

# Второй постулат Бора

---

Составила учитель физики МБОУ  
СОШ 28 Борисова Анастасия  
Евгеньевна

Второй постулат Бора гласит: атом излучает фотоны только при переходе из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_m$ . При этом энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_k - E_m \quad (1)$$

Соотношение 1 позволяет рассчитать частоту  $\nu$  с индексом  $km$  излучения, соответствующего фотону, который образуется при переходе электрона с орбиты, соответствующей главному квантовому числу  $k$ , на орбиту, соответствующую меньшему главному квантовому числу  $m$ :

$$\nu = E_k - E_m / h \quad (2)$$

Для атома водорода с учетом уравнений (5) из §70 получаем:

$$\nu = 2\pi^2 k^2 m e e^4 / h^3 * (1/m^2 - 1/k^2) \quad (3)$$

Атом химического элемента имеет свой уникальный набор стационарных орбит, отличающий данный элемент от других химических элементов.

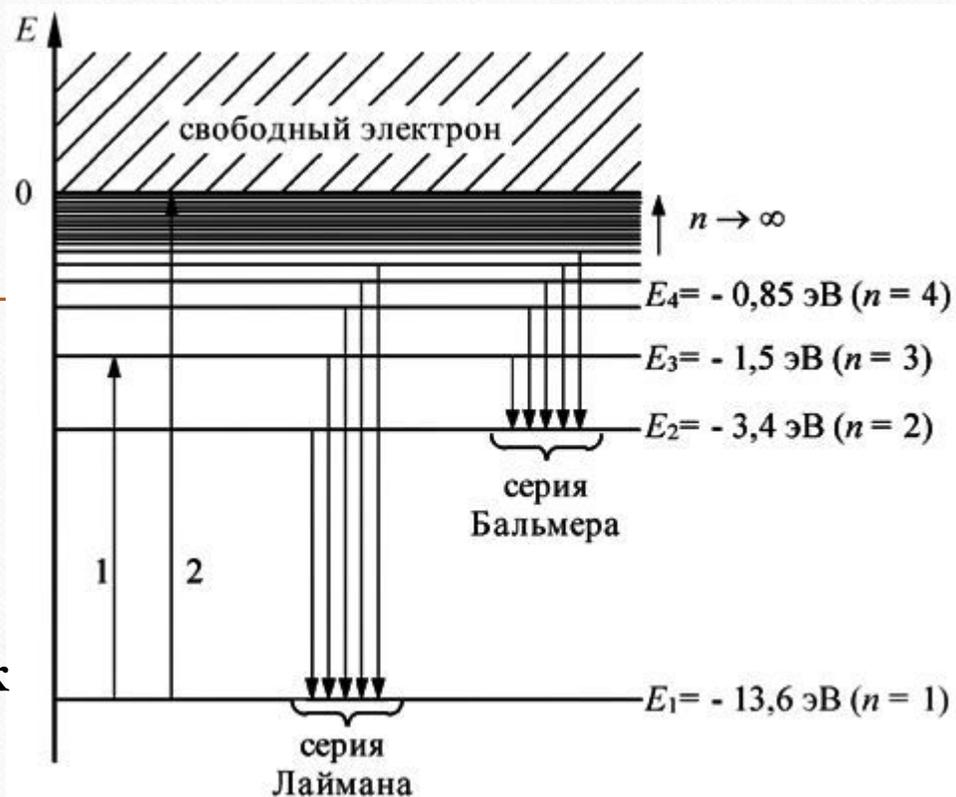
Поэтому атом данного хим элемента может излучать фотоны, имеющие строго определенные энергии, т.е. электромагнитные волны строго определенных частот.

**Набор частот электромагнитных  
волн (фотонов), излучаемых атомом  
данного химического элемента,  
называют спектром излучения этого  
элемента.**

На рисунке представлена энергетическая диаграмма

Атома водорода, на которой отмечены 6 стационарных уровней. Стрелками показаны переходы с внешних энергетических уровней на нижние, соответствующие излучениям атома. Эти переходы разделены на серии, каждой серии присвоена фамилия ученого впервые описавшего ее.

