
А. А. Радциг
Б. М. Смирнов

Параметры атомов
и атомных
ионов

СПРАВОЧНИК



А.А. Радциг
Б.М. Смирнов

Параметры атомов и атомных ионов

СПРАВОЧНИК

Издание второе, переработанное
и дополненное



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1986

УДК 539.1 (035.5)

Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 344 с.

Приведены параметры волновых функций, массы и пространственности изотопов, энергетические и спектроскопические параметры атомов и ионов, радиационные времена жизни и силы осцилляторов переходов и т. п. Первое издание вышло в 1980 г.

Для научных работников, инженеров, студентов вузов.

Табл. 69. Ил. 52. Библиогр. 214

Рецензент В. И. Коган

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РАДЦИГ
БОРИС МИХАЙЛОВИЧ СМИРНОВ

ПАРАМЕТРЫ АТОМОВ И АТОМНЫХ ИОНОВ

Редактор *О. П. Дунаева*
Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*
Технический редактор *Г. С. Соловьева*
Корректор *З. Б. Драновская*

ИБ № 1265

Сдано в набор 29.05.85. Подписано в печать 05.02.86. Т-03288. Формат 60×90^{1/16}. Бумага кн.-журн. имп. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 21,5. Усл. кр.-отт. 21,5. Уч.-изд. л. 26,19. Тираж 6400 экз. Заказ № 223 Цена 1 р. 70 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	4
Глава 1. Единицы физических величин	5
1.1. Системы единиц физических величин	5
1.2. Фундаментальные физические постоянные	9
1.3. Системы единиц, основанные на «естественных эталонах»	12
1.4. Таблицы переводных множителей	14
Глава 2. Изотопный состав и атомная масса элементов	18
2.1. Стабильные и долгоживущие радиоактивные изотопы	18
2.2. Атомная масса элементов и массы изотопов	40
Глава 3. Строение электронных оболочек атомных частиц	48
3.1. Электронные конфигурации и термы основных состояний атомов	48
3.2. Периодическая система элементов	54
3.3. Параметры волновых функций валентных электронов в атомах, положительных и отрицательных ионах	54
Глава 4. Энергетические параметры атомов	70
4.1. Потенциал ионизации атомов	70
4.2. Энергия связи электронов внутренних оболочек атомов	75
4.3. Квантовые дефекты высоковозбужденных атомных уровней	81
4.4. Тонкое расщепление уровней энергии атомов	86
4.5. Сверхтонкое расщепление уровней энергии атомов	85
4.6. Изотопический сдвиг низколежащих атомных уровней	98
4.7. Поляризуемость и магнитная восприимчивость атомов	104
Глава 5. Энергетические параметры атомных ионов	106
5.1. Потенциал ионизации ионов	106
5.2. Энергия сродства атомов к электрону	116
5.3. Уровни энергии многозарядных ионов	118
Глава 6. Спектроскопические параметры атомов	133
6.1. Низколежащие термы атомов	133
6.2. Диаграммы уровней энергии и спектров атомов	172
6.3. Сила осцилляторов оптических переходов атомов	216
6.4. Радиационное время жизни резонансных состояний атомов	227
6.5. Термы и радиационное время жизни метастабильных состояний атомов	251
6.6. Радиационное время жизни высоковозбужденных состояний атомов	259
Глава 7. Спектроскопические параметры атомных ионов	261
7.1. Низколежащие термы однозарядных положительных ионов	261
7.2. Радиационное время жизни резонансных состояний ионов	294
7.3. Термы и радиационное время жизни метастабильных состояний однозарядных положительных ионов	302
7.4. Излучательные характеристики многозарядных ионов	305
Глава 8. Потенциалы взаимодействия атомных частиц	314
8.1. Постоянные мультипольного взаимодействия атомных частиц	314
8.2. Дальнедействующее обменное взаимодействие атомных частиц	318
8.3. Короткодействующее взаимодействие атомных и молекулярных частиц	319
8.4. Параметры потенциалов ван-дер-ваальсовских молекул	322
Математические приложения	327
П.1. Генееалогические коэффициенты	327
П.2. Коэффициенты Клебша—Гордана	330
Список таблиц	343

ПРЕДИСЛОВИЕ

В справочнике собрана информация о структуре и свойствах атомов и атомных ионов, а также о некоторых параметрах ядер. Сюда вошли данные, которые используются при исследовании элементарных процессов в физике, химии и оптике газов, физике и химии плазмы, физике твердого тела, астрофизике и ряде смежных с ними областей науки и техники. Нашей целью был охват широкого круга характеристик атомных частиц, позволяющий судить о наиболее употребительных количественных параметрах и современных оценках их точности и надежности.

По-существу эта книга представляет собой переработанный вариант первой части «Справочника по атомной и молекулярной физике», вышедшего в Атомиздате в 1980 г. Необходимость новой работы над материалом объяснялась несколькими причинами. Во-первых, за прошедшие годы (рукопись первого издания была в основном подготовлена к концу 1977 г.) появилось много новых данных, которые определили по сути современный облик целых областей исследования в атомной физике. При этом к работе были привлечены многие ранее недоступные нам источники информации. Во-вторых, мы включили в книгу сведения по новым, интенсивно развивающимся направлениям физических исследований, таким, например, как многозарядные ионы, высоковозбужденные и метастабильные атомы и др. Наконец, мы исходили из очевидной потребности многочисленных специалистов физического и физико-технического профилей в простых и информативных справочных руководствах по свойствам атомных систем, наиболее полно исследованных физиками.

Накопленный опыт работы над справочными данными позволил уделить еще большее внимание структурной целостности материала и форме его представления. Это сказалось на изменении содержания отдельных глав книги, многократном увеличении числа информативных диаграмм и графиков, изменении места цитированной литературы, которая следует теперь за вводным текстом к каждому параграфу, так что несмотря на увеличение объема книги материал представлен в удобной для пользования «компактной» форме и не загроможден деталями.

Отметим, что введенное в справочнике деление величин по классам точности имеет следующий вид:

Класс точности	Погрешность определения величины, %
A	<1
B	1—3
C	3—10
D	10—30
E	>30

В том случае, когда такое деление не оговаривается, мы выполняли округление данных по последней приводимой значащей цифре (обычно в пределах ± 1 — ± 2). Вводный текст перед таблицами и графиками служит для объяснения вводимых далее характеристик, а в списки литературы попали лишь наиболее «емкие» публикации, которые, по нашему мнению, отражают современный уровень исследований в данной области физики.

Авторы

ГЛАВА I

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Система единиц образуется совокупностью нескольких условно выбираемых *основных* единиц и всех прочих *производных* единиц, связанных определенными зависимостями с основными единицами физических величин. Из практических соображений целесообразно строить системы с тремя — шестью основными единицами, к которым предъявляются требования сохранения постоянства, возможности проверки, воспроизведения и восстановления при утрате эталона. В табл. 1.1 содержится перечень основных единиц физических величин, установленный в результате ряда международных соглашений [1].

На основе перечисленных единиц и их десятичных долей были построены основные системы единиц: наиболее удобная для физики гауссова или симметричная система единиц СГС (см, г, с); введенная в действие с 1 января 1980 г. в качестве государственного стандарта СССР Международная система единиц СИ (м, кг, с, А, К, кд, моль); техническая система единиц МКГСС (м, кгс, с), включающая в себя только геометрические и механические единицы. В табл. 1.2 приведены обозначения единиц физических величин в упомянутых системах, табл. 1.3 содержит список приставок, употребляемых для образования кратных и дольных единиц величин. Перевод единиц из одной системы в другую осуществляется с помощью формул размерности [2, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Document U. I. P. 20 (1978): Symbols, Units and Nomenclature in Physics. — Physica, 1978, vol. 93A, p. 1—60 (См. пер.: Успехи физ. наук, 1979, т. 129, с. 290).
2. McGraw-Hill Dictionary of Physics and Mathematics/Ed. by D. N. Lapedes. — N. Y.: McGraw-Hill, 1978.
3. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. 2-е изд. — М.: Наука, 1977.

Т а б л и ц а 1.1. Основные единицы физических величин

Величина	Единица (обозначение)	Определение (год введения единицы)	Примечание
Время	Секунда (с)	9192631770,0 периодов излучения атомной частоты (1967 г.)	Радиационный переход в изотопе цезия-133 между сверхтонкими компонентами ($F=4 \rightarrow F=3$) основного состояния $6^2S_{1/2}$
Длина	Метр (м)	Расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды (1983 г.)	
Масса	Килограмм (кг)	Масса международного прототипа килограмма (1901 г.)	Платино-иридиевый прототип международной палаты мер и весов (г. Севр, Франция)

Величина	Единица (обозначение)	Определение (год введения единицы)	Примечание
Сила	Килограмм-сила (кгс)	Вес международного прототипа килограмма (1889 г.)	Для места его хранения в г. Севр (вблизи Парижа), Франция, где нормальное ускорение свободного падения принято равным $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Сила тока	Ампер (А)	Сила постоянного тока, вызывающего наперед заданную силу взаимодействия между двумя отрезками параллельных и прямолинейных проводников с равными токами (1948 г.)	Значение силы взаимодействия составляет $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ на каждом метре длины проводников бесконечно малого кругового сечения, разнесенных на 1 м друг от друга
Температура	Кельвин (К)	$1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды (1967 г.)	Градус по шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) равен градусу по термодинамической шкале (К), и по определению $t = T - 273,15 \text{ К}$, где t — температура по шкале Цельсия; T — термодинамическая температура
Сила света	Кандела (кд)	Сила света, испускаемого абсолютно черным телом (1967 г.)	Площадь излучателя $1/600\,000 \text{ м}^2$, его температура равна температуре затвердевания платины (2042 К) при давлении 101 325 Па (1 атм), направление излучения перпендикулярно поверхности излучателя
Количество вещества	Моль (моль)	Количество вещества, число структурных элементов в котором равно числу атомов в $0,012 \text{ кг } ^{12}\text{C}$ (1971 г.)	Структурные элементы вещества — атомы, молекулы, ионы и др.

Т а б л и ц а 1.2. Обозначения единиц физических величин

Наименование		Обозначение	
русское	международное	русское	международное
ампер	ampere	А	A
ангстрем	angström	Å	Å
атмосфера (норм.)	standard atmosphere	атм	atm
атомная единица массы	(unified) atomic mass unit	а. е. м.	u
бар	bar	бар	bar
барн	barn	б	barn (b)
беккерель	becquerel	Бк	Bq
ватт	watt	Вт	W
вебер	weber	Вб	Wb
вольт	volt	В	V
гаусс	gauss	Гс	G (Cs)
генри	henry	Гн	H
герц	hertz	Гц	Hz
гильберт	gilbert	Гб	Gi
год	year	год (лет)	a
грамм	gram	г	g
грэй	gray	Гр	Gy
децибел	decibel	дБ	dB
джоуль	joule	Дж	J
дина	dyne	дин	dyn
калория	calorie	кал	cal
кандела	candela	кд	cd
кельвин	kelvin	К	K
килограмм	kilogram	кг	kg
кулон	coulomb	Кл	C
кюри	curie	Ки	Ci
литр	litre	л	l
люкс	lux	лк	lx
люмен	lumen	лм	lm
максвелл	maxwell	Мкс	Mx
метр	metre	м	m
миллиметр ртутного столба	mm Hg	мм рт. ст.	mm Hg
минута	minute	мин	min
моль	mole	моль	mol

Наименование		Обозначение	
русское	международное	русское	международное
ньютон	newton	Н	N
ом	ohm	Ом	Ω
паскаль	pascal	Па	Pa
пуаз	poise	П	P
радиан	radian	рад	rad
рентген	röntgen	Р	R
сантиметр	centimetre	см	cm
секунда	second	с	s
сиemens	siemens	См	S
стерадиан	steradian	ср	sr
стокс	stokes	Ст	St
сутки	day	сут	d
таунсенд	townsend	Тд	Td
тесла	tesla	Тл	T
торр	torr	Тор	torr
фарад	farad	Ф	F
час	hour	ч	h
электрон-вольт	electronvolt	эВ	eV
эрг	erg	эрг	erg
эрстед	oersted	Э	Oe

Таблица 1.3. Десятичные приставки для образования кратных и дольных единиц измерения

Наименование		Множитель	Обозначение	
русское	международное		русское	международное
экса	exa	10^{18}	Э	E
пета	peta	10^{15}	П	P
тера	tera	10^{12}	Т	T
гига	giga	10^9	Г	G
мега	mega	10^6	М	M
кило	kilo	10^3	к	k
гекто	hecto	10^2	г	h
дека	deca	10	да	da
деци	deci	10^{-1}	д	d

Наименование		Множитель	Обозначение	
русское	международное		русское	международное
санти	centi	10^{-2}	с	с
милли	milli	10^{-3}	м	м
микро	micro	10^{-6}	мк	μ
нано	nano	10^{-9}	н	п
пико	pico	10^{-12}	п	р
фемто	femto	10^{-15}	ф	f
атто	atto	10^{-18}	а	а

1.2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

В табл. 1.4 представлены числовые значения ряда наиболее широко используемых фундаментальных физических постоянных, выраженные в единицах систем СГС и СИ. Эти значения в основном соответствуют данным бюллетеня CODATA [1], содержащего перечень рекомендуемых согласованных значений постоянных за 1973 г.* Однако нами были учтены и некоторые существенно уточненные значения постоянных Ридберга R_∞ [2], тонкой структуры α^{-1} [3], числа Авогадро N_A [4] и других фундаментальных постоянных [5], а также основанные на них производные единицы. Методика статистического анализа экспериментальных и теоретических данных, относящихся к определению числовых значений фундаментальных физических постоянных, описана в [6].

Число приведенных значащих цифр для рассматриваемых числовых значений фундаментальных постоянных получено в результате такого округления, при котором возможные в дальнейшем уточнения могут изменить лишь последнюю цифру в пределах ± 1 . В последнем столбце табл. 1.4 указаны погрешности современного определения фундаментальных постоянных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recommended consistent values of the fundamental constants, 1973: Report of the CODATA Task Group on fundamental constants, August 1973. — CODATA Bull., December 1973, № 11.
2. Amin S. R., Caldwell C. D., Lichten W. — Phys. Rev. Lett., 1981, vol. 47, p. 1234.
3. Tsui D. C., Gossard A. C., Field B. F. e. a. — Phys. Rev. Lett., 1982, vol. 48, p. 3.
4. Deslattes R. D. The Avogadro constant. — In: Annual Review of Physical Chemistry. Vol. 31/Ed. by B. S. Rabinovitch e. a. — Palo Alto: Ann. Rev. Inc., 1980, p. 435.
5. Cohen E. R. Status of the fundamental constants. — In: Atomic Masses and Fundamental Constants 6/Ed. by J. A. Nolen, Jr., W. Benenson. — N. Y.: Plenum, 1980, p. 525—540; Deslattes R. D. Impact of atomic physics on fundamental constants. — In: Atomic Physics 8/Ed. by I. Lindgren e. a. — N. Y.: Plenum, 1983, p. 23—42.
6. Cohen E. R., Taylor B. N. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1973, vol. 2, p. 663 (см. пер. — В кн.: Квантовая метрология и фундаментальные константы: Пер. с англ./Под ред. Р. Н. Фаустова, В. П. Шелеста. — М.: Мир, 1981, с. 174—350.)

* В СССР действуют официальные таблицы стандартных справочных данных ГСССД 1—76 Фундаментальные физические константы. — М.: Изд-во стандартов, 1976, основанные на данных CODATA. Опубликование новой международной таблицы рекомендованных значений ожидается в 1986—1987 гг.

Т а б л и ц а 1.4. Фундаментальные физические постоянные

Величина	Обозначение, формула	Числовое значение		Погрешность, 10^{-6}
		Мантисса	СГС	СИ
Скорость света в вакууме	c	2,99792458	10^{10} см·с ⁻¹	10^8 м·с ⁻¹
Элементарный заряд	e	1,60219	10^{-20} ед. СГСМ	10^{-19} Кл
Постоянная Планка	h	4,80324	10^{-10} ед. СГСЭ	—
Постоянная Ридберга	$\hbar = h/2\pi$	6,6262	10^{-27} эрг·с	10^{-34} Дж·с
Постоянная тонкой структуры	$R_{\infty} = m_e e^4 / 4\pi\hbar^3 c$	1,05459	10^{-27} эрг·с	10^{-34} Дж·с
Отношение Джозефсона	$\alpha = e^2 / \hbar c$	1,097373151	10^5 см ⁻¹	10^7 м ⁻¹
	$2e/h$	7,297354	10^{-3}	10^{-3}
	$\Phi_0 = h/2e$	1,3703597	10^3	10^2
Квант магнитного потока	$a_0 = \alpha / 4\pi R_{\infty}$	4,83594	—	10^{-4} с ⁻¹ В ⁻¹
Радиус Бора	$\lambda_C = \alpha^2 / 2R_{\infty}$	1,44978	10^{17} ед. СГСЭ·эрг ⁻¹ ·с ⁻¹	—
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = \hbar_C / 2\pi = \alpha a_0$	2,06785	10^{-7} Мкс	10^{-15} Вб
Классический радиус электрона	$r_e = \alpha \lambda_C$	5,291773	10^{-9} см	10^{-11} м
Число Авогадро	N_A	2,426311	10^{-10} см	10^{-12} м
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 10^{-3} N_A^{-1}$	3,861595	10^{-11} см	10^{-13} м
Энергетический эквивалент атомной единицы массы	$E (1 \text{ а. е. м.}) = m_e c^2$	2,817942	10^{-13} см	10^{-15} м
Масса покоя электрона	m_e	6,02210	10^{23} моль ⁻¹	10^{23} моль ⁻¹
Отношение атомной единицы массы к массе электрона	m_H / m_e	1,66055	10^{-24} г	10^{-27} кг
Масса покоя протона	m_p	1,49243	10^{-3} эрг	10^{-10} Дж
Отношение масс протона и электрона	m_p / m_e	931,50 МэВ	—	—
		9,1095	10^{-28} г	10^{-31} кг
		5,48580	10^{-4} а. е. м.	10^{-4} а. е. м.
		1,822887	10^3	10^3
		1,67265	10^{-24} г	10^{-27} кг
		1,0072765	а. е. м.	а. е. м.
		1,8361525	10^3	10^3

Масса покоя нейтрона	m_n	1,67495	10 ⁻²⁴ г	10 ⁻²⁷ кг	5
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	1,0086650	а. е. м.	а. е. м.	0,04
Постоянная Фарадея	$F=eNA$	1,75880	—	10 ¹¹ Кл·кг ⁻¹	3
Квант циркуляции	$h/2m_e$	5,2728	10 ¹⁷ ед. СГСЭ·г ⁻¹	—	3
Магнитная постоянная	μ_0	9,485	—	10 ⁴ Кл·моль ⁻¹	3
Электрическая постоянная	$\epsilon_0=1/\mu_0 c^2$	2,89253	10 ¹⁴ ед. СГСЭ·моль ⁻¹	—	3
g -фактор электрона	$g_e/2=\mu_e/\mu_B$	3,63695	дин·с·г ⁻¹	10 ⁻⁴ Дж·с·кг ⁻¹	2
Магнетон Бора*	$\mu_B=e\hbar/2(c)m_e$	1,2566371	—	10 ⁻⁶ Гн·м ⁻¹	—
Ядерный магнетон*	$\mu_N=e\hbar/2(c)m_p$	8,8541878	—	10 ⁻¹² Ф·м ⁻¹	0,008
Магнитный момент электрона	μ_e	1,00115966	—	—	0,004
Магнитный момент протона	μ_p	9,2741	10 ⁻²¹ эрг·Гс ⁻¹	10 ⁻²⁴ Дж·Тл ⁻¹	4
Отношение магнитных моментов электрона и протона	μ_e/μ_p	5,0508	10 ⁻²⁴ эрг·Гс ⁻¹	10 ⁻²⁷ Дж·Тл ⁻¹	4
Гравитационная постоянная	G	9,2848	10 ⁻²¹ эрг·Гс ⁻¹	10 ⁻²⁴ Дж·Тл ⁻¹	4
Универсальная газовая постоянная	R	1,41062	10 ⁻²³ эрг·Гс ⁻¹	10 ⁻²⁶ Дж·Тл ⁻¹	4
Объем моля идеального газа (при $T_0=0^\circ\text{C}=273,15\text{ К}$ и атмосферном давлении)	$V_m=RT_0/p_0$	6,5821069	10 ²	10 ²	0,010
Число Лошмидта	$L_0=N_A/V_m$	6,67	10 ⁻⁵ дин·см ² ·г ⁻²	10 ⁻¹¹ Н·м ² ·кг ⁻²	600
Постоянная Больцмана	$k=R/N_A$	8,3145	—	Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	20
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma=(\pi^2/60)k^4/h^3c^2$	1,9859	10 ⁴ см ³ ·моль ⁻¹	Кэл·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	20
Первая постоянная излучения	$c_1=2\pi hc^2$	2,2414	—	10 ⁻² м ³ ·моль ⁻¹	20
Вторая постоянная излучения	$c_2=hc/k$	2,6867	10 ¹⁹ см ⁻³	10 ¹³ м ⁻³	20
Ускорение свободного падения: нормальное (г. Севр, Франция)	g_0	1,3807	10 ⁻¹⁶ эрг·К ⁻¹	10 ⁻²³ Дж·К ⁻¹	20
Местное — США	$g(\text{CB})$	5,670	10 ⁻⁵ эрг·с ⁻¹ ·см ⁻² ·К ⁻⁴	10 ⁻⁸ Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴	100
Местное — Великобритания	$g(\text{BFS})$	3,7418	10 ⁻⁵ эрг·см ² ·с ⁻¹	10 ⁻¹⁶ Вт·м ²	5
		1,4388	см·К	10 ⁻² м·К	20
		9,80665	10 ² см·с ⁻²	м·с ⁻²	—
		9,801043	10 ² см·с ⁻²	м·с ⁻²	0,02
		9,811818	10 ² см·с ⁻²	м·с ⁻²	0,02

* В формулах множитель в круглых скобках используется только в системе единиц СГС.

1.3. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ, ОСНОВАННЫЕ НА «ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭТАЛОНАХ»

Для того чтобы избежать появления слишком большого количества числовых множителей в формулах физических законов и определений, относящихся к области атомной физики, прибегают к сокращению числа универсальных постоянных. Этого добиваются, производя сокращение числа основных единиц измерения величин, и тогда многие универсальные постоянные становятся равными либо единице, либо безразмерному постоянному числу. Системы, в которых максимально возможное число универсальных постоянных приравнено единице, называются «естественными системами».

