

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА

Цель работы: наблюдение спектра испускания атома водорода; измерение длин волн видимой области; проверка формулы Бальмера; определение постоянной Ридберга и энергии ионизации.

Приборы и принадлежности: монохроматор, блок излучателя с ТВС-15 газосветной трубкой с водородом, блок питания.

Объект измерений: длина волны излучения.

Средства измерений: монохроматор.

Введение

Спектр испускания возникает при переходе атома из более возбуждённого состояния в менее возбуждённое. Величина испущенного кванта энергии определяется разностью энергетических уровней начального и конечного состояний.

В простейшем случае (атома водорода) сказанное можно проиллюстрировать небольшим расчётом с использованием постулатов Бора и второго закона Ньютона (сила кулоновского притяжения ядром электрона сообщает ему нормальное ускорение).

Теоретическая часть

Постулаты Бора. *Первый постулат:* существуют *стационарные* состояния, находясь в которых, атом не излучает и не поглощает энергию.

Стационарными являются только те орбиты, на которых момент импульса электрона принимает дискретный ряд значений:

$$mvr = n_i \hbar, \quad n_i = 1, 2, 3... \quad (1)$$

где m – масса электрона, v – скорость электрона, r – радиус его орбиты, $\hbar = h/(2\pi) = 1,03 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка.

Второй постулат: когда электрон переходит из одного стационарного состояния в другое, то атом переходит из состояния с энергией W_j в состояние с энергией W_i , в этот момент испускается или поглощается один фотон частотой ν_Φ , энергия которого рассчитывается по формуле:

$$E_\Phi = h\nu_\Phi = W_j - W_i. \quad (2)$$

Если $W_i > W_j$, то происходит поглощение фотона, если $W_i < W_j$, - излучение фотона (рис. 1).

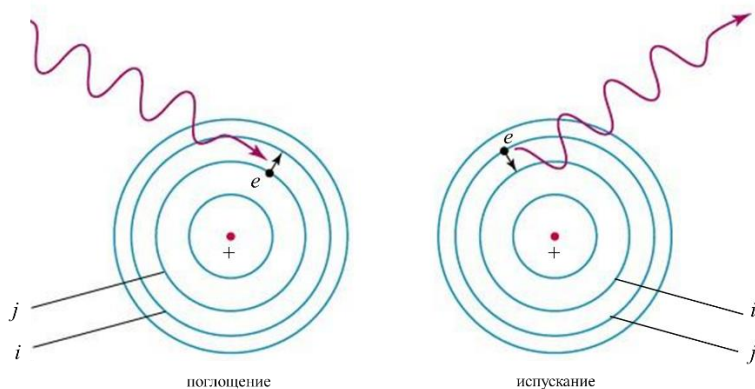


Рис. 1. Поглощение и испускание фотона атомом.

Так как момент импульса электрона дискретен и электрон движется в поле ядра, то для атома водорода уравнения, описывающие поведение электрона, имеют вид:

$$mvr = n_i \hbar, \quad (3)$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4)$$

Решая систему (3), (4) можно получить значения радиусов стационарных орбит электрона r_n

$$r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} \quad (5)$$

и скоростей v_n на соответствующей орбите

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar}. \quad (6)$$

Полная энергия электрона:

$$W = W_K + W_{II} = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (7)$$

Подставив r_n и v_n из уравнений (5) и (6) в уравнение (7), получим:

$$W = -\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n_i^2}. \quad (8)$$

Таким образом, радиус и полная энергия электрона в атоме водорода квантуются, то есть принимают дискретный ряд значений.

Из формул (2) и (8):

$$\nu_{\Phi} = \frac{e^4 m}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2} \right). \quad (9)$$

Множитель перед скобкой обозначается буквой R и называется *постоянной Ридберга*:

$$R = \frac{e^4 m}{8h^3 \epsilon_0^2} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}. \quad (10)$$

Физический смысл постоянная Ридберга заключается в том, что она является максимальной частотой (минимальной длиной волны), с которой может быть испущен фотон атомом водорода.