Рядом указано название диапазона частот, к которому относится серия (см рис 245 на стр. 359) (ИК- инфракрасное излучение, ИФ ультрафиолетовое) серия Бальмера (ИК), серия Лаймана (УФ)



Атом может не только излучать, но и поглощать энергию электромагнитного излучения. Согласно теории Бора, поглощая фотон, атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией  $E_m$  в стационарное состояние с большей энергией  $E_k$ . При этом частота поглощенного фотона удовлетворяет соотношению,  $h\nu = E_k - E_m$  (4)

Из  $h\nu = E_k - E_m$  (1) и  $h\nu = E_k - E_m$  (4)  
следует, что частицы электромагнитных  
волн (фотонов), которые атом может  
поглощать, совпадают с частотами волн  
(фотонов), которые атом может  
излучать.

**Набор частот  
электромагнитных волн  
(фотонов), поглощаемых  
атомом данного химического  
элемента, называют спектром  
поглощения этого элемента**

*Значит, линии в спектрах поглощения и излучения уединенного атома данного элемента совпадают.*

*Переход атома из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние с большей энергией может происходить не только в результате поглощения фотона, но и в результате взаимодействия с другими атомами или элементарными частицами.*

*Если атом, находившийся в основном стационарном состоянии, поглотит энергию, превышающую  $E_1$ , то его электрон перейдет из основного состояния в свободное. Поэтому энергию, равную  $E_1$ , называют энергией ионизации.*

Движение и взаимодействие атомов друг с другом в веществе приводит к изменению спектров как излучения, так и поглощения. Наблюдавшиеся в спектре уединенного атома линии становятся шире (уширяются). Это связано с тем, что каждый атом движется и взаимодействует со своими соседями по-разному. Поэтому разность энергий  $E_k - E_m$  для каждого из атомов данного химического элемента несколько различается. Результатом этого будет наблюдаемое уширение спектральных линий от набора атомов данного химического элемента.

*При больших скоростях  
движений атомов и молекул и  
сильном взаимодействии их друг с  
другом уширенные линии в  
спектре сливаются и спектр  
становится сплошным.*

*Модель атома Резерфорда – Бора, позволяющая объяснить наблюдаемые в эксперименте спектры атома водорода, оказалась неприменимой для описания более сложных атомов.*

---

*Искусственное соединение законов Ньютона и Кулона из классической физики с идеей Планка о квантовании энергии привело к противоречию с результатами экспериментов. Однако модель Резерфорда – Бора послужила одним из толчков для создания современной квантовой теории. Было установлено, что гениально угаданные Бором постулаты являются следствиями основных положений этой теории.*

**Задание 1. Как изменится энергия электрона атоме водорода, если атом излучает фотон, который имеет длину волны  $\lambda = 4,86 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ?**

Решение. На основании второго постулата Бора запишем:

$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu.$$

Длину волны фотона свяжем с его частотой при помощи выражения:

---

$$\nu = c\lambda$$

Принимая во внимание выражение и формулу преобразуем к виду:

$$\Delta E = hc\lambda.$$

Скорость света в вакууме равна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, можем провести вычисления:

$$\Delta E = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 4,86 \cdot 10^{-7} = 4,09 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}.$$

Ответ.  $\Delta E = 4,09 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

**Задание 3 Установите соответствие между названиями постулатов и их формулировками. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.**

## ПОСТУЛАТЫ БОРА

**А) первый**

**Б) второй**

## ИХ ФОРМУЛИРОВКИ

- 1) переходя из одного состояния в другое, атом излучает (поглощает) половину разности энергий в начальном и конечном состояниях
- 2) переходя из одного состояния в другое, атом излучает (поглощает) квант энергии, равный разности энергий в начальном и конечном состояниях
- 3) атом может находиться только в одном из двух возможных состояний
- 4) атом может находиться только в одном из состояний с определенным значением энергии

Решение.

Первый постулат Бора гласит: «Атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия» (А — 4).

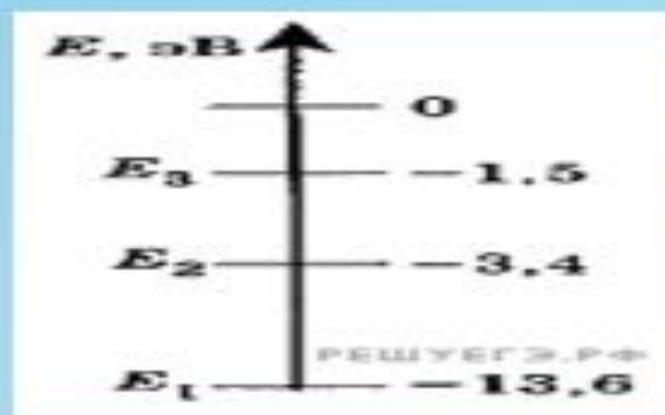
Второй постулат Бора: «Излучение (поглощение) света происходит только при переходе из одного стационарного состояния в другое, при этом излучается (поглощается) квант энергии равный разности энергий в начальном и конечном состояниях» (Б — 2).

