

► Назвать наименьший отрицательный заряд электроном предложил в 1891 г. британский физик Джордж Джонстон Стони, а в 1897 г. ирландский физик Джордж Френсис Фицджеральд предложил использовать этот термин для названия самой частицы.

Модель атома Резерфорда с изображением электронных орбит стала популярной эмблемой XX в. Так, на рисунке 193 показана эмблема физического факультета Белорусского государственного университета.



Рис. 193. Эмблема физического факультета БГУ



1. Объясните сущность модели атома Томсона.
2. Объясните схему экспериментов Резерфорда по рассеянию α -частиц.
3. Почему фольга в экспериментах Резерфорда должна быть как можно тоньше?
4. Объясните причину рассеяния α -частиц атомами вещества.
5. Сформулируйте основные положения ядерной модели атома.
6. Изобразите схематически ядерную модель атома.
7. Почему ядерную модель атома называют также планетарной? Какие элементы модели являются аналогами планет?
8. Какие противоречия возникают при объяснении процессов излучения энергии атомами на основе классической механики и электродинамики при использовании ядерной модели атома?
9. Определите полный заряд всех электронов в атоме: а) углерода; б) кислорода; в) железа.
10. Определите химический элемент, полный заряд ядра атома которого равен: а) $q = 4,80 \cdot 10^{-19}$ Кл; б) $q = 9,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; в) $q = 15,2 \cdot 10^{-19}$ Кл.

§ 31. Квантовые постулаты Бора

- Долгое время атом считался мельчайшей неделимой частицей вещества, являющейся носителем его физических свойств. Однако открытие радиоактивности и первой элементарной частицы (электрона) поставило под сомнение факт его неделимости. Почему атом устойчив? Какие физические процессы происходят в атомах? Как атом излучает свет?

Для преодоления противоречий, возникающих при описании строения атома на основе законов классической механики и электродинамики с экспериментальными данными, датский физик Нильс Бор в 1913 г.

в работе «О строении атомов и молекул» предложил квантовую модель атома, основанную на двух постулатах. В современном виде они формулируются следующим образом.

I постулат Бора (постулат стационарных состояний):

атом может находиться в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.

Стационарные состояния можно пронумеровать, присвоив им порядковые номера $n = 1, 2, 3, \dots$, причем каждому состоянию соответствует определенное дискретное значение энергии E_n .

Согласно модели Бора стационарным состояниям атома соответствуют определенные (разрешенные) орбиты, по которым электроны движутся вокруг ядра. Бор для простоты полагал, что эти орбиты представляют собой окружности, хотя в общем случае орбиты могут иметь форму эллипса, причем ядро располагается в одном из его фокусов (рис. 194).

Первый постулат противоречит как законам классической механики (энергия движущихся электронов может быть любой), так и законам классической электродинамики (ускоренно движущиеся электроны всегда излучают электромагнитные волны).

II постулат Бора (правило частот):

атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}, \quad (1)$$

где ν_{kn} — частота поглощенного или испущенного кванта излучения, E_k, E_n — энергия атома в k -м и n -м стационарном состоянии, h — постоянная Планка.

Если $E_k > E_n$, то при переходе происходит излучение энергии, если $E_k < E_n$, то — ее поглощение.

Состояние атома, которому соответствует наименьшая энергия, называется **основным**, а состояния, которым соответствуют большие значения

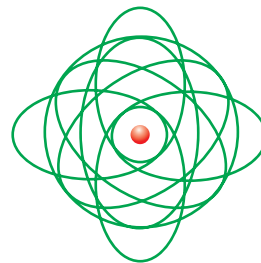


Рис. 194. Электронные орбиты в атоме по теории Бора — Зоммерфельда

энергии, — **возбужденными**. В основном энергетическом состоянии атом может находиться неограниченно долго, а в остальных стационарных состояниях $\sim 10^{-8}$ с. Это так называемое *время жизни атома* в возбужденном состоянии.

Как следует из II постулата Бора, частота излучения атома не связана с частотой вращения электрона по орбите, она определяется разностью значений энергии атома E_k и E_n в начальном и конечном состояниях. Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается электромагнитным излучением с длиной волны

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \quad (2)$$

Таким образом, первый постулат Бора позволил объяснить дискретность значений энергии атома, а первый и второй постулаты — линейчатую структуру атомных спектров.

Бор предложил также количественное *условие квантования* для нахождения радиусов стационарных (разрешенных) круговых орбит электронов:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (3)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, — номер орбиты, m_e — масса электрона, v_n — модуль скорости электрона на n -й орбите, r — радиус n -й орбиты, h — постоянная Планка.

Таким образом, постулаты Бора основывались на трех экспериментальных предположениях — результатах исследования атомных спектров, квантовой теории излучения, развитой Планком и Эйнштейном, и ядерной (планетарной) модели атома Резерфорда.

Исходя из постулатов Бора и условия квантования орбит, можно объяснить структуру энергетических уровней простейшего атома — атома водорода, состоящего из ядра (протона) и одного электрона, вращающегося вокруг него.



