Физика

ИДЗ№2

1. Найти длину волны де Бройля для атома водорода, движущегося со средней квадратичной скоростью при температуре 300 К.

Дано:

$T = 300\ K$

Найти: $\lambda = ?$

Решение:

Импульс атома водорода:

$$p = m \cdot \upsilon = m \cdot \langle \upsilon_{кв} \rangle \qquad (1)$$

где $m -$ масса атома водорода; $\upsilon -$ скорость атома водорода.

Средняя квадратичная скорость атома водорода:

$$\langle \upsilon_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \qquad (2)$$

где $k -$ постоянная Больцмана; $T -$ абсолютная температура.

Длина волны де Бройля, подставляя (1) и (2):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\langle \upsilon_{кв} \rangle} = \frac{h}{m} \cdot \sqrt{\frac{m}{3kT}} = h \cdot \sqrt{\frac{N_A}{3MkT}} \qquad (3)$$

где $M -$ молярная масса атома водорода.

Проверим размерность формулы (3):

$$[\lambda] = \left[h \cdot \sqrt{\frac{N_A}{MkT}} \right] = Дж \cdot с \cdot \sqrt{\frac{моль^{-1}}{\frac{кг}{моль} \cdot \frac{Дж}{К} \cdot К}} = \sqrt{\frac{Дж^2 \cdot с^2}{кг \cdot Дж}} = \sqrt{\frac{Дж \cdot с^2}{кг}} =$$

$$= \sqrt{\frac{Н \cdot м \cdot с^2}{кг}} = \sqrt{\frac{кг \cdot \frac{м}{с^2} \cdot м \cdot с^2}{кг}} = м$$

Произведем вычисления:

$$\lambda = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot \sqrt{\frac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} = 1{,}46 \cdot 10^{-10}\ (м)$$

Ответ: $\lambda = 1{,}46 \cdot 10^{-10}\ м.$

2. Длина волны де Бройля для электрона в атоме водорода составляет 0,33 нм. Определить на какой орбите атома находится электрон и его кинетическую энергию.

Дано:	СИ:
$\lambda = 0,33\ нм$	$0,33 \cdot 10^{-9}\ м$
Найти: $n = ?\ T = ?$	

Решение:

Согласно первому постулату Бора движение электрона вокруг ядра возможно только по определенным орбитам радиусы которых удовлетворяют соотношению:

$$L_n = m\upsilon r_n = n\hbar \quad \text{или} \quad L_n = m\upsilon r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi} \qquad (1)$$

где $m-$масса электрона; $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot c -$постоянная Планка; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot c -$ постоянная Планка; $\upsilon -$скорость электрона; $n-$номер орбиты (главное квантовое число).

Согласно теории Бора, электрон вращается вокруг ядра. При этом сила взаимодействия между электрическими зарядами ядра и электрона сообщает электрону центростремительное ускорение $a = \frac{\upsilon^2}{r_n}$. На основании второго закона Ньютона можем записать:

$$\frac{|+e| \cdot |-e|}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2} = m\frac{\upsilon^2}{r_n} \qquad (2)$$

где $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}\ Кл -$ заряд электрона; $+e = -1,6 \cdot 10^{-19}\ Кл -$ заряд ядра; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м -$диэлектрическая постоянная.

Выразим из (1) скорость и подставим в (2):

$$\upsilon = \frac{n \cdot h}{2\pi m r_n} \qquad (3)$$

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2} = \frac{m}{r_n} \cdot \left(\frac{n \cdot h}{2\pi m r_n}\right)^2$$

$$\frac{e^2}{\varepsilon_0}=\frac{n^2\cdot h^2}{\pi r_n m} \text{ или } r_n=\frac{\varepsilon_0 n^2\cdot h^2}{\pi m e^2} \tag{4}$$

Подставим (4) в (3):

$$\upsilon=\frac{n\cdot h}{2\pi m\cdot\dfrac{\varepsilon_0 n^2\cdot h^2}{\pi m e^2}}=\frac{e^2}{2\varepsilon_0 n h} \tag{5}$$

