров или даже километров, так что волновая природа проявляется «сама собой» — радиоволны в процессе дифракции запросто огибают дома или горы. Излучение радиоволн и их взаимодействие с материальными объектами отлично описывается в рамках классической электродинамики.

- *Видимый свет и ультрафиолет.* Это своего рода «переходная область»: в оптике мы можем наблюдать как волновые свойства света, так и корпускулярные.

Однако в обоих случаях надо постараться. Так, длины волн видимого света много меньше размеров окружающих нас тел, поэтому в опытах по интерференции или дифракции

⁵Слово *дуализм* означает *двойственность*.

света нужно создавать специальные условия (малость щелей или отверстий, удалённость экрана). В свою очередь, термин «красная граница фотоэффекта» также подчёркивает пограничность данного диапазона: фотоэффект начинается лишь при переходе через красную границу.

- *Рентгеновское и гамма-излучение.* Длины волн очень малы, и наблюдать волновые свойства излучения весьма затруднительно. Так, верхняя граница длин волн рентгеновского излучения составляет 10 нм; это лишь на два порядка превышает размер атома. Ясно, что дифракцию на «обычных» препятствиях при такой длине волны наблюдать невозможно. Однако в рентгеновский диапазон входят длины волн порядка размера атома и межатомных расстояний в кристалле (0,1 нм). Поэтому дифракция рентгеновских лучей наблюдается на «естественных» дифракционных решётках — а именно, на кристаллических решётках твёрдых тел⁶.

Энергия квантов в рентгеновском и гамма-диапазоне настолько велика, что излучение ведёт себя почти стопроцентно как поток частиц.

Рассуждая по аналогии с электромагнитными волнами, можно заключить, что и частица будет проявлять волновые свойства тем лучше, чем больше её длина волны де Бройля (в масштабах данной ситуации).

Так, мы совсем не наблюдаем волновых свойств у окружающих нас тел. (Видели вы, например, интерференцию движущихся автомобилей?) А почему? Давайте посчитаем длину дебройлевской волны объекта массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 1} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ м.}$$

Это на 25 порядков меньше размера атома. Воображение отказывается представить себе столь малую величину. Разумеется, никакого волнового поведения у нашего объекта при таких условиях не обнаруживается — он стопроцентно ведёт себя как «частица», то есть как материальная точка классической механики.

3.2 Дифракция электронов

Совсем другое дело — электрон. Масса электрона равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, и столь малое значение массы (а стало быть, и импульса в формуле $\lambda = h/p$) может дать длину волны де Бройля, достаточную для экспериментального обнаружения волновых свойств.

И вот оказывается, что электроны с энергией 100 эВ (при такой энергии становится несущественным хаотическое тепловое движение электронов, и электронный пучок можно считать когерентным) имеют дебройлевскую длину волны примерно 0,1 нм — это как раз порядка размера атома и расстояний между атомами в кристаллической решётке! Опыт по наблюдению дифракции рентгеновских лучей на кристаллических структурах уже имелся, поэтому оставалось направить на кристаллическую решётку пучок электронов.

Впервые это было сделано в знаменитом эксперименте американских физиков Дэвиссона и Джермера (1927 год). Дифракция электронов на кристаллах была обнаружена! Как и ожидалось, полученная дифракционная картина имела тот же характер, что и при дифракции на кристаллической решётке рентгеновских лучей.

Впоследствии волновые свойства были обнаружены и у более крупных частиц: протонов, нейтронов, атомов и молекул. Гипотеза де Бройля, таким образом, получила надёжное опытное подтверждение.

⁶Эта идея была высказана немецким физиком Лауэ в 1912 году.

3.3 Соотношение неопределённостей

Обнаружение корпускулярных свойств электромагнитных волн и волновых свойств частиц показало, что объекты микромира подчиняются необычным законам. Эти законы совершенно неожиданны для нас, привыкших наблюдать за макроскопическими телами.

Наше сознание выработало некоторые образы частицы и волны, вполне пригодные для описания объектов классической физики. Частица — это маленький, локализованный в пространстве сгусток вещества. Волна — это распределённый (не локализованный) в пространстве колебательный процесс. Как же эти понятия могут совмещаться в одном объекте (например, в электроне)?

Вообразить такое действительно получается с трудом. Но что поделать — это факт. Природа оказывается намного богаче нашего воображения. В своей повседневной жизни мы находимся очень далеко от микромира, и в привычном нам диапазоне макроскопических тел природа демонстрирует свои «крайние» проявления — в виде «только частиц» или «только волн». Вот почему корпускулярные и волновые свойства представляются нам несовместимыми друг с другом. Но на самом деле это не так: в микромире оказывается, что один и тот же объект (например, электрон) легко может обладать обоими свойствами одновременно — словно человек, обладающий разными, несовместимыми на первый взгляд чертами характера.

Так, будучи частицей, электрон локализован в пространстве; но, будучи волной, локализован не в точке, а «размазан» по некоторой области. Координаты и скорость электрона не могут быть измерены одновременно сколь угодно точно. Неопределённость координаты Δx и неопределённость соответствующей проекции импульса Δp_x оказываются связанными *соотношением неопределённостей* Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar. \quad (12)$$

Соотношение неопределённостей (12) имеет фундаментальный характер — оно применимо к любым объектам природы. Чем точнее мы знаем координаты объекта (то есть чем в меньшей пространственной области он локализован), тем больше получается разброс значений его импульса (то есть тем с большей скоростью объект «готов вылететь» из этой области). И наоборот, чем точнее мы знаем импульс объекта, тем меньше у нас информации о том, где этот объект находится.

Но коль скоро нет возможности одновременно точно измерить координаты и скорость, то теряет смысл понятие траектории движения объекта. Механика Ньютона перестаёт работать в микромире и уступает место *квантовой механике*.

4 Линейчатые спектры

Если пропустить солнечный свет через стеклянную призму или дифракционную решётку, то возникнет хорошо известный вам *непрерывный спектр* (рис. 5)⁷:



Рис. 5. Непрерывный спектр

Спектр называется непрерывным потому, что в нём присутствуют все длины волн видимого диапазона — от красной границы до фиолетовой. Мы наблюдаем непрерывный спектр в виде сплошной полосы, состоящей из разных цветов.

Непрерывным спектром обладает не только солнечный свет, но и, например, свет электрической лампочки. Вообще, оказывается, что любые твёрдые и жидкие тела (а также весьма плотные газы), нагретые до высокой температуры, дают излучение с непрерывным спектром.

Ситуация качественно меняется, когда мы наблюдаем свечение разреженных газов. Спектр перестаёт быть непрерывным: в нём появляются разрывы, увеличивающиеся по мере разрежения газа. В предельном случае чрезвычайно разреженного атомарного газа спектр становится *линейчатым* — состоящим из отдельных достаточно тонких линий.

Мы рассмотрим два типа линейчатых спектров: спектр испускания и спектр поглощения.

4.1 Спектр испускания

Предположим, что газ состоит из *атомов* некоторого химического элемента и разрежен настолько, что атомы почти не взаимодействуют друг с другом. Раскладывая в спектр излучение такого газа (нагретого до достаточно высокой температуры), мы увидим примерно следующую картину (рис. 6):



Рис. 6. Линейчатый спектр испускания

Этот линейчатый спектр, образованный тонкими изолированными разноцветными линиями, называется *спектром испускания*.

Любой атомарный разреженный газ излучает свет с линейчатым спектром. Более того, для каждого химического элемента спектр испускания оказывается уникальным, играя роль «удостоверения личности» этого элемента. По набору линий спектра испускания можно однозначно сказать, с каким химическим элементом мы имеем дело.

Поскольку газ разрежен и атомы мало взаимодействуют друг с другом, мы можем заключить, что свет излучают атомы *сами по себе*. Таким образом, *атом характеризуется дискретным, строго определённым набором длин волн излучаемого света*. У каждого химического элемента, как мы уже сказали, этот набор свой.

⁷Изображения на рис. 5, 6 и 7 взяты с сайта www.nanospectrum.ru.

4.2 Спектр поглощения

Атомы излучают свет, переходя из возбуждённого состояния в основное. Но вещество может не только излучать, но и поглощать свет. Атом, поглощая свет, совершает обратный процесс — переходит из основного состояния в возбуждённое.

Снова рассмотрим разреженный атомарный газ, но на сей раз в холодном состоянии (при достаточно низкой температуре). Свечения газа мы не увидим; не будучи нагретым, газ не излучает — атомов в возбуждённом состоянии оказывается для этого слишком мало.

Если сквозь наш холодный газ пропустить свет с непрерывным спектром, то можно увидеть что-то вроде этого (рис. 7):



Рис. 7. Линеичатый спектр поглощения

На фоне непрерывного спектра падающего света появляются тёмные линии, которые образуют так называемый *спектр поглощения*. Откуда берутся эти линии?

Под действием падающего света атомы газа переходят в возбуждённое состояние. При этом оказывается, что для возбуждения атомов годятся не любые длины волн, а лишь некоторые, строго определённые для данного сорта газа. Вот именно эти длины волн газ и «забирает себе» из проходящего света.

Более того, газ изымает из непрерывного спектра ровно те самые длины волн, которые излучает сам! Тёмные линии в спектре поглощения газа в точности соответствуют ярким линиям его спектра испускания. На рис. 8 сопоставлены спектры испускания и поглощения разреженных паров натрия⁸:

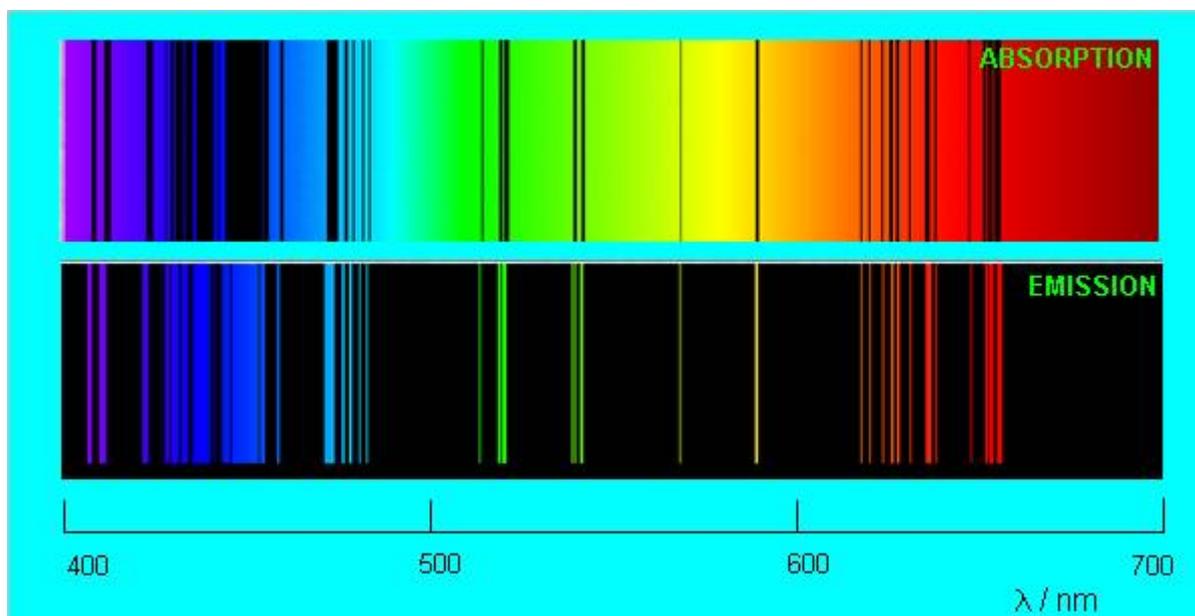


Рис. 8. Спектры поглощения и испускания для натрия

Впечатляющее совпадение линий, не правда ли?

Глядя на спектры испускания и поглощения, физики XIX века пришли к выводу, что атом не является неделимой частицей и обладает некоторой внутренней структурой. В самом деле, что-то ведь внутри атома должно обеспечивать механизм излучения и поглощения света!

⁸Изображение с сайта www.nt.ntnu.no.

Кроме того, уникальность атомных спектров говорит о том, что этот механизм различен у атомов разных химических элементов; стало быть, атомы разных химических элементов должны отличаться по своему внутреннему устройству.

Строению атома будет посвящён следующий раздел.

4.3 Спектральный анализ

Использование линейчатых спектров в качестве уникальных «паспортов» химических элементов лежит в основе *спектрального анализа* — метода исследования химического состава вещества по его спектру.

Идея спектрального анализа проста: спектр излучения исследуемого вещества сопоставляется с эталонными спектрами химических элементов, после чего делается вывод о присутствии или отсутствии того или иного химического элемента в данном веществе. При определённых условиях методом спектрального анализа можно определить химический состав не только качественно, но и количественно.

В результате наблюдения различных спектров были открыты новые химические элементы. Первыми из таких элементов были цезий и рубидий; они получили название по цвету линий своего спектра⁹.

В 1868 году в спектре Солнца были обнаружены линии, не соответствующие ни одному из известных химических элементов. Новый элемент был назван *гелием* (от греческого *гелиос* — солнце). Впоследствии гелий был обнаружен в атмосфере Земли.

Вообще, спектральный анализ излучения Солнца и звёзд показал, что все входящие в их состав входят элементы имеются и на Земле. Таким образом, оказалось, что все объекты Вселенной собраны из одного и того же «набора кирпичиков».

⁹В спектре цезия наиболее выражены две линии небесно-синего цвета, по-латыни называемого *caesius*. Рубидий же даёт две характерные линии рубинового цвета.

5 Строение атома

Атомы каждого химического элемента имеют строго индивидуальный линейчатый спектр, присущий только данному элементу и не меняющийся от опыта к опыту. Как это можно объяснить? Как вывести формулу, дающую весь набор частот атомного спектра? Чтобы сделать это, нужно узнать, как устроен атом.

5.1 Модель Томсона

Первую модель строения атома придумал английский физик Джозеф Джон Томсон (удостоенный Нобелевской премии за открытие электрона). В конечном счёте она оказалась неверной, но сыграла важную роль, будучи стимулом последующих экспериментальных исследований Резерфорда. Физики называли модель Томсона «пудинг с изюмом».

Согласно Томсону атом представляет собой шар размером порядка 10^{-8} см. По этому шару некоторым образом распределён положительный заряд, а внутри шара, подобно изюминкам, находятся электроны (рис. 9).