Бор получил выражение для энергии атома водорода:

$$E_n = -R \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

Поэтому энергия атома водорода (4) фактически определяется только номером орбиты n электрона, так как величина $R = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3}$ является постоянной, вследствие того что выражается через фундаментальные

постоянные (заряд электрона e , массу электрона m_e , постоянную Планка h , электрическая постоянная ϵ_0).

Согласно формуле (4) энергия атома водорода в *основном состоянии* ($n = 1$) получается равной $E_1 = -13,6$ эВ, а его энергия в *ионизированном* состоянии, когда электрон бесконечно далек от ядра ($n = \infty$), равной $E_\infty = 0$ эВ. Во втором состоянии ($n = 2$) энергия $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,40$ эВ, в третьем ($n = 3$) — $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,51$ эВ и т. д. Энергию атома водорода в любом состоянии можно рассчитать по формуле:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (5)$$

Так как энергия атома водорода может принимать только дискретный набор значений, то говорят, что она **квантована**.

Для наглядного представления стационарных энергетических состояний атома используется **энергетическая диаграмма** (рис. 195). Графически возможные значения энергии атома изображают в виде схемы уровней энергии (**энергетических уровней**) — горизонтальных прямых, проведенных на расстояниях в определенном масштабе, соответствующем разностям разрешенных значений энергии. Переходы атома из одного состояния в другое изображаются на диаграмме вертикальными линиями между соответствующими уровнями. Направление перехода обозначается стрелками.

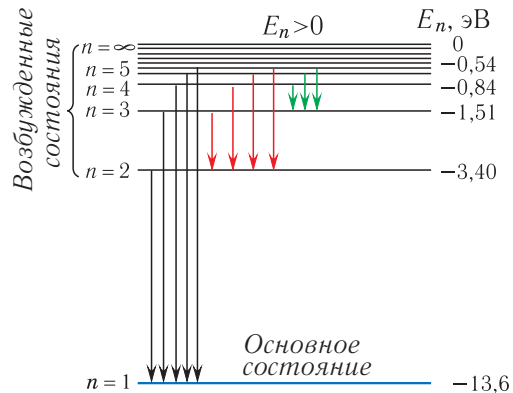


Рис. 195. Энергетическая диаграмма стационарных состояний атома водорода

Энергетическую диаграмму можно считать своеобразной «лестницей» с «нижней площадкой» (основным состоянием) и поднимающимися вверх «ступенями» (возбужденными состояниями). Формула для энергетических уровней энергии E_n атома показывает важную закономерность: чем выше поднимается над основным (первым) уровнем энергетическая «лестница», тем менее «крутыми» становятся ее ступени (на рисунке 196 это хорошо видно при $n > 4$).

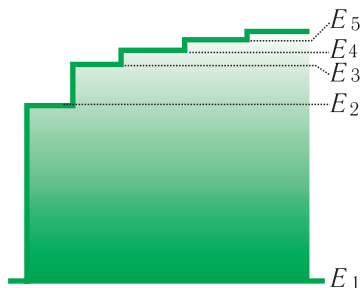


Рис. 196. Энергетическая «лестница» состояний атома водорода

Следовательно, чем дальше электрон от ядра ($n \rightarrow \infty$), тем на меньшую величину отличаются соседние уровни энергии, т. е. густота энергетических уровней растет. Квантовые скачки при этом уменьшаются, вследствие чего переходы между стационарными состояниями атома все больше и больше становятся «похожими» на непрерывное изменение энергии. Энергетическая «лестница» постепенно превращается в плавный «подъем» (см. рис. 196), т. е. энергия становится почти непрерывно

меняющейся величиной, как это и было в классической теории.

Процесс удаления электрона из атома называется **ионизацией**. Для удаления электрона из атома водорода, находящегося в основном состоянии, атому необходимо сообщить энергию $E_{\text{и}} = E_{\infty} - E_1 = 13,6$ эВ. Поэтому эту энергию $E_{\text{и}}$ называют *энергией ионизации* атома водорода. Следовательно, **энергия ионизации** равна работе, которую необходимо совершить внешним силам для удаления электрона на «бесконечное» расстояние из атома, находящегося в основном состоянии. Здесь под «бесконечностью» понимается такое расстояние, при котором взаимодействием электрона и ядра можно пренебречь.

Отметим, что выше уровня $n = \infty$ (при $E > 0$) электрон является свободным и может иметь любую энергию.

Энергия

$$E_{\text{св}} = E_1 - E_{\infty} = -13,6 \text{ эВ}$$

называется **энергией связи** электрона в атоме водорода.

Энергия связи определяется электромагнитным взаимодействием частиц и является *отрицательной величиной*, вследствие того, что при образовании атома энергия выделяется. Абсолютное значение энергии связи характеризует *прочность связи* и *устойчивость* атома.

Энергия связи по абсолютной величине равна энергии ионизации электрона в атоме:

$$E_{\text{и}} = E_{\text{св}}.$$



► Ионизация сложных атомов может быть однократной (атом теряет один электрон), двукратной (два электрона) и т. д.

Поскольку при возбуждении атома радиус орбиты электрона возрастает, то испускание излучения атомом происходит при переходах электронов в атоме с внешних орбит на внутренние (рис. 197).