Импульс электрона, подставляя (5):

$$p=m\upsilon=\frac{me^2}{2\varepsilon_0 n h} \tag{6}$$

Длина волны де Бройля, подставляя (6):

$$\lambda=\frac{h}{p}=\frac{2\varepsilon_0 n h^2}{me^2} \tag{7}$$

Из (7) находим:

$$n=\frac{me^2\lambda}{2\varepsilon_0 h^2} \tag{8}$$

Проверим размерность формулы (8):

$$[n]=\left[\frac{me^2\lambda}{\varepsilon_0 h^2}\right]=\frac{кг\cdot Кл^2\cdot м}{\dfrac{Ф}{м}\cdot Дж^2\cdot c^2}=\frac{кг\cdot Кл^2\cdot м^2}{\dfrac{Кл}{В}\cdot Дж^2\cdot c^2}=\frac{кг\cdot Кл\cdot В\cdot м^2}{Дж^2\cdot c^2}=$$

$$=\frac{Н\cdot м\cdot Дж}{Дж^2}=\frac{Дж}{Дж}=безразмерная\ величина$$

Произведем вычисления:

$$n=\frac{9{,}1\cdot10^{-31}\left(1{,}6\cdot10^{-19}\right)^2\cdot0{,}33\cdot10^{-9}}{2\cdot8{,}85\cdot10^{-12}\cdot\left(6{,}63\cdot10^{-34}\right)^2}=1$$

Кинетическая энергия электрона:

$$T=\frac{m\upsilon^2}{2}=\frac{me^4}{2\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \tag{9}$$

Проверим размерность формулы (9):

$$[T]=\left[\frac{me^4}{\varepsilon_0^2 n^2 h^2}\right]=\frac{кг\cdot Кл^4}{\dfrac{Ф^2}{м^2}\cdot1^2\cdot Дж^2\cdot c^2}=\frac{кг\cdot Кл^4\cdot м^2}{\dfrac{Кл^2}{В^2}\cdot Дж^2\cdot c^2}=$$

$$=\frac{кг\cdot Кл^2\cdot В^2\cdot м^2}{Дж^2\cdot с^2}=\frac{кг\cdot\dfrac{м}{с^2}\cdot м\cdot Дж^2}{Дж^2}=Н\cdot м=Дж$$

Произведем вычисления:

$$T=\frac{9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot\left(1{,}6\cdot 10^{-19}\right)^4}{2\cdot\left(8{,}85\cdot 10^{-12}\right)^2\cdot 1^2\cdot\left(6{,}63\cdot 10^{-34}\right)^2}=8{,}66\cdot 10^{-18}\ \left(Дж\right)$$

Ответ: $n=1;\ T=8{,}66\cdot 10^{-18}\ Дж.$

3. Найти наименьшую и наибольшую длины волн спектральных линий водорода в ультрафиолетовой области спектра.

Дано:

Ультрафиолетовая серия водорода

Найти: $\lambda_{наиб} = ?$ $\lambda_{наим} = ?$

Решение:

Ультрафиолетовая серия водорода – серия Лаймана. Для серии Лаймана главное квантовое число: $n_1 = 1$.

Формула Бальмера-Ридберга:

$$\lambda = \frac{1}{R \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)} \qquad (1)$$

где $n_1 -$ квантовое число нижнего уровня; $n_2 -$квантовое число верхнего уровня; $R -$ постоянная Ридберга.

Наименьшая длина волны фотона будет при переходе электрона из бесконечности $n_2 = \infty$ на $n_1 = 1$:

$$\lambda_{наим} = \frac{1}{1{,}1 \cdot 10^7 \ м^{-1} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right)} = 9{,}1 \cdot 10^{-8} \ м$$

Наибольшая длина волны фотона будет при переходе электрона с $n_2 = 2$ на $n_1 = 1$:

$$\lambda_{наиб} = \frac{1}{1{,}1 \cdot 10^7 \ м^{-1} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)} = 1{,}21 \cdot 10^{-7} \ м$$

Ответ: $\lambda_{наим} = 9{,}1 \cdot 10^{-8}$ *м*; $\lambda_{наиб} = 1{,}21 \cdot 10^{-7}$ *м*.

4. Какую ускоряющую разность потенциалов должны пройти электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов спектр водорода имел три спектральные линии? Найти длины волн этих серий.

Дано:

три спектральные линии

Найти: $\varphi = ?$ $\lambda = ?$

Решение:

Чтобы появились три спектральные линии спектра водорода, энергии бомбардирующих электронов должно быть достаточно для перехода электрона в атоме водорода на третий энергетический уровень, тогда будем иметь переходы $1 \to 2; 1 \to 3; 2 \to 3$.

Для определения длины волн воспользуемся сериальной формулой для атома водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

или $$\lambda = \frac{1}{R \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)} \qquad (1)$$

где $R = 1{,}097 \cdot 10^7\ м^{-1}$ – постоянная Ридберга; n_1 – номер орбиты, на которую перешел электрон; n_2 – номер орбиты, с которой перешел электрон (n_1 и n_2 – главные квантовые числа).