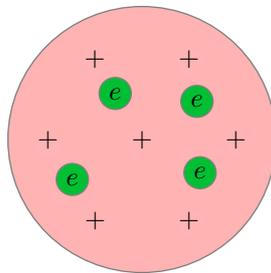


Рис. 9. Модель атома Томсона

Суммарный заряд электронов в точности равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Излучение атомов объясняется колебаниями электронов около положений равновесия (как вы помните, любой ускоренно движущийся заряд излучает электромагнитные волны). Однако вся совокупность экспериментальных данных по атомным спектрам не укладывалась в модель Томсона. Например, были подобраны формулы, хорошо описывающие спектр излучения атома водорода, но эти формулы из модели Томсона никак не следовали.

5.2 Опыты Резерфорда

Верна ли модель Томсона? Как в действительности распределены положительные и отрицательные заряды внутри атома? Чтобы ответить на эти вопросы, нужен был эксперимент, позволяющий проникнуть внутрь атома. Ученик Томсона, знаменитый английский физик Эрнест Резерфорд предложил с этой целью бомбардировать атом высокоэнергетичными α -частицами и смотреть, как они будут отклоняться положительным зарядом атома.

Что такое α -частицы? Потоки этих частиц — так называемые «альфа-лучи» — были обнаружены при радиоактивном распаде некоторых элементов (например, радия). В результате тщательных исследований, проведённых опять-таки Резерфордом, было установлено, что каждая α -частица имеет положительный заряд, равный по модулю удвоенному заряду электрона, и массу, превышающую массу электрона примерно в 8000 раз. То есть, α -частица оказалась полностью ионизованным (лишённым электронов) атомом гелия.

Резерфорд говорил об α -частицах как об ионах гелия; сейчас мы знаем, что это *ядра* гелия. Но в те времена об атомных ядрах ещё ничего не знали — о них Резерфорду лишь предстояло догадаться, глядя на результаты своих знаменитых опытов!

Энергия α -частиц очень велика — достаточно сказать, что скорость их вылета из радиоактивного образца составляет примерно $1/15$ скорости света. Поэтому интересно было выяснить, на какие углы будут отклоняться столь мощные «снаряды» при рассеянии на отдельных атомах, а точнее — на их положительных зарядах.

Пучок α -частиц направлялся на тончайшую золотую фольгу. Как гласит история, Резерфорд не сомневался в том, что углы отклонения должны быть весьма малы: имея столь огромную энергию, α -частицы должны проходить сквозь фольгу как нож сквозь масло. Только «для очистки совести», на всякий случай, он попросил учеников посмотреть, не возникает ли рассеяния α -частиц на большие углы.

Каково же было всеобщее удивление, когда такие частицы обнаружили! Действительно, как и следовало ожидать, подавляющая доля α -частиц отклонялась несущественно. Но совсем небольшая их часть (примерно одна частица из нескольких тысяч) отклонялась на угол, больший 90° (рис. 10).

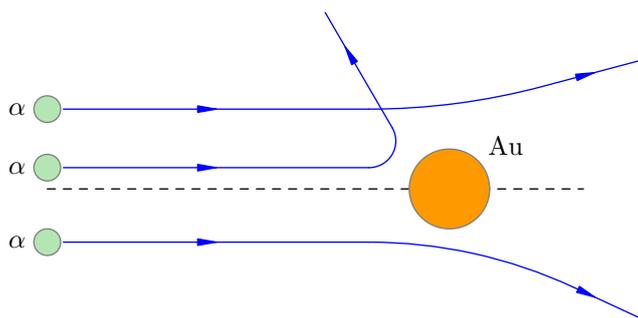


Рис. 10. Рассеяние α -частиц на атомах

Эти отклонения казались совершенно невероятными. По словам Резерфорда, *дело выглядело так, словно артиллерийский снаряд налетел на кусок бумаги и от удара повернул назад*.

А «бумагой» в образном сравнении Резерфорда служил атом, устроенный согласно модели Томсона. Действительно, допустим, что положительный заряд атома q «размазан» по всему атому, то есть шару радиусом $R \sim 10^{-8}$ см. Этот положительный заряд создаёт электрическое поле, тормозящее и отклоняющее α -частицы. Вблизи атома потенциал данного поля:

$$\varphi \sim \frac{kq}{R}.$$

Расчёты, однако, показывают, что такое поле оказывается слишком слабым — его тормозящего действия никак не хватит для того, чтобы остановить α -частицу и отбросить её назад!

Таким образом, наличие α -частиц, отброшенных фольгой, опровергло модель Томсона. Что же было предложено взамен?

5.3 Планетарная модель атома

Чтобы отбросить α -частицу, положительный заряд атома должен создавать куда более сильное электрическое поле, чем то, которое получается в модели Томсона. А чтобы создать такое поле, положительный заряд должен быть сосредоточен в области, гораздо меньшей размера атома.

Размер этой области можно вычислить. Если положительный заряд q занимает область размером r , то вблизи заряда создаётся электрическое поле с потенциалом

$$\varphi \sim \frac{kq}{r}.$$

Зная кинетическую энергию α -частицы, можно найти величину тормозящего потенциала φ , а затем и размер r положительно заряженной области. Вычисления, проведённые Резерфордом,

дали следующий результат:

$$r \sim 10^{-13} \text{ см.}$$

Эта величина на пять порядков (в сто тысяч раз!) меньше размера атома. Так на смену модели Томсона пришла *планетарная модель атома* (рис. 11).

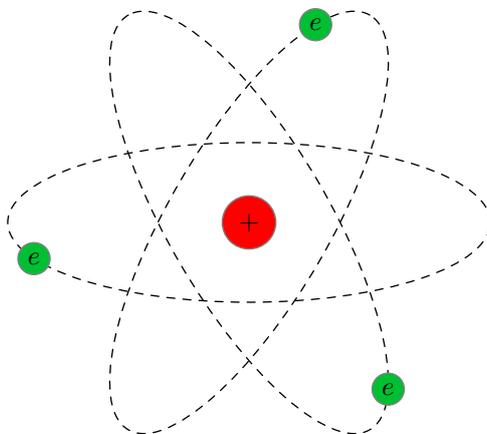


Рис. 11. Планетарная модель атома

В центре атома находится крошечное положительно заряженное *ядро*, вокруг которого, словно планеты вокруг Солнца, движутся электроны. Между ядром и электронами действуют силы кулоновского притяжения, но упасть на ядро электроны не могут за счёт своего движения — точно так же, как и планеты не падают на Солнце, хоть и притягиваются к нему.

Заряд ядра по модулю равен суммарному заряду электронов, так что атом в целом электрически нейтрален. Однако электроны могут быть выбиты из своих орбит и покинуть атом — тогда атом превращается в положительно заряженный ион.

Масса электронов составляет очень малую часть общей массы атома. Например, в атоме водорода всего один электрон, и его масса в 1836 раз меньше массы ядра. Следовательно, почти вся масса атома сосредоточена в ядре — и это при том, что ядро в сто тысяч раз меньше самого атома.

Чтобы лучше почувствовать соотношение масштабов атома и ядра, представьте себе, что атом стал размером с Останкинскую телебашню (500 м). Тогда ядро окажется горошиной размером 5 мм, лежащей у вас на ладони. И тем не менее, почти вся масса атома заключена в этой горошине!

Вот таким удивительным объектом оказался атом. Однако планетарная модель атома, объяснив результаты опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц, стала лишь первым шагом на пути к пониманию внутриатомных процессов. А именно, планетарная модель приводила к одному серьёзному противоречию, и преодоление этого противоречия Нильсом Бором положило начало физике атома. Читаем следующий раздел!

6 Атом Бора

Планетарная модель атома, успешно истолковав результаты опытов по рассеянию α -частиц, в свою очередь столкнулась с очень серьёзными трудностями.

Как мы знаем, любой заряд, движущийся с ускорением, излучает электромагнитные волны. Это — неоспоримый факт классической электродинамики Максвелла, подтверждаемый многочисленными наблюдениями.

Нам также хорошо известно, что электромагнитные волны несут энергию. Стало быть, ускоренно движущийся заряд, излучая, теряет энергию, которая этим излучением уносится.

А теперь давайте возьмём произвольный электрон в планетарной модели. Он движется вокруг ядра, так что направление его скорости постоянно меняется. Следовательно, электрон всё время имеет некоторое ускорение (например, при равномерном движении по окружности это будет центростремительное ускорение), и поэтому должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Расходуя свою энергию на излучение, электрон будет постепенно приближаться к ядру; в конце концов, исчерпав запас своей энергии полностью, электрон упадёт на ядро.

Если исходить из того, что механика Ньютона и электродинамика Максвелла работают внутри атома, и провести соответствующие вычисления, то получается весьма озадачивающий результат: расход энергии электрона на излучение (с последующим падением электрона на ядро) потребует совсем малого времени — порядка 10^{-8} секунды. За это время атом должен полностью «коллапсировать» и прекратить своё существование.

Таким образом, классическая физика предрекает неустойчивость атомов, устроенных согласно планетарной модели. Этот вывод находится в глубоком противоречии с опытом: ведь на самом деле ничего такого не наблюдается. Предметы нашего мира вполне устойчивы и не коллапсируют на глазах! Атом может сколь угодно долго пребывать в невозбуждённом состоянии, не излучая при этом электромагнитные волны.

6.1 Постулаты Бора

Оставалось признать, что внутри атомов перестают действовать известные законы классической физики. Микромир подчиняется совсем другим законам.

Первый прорыв в познании законов микромира принадлежит великому датскому физiku Нильсу Бору. Он предложил три постулата¹⁰, резко расходящиеся с механикой и электродинамикой, но тем не менее позволяющих правильно описать простейший из атомов — атом водорода.

Классическая физика хорошо описывает *непрерывные* процессы — движение материальной точки, изменение состояния идеального газа, распространение электромагнитных волн. . . Энергия объекта, подчиняющегося механике или электродинамике, в принципе может принимать *любые* значения. Однако линейчатые спектры указывают на *дискретность* процессов, происходящих внутри атомов. Эта дискретность должна фигурировать в законах новой теории.

Первый постулат Бора. *Всякий атом (и вообще, всякая атомная система) может находиться не во всех состояниях с любым, наперёд заданным значением энергии. Возможен лишь дискретный набор избранных состояний, называемых стационарными, в которых энергия атома принимает значения $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает электромагнитные волны.*

Как видим, первый постулат Бора вопиющим образом противоречит классической физике: налагается запрет на любые значения энергии, кроме избранного прерывистого набора, и признаётся, что электроны, вроде бы движущиеся ускоренно, на самом деле не излучают.

¹⁰Напомним, что *постулат* — это базовое, первичное утверждение физической теории, обобщающее опытные данные. Постулат не следует из каких-то других утверждений, он просто констатирует факт: так, мол, ведёт себя природа.

Выглядит фантастически, не правда ли? Однако в том же 1913 году, когда Бор предложил свои постулаты, существование стационарных состояний было подтверждено экспериментально — в специально поставленном опыте немецких физиков Франка и Герца. Таким образом, стационарные состояния — это не выдумка, а объективная реальность.

Значения разрешённого набора $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ называются *уровнями энергии* атома. Что происходит при переходе с одного уровня энергии на другой?

Второй постулат Бора. *Если атом переходит из стационарного состояния с большей энергией E_n в стационарное состояние с меньшей энергией E_k , то разность этих энергий может высвободиться в виде излучения. В таком случае излучается фотон с энергией*

$$h\nu = E_n - E_k. \quad (13)$$

Эта же формула работает и при поглощении света: в результате столкновения с фотоном атом переходит из состояния E_k в состояние с большей энергией E_n , а фотон при этом исчезает.

Для примера на рис. 12 показано излучение фотона при переходе атома с энергетического уровня E_3 на уровень E_1 . Переход заключается в том, что электрон «соскакивает» с одной орбиты на другую, расположенную ближе к ядру.

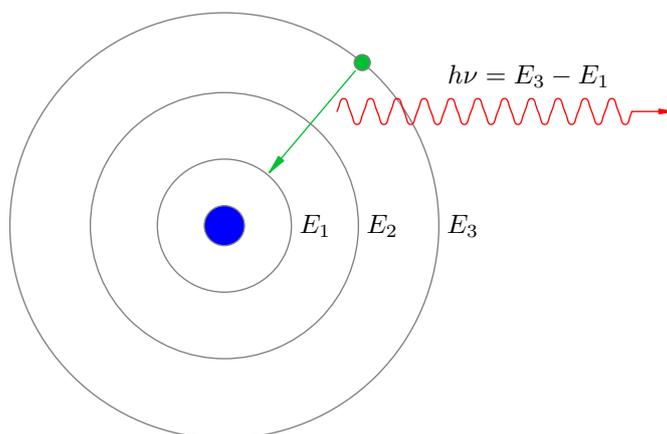


Рис. 12. Излучение фотона атомом

Формула (13) даёт качественное представление о том, почему атомные спектры испускания и поглощения являются линейчатыми.

В самом деле, атом может излучать волны лишь тех частот, которые соответствуют разностям значений энергии разрешённого дискретного набора $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$; соответственно, набор этих частот также получается дискретным. Вот почему спектр излучения атомов состоит из отдельно расположенных резких ярких линий.

Вместе с тем, атом может поглотить не любой фотон, а только тот, энергия $h\nu$ которого в точности равна разности $E_n - E_k$ каких-то двух разрешённых значений энергии E_n и E_k . Переходя в состояние с более высокой энергией E_n , атомы поглощают ровно те самые фотоны, которые способны излучить при обратном переходе в исходное состояние E_k . Попросту говоря, атомы забирают из непрерывного спектра те линии, которые сами же и излучают; вот почему тёмные линии спектра поглощения холодного атомарного газа находятся как раз в тех местах, где расположены яркие линии спектра испускания этого же газа в нагретом состоянии.

Качественного объяснения характера атомных спектров, однако, недостаточно. Хотелось бы иметь теорию, позволяющую *вычислить* частоты наблюдаемых спектров. Бору удалось это сделать в самом простом случае — для атома водорода.

6.2 Атом водорода

Атом водорода состоит из ядра с зарядом $+e$, которое называется *протоном*, и одного электрона с зарядом $-e$ (через e обозначена абсолютная величина заряда электрона). При построении своей теории атома водорода Бор сделал три дополнительных предположения.