Ответ: 42.

## Задания 4

На рисунке представлены несколько самых нижних уровней энергии атома водорода. Может ли атом, находящийся в состоянии  $E_1$ , поглотить фотон с энергией 1,5 эВ?

- 1) да, при этом атом переходит в состояние  $E_3$
- 2) да, при этом атом переходит в состояние  $E_2$
- 3) да, при этом атом ионизуется, распадаясь на протон и электрон
- 4) нет, энергии фотона недостаточно для перехода атома в возбужденное состояние

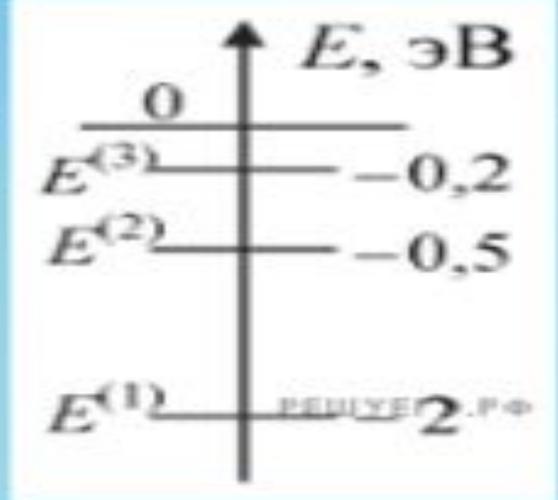


**Решение.**

Согласно постулатам Бора, для перехода в состояние с большей энергией атом должен поглотить фотон с энергией, равной разности энергий конечного и начального состояний. Атом находящийся в состоянии  $E_2$  имеет энергию 3,4 эВ, расстояние до ближайшего уровня равно  $-1,5 - (-3,4) = 1,9$  эВ. Следовательно, фотона с энергией 1,5 эВ недостаточно для перехода атома в другое возбужденное состояние.

**Ответ: 4.**

5. Схема низших энергетических уровней атомов разреженного атомарного газа имеет вид, изображённый на рисунке. В начальный момент времени атомы находятся в состоянии с энергией  $E^{(1)}$ . Согласно постулатам Бора данный газ может излучать фотоны с энергией

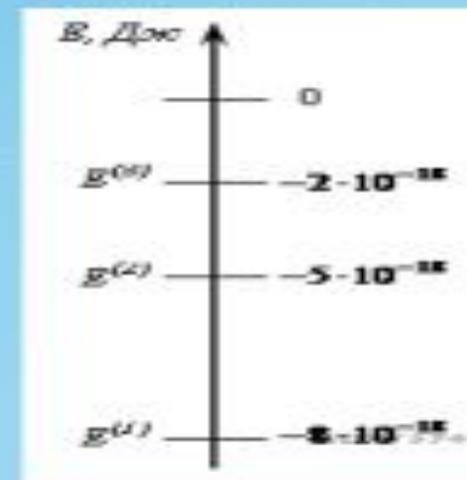


- 1) только 0,5 эВ
- 2) любой, меньшей 0,5 эВ
- 3) только 1,5 эВ
- 4) любой в пределах от 0,5 до 2 эВ

**Решение.**

**Согласно постулатам Бора, свет излучается при переходе атома на более низкие уровни энергии, при этом фотоны несут энергию, равную разности энергий начального и конечного состояний. Из приведенной здесь схемы видно, что фотон может излучиться только при переходе атома в состояние E1 при этом его энергия будет равна  $-0,5 \text{ эВ} - (-2 \text{ эВ}) = 1,5 \text{ эВ}$**

6. На рисунке изображена схема возможных значений энергии атомов разреженного газа.