В одной из наиболее употребительных естественных систем — системе Хартри, часто называемой также «системой атомных единиц» — приравнены единице заряд (e) и масса (m_e) электрона и постоянная Планка (\hbar). Переход в формулах к атомным единицам производится формальным приравниванием $e = m_e = \hbar = 1$. Из этих величин можно построить только одну комбинацию с заданной размерностью, которая и является единицей измерения для искомой величины. В этой системе единицей длины служит $\hbar^2/m_e e^2 \approx 0,529 \cdot 10^{-8}$ см, энергии — $m_e c^4/\hbar^2 \approx 27,212$ эВ и т. п.

В квантовой электродинамике удобно использовать систему единиц, в которой приравнены единице постоянные c , m_e и \hbar . Единица энергии в такой системе совпадает с энергией, отвечающей массе покоя электрона $m_e c^2 \approx 8,2 \cdot 10^{-14}$ Дж, единица длины — с комптоновской длиной волны электрона $\lambda_C \approx 3,9 \cdot 10^{-11}$ см и т. д.

Удобство введенных систем единиц состоит в том, что параметры атомных объектов в них по порядку величины не сильно отличаются от единицы и значительно упрощаются основные уравнения теории. В табл. 1.5 и 1.6 включены соответственно атомные единицы и единицы величин, характеризующих релятивистские частицы, причем их числовые значения выражены в обычных единицах систем СГС и СИ.

Таблица 1.5. Система атомных единиц Хартри: $e = m_e = \hbar = 1$

Величина	Обозначение	Числовое значение
Электрический заряд (заряд электрона)	e	$4,8032 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ = $= 1,6022 \cdot 10^{-20}$ ед. СГСМ
Масса (масса электрона)	m_e	$9,1095 \cdot 10^{-28}$ г
Момент количества движения (постоянная Планка/ $/2\pi$)	$\hbar = h/2\pi$	$1,0546 \cdot 10^{-27}$ эрг·с
Длина (радиус Бора)	$a_0 = \hbar^2/m_e e^2$	$5,2918 \cdot 10^{-9}$ см
Скорость	$v_0 = e^2/\hbar$	$2,1877 \cdot 10^8$ см·с ⁻¹
Импульс	$p_0 = m_e e^2/\hbar$	$1,9929 \cdot 10^{-19}$ г·см·с ⁻¹
Энергия	$\varepsilon_0 = m_e c^4/\hbar^2$	$4,3598 \cdot 10^{-11}$ эрг = $= 27,212$ эВ
Время	$\tau_0 = \hbar^3/m_e e^4$	$2,4189 \cdot 10^{-17}$ с
Частота	$\nu_0 = m_e c^4/\hbar^3$	$4,1341 \cdot 10^{16}$ с ⁻¹

Величина	Обозначение	Числовое значение
Напряженность электрического поля	$E_0 = m_e^2 e^5 / \hbar^4$	$1,7153 \cdot 10^7$ ед. СГСЭ \times $\text{см}^{-2} = 5,1422 \cdot 10^9 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$
Потенциал	$\varphi_0 = m_e e^3 / \hbar^2 = e / a_0$	$9,0767 \cdot 10^{-2}$ ед. СГСЭ \times $\text{см}^{-1} = 27,212 \text{ В}$
Магнитный момент	$\mu_m = \hbar^2 / m_e e = 2\mu_B / \alpha$	$2,5418 \cdot 10^{-18}$ эрг $\cdot \text{Гс}^{-1} = 2,5418 \cdot 10^{-21}$ Дж $\cdot \text{Тл}^{-1}$
Дипольный момент	$\mu_0 = e a_0$	$2,5418 \cdot 10^{-18}$ ед. СГСЭ \times $\text{см} = 2,5418 \text{ Д (дебай)}$
Сечение рассеяния	$\sigma_0 = a_0^2$	$2,8003 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$
Объем, поляризуемость	$V_0 (\alpha_0) = a_0^3$	$1,4818 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$
Плотность числа частиц	$n_0 = a_0^{-3}$	$6,7483 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$
Константа скорости парного процесса	$k_0 = e^2 a_0^2 / \hbar = \hbar^3 / m_e^2 e^2$	$6,126 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
Константа скорости тройного процесса	$\mathcal{K}_0 = e^2 a_0^5 / \hbar = \hbar^9 / m_e^5 e^8$	$9,078 \cdot 10^{-34} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$
Плотность тока	$j_0 = e n_0 v_0 = m_e^3 e^9 / \hbar^7$	$7,0911 \cdot 10^{23}$ ед. СГСЭ \times $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} = 2,3653 \times 10^{14} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$

Т а б л и ц а 1.6. Система релятивистских единиц: $c = m_e = \hbar = 1$

Величина	Обозначение	Числовое значение
Электрический заряд	$Q = e / \alpha^{1/2} = (\hbar c)^{1/2}$	$5,6228 \cdot 10^{-9}$ ед. СГСЭ $= 1,8756 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$
Масса (масса электрона)	$m = m_e$	$9,1095 \cdot 10^{-28} \text{ г}$
Момент количества движения (постоянная Планка / 2π)	$\hbar = h / 2\pi$	$1,0546 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}$
Длина	$l = \hbar / m_e c = \lambda_C = \alpha a_0$	$3,8616 \cdot 10^{-11} \text{ см}$
Время	$t = \hbar / m_e c^2$	$1,2881 \cdot 10^{-21} \text{ с}$
Скорость (скорость света)	$v = c$	$2,9979 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Импульс	$p = m_e c$	$2,7310 \cdot 10^{-17} \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-1}$

Величина	Обозначение	Числовое значение
Энергия	$\varepsilon = m_e c^2$	$8,1872 \cdot 10^{-7}$ эрг = $= 8,1872 \cdot 10^{-14}$ Дж = $= 5,1100 \cdot 10^6$ эВ
Ускорение	$a = m_e c^3 / \hbar$	$2,3274 \cdot 10^{31}$ см·с ⁻²
Частота	$\nu = m_e c^2 / \hbar$	$7,7634 \cdot 10^{20}$ с ⁻¹
Сила	$F = m_e^2 c^3 / \hbar$	$2,1202 \cdot 10^4$ дин = 0,21202 Н
Дипольный момент	$\mu = \hbar^{3/2} / m_e c^{1/2}$	$2,1713 \cdot 10^{-19}$ ед. СГСЭ × × _{см} = 0,21713 Д (дебай)
Напряженность электрического поля	$E = m_e^2 c^{5/2} / \hbar^{3/2}$	$3,7706 \cdot 10^{12}$ ед. СГСЭ × × _{см} ⁻² = $1,1304 \cdot 10^{15}$ В·см ⁻¹
Потенциал	$\varphi = m_e c^{3/2} / \hbar^{1/2} = e / \kappa_C \alpha^{1/2}$	$1,4561 \cdot 10^2$ ед. СГСЭ × × _{см} ⁻¹ = $4,3652 \cdot 10^4$ В
Магнитный момент	$p_M = \hbar^{3/2} / m_e c^{1/2} = 2\mu_B / \alpha^{1/2}$	$2,1713 \cdot 10^{-19}$ эрг·Гс ⁻¹ = $= 2,1713 \cdot 10^{-22}$ Дж·Тл ⁻¹
Сечение рассеяния	$\sigma = \hbar^2 / m_e^2 c^2 = \lambda_C^2 = \alpha^2 a_0^2$	$1,4912 \cdot 10^{-21}$ см ²
Объем, поляризуемость	$V = \hbar^3 / m_e^3 c^3 = \lambda_C^3 = \alpha^3 a_0^3$	$5,7584 \cdot 10^{-32}$ см ³
Плотность числа частиц	$n = m_e^3 c^3 / \hbar^3 = \lambda_C^{-3}$	$1,7366 \cdot 10^{31}$ см ⁻³
Плотность тока	$j = m_e^3 c^{9/2} / \hbar^{5/2}$	$2,9273 \cdot 10^{33}$ ед. СГСЭ × × _{см} ⁻² ·с ⁻¹ = $9,7644 \cdot 10^{23}$ А·см ⁻²

1.4. ТАБЛИЦЫ ПЕРЕВОДНЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ

В целях облегчения практических расчетов удобно пользоваться таблицами перевода одних единиц какой-либо величины в другие единицы. В табл. 1.7 включены некоторые распространенные внесистемные единицы, выраженные через единицы СИ. Таблицы 1.8—1.11 содержат переводные множители для единиц энергии, мощности, давления и сечения рассеяния частиц. Слева в таких таблицах расположены единицы, которые нужно выразить в других единицах, а сверху — единицы, через которые они должны быть выражены. При составлении переводных таблиц использовались соотношения, основанные прямо или косвенно на эксперименте, определяющие соотношения (частично из табл. 1.7) и расчеты на основе формул размерности [1]. Числовые значения переводных множителей даны с таким числом знаков, чтобы при возможном их уточнении изменение произошло не более чем на единицу в последней значащей цифре. Все значения приведены в системах единиц, употребительных в атомной физике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McGraw-Hill Dictionary of Physics and Mathematics/Ed. by D. N. Lapedes. — N. Y.: McGraw-Hill, 1978.

Т а б л и ц а 1.7. Некоторые распространенные единицы, выраженные через единицы СИ

Величина	Наименование единицы измерения	Символ		Числовое значение в системе СИ
		русский	международный	
Длина	Дюйм	дюйм	in	0,0254 м
	Фут	фут	ft	0,3048 м
Масса	Ангстрем	А	Å	10^{-10} м = 0,1 нм = 10^{-8} см
	Фунт	фунт	lb	0,45359237 кг
Сила	Килограмм-сила	кгс	kgf	9,80665 Н
Энергия	Международная калория	кал	cal _{IT}	4,1868 Дж
	Термохимическая калория	кал (термохим.)	cal _{th}	4,184 Дж
	Британская тепловая единица	БТЕ	Btu _{IT}	1055,05585262 Дж
	Градус Ренкина	°R	°R	(9/5) K
	Градус Цельсия	°C	°C	t (°C) = T (K) - 273,15
Термодинамическая температура (Т) Обычная температура (t)	Градус Фаренгейта	°F	°F	t (°F) = T (°R) - 459,67
	Градус Реомюра	°R	°R	t (°R) = $\frac{4}{5} [T$ (K) - 273,15] =
				$= \frac{4}{5} T$ (K) - 218,52 = $\frac{4}{5} t$ (°C)
				13595,1 кг·м·м ⁻³
Плотность	Нормальная плотность ртути	ρ _{Hg}	ρ _{Hg}	101325 Па
	Атмосфера нормальная	атм	атм	(101 325/760) Па = 133,322368 Па
Давление	Тор	тор	Torr (mm Hg)	(13,5951·9,80665) Па =
	Нормальный миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	mmHg	= 133,322387 Па
	ед. CGCЭ	ед. CGCЭ	e. s. u.	(10/c) Кл = 3,33564·10 ⁻¹⁰ Кл
	ед. CGCЭ/см	ед. CGCЭ/см	ед. CGCЭ/см	(10 ⁻⁸ c) В = 2,99792458·10 ³ В
Заряд				
Потенциал				

Т а б л и ц а 1.8. Переводные множители для единиц энергии

Единица измерения	эВ	Дж	эрг	ккал/моль	см ⁻¹	кельвин	а. е.	ридберг	МГц
1 эВ	1	1,6022 · 10 ⁻¹⁹	1,6022 · 10 ⁻¹²	23,045	8065,48	11 604	3,6749 · 10 ⁻²	7,3498 · 10 ⁻²	2,4180 · 10 ⁸
1 Дж	6,2415 · 10 ¹⁸	1	10 ⁷	1,4384 · 10 ²⁰	5,0340 · 10 ²²	7,2430 · 10 ²²	2,2937 · 10 ¹⁷	4,5873 · 10 ¹⁷	1,5092 · 10 ²⁷
1 эрг	6,2415 · 10 ¹¹	10 ⁻⁷	1	1,4384 · 10 ¹³	5,0340 · 10 ¹⁵	7,2430 · 10 ¹⁵	2,2937 · 10 ¹⁰	4,5873 · 10 ¹⁰	1,5092 · 10 ²⁰
1 ккал/моль	4,3393 · 10 ⁻²	6,9524 · 10 ⁻²¹	6,9524 · 10 ⁻¹⁴	1	3,4959 · 10 ²	5,0356 · 10 ³	1,5946 · 10 ⁻³	3,1893 · 10 ⁻³	1,0492 · 10 ⁷
1 см ⁻¹	1,23985 · 10 ⁻⁴	1,9865 · 10 ⁻²³	1,9865 · 10 ⁻¹⁶	2,8573 · 10 ⁻³	1	1,4388	4,5563 · 10 ⁻⁶	9,1127 · 10 ⁻⁶	2,9979 · 10 ⁴
1 К	8,617 · 10 ⁻⁵	1,3807 · 10 ⁻²³	1,3807 · 10 ⁻¹⁶	1,9859 · 10 ⁻³	6,9502 · 10 ⁻¹	1	3,1668 · 10 ⁻⁶	6,3335 · 10 ⁻⁶	2,0836 · 10 ⁴
1 а. е.	27,2116	4,3598 · 10 ⁻¹⁸	4,3598 · 10 ⁻¹¹	6,2709 · 10 ²	2,1947 · 10 ⁵	3,1578 · 10 ⁵	1	2	6,5797 · 10 ⁹
1 Ру	13,606	2,1799 · 10 ⁻¹⁸	2,1799 · 10 ⁻¹¹	3,1355 · 10 ²	1,0974 · 10 ⁵	1,5789 · 10 ⁵	0,5	1	3,2898 · 10 ⁹
1 МГц	4,1357 · 10 ⁻⁹	6,6262 · 10 ⁻²⁸	6,6262 · 10 ⁻²¹	9,5308 · 10 ⁻⁸	3,3356 · 10 ⁻⁵	4,7993 · 10 ⁻⁵	1,5198 · 10 ⁻¹⁰	3,0397 · 10 ⁻¹⁰	1

Т а б л и ц а 1.9. Переводные множители для единиц мощности

Единица измерения	эрг · с ⁻¹	Вт	кВт	кгс · м · с ⁻¹	кал · с ⁻¹	ккал · ч ⁻¹	БТЕ · с ⁻¹
1 эрг · с ⁻¹	1	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰	1,0197 · 10 ⁻⁸	2,3885 · 10 ⁻⁸	8,5985 · 10 ⁻⁸	9,4782 · 10 ⁻¹¹
1 Вт	10 ⁷	1	10 ⁻³	0,1020	0,2388	0,8598	9,4782 · 10 ⁻⁴
1 кВт	10 ¹⁰	10 ³	1	1,0197 · 10 ²	2,3885 · 10 ²	8,5985 · 10 ²	0,9478
1 кгс · м · с ⁻¹	9,80665 · 10 ⁷	9,80665	9,80665 · 10 ⁻³	1	2,3423	8,4322	9,2949 · 10 ⁻³
1 кал · с ⁻¹	4,1868 · 10 ⁷	4,1868	4,1868 · 10 ⁻³	0,4269	1	3,6	3,9683 · 10 ⁻³
1 ккал · ч ⁻¹	1,1630 · 10 ⁷	1,1630	1,1630 · 10 ⁻³	0,1186	0,2778	1	1,1023 · 10 ⁻³
1 БТЕ · с ⁻¹	1,0551 · 10 ¹⁰	1,0551 · 10 ³	1,0551	107,59	252,00	907,185	1

Т а б л и ц а 1.10. Переводные множители для единиц давления

Единица измерения	дин·см ⁻²	Н·м ⁻²	кгс·м ⁻²	кгс·см ⁻²	атм	мм рт. ст.
1 дин·см ⁻²	1	0,1	1,0197·10 ⁻²	1,0197·10 ⁻⁶	9,8693·10 ⁻⁷	7,5007·10 ⁻⁴
1 Н·м ⁻²	10	1	1,0197·10 ⁻¹	1,0197·10 ⁻⁵	9,8693·10 ⁻⁶	7,5007·10 ⁻³
1 кгс·м ⁻²	9,807·10 ¹	9,807	1	10 ⁻⁴	9,6785·10 ⁻⁵	7,3556·10 ⁻²
1 кгс·см ⁻²	9,807·10 ⁶	9,807·10 ⁴	10 ⁴	1	9,6785·10 ⁻¹	7,3556·10 ²
1 атм	1,01325·10 ⁶	1,01325·10 ⁵	1,0332·10 ⁴	1,0332	1	760
1 мм рт. ст. (Тор)	1,3332·10 ³	1,3332·10 ²	13,595	1,3595·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	1

Т а б л и ц а 1.11. Переводные множители для единиц эффективного поперечного сечения рассеяния

Единица измерения	см ²	Å ²	а ₀ ²	πa ₀ ²	барн
1 см ²	1	10 ¹⁶	3,5711·10 ¹⁶	1,1367·10 ¹⁶	10 ²⁴
1 Å ²	10 ⁻¹⁶	1	3,5711	1,1367	10 ⁸
1 а ₀ ²	2,8003·10 ⁻¹⁷	2,8003·10 ⁻¹	1	3,1831·10 ⁻¹	2,8003·10 ⁷
1 πa ₀ ²	8,7973·10 ⁻¹⁷	8,7973·10 ⁻¹	3,1416	1	8,7973·10 ⁷
1 б	10 ⁻²⁴	10 ⁻⁸	3,5711·10 ⁻⁸	1,1367·10 ⁻⁸	1

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И АТОМНАЯ МАССА ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. СТАБИЛЬНЫЕ И ДОЛГОЖИВУЩИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ

В табл. 2.1, 2.2 представлены параметры ядер элементов с различным изотопным составом. В зависимости от строения ядра всех изотопов можно разбить на три группы [1]:

1. Четно-четные ядра, состоящие из четного числа протонов Z и четного числа нейтронов N (напомним принятое обозначение изотопов элемента $X: {}^A_ZX_N$, здесь массовое число $A=Z+N$). Механические, магнитные и квадрупольные моменты у таких ядер равны нулю.

2. Четно-нечетные ядра с четным Z и нечетным N , а также нечетно-четные ядра с нечетным Z и четным N . Спины таких ядер принимают полуцелые значения от $1/2$ до $9/2$, а магнитные и квадрупольные моменты лежат в диапазоне, охватывающем как положительные, так и отрицательные значения. Для ядер со спином $i=1/2$ квадрупольный момент равен нулю.

3. Нечетно-нечетные ядра с нечетными значениями Z и N . Спины этих ядер принимают целые значения от 1 до 7, а магнитные и квадрупольные моменты отличны от нуля, причем квадрупольные моменты, как правило, малы.

В табл. 2.1 включены данные о стабильных изотопах — их распространенность, спин ядра и четность основного состояния, магнитный момент, который выражен в единицах ядерных магнетонов $\mu_N=5,0508 \cdot 10^{-27}$ Дж·Тл⁻¹.

В табл. 2.2 даны характеристики ядер радиоактивных изотопов в основном состоянии, период полураспада $T_{1/2}$ которых превышает период полураспада нейтрона ($\sim 10,6$ мин). Каналы распада радиоактивных изотопов обозначены следующим образом: β^- — бета-распад с вылетом электрона; β^+ — бета-распад с вылетом позитрона; α — распад с вылетом α -частицы (т. е. ядра иона гелия He^{2+}); EC — захват ядром электрона с внутренней электронной оболочки; sf — спонтанное деление ядра. При наличии двух каналов распада первым указывается более эффективный канал.

Представленная информация взята из [2—6] и дополнена данными, полученными в немногочисленных более поздних публикациях. Погрешность определения рассмотренных величин учтена при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней цифры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конферман Г. Ядерные моменты: Пер. с нем. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Isotopic compositions of the elements — 1983/Prepared for publication by N. E. Holden, R. L. Martin, I. L. Barnes. — Pure Appl. Chem., 1984, vol. 56, p. 675—694.
3. Tables of isotopes/Ed. by C. M. Lederer, V. S. Shirley, 7th ed. — N. Y.: Wiley, 1978.
4. Fuller G. H. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1976, vol. 5, p. 835; Fuller G. H., Cohen V. W. — Nuclear Data Tabl., 1969, vol. A5, p. 433.
5. Blachot J., Fiche Ch. Tableau des isotopes radioactifs et des principaux rayonnements émis. — Ann. Phys. (Fr.), 1981, suppl. to vol. 6, p. 3—218.
6. Heath R. L. Table of the isotopes. — In: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 62nd ed./Ed. by R. C. Weast. — Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1981, Sect. B, p. B255—B339.