Модель атома Бора позволяет описать не только атом водорода, но и ионизированные атомы (ионы) других элементов, вокруг ядер которых, как и в атоме водорода, движется только один электрон. Такие ионы называются *водородоподобными*. Примерами таких ионов являются однократно ионизированный атом гелия (He^+), двукратно ионизированный атом лития (Li^{++}) и т. д.

Необходимо отметить, что энергия атома может изменяться не только при испускании или поглощении энергии, но и при столкновении атомов. При неупругом столкновении изменяется внутренняя энергия сталкивающихся атомов, и электроны в них переходят на другие уровни энергии.

Таким образом, с помощью модели атома Бора удалось:

во-первых, вычислить энергию ионизации атома водорода, хорошо согласующуюся с экспериментом. Как теория, так и эксперимент дали значение $E_{\text{и}} = 13,6$ эВ;

во-вторых, значительно продвинуться в объяснении закономерностей периодической системы химических элементов Менделеева. Согласно модели атома Бора электроны движутся по определенным орбитам, образующим различные группы — электронные оболочки. Структура электронных оболочек определяет химические свойства элементов, которые периодически повторяются по мере заполнения оболочек электронами. Это позволило «предсказывать» свойства неизвестных элементов; так, например, был открыт элемент с порядковым номером $Z = 72$ — гафний, по своим свойствам аналогичный цирконию ($Z = 40$).

Модель атома Бора объяснила основные закономерности спектра атома водорода, хотя частично сохранила классический характер, поскольку в ней предполагалось, что электроны движутся по орбитам вокруг ядра. Однако на основе данной модели не удалось построить теорию более сложных атомов, например объяснить спектр излучения следующего за водородом атома гелия, который содержит всего два электрона. Соответ-

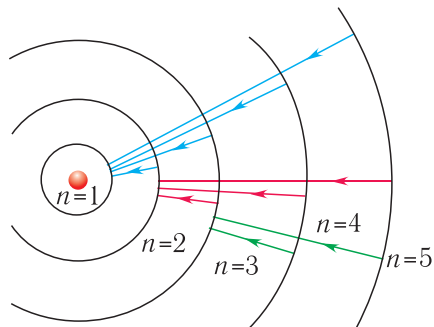


Рис. 197. Переходы электронов в атоме при испускании излучения

ственно, не могло быть и речи об объяснении на основании данной модели строения молекул, так как в них картина движения и взаимодействия электронов и атомных ядер намного сложнее, чем в атомах.

Теория атома Бора явилась важнейшим этапом на пути создания последовательной теории микроскопических явлений — квантовой механики.

▶ Планеты Солнечной системы также движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Это обстоятельство делает аналогию между ядерной моделью атома (см. рис. 194) и Солнечной системой еще более тесной.



В 1922 г. Нильсу Бору была присуждена Нобелевская премия по физике «за заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения».



1. Что предложил Бор для объяснения стабильности атома?
2. Сформулируйте первый постулат Бора — постулат стационарных состояний.
3. Сформулируйте и запишите правило частот — второй постулат Бора.
4. Запишите условие квантования стационарных круговых орбит электронов.
5. Чем отличается атом, находящийся в основном состоянии, от атома, находящегося в возбужденном состоянии?
6. Куда «исчезает» энергия при переходе электрона из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией?
7. неподвижен ли электрон в основном состоянии атома водорода в модели Бора?
8. Какая сила удерживает электроны на орбитах в ядерной модели атома?
9. Почему при наличии в атоме водорода всего одного электрона в спектре атома водорода наблюдается много линий?

Упражнение 20

1. Сколько различных квантов света N может испустить возбужденный атом водорода, если он находится на четвертом энергетическом уровне?
2. Атом водорода перешел с четвертого энергетического уровня ($n = 4$) на второй ($k = 2$). Как при этом изменилась энергия атома?
3. Определите, исходя из представленной энергетической диаграммы (рис. 198), какой из переходов соответствует: а) излучению фотона максимальной энергии; б) поглощению фотона максимальной энергии.

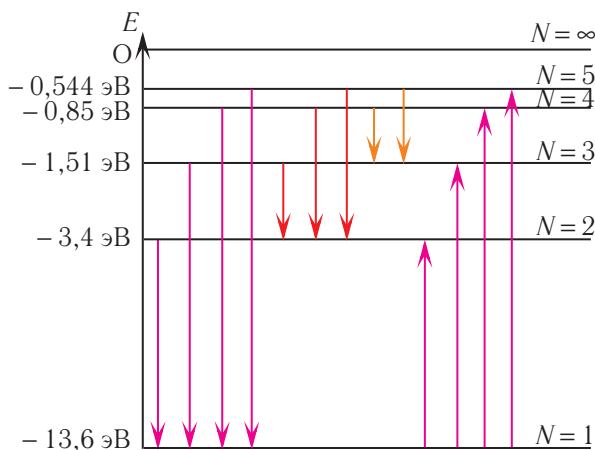


Рис. 198. Энергетическая диаграмма

4. Определите изменение энергии электрона в атоме водорода, если атом излучает фотон, длина волны которого $\lambda = 486$ нм.
5. Определите минимальную энергию, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся в основном состоянии в атоме водорода, чтобы его спектр излучения содержал только три спектральные линии.
6. Определите длину волны излучения, которое может вызвать ионизацию атома: а) лития ($E_{\text{и}} = 5,4$ эВ); б) серебра ($E_{\text{и}} = 7,6$ эВ); в) калия ($E_{\text{и}} = 4,3$ эВ).