1. Прежде всего, мы ограничиваемся рассмотрением только *круговых* орбит электрона¹¹. Таким образом, электрон движется вокруг протона по окружности радиуса r с постоянной по модулю скоростью v (рис. 13).

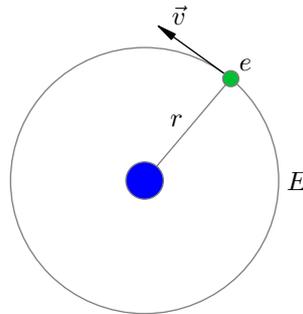


Рис. 13. Модель атома водорода

2. Величина mvr , равная произведению импульса электрона mv на радиус орбиты r , называется *моментом импульса* электрона. В каких единицах измеряется момент импульса? Смотрим:

$$[mvr] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м} = \left(\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) \cdot \text{м} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} = \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Это в точности размерность постоянной Планка! Именно здесь Бор увидел появление дискретности, необходимой для квантового описания атома водорода.

Правило квантования (третий постулат Бора). *Момент импульса электрона может принимать лишь дискретный набор значений, кратных «перечёркнутой» постоянной Планка:*

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (14)$$

3. Выше мы говорили, что классическая физика перестаёт работать внутри атома. Так оно в действительности и есть, но вопреки этому мы предполагаем, что электрон притягивается к протону с силой, вычисляемой по закону Кулона, а движение электрона подчиняется второму закону Ньютона:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}. \quad (15)$$

Эти три предположения позволяют довольно просто получить формулы для уровней энергии атома водорода. Переписываем соотношение (15) в виде:

$$mv^2 = \frac{ke^2}{r}. \quad (16)$$

Из правила квантования (14) выражаем v :

$$v = \frac{n\hbar}{mr},$$

¹¹Впоследствии теория Бора была распространена на общий случай эллиптических орбит.

и подставляем это в (16):

$$\frac{n^2 \hbar^2}{mr^2} = \frac{ke^2}{r}.$$

Отсюда получаем формулу для допустимых радиусов орбит электрона:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{kme^2}. \quad (17)$$

Теперь перейдём к нахождению энергии электрона. Потенциальная энергия кулоновского взаимодействия электрона с ядром равна:

$$W = \frac{k(+e)(-e)}{r} = -\frac{ke^2}{r}.$$

(Она отрицательна, так как отсчитывается от бесконечно удалённой точки, в которой достигает максимального — а именно, нулевого — значения.)

Полная энергия E электрона равна сумме его кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{ke^2}{r}.$$

Вместо mv^2 подставим правую часть выражения (16):

$$E = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r}. \quad (18)$$

Полная энергия, как видим, отрицательна. Если на радиус орбиты никаких ограничений не накладывается, как это имеет место в классической физике, то энергия может принимать любые по модулю значения. Но согласно (17) существует лишь дискретный набор возможных значений радиуса; подставляя их в (18), получаем соответствующий набор допустимых значений энергии атома водорода:

$$E_n = -\frac{ke^2}{2r_n} = -\frac{k^2 me^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (19)$$

Основное состояние атома водорода — это состояние с наименьшей энергией E_1 . В основном состоянии атом может находиться неограниченно долго. Вычисление даёт:

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}.$$

Мы видим, что если атом находится в основном состоянии, то для выбивания электрона нужно сообщить атому энергию, равную как минимум 13,6 эВ. Эта величина носит название *энергии ионизации* атома водорода.

По формуле (17) легко вычислить радиус орбиты основного состояния:

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kme^2} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ см}.$$

То есть, диаметр атома оказывается равным как раз 10^{-8} см — величине, известной из опыта. Таким образом, теория Бора впервые смогла объяснить размер атома!

Кроме того, в рамках теории Бора удаётся получить формулы для вычисления частот (или длин волн) спектра атома водорода. Так, согласно второму постулату Бора и формуле (19) имеем:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} = \frac{k^2 me^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (20)$$

На практике чаще имеют дело с длинами волн. Учитывая, что $\nu = c/\lambda$, формулу (20) можно переписать так:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{k^2 m e^4}{4\pi \hbar^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (21)$$

Константа $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ называется *постоянной Ридберга*. Теория Бора даёт значение этой постоянной, очень хорошо согласующееся с экспериментом.

Длины волн спектра атома водорода образуют *серии*, характеризующиеся фиксированным значением k в формуле (21). Все длины волн данной серии излучаются при переходах на уровень E_k с вышележащих энергетических уровней E_n ($n = k + 1, k + 2, k + 3, \dots$).

Переходы в основное состояние:

$$E_2 \rightarrow E_1, \quad E_3 \rightarrow E_1, \quad E_4 \rightarrow E_1, \quad \dots$$

образуют *серию Лаймана*. Длины волн этой серии описываются формулой (21) при $k = 1$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Линии серии Лаймана лежат в ультрафиолетовом диапазоне.

Переходы на второй уровень:

$$E_3 \rightarrow E_2, \quad E_4 \rightarrow E_2, \quad E_5 \rightarrow E_2, \quad \dots$$

образуют *серию Бальмера*. Длины волн этой серии подчиняются формуле (21) при $k = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Первые четыре линии серии Бальмера лежат в видимом диапазоне (рис. 14)¹², остальные — в ультрафиолетовом.



Рис. 14. Видимый спектр атома водорода (серия Бальмера)

Переходы на третий уровень:

$$E_4 \rightarrow E_3, \quad E_5 \rightarrow E_3, \quad E_6 \rightarrow E_3, \quad \dots$$

образуют *серию Пашена*. Длины волн этой серии описываются формулой (21) при $k = 3$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Все линии серии Пашена лежат в инфракрасном диапазоне.

Имеются ещё три «именованных» серии: это *серия Брэкетта* (переходы на уровень $k = 4$), *серия Пфунда* (переходы на уровень $k = 5$) и *серия Хэмфри* (переходы на уровень $k = 6$). Все линии этих серий лежат в далёкой инфракрасной области.

¹²Изображение с сайта dic.academic.ru.

6.3 Достоинства и недостатки теории Бора

О достоинствах модели атома водорода, предложенной Бором, мы так или иначе уже сказали. Резюмируем их.

- Теория Бора продемонстрировала, что для описания атомных объектов принципиально недостаточно представлений классической физики. В микромире работают другие, совершенно новые законы.

Для микромира характерно *квантование* — дискретность изменения величин, описывающих состояние объекта. В качестве меры квантования, как показала теория Бора, может выступать постоянная Планка \hbar , которая является универсальной константой и играет фундаментальную роль во всей физике микромира (а не только в явлениях излучения и поглощения света).

- Теория Бора впервые и совершенно точно указала на факт наличия стационарных энергетических состояний атома, образующих дискретный набор. Этот факт оказался общим свойством объектов микромира.
- В рамках модели Бора удалось получить формулы для вычисления частот спектра атома водорода и объяснить размер атома. Классическая физика была не в состоянии решить эти проблемы.

Однако теория Бора, разумеется, не могла претендовать на роль общей теории, описывающей микромир. Модель Бора обладала рядом существенных недостатков.

- Теория Бора *непоследовательна*. С одной стороны, она отвергает описание атома на основе классической физики, так как постулирует наличие стационарных состояний и правила квантования, непонятных с точки зрения механики и электродинамики. С другой стороны, классические законы — второй закон Ньютона и закон Кулона — используются для записи уравнения движения электрона по круговой орбите¹³.
- Теория Бора не смогла дать адекватное описание самого простого после водорода атома гелия. Подавно не могло быть и речи о распространении теории Бора на более сложные атомы¹⁴.
- Даже в самом атоме водорода теория Бора смогла описать не всё. Например, дав выражения для частот спектральных линий, модель Бора не объясняла различие в их интенсивностях. Кроме того, неясен оставался механизм образования молекулы водорода из двух атомов.

Несмотря на свои недостатки, теория Бора стала важнейшим этапом развития физики микромира. Полуклассическая-полуквантовая модель Бора послужила промежуточным звеном между классической физикой и последовательной *квантовой механикой*, построенной десятилетием позже — в 1920-х годах.

¹³Как шутливо замечал известный физик Брэгг, в теории Бора по понедельникам, средам и пятницам надо применять классические законы, а по вторникам, четвергам и субботам — квантовые.

¹⁴Как опять-таки шутили физики, атом Бора — это не атом бора, а атом водорода.

7 Лазер

Лазер (оптический квантовый генератор) — выдающееся достижение физики XX века. Уникальные свойства лазерного луча находят применение в самых разнообразных сферах — от мощных промышленных агрегатов до мелкой бытовой техники.

Слово *laser* образовано первыми буквами фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Дословный перевод таков: «усиление света с помощью вынужденной эмиссии излучения». В русском языке используется более короткий термин *вынужденное излучение* или *индуцированное излучение* (слово «эмиссия» опускается). Явление индуцированного излучения, которое мы сейчас обсудим, составляет физическую основу действия любого лазера.

7.1 Индуцированное излучение

Рассмотрим два энергетических состояния атома: основное состояние с энергией E_1 и возбуждённое состояние с энергией $E_2 > E_1$. Переходя из возбуждённого состояния в основное, атом излучает фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$.

Если возбуждённый атом предоставлен сам себе, то он переходит в основное состояние самопроизвольно. Момент перехода предсказать невозможно, и потому излучение в этом случае называется *спонтанным*. Спонтанное излучение различных атомов является некогерентным, поскольку атомы излучают совершенно независимо друг от друга.

Оказывается, однако, что атом можно *заставить* излучить фотон, *вынудив* соскок электрона с верхнего уровня на нижний. Это произойдёт под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает с частотой перехода $\nu = (E_2 - E_1)/h$. Эффект аналогичен явлению резонанса при вынужденных колебаниях; в качестве вынуждающей силы выступает при этом электромагнитное поле. Излучение атома, вызванное внешним электромагнитным полем, называется *вынужденным* или *индуцированным*¹⁵ (рис. 15).

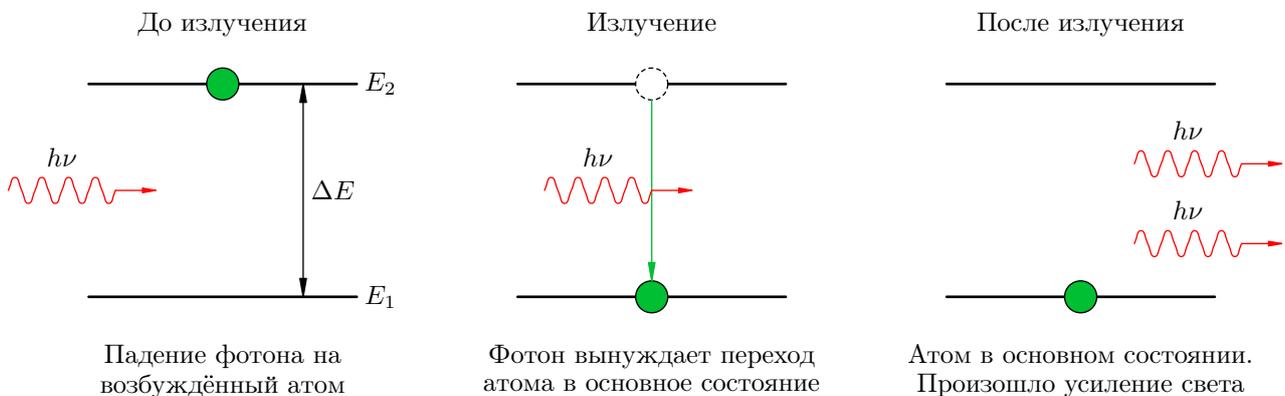


Рис. 15. Индуцированное излучение: $h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$

Левая часть рисунка соответствует начальной ситуации, когда на возбуждённый атом, находящийся в состоянии с энергией E_2 , падает фотон, энергия $h\nu$ которого в точности равна разности $\Delta E = E_2 - E_1$ энергий возбуждённого и основного состояний.

Средняя часть рисунка показывает вынужденный переход атома в основное состояние: под воздействием падающего фотона электрон соскакивает с верхнего уровня на нижний.

В правой части рисунка мы видим результат этого соскока. Падающий фотон никуда не делся, а атом, перейдя в основное состояние, излучил ещё один фотон, *тождественный падающему фотону*. Таким образом, вместо одного падающего фотона «на входе» возникло два фотона-близнеца «на выходе».

¹⁵Возможность индуцированного излучения света атомами предсказал А. Эйнштейн в 1916 году.

Итак, в результате индуцированного излучения атом испускает монохроматическую волну, совпадающую с падающей волной по частоте и фазе. Эти две волны, интерферируя, *усиливают друг друга!* Именно этот эффект усиления света используется в лазере.

7.2 Инверсная населённость

Для усиления света, проходящего через некоторую среду, одного только индуцированного излучения атомов среды недостаточно. Нужно ещё создать *инверсную населённость* энергетических уровней атомов. Давайте разберёмся, что это такое.

Когда свет идёт через вещество, возникают два противоположных эффекта.

1. Свет поглощается атомами среды, находящимися в основном состоянии. Эти атомы переходят в возбуждённое состояние.
2. Свет усиливается за счёт индуцированного излучения возбуждённых атомов. Испуская фотоны, эти атомы возвращаются в основное состояние.

Возникает вопрос: какой эффект перевешивает?

В обычных условиях большинство атомов вещества находятся в основном состоянии, меньшая их часть — в возбуждённом. В таком случае мы имеем *нормальную населённость* энергетических уровней (рис. 16, слева).

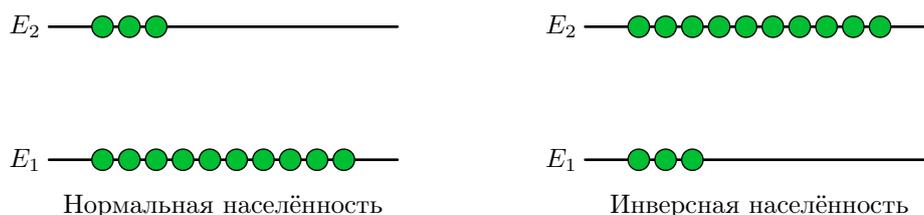


Рис. 16. Два типа населённости уровней

Если свет проходит через среду с нормальной населённостью, то большая часть атомов поглощает свет; индуцированное излучение создаётся малым количеством атомов. В результате число фотонов уменьшается со временем, и световой поток ослабляется.