Т а б л и ц а 2.1. Параметры стабильных изотопов

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
1	^1H	99,985	1/2+	2,79285
	^2H	0,015	1+	0,85744
2	^3He	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1/2+	-2,12762
	^4He	≈ 100	0+	0
3	^6Li	7,5	1+	0,82205
	^7Li	92,5	3/2-	3,2564
4	^9Be	100	3/2-	-1,178
5	^{10}B	19,9	3+	1,8006
	^{11}B	80,1	3/2-	2,6886
6	^{12}C	98,9	0+	0
	^{13}C	1,1	1/2-	0,7024
7	^{14}N	99,63	1+	0,40376
	^{15}N	0,37	1/2-	-0,2832
8	^{16}O	99,76	0+	0
	^{17}O	0,04	5/2+	-1,8938
	^{18}O	0,20	0+	0
9	^{19}F	100	1/2+	2,6289
10	^{20}Ne	90,5	0+	0
	^{21}Ne	0,27	3/2+	-0,6618
	^{22}Ne	9,2	0+	0
11	^{23}Na	100	3/2+	2,2175
12	^{24}Mg	79,0	0+	0
	^{25}Mg	10,00	5/2+	-0,8554
	^{26}Mg	11,01	0+	0
13	^{27}Al	100	5/2+	3,6415
14	^{28}Si	92,23	0+	0
	^{29}Si	4,67	1/2+	-0,5553
	^{30}Si	3,10	0+	0
15	^{31}P	100	1/2+	1,1316
16	^{32}S	95,0	0+	0
	^{33}S	0,75	3/2+	0,644
	^{34}S	4,2	0+	0
	^{36}S	0,02	0+	0
17	^{35}Cl	75,8	3/2+	0,82187
	^{37}Cl	24,2	3/2+	0,68412
18	^{36}Ar	0,337	0+	0
	^{38}Ar	0,063	0+	0
	^{40}Ar	99,60	0+	0
19	^{39}K	93,26	3/2+	0,3915
	^{40}K	0,0117	4-	-1,298
	^{41}K	6,73	3/2+	0,215
20	^{40}Ca	96,94	0+	0
	^{42}Ca	0,647	0+	0
	^{43}Ca	0,135	7/2-	-1,317
	^{44}Ca	2,09	0+	0
	^{46}Ca	$4 \cdot 10^{-3}$	0+	0
	^{48}Ca	0,187	0+	0
21	^{45}Sc	100	7/2-	4,756
22	^{46}Ti	8,0	0+	0
	^{47}Ti	7,3	5/2-	-0,7885
	^{48}Ti	73,8	0+	0
	^{49}Ti	5,5	7/2-	-1,1042
	^{50}Ti	5,4	0+	0

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
23	⁵⁰ V	0,250	6+	3,3475
	⁵¹ V	99,750	7/2—	5,151
24	⁵⁰ Cr	4,35	0+	0
	⁵² Cr	83,79	0+	0
	⁵³ Cr	9,50	3/2—	—0,47
	⁵⁴ Cr	2,36	0+	0
	⁵⁵ Mn	100	5/2—	3,47
26	⁵⁴ Fe	5,8	0+	0
	⁵⁶ Fe	92	0+	0
	⁵⁷ Fe	2,2	1/2—	0,0907
	⁵⁸ Fe	0,28	0+	0
27	⁵⁹ Co	100	7/2—	4,6
28	⁵⁸ Ni	68,27	0+	0
	⁶⁰ Ni	26,10	0+	0
	⁶¹ Ni	1,13	3/2—	—0,750
	⁶² Ni	3,59	0+	0
	⁶⁴ Ni	0,91	0+	0
	⁶³ Cu	69,17	3/2—	2,22
29	⁶⁵ Cu	30,83	3/2—	2,38
30	⁶⁴ Zn	48,6	0+	0
	⁶⁶ Zn	27,9	0+	0
	⁶⁷ Zn	4,1	5/2—	0,876
	⁶⁸ Zn	19	0+	0
	⁷⁰ Zn	0,6	0+	0
31	⁶⁹ Ga	60,1	3/2—	2,017
	⁷¹ Ga	39,9	3/2—	2,562
32	⁷⁰ Ge	20	0+	0
	⁷² Ge	27	0+	0
	⁷³ Ge	7,8	9/2+	—0,8795
	⁷⁴ Ge	36	0+	0
	⁷⁶ Ge	7,8	0+	0
	⁷⁵ As	100	3/2—	1,439
34	⁷⁴ Se	0,9	0+	0
	⁷⁶ Se	9,0	0+	0
	⁷⁷ Se	7,6	1/2—	0,534
	⁷⁸ Se	24	0+	0
	⁸⁰ Se	50	0+	0
	⁸² Se	9	0+	0
35	⁷⁹ Br	50,7	3/2—	2,1064
	⁸¹ Br	49,3	3/2—	2,271
36	⁷⁸ Kr	0,35	0+	0
	⁸⁰ Kr	2,25	0+	0
	⁸² Kr	11,6	0+	0
	⁸³ Kr	11,5	9/2+	—0,9707
	⁸⁴ Kr	57	0+	0
	⁸⁶ Kr	17,3	0+	0
37	⁸⁵ Rb	72,17	5/2—	1,353
	⁸⁷ Rb	27,83	3/2—	2,751
38	⁸⁴ Sr	0,56	0+	0
	⁸⁶ Sr	9,86	0+	0
	⁸⁷ Sr	7,00	9/2+	—1,093
	⁸⁸ Sr	82,58	0+	0
39	⁸⁹ Y	100	1/2—	—0,1374

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
40	^{90}Zr	51,45	0+	0
	^{91}Zr	11,22	5/2+	-1,304
	^{92}Zr	17,15	0+	0
	^{94}Zr	17,38	0+	0
	^{96}Zr	2,80	0+	0
41	^{93}Nb	100	9/2+	6,17
42	^{92}Mo	14,8	0+	0
	^{94}Mo	9,25	0+	0
	^{95}Mo	15,9	5/2+	-0,914
	^{96}Mo	16,7	0+	0
	^{97}Mo	9,55	5/2+	-0,933
	^{98}Mo	24,1	0+	0
	^{100}Mo	9,63	0+	0
	^{96}Ru	5,5	0+	0
44	^{98}Ru	1,9	0+	0
	^{99}Ru	12,7	5/2+	-0,64
	^{100}Ru	12,6	0+	0
	^{101}Ru	17,0	5/2+	-0,72
	^{102}Ru	31,6	0+	0
	^{104}Ru	18,7	0+	0
	^{103}Rh	100	1/2-	-0,088
	^{102}Pd	1,02	0+	0
46	^{104}Pd	11,1	0+	0
	^{105}Pd	22,3	5/2+	-0,642
	^{106}Pd	27,3	0+	0
	^{108}Pd	26,5	0+	0
	^{110}Pd	11,7	0+	0
	^{107}Ag	51,84	1/2-	-0,1137
47	^{109}Ag	48,16	1/2-	-0,1307
	^{106}Cd	1,25	0+	0
48	^{108}Cd	0,89	0+	0
	^{110}Cd	12,5	0+	0
	^{111}Cd	12,8	1/2+	-0,595
	^{112}Cd	24,1	0+	0
	^{113}Cd	12,2	1/2+	0,622
	^{114}Cd	28,7	0+	0
	^{116}Cd	7,5	0+	0
	^{113}In	4,3	9/2+	5,53
49	^{115}In	95,7	9/2+	5,54
50	^{112}Sn	0,97	0+	0
	^{114}Sn	0,65	0+	0
	^{115}Sn	0,36	1/2+	-0,919
	^{116}Sn	14,5	0+	0
	^{117}Sn	7,7	1/2+	-1,001
	^{118}Sn	24,2	0+	0
	^{119}Sn	8,6	1/2+	-1,047
	^{120}Sn	32,6	0+	0
	^{122}Sn	4,6	0+	0
	^{124}Sn	5,8	0+	0
51	^{121}Sb	57	5/2+	3,36
	^{123}Sb	43	7/2+	2,55
52	^{120}Te	0,096	0+	0
	^{122}Te	2,60	0+	0
	^{123}Te	0,91	1/2+	-0,736

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
53	^{124}Te	4,82	0+	0
	^{125}Te	7,14	1/2+	-0,887
	^{126}Te	18,95	0+	0
	^{128}Te	31,69	0+	0
	^{130}Te	33,80	0+	0
	^{127}I	100	5/2+	2,81
	^{124}Xe	0,10	0+	0
	^{126}Xe	0,09	0+	0
	^{128}Xe	1,9	0+	0
	^{129}Xe	26	1/2+	-0,778
	^{130}Xe	4,1	0+	0
	^{131}Xe	21	3/2+	0,692
	^{132}Xe	27	0+	0
	^{134}Xe	10,4	0+	0
54	^{136}Xe	8,9	0+	0
	^{133}Cs	100	7/2+	2,582
55	^{130}Ba	0,106	0+	0
	^{132}Ba	0,101	0+	0
	^{134}Ba	2,42	0+	0
	^{135}Ba	6,59	3/2+	0,838
	^{136}Ba	7,9	0+	0
	^{137}Ba	11,2	3/2+	0,937
	^{138}Ba	71,7	0+	0
	^{138}La	0,09	5+	3,70
57	^{139}La	99,91	7/2+	2,78
	^{136}Ce	0,19	0+	0
	^{138}Ce	0,25	0+	0
58	^{140}Ce	88,5	0+	0
	^{142}Ce	11,1	0+	0
	^{141}Pr	100	5/2+	4,1
	^{142}Nd	27,1	0+	0
59	^{143}Nd	12,2	7/2-	-1,06
	^{144}Nd	23,8	0+	0
	^{145}Nd	8,3	7/2-	-0,66
	^{146}Nd	17,2	0+	0
	^{148}Nd	5,76	0+	0
	^{150}Nd	5,64	0+	0
	^{144}Sm	3,1	0+	0
	^{147}Sm	15,0	7/2-	-0,81
60	^{148}Sm	11,3	0+	0
	^{149}Sm	13,8	7/2-	-0,67
	^{150}Sm	7,4	0+	0
	^{152}Sm	26,7	0+	0
	^{154}Sm	22,7	0+	0
	^{151}Eu	48	5/2+	3,47
63	^{153}Eu	52	5/2+	1,53
	^{152}Gd	0,20	0+	0
	^{154}Gd	2,18	0+	0
64	^{155}Gd	14,8	3/2-	-0,26
	^{156}Gd	20,5	0+	0
	^{157}Gd	15,6	3/2-	-0,34
	^{158}Gd	24,8	0+	0
	^{160}Gd	21,9	0+	0
	^{159}Tb	100	3/2+	2,01

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
66	¹⁵⁶ Dy	0,06	0+	0
	¹⁵⁸ Dy	0,10	0+	0
	¹⁶⁰ Dy	2,3	0+	0
	¹⁶¹ Dy	18,9	5/2+	-0,48
	¹⁶² Dy	25,5	0+	0
	¹⁶³ Dy	24,9	5/2-	0,67
	¹⁶⁴ Dy	28,2	0+	0
67	¹⁶⁵ Ho	100	7/2-	4,17
68	¹⁶² Er	0,14	0+	0
	¹⁶⁴ Er	1,61	0+	0
	¹⁶⁶ Er	33,6	0+	0
	¹⁶⁷ Er	22,9	7/2+	-0,57
	¹⁶⁸ Er	26,8	0+	0
	¹⁷⁰ Er	14,9	0+	0
	¹⁶⁹ Tm	100	1/2+	-0,23
70	¹⁶⁸ Yb	0,13	0+	0
	¹⁷⁰ Yb	3,1	0+	0
	¹⁷¹ Yb	14,3	1/2-	0,49
	¹⁷² Yb	21,9	0+	0
	¹⁷³ Yb	16,1	5/2-	-0,68
	¹⁷⁴ Yb	32	0+	0
	¹⁷⁶ Yb	12,7	0+	0
	¹⁷⁵ Lu	97,41	7/2+	2,23
71	¹⁷⁶ Lu	2,59	7-	3,2
	¹⁷⁴ Hf	0,162	0+	0
	¹⁷⁶ Hf	5,21	0+	0
	¹⁷⁷ Hf	18,61	7/2-	0,784
	¹⁷⁸ Hf	27,30	0+	0
	¹⁷⁹ Hf	13,63	9/2+	-0,633
	¹⁸⁰ Hf	35,10	0+	0
	¹⁸⁰ Ta	0,012	8+	0
73	¹⁸¹ Ta	99,988	7/2+	2,4
	¹⁸⁰ W	0,1	0+	0
	¹⁸² W	26,3	0+	0
	¹⁸³ W	14,3	1/2-	0,118
	¹⁸⁴ W	30,7	0+	0
	¹⁸⁶ W	28,6	0+	0
	¹⁸⁵ Re	37,40	5/2+	3,19
	¹⁸⁷ Re	62,60	5/2+	3,22
75	¹⁸⁴ Os	0,02	0+	0
	¹⁸⁶ Os	1,6	0+	0
	¹⁸⁷ Os	1,6	1/2-	0,065
	¹⁸⁸ Os	13,3	0+	0
	¹⁸⁹ Os	16	3/2-	0,7
	¹⁹⁰ Os	26	0+	0
	¹⁹² Os	41	0+	0
	¹⁹¹ Ir	37	3/2+	0,15
77	¹⁹³ Ir	63	3/2+	0,16
	¹⁹⁰ Pt	0,01	0+	0
	¹⁹² Pt	0,8	0+	0
	¹⁹⁴ Pt	33	0+	0
	¹⁹⁵ Pt	34	1/2-	0,61
	¹⁹⁶ Pt	25	0+	0
	¹⁹⁸ Pt	7,2	0+	0
	¹⁹⁸ Pt		0+	0

Атомный номер Z	Изотоп	Распространен- ность, %	Спин ядра i и четность	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N
79	^{197}Au	100	$3/2+$	0,146
80	^{196}Hg	0,1	$0+$	0
	^{198}Hg	10,0	$0+$	0
	^{199}Hg	16,8	$1/2-$	0,506
	^{200}Hg	23,1	$0+$	0
	^{201}Hg	13,2	$3/2-$	-0,560
	^{202}Hg	29,8	$0+$	0
	^{204}Hg	6,8	$0+$	0
81	^{203}Tl	29,52	$1/2+$	1,62
	^{205}Tl	70,48	$1/2+$	1,64
82	^{204}Pb	1,4	$0+$	0
	^{206}Pb	24,1	$0+$	0
	^{207}Pb	22,1	$1/2-$	0,59
	^{208}Pb	52,4	$0+$	0
83	^{209}Bi	100	$9/2-$	4,1
90	$^{232}\text{Th}^a$	100	$0+$	0
91	$^{231}\text{Pa}^b$	100	$3/2-$	2,0
92	$^{234}\text{U}^c$	0,005	$0+$	0
	$^{235}\text{U}^d$	0,720	$7/2-$	-0,35
	$^{238}\text{U}^e$	99,275	$0+$	0

Примечание. $^a T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет; $^b T_{1/2} = 3,3 \cdot 10^4$ лет; $^c T_{1/2} = 2,4 \cdot 10^5$ лет; $^d T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$ лет; $^e T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет.

Таблица 2.2. Параметры долгоживущих радиоактивных изотопов

Атомный номер Z	Символ и массо- вое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в еди- ницах ядер- ных магнето- нов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
0	n	$1/2+$	-1,9130	10,6 мин	$\beta-$
1	^3H	$1/2+$	2,979	12,3 года	$\beta-$
4	^7Be	$3/2-$	—	53,4 сут	EC
	^{10}Be	$0+$	0	$1,6 \cdot 10^6$ лет	$\beta-$
6	^{12}C	$3/2-$	1,0	20,4 мин	$\beta+, EC$
	^{14}C	$0+$	0	5730 лет	$\beta-$
7	^{11}N	$1/2+$	—	10,2 мин	$\beta-$
	^{13}N	$1/2-$	$\pm 0,322$	9,96 мин	$\beta+$
9	^{18}F	$1+$	0,8	1,83 ч	$\beta+, EC$
11	^{22}Na	$3+$	1,75	2,60 года	$\beta+, EC$
	^{24}Na	$4+$	1,69	15,02 ч	$\beta-$
12	^{28}Mg	$0+$	0	21,1 ч	$\beta-$
13	^{26}Al	$5+$	2,8	$7,2 \cdot 10^5$ лет	$\beta+, EC$
14	^{31}Si	$3/2+$	—	2,62 ч	$\beta-$
	^{32}Si	$0+$	0	330 лет	$\beta-$
15	^{32}P	$1+$	-0,252	14,4 сут	$\beta-$
	^{33}P	$1/2+$	—	25,3 сут	$\beta-$
16	^{35}S	$3/2+$	1,0	87,2 сут	$\beta-$
	^{38}S	$0+$	0	2,84 ч	$\beta-$

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
17	^{36}Cl	2+	1,285	$3,0 \cdot 10^5$ лет	β^- , EC, β^+
	^{38}Cl	2—	2,0	0,62 ч	β^-
	^{39}Cl	3/2+	—	0,93 ч	β^-
18	^{37}Ar	3/2+	0,9	35 сут	EC
	^{39}Ar	7/2—	—1,3	269 лет	β^-
	^{41}Ar	7/2—	—	1,83 ч	β^-
	^{42}Ar	0+	0	33 года	β^-
19	^{44}Ar	0+	0	0,20 ч	β^-
	^{40}K	4—	—1,30	$1,3 \cdot 10^9$ лет	β^- , EC, β^+
	^{42}K	2—	—1,14	12,4 ч	β^-
	^{43}K	3/2+	$\pm 0,16$	22,3 ч	β^-
	^{44}K	2—	—	0,37 ч	β^-
20	^{45}K	3/2+	$\pm 0,17$	0,3 ч	β^-
	^{41}Ca	7/2—	—1,595	$1,4 \cdot 10^5$ лет	EC
	^{45}Ca	7/2—	—	164 сут	β^-
	^{47}Ca	7/2—	—	4,54 сут	β^-
	^{48}Ca	0+	0	$2,0 \cdot 10^{16}$ лет	β^-
21	^{43}Sc	7/2—	4,6	3,9 ч	β^+ , EC
	^{44}Sc	2+	2,6	3,93 ч	β^+ , EC
	^{46}Sc	4+	3,0	84 сут	β^-
	^{47}Sc	7/2—	5,3	3,4 сут	β^-
	^{48}Sc	6+	—	44 ч	β^-
22	^{49}Sc	7/2—	—	0,96 ч	β^-
	^{44}Ti	0+	0	47 лет	EC
	^{45}Ti	7/2—	0,09	3,1 ч	β^+ , EC
23	^{47}V	3/2—	—	0,54 ч	β^+ , EC
	^{48}V	4+	$\pm 1,6$	16 сут	EC, β^+
	^{49}V	7/2—	$\pm 4,5$	0,90 года	EC
	^{50}V	6+	3,347	$4 \cdot 10^{16}$ лет	—
24	^{46}Cr	0+	0	23,0 ч	EC
	^{49}Cr	5/2—	$\pm 0,48$	0,70 ч	β^+ , EC
	^{51}Cr	7/2—	$\pm 0,93$	27,70 сут	EC
25	^{51}Mn	5/2—	$\pm 3,57$	0,77 ч	β^+ , EC
	^{52}Mn	6+	3,06	5,6 сут	EC, β^+
	^{53}Mn	7/2—	$\pm 5,02$	$3,7 \cdot 10^6$ лет	EC
	^{54}Mn	3+	—	312 сут	EC
	^{56}Mn	3+	3,23	2,58 ч	β^-
26	^{52}Fe	0+	0	8,3 ч	β^+ , EC
	^{55}Fe	3/2—	—	2,7 года	EC
	^{59}Fe	3/2—	$\pm 1,1$	44,5 сут	β^-
	^{60}Fe	0+	0	$3,0 \cdot 10^5$ лет	β^-
27	^{55}Co	7/2—	$\pm 4,5$	17,5 ч	β^+ , EC
	^{56}Co	4+	3,83	79 сут	EC, β^+
	^{57}Co	7/2—	4,72	271 сут	EC
	^{58}Co	2+	4,04	70,8 сут	EC, β^+
	^{60}Co	5+	3,80	5,3 года	β^-
	^{61}Co	7/2—	—	1,7 ч	β^-
28	^{56}Ni	0+	0	6,1 сут	EC
	^{57}Ni	3/2—	—	1,5 сут	EC, β^+
	^{59}Ni	3/2—	—	$7,5 \cdot 10^4$ лет	EC, β^+
	^{63}Ni	1/2—	—	100 лет	β^-
	^{65}Ni	5/2—	—	2,52 ч	β^-
	^{66}Ni	0+	0	2,3 сут	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра I и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
29	^{60}Cu	2+	1,22	0,39 ч	β^+ , EC
	^{61}Cu	3/2—	2,13	3,4 ч	β^+ , EC
	^{64}Cu	1+	—0,22	12,70 ч	EC, β^- , β^+
	^{67}Cu	3/2—	—	62 ч	β^-
30	^{62}Zn	0+	0	9,3 ч	EC, β^+
	^{63}Zn	3/2—	—0,282	0,64 ч	β^+ , EC
	^{65}Zn	5/2—	0,77	244 сут	EC, β^+
	^{69}Zn	1/2—	—	0,93 ч	β^-
	^{72}Zn	0+	0	46 ч	β^-
31	^{65}Ga	3/2—	—	0,25 ч	β^+ , EC
	^{66}Ga	0+	—	9,5 ч	β^+ , EC
	^{67}Ga	3/2—	1,85	3,3 сут	EC
	^{68}Ga	1+	$\pm 0,012$	1,1 ч	β^+ , EC
	^{70}Ga	1+	—	0,35 ч	β^- , EC
	^{72}Ga	3—	—0,132	14,1 ч	β^-
	^{73}Ga	3/2—	—	4,9 ч	β^-
	^{76}Ge	0+	0	2,3 ч	EC, β^+
32	^{67}Ge	1/2—	—	0,31 ч	β^+ , EC
	^{68}Ge	0+	0	287 сут	EC
	^{69}Ge	5/2—	—	39 ч	EC, β^+
	^{71}Ge	1/2—	0,55	11,8 сут	EC
	^{75}Ge	1/2—	—	1,38 ч	β^-
	^{77}Ge	7/2+	—	11,3 ч	β^-
	^{78}Ge	0+	0	1,5 ч	β^-
	^{69}As	5/2—	—	0,25 ч	β^+ , EC
	^{70}As	4+	—	0,88 ч	β^+ , EC
	^{71}As	5/2—	—	2,7 сут	EC, β^+
33	^{72}As	2—	$\pm 2,2$	1,1 сут	β^+ , EC
	^{73}As	3/2—	—	80,3 сут	EC
	^{74}As	2—	—	17,8 сут	EC, β^- , β^+
	^{76}As	2—	—0,91	1,1 сут	β^-
	^{77}As	3/2—	—	1,6 сут	β^-
	^{78}As	2—	—	1,5 ч	β^-
	^{70}Se	0+	0	0,68 ч	β^+ , EC
	^{72}Se	0+	0	8,4 сут	EC
	^{73}Se	9/2+	—	7,1 ч	β^+ , EC
	^{75}Se	5/2+	$\pm 0,7$	120 сут	EC
34	^{79}Se	7/2+	—1,02	$6,5 \cdot 10^4$ лет	β^-
	^{81}Se	1/2—	—	0,31 ч	β^-
	^{83}Se	9/2+	—	22,5 мин	β^-
	^{74}Br	(0—, 1—)	—	0,42 ч	β^+ , EC
	^{75}Br	3/2—	—	1,6 ч	β^+ , EC
	^{76}Br	1—	$\pm 0,55$	16,2 ч	β^+ , EC
	^{77}Br	3/2—	—	2,4 сут	EC, β^+
	^{80}Br	1+	$\pm 0,514$	0,29 ч	β^- , EC, β^+
	^{82}Br	5—	1,63	1,47 сут	β^-
	^{83}Br	3/2—	—	2,4 ч	β^-
35	^{84}Br	2—	—	0,53 ч	β^-
	^{74}Kr	0+	0	11,5 мин	β^+ , EC
	^{76}Kr	0+	0	14,8 ч	EC
	^{77}Kr	5/2+	—	1,2 ч	β^+ , EC
	^{79}Kr	1/2—	—	35,0 ч	EC, β^+
36	^{81}Kr	7/2+	—	$2 \cdot 10^5$ лет	EC

