

АТОМНАЯ ФИЗИКА

Основные законы и формулы

1 Момент импульса электрона в атоме (правило отбора стационарных орбит)

$$m v r = n \hbar,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots \infty$. – главное квантовое число.

2 Радиус n-ой стационарной орбиты атома водорода

$$r_n = a_1 n^2,$$

где a_1 – радиус первой боровской орбиты (радиус Бора)

3 Энергия ионизации атома водорода

$$E_i = R h c,$$

где $R = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга

4 Энергия электрона в атоме водорода

$$E_n = E_i / n^2$$

5 Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом (второй постулат Бора)

$$\varepsilon = \hbar \omega = E_{n_2} - E_{n_1} \quad \text{или} \quad \varepsilon = E_i \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

6 Сериальная формула для спектральных линий, излучаемых или поглощаемых атомом водорода или водородоподобными ионами с зарядом ядра Z при переходе с одного стационарного уровня с главным квантовым числом n_2 на другой стационарный уровень с главным квантовым числом n_1

$$\nu = Z^2 R c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{или} \quad \frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

7 Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра

$$\lambda_{\min} = hc / e U$$

8 Закон Мозли

а) в общем случае

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

б) для K_{α} – линий

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} = \frac{3}{4} R (Z - b)^2$$

9 Энергия фотона K_{α} – линии рентгеновского излучения

$$\varepsilon_{K\alpha} = \frac{3}{4} E_i (Z - b)^2$$

Примеры решения задач

Задача 1. Электрон в ионе Li^{++} перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

Дано:

$$Z=3$$

$$n_2=4$$

$$n_1=2$$

$$\varepsilon - ?$$

Решение: Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (11.1)$$

где λ – длина волны фотона; R – постоянная Ридберга; Z – заряд ядра в относительных единицах; 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 фотона ε выражается формулой

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}.$$

Умножив обе части формулы (11.1) на hc , получим:

$$\varepsilon = R hcZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

Так как Rhc есть энергия ионизации E_i атома водорода, то

$$\varepsilon = E_i Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (11.2)$$

Подставим числовые значения и произведем расчеты. E_i возьмем из справочной табл. 1 во внесистемной единице: $E_i=13,6$ эВ.

$$\varepsilon = 13,6 \cdot 3^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) = 22,95 \text{ эВ.}$$

Ответ: $\varepsilon = 22,95$ эВ.

Задача 2. Используя теорию Бора для атома водорода, определить радиус ближайшей к ядру орбиты (первый боровский радиус) и скорость движения электрона по этой орбите.

Дано:

$n=1$

$Z=1$

$r_1=?$ $v_1=?$

Решение: В атоме на электрон со стороны ядра действует кулоновская сила притяжения, которая играет роль центростремительной силы:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad (11.3)$$

где m и e соответственно масса и заряд электрона, Ze – заряд ядра, v и r

– скорость движения электрона по орбите и радиус орбиты, ε_0 – электрическая постоянная. Из множества орбит, удовлетворяющих уравнению (11.3), выберем стационарные орбиты. Для этого воспользуемся правилом квантования (отбора) орбит:

$$mvr = n\hbar, \quad (11.4)$$

где n – главное квантовое число, в теории Бора соответствует номеру стационарной орбиты; $\hbar = h / 2\pi$ – приведённая постоянная Планка.

По условию задачи $Z = 1$, $n = 1$ и уравнения (11.3) и (11.4) примут вид:

$$\begin{cases} \frac{mv_1^2}{r_1} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}, \\ mv_1 r_1 = \hbar \end{cases} \quad (11.5)$$

Решая систему уравнений (4.5), получим:

$$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{me^2}, \quad (11.6)$$

$$v_1 = \frac{\hbar}{mr_1}. \quad (11.7)$$

Проверим единицы r_I и v_I :

$$[r_I] = \frac{Kл^2 \cdot Дж^2 \cdot c^2}{H \cdot м^2 \cdot кг \cdot Кл^2} = \frac{H^2 м^2 c^2}{H м^2 кг} = м,$$

$$[v_I] = \frac{Дж \cdot c}{кг \cdot м} = \frac{кг \cdot м^2 c}{с^2 кг \cdot м} = \frac{м}{с}.$$

Единицы r_I и v_I верны, следовательно, верны и формулы (11.6) и (11.7). Подставим числовые значения и произведём расчёты:

$$r_1 = \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}{9 \cdot 10^9 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (1,6 \cdot 10^{-19})^2} = 52,8 \cdot 10^{-12} м = 52,8 нм$$

$$v_1 = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 52,8 \cdot 10^{-12}} = 2,19 \cdot 10^6 м/с = 2,19 Мм/с$$

Ответ: $r_I = 52,8 нм$; $v_I = 2,19 Мм/с$.

Задача 3. Определить длину волны $\lambda_{K\alpha}$ энергию $\mathcal{E}_{K\alpha}$ фотона $K\alpha$ – линии рентгеновского спектра, излучаемого вольфрамом при бомбардировке его быстрыми электронами.