Энергия, необходимая для перехода электрона в атоме водорода на третий уровень:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = hcR \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \qquad (2)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

Таким образом, наименьшая энергия бомбардирующих электронов:

$$\varepsilon = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с \cdot 3 \cdot 10^8\ м/с \cdot 1{,}097 \cdot 10^7\ м^{-1} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right) =$$

$$=1{,}94\cdot 10^{-18}\ Дж=\frac{1{,}94\cdot 10^{-18}\ Дж}{1{,}6\cdot 10^{-19}\ Дж/эВ}=12{,}1\ эВ$$

Искомый потенциал:

$$\varphi=\frac{\varepsilon}{e}=\frac{12{,}1\ эВ}{e}=12{,}1\ В$$

Длина волны фотона при переходе электрона с $n_2=2$ на $n_1=1$:

$$\lambda_{2-1}=\frac{1}{1{,}097\cdot 10^{7}\ м^{-1}\cdot\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right)}=1{,}21\cdot 10^{-7}\ м$$

Длина волны фотона при переходе электрона с $n_2=3$ на $n_1=1$:

$$\lambda_{3-1}=\frac{1}{1{,}097\cdot 10^{7}\ м^{-1}\cdot\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}\right)}=1{,}02\cdot 10^{-7}\ м$$

Длина волны фотона при переходе электрона с $n_2=3$ на $n_1=2$:

$$\lambda_{3-2}=\frac{1}{1{,}097\cdot 10^{7}\ м^{-1}\cdot\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2}\right)}=6{,}54\cdot 10^{-7}\ м$$

Ответ: $\varphi=12{,}1\ В$; $\lambda_{2-1}=1{,}21\cdot 10^{-7}\ м$; $\lambda_{3-1}=1{,}02\cdot 10^{-7}\ м$; $\lambda_{3-2}=6{,}54\cdot 10^{-7}\ м$.

5. В одномерный потенциальный ящик шириной l помещен электрон. Какова вероятность обнаружить электрон в основном состоянии в интервале $l/4 < x < 3l/4$.

Дано:

$n = 1$

$\frac{l}{4} \le x \le \frac{2}{4} l$

Найти: $W_1 - ?$

Решение:

Вероятность того, что частица будет находиться в интервале dx (от x до $x + dx$), пропорциональна этому интервалу и квадрату модуля волновой функции, описывающей данное состояние:

$$dW = \left|\psi_n(x)\right|^2 dx \qquad (1)$$

Волновая функция частицы в потенциальном ящике в основном состоянии $(n = 1)$:

$$\psi_1 = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right) \qquad (2)$$

где x – координата частицы в ящике; l – ширина ящика; n – главное квантовое число.

Вероятность обнаружить частицу в интервале $l/4 < x < 3l/4$:

$$W_1 = \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{3l}{4}} \left|\psi_1(x)\right|^2 dx = \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{3l}{4}} \frac{2}{l} \sin^2\left(\frac{\pi}{l} x\right) dx =$$

$$= \frac{1}{l} \cdot \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{3l}{4}} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{l} x\right)\right) dx = \frac{1}{l} \cdot \left(x - \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{l} x\right)}{\frac{2\pi}{l}} \right)\Bigg|_{\frac{l}{4}}^{\frac{3l}{4}} =$$

$$=\frac{1}{l}\cdot\left(\frac{3l}{4}-\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{l}\cdot\frac{3l}{4}\right)}{\frac{2\pi}{l}}\right)-\frac{1}{l}\cdot\left(\frac{l}{4}-\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{l}\cdot\frac{l}{4}\right)}{\frac{2\pi}{l}}\right)=$$

$$=\frac{3}{4}-\frac{\sin\left(\frac{3\pi}{2}\right)}{2\pi}-\frac{1}{4}+\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{2\pi}=\frac{1}{2}+\frac{2}{2\pi}=\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi}=0,818$$

Ответ: $W_1=\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi}=0,818$.

6. Частица массой 10^{-27} г помещена в потенциальный ящик шириной 0,25 нм. Вычислить разность энергий пятого и шестого энергетических уровней частицы. Ответ выразить в электрон-вольтах.