В начальный момент времени атомы находятся в состоянии с энергией  $E(1)$ . Возможно испускание газом фотонов с энергией

- 1) Только  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 2) только  $3 \cdot 10^{-18}$  Дж и  $6 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 3) только  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж,  $5 \cdot 10^{-18}$  Дж и  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 4) любой от  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж до  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж

1. Уровни энергии электрона в атоме водорода задаются формулой  $E = -13,6/n^2$  эВ, где  $n=1,2,3,\dots$ . При переходе атома из состояния  $E_2$  в состояние  $E_1$  атом испускает фотон. Попадая на поверхность фотокатода, этот фотон выбивает фотоэлектрон. Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта для материала поверхности фотокатода,  $\lambda_{кр} = 300$  нм. Чему равна максимально возможная кинетическая энергия фотоэлектрона?

Решение.

Согласно постулатам Бора, свет излучается при переходе атома на более низкие уровни энергии, при этом фотоны несут энергию, равную разности энергий начального и конечного состояний. Таким образом, испущенный фотон имел нес энергию

---

$$h\nu = E_2 - E_1 = -13,6 \text{ эВ} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{1^2} \right) = 10,2 \text{ эВ}$$

Согласно уравнению фотоэффекта, максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов связана с энергией фотона и работой выхода соотношением

$$h\nu = A + E$$

Работа выхода связана с длиной волны красной границы соотношением:

$$A = hc / \lambda_{\text{кр}}$$

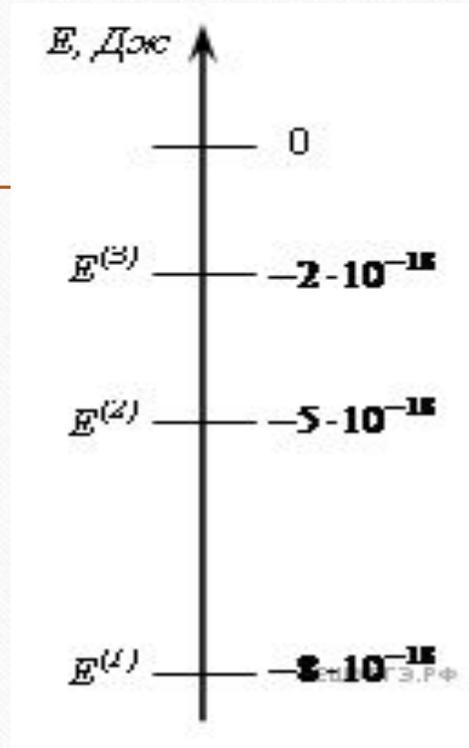
Таким образом, максимально  
возможная кинетическая энергия  
фотоэлектрон равна

$$E = h\nu - A = 10,2 \text{ эВ} - 6,62 \text{ на } 10 \text{ в минус}$$
$$34 \text{ на } 3 \text{ в } 10 \text{ в } 8 / 3 \text{ на } 10 \text{ в минус} 7 * 1 / 1,6$$
$$\text{на } 10 \text{ в минус } 19 \text{ эВ} = 6,1 \text{ эВ}$$

2. На рисунке изображена схема возможных значений энергии атомов разреженного газа.

В начальный момент времени атомы находятся в состоянии с энергией  $E_3$ .  
Возможно испускание газом фотонов с энергией

- 1) только  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 2) Только  $3 \cdot 10^{-18}$  и  $6 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 3) только  $2 \cdot 10^{-18}$ ,  $5 \cdot 10^{-18}$  и  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 4) любой от  $2 \cdot 10^{-18}$  до  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж



Решение.

В описанной ситуации атомы будут спонтанно переходить из состояния с энергией  $E_3$  в состояния с меньшей энергией:  $E_1$  и  $E_2$ . Кроме того те атомы, которые перешли в состояние с энергией  $E_2$  могут впоследствии опуститься еще ниже, то есть перейти в состояние с энергией  $E_1$ .

Согласно постулатам Бора, при переходе в состояние с меньшей энергией происходит испускание фотона света с энергией, равной разности энергий начального и конечного состояний. Таким образом, возможно испускание газом фотонов с энергиями:

$$E_3 - E_1 = -2 \text{ на } 10 \text{ в минус } 18 - (-8 \text{ на } 10(-18)) = 6 \text{ на } 10(-18),$$

$$E_3 - E_2 = -2 \text{ на } 10(-18) - (-5 \text{ на } 10(-18)) = 3 \text{ на } 10(-18) \text{ и}$$

$$E_2 - E_1 = -5 \text{ на } 10(-18) - (-8 \text{ на } 10(-18)) = 3 \text{ на } 10(-18) \text{ Дж}$$

Ответ: 2

3. Электрон в атоме водорода переходит с энергетического уровня с номером  $n = 2$  на энергетический уровень с  $n = 1$ . Чему равен модуль импульса испущенного при этом фотона? Ответ выразите в  $\text{кг} \cdot \text{м/с}$ , умножьте на  $10^{29}$  и после этого округлите до целого числа.