Можно, однако, создать условия, когда большинство атомов среды находится в возбуждённом состоянии. В таком случае населённость уровней называется *инверсной* (рис. 16, справа).

Если свет подходящей частоты распространяется в среде с инверсной населённостью, то фотоны чаще налетают на возбуждённые атомы, чем на невозбуждённые, так что индуцированное излучение фотонов преобладает над их поглощением. По мере прохождения света количество фотонов нарастает, и свет усиливается.

Как же создать в среде инверсную населённость? Нельзя ли просто направить на вещество мощный поток света и освещать до тех пор, пока больше половины атомов не перейдёт в возбуждённое состояние?

Добиться этого и в самом деле можно, но проблема состоит в том, что двумя энергетическими уровнями тут не обойдёшься. Действительно, поглощая фотоны, атомы будут переходить из основного состояния E_1 в возбуждённое состояние E_2 ; но те же самые фотоны падающего света будут вынуждать и обратные переходы с уровня E_2 на уровень E_1 , сопровождающиеся индуцированным излучением. Следовательно, число возбуждённых атомов с энергией E_2 не может превысить числа атомов в основном состоянии E_1 .

7.3 Трёхуровневая система рубина

Классической схемой создания в среде инверсной населённости является система из *трёх* энергетических уровней E_1 , E_2 и E_3 , в которой состояние E_1 является основным, состояние E_3 — «короткоживущим», а состояние E_2 — «долгоживущим». Такие уровни имеются в кристаллах рубина.

Работа трёхуровневой системы показана на рис. 17. В начальной ситуации большинство атомов находится в основном состоянии E_1 .

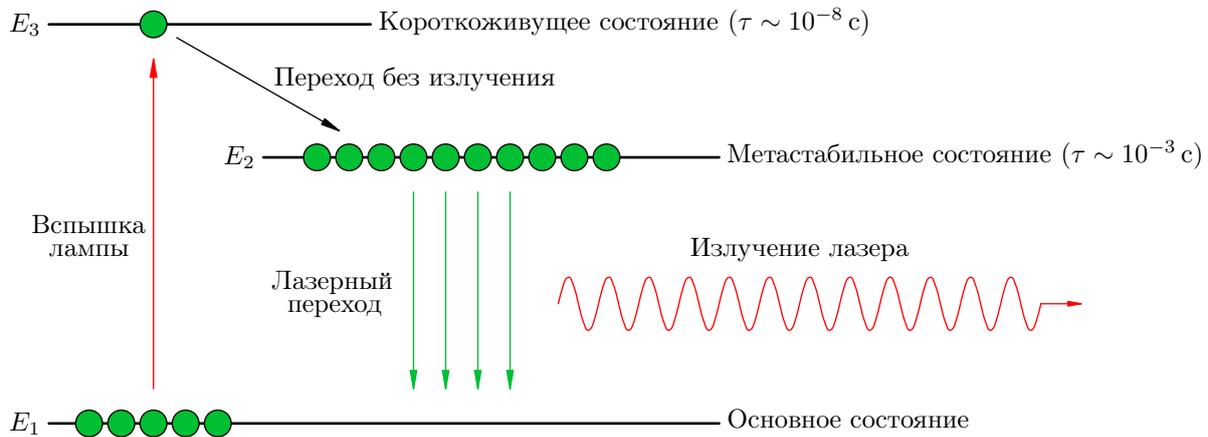


Рис. 17. Инверсная населённость в трёхуровневой системе

Мощная вспышка лампы переводит большую часть атомов среды в возбуждённое состояние с энергией E_3 . Но электроны атомов не задерживаются на этом энергетическом уровне. Состояние E_3 обладает малым *временем жизни* τ , равным примерно 10^{-8} с; по истечении данного промежутка времени электроны соскакивают с уровня E_3 вниз — но не назад на уровень E_1 , а на промежуточный уровень E_2 .

Переход $E_3 \rightarrow E_2$ не сопровождается излучением — энергия этого перехода передаётся тепловым колебаниям кристаллической решётки. Но самое главное заключается в том, что состояние E_2 имеет огромное по атомным масштабам время жизни — порядка 10^{-3} с. Эта величина, как видим, в 100000 раз больше времени жизни состояния E_3 ; по этой причине энергетическое состояние E_2 называется *метастабильным*.

Итак, в результате вспышки лампы атомы из основного состояния E_1 транзитом через уровень E_3 переводятся на метастабильный уровень E_2 , и благодаря большому времени жизни этого уровня начинают на нём накапливаться. Если переходы $E_1 \rightarrow E_3$ совершаются достаточно быстро, то на уровне E_2 окажется больше половины атомов среды — возникает инверсная населённость данного уровня!

Ну а затем достаточно небольшого числа спонтанных переходов $E_2 \rightarrow E_1$, и излучённые фотоны вызовут лавину таких же, но теперь уже индуцированных *лазерных переходов* $E_2 \rightarrow E_1$. Число фотонов, порождённых лазерными переходами, стремительно нарастает и создаёт импульс лазерного излучения.

Таким образом, луч лазера генерируется в ходе *согласованного* «сброса» многих атомов с уровня E_2 на уровень E_1 . Атомы при этом излучают *синхронно*, «в такт», и волны, излучённые атомами, идентичны друг другу по частоте и фазе. Излучение лазера, будучи результатом наложения таких идентичных волн, получается *когерентным* — в отличие, например, от некогерентного света электрической лампочки, порождаемого спонтанным излучением различных атомов в случайные моменты времени.

7.4 Устройство лазера

В общих чертах схема устройства лазера выглядит следующим образом (рис. 18)¹⁶.

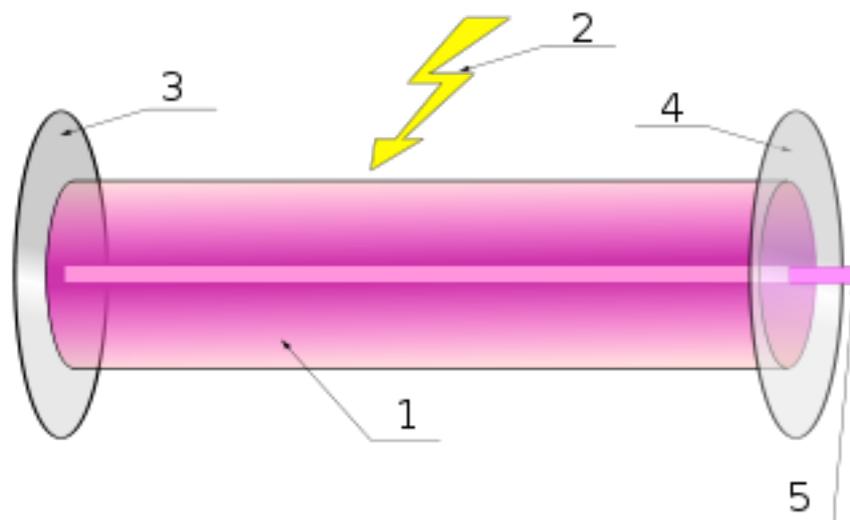


Рис. 18. Устройство лазера

В атомах *активной среды* 1 создаётся инверсная населённость в результате *вспышки* 2. Активной средой может служить, например, кристалл рубина или какое-либо другое подходящее вещество.

На торцах активной среды стоят *непрозрачное зеркало* 3 и *полупрозрачное зеркало* 4. Эти зеркала обеспечивают, как говорят, *обратную связь*. Они нужны для более эффективного усиления *лазерного луча* 5.

А именно, происходит вот что. После вспышки, как мы уже говорили, создаётся инверсная населённость, и достаточно нескольких спонтанно излучённых фотонов при лазерном переходе $E_2 \rightarrow E_1$, чтобы началось их лавинообразное размножение в результате индуцированного излучения. Но при отсутствии зеркал эта лавина не успеет затронуть весьма большое количество возбуждённых атомов — возникший импульс уже покинет пределы активной среды.

Чтобы этого не произошло, световой импульс разумно завернуть назад и погонять некоторое время внутри активной среды, заставляя высвечиваться всё большее и большее количество атомов — и тем самым всё более усиливая лазерный луч. Вот для этого и нужны зеркала на торцах. Одно зеркало, естественно, должно быть полупрозрачным и частично выпускать излучение наружу — мы ведь хотим использовать луч лазера для каких-то целей :-)

Зеркала выполняют ещё одну важную функцию: благодаря им лазерный луч имеет *очень малую расходимость*. Дело в том, что лучи, отклоняющиеся от оси цилиндра, рано или поздно выйдут через боковую цилиндрическую поверхность, а лучи, идущие параллельно оси, будут циркулировать туда-сюда сколько угодно и максимально усиливаться. Вот почему лазерный луч даёт маленькое световое пятно даже на удалённых предметах.

¹⁶Изображение с сайта en.wikipedia.org.

8 Строение ядра

После опытов Резерфорда, прояснивших устройство атома, возник естественный вопрос: из чего состоит атомное ядро? Ответа пришлось ждать двадцать лет — до открытия нейтрона.

Ядро самого простого атома водорода, как вы помните, было названо *протоном*. Протон имеет положительный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (равный по модулю заряду электрона) и массу $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса протона примерно в 1836 раз больше массы электрона.

Нейтрон был открыт в 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком. Масса нейтрона $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг оказалась очень близка к массе протона. Однако, в отличие от протона, нейтрон не имеет электрического заряда.

Открытие нейтрона послужило ключом к пониманию устройства атомного ядра.

8.1 Нуклонная модель ядра

Сразу после открытия нейтрона несколько физиков одновременно высказали идею *протонно-нейтронной*, или *нуклонной*, модели ядра. Согласно этой модели *ядро состоит из протонов и нейтронов*. Будучи «кирпичиками», из которых строится ядро, протоны и нейтроны получили общее название *нуклонов*¹⁷.

Модель атомного ядра показана¹⁸ на рис. 19. Красным цветом условно изображены протоны, чёрным — нейтроны.

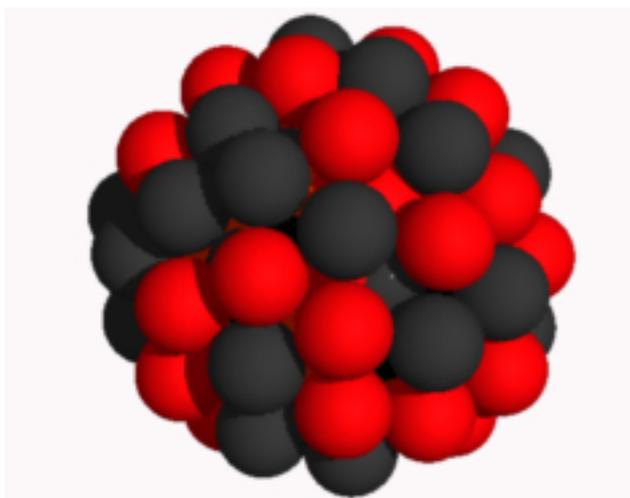


Рис. 19. Модель ядра атома

Число протонов в ядре называется *зарядовым числом* и обозначается Z . *Заряд ядра*, следовательно, равен Ze . Поскольку атом в целом электрически нейтрален, величина Z совпадает с числом электронов в атоме. Зарядовое число, таким образом, есть не что иное, как порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева.

Общее число нуклонов в ядре называется *массовым числом* и обозначается A . Число нейтронов в ядре тогда будет равно $A - Z$.

Запись A_ZX означает, что в ядре элемента X содержится A нуклонов, из которых Z являются протонами. Например, ядро алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$ состоит из 27 нуклонов, а именно из 13 протонов и 14 нейтронов. Ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ — так называемая α -частица — состоит из двух протонов и двух нейтронов.

¹⁷От лат. *nucleus* — ядро.

¹⁸Изображение с сайта alternativephysics.org.

8.2 Изотопы

Что будет, если изменить число нейтронов ядре? Какие-то свойства вещества в результате должны поменяться — например, плотность. Однако все химические свойства при этом останутся прежними — ведь за них отвечает зарядовое число Z , а оно-то не менялось!

Изотопы — это разновидности одного и того же химического элемента, различающиеся числом нейтронов в ядре.

Например, у водорода три изотопа: обычный ${}^1_1\text{H}$, дейтерий ${}^2_1\text{H}$ и третий ${}^3_1\text{H}$. А химический элемент уран имеет 26 изотопов! В природе наиболее распространён уран ${}^{238}_{92}\text{U}$, а в атомной энергетике и ядерном оружии используется уран ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Изотопы совершенно идентичны в отношении химических свойств, и их невозможно разделить никакими химическими методами. Оказывается, почти любой элемент таблицы Менделеева представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях — вот почему атомные массы химических элементов не равны целым числам. Как правило, атомная масса всё же достаточно близка к целому числу, поскольку в природе доминирует изотоп именно с такой атомной массой (например, в природном уране доля изотопа ${}^{238}_{92}\text{U}$ составляет 93%; соответственно, в таблице Менделеева мы видим атомную массу урана, равную 238,03). Но бывают и исключения: так, атомная масса хлора равна 35,5.

Изотопы могут различаться также своими радиоактивными свойствами: у одного и того же химического элемента могут быть как стабильные изотопы, так и подверженные радиоактивному распаду (например, углерод ${}^{12}_6\text{C}$ стабилен, а изотоп ${}^{14}_6\text{C}$ — радиоактивен). Собственно, именно это наблюдение — что вроде бы одно и то же вещество бывает то радиоактивным, то нет — и навело в своё время на мысль о существовании изотопов. Радиоактивность будет темой следующего раздела.

9 Радиоактивность

Явление радиоактивности обнаружил французский физик Анри Антуан Беккерель, и произошло это совершенно случайно.

В начале 1896 года всё научное сообщество было охвачено интересом к недавно открытым всепроникающим рентгеновским лучам. Беккерель решил выяснить, не появляются ли рентгеновские лучи при освещении солнечным светом некоторых минералов, и выбрал для своих экспериментов весьма редкую соль урана.

Опыт Беккереля был чрезвычайно прост. Кристаллы соли выставлялись на солнце и лежали при этом на фотопластинке. Разумеется, фотопластинка заворачивалась в чёрную бумагу, чтобы её не засветил солнечный свет. Но чёрная бумага — не помеха рентгеновским лучам, и если они действительно возникают, то засветят фотопластинку.

