

# АТОМ ИЗЛУЧАЕТ КВАНТЫ

Б. С. Ратнер

В «Рассказе о кванте»\*) были рассмотрены основные свойства электромагнитного излучения. Наименьшая порция энергии, которая может быть испущена или поглощена в виде излучения с частотой  $\nu$ , называется квантом. Энергия кванта  $E = 2\pi h\nu$ , где  $h = 1,05459 \cdot 10^{-34}$  дж·с — знаменитая постоянная Планка. (В старой литературе под постоянной Планка подразумевали величину  $h = 2\pi h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  дж·с.)

Диапазон энергии квантов, встречающихся в природе, необычайно широк (см. рис. 1). Если энергия кванта, соответствующего длинным радиоволнам (например, волнам длиной 1000 м), составляет всего  $E = \frac{2\pi h c}{\lambda} = 1,2 \cdot 10^{-9}$  эв (то есть в миллиард раз меньше энергии светового кванта), то энергия жестких  $\gamma$ -квантов, возникающих при распаде падающих на Землю частиц косми-

ческих лучей, достигает значений  $\approx 10^{15}$  эв ( $1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  дж).

В этой статье мы расскажем о том, как образуются световые и рентгеновские кванты, а также гамма-кванты.

## Возникновение света

Солнечный свет и пламя спички, свет неоновой рекламы и свечение раскаленного металла, несмотря на кажущееся различие, имеют одну природу. Возникновение света во всех источниках обусловлено изменениями, происходящими в атомах.

Согласно теории Бора атом любого элемента может находиться лишь в строго определенных дискретных состояниях. Каждому состоянию соответствует определенная внутренняя энергия атома  $E_n$ . Возможные значения энергии атома получили название энергетических уровней и обозначаются на схеме уровней горизонтальными прямыми (см. рис. 2, а). Расстояние между прямыми  $\Delta E$

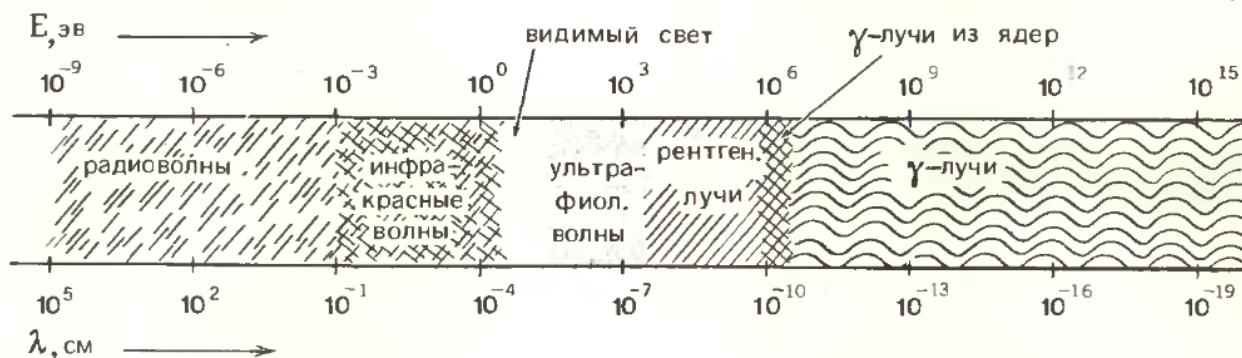


Рис. 1. Диапазон энергии квантов электромагнитного поля, встречающихся в природе.