§ 32. Излучение и поглощение света атомом. Спектры испускания и поглощения

■ Модель атома Бора позволяет описать процессы излучения и поглощения света атомом. Как это происходит? Как фотон «появляется на свет»? Что меняется в атоме после поглощения фотона?

Вследствие того что энергия атома квантована, она характеризуется определенным набором энергетических уровней E_n . Испускание излучения происходит при самопроизвольном переходе атома с высших энергетических уровней E_k на один из низших энергетических уровней E_n ($E_k > E_n$). Атом излучает фотон (квант электромагнитной энергии) с энергией $h\nu_{kn} = E_k - E_n$. Частота излучения при этом:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}. \quad (1)$$

Подчеркнем, что наряду с прямым переходом атом может переходить из возбужденного состояния в основное поэтапно, через промежуточные состояния. При этом излучаются соответствующие промежуточным переходам кванты света. Набор таких частот образует **линейчатый спектр излучения** атома.

Поглощение света — процесс, обратный испусканию. Атом, поглощая фотон $h\nu_{kn} = E_n - E_k$, переходит из низшего k состояния в более высокое n ($E_k < E_n$) состояние. Частота поглощенного фотона:

$$\nu_{kn} = \frac{E_n - E_k}{h}. \quad (2)$$

Подобные переходы дают **линейчатый спектр поглощения** атома.

Подчеркнем, что частоты переходов с испусканием и поглощением, происходящие между одними и теми же энергетическими уровнями, совпадают.

Таким образом, спектры атомов позволяют определять изменения энергии атома при испускании или поглощении ими излучения.

Спектры, полученные от самосветящихся тел, называются **спектрами испускания**. Они бывают трех типов: *линейчатые*, *полосатые* и *сплошные*.

Линейчатые спектры имеют все вещества в газообразном атомарном состоянии. Обычно (например, при нормальных условиях) атомы газа находятся в основном состоянии и не излучают света. Если такой газ нагревается, некоторые атомы переходят на более высокие энергетические уровни. Именно эти атомы при переходе в более низкие энергетические состояния и испускают фотоны. В результате атомарные спектры состоят из отдельных узких линий различного цвета, разделенных темными промежутками (рис. 199).

Изучение линейчатых спектров показало, что каждый химический элемент обладает своим строго индивидуальным спектром. Такие спек-

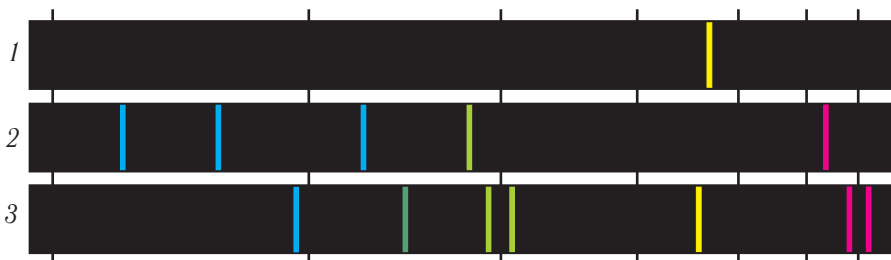


Рис. 199. Линейчатые спектры испускания: 1 — натрия; 2 — водорода; 3 — гелия

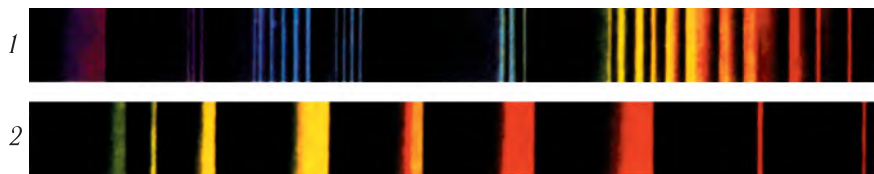


Рис. 200. Полосатые спектры испускания угольной дуги (1) и молекул йода (2)

тры отличаются друг от друга цветом отдельных светящихся линий, их положением и числом.

Полосатые спектры имеют газы, состоящие из молекул. Для объяснения молекулярных спектров необходимо принимать во внимание большую сложность структуры молекул. В таких спектрах, в отличие от атомных спектров, совокупности тесно расположенных спектральных линий образуют полосы, разделенные темными промежутками (рис. 200). Спектры молекул можно использовать для идентификации молекул и их структуры.

Непрерывные (сплошные) спектры имеют нагретые тела, находящиеся в твердом и жидком состоянии, а также газы при высоком давлении и плазма. Вследствие интенсивного взаимодействия между молекулами индивидуальные черты, присущие отдельным частицам, в таких спектрах неразличимы. В них представлены все длины волн, нет темных промежутков и на экране видна сплошная разноцветная полоса (рис. 201).