Итак, Беккерель положил завернутую фотопластинку с насыпанной поверх урановой солью на солнечный свет, подержал несколько часов и затем проявил фотопластинку. Ожидания подтвердились! После проявления на фотопластинке проступили очертания кристаллов соли урана.

Полагая, что и впрямь обнаружись рентгеновские лучи, испускаемые урановой солью под действием солнечного света, Беккерель доложил об этом на заседании Французской академии наук. Доклад вызвал большой интерес, и было решено, что на следующем заседании, то есть через неделю, Беккерель расскажет о результатах новых опытов.

А погода тем временем испортилась, и солнце на всю неделю скрылось за облаками. Медный крест, покрытый урановой солью и приготовленный для опытов, в ожидании солнца несколько дней пролежал в ящике письменного стола — поверх фотопластинки, завернутой в чёрную бумагу.

Накануне нового доклада облачность так и не рассеялась, и докладывать Беккерелю было нечего. Однако отчаяние и удачу порой разделяет лишь один шаг. Неизвестно почему, но Беккерель решил проявить фотопластинку, лежавшую в столе. Каково же было его удивление, когда он увидел проступившие на ней почернения в виде отчётливой тени креста!

Таким образом, солнце оказалось совершенно ни при чём. Было обнаружено новое явление природы: урановая соль без каких-либо внешних факторов, сама по себе испускает некоторое излучение, пронизывающее чёрную бумагу.

На следующий день Беккерель рассказал об этом на заседании Французской академии и затем приступил к интенсивным исследованиям. В ходе своих экспериментов он обнаружил следующие черты нового явления.

- Новые лучи могут проникать сквозь предметы и ионизировать воздух.
- Засвечивают фотопластинку только те вещества, которые содержат уран.
- Интенсивность излучения зависит только от количества урана в веществе. Само химическое соединение при этом роли не играет. *Максимально интенсивным является излучение чистого урана.*

Новое явление было впоследствии названо *радиоактивностью*. Из опытов Беккереля следовало, что радиоактивность есть свойство химического элемента урана самого по себе — то есть свойство, которым обладают *атомы* урана.

Уран оказался не единственным радиоактивным элементом. Мария Склодовская-Кюри спустя два года после открытия Беккереля обнаружила аналогичное излучение *тория*. Вместе с мужем, Пьером Кюри, они открыли новый радиоактивный химический элемент — *полоний*. Наконец, вручную переработав 11 тонн руды, Мария Склодовская-Кюри получила маленькую капельку чистого *радия*, который излучал в три миллиона раз интенсивнее урана.

9.1 Виды радиоактивных излучений

Каков состав радиоактивного излучения? Оказалось, что радиоактивные вещества испускают три типа лучей, различающихся по своим физическим свойствам.

Эти три компоненты обнаруживаются в результате пропускания радиоактивного излучения солей урана через сильное магнитное поле (рис. 20).

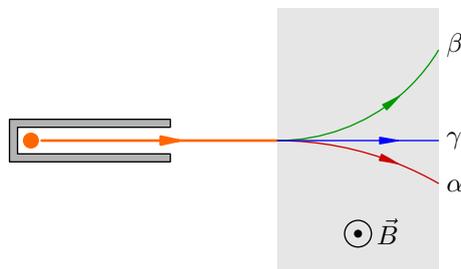


Рис. 20. Виды радиоактивных излучений

А именно, излучение радиоактивного препарата, находящегося внутри свинцового контейнера с узким каналом, направляется на фотопластинку. В отсутствие магнитного поля на фотопластинке наблюдается одно тёмное пятно. Но если пропустить излучение сквозь область магнитного поля, то пятен становится *три* — одно на прежнем месте и два по бокам от него на разных расстояниях. Это означает, что радиоактивное излучение в магнитном поле распалось на три существенно различные части.

То, что две компоненты отклонились в разные стороны, означает, что они являются соответственно потоками положительных и отрицательных зарядов. Третья компонента, не отклоняющаяся магнитным полем, электрического заряда не несёт.

Положительно заряженной компоненте была присвоена буква α ; её называли α -излучением, α -лучами или потоком α -частиц. Альфа-лучи достаточно слабо отклонялись магнитным полем. Тщательные исследования Резерфорда показали, что α -частицы — это полностью ионизованные атомы гелия, то есть *ядра гелия*.

Отрицательно заряженная компонента была названа β -излучением (или β -лучами). Они отклонялись магнитным полем значительно сильнее, чем α -частицы. Бета-лучи оказались потоком *электронов*, мчащихся со скоростями, близкими к скорости света.

Нейтральная компонента получила название γ -излучения (или γ -лучей). Гамма-лучи оказались электромагнитными волнами чрезвычайно высокой частоты — выше, чем у рентгеновского излучения¹⁹. Соответственно, проникающая способность гамма-лучей также больше, чем у рентгеновских лучей.

Среди трёх компонент радиоактивного излучения наибольшей проникающей способностью также обладают гамма-лучи — они могут пробиться сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров. Сильнее поглощаются веществом бета-лучи: тут хватит нескольких миллиметров свинца, чтобы поглотить их полностью. Слабее всего проникают сквозь вещество α -частицы: они не могут, например, пройти через лист бумаги.

9.2 Радиоактивные превращения

Многочисленные эксперименты с радиоактивными веществами показали, что *радиоактивность сопровождается изменениями атомов, и в результате этих изменений одни химические элементы превращаются в другие*.

¹⁹Электромагнитная природа гамма-излучения была установлена экспериментально: обнаружилась дифракция гамма-лучей на кристаллических решётках. Эти же опыты позволили измерить и длину волны гамма-излучения.

Положение химического элемента в таблице Менделеева определяется числом электронов в нейтральном атоме, или, что то же самое — зарядом ядра атома. Поэтому превращения химических элементов означают, что *в результате радиоактивных процессов изменения претерпевают атомные ядра*.

Ядра атомов радиоактивных элементов являются *нестабильными*. Каждое такое ядро в некоторый момент распадается, поэтому явление радиоактивности называют ещё *радиоактивным распадом*.

В процессе радиоактивного распада исходное вещество постепенно исчезает. Новые вещества, являющиеся продуктами распада, также могут быть нестабильными и распадаться дальше. Наблюдаются целые цепочки радиоактивных распадов — вплоть до образования стабильных элементов.

Самой известной такой цепочкой является *радиоактивное семейство урана*. Начинается эта цепочка с *альфа-распада* ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$, в результате которого образуется ядро тория ${}_{90}^{234}\text{Th}$ и вылетает α -частица:



Затем родившееся ядро тория испытывает *бета-распад*, испуская электрон и превращаясь в ядро протактиния ${}_{91}^{234}\text{Pa}$:



Обратите внимание, что электрону приписывается зарядовое число -1 (так как заряд электрона равен $-e$) и массовое число 0 (так как электрон не содержит нуклонов).

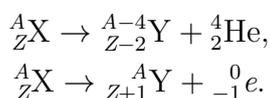
В обеих формулах (22) и (23) мы наблюдаем два важных момента.

- *Сумма массовых чисел продуктов распада равна массовому числу исходного ядра*. Этот баланс массовых чисел отражает неизменность общего числа нуклонов до и после распада.
- *Сумма зарядовых чисел продуктов распада равна зарядовому числу исходного ядра*. Этот факт служит одним из многочисленных экспериментальных подтверждений закона сохранения заряда.

Поскольку α -частица уносит заряд $+2e$, а электрон уносит заряд $-e$, то возникает следующая закономерность превращения химических элементов при α - и β -распадах.

Правило смещения. *После α -распада элемент смещается на две клетки назад, то есть к началу периодической системы. После β -распада элемент смещается на одну клетку вперёд, то есть к концу периодической системы.*

Общие формулы, выражающие правило смещения при альфа- и бета-распадах, выглядят следующим образом:



Формулы (22) и (23) — это самое начало радиоактивного семейства урана. Всего в этой цепочке происходит восемь α -распадов и шесть β -распадов (при каждом β -распаде вдобавок излучается γ -квант), пока в самом конце цепочки не образуется стабильное ядро свинца ${}_{82}^{206}\text{Pb}$.

Излучение всех элементов радиоактивного семейства урана как раз и засветило фотопластинку Беккереля, и именно эта смесь излучений была впервые разложена на компоненты в магнитном поле (рис. 20).

9.3 Закон радиоактивного распада

Нестабильное ядро распадается *самопроизвольно* (или, как ещё говорят, *спонтанно*). Происходит это в случайный момент времени, так что невозможно предсказать, когда именно распадётся каждое конкретное ядро. Тем не менее, ядра каждого элемента обладают определённым *средним временем жизни*, характерным для данного элемента.

А именно, опыт показывает, что *распад радиоактивного элемента происходит со строго определённой, присущей именно этому элементу скоростью*. Скорость распада у разных элементов различна; она является такой же неотъемлемой характеристикой радиоактивного элемента, как зарядовое или массовое число. Вне зависимости от условий опыта можно точно сказать, спустя какой промежуток времени интенсивность излучения данного элемента уменьшится, например, в два раза.

Период полураспада — это время, в течение которого распадается половина имеющихся радиоактивных атомов. Период полураспада как раз и является количественной характеристикой скорости радиоактивного распада.

Величина периода полураспада может быть очень разной. Например, период полураспада урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ равен 4,5 млрд. лет, радия ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ — 1600 лет, полония ${}_{84}^{210}\text{Po}$ — 138 дней, а у инертного газа радона ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ он составляет всего 3,8 суток.

Выведем теперь закон радиоактивного распада, а именно — найдём, как зависит от времени количество N атомов, не претерпевших пока радиоактивный распад. Начальное число радиоактивных атомов равно N_0 , период полураспада равен T .

Имеем следующую простую цепочку рассуждений.

Спустя время $t_1 = T$ количество оставшихся атомов будет равно

$$N_1 = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}.$$

Спустя время $t_2 = 2T$ атомов останется

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4} = N_0 \cdot 2^{-2}.$$

Спустя время $t_3 = 3T$ атомов останется

$$N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{8} = N_0 \cdot 2^{-3}.$$

Становится ясно, что спустя время $t_k = kT$ атомов останется

$$N_k = N_0 \cdot 2^{-k}.$$

Поставляя сюда $k = t_k/T$, получим:

$$N_k = N_0 \cdot 2^{-t_k/T}.$$

Отбрасывая индекс k , находим число оставшихся атомов в зависимости от времени:

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T}. \quad (24)$$

Мы получили *закон радиоактивного распада*. Количество нераспавшихся атомов оказывается показательной функцией, убывающей с течением времени.

Ещё одной характеристикой скорости распада радиоактивного элемента является *активность* — число радиоактивных распадов, происходящих в единицу времени. Активность A есть производная по времени от числа $N_0 - N$ распавшихся атомов:

$$A = \frac{d(N_0 - N)}{dt} = -\frac{dN}{dt} = N_0 \frac{\ln 2}{T} \cdot 2^{-t/T}.$$

Обозначая множитель перед показательной функцией через A_0 (это будет активность в начальный момент времени), получим:

$$A = A_0 \cdot 2^{-t/T}.$$

Мы видим, что зависимость активности от времени имеет точно такой же вид, как и закон радиоактивного распада (24). График зависимости активности от времени приведён на рис. 21.

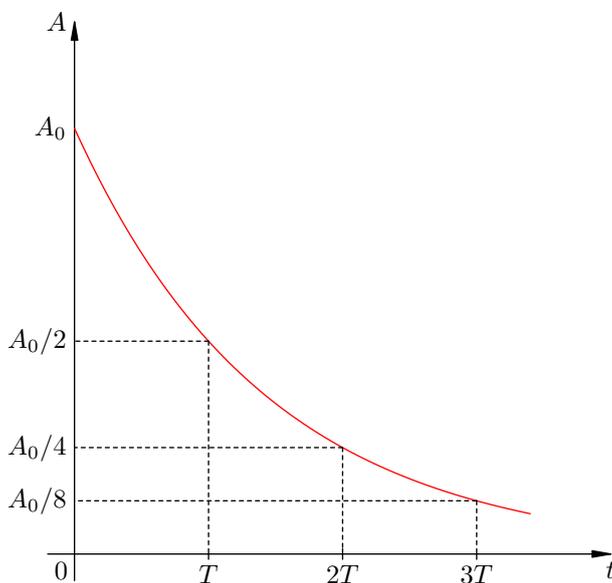


Рис. 21. Зависимость активности от времени

Ясно, что активность убывает тем быстрее, чем меньше период полураспада. И наоборот, при большом периоде полураспада активность меняется медленно. Например, активность радона ($T = 3,8$ суток) уменьшается буквально на глазах, а активность солей урана ($T = 4,5$ млрд. лет) остаётся практически неизменной на протяжении человеческой жизни.

10 Энергия связи ядра

Атомное ядро, согласно нуклонной модели, состоит из нуклонов — протонов и нейтронов. Но какие силы удерживают нуклоны внутри ядра?

За счёт чего, например, держатся вместе два протона и два нейтрона внутри ядра атома гелия? Ведь протоны, отталкиваясь друг от друга электрическими силами, должны были бы разлететься в разные стороны! Может быть, это гравитационное притяжение нуклонов друг к другу не даёт ядру распасться?

Давайте проверим. Пусть два протона находятся на некотором расстоянии r друг от друга. Найдём отношение силы F_{el} их электрического отталкивания к силе F_{gr} их гравитационного притяжения:

$$\frac{F_{\text{el}}}{F_{\text{gr}}} = \frac{ke^2/r^2}{Gm^2/r^2} = \frac{ke^2}{Gm^2}.$$

Заряд протона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона $m \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, поэтому имеем:

$$\frac{F_{\text{el}}}{F_{\text{gr}}} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,7^2 \cdot 10^{-54}} \sim 10^{36}.$$

Какое чудовищное превосходство электрической силы! Гравитационное притяжение протонов не то что не обеспечивает устойчивость ядра — оно вообще не заметно на фоне их взаимного электрического отталкивания.

Следовательно, существуют иные силы притяжения, которые скрепляют нуклоны внутри ядра и превосходят по величине силу электрического отталкивания протонов. Это — так называемые *ядерные силы*.

10.1 Ядерные силы

До сих пор мы знали два типа взаимодействий в природе — гравитационные и электромагнитные. Ядерные силы служат проявлением нового, третьего по счёту типа взаимодействий — *сильного взаимодействия*. Мы не будем вдаваться в механизм возникновения ядерных сил, а лишь перечислим их наиболее важные свойства.