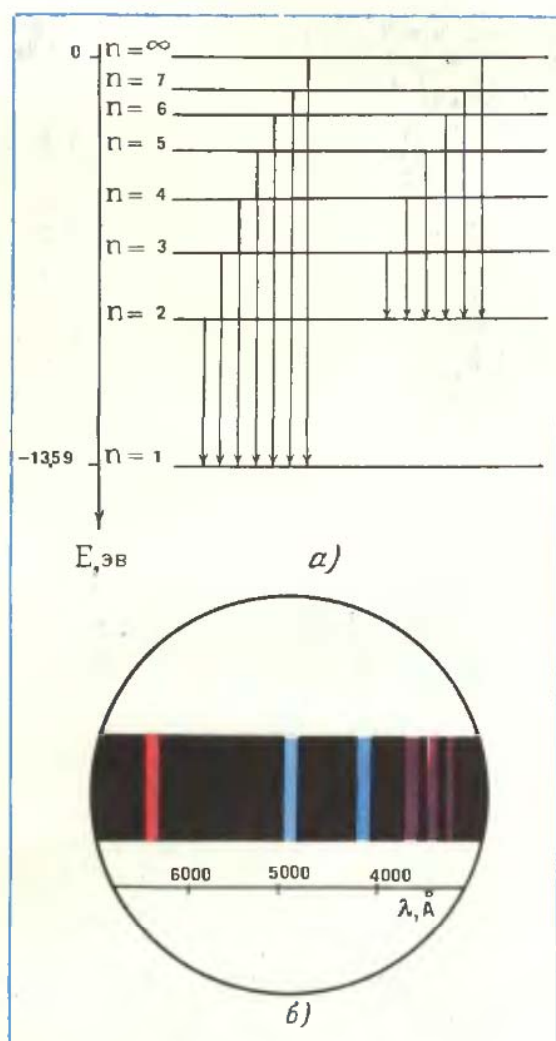


Рис. 2. а) Схема уровней атома водорода. Показаны переходы на уровни с  $n=1$  и  $n=2$ . б) Спектр излучения атомарного водорода в видимой области — переходы на уровень с  $n=2$ . Такая картина наблюдается в спектрометре.

равно разности энергий соответствующих уровней атома. Низший энергетический уровень  $E_1$  характеризует основное состояние атома. В этом устойчивом состоянии находятся в нормальных условиях все атомы. При поглощении энергии атом переходит в одно из возбужденных состояний  $E_2, E_3, E_4, \dots$ . Способ возбуждения атома может быть самым различным: облучение быстрыми электронами, тепловое возбуждение, воздействие световых квантов или электрический разряд. Во всех случаях возбуждения энергия передается электронам атома, поэтому часто говорят не о переходах

атома с одного уровня на другой, а о переходах электрона. Возбужденные состояния атома неустойчивы. За время  $\tau \approx 10^{-8}$  с атом переходит в основное состояние, излучая энергию в виде квантов электромагнитного поля. Энергия кванта  $E = 2\pi h\nu = E_2 - E_1$ .

Рассмотрим атом водорода, простейший из атомов, состоящий из протона и связанного с ним электрона. Энергия любого уровня может быть найдена из следующей формулы:

$$E_n = -\frac{13,59}{n^2} \text{ эВ},$$

где  $n=1, 2, \dots$  — так называемое главное квантовое число, характеризующее энергию уровня. В невозбужденном состоянии атома электрон находится на уровне с  $n=1$ . При возбуждении электрон может оказаться на уровне с  $n=2, 3, \dots$ . Из формулы видно, что с увеличением энергии возбуждения расстояние между соседними уровнями (то есть разность энергий) уменьшается. Отрицательным значениям энергии  $E_n$  соответствуют связанные состояния электрона. Следовательно, до тех пор, пока электрон удерживается в поле атома, спектр имеет прерывный (дискретный) характер. Сообщив атому водорода энергию, превышающую значение  $E = 13,59$  эВ, мы ионизуем его.

При переходе электрона с более высокого уровня на более низкий испускается квант света. Его энергия равна разности энергий уровней:

$$\begin{aligned} E_{n_i n_k} &= E_{n_i} - E_{n_k} = \\ &= 13,59 \left( \frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) (\text{эВ}). \end{aligned}$$

Зная энергию кванта, мы можем найти длину волны испущенного света, наблюдаемого в спектро스코пе:

$$\lambda = \frac{2\pi h c}{E} (\text{см}).$$

Схема энергетических уровней атома водорода показана на рисунке 2, а. Серия спектральных линий, соответствующих переходам на уровень с  $n=2$  со всех вышележащих уровней (серия



Бальмера), находится в видимой области (рис. 2, б). Переходы в основное состояние дают излучение в ультрафиолетовой части спектра (серия Лаймана).