Дано:

$$k=1$$

$$n=2$$

$$Z=74$$

$$\lambda_{K\alpha}=?$$

$$\mathcal{E}_{K\alpha}=?$$

Решение: При бомбардировке вольфрама быстрыми электронами возникает характеристическое рентгеновское излучение, имеющее линейчатый спектр. Быстрые электроны, проникая внутрь электронной оболочки атома, выбивают электроны, принадлежащие электронным слоям. Если за пределы атома выбивается один из двух электронов ближайшей к ядру K – оболочки, то на освободившееся место переходит один из электронов вышележащих слоёв (L , M , N).

При этом возникает соответствующая линия K – серии. Наиболее интенсивная линия этой серии $K\alpha$ возникает при переходе электрона из L - слоя ($n=2$) в K – слой ($k=1$). Поэтому длина волны этой линии в соответствии с законом Мозли определится по формуле:

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} = R (Z-b)^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{3}{4} R (Z-b)^2, \quad (11.8)$$

где $R = 1,1 \cdot 10^7 м^{-1}$ – постоянная Ридберга, $Z = 74$ – атомный номер вольфрама, b - постоянная экранирования (для K – серии $b= 1$). Из формулы (11.8) получим:

$$\lambda_{K\alpha} = \frac{4}{3R(Z-1)^2}.$$

Подставим числовые значения и произведём расчёт:

$$\lambda_{K\alpha} = \frac{4}{3 \cdot 1,1 \cdot 10^7 (74 - 1)^2} = 2,28 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 22,8 \text{ нм}$$

Энергию фотона α – серии определим по формуле:

$$\varepsilon_{K\alpha} = \frac{3}{4} E_i (Z - b)^2, \quad (11.9)$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода, $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (см. табл. 1).
Подставим в формулу (11.9) числовые значения и произведём расчёт:

$$\varepsilon_{K\alpha} = 0,75 \cdot 2,18 \cdot 10^{-18} (74 - 1)^2 = 8,713 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 54,5 \text{ кэВ}$$

Ответ: $\lambda_{K\alpha} = 22,8$ пм, $\varepsilon_{K\alpha} = 54,5$ кэВ.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Таблица 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Гравитационная постоянная	G	6,67·10 ⁻¹¹ м ³ /(кг·с ²)
Число Авогадро	N_A	6,02·10 ²³ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	k	1,38·10 ⁻²³ Дж/К
Элементарный заряд	e	1,60·10 ⁻¹⁹ Кл
Скорость света в вакууме	c	3,00·10 ⁸ м/с
Масса покоя электрона	m_e	9,1·10 ⁻³¹ кг
Масса покоя протона	m_p	1,67·10 ⁻²⁷ кг
Нормальные условия: давление	P	1,01·10 ⁵ Па
температура	T	273 К
Электрическая постоянная	ϵ_0	8,85·10 ⁻¹² Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	4π·10 ⁻⁷ Гн/м
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	5,67·10 ⁻⁸ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
Постоянная Вина (первый закон)	b	2,9 ·10 ⁻³ м·К
Постоянная Вина (второй закон)	c	1,3 ·10 ⁻⁵ Вт/(м ³ ·К ⁵)
Постоянная Планка	h	6,63·10 ⁻³⁴ Дж·с
	\hbar	1,05·10 ⁻³⁴ Дж·с
Постоянная Ридберга	R	1,1·10 ⁷ м ⁻¹
	R'	3,3·10 ¹⁵ с ⁻¹
Энергия ионизации атома водорода	E_i	2,18·10 ⁻¹⁸ Дж (13,6эВ)
Атомная единица массы	$1a.e.m$	1,660·10 ⁻²⁷ кг
Радиус Бора	a_0	0,529·10 ⁻¹⁰ м
Модуль Юнга для стали	E	0,2 ТПа

Таблица 2. Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность кг/м ³	Твердое тело	Плотность кг/м ³	Твердое тело	Плотность кг/м ³
Алюминий	2,70·10 ³	Железо	7,88·10 ³	Свинец	11,3·10 ³
Барий	3,50·10 ³	Литий	0,53·10 ³	Серебро	10,5·10 ³
Ванадий	6,02·10 ³	Медь	8,93·10 ³	Цезий	1,90·10 ³
Висмут	9,80·10 ³	Никель	8,90·10 ³	Цинк	7,15·10 ³
Латунь	8,4·10 ³	Сталь	7,70·10 ³	Фарфор	2,3·10 ³

Таблица 3. Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность кг/м ³	Жидкость	Плотность кг/м ³
Вода (при 4 °С)	1,00·10 ³	Сероуглерод	1,26·10 ³
Глицерин	1,26·10 ³	Спирт	0,80·10 ³
Ртуть	13,6·10 ³	Касторовое масло	0,9·10 ³
Машинное масло	0,9·10 ³	Нефть	0,85·10 ³