1. Ядерные силы действуют между любыми двумя нуклонами: протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном.
2. Ядерные силы притяжения протонов внутри ядра примерно в 100 раз превосходят силу электрического отталкивания протонов. Более мощных сил, чем ядерные, в природе не наблюдается.
3. Ядерные силы притяжения являются *короткодействующими*: радиус их действия составляет около 10^{-15} м. Это и есть размер ядра — именно на таком расстоянии друг от друга нуклоны удерживаются ядерными силами. При увеличении расстояния ядерные силы очень быстро убывают; если расстояние между нуклонами станет равным $2 \cdot 10^{-15}$ м, ядерные силы почти полностью исчезнут.

На расстояниях, меньших 10^{-15} м, ядерные силы становятся силами отталкивания.

Сильное взаимодействие относится к числу фундаментальных — его нельзя объяснить на основе каких-то других типов взаимодействий. Способность к сильным взаимодействиям оказалась свойственной не только протонам и нейтронам, но и некоторым другим элементарным частицам; все такие частицы получили название *адронов*. Электроны и фотоны к адронам не относятся — они в сильных взаимодействиях не участвуют.

10.2 Атомная единица массы

Массы атомов и элементарных частиц чрезвычайно малы, и измерять их в килограммах неудобно. Поэтому в атомной и ядерной физике часто применяется куда более мелкая единица — так называемая *атомная единица массы* (сокращённо *а. е. м.*).

По определению, *атомная единица массы есть 1/12 массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$* . Вот её значение с точностью до пяти знаков после запятой в стандартной записи:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

(Такая точность нам впоследствии понадобится для вычисления одной очень важной величины, постоянно применяющейся в расчётах энергии ядер и ядерных реакций.)

Оказывается, что 1 а. е. м., выраженная в граммах, численно равна величине, обратной к постоянной Авогадро $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$:

$$\frac{1}{N_A} = \frac{1}{6,02214 \cdot 10^{23}} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ моль.}$$

Почему так получается? Вспомним, что число Авогадро есть число атомов в 12 г углерода. Кроме того, масса m_C атома углерода равна 12 а. е. м. Отсюда имеем:

$$12 \text{ г} = N_A m_C = N_A \cdot 12 \text{ а. е. м.},$$

поэтому $N_A \cdot 1 \text{ а. е. м.} = 1 \text{ г}$, что и требовалось.

Как вы помните, любое тело массы m обладает энергией покоя E , которая выражается формулой Эйнштейна:

$$E = mc^2. \quad (25)$$

Выясним, какая энергия заключена в одной атомной единице массы. Нам надо будет провести вычисления с достаточно высокой точностью, поэтому берём скорость света с пятью знаками после запятой:

$$c = 2,99792 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Итак, для массы $m_1 = 1 \text{ а. е. м.}$ имеем соответствующую энергию покоя E_1 :

$$E_1 = m_1 c^2 = 1,66054 \cdot 10^{-27} \cdot 2,99792^2 \cdot 10^{16} = 1,49241 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.} \quad (26)$$

В случае малых частиц пользоваться джоулями неудобно — по той же причине, что и килограммами. Существует гораздо более мелкая единица измерения энергии — *электронвольт* (сокращённо *эВ*).

По определению, *1 эВ есть энергия, приобретаемая электроном при прохождении ускоряющей разности потенциалов 1 вольт*:

$$1 \text{ эВ} = eV = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \quad (27)$$

(вы привыкли использовать в задачах величину элементарного заряда в виде $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, но здесь нам нужны более точные вычисления).

Теперь, наконец, мы готовы вычислить обещанную величину — *энергетический эквивалент атомной единицы массы*, выраженный в МэВ. Из (26) и (27) получаем:

$$E_1 = \frac{1,49241 \cdot 10^{-10}}{1,60218 \cdot 10^{-19}} = 0,93149 \cdot 10^9 \text{ эВ} = \mathbf{931,5 \text{ МэВ.}} \quad (28)$$

Итак, запоминаем: **энергия покоя одной а. е. м. равна 931,5 МэВ**. Данное соотношение вы будете неоднократно использовать в задачах. Ведь обычные единицы измерения массы и

энергии в ядерной физике — это атомная единица массы и электронвольты с различными приставками (кэВ, МэВ, ГэВ и сейчас уже ТэВ).

В дальнейшем нам понадобятся массы и энергии покоя протона, нейтрона и электрона. Приведём их с точностью, достаточной для решения задач. Энергия получена из массы умножением на только что вычисленный переводной коэффициент 931,5 МэВ/а. е. м.

$$\begin{aligned} m_p &= 1,00728 \text{ а. е. м.}, & E_p &= 938,3 \text{ МэВ}; \\ m_n &= 1,00867 \text{ а. е. м.}, & E_n &= 939,6 \text{ МэВ}; \\ m_e &= 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а. е. м.}, & E_e &= 0,511 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Дефект массы и энергия связи

Мы привыкли, что масса тела равна сумме масс частей, из которых оно состоит. В ядерной физике от этой простой мысли приходится отвыкать.

Давайте начнём с примера и возьмём хорошо знакомую нам α -частицу — ядро ${}^4_2\text{He}$. В таблице (например, в задачнике Рымкевича) имеется значение массы *нейтрального атома* гелия: она равна 4,00260 а. е. м. Для нахождения массы M ядра гелия нужно из массы нейтрального атома вычесть массу двух электронов, находящихся в атоме:

$$M = 4,00260 - 2 \cdot 0,0005486 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

В то же время, суммарная масса двух протонов и двух нейтронов, из которых состоит ядро гелия, равна:

$$2m_p + 2m_n = 2 \cdot 1,00728 + 2 \cdot 1,00867 = 4,03190 \text{ а. е. м.}$$

Мы видим, что сумма масс нуклонов, составляющих ядро, превышает массу ядра на

$$\Delta m = 2m_p + 2m_n - M = 4,03190 - 4,00150 = 0,0304 \text{ а. е. м.}$$

Величина Δm называется *дефектом массы*. В силу формулы Эйнштейна (25) дефекту массы отвечает изменение энергии:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0,0304 \cdot 931,5 \approx 28 \text{ МэВ.}$$

Величина ΔE обозначается также $E_{\text{св}}$ и называется *энергией связи* ядра ${}^4_2\text{He}$. Таким образом, энергия связи α -частицы составляет приблизительно 28 МэВ.

Каков же физический смысл энергии связи (и, стало быть, дефекта масс)?

Чтобы расщепить ядро на составляющие его протоны и нейтроны, нужно *совершить работу* против действия ядерных сил. Эта работа не меньше определённой величины A_{min} ; *минимальная* работа A_{min} по разрушению ядра совершается в случае, когда высвободившиеся протоны и нейтроны *покоятся*.

Ну а если над системой совершается работа, то энергия системы *возрастает* на величину совершённой работы. Поэтому суммарная энергия покоя нуклонов, составляющих ядро и взятых по отдельности, оказывается *больше* энергии покоя ядра на величину A_{min} .

Следовательно, и суммарная масса нуклонов, из которых состоит ядро, будет больше массы самого ядра. Вот почему возникает дефект массы.

В нашем примере с α -частицей суммарная энергия покоя двух протонов и двух нейтронов больше энергии покоя ядра гелия на 28 МэВ. Это значит, что для расщепления ядра ${}^4_2\text{He}$ на составляющие его нуклоны нужно совершить работу, равную как минимум 28 МэВ. Эту величину мы и назвали энергией связи ядра.

Итак, *энергия связи ядра — это минимальная работа, которую необходимо совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны.*

Энергия связи ядра есть разность энергий покоя нуклонов ядра, взятых по отдельности, и энергии покоя самого ядра. Если ядро массы M состоит из Z протонов и N нейтронов, то для энергии связи $E_{\text{св}}$ имеем:

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M)c^2.$$

Величина $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M$, как мы уже знаем, называется дефектом массы.

10.3 Удельная энергия связи

Важной характеристикой прочности ядра является его *удельная энергия связи*, равная отношению энергии связи к числу нуклонов:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Удельная энергия связи есть энергия связи, приходящаяся на один нуклон, и имеет смысл средней работы, которую необходимо совершить для удаления нуклона из ядра.

На рис. 22 представлена зависимость удельной энергии связи естественных (то есть встречающихся в природе²⁰) изотопов химических элементов от массового числа A .

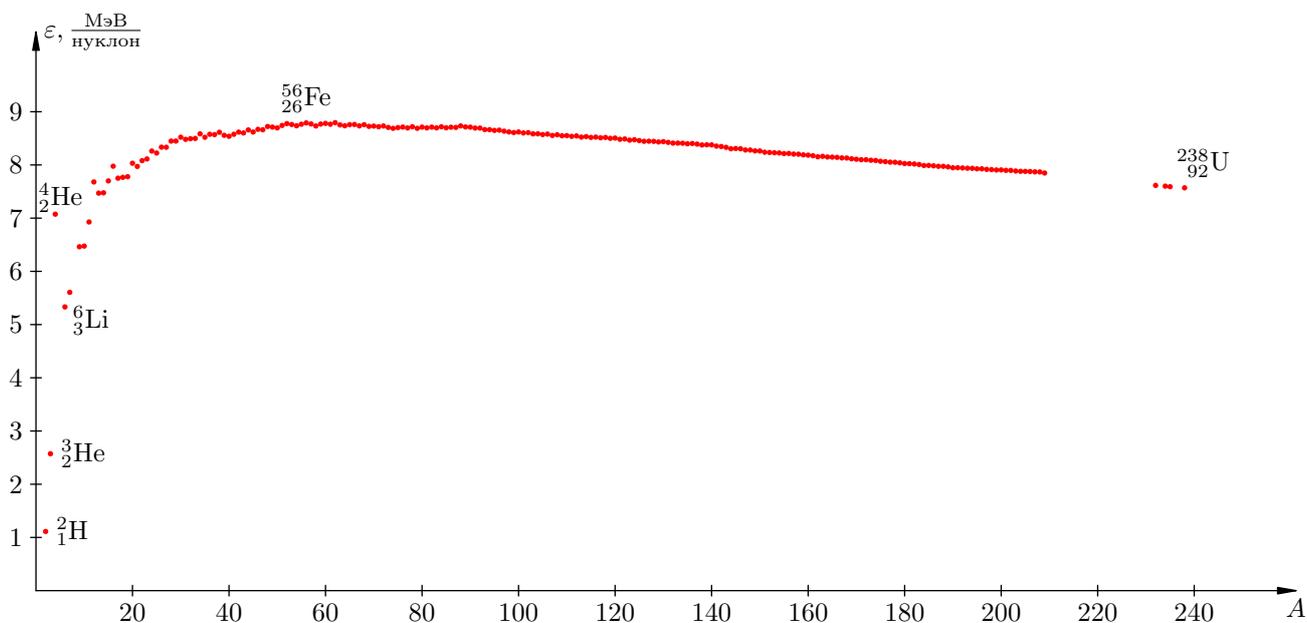


Рис. 22. Удельная энергия связи естественных изотопов

У лёгких элементов удельная энергия связи возрастает с ростом A , достигая максимального значения 8,8 МэВ/нуклон в окрестности железа $^{56}_{26}\text{Fe}$ (то есть в диапазоне изменения A примерно от 50 до 65). Затем она плавно убывает до величины 7,6 МэВ/нуклон у урана $^{238}_{92}\text{U}$.

Такой характер зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов объясняется совместным действием двух разнонаправленных факторов.

Первый фактор — поверхностные эффекты. Если нуклонов в ядре мало, то значительная их часть находится *на поверхности* ядра. Эти поверхностные нуклоны окружены меньшим числом соседей, чем внутренние нуклоны, и, соответственно, взаимодействуют с меньшим числом соседних нуклонов. При увеличении A доля внутренних нуклонов растёт, а доля поверхностных

²⁰Элементы с массовыми числами 210–231, 233, 236, 237 в естественных условиях не встречаются. Этим объясняются пробелы в конце графика.

нуклонов — падает; поэтому работа, которую нужно совершить для удаления одного нуклона из ядра, в среднем должна увеличиваться с ростом A .

Однако с возрастанием числа нуклонов начинает проявляться *второй фактор* — *кулоновское отталкивание протонов*. Ведь чем больше протонов в ядре, тем большие электрические силы отталкивания стремятся разорвать ядро; иными словами, тем сильнее каждый протон отталкивается от остальных протонов. Поэтому работа, необходимая для удаления нуклона из ядра, в среднем должна уменьшаться с ростом A .

Пока нуклонов мало, первый фактор доминирует над вторым, и потому удельная энергия связи возрастает.

В окрестности железа ($50 \leq A \leq 65$) действия обоих факторов сравниваются друг с другом, в результате чего удельная энергия связи выходит на максимум. Это область наиболее устойчивых, прочных ядер.

Затем второй фактор начинает перевешивать, и под действием всё возрастающих сил кулоновского отталкивания, распирающих ядро, удельная энергия связи убывает.

10.4 Насыщение ядерных сил

Тот факт, что второй фактор доминирует у тяжёлых ядер, говорит об одной интересной особенности ядерных сил: они обладают свойством *насыщения*. Это означает, что каждый нуклон в большом ядре связан ядерными силами не со всеми остальными нуклонами, а лишь с небольшим числом своих соседей, и число это не зависит от размеров ядра.

Действительно, если бы такого насыщения не было, удельная энергия связи продолжала бы возрастать с увеличением A — ведь тогда каждый нуклон скреплялся бы ядерными силами со всё большим числом нуклонов ядра, так что первый фактор неизменно доминировал бы над вторым. У кулоновских сил отталкивания не было бы никаких шансов переломить ситуацию в свою пользу!

11 Ядерные реакции

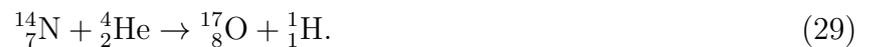
В предыдущем листке мы неоднократно говорили о расщеплении атомного ядра на составные части. Но как этого добиться в действительности? В результате каких физических процессов можно разбить ядро?

Наблюдения радиоактивного распада в изменяющихся внешних условиях — а именно, при различных давлениях и температурах, в электрических и магнитных полях — показали, что скорость радиоактивного распада от этих условий не зависит. Никаких превращений химических элементов друг в друга все эти факторы вызвать не способны. Очевидно, изменения энергии тут слишком малы, чтобы повлиять на атомное ядро — так ветер, обдувающий кирпичный дом, не в состоянии его разрушить.