Прозрачные вещества поглощают часть падающего на них излучения, и в спектре, полученном после прохождения белого света через такие вещества, появляются темные линии, или полосы поглощения. Такой спектр называется **спектром поглощения** (рис. 202).



Рис. 201. Сплошной спектр излучения Солнца

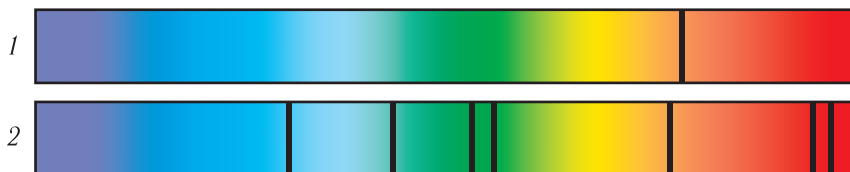


Рис. 202. Спектры поглощения различных веществ: 1 — натрия; 2 — гелия

Так, вещество в газообразном состоянии поглощает наиболее сильно свет тех длин волн, которые оно испускает в нагретом состоянии.

Это означает, что темные линии в спектре поглощения будут находиться как раз в тех местах, где находятся светящиеся линии в спектре испускания данного химического элемента. Эти строго установленные закономерности в линейчатых спектрах дают возможность обнаружить те или иные элементы в данном веществе.

Для определения качественного и количественного состава вещества применяется метод, основанный на получении и исследовании его спектров. Этот метод называется *спектральным анализом*. Это самый быстрый и простой способ определения состава различных химических соединений.

► Спектр поглощения атома водорода при нормальных условиях содержит только одну серию линий, частоты которых находятся в ультрафиолетовой области.

Наиболее изученным спектром поглощения является спектр Солнца. Его сплошной спектр содержит значительное количество черных линий. Эти линии являются линиями поглощения, возникающими при прохождении света через газовую оболочку Солнца и атмосферу Земли. Они получили название фраунгоферовых линий, так как Фраунгофер впервые наблюдал спектр Солнца и установил, что закономерность их расположения не случайна и линии поглощения (темные линии) появляются всегда только на определенных местах. Основатели спектрального анализа немецкие физики Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф, исследуя спектры паров соединений щелочных металлов лития, натрия и калия, обнаружили новые элементы — рубидий и цезий, названные так по цвету наиболее ярких линий в их спектрах. У рубидия — красная линия, у цезия — синяя.

Спектральный анализ базируется на двух основных положениях:

- 1) каждый химический элемент или химическое соединение характеризуется определенным спектром;
- 2) интенсивность линий и полос в спектре зависит от концентрации того или иного элемента в веществе.

К достоинствам спектрального анализа исследования можно отнести:

высокую чувствительность (обнаруживает элементы с относительной концентрацией 10^{-7} — 10^{-8} , т. е. один атом вещества на сто миллионов других атомов); малое время измерения;

малые количества исследуемого вещества (достаточно 10^{-2} — 10^{-3} г и даже до 10^{-5} — 10^{-6} г) вплоть до возможности детектирования отдельных молекул; дистанционность измерений (можно проводить исследования, например, состава атмосферы далеких планет).

► По спектрам определяют, из каких химических элементов состоит вещество и в каких количествах.

Белорусский физик академик Михаил Александрович Ельяшевич разработал основы теории колебаний многоатомных молекул и их колебательных спектров. Он внес значительный вклад в теорию спектров редкоземельных элементов и низкотемпературной плазмы.



1. Что называют спектром? Какие виды спектров вы знаете?
2. Какие виды спектров излучения вы знаете?
3. Что называют спектром поглощения?



§ 33. Спонтанное и индуцированное излучение

■ Как оказалось, закономерности излучения света атомами определяются не только «самим» атомом, но и внешними условиями, которые могут повлиять на данный процесс. Какие виды излучения существуют? В чем их сходство и в чем различия? Где их можно использовать практически?



Излучение, происходящее с неизменной частотой, называется монохроматическим.

Напомним, что атом может находиться в одном из стационарных состояний, энергия которых квантована, т. е. имеет дискретный ряд значений $E_1, E_2, \dots, E_n$. Соответственно, при переходах между этими состояниями атом излучает или поглощает кванты энергии электромагнитного поля. Существуют два вида переходов: *спонтанные* и *вынужденные*.

Если атом, находящийся в возбужденном состоянии на верхнем энергетическом уровне E_m , переходит на более низкий уровень E_n самопроизвольно без каких-либо внешних воздействий, то происходит так называемый **спонтанный** переход (рис. 203, а). При таком переходе излучается фотон, частота которого определяется соотношением:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (1)$$

Переход такого рода является случайным (вероятностным) процессом, происходящим в принципиально непредска-

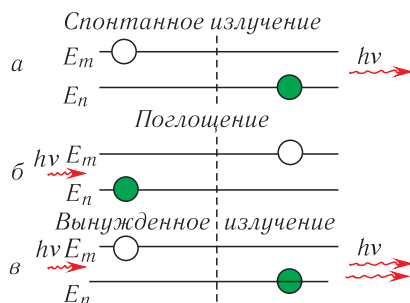


Рис. 203. Переходы в атоме

зуемый момент времени. Таким переходам соответствует спонтанное излучение. Такие процессы происходят в нагретых телах и светящихся газах. При нагревании или электрическом разряде часть атомов переходит в возбужденное состояние. Затем они излучают свет, переходя в основное состояние.