Линейчатые спектры обусловлены испусканием электромагнитного излучения свободными или слабо связанными атомами. Одним из источников такого излучения является возбужденный газ или пар. В данной работе используются газосветные трубки, наполненные водородом и неоном.

Установлено, что спектральные линии атомарного водорода обнаруживают несложные закономерности. Частоты соответствующих линий могут быть определены по формуле:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2} \right). \quad (11)$$

где ν – частота, $\nu = c/\lambda$, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны, R – постоянная Ридберга, n_i и n_j – целые числа, причем n_j может принимать значения $(n_i + 1)$, $(n_i + 2)$, $(n_i + 3)$,

Рассмотрим переход атома из различных возбужденных состояний на один и тот же энергетический уровень, определяемый квантовым числом n_i . Совокупность спектральных линий, отвечающая таким переходам, образует *серию*. Таким образом, n_i определяет серию. Соответственно квантовое число n_j определяет энергетический уровень, с которого имел место данный переход, то есть линию в серии.

Различным сериям атома водорода: Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэкетта, Пфунда, - отвечают соответственно значения $n_i = 1, 2, 3, 4, 5$ (рис. 2).

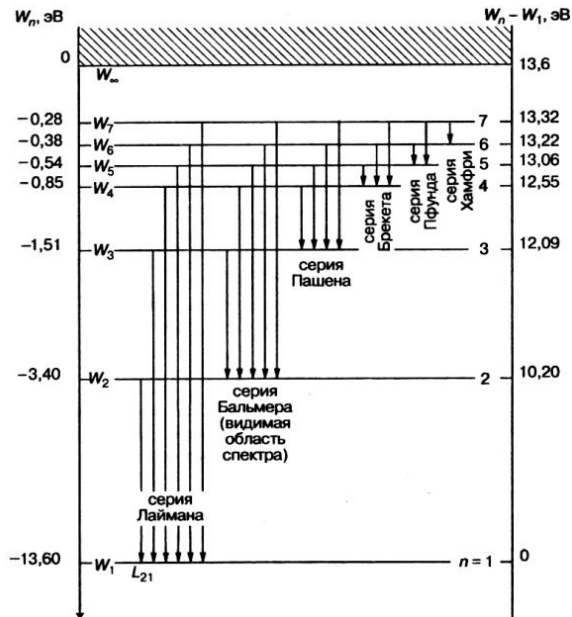


Рис. 2. Схема энергетических уровней атома водорода.

Чем больше электронов имеет атом, тем сложнее схема его энергетических уровней и спектр.

Рассмотрим, как определить частоты спектральных линий атома водорода, принадлежащих серии Бальмера, используя комбинационный принцип, математическое выражение которого представлено равенством (11). Для серии Бальмера $n_i = 2$, $n_j = 3, 4, 5, \dots$, тогда

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_j^2} \right). \quad (12)$$

Если приписать n_j значения соответственно 3, 4, 5, 6, то из уравнения (12) получим значения частот спектральных линий, лежащих в видимой области и обозначаемых в спектроскопии H_α , H_β , H_γ , H_δ (рис. 3).

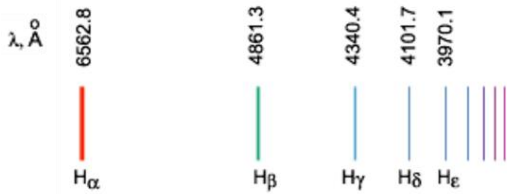


Рис. 3. Бальмеровская серия атома водорода.

По мере увеличения n_j разность частот соседних линий уменьшается, и при $n_j \rightarrow \infty$ сами частоты стремятся к пределу:

$$\nu_{\text{ГР}} = R \frac{1}{2^2}. \quad (13)$$

где $\nu_{\text{ГР}}$ – частота, соответствующая границе серии Бальмера. У каждой серии есть своя граница, соответствующая ей частота определяется соотношением:

$$\nu = R \frac{1}{n_j^2}. \quad (14)$$

Рассмотрим физический смысл $\nu_{\text{ГР}}$. Согласно Бору, при переходе атома с более высокого j -го энергетического уровня на менее высокий i -й уровень излучается квант энергии

$$h\nu = W_j - W_i, \quad (15)$$

чтобы перевести электрон с уровня i на уровень j , необходимо сообщить ему такую же энергию.