Решение. Уровни энергии электрона в атоме водорода задаются формулой  $E = -13,6/n^2$  эВ, где  $n=1,2,3,\dots$  эВ, где  $n = 1, 2, 3, \dots$ . При переходе атома из состояния  $E_n$  в состояние  $E_m$  атом испускает фотон с энергией  $E = E_n - E_m$ . При переходе со второго на первый энергетический уровень атом испустит фотон с энергией

$$E = E_2 - E_1 = 13,6 * (1 - 1/4) = 10,2 \text{ эВ}$$

Импульс фотона связан с его энергией как  $p = E/c$  тогда

$$10 \text{ в } (29) * 10,2 * 1,6 \text{ на } 10^{-19} / 3 \text{ на } 10^8 = 544 \text{ кг} * \text{м} / \text{с}$$

4. Покоящийся атом излучает фотон с энергией  $16,32 \text{ на } 10^{-19} \text{ Дж}$  в результате перехода электрона из возбуждённого состояния в основное. Атом в результате отдачи начинает двигаться поступательно в противоположном направлении с кинетической энергией  $8,81 \text{ на } 10^{-27} \text{ Дж}$ . Найдите массу атома. Скорость атома считать малой по сравнению со скоростью света.

Решение.

Ядерные силы намного больше внешней силы тяжести, действующей на атом и фотон, поэтому система является замкнутой и выполняется закон сохранения импульса. Изначально атом покоился и импульс системы был равен нулю.

Следовательно, импульс фотона равен импульсу излучившего атома:  $P_{\text{ф}} = P_{\text{ат}}$

Импульс тела связан с его кинетической энергией. Скорость атома мала по сравнению со скоростью света, поэтому для атома эта связь выражается нерелятивистским соотношением:  $E_{\text{ат}} = P_{\text{ат}}^2 / 2m_{\text{ат}}$  а для фотона  $E_{\text{ф}} = P_{\text{ф}} c$

Выражая отсюда импульсы и подставляя их в закон сохранения, получаем

$E_{\text{ф}} / c = \sqrt{2m_{\text{ат}} E_{\text{ат}}}$  значит  $m_{\text{ат}} = E_{\text{ф}}^2 / 2E_{\text{ат}} c^2$

$m_{\text{ат}} = 1,67 \times 10^{-27}$  кг

5. В атоме водорода уровни энергии описываются формулой  $E_n = -E_0/n^2$ .

Наибольшая длина волны излучаемого фотона при переходе на второй уровень энергии равна 655 нм. Найдите  $E_0$ .

- Решение.
  - 1. Структуру атомных уровней атома водорода можно схематично представить в виде следующей схемы.
- 

Поглощению фотона соответствует переход с нижнего уровня на верхний. Излучению — переход с верхнего уровня на нижний.

2. В условии говорится о излучении при переходе на уровень 2. То есть это переходы  $3 \rightarrow 2$ ,  $4 \rightarrow 2$ ,  $5 \rightarrow 2$ .  
Переход с наибольшей длиной волны соответствует переходу с наименьшей частотой излучаемого фотона. А это возможно при переходе с ближайшего ко 2 уровню энергии — то есть с третьего на второй  $\lambda_{\max} \rightarrow \nu_{\min}$ . к.  $\lambda \nu = c$ ,  $\nu_{\min}$ :  $3 \rightarrow 2$ .

Согласно постулатам Бора частота излучаемого фотона определяется соотношением:

$$h\nu = E_3 - E_2; \quad hc/\lambda^2 = -E_0/3(2) + E_0/2(2);$$

$$hc/\lambda^2 = 9E_0 - 4E_0/4 \cdot 9;$$

$$hc/\lambda^2 = 5E_0/4 \cdot 9;$$

Теперь найдем значение  $E_0$ :  $hc/\lambda^2 = 5E_0/4 \cdot 9$ ;  $E_0 =$   
 $36hc/5\lambda^2 =$

$$= 36 \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 655 \cdot 10^{-9} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

6. При облучении паров ртути электронами энергия атома ртути увеличивается на 4,9 эВ. Какова длина волны излучения, которое испускают атомы ртути при переходе в невозбужденное состояние?