Но разрушить дом можно артиллерийским снарядом. И Резерфорд в 1919 году решил воспользоваться наиболее мощными «снарядами», которые имелись тогда в распоряжении. Это были α -частицы, вылетающие с энергией около 5 МэВ при радиоактивном распаде урана. (Как вы помните, это те самые снаряды, которыми он восемь лет назад бомбардировал лист золотой фольги в своих знаменитых опытах, породивших планетарную модель атома.)

Правда, превращений золота в другие химические элементы в тех экспериментах не наблюдалось. Ядро золота ${}^{197}_{79}\text{Au}$ само по себе весьма прочное, да и к тому же содержит довольно много протонов; они создают сильное кулоновское поле, отталкивающее α -частицу и не подпускающее её слишком близко к ядру. А ведь для разбивания ядра α -снаряд должен сблизиться с ядром настолько, чтобы включились ядерные силы! Что ж, раз большое количество протонов мешает — может, взять ядро полегче, где протонов мало?

Резерфорд подверг бомбардировке ядра азота ${}^{14}_7\text{N}$ и в результате осуществил первую в истории физики *ядерную реакцию*:



В правой части (29) мы видим *продукты реакции* — изотоп кислорода и протон.

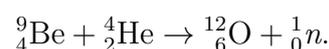
Стало ясно, что для изучения ядерных реакций нужно располагать частицами-снарядами высоких энергий. Такую возможность дают *ускорители* элементарных частиц. Ускорители имеют два серьёзных преимущества перед естественными «радиоактивными пушками».

1. В ускорителях можно разгонять любые заряженные частицы. В особенности это касается протонов, которые при естественном распаде ядер не появляются. Протоны хороши тем, что несут минимальный заряд, а значит — испытывают наименьшее кулоновское отталкивание со стороны ядер-мишеней.
2. Ускорители позволяют достичь энергий, на несколько порядков превышающие энергию α -частиц при радиоактивном распаде. Например, в Большом адронном коллайдере протоны разгоняются до энергий в несколько ТэВ; это в миллион раз больше, чем 5 МэВ у α -частиц в реакции (29), осуществлённой Резерфордом.

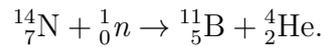
Так, с помощью протонов, прошедших через ускоритель, в 1932 году удалось разбить ядро лития (получив при этом две α -частицы):



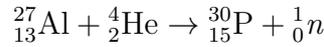
Ядерные реакции дали возможность искусственного превращения химических элементов. Кроме того, в продуктах реакций стали обнаруживаться новые, не известные ранее частицы. Например, при облучении бериллия α -частицами в том же 1932 году был открыт нейтрон:



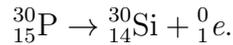
Нейтроны замечательно подходят для раскалывания ядер: не имея электрического заряда, они беспрепятственно проникают внутрь ядра²¹. Так, при облучении азота нейтронами протекает следующая реакция:



В ходе экспериментов с ядерными реакциями была открыта *искусственная радиоактивность* — получены радиоактивные изотопы, не встречающиеся в естественных условиях. Например, в реакции



получился радиоактивный изотоп фосфора ${}^{30}_{15}\text{P}$, которого нет в природе (ядро «природного» фосфора ${}^{31}_{15}\text{P}$ стабильно). Этот радиоактивный фосфор распадается, испуская позитрон и превращаясь в кремний:



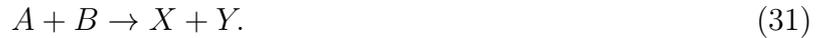
11.1 Энергетический выход ядерной реакции

Обсуждая энергию связи, мы видели, что в результате ядерных процессов масса системы частиц не остаётся постоянной. Это, в свою очередь, приводит к тому, что кинетическая энергия продуктов ядерной реакции отличается от кинетической энергии исходных частиц.

Прежде всего напомним, что полная энергия E частицы массы m складывается из её энергии покоя mc^2 и кинетической энергии K :

$$E = mc^2 + K.$$

Пусть в результате столкновения частиц A и B происходит ядерная реакция, продуктами которой служат частицы X и Y :



Полная энергия системы частиц сохраняется:

$$E_A + E_B = E_X + E_Y,$$

то есть

$$(m_Ac^2 + K_A) + (m_Bc^2 + K_B) = (m_Xc^2 + K_X) + (m_Yc^2 + K_Y). \quad (32)$$

Кинетическая энергия исходных частиц равна $K_A + K_B$. Кинетическая энергия продуктов реакции равна $K_X + K_Y$. *Энергетический выход* Q ядерной реакции — это разность кинетических энергий продуктов реакции и исходных частиц:

$$Q = (K_X + K_Y) - (K_A + K_B).$$

Из (32) легко получаем:

$$Q = (m_A + m_B - m_X - m_Y)c^2. \quad (33)$$

Если $Q > 0$, то говорят, что реакция идёт *с выделением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *больше* кинетической энергии исходных частиц. Из (33) мы видим, что в этом случае суммарная масса продуктов реакции *меньше* суммарной массы исходных частиц.

Если же $Q < 0$, то реакция идёт *с поглощением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *меньше* кинетической энергии исходных частиц. Суммарная масса продуктов реакции в этом случае *больше* суммарной массы исходных частиц.

²¹При этом ускорять нейтроны не надо — медленные нейтроны легче проникают в ядра. Нейтроны, оказываясь, нужно даже замедлять, и делается это пропусканием нейтронов через обычную воду.

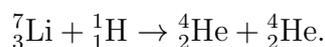
Таким образом, термины «выделение» и «поглощение» энергии не должны вызывать недоумение: они относятся только к *кинетической* энергии частиц. Полная энергия системы частиц, разумеется, в любой реакции остаётся неизменной.

Чтобы посчитать энергетический выход Q ядерной реакции (31), действуем по следующему алгоритму.

1. С помощью таблицы масс нейтральных атомов находим m_A , m_B , m_X и m_Y , выраженные в а. е. м. (для нахождения массы ядра не забываем вычесть из массы нейтрального атома массу электронов).
2. Вычисляем массу $m_1 = m_A + m_B$ исходных частиц, массу $m_2 = m_X + m_Y$ продуктов реакции и находим разность масс $\Delta m = m_1 - m_2$.
3. Умножаем Δm на 931,5 и получаем величину Q , выраженную в МэВ.

Мы сейчас подробно рассмотрим вычисление энергетического выхода Q на двух примерах бомбардировки ядер лития ${}^7_3\text{Li}$: сначала — протонами, затем — α -частицами.

В первом случае имеем уже упоминавшуюся выше реакцию (30):



Масса атома лития ${}^7_3\text{Li}$ равна 7,01601 а. е. м. Масса электрона равна 0,000548 а. е. м. Вычитая из массы атома массу трёх его электронов, получаем *массу ядра лития* ${}^7_3\text{Li}$:

$$7,01601 - 3 \cdot 0,000548 = 7,01437 \text{ а. е. м.}$$

Масса протона равна 1,00728 а. е. м., так что масса исходных частиц:

$$m_1 = 7,01437 + 1,00728 = 8,02165 \text{ а. е. м.}$$

Переходим к продуктам реакции. Масса атома гелия равна 4,00260 а. е. м. Вычитаем массу электронов и находим *массу ядра гелия* ${}^4_2\text{He}$:

$$4,00260 - 2 \cdot 0,000548 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

Умножая на 2, получаем массу продуктов реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00150 = 8,00300 \text{ а. е. м.}$$

Масса, как видим, уменьшилась ($m_2 < m_1$); это означает, что наша реакция идёт с выделением энергии. Разность масс:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 8,02165 - 8,00300 = 0,01865 \text{ а. е. м.}$$

Выделившаяся энергия:

$$Q = 0,01865 \cdot 931,5 = 17,4 \text{ МэВ.}$$

Теперь рассмотрим второй пример. При бомбардировке ядер лития α -частицами происходит реакция:



Массы исходных ядер нам уже известны; остаётся сосчитать их суммарную массу:

$$m_1 = 7,01437 + 4,00150 = 11,01587 \text{ а. е. м.}$$

Из таблицы берём массу атома бора $^{10}_5\text{B}$ (она равна 10,01294 а. е. м.); вычитаем массу пяти электронов и получаем массу ядра атома бора:

$$10,01294 - 5 \cdot 0,000548 = 10,01020 \text{ а. е. м.}$$

Масса нейтрона равна 1,00867 а. е. м. Находим массу продуктов реакции:

$$m_2 = 10,01020 + 1,00867 = 11,01887 \text{ а. е. м.}$$

На сей раз масса увеличилась ($m_2 > m_1$), то есть реакция идёт с поглощением энергии. Разность масс равна:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -0,0030 \text{ а. е. м.}$$

Энергетический выход реакции:

$$Q = -0,0030 \cdot 931,5 = -2,8 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, в реакции (34) поглощается энергия 2,8 МэВ. Это означает, что суммарная кинетическая энергия продуктов реакции (ядра бора и нейтрона) на 2,8 МэВ меньше, чем суммарная кинетическая энергия исходных частиц (ядра лития и α -частицы). Поэтому, чтобы данная реакция в принципе осуществилась, энергия исходных частиц должна быть не меньше величины 2,8 МэВ.

11.2 Деление ядер

Бомбардируя ядра урана медленными нейтронами, немецкие физики Ган и Штрассман обнаружили появление элементов средней части периодической системы: бария, криптона, стронция, рубидия, цезия и т. д. Так было открыто *деление ядер* урана.

На рис. 23 мы видим процесс деления ядра²². Захватывая нейтрон, ядро урана делится на два *осколка*, и при этом освобождаются два-три нейтрона.

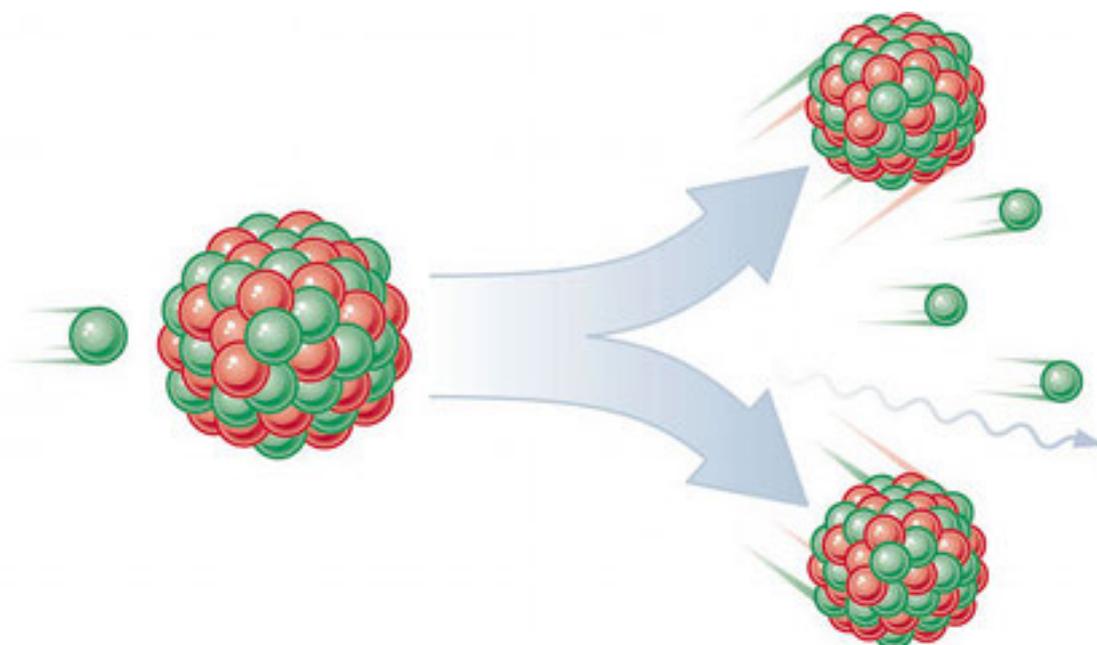


Рис. 23. Деление ядра урана

²²Изображение с сайта oup.co.uk.

Осколки являются ядрами радиоактивных изотопов элементов середины таблицы Менделеева. Один из осколков всегда больше другого. Например, при бомбардировке урана $^{235}_{92}\text{U}$ могут встречаться такие комбинации осколков (как говорят, реакция идёт по следующим *каналам*).

- Барий и криптон: $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3 {}^1_0n$.
- Цезий и рубидий: $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{140}_{55}\text{Cs} + ^{94}_{37}\text{Rb} + 2 {}^1_0n$.
- Ксенон и стронций: $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 2 {}^1_0n$.

Вообще, известно около 50 каналов распада ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$. В каждой из этих реакций выделяется очень большая энергия — порядка 200 МэВ. Сравните эту величину с найденным выше энергетическим выходом реакции (30), равным 17,4 МэВ! Откуда берётся такое количество энергии?

Основная причина состоит в том, что из-за наличия большого числа протонов — а их в ядре урана упаковано 92 штуки — кулоновские силы отталкивания, распирающие ядро, очень велики. Ядерные силы пока ещё в состоянии удерживать ядро от распада, но могучий кулоновский фактор готов сказать своё слово в любой момент.

И такой момент настает, когда в ядре застревает нейтрон (рис. 24)²³.