Случайность спонтанных переходов в атомах и молекулах различных веществ означает то, что они происходят не одновременно и независимо друг от друга, поэтому фазы излучаемых при переходах электромагнитных волн не согласованы. Случайным является не только момент испускания фотонов, но и направление их распространения, а также направление $\vec{E}$ электрического поля и $\vec{B}$ магнитного поля в электромагнитной волне, т. е. их поляризация. Вследствие этого спонтанное излучение вещества не направлено, не когерентно, а направления векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ хаотически изменяются (не поляризовано). Примером такого излучения является свет ламп накаливания.

Переход атома из одного состояния в другое может происходить также и *безызлучательным* путем. В этом случае избыток энергии выделяется в какой-либо иной форме. Например, он может перейти в кинетическую энергию окружающих молекул.

Атом, находящийся в возбужденном состоянии, может перейти с верхнего уровня E_m на нижний E_n не только спонтанно, но и под действием электромагнитного излучения, частота которого $\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$ совпадает с частотой (1) (рис. 203, в). Переходы, происходящие под действием внешнего электромагнитного излучения, называются **индуцированными** или **вынужденными**. При таком переходе излучается квант энергии $h\nu_{mn}$, который добавляется к исходящему от внешнего источника излучению. Отличительной особенностью индуцированного излучения является тождественность излученного фотона и фотона, индуцировавшего данный переход. Оба фотона при этом имеют одинаковые частоту, фазу, направление распространения, т. е. образно говоря, «клонировать» друг друга. Именно поэтому индуцированное излучение приобретает свойство *монохроматичности, когерентности, направленности*.

Кроме рассмотренного индуцированного перехода «сверху вниз», могут происходить и вынужденные переходы «снизу вверх» (рис. 203, б). Если атом находится на нижнем уровне E_n , то он может перейти на верхний уровень E_m под действием внешнего электромагнитного излучения частотой (1). Атом при этом поглощает фотон, энергия которого $h\nu_{mn} = E_m - E_n$.

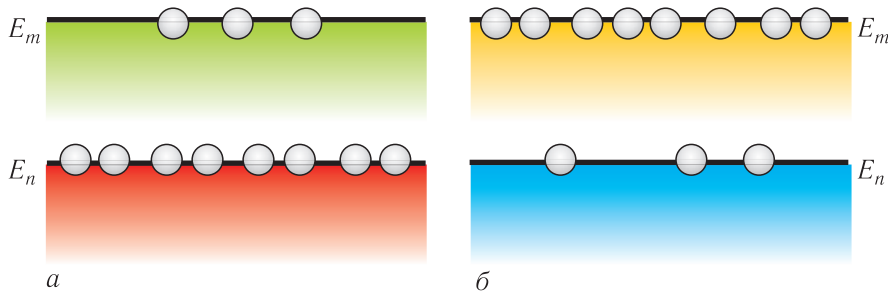


Рис. 204. Населенность энергетических уровней:
 а — при тепловом равновесии; б — инверсная населенность

Дискретность энергетического спектра характерна не только для атомов, но и для любой системы взаимодействующих микрочастиц — молекул, ионов, твердых тел. Число атомов в единице объема вещества, находящихся на данном энергетическом уровне, называют *населенностью* этого уровня. В естественных условиях (в условиях теплового равновесия) в веществе число атомов N_m в возбужденном состоянии с большей энергией E_m меньше, чем число атомов N_n в состоянии с меньшей энергией E_n , т. е. при $E_m > E_n$ населенность уровня E_m меньше, чем уровня с энергией E_n ($N_m < N_n$) (рис. 204, а).

Для усиления излучения необходимо искусственно изменить населенности уровней в веществе. Рассмотрим два энергетических уровня атома E_m и E_n . Если при падении на такое вещество электромагнитного излучения частотой ν_{mn} (1) достигнуто неравновесное состояние вещества, для которого на верхнем энергетическом уровне находится большее количество атомов, чем на нижнем ($N_m > N_n$), то излучаться будет большее число квантов, чем поглощаться. В этом случае будет происходить усиление падающего излучения, и вещество будет действовать как *усилитель*.

Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего больше, чем нижнего, получило название состояния с **инверсной населенностью** (рис. 204, б). Процесс создания инверсной населенности получил название **накачки**. Вещество, в котором осуществлена инверсия населенностей, называется **активным**.

Для того чтобы усилитель превратить в генератор, необходимо ввести подходящую «обратную связь». Смысл обратной связи заключается в том, что часть усиленного излучения остается в активном веществе и подвергается повторному когерентному усилению.