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,9 \text{ эВ}} =$$
$$= 2,53 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 253 \text{ нм.}$$

**7. Для ионизации атома азота  
необходима энергия 14,53 эВ.  
Найти длину волны излучения,  
которое вызовет ионизацию.**

©5terka.com

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

©5terka.com

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{hc}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{14,53 \text{ эВ}} = \\ &= 8,53 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 85,3 \text{ нм}.\end{aligned}$$

8. Для однократной ионизации атомов неона требуется энергия 21,6 эВ, для двукратной — 41 эВ, для трехкратной — 64 эВ. Какую степень ионизации можно получить, облучая неон рентгеновскими лучами, наименьшая длина волны которых 25 нм?

$$E_1 = 21,6 \text{ эВ},$$

$$E_2 = 41 \text{ эВ},$$

$$E_3 = 64 \text{ эВ},$$

$$\lambda = 25 \text{ нм} = \\ = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

©5terka.com

©5terka.com

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}} = 49,6 \text{ эВ}$$

**Данная длина волны может вызвать однократную и двукратную ионизацию, так как энергия фотона 49,6 эВ.**

9. Во сколько раз изменится энергия атома водорода при переходе атома из первого энергетического состояния в третье? при переходе из четвертого энергетического состояния во второе?

$$n_1 = 1, k_1 = 3,$$

$$n_2 = 4, k_2 = 2.$$

©5terka.com

## Решение.

Найти

©5terka.com

$$\frac{E_{21}}{E_{11}}, \frac{E_{22}}{E_{12}}$$

©5terka.com

$$\frac{E_{21}}{E_{11}} = \frac{k_1^2}{n_1^2} = 3^2 = 9; \quad \frac{E_{22}}{E_{12}} = \frac{k_2^2}{n_2^2} = \frac{2^2}{4^2} = \frac{1}{4}.$$

10. Во сколько раз длина волны излучения атома водорода при переходе из третьего энергетического состояния во второе больше длины волны излучения, обусловленного переходом из второго состояния в первое?

Дано:

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

$n_1=3, k_1=2,$

©5terka.com

$n_2 = 2, k_2 = 1.$

©5terka.com

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_1^2 k_1^2 (n_2^2 - k_2^2)}{n_2^2 k_2^2 (n_1^2 - k_1^2)} = \frac{3^2 \cdot 2^2 \cdot (2^2 - 1^2)}{2^2 \cdot 1^2 \cdot (3^2 - 2^2)} = 5,4.$$

Найти

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

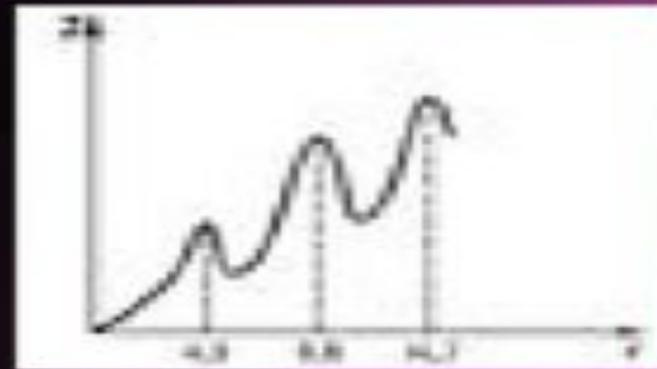
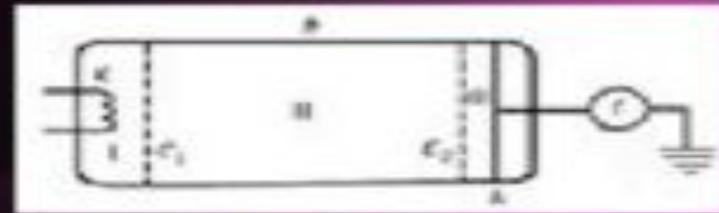
Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытом Франка и Герца. Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц за экспериментальные исследования дискретности энергетических уровней получили Нобелевскую премию в 1925 г.