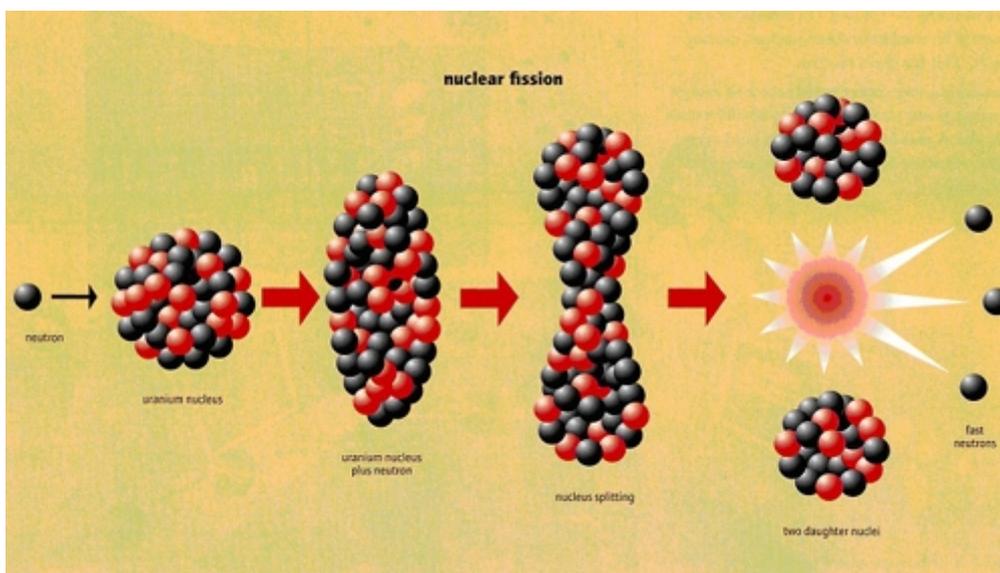


Рис. 24. Деформация, колебания и разрыв ядра

Застывший нейтрон вызывает деформацию ядра и колебания его формы. Эти колебания могут стать столь интенсивными, что ядро вытянется в «гантельку». Между половинками гантельки образуется тонкий перешеек из небольшого числа нуклонов.

Получается, что силам электрического отталкивания половинок гантельки противостоят короткодействующие ядерные силы, скрепляющие нуклоны перешейка. Чем тоньше становится перешеек, тем меньше в нём оказывается нуклонов, и тем слабее будет действие ядерных сил. В конце концов перешеек не выдержит, и ядро разорвётся.

Осколки ядра разлетаются с огромной скоростью — около $1/30$ скорости света. Они и уносят большую часть энергии, высвобождающейся при делении ядра²⁴.

²³Изображение с сайта investingreenenergy.com.

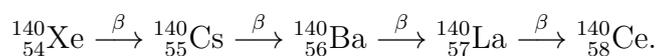
²⁴Из 200 МэВ энергетического выхода примерно 168 МэВ приходится на кинетическую энергию осколков. Остальная энергия распределяется между нейтронами и другими частицами, появляющимися в процессе деления: гамма-квантами, электронами и антинейтрино.

Появление двух-трёх свободных нейтронов — характерная черта деления ядра урана. Чем объясняется их неизменное присутствие в каждом канале деления?

Дело в том, что по мере движения от конца таблицы Менделеева к её началу отношение N/A числа нейтронов к числу нуклонов в стабильных ядрах *уменьшается*. Возьмём в качестве примера уран и продукты его деления — барий и криптон (стабильные ядра).

- Для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ имеем $N/A = 143/235 = 0,61$;
- Для бария ${}^{137}_{56}\text{Ba}$ имеем $N/A = 81/137 = 0,59$;
- Для криптона ${}^{84}_{36}\text{Kr}$ имеем $N/A = 48/84 = 0,57$.

Поэтому при делении тяжёлого ядра возникают «лишние» нейтроны, часть которых и освобождается в качестве продуктов реакции. Другая часть лишних нейтронов остаётся в ядрах-осколках, делая их радиоактивными. Осколки дают начало целым цепочкам β -распадов, последовательно уменьшающих отношение N/A . Например:



(концом этой цепочки является стабильное ядро изотопа церия). В ядерной энергетике такие цепочки распадов продуктов деления тяжёлых ядер создают серьёзную экологическую проблему ликвидации радиоактивных отходов.

Деление тяжёлых ядер можно истолковать с точки зрения уже известного нам графика зависимости удельной энергии связи ядра от его массового числа (рис. 25).

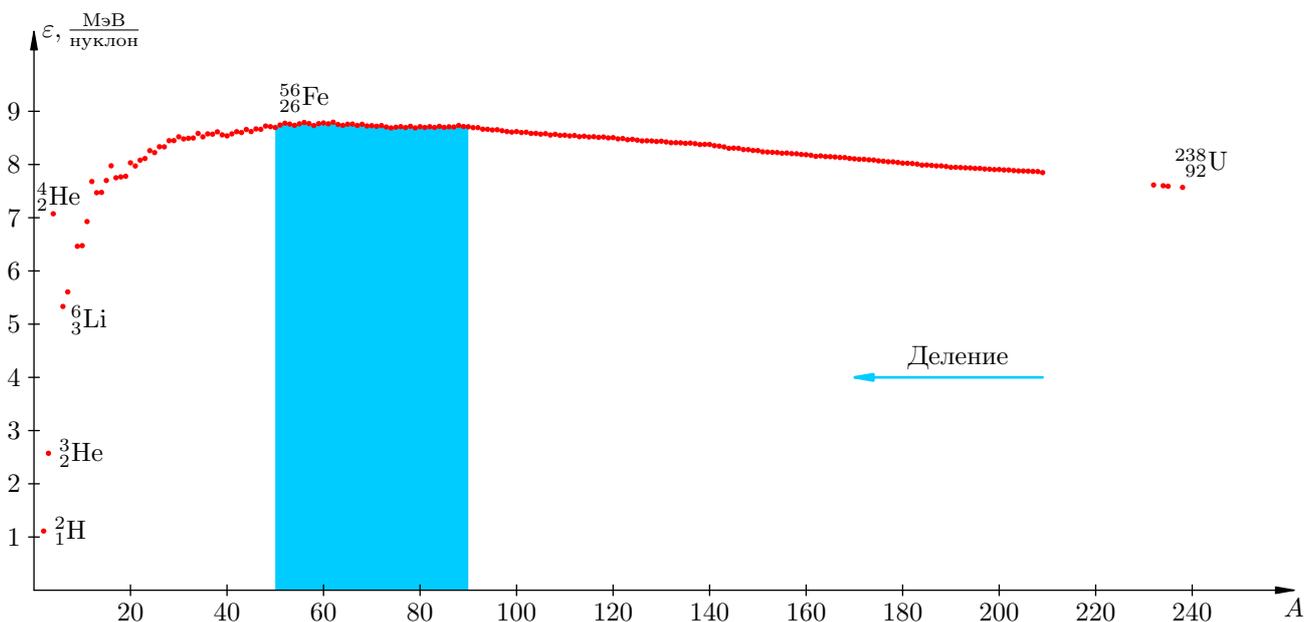


Рис. 25. Деление тяжёлых ядер энергетически выгодно

Цветом выделена область $50 \leq A \leq 90$, в которой удельная энергия связи достигает наибольшего значения $8,7 \text{ МэВ/нуклон}$. Это область наиболее устойчивых ядер. Справа от этой области удельная энергия связи плавно уменьшается до $7,6 \text{ МэВ/нуклон}$ у ядра урана.

Процесс превращения менее устойчивых ядер в более устойчивые является энергетически выгодным и сопровождается выделением энергии. При делении ядра урана, как видим, удельная энергия связи повышается примерно на 1 МэВ/нуклон ; эта энергия как раз и выделяется в процессе деления. Умножив это на число нуклонов в ядре урана, получим приблизительно те самые 200 МэВ энергетического выхода, о которых говорилось выше.

11.3 Цепная ядерная реакция

Появление двух-трёх нейтронов в процессе деления ядра урана — важнейший факт. Эти нейтроны «первого поколения» могут попасть в новые ядра и вызвать их деление; в результате деления новых ядер возникнут нейтроны «второго поколения», которые попадут в следующие ядра и вызовут их деление; возникнут нейтроны «третьего поколения», которые приведут к делению очередных ядер и т. д. Так идёт *цепная ядерная реакция*, в ходе которой высвобождается колоссальное количество энергии.

Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы число N_i высвободившихся нейтронов в очередном поколении было не меньше числа N_{i-1} нейтронов в предыдущем поколении. Величина

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

называется *коэффициентом размножения нейтронов*. Таким образом, цепная реакция идёт при условии $k \geq 1$. Если $k < 1$, то цепная реакция не возникает.

В случае $k > 1$ происходит лавинообразное нарастание числа освобождающихся нейтронов, и цепная реакция становится *неуправляемой*. Так происходит взрыв атомной бомбы.

В ядерных реакторах происходит *управляемая* цепная реакция деления с коэффициентом размножения $k = 1$. Стационарное течение управляемой цепной реакции обеспечивается введением в активную зону реактора (то есть в ту область, где протекает реакция) специальных управляющих стержней, поглощающих нейтроны. При полностью введённых стержнях поглощение ими нейтронов настолько велико, что $k < 1$ и реакция не идёт. В процессе запуска реактора стержни постепенно выводят из активной зоны, пока выделяемая мощность не достигнет требуемого уровня. Этот уровень тщательно контролируется, и при его превышении включаются устройства, вводящие управляющие стержни назад в активную зону.

11.4 Термоядерная реакция

Наряду с реакцией деления тяжёлых ядер энергетически выгодным оказывается и обратный в некотором смысле процесс — *синтез лёгких ядер*, то есть слияние ядер лёгких элементов (расположенных в начале периодической таблицы) с образованием более тяжёлого ядра.

Чтобы началось слияние ядер, их нужно сблизить вплотную — чтобы вступили в действие ядерные силы. Для такого сближения нужно преодолеть кулоновское отталкивание ядер, резко возрастающее с уменьшением расстояния между ними. Это возможно лишь при очень большой кинетической энергии ядер, а значит — при очень высокой температуре (в десятки и сотни миллионов градусов). Поэтому реакция ядерного синтеза называется *термоядерной реакцией*.

В качестве примера термоядерной реакции приведём реакцию слияния ядер дейтерия и трития (тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода), в результате которой образуется ядро гелия и нейтрон:



Эта реакция идёт с выделением энергии, равной 17,6 МэВ (попробуйте сами провести расчёты и получить данную величину). Это очень много, если учесть, что в реакции участвуют всего 5 нуклонов! В самом деле, в расчёте на один нуклон в реакции (35) выделяется энергия примерно 3,5 МэВ, в то время как при делении ядра урана выделяется «всего» 1 МэВ на нуклон.

Таким образом, термоядерные реакции служат источником ещё большего количества энергии, чем реакции деления ядер. С физической точки зрения это понятно: энергия реакции ядерного деления есть в основном кинетическая энергия осколков, разогнанных *электрическими* силами отталкивания, а при ядерном синтезе энергия высвобождается в результате разгона нуклонов навстречу друг другу под действием куда более мощных *ядерных* сил притяжения.

Проще говоря, при делении ядер высвобождается энергия электрического взаимодействия, а при синтезе ядер — энергия сильного (ядерного) взаимодействия.

В недрах звёзд достигаются температуры, подходящие для синтеза ядер. Свет Солнца и далёких звёзд несёт энергию, выделяющуюся в термоядерных реакциях — при слиянии ядер водорода в ядра гелия и последующем слиянии ядер гелия в ядра более тяжёлых элементов, расположенных в средней части периодической системы. Направление термоядерного синтеза показано на рис. 26; синтез лёгких ядер энергетически выгоден, так как направлен в сторону увеличения удельной энергии связи ядра.

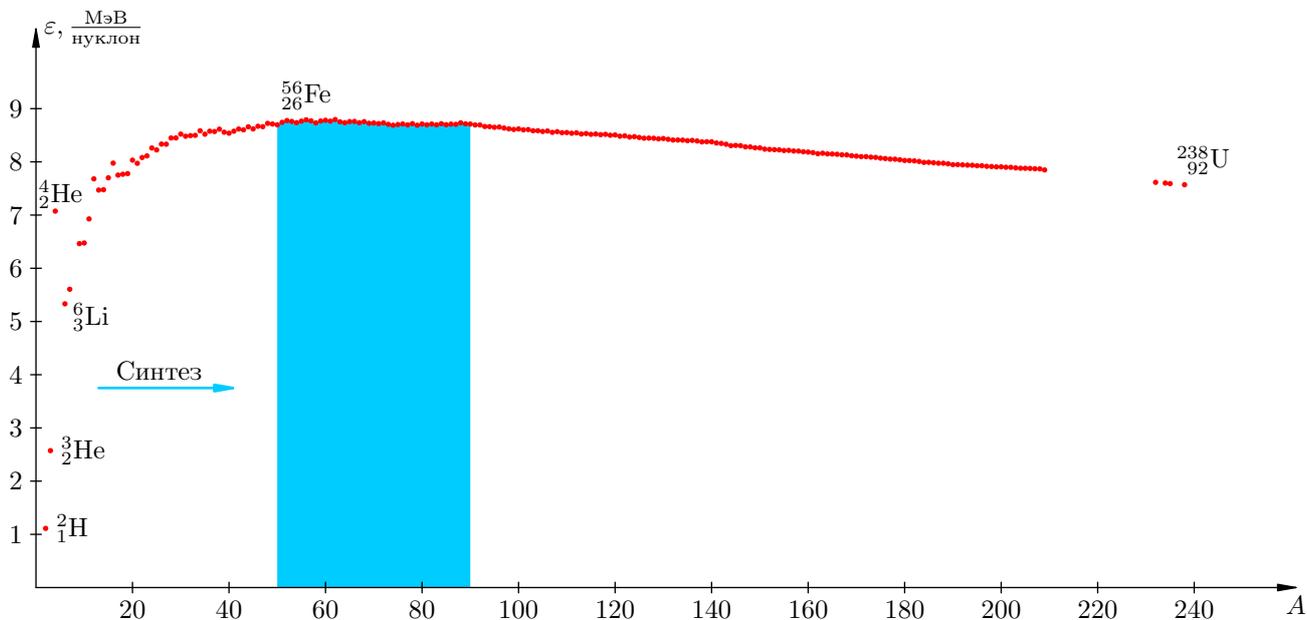


Рис. 26. Синтез лёгких ядер энергетически выгоден

Неуправляемая термоядерная реакция осуществляется при взрыве водородной бомбы. Сначала взрывается встроенная атомная бомба — это нужно для создания высокой температуры и давления на первой ступени термоядерного взрыва. Термоядерное горючее сжимается давлением излучения и разогревается до такой степени, что начинаются реакции ядерного синтеза, и происходит взрыв собственно водородной бомбы.

Осуществление управляемой термоядерной реакции остаётся пока нерешённой проблемой, над которой физики работают уже более полувека. Если удастся добиться управляемого течения термоядерного синтеза, то человечество получит в своё распоряжение фактически неограниченный источник энергии. Это чрезвычайно важная задача, стоящая перед нынешним и будущими поколениями — в свете угрожающей перспективы истощения нефтегазовых ресурсов нашей планеты.