Явление индуцированного излучения позволяет управлять излучением атомов, усиливать и генерировать когерентное излучение.

Основная трудность в практическом осуществлении данной идеи — создание инверсной населенности. Советскими физиками Николаем Геннадьевичем Басовым и Александром Михайловичем Прохоровым в середине 50-х гг. XX в. был предложен универсальный метод создания инверсной населенности посредством воздействия на молекулы внешнего электромагнитного излучения на резонансной частоте. Впоследствии он получил название метода трех уровней.

Вещество, в котором имеются метастабильные уровни, можно эффективно использовать для усиления света. Рассмотрим, как была решена эта проблема на примере трехуровневой системы. Общее число уровней в веществе всегда велико, но в нем существуют три «рабочих» энергетических уровня, которые позволяют создать инверсию населенностей. У некоторых атомов имеются долгоживущие промежуточные возбужденные состояния (их называют метастабильными), время жизни в которых может достигать до нескольких секунд, в то время как в обычных возбужденных состояниях время жизни $\sim 10^{-8}$ с.

В этом случае, если накачка производится на частоте перехода между нижним и верхним уровнями, то можно перевести часть атомов из основного 1 в возбужденное состояние 3 (рис. 205). За короткое время (время жизни порядка 10^{-8} с) большая часть этих атомов самопроизвольно перейдет в метастабильное долгоживущее возбужденное состояние 2 без излучения. Избыточная энергия передается веществу, вследствие чего оно нагревается.

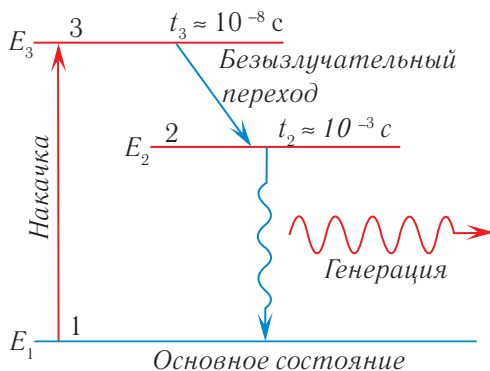


Рис. 205. Трехуровневая схема генерации вынужденного излучения

Населенность промежуточного (метастабильного) уровня, увеличиваясь за счет спонтанных переходов с верхнего уровня на промежуточный, может превысить населенность нижнего уровня. Пропустив излучение с частотой $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ через эту систему находящихся в метастабильном состоянии атомов, получаем дополнительно к исходным фотонам еще и индуцированно испущенные фотоны (см. рис. 205). Вследствие этого результирующий поток фотонов будет превышать ис-

ходный. Таким образом, на частоте перехода с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 будет происходить усиление и генерация излучения.



► Понятие индуцированного излучения было введено А. Эйнштейном в 1916 г.



1. Что такое спонтанное и индуцированное излучения?
2. Какие характеристики имеет спонтанное излучение?
3. Какие характеристики имеет индуцированное излучение?
4. Объясните процесс возбуждения индуцированного излучения.
5. Что такое активная среда?
6. Какой процесс называется накачкой?
7. Объясните принцип работы трехуровневой системы генерации излучения.

§ 34. Лазеры

■ Обычные источники света (свеча, лампа накаливания), окружающие человека в быту, испускают некогерентное излучение. А что произойдет, если согласовать (синхронизировать) излучения возбужденных атомов между собой? Какие новые свойства излучения при этом появятся?

При взаимодействии с активным веществом (средой) внешнее излучение усилится, поскольку к исходным фотонам добавятся индуцированные фотоны с тождественными характеристиками. Тожественность фотонов приводит к тому, что при их взаимодействии с новым возбужденным атомом получается вместо 2 уже 4 фотона, затем 8, 16 и т. д. Это позволяет использовать вынужденное излучение для усиления электромагнитных волн и создания генераторов монохроматического когерентного излучения — *лазеров*.

Слово **лазер** является сокращенной записью английской фразы — *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (laser)*, которая переводится так: *усиление света путем вынужденного испускания излучения*.

Рассмотрим принципиальную схему работы лазера (рис. 206). Для реализации обратной связи в лазере активное вещество 1 размещается в *оптическом резонаторе* (рис. 206, а). Резонатор состоит из двух параллельных плоских зеркал, одно из которых — полностью отражающее

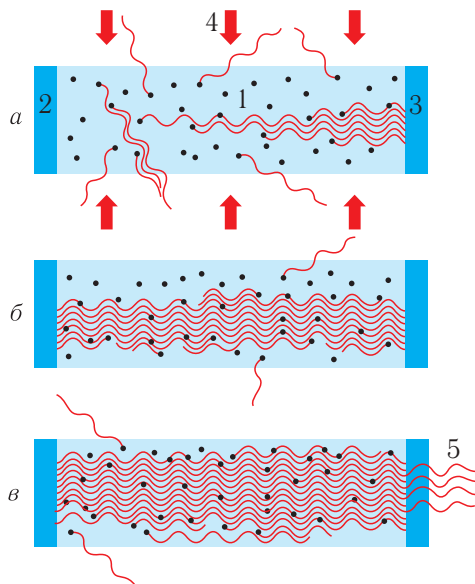


Рис. 206. Принципиальная схема лазера на рубине: 1 — активная среда; 2 — полностью отражающее зеркало; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — накачка; 5 — генерируемое излучение

(«глухое») 2, другое — полупрозрачное 3, предназначенное для выхода излучения 5 (см. рис. 206, в) из резонатора.