Частота $\nu_{\Gamma P}$ определяет энергию ($W = h\nu_{\Gamma P}$), которую надо сообщить электрону, чтобы удалить его с уровня, определяемого числом n_i , в пространство за пределы атома, где его полная энергия должна быть равна нулю (рис. 4). Описанный процесс называется *процессом ионизации*, а $W = h\nu_{\Gamma P}$ - *энергией ионизации атома* в данном состоянии.

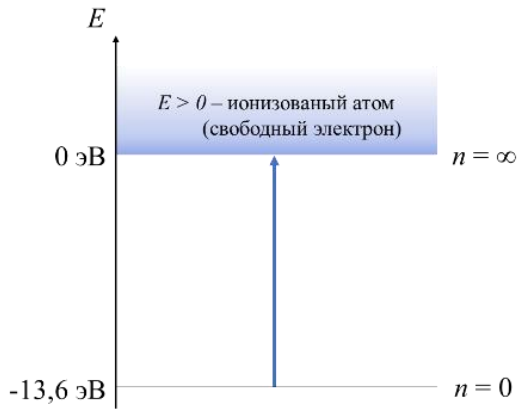


Рис. 4. Схема ионизации атома водорода.

Процесс обратный ионизации называется *захват электрона атомом* и будет сопровождаться излучением света.

Поскольку электрон, отделенный от атома, может обладать произвольной кинетической энергией W_K , то при его захвате ионом должна освободиться энергия ($h\nu_{\Gamma P} + W_K$). Следовательно, согласно второму постулату Бора (2) в этом случае будет испускаться электромагнитное излучение с частотой:

$$\nu = \frac{h\nu_{\Gamma P} + W_K}{h} = \nu_{\Gamma P} + \frac{W_K}{h}. \quad (16)$$

Таким образом, возможно излучение с частотой, большей

нежели частота границы серии, на любую величину W_k/h . Это означает, что к границе серии со стороны высоких частот прилегает сплошной спектр (рис. 2 или рис. 4).

Спектры позволяют исследовать строение атома. Частоты линий спектров поглощения и излучения совпадают, так как любой атом, в том числе и атом водорода, излучает и поглощает только на определенных частотах (рис. 5).

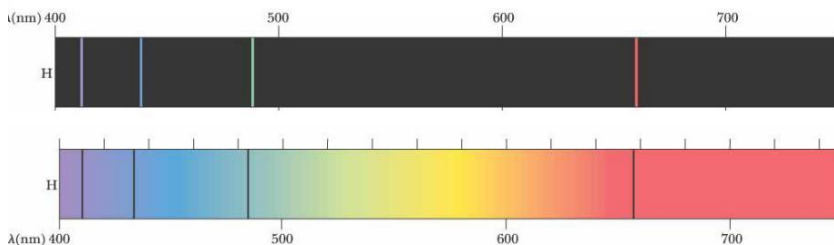


Рис. 5. Спектры поглощения и излучения атома водорода.

Методика проведения измерений и описание установки

Необходимо определить длины волн спектральных линий, принадлежащих серии Бальмера (красной, голубой и фиолетовой).

Общая схема установки приведена на рис. 6. Установка содержит:

- 1 – блок излучателя, содержащий ТВС-15 лампу, заполненную водородом;
- 2 – монохроматор, предназначенный для выделения и исследования монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 2000 до 8000 Å (Å - ангстрем);
- 3 – окуляр на выходном патрубке для наблюдения спектра;
- 4 – вращательная ручка для сканирования спектра;
- 5 – цифровой счетчик длин волн (первые три цифры на счетчике – длина волны в нм);
- 6 – барабан с рисками, отсчитывающими десятые доли нм в окне счетчика.