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
37	⁸⁵ Kr	9/2+	±1,00	10,7 года	β-
	⁸⁷ Kr	5/2+	—	1,3 ч	β-
	⁸⁸ Kr	0+	0	2,8 ч	β-
	⁷⁸ Rb	0+	—	17,7 мин	β+, EC
	⁷⁹ Rb	5/2+	—	23 мин	β+, EC
	⁸¹ Rb	3/2-	2,06	4,6 ч	EC, β+
	⁸³ Rb	5/2-	1,42	86,2 сут	EC
	⁸⁴ Rb	2-	-1,32	33 сут	EC, β+, β-
	⁸⁶ Rb	2-	-1,698	18,7 сут	β-, EC
	⁸⁷ Rb	3/2-	2,75	4,8·10 ¹⁰ лет	β-
38	⁸⁸ Rb	2-	+0,51	0,30 ч	β-
	⁸⁹ Rb	3/2-	2,38	0,25 ч	β-
	⁷⁸ Sr	0+	0	0,51 ч	β+, EC
	⁸⁰ Sr	0+	0	1,77 ч	EC, β+
	⁸¹ Sr	1/2-	—	0,43 ч	β+, EC
	⁸² Sr	0+	0	25 сут	EC
	⁸³ Sr	7/2+	—	1,4 сут	EC, β+
	⁸⁵ Sr	9/2+	—	65 сут	EC
	⁸⁹ Sr	5/2+	—	51 сут	β-
	⁹⁰ Sr	0+	0	29 лет	β-
39	⁹¹ Sr	5/2+	—	9,5 ч	β-
	⁹² Sr	0+	0	2,7 ч	β-
	⁸⁴ Y	5-	—	0,67 ч	β+, EC
	⁸⁵ Y	1/2-	—	2,7 ч	β+, EC
	⁸⁶ Y	4-	-1,1	15 ч	EC, β+
	⁸⁷ Y	1/2-	—	3,3 сут	EC, β+
	⁸⁸ Y	4-	—	107 сут	EC, β+
	⁹⁰ Y	2-	-1,63	2,7 сут	β-
	⁹¹ Y	1/2-	±0,164	58,5 сут	β-
	⁹² Y	2-	—	3,5 ч	β-
40	⁹³ Y	1/2-	—	10 ч	β-
	⁹⁴ Y	2-	—	0,32 ч	β-
	⁹⁵ Y	1/2-	—	10,3 мин	β-
	⁸⁶ Zr	0+	0	16,5 ч	EC
	⁸⁷ Zr	9/2+	—	1,7 ч	β+, EC
	⁸⁸ Zr	0+	0	83 сут	EC
	⁸⁹ Zr	9/2+	—	3,3 сут	EC, β+
	⁹³ Zr	5/2+	—	1,5·10 ⁶ лет	β-
	⁹⁵ Zr	5/2+	—	64,0 сут	β-
	⁹⁷ Zr	1/2+	—	17,0 ч	β-
41	⁸⁸ Nb	8+	—	0,24 ч	β+, EC
	⁸⁹ Nb	1/2-	—	1,1 ч	EC, β+
	⁹⁰ Nb	8+	—	14,6 ч	β+, EC
	⁹¹ Nb	9/2+	—	1,0·10 ⁴ лет	EC
	⁹² Nb	7+	—	3,5·10 ⁷ лет	EC
	⁹⁴ Nb	6+	—	2·10 ⁴ лет	β-
	⁹⁵ Nb	9/2+	—	35,0 сут	β-
	⁹⁶ Nb	6+	—	0,97 сут	β-
	⁹⁷ Nb	9/2+	7	1,2 ч	β-
42	⁹⁰ Mo	0+	0	5,7 ч	EC, β+
	⁹¹ Mo	9/2+	—	0,26 ч	β+, EC
	⁹³ Mo	5/2+	—	3,5·10 ³ лет	EC

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра I и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
43	⁹⁹ Mo	1/2+	$\pm 0,37$	2,8 сут	β^-
	¹⁰¹ Mo	1/2+	—	0,24 ч	β^-
	¹⁰² Mo	0+	0	11,3 мин	β^-
	⁹³ Tc	9/2+	—	2,8 ч	EC, β^+
	⁹⁴ Tc	7+	—	4,9 ч	EC, β^+
	⁹⁵ Tc	9/2+	—	20,0 ч	EC
	⁹⁶ Tc	7+	$\pm 5,4$	4,3 сут	EC
	⁹⁷ Tc	9/2+	—	$2,6 \cdot 10^6$ лет	EC
	⁹⁸ Tc	6+	—	$4,2 \cdot 10^6$ лет	β^-
	⁹⁹ Tc	9/2+	5,68	$2,1 \cdot 10^5$ лет	β^-
44	¹⁰¹ Tc	9/2+	—	0,24 ч	β^-
	¹⁰⁴ Tc	—	—	0,30 ч	β^-
	⁹⁴ Ru	0+	0	0,86 ч	EC
	⁹⁵ Ru	5/2+	—	1,64 ч	EC, β^+
	⁹⁷ Ru	5/2+	—	2,9 сут	EC
	¹⁰³ Ru	3/2+	0,18	39,3 сут	β^-
	¹⁰⁵ Ru	3/2+	—	4,4 ч	β^-
	¹⁰⁶ Ru	0+	0	1,02 года	β^-
	⁹⁷ Rh	9/2+	—	0,5 ч	β^+ , EC
	⁹⁹ Rh	1/2—	—	16 сут	EC, β^+
45	¹⁰⁰ Rh	1—	—	21 ч	EC, β^+
	¹⁰¹ Rh	1/2—	—	3,3 года	EC
	¹⁰² Rh	6+	4,1	2,9 года	EC
	¹⁰⁵ Rh	7/2+	—	1,5 сут	β^-
	¹⁰⁷ Rh	7/2+	—	0,36 ч	β^-
	⁹⁸ Pd	0+	0	0,30 ч	EC, β^+
	⁹⁹ Pd	5/2+	—	0,36 ч	β^+ , EC
	¹⁰⁰ Pd	0+	0	3,6 сут	EC
	¹⁰¹ Pd	5/2+	—	8,5 ч	EC, β^+
	¹⁰³ Pd	5/2+	—	17,0 сут	EC
46	¹⁰⁷ Pd	5/2+	—	$6,5 \cdot 10^6$ лет	β^-
	¹⁰⁹ Pd	5/2+	—	13,5 ч	β^-
	¹¹¹ Pd	5/2+	—	0,39 ч	β^-
	¹¹² Pd	0+	0	21 ч	β^-
	¹⁰¹ Ag	9/2+	—	0,185 ч	β^+ , EC
	¹⁰² Ag	5+	—	0,215 ч	β^+ , EC
	¹⁰³ Ag	7/2+	4,5	1,1 ч	EC, β^+
	¹⁰⁴ Ag	5+	4,0	1,2 ч	β^+ , EC
	¹⁰⁵ Ag	1/2—	$\pm 0,10$	41,3 сут	EC, β^+
	¹⁰⁶ Ag	1+	2,9	0,40 ч	EC, β^+
47	¹¹¹ Ag	1/2—	—0,15	7,5 сут	β^-
	¹¹² Ag	2—	$\pm 0,055$	3,1 ч	β^-
	¹¹³ Ag	1/2—	$\pm 0,16$	5,4 ч	β^-
	¹¹⁵ Ag	1/2—	—	0,33 ч	β^-
	¹⁰⁴ Cd	0+	0	0,96 ч	EC, β^+
	¹⁰⁵ Cd	5/2+	—0,74	0,93 ч	EC, β^+
	¹⁰⁷ Cd	5/2+	—0,615	6,5 ч	EC, β^+
	¹⁰⁹ Cd	5/2+	—0,83	1,3 года	EC
	¹¹³ Cd	1/2+	0,622	$9 \cdot 10^{15}$ лет	β^-
	¹¹⁵ Cd	1/2+	—0,65	2,2 сут	β^-
48	¹¹⁷ Cd	1/2+	—	2,5 ч	β^-
	¹¹⁸ Cd	0+	0	0,84 ч	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
49	^{104}In	—	—	0,42 ч	β^+ , EC
	^{107}In	9/2+	—	0,54 ч	EC , β^+
	^{108}In	3+	—	40 мин	EC , β^+
	^{109}In	9/2+	5,5	4,2 ч	EC , β^+
	^{110}In	2+	4,36	1,2 ч	β^+ , EC
	^{111}In	9/2+	5,50	2,8 сут	EC
	^{112}In	1+	2,8	0,24 ч	β^- , EC , β^+
	^{115}In	9/2+	5,54	4,4 · 10 ¹⁴ лет	β^-
	^{117}In	9/2+	—	0,73 ч	β^-
50	^{109}Sn	7/2+	—	0,30 ч	β^+ , EC
	^{110}Sn	0+	0	4,1 ч	EC
	^{111}Sn	7/2+	—	35 мин	EC , β^+
	^{113}Sn	1/2+	$\pm 0,88$	115 сут	EC
	^{121}Sn	3/2+	$\pm 0,70$	1,1 сут	β^-
	^{123}Sn	11/2—	—	129 сут	β^-
	^{125}Sn	11/2—	—	9,6 сут	β^-
	^{126}Sn	0+	0	10 ⁵ лет	β^-
	^{127}Sn	11/2—	—	2,1 ч	β^-
	^{128}Sn	0+	0	0,99 ч	β^-
51	^{115}Sb	5/2+	3,46	0,54 ч	EC , β^+
	^{116}Sb	3+	—	0,26 ч	EC , β^+
	^{117}Sb	5/2+	3,4	2,8 ч	EC , β^+
	^{119}Sb	5/2+	3,45	38,1 ч	EC
	^{120}Sb	8—	$\pm 2,3$	5,8 сут	EC
	^{122}Sb	2—	$-1,90$	2,7 сут	β^- , EC , β^+
	^{124}Sb	3—	$\pm 1,2$	60,2 сут	β^-
	^{125}Sb	7/2+	$\pm 2,6$	2,7 года	β^-
	^{126}Sb	8—	$\pm 1,3$	12,4 сут	β^-
	^{127}Sb	7/2+	$\pm 2,6$	3,9 сут	β^-
	^{128}Sb	8—	$\pm 1,3$	9,0 ч	β^-
	^{129}Sb	7/2+	—	4,4 ч	β^-
	^{130}Sb	8—	—	40 мин	β^-
	^{131}Sb	7/2+	—	0,38 ч	β^-
52	^{114}Te	0+	0	15 мин	EC , β^+
	^{116}Te	0+	0	2,5 ч	EC , β^+
	^{117}Te	1/2+	—	1,0 ч	EC , β^+
	^{118}Te	0+	0	6,0 сут	EC
	^{119}Te	1/2+	$\pm 0,25$	16,0 ч	EC , β^+
	^{121}Te	1/2+	—	17 сут	EC
	^{123}Te	1/2+	$-0,736$	10 ¹³ лет	EC
	^{127}Te	3/2+	$\pm 0,63$	9,4 ч	β^-
	^{129}Te	3/2+	$\pm 0,70$	1,2 ч	β^-
	^{131}Te	3/2+	$\pm 0,70$	0,42 ч	β^-
	^{132}Te	0+	0	3,26 сут	β^-
	^{133}Te	3/2+	—	0,21 ч	β^-
	^{134}Te	0+	0	0,70 ч	β^-
53	^{118}I	2—	—	0,23 ч	β^+ , EC
	^{119}I	5/2+	—	0,32 ч	β^+ , EC
	^{120}I	2—	—	1,4 ч	EC , β^+
	^{121}I	5/2+	—	2,12 ч	EC , β^+
	^{123}I	5/2+	—	13,2 ч	EC
	^{124}I	2—	—	4,2 сут	EC , β^+

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
54	^{125}I	$5/2+$	3	60 сут	EC
	^{126}I	2—	—	13,0 сут	EC, β^- , β^+
	^{128}I	1+	—	0,42 ч	β^- , EC, β^+
	^{129}I	$7/2+$	2,62	$1,6 \cdot 10^7$ лет	β^-
	^{130}I	5+	—	12,4 ч	β^-
	^{131}I	$7/2+$	2,74	8,0 сут	β^-
	^{132}I	4+	$\pm 3,09$	2,3 ч	β^-
	^{133}I	$7/2+$	2,86	20,8 ч	β^-
	^{134}I	4+	—	0,88 ч	β^-
	^{135}I	$7/2+$	—	6,6 ч	β^-
	^{120}Xe	0+	0	0,67 ч	EC, β^+
	^{121}Xe	$5/2+$	—	0,67 ч	EC, β^+
	^{122}Xe	0+	0	20,1 ч	EC
	^{123}Xe	$1/2+$	—	2,1 ч	EC, β^+
	^{125}Xe	$1/2+$	—	17 ч	EC, β^+
	^{127}Xe	$1/2+$	—	36,4 сут	EC
	^{133}Xe	$3/2+$	—	5,29 сут	β^-
	^{135}Xe	$3/2+$	—	9,1 ч	β^-
	^{136}Xe	0+	0	14,1 мин	β^-
55	^{125}Cs	$1/2+$	1,41	0,75 ч	EC, β^+
	^{127}Cs	$1/2+$	1,46	6,2 ч	EC, β^+
	^{129}Cs	$1/2+$	1,49	32,1 ч	EC, β^+
	^{130}Cs	1+	1,46	0,5 ч	EC, β^+ , β^-
	^{131}Cs	$5/2+$	3,53	9,7 сут	EC
	^{132}Cs	2—	2,23	6,5 сут	EC, β^- , β^+
	^{134}Cs	4+	2,99	2,06 года	β^- , EC
	^{135}Cs	$7/2+$	2,73	$2,3 \cdot 10^6$ лет	β^-
	^{136}Cs	5+	3,7	13,2 сут	β^-
	^{137}Cs	$7/2+$	2,84	30 лет	β^-
	^{138}Cs	3—	0,70	0,54 ч	β^-
56	^{124}Ba	0+	0	0,20 ч	EC, β^+
	^{126}Ba	0+	0	1,67 ч	EC, β^+
	^{127}Ba	$1/2+$	—	13 мин	β^+ , EC
	^{128}Ba	0+	0	2,4 сут	EC
	^{129}Ba	$1/2+$	—	2,2 ч	EC, β^+
	^{131}Ba	$1/2+$	—	12 сут	EC
	^{133}Ba	$1/2+$	—	10,5 года	EC
	^{139}Ba	$7/2-$	—	1,4 ч	β^-
	^{140}Ba	0+	0	12,8 сут	β^-
	^{141}Ba	$3/2-$	—	0,30 ч	β^-
	^{142}Ba	0+	0	10,6 мин	β^-
57	^{129}La	$3/2+$	—	11,6 мин	β^+ , EC
	^{131}La	$3/2+$	—	1,0 ч	EC, β^+
	^{132}La	2—	—	4,8 ч	β^+ , EC
	^{133}La	$5/2+$	—	3,91 ч	EC, β^+
	^{135}La	$5/2+$	—	19 ч	EC, β^+
	^{137}La	$7/2+$	2,69	$6 \cdot 10^4$ лет	EC
	^{138}La	5+	3,70	$1,3 \cdot 10^{11}$ лет	EC, β^-
	^{140}La	3—	0,73	40,3 ч	β^-
	^{141}La	—	—	3,9 ч	β^-
	^{142}La	2—	—	1,54 ч	β^-
	^{143}La	—	—	0,24 ч	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
58	^{130}Ce	0+	0	0,42 ч	EC, β^+
	^{132}Ce	0+	0	4,2 ч	EC
	^{133}Ce	9/2—	—	5,4 ч	EC, β^+
	^{134}Ce	0+	0	76 ч	EC
	^{135}Ce	1/2+	—	17,6 ч	EC, β^+
	^{137}Ce	3/2+	$\pm 0,9$	9 ч	EC, β^+
	^{139}Ce	3/2+	0,9	138 сут	EC
	^{141}Ce	7/2—	1,0	33 сут	β^-
	^{142}Ce	0+	0	$5 \cdot 10^{16}$ лет	—
	^{143}Ce	3/2—	—	33 ч	β^-
	^{144}Ce	0+	0	285 сут	β^-
	^{146}Ce	0+	0	0,24 ч	β^-
59	^{134}Pr	2—	—	0,28 ч	β^+ , EC
	^{135}Pr	3/2+	—	0,37 ч	EC, β^+
	^{136}Pr	2+	—	0,22 ч	β^+ , EC
	^{137}Pr	5/2+	—	1,3 ч	EC, β^+
	^{139}Pr	5/2+	—	4,4 ч	EC, β^+
	^{142}Pr	2—	0,23	19,1 ч	β^- , EC
	^{143}Pr	7/2+	—	13,6 сут	β^-
	^{144}Pr	0—	—	0,29 ч	β^-
	^{145}Pr	7/2+	—	6,0 ч	β^-
	^{146}Pr	—	—	0,40 ч	β^-
	^{147}Pr	5/2+	—	0,23 ч	β^-
60	^{135}Nd	9/2—	—	0,20 ч	β^+ , EC
	^{136}Nd	0+	0	0,84 ч	EC, β^+
	^{137}Nd	1/2+	—	0,64 ч	β^+ , EC
	^{138}Nd	0+	0	5,0 ч	EC
	^{139}Nd	3/2+	—	0,50 ч	EC, β^+
	^{140}Nd	0+	0	3,4 сут	EC
	^{141}Nd	3/2+	—	2,5 ч	EC, β^+
	^{144}Nd	0+	0	$2,1 \cdot 10^{15}$ лет	α
	^{147}Nd	5/2—	$-0,55$	11 сут	β^-
	^{149}Nd	5/2—	$-0,35$	1,73 ч	β^-
	^{151}Nd	3/2+	—	0,21 ч	β^-
	^{152}Nd	0+	0	0,19 ч	β^-
61	^{141}Pm	5/2+	—	0,35 ч	β^+ , EC
	^{143}Pm	5/2+	$\pm 3,8$	265 сут	EC
	^{144}Pm	5—	$\pm 1,7$	363 сут	EC
	^{145}Pm	5/2+	—	18 лет	EC, α
	^{146}Pm	(2—, 3, 4—)	—	5,5 года	EC, β^-
	^{147}Pm	7/2+	2,7	2,62 года	β^-
	^{148}Pm	1—	2,0	5,4 сут	β^-
	^{149}Pm	7/2+	$\pm 3,3$	53,1 ч	β^-
	^{150}Pm	1—	—	2,7 ч	β^-
	^{151}Pm	5/2+	$\pm 1,6$	28,4 ч	β^-
62	^{140}Sm	0+	0	0,25 ч	EC, β^+
	^{142}Sm	0+	0	1,21 ч	EC, β^+
	^{145}Sm	7/2—	$\pm 0,9$	340 сут	EC
	^{146}Sm	0+	0	$1,0 \cdot 10^8$ лет	α
	^{147}Sm	7/2—	$-0,81$	$1,1 \cdot 10^{11}$ лет	α
	^{148}Sm	0+	0	$8 \cdot 10^{15}$ лет	α
	^{149}Sm	7/2—	$-0,67$	$1 \cdot 10^{16}$ лет	α

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
63	^{151}Sm	5/2—	$\pm 0,35$	90 лет	β^-
	^{153}Sm	3/2+	$-0,022$	47 ч	β^-
	^{155}Sm	3/2—	—	0,37 ч	β^-
	^{156}Sm	0+	0	9,4 ч	β^-
	^{145}Eu	5/2+	—	5,9 сут	EC, β^+
	^{146}Eu	4—	—	4,6 сут	EC, β^+
	^{147}Eu	5/2+	—	24 сут	EC, β^+ , α
	^{148}Eu	5—	—	54 сут	EC, β^+ , α
	^{149}Eu	5/2+	—	93 сут	EC
	^{150}Eu	0—	—	12,6 ч	β^- , EC, β^+
	^{152}Eu	3—	$-1,94$	13,3 года	EC, β^- , β^+
	^{154}Eu	3—	$\pm 2,0$	8,8 года	β^- , EC
	^{155}Eu	5/2+	$\pm 1,9$	5,0 лет	β^-
	^{156}Eu	0+	1,97	15,2 сут	β^-
	^{157}Eu	5/2+	—	15,1 ч	β^-
	^{158}Eu	1—	—	0,77 ч	β^-
	^{159}Eu	5/2+	—	0,31 ч	β^-
64	^{145}Gd	1/2+	—	0,40 ч	β^+ , EC
	^{146}Gd	0+	0	48,3 сут	EC, β^+
	^{147}Gd	7/2—	—	1,59 сут	EC, β^+
	^{148}Gd	0+	0	93 года	α
	^{149}Gd	7/2—	—	9,4 сут	EC, α
	^{150}Gd	0+	0	$1,8 \cdot 10^6$ лет	α
	^{151}Gd	7/2—	—	120 сут	EC, α
	^{152}Gd	0+	0	$1,1 \cdot 10^{14}$ лет	α
	^{153}Gd	3/2—	—	242 сут	EC
	^{159}Gd	3/2—	$\pm 0,4$	18,6 ч	β^-
65	^{147}Tb	5/2+	—	1,7 ч	EC, β^+
	^{148}Tb	2—	—	1,0 ч	EC, β^+
	^{149}Tb	(3/2+, 5/2+)	—	4,1 ч	EC, α , β^+
	^{150}Tb	2—	—	3,3 ч	EC, β^+ , α
	^{151}Tb	1/2+	—	17,6 ч	EC, β^+ , α
	^{152}Tb	2—	—	17,5 ч	EC, β^+
	^{153}Tb	5/2+	—	2,34 сут	EC, β^+
	^{154}Tb	0—	—	21 ч	EC, β^+
	^{155}Tb	3/2+	—	5,3 сут	EC
	^{156}Tb	3—	$\pm 1,4$	5,3 сут	EC
	^{157}Tb	3/2+	$\pm 2,0$	150 лет	EC
	^{158}Tb	3—	$\pm 1,7$	150 лет	EC, β^-
	^{160}Tb	3—	$\pm 1,7$	72 сут	β^-
	^{161}Tb	3/2+	—	6,9 сут	β^-
	^{163}Tb	3/2+	—	0,32 ч	β^-
66	^{161}Dy	7/2—	—	0,28 ч	EC, β^+ , α
	^{162}Dy	0+	0	2,4 ч	EC, α
	^{163}Dy	7/2—	$-0,71$	6,4 ч	EC, β^+ , α
	^{164}Dy	0+	0	10^7 лет	α
	^{165}Dy	3/2—	$-0,34$	10 ч	EC, β^+
	^{167}Dy	3/2—	$-0,30$	8,1 ч	EC
	^{169}Dy	3/2—	—	144 сут	EC
	^{165}Dy	7/2+	$-0,52$	2,33 ч	β^-
	^{166}Dy	0+	0	3,4 сут	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
67	^{154}Ho	1	—	0,20 ч	β^+ , EC, α
	^{155}Ho	5/2	—	0,80 ч	EC, β^+ , α
	^{156}Ho	1	—	0,93 ч	β^+ , EC
	^{157}Ho	7/2—	—	0,21 ч	β^+ , EC
	^{158}Ho	5+	—	0,19 ч	EC, β^+
	^{159}Ho	7/2—	—	0,55 ч	EC
	^{160}Ho	5+	—	0,43 ч	EC, β^+
	^{161}Ho	7/2—	—	2,5 ч	EC
	^{162}Ho	1+	—	0,25 ч	EC, β^+
	^{163}Ho	7/2—	—	33 года	EC
	^{164}Ho	1+	—	0,48 ч	EC, β^-
	^{166}Ho	0—	—	1,1 сут	β^-
	^{167}Ho	7/2—	—	3,1 ч	β^-
68	^{157}Er	3/2—	—	0,42 ч	β^+ , EC
	^{158}Er	0+	0	2,3 ч	EC, β^+
	^{159}Er	3/2—	—	0,60 ч	EC, β^+
	^{160}Er	0+	0	1,2 сут	EC
	^{161}Er	3/2—	-0,37	3,2 ч	EC, β^+
	^{163}Er	5/2—	0,56	1,25 ч	EC, β^+
	^{165}Er	5/2—	$\pm 0,65$	10,4 ч	EC
	^{169}Er	1/2—	0,49	9,4 сут	β^-
	^{171}Er	5/2—	$\pm 0,7$	7,5 ч	β^-
	^{172}Er	0+	0	2,1 сут	β^-
69	^{161}Tm	7/2+	—	0,63 ч	EC, β^+
	^{162}Tm	1—	—	0,36 ч	EC, β^+
	^{163}Tm	1/2+	-0,08	1,8 ч	EC, β^+
	^{165}Tm	1/2+	-0,14	30,1 ч	EC, β^+
	^{166}Tm	2+	$\pm 0,09$	7,7 ч	EC, β^+
	^{167}Tm	1/2+	-0,20	9,2 сут	EC
	^{168}Tm	3+	—	93,1 сут	EC, β^-
	^{170}Tm	1—	$\pm 0,25$	129 сут	β^- , EC
	^{171}Tm	1/2—	-0,23	1,9 года	β^-
	^{172}Tm	2—	—	64 ч	β^-
	^{173}Tm	1/2+	—	8,2 ч	β^-
	^{175}Tm	1/2+	—	0,25 ч	β^-
70	^{162}Yb	0+	0	0,32 ч	EC, β^+
	^{163}Yb	3/2—	—	0,18 ч	EC, β^+
	^{164}Yb	0+	0	1,3 ч	EC
	^{166}Yb	0+	0	2,4 сут	EC
	^{167}Yb	5/2—	—	0,29 ч	EC, β^+
	^{169}Yb	7/2+	-0,6	32,0 сут	EC
	^{175}Yb	7/2—	$\pm 0,3$	4,2 сут	β^-
	^{177}Yb	9/2+	—	1,9 ч	β^-
	^{178}Yb	0+	0	1,23 ч	β^-
71	^{165}Lu	—	—	0,2 ч	EC, β^+
	^{167}Lu	7/2+	—	0,86 ч	EC, β^+
	^{169}Lu	7/2+	—	1,42 сут	EC, β^+
	^{170}Lu	0+	—	2,0 сут	EC, β^+
	^{171}Lu	7/2+	—	8,2 сут	EC, β^+
	^{172}Lu	4—	—	6,7 сут	EC
	^{173}Lu	7/2+	2,3	1,4 года	EC