Накачка 4 создает инверсию населенностей уровней в активной среде. На начальной стадии генерации фотоны, спонтанно испущенные атомами активной среды, распространяются в различных направлениях (см. рис. 206, а, б). Но только фотоны, которые распространяются перпендикулярно зеркалам, многократно проходят через активную среду в результате отражений от зеркал резонатора (см. рис. 206, в).

Излученная атомами энергия накапливается в резонаторе и, воздействуя на активную среду, вызывает новые индуцированные переходы. Происходит лавинообразное «размножение» фотонов в веществе. Далее пучок монохроматического лазерного излучения выходит наружу через полупрозрачное зеркало.



▶ Днем рождения лазера следует считать 16 мая 1960 г. Эта дата стоит в рабочей тетради американского физика Т. Н. Меймана. В созданном им приборе содержались все три необходимых и достаточных компонента для получения эффекта генерации оптического когерентного излучения.

Основными характеристиками лазерного излучения являются когерентность, малая расходимость (узкая направленность), монохроматичность, возможность получать сверхкороткие импульсы, большая мощность.



По типу активной среды лазеры можно разделить на газовые, твердотельные, полупроводниковые, жидкостные, химические, газодинамические. А по способу накачки — на оптические, электрические, химические, ядерные, газодинамические.

Лазеры находят широкое применение в голографии, передаче оптической информации, обработке материалов (сварка, резка, сверление и т. п.), медицине, локации, рекламе.

При работе с лазерами необходимо быть внимательными и осторожными. Наибольшую опасность лазерное излучение представляет для глаз и кожи. При попадании в глаз луч лазера фокусируется в пятно очень малых размеров, что может за доли секунды привести к ожогам сетчатки глаза, частичной или полной необратимой потере зрения. Прямое, а в некоторых случаях и рассеянное излучение лазеров большой мощности способно вызывать ожоги кожи. Оно представляет также пожарную опасность.

Знак опасности, предупреждающий о лазерном излучении, приведен на рисунке 207.



Рис. 207. Знак опасности лазерного излучения

► Белорусский физик, академик Николай Александрович Борисевич в 1978 г. открыл явление «стабилизации» электронно-возбужденных многоатомных молекул. Он впервые получил генерацию излучения многоатомных молекул в газовой фазе. Разработал газовые и одночастотные гелий-неоновые лазеры со значительной выходной мощностью.

В 1957 г. белорусский физик, академик Борис Иванович Степанов вывел универсальное соотношение между спектрами поглощения и испускания сложных молекул и полупроводников, которое получило название соотношения Степанова. Он совместно с А. Н. Рубиновым и В. А. Мостовниковым открыл новый класс генерирующих соединений — органические красители.



В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и Ч. Таунсу «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию лазера».



1. Объясните принцип действия лазера.
2. В чем заключается роль метастабильных состояний в генерации лазерного излучения?
3. Для чего в лазере необходим оптический резонатор?
4. Чем отличается лазерное излучение от излучений, создаваемых другими источниками света?
5. Где применяются лазеры?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 6

К числу первых моделей атомов относятся модель атома Томсона и ядерная (планетарная) модель атома Резерфорда.

Постулаты Бора.

I постулат Бора (постулат стационарных состояний):

атом может находиться в особых стационарных **квантовых** состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.

II постулат Бора (правило частот):

атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h},$$

где ν_{kn} — частота поглощенного или испущенного кванта излучения, E_k, E_n — энергия атома в k -м и n -м стационарном состоянии, h — постоянная Планка.

Условие квантования орбит в атоме:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, — номер орбиты, m_e — масса электрона, v_n — модуль скорости электрона на n -й орбите, r — радиус n -й орбиты, h — постоянная Планка.

Переходы, происходящие под действием внешнего электромагнитного излучения, называются **индуцированными** или **вынужденными**.



Состояние вещества, при котором для некоторой пары уровней населенность верхнего больше, чем нижнего, получило название состояния с **инверсной населенностью**.

Среда с инверсной населенностью уровней энергии — **активная среда**.

Процесс перевода атомов из основного состояния в возбужденное называют **накачкой**.

Принцип работы лазеров заключается в использовании вынужденных излучательных переходов в системах с инверсией населенности для генерации когерентных световых волн.

Основные характеристики лазерного излучения: когерентность; малая расходимость (узкая направленность); монохроматичность; реализация сверхкоротких импульсов; большая мощность излучения.

Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Томсон, Бор, Басов, Прохоров, Таунс).
2. Подготовьте рефераты на темы: «Применение лазеров: в промышленности (сварка, резание, сверление), в медицине (хирургия, офтальмология, терапия), голографии, термоядерном синтезе, химии, биологии, связи (кабельной, телевизионной, телефонной), технике, локации».