Дано:	СИ:
$m = 10^{-27}$ *г*	10^{-30} *кг*
$l = 0,25$ *нм*	$0,25 \cdot 10^{-9}$ *м*
Найти: $\Delta E_{6-5} = ?$	

Решение:

Собственное значение энергии для частицы, находящейся в бесконечно глубоком, прямоугольном потенциальном ящике:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2} \qquad (1)$$

где $m-$масса частицы; $n-$главное квантовое число, $\hbar-$постоянная Планка.

Разность энергий четвертого и шестого энергетических уровней частицы:

$$E_{6-5} = E_6 - E_5 = \frac{\pi^2 \hbar^2 6^2}{2ml^2} - \frac{\pi^2 \hbar^2 5^2}{2ml^2} = \frac{11\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} =$$

$$= \frac{11\pi^2 \left(1,05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot c\right)^2}{2 \cdot 10^{-30}\ кг \cdot \left(0,25 \cdot 10^{-9}\ м\right)^2} = 9,57 \cdot 10^{-18}\ Дж = \frac{9,57 \cdot 10^{-18}\ Дж}{1,6 \cdot 10^{-19}\ \frac{Дж}{эВ}} = 59,8\ эВ$$

Ответ: $E_{6-5} = 59,8$ *эВ*.

7. Найти число электронов в атоме, у которого в основном состоянии заполнены: K -, L - , M - слои и $4s$ -, $4p$ - и $4d$ - оболочки. Что это за атом?

Дано:

K, L, M -слои заполнены полностью

$4s, 4p, 4d$ -оболочки заполнены полностью

Найти: $N = ?$ $атом = ?$

Решение:

K -слой – это уровень с главным квантовым числом $n = 1$: $1s^2$.

L -слой – это уровень с главным квантовым числом $n = 2$: $2s^2 2p^6$.

M -слой – это уровень с главным квантовым числом $n = 3$: $3s^2 3p^6 3d^{10}$.

Полностью заполненная $4s$ -оболочка: $4s^2$; полностью заполненная $4p$ -оболочка: $4p^6$; полностью заполненная $4d$ -оболочка: $4d^{10}$, Таким образом, электронная формула атома элемента имеет вид:

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10}$

Число электронов в атоме $N = 46$. По периодической таблице Д.И. Менделеева определяем, что этот элемент – палладий Pd.

Ответ: $N = 46$, палладий.

8. Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния ${}_{89}\mathrm{Ac}^{225}$ останется через 5 суток?

Дано:

${}_{89}\mathrm{Ac}^{225}$

$t = 5\ сут$

Найти: $\dfrac{N}{N_0} = ?$

Решение:

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (1)$$

где $N_0 -$ начальное количество ядер $(t = 0)$; $N -$ число оставшихся ядер в момент времени t.

Постоянная радиоактивного распада:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \qquad (2)$$

где $T_{1/2} -$ период полураспада.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}t} = e^{-\frac{\ln 2}{10\,сут}\cdot 5\,сут} = 0{,}707\ или\ 70{,}7\%$$

Ответ: $\dfrac{N}{N_0} = 0{,}707\ или\ 70{,}7\%.$

9. Вследствие радиоактивного распада ${}_{92}\mathrm{U}^{238}$ превращается в ${}_{82}\mathrm{Pb}^{206}$. Сколько α - и β-распадов он при этом испытывает?

Решение:

Схема α-распада:

$${}_{Z}\mathrm{X}^{A} \xrightarrow{\alpha-распад} {}_{Z-2}\mathrm{Y}^{A-4} + {}_{2}\mathrm{He}^{4}$$

где ${}_{2}\mathrm{He}^{4}$ – α- частица.

Схема β-минус-распада:

$${}_{Z}\mathrm{X}^{A} \xrightarrow{\beta_{-}-распад} {}_{Z+1}\mathrm{Y}^{A} + {}_{-1}^{0}e^{0}$$

где ${}_{-1}e^{0}$ – электрон.

Из схем распадов видно, что изменение массового числа A происходит только при α-распаде, причем за один распад массовое число уменьшается на 4, следовательно, можно подсчитать число α-распадов:

$$\frac{238-206}{4} = 8 \;\; \alpha\text{-распадов.}$$

При одном α-распаде зарядовое число уменьшается на 2, следовательно, при 8-ми α-распадах – на $8 \cdot 2 = 16$.