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра J и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
72	^{174}Lu	1—	1,9	3,3 года	EC, β^+
	^{176}Lu	7—	3,2	$3,6 \cdot 10^{10}$ лет	β^-
	^{177}Lu	$7/2^+$	2,24	6,7 сут	β^-
	^{178}Lu	1^+	—	0,47 ч	β^-
	^{179}Lu	$7/2^+$	—	4,6 ч	β^-
	^{168}Hf	0^+	0	0,43 ч	EC
	^{170}Hf	0^+	0	16 ч	EC
	^{171}Hf	$7/2^+$	—	12,1 ч	EC, β^+
	^{172}Hf	0^+	0	1,9 года	EC
	^{173}Hf	$1/2^-$	—	1,0 сут	EC
	^{174}Hf	0^+	0	$2 \cdot 10^{15}$ лет	α
	^{176}Hf	$5/2^-$	—	70 сут	EC
	^{181}Hf	$1/2^-$	—	42,4 сут	β^-
	^{182}Hf	0^+	0	$9 \cdot 10^6$ лет	β^-
	^{183}Hf	$3/2^-$	—	1,1 ч	β^-
	^{184}Hf	0^+	0	4,1 ч	β^-
73	^{171}Ta	$7/2$	—	0,39 ч	EC, β^+
	^{172}Ta	3—	—	0,61 ч	EC, β^+
	^{173}Ta	$5/2^-$	—	3,7 ч	EC, β^+
	^{174}Ta	4—	—	1,2 ч	EC, β^+
	^{175}Ta	$7/2^+$	—	10,5 ч	EC, β^+
	^{176}Ta	1—	—	8,1 ч	EC, β^+
	^{177}Ta	$7/2^+$	—	2,4 сут	EC, β^+
	^{178}Ta	7—	—	2,2 ч	EC
	^{179}Ta	$7/2^+$	—	1,82 года	EC
	^{182}Ta	3—	$\pm 2,6$	115 сут	β^-
	^{183}Ta	$7/2^+$	—	5,1 сут	β^-
	^{184}Ta	5—	—	8,7 ч	β^-
	^{185}Ta	$7/2^+$	—	0,82 ч	β^-
	^{186}Ta	3—	—	10,5 мин	β^-
74	^{173}W	—	—	0,28 ч	EC, β^+
	^{174}W	0^+	0	0,48 ч	EC
	^{175}W	$1/2^-$	—	0,57 ч	EC, β^+
	^{176}W	0^+	0	2,3 ч	EC
	^{177}W	$1/2^-$	—	2,25 ч	EC, β^+
	^{178}W	0^+	0	22 сут	EC
	^{179}W	$7/2^-$	—	0,63 ч	EC
	^{181}W	$9/2^+$	—	121 сут	EC
	^{185}W	$3/2^-$	—	75 сут	β^-
	^{187}W	$3/2^-$	—	1,0 сут	β^-
	^{188}W	0^+	0	69 сут	β^-
	^{189}W	$3/2^-$	—	0,19 ч	β^-
	^{190}W	0^+	—	0,50 ч	β^-
75	^{177}Re	$5/2^-$	—	0,23 ч	EC, β^+
	^{178}Re	3	—	0,22 ч	EC, β^+
	^{179}Re	$5/2^+$	—	0,33 ч	EC, β^+
	^{181}Re	$5/2^+$	—	20 ч	EC
	^{182}Re	7^+	—	64 ч	EC
	^{183}Re	$5/2^+$	$\pm 3,1$	70 сут	EC
	^{184}Re	3—	$\pm 2,5$	38 сут	EC
	^{186}Re	1—	1,74	3,8 сут	β^- , EC
	^{187}Re	$5/2^+$	3,22	$5 \cdot 10^{10}$ лет	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра i и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
76	^{188}Re	1—	1,79	17 ч	β^-
	^{189}Re	5/2+	—	1,0 сут	β^-
	^{180}Os	0+	0	0,37 ч	EC
	^{181}Os	1/2—	—	1,75 ч	EC, β^+
	^{182}Os	0+	0	22 ч	EC
	^{183}Os	9/2+	—	13 ч	EC, β^+
	^{186}Os	1/2—	—	94 сут	EC
	^{186}Os	0+	0	$2 \cdot 10^{16}$ лет	α
	^{191}Os	9/2—	—	15,4 сут	β^-
	^{193}Os	3/2—	—	1,27 сут	β^-
	^{194}Os	0+	0	6,0 лет	β^-
77	^{196}Os	0+	0	0,58 ч	β^-
	^{182}Ir	(3)	—	0,25 ч	EC, β^+
	^{183}Ir	(1/2+, 3/2+)	—	0,95 ч	EC, β^+
	^{184}Ir	5	—	3,0 ч	EC, β^+
	^{185}Ir	5/2—	—	14 ч	EC, β^+
	^{186}Ir	2—	—	1,7 ч	EC, β^+
	^{187}Ir	3/2+	—	10,5 ч	EC
	^{188}Ir	2—	—	1,7 сут	EC, β^+
	^{189}Ir	3/2+	—	13,2 сут	EC
	^{190}Ir	4+	—	12 сут	EC
	^{192}Ir	4—	1,9	73,8 сут	β^- , EC
78	^{194}Ir	1—	$\pm 0,4$	19,1 ч	β^-
	^{195}Ir	3/2+	—	2,5 ч	β^-
	^{184}Pt	0+	0	0,29 ч	EC, β^+ , α
	^{185}Pt	9/2+	—	1,2 ч	EC, β^+
	^{186}Pt	0+	0	2,0 ч	EC, α
	^{187}Pt	3/2—	—	2,3 ч	EC, β^+
	^{188}Pt	0+	0	10,2 сут	EC, α
	^{189}Pt	3/2—	—	10,9 ч	EC, β^+
	^{190}Pt	0+	0	$6 \cdot 10^{11}$ лет	α
	^{191}Pt	3/2—	—	2,9 сут	EC
	^{193}Pt	1/2—	—	50 лет	EC
79	^{197}Pt	1/2—	$\pm 0,5$	18 ч	β^-
	^{199}Pt	5/2—	—	0,51 ч	β^-
	^{200}Pt	0+	0	12,5 ч	β^-
	^{186}Au	—	—	0,18 ч	EC, β^+
	^{189}Au	1/2+	—	0,48 ч	EC, β^+
	^{190}Au	1—	$\pm 0,07$	0,71 ч	EC, β^+
	^{191}Au	3/2+	$\pm 0,14$	3,2 ч	EC
	^{192}Au	1—	$\pm 0,008$	4,9 ч	EC, β^+
	^{193}Au	3/2+	$\pm 0,14$	17,7 ч	EC
	^{194}Au	1—	$\pm 0,07$	1,65 сут	EC, β^+
	^{195}Au	3/2+	$\pm 0,15$	183 сут	EC
80	^{196}Au	2—	$\pm 0,6$	6,2 сут	EC, β^- , β^+
	^{198}Au	2—	0,59	2,7 сут	β^-
	^{199}Au	3/2+	0,27	3,14 сут	β^-
	^{200}Au	1—	—	0,81 ч	β^-
	^{201}Au	3/2+	—	0,43 ч	β^-
	^{190}Hg	0+	0	0,33 ч	EC
	^{191}Hg	3/2—	—	0,82 ч	EC, β^+
	^{192}Hg	0+	0	4,9 ч	EC
	^{193}Hg	3/2—	$-0,63$	3,8 ч	EC

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра I и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
81	¹⁹⁴ Hg	0+	0	260 лет	EC
	¹⁹⁵ Hg	1/2—	0,54	10 ч	EC
	¹⁹⁷ Hg	1/2—	0,527	2,7 сут	EC
	²⁰³ Hg	5/2—	0,85	46,6 сут	β^-
	¹⁹³ Tl	1/2+	—	0,36 ч	EC, β^+
	¹⁹⁴ Tl	2—	—	0,55 ч	EC, β^+
	¹⁹⁵ Tl	1/2+	1,6	1,2 ч	EC, β^+
	¹⁹⁶ Tl	2—	$\pm 0,07$	1,8 ч	EC, β^+
	¹⁹⁷ Tl	1/2+	1,6	2,8 ч	EC, β^+
	¹⁹⁸ Tl	2—	$\pm 0,001$	5,3 ч	EC, β^+
	¹⁹⁹ Tl	1/2+	1,6	7,4 ч	EC
	²⁰⁰ Tl	2—	$\pm 0,04$	1,1 сут	EC, β^+
	²⁰¹ Tl	1/2+	1,6	3,05 сут	EC
	²⁰² Tl	2—	$\pm 0,06$	12,2 сут	EC
	²⁰⁴ Tl	2—	$\pm 0,09$	3,8 года	β^- , EC
82	¹⁹⁴ Pb	0+	0	0,18 ч	EC, β^+
	¹⁹⁶ Pb	0+	0	0,62 ч	EC
	¹⁹⁷ Pb	3/2—	—	10 мин	EC, β^+
	¹⁹⁸ Pb	0+	0	2,4 ч	EC
	¹⁹⁹ Pb	5/2—	—	1,5 ч	EC, β^+
	²⁰⁰ Pb	0+	0	21,5 ч	EC
	²⁰¹ Pb	5/2—	—	9,4 ч	EC, β^+
	²⁰² Pb	0+	0	$3 \cdot 10^5$ лет	EC
	²⁰³ Pb	5/2—	—	52 ч	EC
	²⁰⁵ Pb	5/2—	—	$1,4 \cdot 10^7$ лет	EC
	²⁰⁹ Pb	9/2+	—	3,25 ч	β^-
	²¹⁰ Pb	0+	0	22,3 года	β^- , α
	²¹¹ Pb	9/2+	—	0,60 ч	β^-
	²¹² Pb	0+	0	10,6 ч	β^-
	²¹⁴ Pb	0+	0	0,45 ч	β^-
83	¹⁹⁸ Bi	7+	—	0,20 ч	EC, β^+
	¹⁹⁹ Bi	9/2—	—	0,45 ч	EC
	²⁰⁰ Bi	7+	—	0,61 ч	EC, β^+
	²⁰¹ Bi	9/2—	—	1,8 ч	EC, β^+
	²⁰² Bi	5+	—	1,7 ч	EC, β^+
	²⁰³ Bi	9/2—	4,6	11,8 ч	EC, β^+
	²⁰⁴ Bi	6+	4,3	11,2 ч	EC
	²⁰⁵ Bi	9/2—	4,2	15,3 сут	EC, β^+
	²⁰⁶ Bi	6+	4,6	6,24 сут	EC
	²⁰⁷ Bi	9/2—	—	38 лет	EC, β^+
	²⁰⁸ Bi	5+	—	$3,7 \cdot 10^5$ лет	EC
	²¹⁰ Bi	1—	$-0,045$	5,0 сут	β^- , α
	²¹² Bi	1—	—	1,01 ч	β^- , α
	²¹³ Bi	9/2—	—	0,76 ч	β^- , α
	²¹⁴ Bi	1—	—	0,33 ч	β^- , α
84	²⁰⁰ Po	0+	0	0,19 ч	EC, β^+ , α
	²⁰¹ Po	3/2—	—	0,25 ч	EC, β^+ , α
	²⁰² Po	0+	0	0,75 ч	EC, β^+ , α
	²⁰³ Po	5/2—	—	0,61 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁴ Po	0+	0	3,5 ч	EC, α
	²⁰⁵ Po	5/2—	0,3	1,8 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁶ Po	0+	0	8,8 сут	EC, α
	²⁰⁷ Po	5/2—	0,3	5,8 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁸ Po	0+	0	2,90 года	α , EC

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра I и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
85	²⁰⁹ Po	1/2—	0,8	102 года	α , EC
	²¹⁰ Po	0+	0	138,4 сут	α
	²⁰⁵ At	9/2—	—	0,44 ч	EC, α , β^+
	²⁰⁶ At	5+	—	0,49 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁷ At	9/2—	—	1,8 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁸ At	0+	—	1,6 ч	EC, β^+ , α
	²⁰⁹ At	9/2—	—	5,4 ч	EC, α
	²¹⁰ At	5+	—	8,1 ч	EC, β^+ , α
86	²¹¹ At	9/2—	—	7,21 ч	EC, α
	²⁰⁶ Rn	0+	0	0,41 ч	α , EC, β^+
	²⁰⁹ Rn	5/2—	—	0,48 ч	EC, α , β^+
	²¹⁰ Rn	0+	0	2,4 ч	α , EC
	²¹¹ Rn	1/2—	—	14,6 ч	EC, β^+ , α
	²¹² Rn	0+	0	0,40 ч	α
	²²¹ Rn	(7/2+, 9/2+)	—	25 мин	β^- , α
	²²² Rn	0+	0	3,82 сут	α
	²²³ Rn	—	0	43 мин	β^-
	²²⁴ Rn	0+	0	1,8 ч	β^-
87	²¹² Fr	5+	—	0,33 ч	EC, β^+ , α
	²²² Fr	2	—	0,24 ч	β^- , α
	²²³ Fr	—	—	0,36 ч	β^- , α
88	²²³ Ra	1/2+	—	11,43 сут	α
	²²⁴ Ra	0+	0	3,7 сут	α
	²²⁵ Ra	3/2+	—	14,8 сут	β^-
	²²⁶ Ra	0+	0	1600 лет	α
	²²⁷ Ra	3/2+	—	0,70 ч	β^-
	²²⁸ Ra	0+	0	5,8 года	β^-
	²³⁰ Ra	0+	0	1,5 ч	β^-
89	²²⁴ Ac	(0—, 1±)	—	2,9 ч	EC, α
	²²⁵ Ac	3/2	—	10 сут	α
	²²⁶ Ac	1—	—	1,2 сут	β^- , EC, α
	²²⁷ Ac	3/2—	1,1	21,8 года	β^- , α
	²²⁸ Ac	3+	—	6,1 ч	β^-
	²²⁹ Ac	3/2+	—	1,05 ч	β^-
90	²²⁶ Th	0+	0	0,52 ч	α
	²²⁷ Th	3/2+	—	18,7 сут	α
	²²⁸ Th	0+	0	1,913 года	α
	²²⁹ Th	5/2+	0,5	7300 лет	α
	²³⁰ Th	0+	0	$7,5 \cdot 10^4$ лет	α
	²³¹ Th	5/2+	—	25,5 ч	β^-
	²³² Th	0+	0	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	α
	²³³ Th	1/2+	—	0,37 ч	β^-
	²³⁴ Th	0+	0	24,1 сут	β^-
	²³⁶ Th	0+	0	0,62 ч	β^-
91	²²⁷ Pa	—	—	0,64 ч	α , EC
	²²⁸ Pa	3+	—	22 ч	EC, α
	²²⁹ Pa	5/2	—	1,4 сут	EC, α
	²³⁰ Pa	2—	—	17,4 сут	EC, β^- , α
	²³¹ Pa	3/2—	$\pm 2,0$	$3,28 \cdot 10^4$ лет	α
	²³² Pa	2—	—	1,3 сут	β^-
	²³³ Pa	3/2—	3,5	27,0 сут	β^-
	²³⁴ Pa	4+	—	6,7 ч	β^-
	²³⁵ Pa	3/2—	—	0,40 ч	β^-

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
92	^{229}U	3/2+	—	0,97 ч	EC, α
	^{230}U	0+	0	20,8 сут	α
	^{231}U	5/2—	—	4,2 сут	EC, α
	^{232}U	0+	0	69 лет	α
	^{233}U	5/2+	0,6	$1,59 \cdot 10^5$ лет	α
	^{234}U	0+	0	$2,45 \cdot 10^5$ лет	α
	^{235}U	7/2—	—0,3	$7,04 \cdot 10^8$ лет	α
	^{236}U	0+	0	$2,34 \cdot 10^7$ лет	α
	^{237}U	1/2+	—	6,75 сут	β —
	^{238}U	0+	0	$4,47 \cdot 10^9$ лет	α
	^{239}U	5/2+	—	0,39 ч	β —
	^{240}U	0+	0	14,1 ч	β —
93	^{231}Np	5/2	—	0,81 ч	EC, α
	^{232}Np	4+	—	0,25 ч	EC
	^{233}Np	5/2+	—	0,60 ч	EC, α
	^{234}Np	0+	—	4,4 сут	EC, β +
	^{235}Np	5/2+	—	1,1 года	EC, α
	^{236}Np	6—	—	$1,1 \cdot 10^6$ лет	EC, β —
	^{237}Np	5/2+	3,1	$2,14 \cdot 10^6$ лет	α
	^{238}Np	2+	—	2,12 сут	β —
	^{239}Np	5/2+	0,3	2,35 сут	β —
	^{240}Np	5+	—	1,1 ч	β —
	^{241}Np	5/2+	—	0,27 ч	β —
94	^{232}Pu	0+	0	0,57 ч	EC, α
	^{233}Pu	—	—	0,35 ч	EC, α
	^{234}Pu	0+	0	8,8 ч	EC, α
	^{235}Pu	5/2+	—	0,42 ч	EC, α
	^{236}Pu	0+	0	2,85 года	α
	^{237}Pu	7/2—	—	45,3 сут	EC, α
	^{238}Pu	0+	0	87,7 года	α
	^{239}Pu	1/2+	0,20	$2,41 \cdot 10^4$ лет	α
	^{240}Pu	0+	0	6540 лет	α
	^{241}Pu	5/2+	—0,71	14,4 года	β —, α
	^{242}Pu	0+	0	$3,8 \cdot 10^5$ лет	α
	^{243}Pu	7/2+	—	4,96 ч	β —
	^{244}Pu	0+	0	$8,1 \cdot 10^7$ лет	α
	^{245}Pu	9/2—	—	10,5 ч	β —
95	^{246}Pu	0+	0	10,8 сут	β —
	^{237}Am	5/2—	—	1,2 ч	EC, α
	^{238}Am	1+	—	1,63 ч	EC, α
	^{239}Am	5/2—	—	12 ч	EC, α
	^{240}Am	3—	—	2,1 сут	EC, α
	^{241}Am	5/2—	1,6	432 года	α
	^{242}Am	1—	0,39	16,0 ч	β —, EC
	^{243}Am	5/2—	1,6	$7,4 \cdot 10^3$ лет	α
	^{244}Am	6—	—	10,1 ч	β —
	^{245}Am	5/2+	—	2,05 ч	β —
	^{246}Am	7—	—	0,65 ч	β —
	^{247}Am	5/2	—	0,37 ч	β —
96	^{238}Cm	0+	0	2,4 ч	EC, α
	^{239}Cm	7/2—	—	3 ч	EC
	^{240}Cm	0+	0	27 сут	α
	^{241}Cm	1/2+	—	33 сут	EC, α
	^{242}Cm	0+	0	163 сут	α

Атомный номер Z	Символ и массовое число	Спин ядра I и четность основного состояния	Магнитный момент в единицах ядерных магнетонов μ/μ_N	Период полураспада $T_{1/2}$	Канал распада
97	^{243}Cm	$5/2+$	$\pm 0,4$	28,5 года	α , EC
	^{244}Cm	$0+$	0	18,1 года	α
	^{245}Cm	$7/2+$	$\pm 0,5$	$8,5 \cdot 10^3$ лет	α
	^{246}Cm	$0+$	0	$4,7 \cdot 10^3$ лет	α
	^{247}Cm	$9/2-$	$\pm 0,4$	$1,56 \cdot 10^7$ лет	α
	^{248}Cm	$0+$	0	$3,4 \cdot 10^6$ лет	α , sf
	^{249}Cm	$1/2+$	—	1,07 ч	$\beta-$
	^{250}Cm	$0+$	0	7400 лет	sf
	^{251}Cm	$1/2+$	—	17 мин	$\beta-$
	^{243}Bk	$3/2-$	—	4,5 ч	EC , α
	^{244}Bk	4—	—	4,4 ч	EC , α
	^{245}Bk	$3/2-$	—	4,9 сут	EC , α
	^{246}Bk	2—	—	1,8 сут	EC
	^{247}Bk	$3/2-$	—	1400 лет	α
	^{248}Bk	1—	—	24 ч	$\beta-$, EC
98	^{249}Bk	$7/2+$	± 2	320 сут	β , α
	^{250}Bk	2—	—	3,2 ч	$\beta-$
	^{251}Bk	$3/2-$	—	0,93 ч	$\beta-$
	^{243}Cf	$1/2+$	—	0,18 ч	EC , α
	^{244}Cf	$0+$	0	0,32 ч	α
	^{245}Cf	—	—	0,73 ч	EC , α
	^{246}Cf	$0+$	0	1,5 сут	α
	^{247}Cf	$7/2+$	—	3,1 ч	EC , α
	^{248}Cf	$0+$	0	330 сут	α
	^{249}Cf	$9/2-$	—	351 год	α
	^{250}Cf	$0+$	0	13,1 года	α
	^{251}Cf	$1/2+$	—	900 лет	α
	^{252}Cf	$0+$	0	2,64 года	α , sf
	^{253}Cf	$7/2+$	—	17,8 сут	$\beta-$, α
	^{254}Cf	$0+$	0	60,5 сут	sf , α
	^{255}Cf	—	—	2 ч	$\beta-$
99	^{256}Cf	$0+$	0	12 мин	sf
	^{248}Es	(2—, $0+$)	—	0,45 ч	EC , α
	^{249}Es	$7/2+$	—	1,7 ч	EC , α
	^{250}Es	1—	—	2,2 ч	EC
	^{251}Es	$3/2-$	—	1,4 сут	EC , α
	^{252}Es	(5—, $4+$)	—	472 сут	α , EC
	^{253}Es	$7/2+$	4,1	20,5 сут	α
	^{254}Es	7+	—	276 сут	α
	^{255}Es	$7/2+$	—	40 сут	$\beta-$, α , sf
	^{256}Es	1+	—	22 мин	$\beta-$
100	^{250}Fm	$0+$	0	0,50 ч	α
	^{251}Fm	$9/2-$	—	5,3 ч	EC , α
	^{252}Fm	$0+$	0	25,4 ч	α
	^{253}Fm	$1/2+$	—	3,0 сут	EC , α
	^{254}Fm	$0+$	0	3,2 ч	α , sf
	^{255}Fm	$7/2+$	—	20,1 ч	α
	^{256}Fm	$0+$	0	2,6 ч	sf , α
	^{257}Fm	$9/2+$	—	100 сут	α , sf
101	^{255}Md	$7/2-$	—	0,45 ч	EC , α
	^{256}Md	—	—	1,3 ч	EC , α
	^{257}Md	$7/2-$	—	5,2 ч	EC , α
	^{258}Md	8—	—	55 сут	α
	^{259}Md	$7/2-$	—	1,6 ч	sf
	^{259}No	$9/2+$	—	1,0 ч	α , EC

2.2. АТОМНАЯ МАССА ЭЛЕМЕНТОВ И МАССЫ ИЗОТОПОВ

Приведенные ниже данные характеризуют атомные веса* элементов и массы наиболее распространенных или долгоживущих изотопов. Следуя терминологии, одобренной на XXX Генеральной Ассамблее Международного союза чистой и прикладной химии (IUPAC) (Давос, Швейцария, 1979 г.) «атомный вес (средняя относительная атомная масса) $A_r(E)$ элемента из данного образца определяется как отношение средней массы на атом элемента к $1/12$ массы атома ^{12}C . При этом предполагается, что: 1) атомные веса могут быть определены для произвольного образца; 2) атомные веса характеризуют атомы в невозбужденных электронных и ядерных состояниях; 3) «средняя масса на атом» в заданном образце рассчитывается путем деления суммарной массы элемента на полное число атомов рассматриваемого элемента; 4) публикуемые Комиссией по атомным весам элементов и распространенностям изотопов при IUPAC хронологические таблицы стандартных атомных весов элементов отражают наиболее высокий достигнутый уровень знаний об элементах в естественных образцах земного происхождения».