Дж. Франк



Г. Герц





Н.Г.Басов



А.М.Прохоров



Ч.Х.Таунс

Когда-то мир жил без лазеров. Это сейчас достижения квантовой физики, лазерной электроники, компьютерные технологии являются неотъемлемыми составляющими нашей жизни, применяются даже в быту. А у истоков глобальных перемен стояли выдающиеся физики XX века Николай Геннадьевич Басов, Александр Михайлович Прохоров и американец Чарлз Хард Таунс.

В 1964 году все трое получили Нобелевскую премию "за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию осцилляторов и усилителей, основанных на принципе



Лазерное излучение с длинами волн (снизу вверх): 405, 445, 520, 532, 635 и 660 нм.

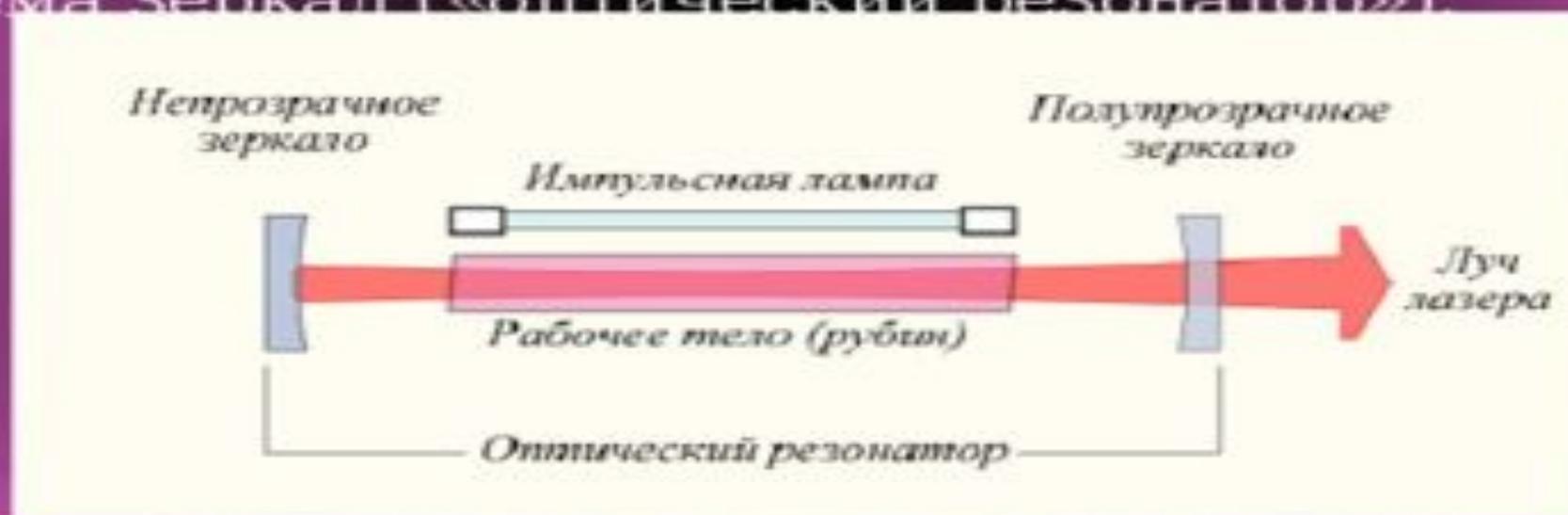
\* **Лáзер** (англ. *laser*, акроним от *light amplification by stimulated emission of radiation* «усиление света посредством вынужденного излучения»), или **оптíческий квантовый генерáтор** — это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

**Лáзер** — квантовый генератор, источник когерентного монохроматического электромагнитного излучения оптического диапазона. Обычно состоит из трёх основных элементов:

Источник энергии (механизм «накачки» лазера).

Рабочее тело лазера.

Система зеркал («оптический резонатор»).



Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками:

1. Лазеры способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения (около  $10^{-5}$  рад). На Луне такой пучок, испущенный с Земли, дает пятно диаметром 3 км.

Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками:

2. Свет лазера обладает исключительной когерентностью и монохроматичностью.

Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками:

3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра кратковременно (в течение промежутка времени продолжительностью порядка  $10^{-13}$  с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, в то время как мощность излучения Солнца равна только  $7 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, причем суммарно по всему спектру. На узкий же интервал  $\Delta l = 10^{-6}$  см (ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего лишь 0,2 Вт/см<sup>2</sup>. Напряженность электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, превышает напряженность поля внутри атома.