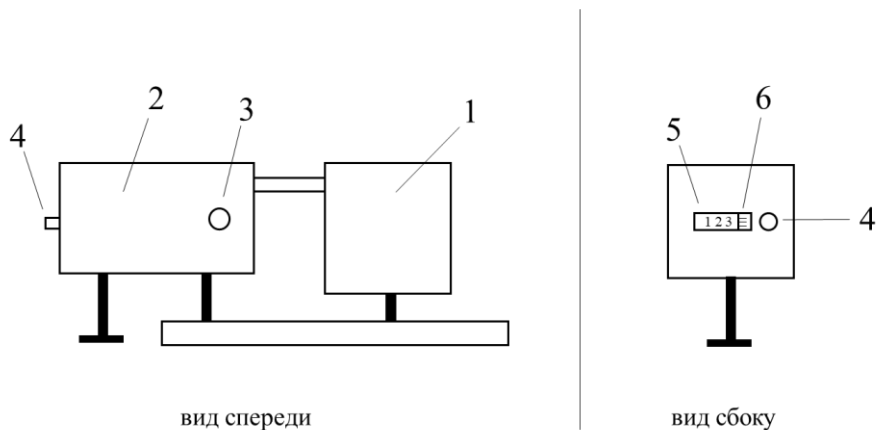


Рис. 6. Общая схема установки.

Экспериментальные установки немного отличаются по расположению приборов в зависимости от лаборатории. Ниже приведены фотографии в зависимости от лабораторий.

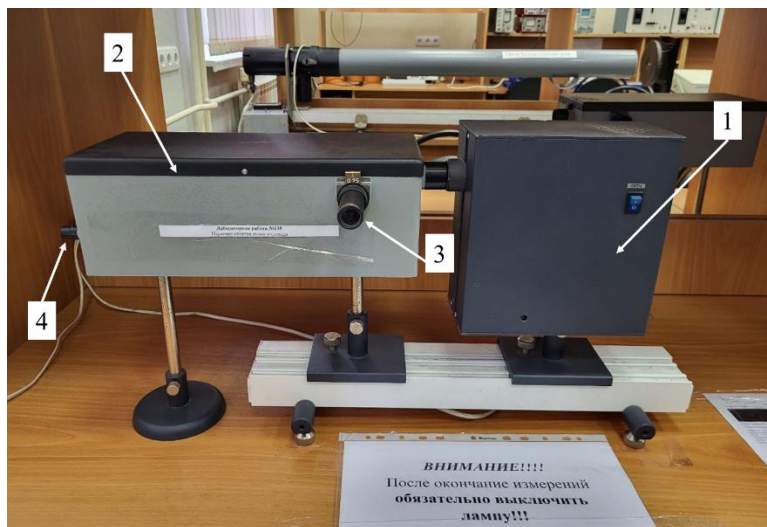


Рис. 7. Лабораторная установка в ауд. 14110 (вид спереди).

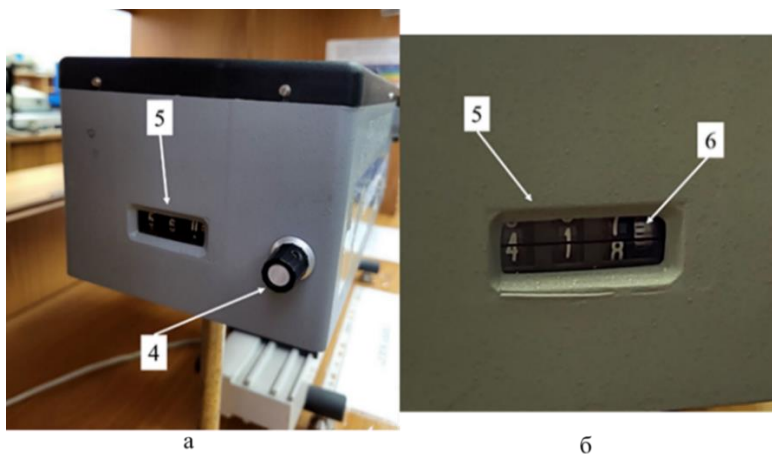


Рис. 8. Лабораторная установка в ауд. 14110 (а - вид сбоку, б - счетчик).