Ввиду наличия у большинства элементов изотопов, атомная масса элемента не может рассматриваться в качестве постоянной в природе величины, а зависит от происхождения образца, содержащего исследуемый элемент. Отсюда понятна важность установления согласованных значений рассматриваемой величины, учитывающих достигнутый уровень научных и технологических применений химических элементов. Эту задачу и взяла на себя упоминавшаяся выше Комиссия, которая каждые два года с учетом появившихся новых данных пересматривает рекомендованную таблицу стандартных атомных масс элементов. Приводимые ниже значения $A_r(E)$ соответствуют официальному бюллетеню IUPAC по данным за 1983 г. [1].

Погрешность в определении атомной массы элемента определяется суммарной погрешностью измерения масс изотопов и распространенности изотопов в исследуемом образце; эта полная погрешность и приведена в табл. 2.3. В принятой сейчас записи оцениваемая погрешность определения величины $A_r(E)$ либо указывается непосредственно, либо определяется видом последней цифры: если последняя цифра имеет нормальный размер, то оцениваемая погрешность $\leq \pm 1$ в этой значащей цифре. Значения атомной массы, заключенные в квадратные скобки, относятся к радиоактивным элементам, чью атомную массу нельзя определить достаточно точно, не указав источник происхождения элементов; приведенное в этом случае значение характеризует массовое число наиболее долгоживущего изотопа элемента.

По рекомендации упомянутой Комиссии значения атомных масс для почти половины элементов снабжены также дополнительными метками, информирующими пользователя о надежности приводимых данных:

g — известные геологические образцы с аномальным изотопным составом элементов, так что наблюдаемое в этих случаях отличие атомной массы от приведенного в табл. 2.3 значения может существенно превысить установленную погрешность измерений;

m — элемент, для которого могут иметь место заметные вариации величины $A_r(E)$ по отношению к приведенным в табл. 2.3 значениям из-за неидентифицированных или неумышленных изменений изотопного состава при разделении в коммерчески доступных образцах;

г — диапазон наблюдаемых вариаций изотопного состава в обычных образцах земного происхождения является препятствием на пути к более точному определению атомной массы элемента; затабулированные значения $A_r(E)$ следует относить к любому нормальному образцу;

A — радиоактивный элемент, не обладающий характерным изотопным составом в образцах земного происхождения;

X — за редкими исключениями торий обладает хорошо определенным (моноизотопным) составом в образцах минералов; однако в некоторых местах (осо-

* В отечественной литературе термин «атомный вес» заменен на «атомную массу».

бенно в морской воде) могут быть обнаружены измеримые количества изотопа ^{230}Th ;

Y — уран единственный элемент (среди тех, которые не обладают стабильными изотопами), имеющий характерное распределение долгоживущих изотопов в образцах земного происхождения, так что для него можно указать вполне определенное значение атомной массы;

* — элемент не обладает стабильными изотопами.

Помимо рекомендованных значений атомных масс элементов в табл. 2.3 включены также значения относительных масс для ряда распространенных в современной технологии изотопов [2—4]. Значения масс изотопов округлены таким образом, что возможные уточнения могут изменить лишь последнюю цифру в пределах ± 1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atomic weights of the elements — 1983/Prepared for publication by N. E. Holden, R. L. Martin. — Pure Appl. Chem., 1984, vol. 56, p. 653—674.

2. Element by element review of their atomic weights/Prepared for publication by H. S. Peiser, N. E. Holden. P. De Bièvre, I. L. Barnes. — Pure Appl. Chem., 1984, vol. 56, p.695—768.

3. DeBièvre P., Gallet M., Holden N. E., Barnes I. L. Isotopic abundances and atomic weights of the elements. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1984, vol. 13, p. 809.

4. Wapstra A. H., Bos K. — Atomic Data Nucl. Data Tabl., 1977, vol. 19, p. 177; Wapstra A. H., Gove N. B. — Nucl. Data Tabl., 1971, vol. 9, p. 265.

Т а б л и ц а 2.3. Атомная масса элементов $A_r(E)$ (на 1983 г.) и массы наиболее распространенных или долгоживущих изотопов: $A_r(^{12}\text{C}) = 12$

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$, а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
0	n	(Нейтрон)	—	—	1,0086650
1	H	Водород	1,00794 (7) ^{г. т. r}	^1H $^2\text{H (D)}$ $^3\text{H (T)}$	1,00782504 2,0141018 3,0160493
2	He	Гелий	4,002602 (2) ^{г. r}	^3He ^4He	3,0160293 4,002603
3	Li	Литий	6,941 (2) ^{г. т. r}	^6Li ^7Li	6,015123 7,016004
4	Be	Бериллий	9,01218	^9Be	9,012182
5	B	Бор	10,811 (5) ^{т. r}	^{10}B ^{11}B	10,012938 11,009305
6	C	Углерод	12,011 ^r	^{12}C ^{13}C	12 13,0033548

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$, а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
7	N	Азот	14,0067 ^g	¹⁴ N ¹⁵ N	14,0030740 15,0001090
8	O	Кислород	15,9994 (3) ^{g, r}	¹⁶ O ¹⁷ O ¹⁸ O	15,994915 16,999131 17,999159
9	F	Фтор	18,998403	¹⁹ F	18,998403
10	Ne	Неон	20,179 ^{g, m}	²⁰ Ne ²¹ Ne ²² Ne	19,992439 20,99385 21,991384
11	Na	Натрий	22,98977	²³ Na	22,989770
12	Mg	Магний	24,305	²⁴ Mg ²⁵ Mg ²⁶ Mg	23,985045 24,985839 25,982595
13	Al	Алюминий	26,98154	²⁷ Al	26,981541
14	Si	Кремний	28,0855 (3) ^r	²⁸ Si ²⁹ Si ³⁰ Si	27,976928 28,976496 29,973772
15	P	Фосфор	30,97376	³¹ P	30,973763
16	S	Сера	32,066 (6) ^r	³² S ³⁴ S	31,972072 33,967868
17	Cl	Хлор	35,453	³⁵ Cl ³⁷ Cl	34,9688527 36,9659026
18	Ar	Аргон	39,948 ^{g, r}	³⁶ Ar ³⁸ Ar ⁴⁰ Ar	35,967546 37,962732 39,962383
19	K	Калий	39,0983	³⁹ K ⁴¹ K	38,963708 40,961825
20	Ca	Кальций	40,078 (4) ^g	⁴⁰ Ca ⁴² Ca ⁴⁴ Ca	39,962591 41,958622 43,955485
21	Sc	Скандий	44,95591	⁴⁵ Sc	44,955914
22	Ti	Титан	47,88 (3)	⁴⁶ Ti ⁴⁷ Ti ⁴⁸ Ti ⁴⁹ Ti ⁵⁰ Ti	45,952633 46,951765 47,947947 48,947870 49,94479
23	V	Ванадий	50,9415	⁵¹ V	50,943962
24	Cr	Хром	51,9961 (6)	⁵⁰ Cr ⁵² Cr ⁵³ Cr ⁵⁴ Cr	49,946046 51,940510 52,940651 53,938882
25	Mn	Марганец	54,9380	⁵⁵ Mn	54,938046
26	Fe	Железо	55,847 (3)	⁵⁴ Fe ⁵⁶ Fe ⁵⁷ Fe	53,939612 55,934939 56,935396
27	Co	Кобальт	58,9332	⁵⁹ Co	58,933198
28	Ni	Никель	58,69	⁵⁸ Ni ⁶⁰ Ni ⁶¹ Ni ⁶² Ni ⁶⁴ Ni	57,935347 59,930789 60,931059 61,928346 63,927968

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$, а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
29	Cu	Медь	63,546 (3) ^r	⁶³ Cu	62,929599
30	Zn	Цинк	65,39 (2)	⁶⁵ Cu ⁶⁴ Zn ⁶⁶ Zn ⁶⁷ Zn ⁶⁸ Zn	64,92779 63,92915 65,926035 66,92713 67,92485
31	Ga	Галлий	69,723 (4)	⁶⁹ Ga ⁷¹ Ga	68,92558 70,92470
32	Ge	Германий	72,59 (3)	⁷⁰ Ge ⁷² Ge ⁷³ Ge ⁷⁴ Ge ⁷⁶ Ge	69,92425 71,92208 72,92346 73,92118 75,92140
33	As	Мышьяк	74,9216	⁷⁵ As	74,92160
34	Se	Селен	78,96 (3)	⁷⁶ Se ⁷⁷ Se ⁷⁸ Se ⁸⁰ Se ⁸² Se	75,91921 76,91991 77,91730 79,91652 81,91671
35	Br	Бром	79,904	⁷⁹ Br ⁸¹ Br	78,91834 80,91629
36	Kr	Криптон	83,80 ^g <i>m</i>	⁸⁰ Kr ⁸² Kr ⁸³ Kr ⁸⁴ Kr ⁸⁶ Kr	79,91637 81,91348 82,91413 83,91151 85,91061
37	Rb	Рубидий	85,4678 (3) ^g	⁸⁵ Rb ⁸⁷ Rb	84,91180 86,90918
38	Sr	Стронций	87,62 ^g	⁸⁶ Sr ⁸⁷ Sr ⁸⁸ Sr	85,90927 86,90889 87,90562
39	Y	Иттрий	88,9059	⁸⁹ Y	88,90586
40	Zr	Цирконий	91,224 (2) ^g	⁹⁰ Zr ⁹¹ Zr ⁹² Zr ⁹⁴ Zr ⁹⁶ Zr	89,90471 90,90564 91,90504 93,90632 95,90827
41	Nb	Ниобий	92,9064	⁹³ Nb	92,90638
42	Mo	Молибден	95,94	⁹² Mo ⁹⁴ Mo ⁹⁵ Mo ⁹⁶ Mo ⁹⁷ Mo ⁹⁸ Mo ¹⁰⁰ Mo	91,90681 93,90509 94,90584 95,90468 96,90602 97,90540 99,90747
43	Tc	Технеций*	[98] ^A	⁹⁷ Tc ⁹⁸ Tc ⁹⁹ Tc	96,90636 97,90721 98,90625
44	Ru	Рутений	101,07 (2) ^g	⁹⁶ Ru ⁹⁸ Ru ⁹⁹ Ru	95,90760 97,90529 98,90594

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$, а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
				^{100}Ru	99,90422
				^{101}Ru	100,90558
				^{102}Ru	101,90435
				^{104}Ru	103,90542
45	Rh	Родий	102,9055	^{103}Rh	102,90550
46	Pd	Палладий	106,42 ^g	^{102}Pd	101,90561
				^{104}Pd	103,90403
				^{106}Pd	104,90507
				^{108}Pd	105,90347
				^{108}Pd	107,90389
				^{110}Pd	109,90517
47	Ag	Серебро	107,8682 (3) ^g	^{107}Ag	106,90509
				^{109}Ag	108,90475
48	Cd	Кадмий	112,41 ^g	^{106}Cd	105,90646
				^{110}Cd	109,90301
				^{111}Cd	110,90418
				^{112}Cd	111,90276
				^{113}Cd	112,90440
				^{114}Cd	113,90336
				^{116}Cd	115,90476
49	In	Индий	114,82 ^g	^{113}In	112,90406
				^{115}In	114,90387
50	Sn	Олово	118,710 (7)	^{116}Sn	115,90174
				^{117}Sn	116,90295
				^{118}Sn	117,90161
				^{119}Sn	118,90331
				^{120}Sn	119,90220
				^{122}Sn	121,90344
				^{124}Sn	123,90527
51	Sb	Сурьма	121,75 (3)	^{121}Sb	120,90382
				^{123}Sb	122,90422
52	Te	Теллур	127,60 (3) ^g	^{122}Te	121,90305
				^{124}Te	123,90282
				^{125}Te	124,90443
				^{126}Te	125,90331
				^{128}Te	127,90446
				^{130}Te	129,90623
53	I	Иод	126,9045	^{127}I	126,90448
54	Xe	Ксенон	131,29 (3) ^{g. m}	^{124}Xe	123,9061
				^{126}Xe	125,90428
				^{128}Xe	127,90353
				^{129}Xe	128,90478
				^{130}Xe	129,90351
				^{131}Xe	130,90508
				^{132}Xe	131,90415
				^{134}Xe	133,90539
				^{136}Xe	135,90722
55	Cs	Цезий	132,9054	^{133}Cs	132,90543
56	Ba	Барий	137,33 ^g	^{134}Ba	133,90449
				^{136}Ba	134,90567
				^{138}Ba	135,90456
				^{137}Ba	136,90582
				^{138}Ba	137,90524

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$. а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
57	La	Лантан	138,9055 (3) ^g	¹³⁸ La ¹³⁹ La	137,90711 138,90635
58	Ce	Церий	140,12 ^g	¹⁴⁰ Ce ¹⁴² Ce	139,90544 141,90925
59	Pr	Празеодим	140,9077	¹⁴¹ Pr	140,90766
60	Nd	Неодим	144,24 (3) ^g	¹⁴² Nd ¹⁴³ Nd ¹⁴⁴ Nd ¹⁴⁵ Nd ¹⁴⁶ Nd ¹⁴⁸ Nd ¹⁵⁰ Nd	141,90773 142,90982 143,91010 144,91258 145,91313 147,91690 149,92090
61	Pm	Прометий*	[145] ^A	¹⁴⁵ Pm ¹⁴⁶ Pm ¹⁴⁷ Pm	144,91275 145,91472 146,91515
62	Sm	Самарий	150,36 (3) ^g	¹⁴⁴ Sm ¹⁴⁷ Sm ¹⁴⁸ Sm ¹⁴⁹ Sm ¹⁵⁰ Sm ¹⁵² Sm ¹⁵⁴ Sm	143,91201 146,91491 147,91483 148,91719 149,91728 151,91974 153,92222
63	Eu	Европий	151,96 ^g	¹⁵¹ Eu ¹⁵⁹ Eu	150,91986 152,92124
64	Gd	Гадолиний	157,25 (3) ^g	¹⁵⁴ Gd ¹⁵⁶ Gd ¹⁵⁷ Gd ¹⁵⁸ Gd ¹⁶⁰ Gd	153,92088 154,92263 155,92213 156,92397 157,92411
65	Tb	Тербий	158,9254	¹⁶⁰ Gd ¹⁵⁹ Tb	159,92706 158,92535
66	Dy	Диспрозий	162,50 (3) ^g	¹⁶⁰ Dy ¹⁶¹ Dy ¹⁶² Dy ¹⁶³ Dy ¹⁶⁴ Dy	159,92520 160,92694 161,92680 162,92874 163,92918
67	Ho	Гольмий	164,9304	¹⁶⁵ Ho	164,93033
68	Er	Эрбий	167,26 (3) ^g	¹⁶⁴ Er ¹⁶⁶ Er ¹⁶⁷ Er ¹⁶⁸ Er ¹⁷⁰ Er	163,92921 165,93030 166,93206 167,93238 169,93548
69	Tm	Тулий	168,9342	¹⁶⁹ Tm	168,93422
70	Yb	Иттербий	173,04 (3) ^g	¹⁷⁰ Yb ¹⁷¹ Yb ¹⁷² Yb ¹⁷³ Yb ¹⁷⁴ Yb ¹⁷⁶ Yb	169,93477 170,93634 171,93639 172,93822 173,93887 175,94258
71	Lu	Лютеций	174,967 ^g	¹⁷⁵ Lu ¹⁷⁶ Lu	175,94078 175,94269

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса A_r (Е). а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
72	Hf	Гафний	178,49 (3)	¹⁷⁶ Hf ¹⁷⁷ Hf ¹⁷⁸ Hf ¹⁷⁹ Hf ¹⁸⁰ Hf	175,94142 176,94323 177,94371 178,94583 179,94656
73	Ta	Тантал	180,9479	¹⁸⁰ Ta ¹⁸¹ Ta	179,94749 180,94801
74	W	Вольфрам	183,85 (3)	¹⁸² W ¹⁸³ W ¹⁸⁴ W ¹⁸⁶ W	181,94822 182,95024 183,95095 185,95438
75	Re	Рений	186,207	¹⁸⁵ Re ¹⁸⁷ Re	184,95298 186,95576
76	Os	Осмий	190,2 ^g	¹⁸⁶ Os ¹⁸⁷ Os ¹⁸⁸ Os ¹⁸⁹ Os ¹⁹⁰ Os ¹⁹² Os	185,95385 186,95576 187,95585 188,95816 189,95845 191,96149
77	Ir	Иридий	192,22 (3)	¹⁹¹ Ir ¹⁹³ Ir	190,96060 192,96294
78	Pt	Платина	195,08 (3)	¹⁹⁴ Pt ¹⁹⁵ Pt ¹⁹⁶ Pt ¹⁹⁸ Pt	193,96268 194,96478 195,96495 197,96788
79	Au	Золото	196,9665	¹⁹⁷ Au	196,96656
80	Hg	Ртуть	200,59 (3)	¹⁹⁸ Hg ¹⁹⁹ Hg ²⁰⁰ Hg ²⁰¹ Hg ²⁰² Hg ²⁰⁴ Hg	197,96676 198,96827 199,96832 200,97029 201,97063 203,97348
81	Tl	Таллий	204,383	²⁰³ Tl ²⁰⁵ Tl	202,97234 204,97441
82	Pb	Свинец	207,2 ^g	²⁰⁴ Pb ²⁰⁶ Pb ²⁰⁷ Pb ²⁰⁸ Pb	203,97304 205,97445 206,97588 207,97664
83	Bi	Висмут	208,9804	²⁰⁹ Bi	208,98039
84	Po	Полоний*	[209] ^A	²⁰⁸ Po ²⁰⁹ Po ²¹⁰ Po	207,98124 208,98242 209,98286
85	At	Астат*	[210] ^A	²⁰⁸ At ²¹⁰ At ²¹¹ At	208,98616 209,98714 210,98749
86	Rn	Радон*	[222] ^A	²¹¹ Rn ²²² Rn	210,99059 222,01757
87	Fr	Франций*	[223] ^A	²¹² Fr ²²³ Fr	211,9960 222,0175
88	Ra	Радий*	[226] ^A	²²³ Fr ²²⁶ Ra ²²⁸ Ra	223,01973 226,02541 228,03107

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса $A_r(E)$, а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
89	Ac	Актиний*	[227] ^A	²²⁵ Ac ²²⁷ Ac	225,02322 227,02775
90	Th	Торий*	232,0381g. X	²²⁹ Th ²³⁰ Th ²³² Th	229,03176 230,03313 232,03805
91	Ra	Протактиний*	[231] ^A	²³⁰ Ra ²³¹ Ra ²³³ Ra	230,03453 231,03588 233,04024
92	U	Уран*	238,0289g. m, Y	²³² U ²³³ U ²³⁴ U ²³⁵ U ²³⁶ U ²³⁸ U	232,03714 233,03963 234,04095 235,04393 236,04556 238,05079
93	Np	Нептуний*	[237] ^A	²³⁵ Np ²³⁶ Np ²³⁷ Np	235,04406 236,04662 237,04817
94	Pu	Плутоний*	[244] ^A	²³⁸ Pu ²³⁹ Pu ²⁴⁰ Pu ²⁴¹ Pu ²⁴² Pu ²⁴⁴ Pu	238,04956 239,05216 240,05381 241,05685 242,05874 244,06420
95	Am	Америций*	[243] ^A	²⁴¹ Am ²⁴³ Am	241,05682 243,06137
96	Cm	Кюрий*	[247] ^A	²⁴² Cm ²⁴³ Cm ²⁴⁴ Cm ²⁴⁵ Cm ²⁴⁶ Cm ²⁴⁷ Cm ²⁴⁸ Cm ²⁵⁰ Cm	242,05883 243,06138 244,06275 245,06549 246,06722 247,07035 248,07234 250,07835
97	Bk	Берклий*	[247] ^A	²⁴⁷ Bk ²⁴⁹ Bk	247,07030 249,07498
98	Cf	Калифорний*	[251] ^A	²⁴⁸ Cf ²⁴⁹ Cf ²⁵⁰ Cf ²⁵¹ Cf ²⁵² Cf ²⁵⁴ Cf	248,0722 249,07485 250,07640 251,07958 252,08162 254,08732
99	Es	Эйнштейний*	[252] ^A	²⁵² Es ²⁵³ Es ²⁵⁴ Es	252,0828 253,08482 254,08802
100	Fm	Фермий*	[257] ^A	²⁵² Fm ²⁵³ Fm ²⁵⁵ Fm ²⁵⁷ Fm	252,08247 253,08518 255,08996 257,09510
101	Md	Менделевий*	[258] ^A	²⁵⁸ Md	258,0986

Атомный номер Z	Символ элемента	Название элемента	Атомная масса A_r (Е), а. е. м.	Символ и массовое число нуклида A_X	Масса нуклида, а. е. м.
102	No	Нобелий*	[259] ^A	²⁵² No ²⁵⁶ No ²⁵⁹ No 2 ⁰ Lr	252,0890 256,0943 259,1009 260,1054
103	Lr	Лоуренсий*	[260] ^A		
104	(Unq)	(Уннилкавдий*)	[261] ^A	²⁶¹ (Unq)	261,1087
105	(Unp)	(Уннилпентий*)	[262] ^A	²⁶² (Unp)	262,1138
106	(Unh)	(Уннилгексий*)	[263] ^A	²⁶³ (Unh)	263,1184
107	(Uns)	(Уннилсептий*)	[262] ^A	²⁶² (Uns)	—

ГЛАВА 3

СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

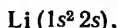
3.1. ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНФИГУРАЦИИ И ТЕРМЫ ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ

Состояния электронов в атоме. Строго говоря, состояния системы электронов и ядра, образующих атомную частицу, можно рассматривать только в целом. Приближенная и наиболее употребительная модель атомной частицы связана с представлением, согласно которому каждый электрон движется в некотором эффективном центрально-симметрическом поле, созданном ядром и всеми остальными электронами (или, как говорят, в самосогласованном поле).