В атомах более сложных, чем водород, электроны группируются в оболочки, то есть группы уровней с близкой энергией, имеющих одно и то же главное квантовое число  $n$ . Различные оболочки обозначают буквами  $K, L, M$  и т. д. На ближайшей к ядру  $K$ -оболочке располагается не более 2-х электронов, на  $L$ -оболочке — 8, на  $M$ -оболочке — 8, на  $N$ -оболочке — 18 и т. д. Наружные электроны связаны с атомом слабее внутренних; объясняется это увеличением расстояния до ядра и частичным экранированием притяжения ядра со стороны внутренних электронов.

С увеличением заряда ядра энергия связи  $k$ -электронов быстро растет (пропорционально  $Z^2$ ) и составляет в атоме натрия 1,1 кэв, а в атоме вольфрама — 70 кэв. Поэтому кванты видимого света, энергия которых составляет от 1,6 до 4,1 эв, испускаются сложными атомами при переходах электронов между уровнями внешней оболочки.

Широко известен опыт, в котором пламя газовой горелки вспыхивает желтым светом, когда в него бросают щепотку поваренной соли. Два очень близкие по энергии кванта, излученные атомами натрия в желтой части спектра, ответственные за этот эффект (см. рис. 3).

Испускание света в газосветных трубках, используемых для рекламы, также обусловлено переходами между определенными уровнями атомов газа, возбуждаемых с помощью электрического разряда. Однако чаще нам приходится сталкиваться с источниками света, обладающими сплошным (непрерывным) спектром. Именно к таким источникам света относятся солнце, лампы накаливания и лампы дневного света (люминесцентное освещение). В чем причина перехода от отдельных линий к сплошному

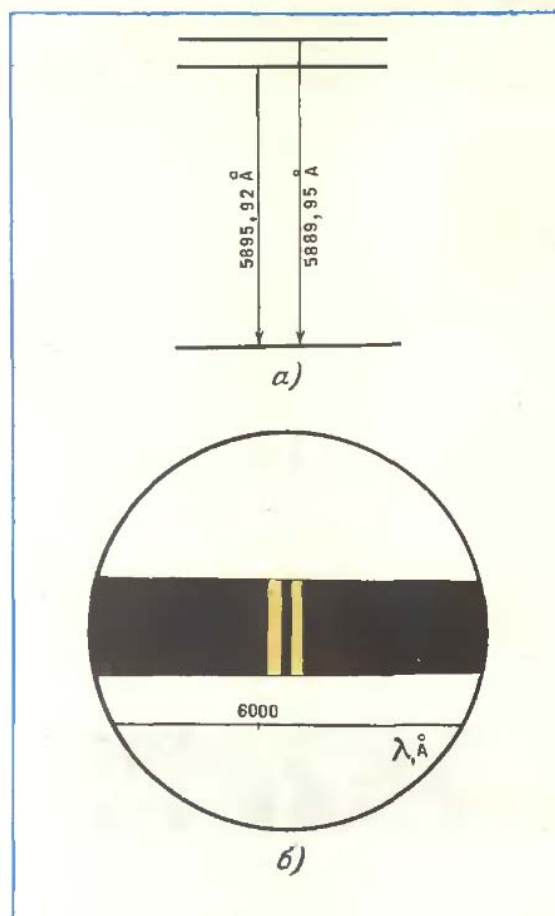


Рис. 3. а) Спектр излучения атома натрия в видимой области. б) В поле зрения спектрометра наблюдаются две желтые линии.

спектру? Оказывается, только разреженные газы, в которых взаимодействие между атомами невелико, дают линейные спектры. Если же вследствие высокой температуры или большого давления атомы газа часто испытывают соударения, то линии излучения уширяются настолько, что образуют непрерывный спектр. (Любопытно, что хотя спектр солнечного света сплошной, спектр атмосферы Солнца, который удается измерить во время полного солнечного затмения, состоит из отдельных ярких линий).

В твердом теле высокорасположенные уровни отдельных атомов, участвующие в образовании оптических спектров, из-за взаимодействия атомов превращаются в широкие энергетические зоны. Переходы между ними дают сплошной спектр, почти одинаковый для всех раскаленных твердых тел и зависящий, в основном,

от температуры. Так, в раскаленном кузнечном горне почти не различаются куски угля, шлака и железа.