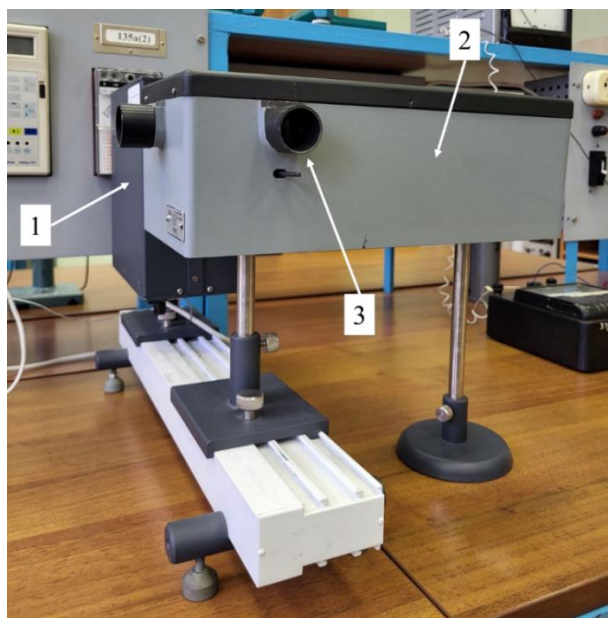


Рис. 9. Лабораторная установка в ауд. 14202 (вид спереди).

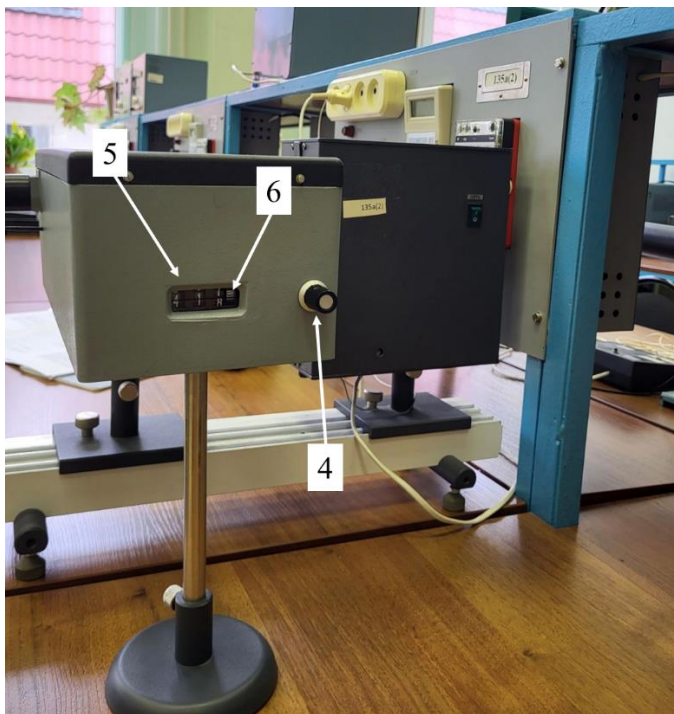


Рис. 10. Лабораторная установка в ауд. 14202 (вид сбоку).

Порядок выполнения

а) проведение измерений лаборатории

1. Включите панель питания – 7 рис. 11 (для лаборатории 14202).
2. Включите блок излучателя – 1, нажав кнопку «сеть».
3. Ручкой монохроматора – 4 установить на счетчике – 5 любое значение длины волны из диапазона красного цвета по таблице 1.

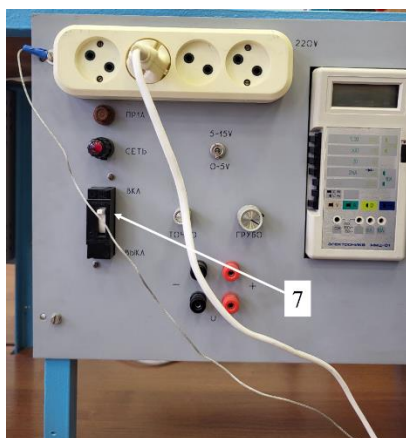


Рис. 11. Панель питания.

Таблица 1.

Цвет	Диапазон длин волн, нм
Красный	625-740
Голубой	485-500
Фиолетовый	380-440

4. Смотрите в окуляр – 3 и вращайте ручку – 4 до момента, пока красная полоса не станет максимально яркой.