В нерелятивистском приближении характер движения отдельного электрона в центральном поле полностью определяется значениями его орбитального момента количества движения $l=0, 1, 2, \dots$, проекцией этого момента на некоторое направление $l_z=m=l, l-1, \dots, -l$, а также энергией (все моменты частиц в квантовой механике измеряются в единицах \hbar — постоянной Планка, которую для краткости опускают). Для обозначения состояний с различными l существует общепринятая символика, устанавливающая их соответствие с буквами латинского алфавита:

l , ед. \hbar	0	1	2	3	4	5	6
Принятое обозначение	s	p	d	f	g	h	i

Состояния электрона с заданным l нумеруют в порядке возрастания их энергии главным квантовым числом n , пробегающим значения $l+1, l+2, \dots$. Состояния отдельных электронов с различными n и l принято обозначать символом, состоящим из цифры, указывающей значение n , и буквы, указывающей значение l , а если имеется несколько электронов с одинаковыми значениями n и l , то их число обозначают в виде соответствующего показателя степени. Например, совокупность электронов в атоме лития в основном состоянии обозначается следующим образом:



так что два электрона находятся в состоянии с главным квантовым числом 1 и нулевым орбитальным моментом, а один — в состоянии с $n=2$ и $l=0$. Аналогично внешние электроны атома железа в основном состоянии заполняют состояния $\text{Fe}(3d^6 4s^2)$, т. е. шесть электронов находятся в состоянии с $n=3$ и $l=2$, а два — в состоянии с $n=4$ и $l=0$. О распределении электронов в атомной части-

це по состояниям с различными значениями n и l говорят как об *электронной конфигурации*.

Далее, каждое состояние электрона в центральном поле характеризуется определенной *четностью*, зависящей целиком от его орбитального момента l . Четные состояния отвечают четным l , и соответствующая волновая функция электрона не меняется при преобразовании инверсии координат, и наоборот, т. е. четность состояния с данным l есть

$$P = (-1)^l.$$

Соответственно состояние системы невзаимодействующих электронов четно, если сумма моментов частиц принимает четные значения, так что имеем $P = (-1)^{\sum l_i}$.

Классификация состояний электронов по их четности необходима для установления правил отбора для излучательных переходов атомных частиц.

Наконец, любой частице следует приписать наличие собственного момента количества движения (спина) s и проекции спина на выбранное направление s_z , которые не связаны с ее движением в пространстве. Для электрона $s=1/2$, а $s_z = \pm 1/2$ (в единицах \hbar). В итоге полная характеристика состояния электрона осуществляется заданием четырех квантовых чисел: n , l , l_z и s_z . При заданных числах n и l имеется $2(2l+1)$ состояний электрона с различными значениями чисел l_z и s_z (*вырождение уровня nl*). Поскольку из-за принципа Паули в каждом состоянии с квантовыми числами n , l , l_z , s_z может находиться только один электрон, не более чем $2(2l+1)$ электронов в атомной частице могут иметь одинаковые значения n и l ; электроны, обладающие этим последним свойством, называют *эквивалентными*, а их совокупность образует заполненную либо незаполненную *оболочку* данного типа. Таким образом, в заполненной s -оболочке имеются 2 электрона, в p — 6 электронов, в d — 10 электронов, в f — 14 электронов и т. д. Впрочем, используется также терминология, согласно которой об электронах с главными квантовыми числами $n=1, 2, 3, 4, 5, 6...$ говорят как об электронах соответственно K -, L -, M -, N -, O -, P -... оболочек, так что в K -оболочке могут находиться 2 электрона ($1s^2$), в L — 8 электронов ($2s^2 2p^2$), в M — 18 электронов ($3s^2 3p^6 3d^{10}$), в N — 32 электрона ($4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{14}$) и т. д.

Учет релятивистских эффектов приводит к тому, что энергия электрона начинает зависеть от взаимной ориентации его моментов l и s , которые отдельно уже не сохраняются; в итоге каждый уровень энергии электрона nl должен характеризоваться значением полного момента электрона $j=l \pm 1/2$ (*тонкое расщепление уровней*), которое принято указывать справа внизу после спектроскопического обозначения l , например, $np_{1/2}$ или $nd_{5/2}$ и т. д. К уровню энергии электрона nlj относятся $(2j+1)$ состояний, отличающихся значением проекции его полного момента $m_j = l_z + s_z$. Правило отбора по квантовому числу j имеет вид $\Delta j = 0, \pm 1$, а совокупность линий, образованных переходами между компонентами тонкой структуры уровней nl и $n'l'$, называется *мультиплетом* (оптические переходы $nlj \rightarrow n'l'j'$).

Систематика уровней атомных частиц. Приведем принятые в спектроскопии обозначения электронных состояний атомов и атомных ионов. В приближении центрального поля энергия атомной частицы полностью определяется заданием электронной конфигурации $\{nl\}$. Если учесть нецентральные электростатические межэлектронные взаимодействия и спин-орбитальное взаимодействие электронов, то уровень энергии $n_1l_1, n_2l_2...$ расщепляется на целый ряд подуровней. Практически оказалось достаточным строить систематику этих подуровней на основе двух предельных подходов, когда одно из отмеченных выше взаимодействий считается малым по сравнению с другим. Экспериментальные данные показывают, что при переходе от легких элементов к тяжелым происходит более или менее непрерывный переход от случая, когда электростатическое взаимодействие превышает спин-орбитальное (LS -связь), к обратному случаю (jj -связь), хотя последний случай в чистом виде встречается редко и гораздо большее значение имеет промежуточный тип связи.

Учет только электростатического взаимодействия электронов приводит к расщеплению уровня, соответствующего заданной электронной конфигурации, на ряд подуровней (*термов*), характеризующихся квантовыми числами полного орбитального момента электронов L и полного спина электронов S . Возможные зна-

чения L и S находят, применяя общие правила сложения моментов отдельных электронов l_i и s_i и принцип Паули; для значений полного момента L принята символика:

L , ед. \hbar	...	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Принятое обозначение	...	S	P	D	F	G	H	I	K	L

Четность состояний, относящихся к данному терму LS , отмечают индексом справа вверху от L (° — нечетное состояние, четные состояния никак не отмечают). Если принять во внимание релятивистские эффекты, то терм LS расщепится на ряд компонент (тонкое расщепление), которым отвечают различные значения полного момента электронов $J = L + S$, пробегающие при заданных L и S диапазон $L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$. В итоге уровни энергии атомной частицы в этом приближении характеризуют заданными значениями L, S, J и четностью с помощью принятого обозначения

$$2S+1L_J^\circ,$$

где слева вверху указана мультиплетность терма $(2S+1)$, отмечающая при $L > S$ число уровней с различными J для терма LS , а справа внизу указан полный момент электронов J . Например $2P_{3/2}^\circ$ означает нечетный уровень энергии с $L=1, S=1/2, J=3/2$, а уровню 3D_4 отвечают квантовые числа $L=2, S=2, J=4$ и положительная четность состояния. Наконец, отметим, что в рассматриваемом приближении каждый уровень с заданными L, S, J остается вырожденным по направлениям вектора J ; кратность этого вырождения $(2J+1)$. Поскольку к терму LS относятся всего $(2L+1)(2S+1)$ состояний, различающихся значениями проекций момента на выделенное направление, а сумма $\sum_J (2J+1) = (2L+1)(2S+1)$, если перебрать все возможные для данных LS значения J , в итоге получаем, что спин-орбитальное взаимодействие не меняет числа состояний для терма LS .

Для рассмотренного выше случая LS -связи типична группировка уровней энергии, когда расстояние между разными термами одной электронной конфигурации значительно меньше, чем между одинаковыми термами разных конфигураций; кроме того, расстояние между соседними термами существенно превышает разность между компонентами тонкой структуры каждого из термов (фактически это и составляет условие относительной малости релятивистских эффектов).

Эмпирически было установлено, что для заданной электронной конфигурации наименьшей энергией обладает терм с наибольшим возможным значением S и наибольшим (возможным при этом S) значением L (правило Хунда).

В случае jj -связи спин-орбитальное взаимодействие электронов существенно превышает электростатическое межэлектронное взаимодействие (точнее, ту его часть, которая связана с зависимостью энергии от квантовых чисел L и S) и можно говорить лишь о сохранении полного момента электрона j , поскольку моменты l и s в отдельности не сохраняются. При этом состояние каждого электрона задается четырьмя квантовыми числами $nljm_j$, причем при заданном j имеем $l = j \pm 1/2$. Если отбросить электростатическое взаимодействие электронов, то энергия каждого электрона будет зависеть только от значений nlj , а каждое j -состояние будет $(2j+1)$ -кратно вырождено; энергия уровня атомной частицы определяется набором квантовых чисел $n_i l_i j_i$ для каждого электрона. Если учесть электростатическое взаимодействие электронов, то уровень энергии $\{n_i l_i j_i\}$ расщепится на ряд подуровней, характеризуемых значениями полного момента электронной подсистемы J . Возможные значения J находят сложением моментов j_i в полный момент заданной электронной конфигурации и учетом принципа Паули. Состояния с заданными значениями моментов j_1, j_2 и J обозначают

$$(j_1 j_2)J,$$

так что $|j_1 - j_2| \leq J \leq j_1 + j_2$. Для данной электронной конфигурации общее число уровней с заданным значением J одинаково как в случае LS -связи, так и в случае jj -связи.

Для сильновозбужденных состояний некоторых атомных частиц (в частности, атомов благородных газов, атома Cl и др.) реализуется случай промежу-

точной jl -связи, когда спин-орбитальное взаимодействие электронов атомного остатка превышает электростатическое взаимодействие сильновозбужденного валентного электрона с электронами атомного остова. При этом атомный остов можно характеризовать значениями орбитального и спинового моментов, а его связь с сильновозбужденным электроном описывать в приближении jj -связи. Пусть квантовые числа L , S и j характеризуют моменты электронов атомного остова, а l — возбужденного электрона. Состояние $LSjl$ при учете электростатического взаимодействия выделенного электрона с атомным остовом даст ряд подуровней, каждому из которых отнесено значение квантового числа K суммарного момента $j+l=K$. С учетом спин-орбитального взаимодействия возбужденного электрона каждый из уровней $LSjlK$ распадается на две компоненты, которым надо приписать значения полного момента электронов атомной частицы J , причем $J=K\pm 1/2$.

В итоге уровень энергии рассматриваемой атомной частицы характеризуется набором квантовых чисел $LSjlKJ$, который условились обозначать следующим образом:

$$2S+1 L_j n l [K] J,$$

где n — главное квантовое число валентного электрона. Для случая jl -связи характерна группировка уровней энергии, когда расстояние между уровнями $LSjlK$ и $LSj'lK'$ существенно меньше аналогичного показателя для уровней $LSjlK$ и $L'S'j'lK$, относящихся к разным состояниям атомного остова, и много больше дублетного расщепления уровня $LSjlK$ по квантовому числу J .

Электронные конфигурации и термы основных состояний атомов. Основным состоянием атомной частицы называется состояние с наименьшей возможной энергией. При переходе от одного невозбужденного атома к другому увеличивается на единицу заряд Z и к электронной оболочке добавляется один электрон, который занимает наинизшее из незанятых состояний, разрешенных принципом Паули. Энергия связи добавляемого электрона изменяется в целом немонотонно по мере роста атомного номера элемента Z , и последовательное заполнение электронных оболочек нарушается из-за своеобразной конкуренции между ns -, nd - и nf -состояниями. Это связано с особенностью d - и f -состояний, когда электрон находится существенно ближе к ядру, чем в s - и p -состояниях. В итоге последовательно заполняющиеся группы состояний электронов можно распределить следующим образом:

1s	2 электрона
2s2p	8 электронов
3s3p	8 электронов
4s3d4p	18 электронов
5s4d5p	18 электронов
6s4f5d6p	32 электрона
7s6d5f	

Элементы с заполненными d - и f -оболочками (или не содержащие их вовсе) называют элементами *главных групп*, а все элементы с заполняющимися d - и f -оболочками — элементами *промежуточных групп*. В табл. 3.1 и 3.2 приведены электронные конфигурации и термы основных состояний этих элементов. В табл. 3.2 представлены конфигурации электронов сверх заполненных оболочек. Индекс внизу слева у символа элемента указывает его атомный номер в периодической таблице, соответствующий заряду ядра Z .

Представленная выше информация почерпнута из общих руководств по нерелятивистской квантовой механике атомов (см., например, [1, 2]) и теории атомных спектров [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Квантовая механика. 3-е изд.— М.: Наука, 1974.
2. Condon E. U., Odabasi N. Atomic Structure. — Lond.: Cambridge University Press, 1980.
3. Собельман И. И. Введение в теорию атомных спектров.— М.: Физматгиз, 1963.

Т а б л и ц а 3.1. Электронные конфигурации и термы элементов главных групп

Главное квантовое число n	Заполняющиеся электронные оболочки								Заполненные электронные оболочки
	ns	ns^2	s^2np	s^2np^2	s^2np^3	s^2np^4	s^2np^5	s^2np^6	
2	3Li	4Be	5B	6C	7N	8O	9F	10Ne	$1s^2$
3	11Na	12Mg	13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar	$2s^22p^6$
4	19K	20Ca	—	—	—	—	—	—	$3s^23p^6$
4	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr	$3d^{10}$
5	37Rb	38Sr	—	—	—	—	—	—	$4s^24p^6$
5	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe	$4d^{10}$
6	55Cs	56Ba	—	—	—	—	—	—	$5s^25p^6$
6	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn	$4f^{14}5d^{10}$
7	87Fr	88Ra	—	—	—	—	—	—	$6s^26p^6$
Терм основ-ного состоя-ния	$^2S_{1/2}$	1S_0	$^2P_{1/2}^\circ$	3P_0	$^4S_{3/2}^\circ$	3P_2	$^2P_{3/2}^\circ$	1S_0	

Т а б л и ц а 3.2. Электронные конфигурации и термы элементов промежуточных групп

Атом	Электронная конфигурация валентной оболочки	Терм основного состояния
------	---	--------------------------

1. Группа железа (заполненные оболочки $18\text{Ar} +$ заполняющиеся оболочки $4s, 3d$)

21Sc	$3d4s^2$	$^2D_{3/2}$
22Ti	$3d^24s^2$	3F_2
23V	$3d^34s^2$	$^4F_{3/2}$
24Cr	$3d^54s$	7S_3
25Mn	$3d^54s^2$	$^6S_{5/2}$
26Fe	$3d^64s^2$	5D_4
27Co	$3d^74s^2$	$^4F_{9/2}$
28Ni	$3d^84s^2$	3F_4

2. Группа палладия (заполненные оболочки $36\text{Kr} +$ заполняющиеся оболочки $5s, 4d$)

39Y	$4d5s^2$	$^2D_{3/2}$
40Zr	$4d^25s^2$	3F_2
41Nb	$4d^45s$	$^6D_{1/2}$
42Mo	$4d^55s$	7S_3
43Tc	$4d^55s^2$	$^6S_{5/2}$
44Ru	$4d^75s$	5F_5
45Rh	$4d^85s$	$^4F_{9/2}$
46Pd	$4d^{10}$	1S_0

Атом	Электронная конфигурация валентной оболочки	Терм основного состояния
3. Группа платины ($_{57}\text{La}$ содержит заполненные оболочки $_{54}\text{Xe}$ + оболочку $6s^25d$; все остальные элементы содержат заполненные оболочки $_{54}\text{Xe}$ + заполненную оболочку $4f$ + заполняющиеся оболочки $6s$, $5d$)		
$_{57}\text{La}$	$5d6s^2$	$^2D_{3/2}$
$_{71}\text{Lu}$	$5d6s^2$	$^2D_{3/2}$
$_{72}\text{Hf}$	$5d^26s^2$	3F_2
$_{73}\text{Ta}$	$5d^36s^2$	$^4F_{3/2}$
$_{74}\text{W}$	$5d^46s^2$	5D_0
$_{75}\text{Re}$	$5d^56s^2$	$^6S_{5/2}$
$_{76}\text{Os}$	$5d^66s^2$	5D_4
$_{77}\text{Ir}$	$5d^76s^2$	$^4F_{9/2}$
$_{78}\text{Pt}$	$5d^96s$	3D_3
4. Группа редкоземельных элементов (заполненные оболочки $_{54}\text{Xe}$ + заполняющиеся оболочки $6s$, $4f$ и $5d$)		
$_{58}\text{Ce}$	$4f5d6s^2$	$^1G_4^\circ$
$_{59}\text{Pr}$	$4f^36s^2$	$^4I_{9/2}^\circ$
$_{60}\text{Nd}$	$4f^46s^2$	$^5I_4^\circ$
$_{61}\text{Pm}$	$4f^56s^2$	$^6H_{5/2}^\circ$
$_{62}\text{Sm}$	$4f^66s^2$	$^7F_0^\circ$
$_{63}\text{Eu}$	$4f^76s^2$	$^8S_{7/2}^\circ$
$_{64}\text{Gd}$	$4f^75d6s^2$	$^9D_2^\circ$
$_{65}\text{Tb}$	$4f^96s^2$	$^6H_{15/2}^\circ$
$_{66}\text{Dy}$	$4f^{10}6s^2$	$^5I_8^\circ$
$_{67}\text{Ho}$	$4f^{11}6s^2$	$^4I_{15/2}^\circ$
$_{68}\text{Er}$	$4f^{12}6s^2$	$^3H_6^\circ$
$_{69}\text{Tm}$	$4f^{13}6s^2$	$^2F_{7/2}^\circ$
$_{70}\text{Yb}$	$4f^{14}6s^2$	$^1S_0^\circ$
5. Группа актиноидов (заполненные оболочки $_{86}\text{Rn}$ + заполняющиеся оболочки $7s$, $7p$, $5f$ и $6d$)		
$_{89}\text{Ac}$	$6d7s^2$	$^2D_{3/2}$
$_{90}\text{Th}$	$6d^27s^2$	3F_2
$_{91}\text{Pa}$	$5f^2(^3H_4)6d7s^2$	$^4K_{11/2}^\circ$
$_{92}\text{U}$	$5f^3(^4I_{9/2}^\circ)6d7s^2$	$^5L_6^\circ$
$_{93}\text{Np}$	$5f^4(^5I_4)6d7s^2$	$^6L_{11/2}^\circ$
$_{94}\text{Pu}$	$5f^67s^2$	$^7F_0^\circ$
$_{95}\text{Am}$	$5f^77s^2$	$^8S_{7/2}^\circ$
$_{96}\text{Cm}$	$5f^7(^8S_{7/2}^\circ)6d7s^2$	$^9D_2^\circ$
$_{97}\text{Bk}$	$5f^97s^2$	$^6H_{15/2}^\circ$
$_{98}\text{Cf}$	$5f^{10}7s^2$	$^5I_8^\circ$
$_{99}\text{Es}$	$5f^{11}7s^2$	$^4I_{15/2}^\circ$
$_{100}\text{Fm}$	$5f^{12}7s^2$	$^3H_6^\circ$
$_{101}\text{Md}$	$5f^{13}7s^2$	$^2F_{7/2}^\circ$
$_{102}\text{No}$	$5f^{14}s^2$	$^1S_0^\circ$
$_{103}\text{Lr}$	$7s^27p$	$^2P_{1/2}^\circ$

3.2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Особенности строения электронных оболочек и связанные с ними физико-химические свойства атомов нашли свое отражение в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Согласно принятому в настоящее время способу все элементы в природе подразделяют таблично горизонтальными строками на семь периодов и вертикальными столбцами на восемь групп, условно вынося часть элементов за границы указанного деления ($_{27}\text{Co}$, $_{28}\text{Ni}$, $_{45}\text{Rh}$, $_{46}\text{Pd}$, $_{77}\text{Ir}$, $_{78}\text{Pt}$, лантаноиды и актиноиды).

3.3. ПАРАМЕТРЫ ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАХ, ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНАХ

Данные о структуре электронных оболочек атомных частиц представляют интерес для физики атомных столкновений, молекулярной физики, физики твердого тела и т. п. С появлением быстродействующих ЭВМ и эффективных программ решений соответствующих волновых уравнений (в приближении самосогласованного поля) результаты численных расчетов уровней энергии многоэлектронных систем и распределений электронной плотности превратились в надежный источник сведений о структуре изолированных атомов и ионов.