Таблица 4. Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность кг/м ³	Газ	Плотность кг/м ³
Аргон	1,78	Гелий	0,18
Водород	0,09	Кислород	1,43
Воздух	1,29	Азот	1,25

Таблица 5. Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d·10 ¹⁰ , м	Динамическая вязкость η, мкПа·с	Теплопроводность α, мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	0,27	17,2	24,1
Гелий	0,22	18,9	142
Кислород	0,29	19,8	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

Таблица 6. Динамическая вязкость η жидкостей при 20 °С

Вещество	Динамическая вязкость η, мПа·с	Вещество	Динамическая вязкость η, мПа·с
Вода	1,00	Масло машинное	100
Глицерин	1480	Ртуть	1,58
Масло касторовое	987		

Таблица 7. Молярные массы некоторых газов

Газ	Молярная масса $\mu \cdot 10^3$, кг/моль	Газ	Молярная масса $\mu \cdot 10^3$, кг/моль
Гелий	4	Углерод	24
Аргон	40	Азот	28
Неон	20	Воздух	29
Водород	2	Пары воды	18
Кислород	32		

Таблица 8. Удельная теплоемкость

Вещество	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Вещество	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)
Вода	4190	Нихром	220
Лед	2100	свинец	126

Таблица 9. Удельная теплота плавления

Вещество	Удельная теплота плавления λ , Дж/кг
Лед	$33,5 \cdot 10^4$
Свинец	$2,3 \cdot 10^4$

Таблица 10. Удельная теплота парообразования

Вещество	Удельная теплота парообразования r , Дж/кг
Вода	$22,5 \cdot 10^5$
Эфир	$6,68 \cdot 10^5$

Таблица 11. Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Парафин	2,0	Вода	81
Стекло	7,0	Масло трансформаторное	2,2

Таблица 12. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление металлов, Ом·м	Металл	Удельное сопротивление металлов, Ом·м
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Никелин	$4 \cdot 10^{-7}$		

Таблица 13. Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

Таблица 14. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	m_0		E_0	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный мезон π -	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

Таблица 15. Работа выхода электронов

Металл	Дж	эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

Таблица 16. Относительные атомные массы (атомные веса) A и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Химический символ	A	Z
Азот	N	14	7
Алюминий	Al	27	13
Водород	H	1	1
Вольфрам	W	184	74
Гелий	He	4	2
Железо	Fe	56	26
Золото	Au	197	79
Калий	K	39	19
Кальций	Ca	40	20
Кислород	O	16	8
Магний	Mg	24	12
Марганец	Mn	55	25
Медь	Cu	64	29
Молибден	Mo	96	42
Натрий	Na	23	11
Никель	Ni	59	28
Платина	Pt	195	78
Сера	S	32	16
Серебро	Ag	108	47
Уран	U	238	92
Углерод	C	12	6
Хлор	Cl	35	17

Таблица 17. Периоды полураспада радиоактивных изотопов.

Изотоп	Символ	Период полураспада
Магний	${}_{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин
Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 суток
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 года
Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	27 лет
Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 суток
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 суток
Торий	${}_{90}\text{Th}^{229}$	$7 \cdot 10^3$ лет
Уран	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Радий	${}_{88}\text{Ra}^{219}$	10^{-3} сек
	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	$1,62 \cdot 10^3$ лет

Таблица 18. Массы нейтрона и некоторых атомов

Изотоп	Символ	Масса (а.е.м)
Нейтрон	${}_0n^1$	1,00867
Водород	${}_1H^1$	1,00783
	${}_1H^2$	2,01410
	${}_1H^3$	3,01605
Гелий	${}_2He^3$	3,01603
	${}_2He^4$	4,00260
Литий	${}_3Li^6$	6,01513
	${}_3Li^7$	7,01601
Бериллий	${}_4Be^7$	7,01693
	${}_4Be^9$	9,01219
Бор	${}_5B^{10}$	10,01294
	${}_5B^{11}$	11,00930
Углерод	${}_6C^{12}$	12,00000
	${}_6C^{13}$	13,00335
	${}_6C^{14}$	14,00324
Азот	${}_7N^{14}$	14,00307
Кислород	${}_8O^{16}$	15,99491
	${}_8O^{17}$	16,99913
Магний	${}_{12}Mg^{23}$	22,99414

Таблица 19. внесистемные единицы, допущенные к применению наравне с единицами СИ, их связь с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Название	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	$1\text{т} = 10^3 \text{кг}$
	атомная единица массы	а.е.м.	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{кг}$
Время	минута	мин	$1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$
	час	ч	$1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$
	сутки	сут	$1 \text{ сут} = 86400 \text{ с}$
	год	год	$1 \text{ год} = 365,25 \text{ сут} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$
Работа, энергия	электрон -вольт	эВ	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Таблица 20. Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

Таблица 21. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка		Множитель	Приставка		Множитель
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санتي	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}