5. Посмотрите на счетчик – 5 и определите точное значение получившейся длины волны. Запишите его в таблицу 2.

6. Сбросьте значение длины волны, немного прокрутив ручку – 4.

7. Прodelайте пункты 3-5 снова. Запишите второе значение длины волны красного цвета в таблицу 2.

8. Аналогично прodelайте пункты 3-7 для голубой и фиолетовой полосы. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Цвет полосы	n_i	n_j		λ (10^{-9}м)
Красная			1	
			2	
Голубая			1	
			2	
Фиолетовая			1	
			2	

б) обработка результатов измерений

1. Рассчитайте среднее значение длины волны $\lambda_{\text{ср}}$ для каждой полосы по формуле (17) и запишите в таблицу 3:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}. \quad (17)$$

2. Рассчитайте $1/\lambda_{\text{ср}}$ и $(1/n_i^2 - 1/n_j^2)$ для каждой полосы, запишите в таблицу 3.

Таблица 3

Цвет	$\lambda_{\text{ср}}$ (10^{-9}м)	$\frac{1}{\lambda_{\text{ср}}} (10^9\text{м}^{-1})$	$\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2}$	$R_{\text{эксп}}$ (10^{15}с^{-1})	$R_{\text{ср}}$ (10^{15}с^{-1})
Кр.					
Гол.					
Фиол.					

3. Определите значение постоянной Ридберга $R_{\text{эксп}}$ для каждой полосы по формуле (18) и запишите в таблицу 3.

$$R_{\text{эксп}} = \frac{c \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{ср}}}}{\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2} \right)}. \quad (18)$$

4. Рассчитайте среднее значение постоянной Ридберга $R_{\text{ср}}$ и запишите в таблицу 3.

5. Оцените точность измерения, сравнив экспериментально найденное $R_{\text{ср}}$ с теоретическим $R_{\text{теор}} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Относительную ошибку определить по формуле (19):

$$\delta R = \frac{|R_{\text{ср}} - R_{\text{теор}}|}{R_{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (19)$$

7. По экспериментальному значению постоянной Ридберга $R_{\text{ср}}$ рассчитайте энергию ионизации атома водорода ($n_i=1, n_j=\infty$) по формуле (20) и переведите в эВ. Для этого необходимо поделить полученное значение на $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

$$W_{\text{ион}} = hR_{\text{ср}} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2} \right). \quad (20)$$

8. Рассчитайте энергии стационарных состояний W_i и W_j по формулам (21) для ваших значений n_i и n_j , используя экспериментальное значение $R_{\text{ср}}$. Полученные значения переведите в эВ.

$$W_i = -\frac{hR_{\text{ср}}}{n_i^2}, \quad W_j = -\frac{hR_{\text{ср}}}{n_j^2}. \quad (21)$$

9. По полученным значениям энергий постройте схему энергетических уровней для серии Бальмера аналогичную рис. 2.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постулаты Бора.
2. Какие важнейшие свойства атома не находят своего объяснения в классической теории?
3. Что такое боровский радиус?

4. Рассчитайте по теории Бора радиус первой орбиты атома водорода.
5. Рассчитайте энергию атома водорода по теории Бора в основном состоянии ($n = 1$).
6. Что определяют в формуле (11) квантовые числа n_i и n_j ?
7. Объясните закономерности в спектре атома водорода.
8. Что называется серией?
9. Что такое граница серии?
10. В каких случаях спектр энергии атомной системы дискретен, а в каких непрерывен?
11. Что называется потенциалом ионизации? Как он определяется?
12. Как интерпретируется условие частот Бора на основе представлений о фотонах?
13. При каком выборе начала отсчета на шкале энергии связанным состояниям будут соответствовать отрицательные значения энергии атома?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы для изучения постулатов Бора рекомендуется: [1, §62, 63, 69; 2, гл.2 §1; 3, §209, 210]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 3. Оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц.: учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. — 16-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 537 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. — М.: Издательский центр «Академия», 2015. — 720 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учеб. для вузов / Т.И. Трофимова. — 11-е изд., стер. — М.: Высшая шк., 2006. — 560 с.