### Возникновение рентгеновских квантов

По своей природе рентгеновские лучи тождественны со светом и отличаются от него лишь тем, что имеют меньшие длины волн.

Рентгеновские лучи образуются в вакуумной трубке. Между источником электронов (катод) и анодом поддерживается разность потенциалов до 50 кв. Попадание ускоренных электронов на анод вызывает испускание из анода пучка рентгеновских лучей. Какова физическая природа этого процесса? Если электрон с энергией  $E_0$  проходит через электрическое поле ядра, то он претерпевает отклонение. Поскольку при этом электрон испытывает ускорение, он, согласно электродинамике, должен излучить энергию. Закон сохранения энергии запишется в виде

$$E_0 = E + 2\pi h\nu,$$

где  $E_0$  — первоначальная энергия электрона,  $E$  — энергия электрона после испускания кванта частоты  $\nu$ . Электрон при торможении может потерять любую часть своей кинетической энергии, поэтому спектр тормозного излучения будет сплошным.

Попробуем определить верхнюю границу рентгеновского спектра (по энергии) (или минимальную длину волны). Из закона сохранения энергии следует, что наибольшая энергия кванта равна кинетической энергии электрона:

$$2\pi h\nu_{\max} = \frac{2\pi hc}{\lambda_{\min}} = eU,$$

где  $U$  — величина ускоряющего напряжения. На рисунке 4 изображен рентгеновский спектр молибдена. Мы видим помимо непрерывного рентгеновского спектра отдельные узкие линии. Эти линии представляют характеристическое рентгеновское излучение, которое возникает в тех случаях, когда энергия возбуждающих электронов становится равной или

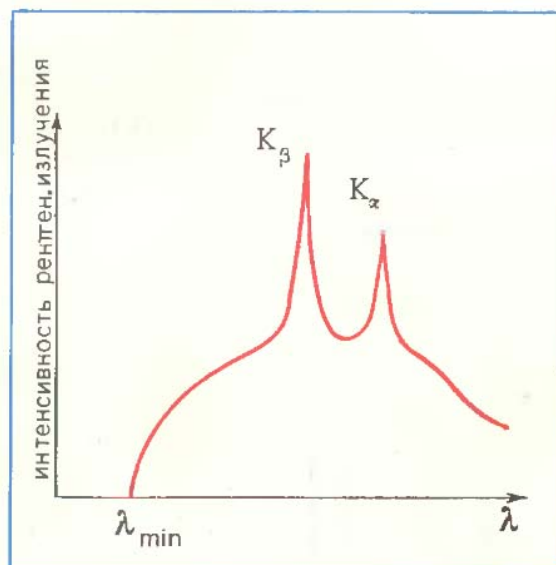


Рис. 4. Рентгеновский спектр излучения молибдена. [По оси ординат отложена интенсивность рентгеновского излучения, характеризующая количество испущенных квантов.] В области малых длин волн на сплошной спектр тормозного излучения накладываются линии  $K$ -серии характеристического излучения.

большей некоторого критического значения (для каждого элемента свое определенное значение). Теперь, после ознакомления с атомными спектрами, можно понять его происхождение. В тяжелых атомах энергия ближайшей к ядру  $K$ -оболочки составляет десятки кэв. Ускоренный в рентгеновской трубке быстрый электрон может вырвать из атома один из  $k$ -электронов. Образующаяся дырка заполняется электроном из верхней  $L$ - или  $M$ -оболочки. Одновременно испускается квант характеристического излучения. Более редкое событие — наблюдение излучения, возникающего при выбивании электрона из  $L$ -оболочки.

Спектральные линии характеристического излучения образуют закономерные последовательности, или серии, расположенные в различных частях рентгеновского спектра. Обозначают эти серии буквами  $K$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$ . Серия  $K$  — самая коротковолновая, состоит из линии  $K_\alpha$  (переход из  $L$ -оболочки в  $K$ ),  $K_\beta$  (переход из  $M$ -оболочки в  $K$ ) и т. д. Следующая (в сторону длинных волн) — серия



$\bar{L}$ ; далее идут серии  $M$  и  $N$ , которые наблюдаются только у тяжелых элементов. Длина волны рентгеновских лучей в тысячи раз меньше длин волн, испускаемых в видимой части спектра при переходах электронов внешней оболочки атомов.