При одном β-распаде зарядовое число увеличивается на 1. Запишем уравнение:

$$92 - 16 + x \cdot 1 = 82,$$

где x – число β-распадов

$$76 + x = 82$$

$$x = 82 - 76 = 6 \; – \; \beta\text{-распадов.}$$

Схема восьми α-распадов:

$${}_{92}\mathrm{U}^{238} \xrightarrow{8\alpha-распадов} {}_{92-8\cdot 2}\mathrm{Os}^{238-8\cdot 4} + 8 \cdot {}_{2}\mathrm{He}^{4}$$

уран

$${}_{92}\mathrm{U}^{238} \xrightarrow{8\alpha-распадов} {}_{76}\mathrm{Os}^{206} + 8 \cdot {}_{2}\mathrm{He}^{4}$$

осмий

Схема шести β-распадов:

$${}_{76}\mathrm{Os}^{206} \xrightarrow{6\beta_{-}\text{-}распадов} {}_{76+6\cdot1}\mathrm{Pb}^{206} + 6\cdot{}_{-1}^{0}e$$

$${}_{76}\mathrm{Os}^{206} \xrightarrow{6\beta_{-}\text{-}распадов} {}_{82}\mathrm{Pb}^{206} + 6\cdot{}_{-1}e^{0}$$

свинец

Ответ: 8 α- и 6 β-распадов испытывает ${}_{92}\mathrm{U}^{238}$.

10. Найти (в МэВ) минимальную энергию, необходимую для удаления одного протона из ядра азота ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$.

Дано:
ядро ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$
Найти: $\Delta E - ?$

Решение:

После удаления протона от ядра азота ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ число нуклонов A в ядре атома азота уменьшится на единицу, и число протонов Z уменьшится на единицу, получится ядро ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$. Минимальная энергия, необходимая для удаления протона из ядра ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ равна разности между энергиями связи ядра азота ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ и ядра углерода ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$.

Дефект массы ядра определяется соотношением:

$$\Delta m = Zm_p + \left(A - Z\right)m_n - M_Я \qquad (1)$$

где $Z -$зарядовое число; $A -$массовое число; $m_p -$масса протона; $m_n -$ масса нейтрона.

Масса ядра: $M_Я = M_a - Zm_e$ (2)

где $M_a -$масса атома; $m_e -$масса электрона.

Следовательно,

$$\Delta m = Z\left(m_p + m_e\right) + \left(A - Z\right)m_n - M_a \qquad (3)$$

Замечая, что $m_p + m_e = M_H$, где M_H – масса ядра водорода. Окончательно найдем

$$\Delta m = ZM_H + \left(A - Z\right)\cdot m_n - M_a \qquad (4)$$

Энергию связи найдем из соотношения

$$\Delta E = \Delta mc^2 \qquad (5)$$

Коэффициент пропорциональности c^2 может быть выражен двояко:

$c^2 = 9\cdot 10^{16}$ $м^2/с^2$

или $c^2 = \dfrac{\Delta E}{\Delta m} = 9 \cdot 10^{16}$ *Дж / кг*

В последней формуле, перейдя к внесистемным единицам, получим

$c^2 = 931$ *МэВ / а.е.м.*

С учетом этого искомая формула для энергии связи примет вид:

$$\Delta E = 931 \cdot \Delta m \left(\text{МэВ} \right) \tag{6}$$

Подставим (4) в (6):

$$\Delta E = 931 \cdot \left[ZM_H + \left(A - Z \right) \cdot m_n - M_a \right] \tag{7}$$

Используя формулу (7) вычислим искомую энергию:

$$\Delta E = E_N - E_C = 931 \cdot \left[7 \cdot M_H + \left(14 - 7 \right) \cdot m_n - M_N \right] -$$
$$-931 \cdot \left[6 \cdot M_H + \left(13 - 6 \right) \cdot m_n - M_C \right] =$$
$$= 931 \cdot \left[M_H - M_N + M_C \right] = 931 \cdot \left[1,00783 - 14,00307 + 13,00335 \right] =$$
$$= 7,55 \text{ МэВ}$$

Ответ: $\Delta E = 7,55$ *МэВ*.

Список использованной литературы

1. Грабовский Р.И. Курс физики / Р.И. Грабовский. – СПб.: Лань, 2009. – 608 с.

2. Дмитриева В.Ф. Основы физики / В.Ф. Дмитриева, В.Л. Прокофьев. – М.: Высшая школа, 2003. – 527 с.

3. Общая физика / коллектив авторов; под ред. А.А. Воробьёва. – М.: КНОРУС, 2016. – 800 с.

4. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Атомная физика. Ядерная физика. Астрофизика: Учебник.- М.: Высшая школа, 2008. – 210 с.

5. Яворский Б.М. Основы физики: Колебания и волны. Квантовая физика. Физика ядра и элементарных частиц / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 552 с.