### Возникновение $\gamma$ -квантов

Вскоре после открытия радиоактивного распада элементов Э. Резерфорд осуществил свой известный опыт по определению природы нового излучения. На одну из составляющих лучей, испускаемых препаратом радия, магнитное поле не оказывало никакого воздействия — это были  $\gamma$ -кванты.

С тех пор вот уже более полувека испускание  $\gamma$ -квантов ядрами является предметом тщательного изучения физиков.

Ядра, как и атомы, помимо основного состояния с минимальной энергией могут находиться в дискретных возбужденных энергетических состояниях. Расстояние между энергетическими уровнями колеблется в зависимости от массы ядра и энергии возбуждения от десятка  $\text{кэВ}$  до нескольких  $\text{МэВ}$ . Время жизни ядра в возбужденных состояниях не превышает  $10^{-13}$  —  $10^{-14}$  с. Переход ядра из возбужденного состояния в основное чаще всего сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов.

Энергия  $\gamma$ -кванта равна разности энергии начального и конечного состояний. Иногда энергия возбуждения ядра может превратиться в кинетическую энергию электрона, который вследствие этого покидает атом. Этот процесс, называемый внутренней конверсией, чаще всего происходит на ближайшей к ядру электронной оболочке.

У некоторых ядер встречаются состояния, распад которых в основное состояние запрещен определенными правилами квантовой механики. Время жизни таких состояний, называе-

мых изомерными, гораздо больше обычных времен жизни возбужденных состояний и достигает нескольких часов, дней и даже лет.

На рисунке 5 показана схема уровней ядра  $^{83}_{36}\text{Kr}$ .

Как образуются возбужденные состояния ядер? Радиоактивный распад элементов сопровождается испусканием  $\alpha$ -частиц с образованием ядра  $A-4$ ,  $Z-2$ , где  $A$  — массовое число и  $Z$  — заряд исходного ядра. При  $\beta$ -распаде ядро испускает две частицы — электрон и антинейтрино, образуя ядро  $A$ ,  $Z-1$ . В результате обоих типов распадов ядро обычно остается в возбужденном состоянии. Эти же состояния возникают в ходе

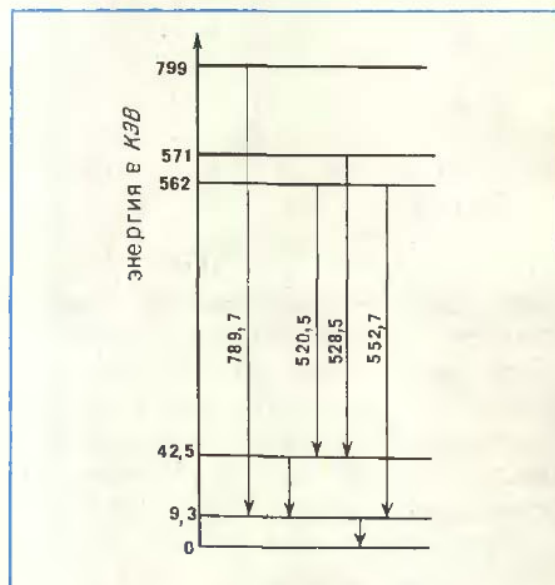


Рис. 5. Расположение уровней в ядре криптона  $^{83}_{36}\text{Kr}$ . Уровень с  $E=42,5$   $\text{кэВ}$  — изомерный, время жизни  $T=1,86$  года.

различных ядерных реакций. Так например, после реакции захвата медленного нейтрона возникает новое ядро, возбужденное до энергии  $8 \text{ МэВ}$ . В ускорителях кольцевого типа (бетатроны и синхротроны) и в линейных ускорителях электроны приобретают энергию в несколько десятков, сотен и даже тысяч  $\text{МэВ}$ . При торможении электронов в мишени образуются мощные пучки  $\gamma$ -квантов.