В табл. 3.3—3.5 приведены параметры радиальных волновых функций внешних (валентных) электронов атомных частиц с зарядом ядра $Z \lesssim 90$. Эти функции заданы в аналитическом виде и получены путем разложения в ряд по базису слэтеровских атомных орбиталей в рамках нерелятивистского приближения [1, 2]:

$$\varphi(nlm) = \sum_i C_i \chi_{n_i l m}(r, \theta, \varphi);$$

$$\chi_{n_i l m}(r, \theta, \varphi) = R_{n_i l}(r) Y_{lm}(\theta, \varphi);$$

$$R_{n_i l}(r) = [(2n_i)!]^{-1/2} (2\xi_i)^{n_i+1/2} r^{n_i-1} \exp(-\xi_i r) = N_i r^{n_i-1} \exp(-\xi_i r).$$

Здесь $n l m$ — квантовые числа электрона; $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ — нормированная шаровая функция, а радиальные части функций φ и χ_i нормированы на единицу с весом r^2 ; C_i , ξ_i , N_i — коэффициенты, характеризующие радиальное распределение электронной плотности. Кроме того, в таблицах приведены расчетные значения средних степеней расстояния валентного электрона от ядра

$$\langle r^\alpha \rangle = \int_0^\infty r^\alpha |\varphi|^2 r^2 dr,$$

$\alpha = -1, 1, 2$, а также асимптотические параметры A и γ , определяющие амплитуду волновой функции валентного электрона в области расстояний r от ядра, удаленных по сравнению со средним размером атомных частиц. Указанные параметры характеризуют асимптотику решения одноэлектронного волнового уравнения при $r\gamma \gg 1$, где $(-\gamma^2/2)$ — потенциал ионизации атомной частицы, а. е.:

$$-\frac{1}{2} \Delta_r \varphi + [l(l+1)/r^2 - Z_{\text{ост}}/r] \varphi = -(\gamma^2/2) \varphi(nl|r), \quad r \rightarrow \infty,$$

так что $Z_{\text{ост}}$ — заряд атомного остова, равный 0, 1 и 2 соответственно для отрицательного иона, атома и однозарядного положительного иона. Решение этого последнего уравнения имеет вид

$$\lim_{r\gamma \gg 1} \varphi(nl|r) \simeq A r^{Z_{\text{ост}}/\gamma-1} \exp(-r\gamma) \left\{ 1 - \frac{Z_{\text{ост}}}{2r\gamma^2} \left(\frac{Z_{\text{ост}}}{\gamma} - 1 \right) + \frac{l(l+1)}{2r\gamma} + O\left(\frac{1}{r^2}\right) \right\},$$

где асимптотический коэффициент A находят сшивкой данного решения с самосогласованной волновой функцией валентного электрона [3].

Погрешности определения включенных в табл. 3.3—3.5 значений параметров волновой функции электрона в атомных частицах либо указаны непосредственно, либо учитывались при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней цифры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clementi E., Roetti C. — Atomic Data Nucl. Data Tabl., 1974, vol. 14, p. 177.
2. McLean A. D., McLean R. S. — Ibid., 1981, vol. 26, p. 197.
3. Евсеев А. В., Радциг А. А., Смирнов Б. М. — Оптика и спектроскопия, 1978, т. 44, с. 833.

Таблица 3.3. Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в атомах, а. е.

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
Z=2, гелий — He ($1S_0$), $\varphi(1s)$				Z=6, углерод — C ($3P_0$), $\varphi(2p)$			
1s	1,4171	0,7684	3,374	2p	0,9807	0,2824	1,100
1s	2,3768	0,2235	7,329	2p	1,4436	0,5470	2,891
1s	4,3963	0,0408	18,44	2p	2,6005	0,2320	12,59
1s	6,5270	-0,0099	33,35	2p	6,5100	0,0103	124,9
1s	7,9425	0,0023	44,77	$\langle r \rangle = 1,743$; $\langle r^2 \rangle = 3,890$; $A = 1,30(C)$; $\gamma = 0,910$			
$\langle r \rangle = 0,927$; $\langle r^2 \rangle = 1,185$; $A = 2,87(A)$; $\gamma = 1,344$				Z=7, азот — N ($4S_{3/2}^\circ$), $\varphi(2p)$			
Z=3, литий — Li ($2S_{1/2}$), $\varphi(2s)$				2p	1,1607	0,2664	1,676
1s	2,4767	-0,1463	7,796	2p	1,7047	0,5232	4,381
1s	4,6987	-0,0152	20,37	2p	3,0394	0,2735	18,60
2s	0,3835	0,0038	0,1052	2p	7,1748	0,0129	159,2
2s	0,6606	0,9805	0,4095	$\langle r \rangle = 1,447$; $\langle r^2 \rangle = 2,707$; $A = 1,5(C)$; $\gamma = 1,034$			
2s	1,07	0,1097	1,3675	Z=8, кислород — O ($3P_2$), $\varphi(2p)$			
2s	1,632	-0,1102	3,929	2p	1,1439	0,1692	1,616
$\langle r \rangle = 3,874$; $\langle r^2 \rangle = 17,74$; $A = 0,82(B)$; $\gamma = 0,630$				2p	1,8173	0,5797	5,141
Z=4, бериллий — Be ($1S_0$), $\varphi(2s)$				2p	3,4499	0,3235	25,53
1s	3,4712	-0,1709	12,93	2p	7,5648	0,0166	181,7
1s	6,3686	-0,0146	32,14	$\langle r \rangle = 1,239$; $\langle r^2 \rangle = 2,001$; $A = 1,3(C)$; $\gamma = 1,00$			
2s	0,778	0,2119	0,6169	Z=9, фтор — F ($2P_{3/2}^\circ$), $\varphi(2p)$			
2s	0,9407	0,6250	0,9910	2p	1,2657	0,1783	2,081
2s	1,4873	0,2666	3,115	2p	2,0580	0,5619	7,016
2s	2,718	-0,0992	14,07	2p	3,9285	0,3366	35,32
$\langle r \rangle = 2,649$; $\langle r^2 \rangle = 8,426$; $A = 1,62(B)$; $\gamma = 0,828$				2p	8,2041	0,0190	222,6
Z=5, бор — B ($2P_{1/2}^\circ$), $\varphi(2p)$				$\langle r \rangle = 1,085$; $\langle r^2 \rangle = 1,544$; $A = 1,59(C)$; $\gamma = 1,132$			
2p	0,8748	0,5362	0,8265				
2p	1,3699	0,4034	2,536				
2p	2,3226	0,1165	9,493				
2p	5,5948	0,0082	85,49				
$\langle r \rangle = 2,205$; $\langle r^2 \rangle = 6,146$; $A = 0,88(C)$; $\gamma = 0,781$							

$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=10$, неон — $\text{Ne}(^1S_0)$, $\varphi(2p)$				$Z=15$, фосфор — $\text{P}(^4S_{3/2})$, $\varphi(3p)$			
2p	1,4521	0,2180	2,934	2p	8,7449	0,0526	261,1
2p	2,3817	0,5334	10,11	2p	4,6304	0,2012	53,28
2p	4,4849	0,3293	49,19	3p	2,0645	-0,4908	5,331
2p	9,1346	0,0187	291,2	3p	1,2267	-0,5940	0,8620
$\langle 1/r \rangle = 1,435$; $\langle r \rangle = 0,965$; $\langle r^2 \rangle = 1,228$; $A = 1,75$ (C); $\gamma = 1,259$				$\langle r \rangle = 2,369$; $\langle r^2 \rangle = 6,694$; $A = 1,65$ (C); $\gamma = 0,878$			
$Z=11$, натрий — $\text{Na}(^2S_{1/2})$, $\varphi(3s)$				$Z=16$, сера — $\text{S}(^3P_2)$, $\varphi(3p)$			
2s	3,8593	-0,1183	33,79	2p	9,5125	-0,0524	322,3
2s	2,3943	-0,0662	10,24	2p	5,1205	-0,2201	68,51
3s	1,2528	0,2794	0,9279	3p	2,3379	0,5377	8,239
3s	0,7461	0,7814	0,1512	3p	1,3333	0,5615	1,154
$\langle r \rangle = 4,209$; $\langle r^2 \rangle = 20,70$; $A = 0,74$ (B); $\gamma = 0,615$				$\langle r \rangle = 2,069$; $\langle r^2 \rangle = 5,116$; $A = 1,11$ (C); $\gamma = 0,873$			
$Z=12$, магний — $\text{Mg}(^1S_0)$, $\varphi(3s)$				$Z=17$, хлор — $\text{Cl}(^2P_{3/2})$, $\varphi(3p)$			
2s	4,4051	-0,1323	47,03	2p	10,29	-0,0514	392,0
2s	2,9954	-0,1127	17,93	2p	5,6130	-0,2377	86,19
3s	1,4723	0,4724	1,633	3p	2,6242	0,5554	12,34
3s	0,8917	0,6101	0,2823	3p	1,4746	0,5519	1,642
$\langle r \rangle = 3,253$; $\langle r^2 \rangle = 12,42$; $A = 1,32$ (B); $\gamma = 0,750$				$\langle r \rangle = 1,842$; $\langle r^2 \rangle = 4,059$; $A = 1,78$ (C); $\gamma = 0,976$			
$Z=13$, алюминий — $\text{Al}(^2P_{1/2})$, $\varphi(3p)$				$Z=18$, аргон — $\text{Ar}(^1S_0)$, $\varphi(3p)$			
2p	7,2078	-0,0448	161,1	2p	11,07	-0,0494	470,8
2p	3,6541	-0,1498	29,47	2p	6,1066	-0,2514	106,4
3p	1,6828	0,2679	2,606	3p	2,9034	0,5696	17,58
3p	0,9138	0,8038	0,3076	3p	1,6226	0,5431	2,294
$\langle r \rangle = 3,434$; $\langle r^2 \rangle = 14,01$; $A = 0,61$ (C); $\gamma = 0,663$				$\langle 1/r \rangle = 0,814$; $\langle r \rangle = 1,663$; $\langle r^2 \rangle = 3,311$; $A = 2,11$ (B); $\gamma = 1,076$			
$Z=14$, кремний — $\text{Si}(^3P_0)$, $\varphi(3p)$				$Z=19$, калий — $\text{K}(^2S_{1/2})$, $\varphi(4s)$			
2p	7,9691	0,0508	207,0	2s	8,5026	-0,0140	243,4
2p	4,1376	0,1774	40,21	2s	6,7454	0,1097	136,5
3p	1,8190	-0,4216	3,422	3s	3,4800	-0,1555	33,15
3p	1,0646	-0,6577	0,5249	3s	2,3268	-0,0788	8,102
$\langle r \rangle = 2,788$; $\langle r^2 \rangle = 9,254$; $A = 1,10$ (C); $\gamma = 0,774$				4s	1,2053	0,4058	0,2611
				4s	0,7277	0,6757	0,0270
				$\langle r \rangle = 5,244$; $\langle r^2 \rangle = 31,54$; $A = 0,52$ (C); $\gamma = 0,565$			

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=20$, кальций — Ca ($1S_0$), φ (4s)				$Z=25$, марганец — Mn ($6S_{5/2}$), φ (4s)			
2s	9,3003	-0,0212	304,6	2s	9,6693	0,1498	335,7
2s	7,2676	0,1465	164,4	3s	4,9405	-0,2181	113,0
3s	3,6997	-0,2091	41,07	3s	3,2909	-0,0513	27,26
3s	2,5701	-0,0965	11,48	4s	1,8449	0,5046	1,773
4s	1,4341	0,5179	0,5709	4s	1,0441	0,6024	0,1368
4s	0,8667	0,5836	0,0592				
$\langle r \rangle = 4,218$; $\langle r^2 \rangle = 20,45$; $A=0,95$ (C); $\gamma=0,670$				$\langle r \rangle = 3,349$; $\langle r^2 \rangle = 13,05$; $A=1,31$ (C); $\gamma=0,739$			
$Z=21$, скандий — Sc ($2D_{3/2}$), φ (4s)				$Z=26$, железо — Fe ($5D_4$), φ (4s)			
2s	7,7646	0,1508	194,0	2s	10,131	0,1509	377,2
3s	3,9271	-0,2234	50,61	3s	5,2166	-0,2138	136,7
3s	2,7006	-0,0792	13,65	3s	3,4762	-0,0510	33,02
4s	1,5384	0,5172	0,7829	4s	1,9252	0,5016	2,148
4s	0,9141	0,5870	0,0752	4s	1,0774	0,6071	0,1576
$\langle r \rangle = 3,96$; $\langle r^2 \rangle = 18,07$; $A=1,11$ (C); $\gamma=0,693$				$\langle r \rangle = 3,242$; $\langle r^2 \rangle = 12,25$; $A=1,40$ (C); $\gamma=0,762$			
$Z=22$, титан — Ti ($3F_2$), φ (4s)				$Z=27$, кобальт — Co ($4F_{9/2}$), φ (4s)			
2s	8,2522	0,1495	225,9	2s	10,589	0,1518	421,3
3s	4,1466	-0,2320	61,22	3s	5,5025	-0,2074	164,8
3s	2,7991	-0,0615	15,47	3s	3,6714	-0,0521	39,98
4s	1,6185	0,5172	0,9838	4s	2,0014	0,4976	2,558
4s	0,9489	0,5874	0,0890	4s	1,1084	0,6125	0,1791
$\langle r \rangle = 3,766$; $\langle r^2 \rangle = 16,39$; $A=1,16$ (C); $\gamma=0,708$				$\langle r \rangle = 3,144$; $\langle r^2 \rangle = 11,55$; $A=1,42$ (B); $\gamma=0,760$			
$Z=23$, ванадий — V ($4F_{3/2}$), φ (4s)				$Z=28$, никель — Ni ($3F_4$), φ (4s)			
2s	8,7282	0,1487	259,9	2s	11,05	0,1529	468,3
3s	4,3956	-0,2309	75,08	3s	5,7963	-0,2005	197,7
3s	2,9401	-0,054	18,37	3s	3,8721	-0,0542	48,17
4s	1,6973	0,5133	1,219	4s	2,0771	0,4929	3,023
4s	0,9828	0,5919	0,1042	4s	1,1389	0,6188	0,2023
$\langle r \rangle = 3,607$; $\langle r^2 \rangle = 15,07$; $A=1,18$ (B); $\gamma=0,704$				$\langle r \rangle = 3,055$; $\langle r^2 \rangle = 10,93$; $A=1,42$ (A); $\gamma=0,749$			
$Z=24$, хром — Cr ($7S_3$), φ (4s)				$Z=29$, медь — Cu ($2S_{1/2}$), φ (4s)			
2s	9,1541	0,1458	292,8	2s	11,45	0,1308	512,2
3s	4,7273	-0,2023	96,84	3s	6,1933	-0,1533	249,3
3s	3,1374	-0,0524	23,07	3s	4,0847	-0,0422	58,08
4s	1,7444	0,4536	1,378	4s	2,0076	0,4143	2,594
4s	0,9623	0,6545	0,0948	4s	1,0368	0,6983	0,1326
$\langle r \rangle = 3,843$; $\langle r^2 \rangle = 17,21$; $\langle 1/r \rangle = 0,329$; $A=1,13$ (B); $\gamma=0,705$				$\langle 1/r \rangle = 0,382$; $\langle r \rangle = 3,331$; $\langle r^2 \rangle = 13,08$; $A=1,29$ (A); $\gamma=0,754$			

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
Z=30, цинк — Zn ($1S_0$), $\varphi(4s)$				Z=35, бром — Br ($2P_{3/2}^\circ$), $\varphi(4p)$			
2s	11,91	0,1550	564,9	3p	7,6018	-0,2134	510,7
3s	6,4259	-0,1848	283,6	3p	5,0178	-0,1076	119,3
3s	4,2954	-0,0608	69,26	4p	2,9199	-0,5821	14,00
4s	2,2212	0,4843	4,088	4p	1,6241	0,5472	0,9993
4s	1,1951	0,6304	0,2513	$\langle r \rangle = 2,112$; $\langle r^2 \rangle = 5,224$; $A = 1,83 (B)$; $\gamma = 0,932$			
$\langle r \rangle = 2,898$; $\langle r^2 \rangle = 9,869$; $A = 1,69 (C)$; $\gamma = 0,831$				Z=36, криптон — Kr ($1S_0$), $\varphi(4p)$			
Z=31, галлий — Ga ($2P_{1/2}^\circ$), $\varphi(4p)$				3p	7,9359	-0,2192	593,7
3p	6,5222	-0,1261	298,8	3p	5,3714	-0,1237	151,4
3p	4,0381	-0,0571	55,79	4p	3,1274	0,6039	19,06
4p	2,0596	0,4061	2,910	4p	1,7460	0,5302	1,384
4p	1,0709	0,7055	0,1534	$\langle 1/r \rangle = 0,669$; $\langle r \rangle = 1,952$; $\langle r^2 \rangle = 4,455$; $A = 2,22 (B)$; $\gamma = 1,014$			
$\langle r \rangle = 3,424$; $\langle r^2 \rangle = 13,90$; $A = 0,60 (C)$; $\gamma = 0,664$				Z=37, рубидий — Rb ($2S_{1/2}$), $\varphi(5s)$			
Z=32, германий — Ge ($3P_0$), $\varphi(4p)$				3s	9,3132	0,0245	1039
3p	6,7820	-0,1557	342,5	3s	6,7684	0,0884	340,1
3p	4,2606	-0,0736	67,31	4s	3,8861	-0,1667	50,66
4p	2,2886	0,4669	4,677	4s	2,5250	-0,0739	7,278
4p	1,2516	0,6437	0,3094	5s	1,3802	0,4481	0,1398
$\langle r \rangle = 2,904$; $\langle r^2 \rangle = 9,951$; $A = 1,29 (C)$; $\gamma = 0,762$				5s	0,804	0,6557	0,0072
Z=33, мышьяк — As ($4S_{3/2}^\circ$), $\varphi(4p)$				$\langle r \rangle = 5,632$; $\langle r^2 \rangle = 36,18$; $A = 0,48 (C)$; $\gamma = 0,554$			
3p	7,0563	-0,1785	393,5	Z=38, стронций — Sr ($1S_0$), $\varphi(5s)$			
3p	4,5083	-0,0871	82,03	3s	9,603	0,0228	1157
4p	2,4974	0,5156	6,928	3s	7,1809	0,1242	418,4
4p	1,4078	0,5960	0,5252	4s	4,1612	-0,1986	68,92
$\langle r \rangle = 2,561$; $\langle r^2 \rangle = 7,716$; $A = 1,58 (C)$; $\gamma = 0,850$				4s	2,8205	-0,1154	11,98
Z=34, селен — Se ($3P_2$), $\varphi(4p)$				5s	1,6304	0,5087	0,3494
3p	7,2781	-0,2015	438,5	5s	0,9613	0,6091	0,0191
3p	4,6810	-0,0934	93,57	$\langle r \rangle = 4,633$; $\langle r^2 \rangle = 24,50$; $A = 0,86 (C)$; $\gamma = 0,647$			
4p	2,7150	0,5509	10,09	Z=39, иттрий — Y ($2D_{3/2}$), $\varphi(5s)$			
4p	1,5114	0,5721	0,7229	3s	10,28	0,0196	1468
$\langle r \rangle = 2,309$; $\langle r^2 \rangle = 6,256$; $A = 1,52 (C)$; $\gamma = 0,847$				3s	7,4893	0,1383	484,7
Z=35, бром — Br ($2P_{3/2}^\circ$), $\varphi(4p)$				4s	4,2802	-0,2364	78,25
3p	7,6018	-0,2134	510,7	4s	2,9141	-0,0806	13,87
3p	5,0178	-0,1076	119,3	5s	1,7052	0,5500	0,4473
4p	2,9199	-0,5821	14,00	5s	0,9973	0,5686	0,0234
4p	1,6241	0,5472	0,9993	$\langle r \rangle = 4,300$; $\langle r^2 \rangle = 21,14$; $A = 1,02 (C)$; $\gamma = 0,685$			

$x_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$x_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
Z=40, цирконий — Zr (3F_2), φ (5s)				Z=45, родий — Rh ($^4F_{9/2}$), φ (5s)			
3s	10,81	0,0144	1754	3s	9,313	0,1722	1039
3s	7,8217	0,1502	564,3	4s	5,5376	-0,2468	249,4
4s	4,4526	-0,2554	93,47	4s	3,7113	-0,0282	41,18
4s	3,0309	-0,0634	16,55	5s	2,0886	0,5119	1,365
5s	1,7957	0,5559	0,5945	5s	1,1416	0,6127	0,0492
5s	1,0428	0,5633	0,0299				
$\langle r \rangle = 4,078$; $\langle r^2 \rangle = 19,05$; A=1,15 (C); $\gamma = 0,709$				$\langle 1/r \rangle = 0,331$; $\langle r \rangle = 3,795$; $\langle r^2 \rangle = 16,73$; A=1,19 (C); $\gamma = 0,741$			
Z=41, ниобий — Nb ($^6D_{1/2}$), φ (5s)				Z=46, палладий — Pd (1S_0), φ (4d)			
3s	11,31	0,0148	2049	3d	16,12	-0,0685	7085
3s	7,9335	0,1531	593,0	3d	9,1000	-0,2381	958,5
4s	4,6835	-0,2611	117,3	4d	5,79	0,2391	304,7
4s	3,1068	-0,0502	18,51	4d	3,4769	0,5889	30,71
5s	1,8474	0,5507	0,6948	4d	1,7379	0,3837	1,355
5s	1,0654	0,5668	0,0337				
$\langle 1/r \rangle = 0,298$; $\langle r \rangle = 4,207$; $\langle r^2 \rangle = 20,37$; A=1,16 (C); $\gamma = 0,711$				$\langle 1/r \rangle = 0,893$; $\langle r \rangle = 1,533$; $\langle r^2 \rangle = 2,951$; A=0,26 (C); $\gamma = 0,783$			
Z=42, молибден — Mo (7S_3), φ (5s)				Z=47, серебро — Ag ($^2S_{1/2}$), φ (5s)			
3s	8,2694	0,1644	685,6	3s	10,14	0,1654	1399
4s	4,9249	-0,2615	147,1	4s	5,8718	-0,2176	324,6
4s	3,2627	-0,053	23,06	4s	3,9877	-0,0557	56,90
5s	1,9412	0,5478	0,9123	5s	2,6640	0,2528	5,203
5s	1,1033	0,5749	0,0408	5s	1,6501	0,5102	0,3733
				5s	1,0419	0,3948	0,0298
$\langle 1/r \rangle = 0,307$; $\langle r \rangle = 4,079$; $\langle r^2 \rangle = 19,19$; A=1,23 (C); $\gamma = 0,722$				$\langle 1/r \rangle = 0,344$; $\langle r \rangle = 3,656$; $\langle r^2 \rangle = 15,59$; A=1,18 (C); $\gamma = 0,746$			
Z=43, технеций — Tc ($^6S_{5/2}$), φ (5s)				Z=48, кадмий — Cd (1S_0), φ (5s)			
3s	8,8204	0,1750	859,3	3s	10,48	0,1974	1568
4s	5,0392	-0,2743	163,1	4s	6,0667	-0,2692	376,0
4s	3,4213	-0,0350	28,56	4s	4,1340	-0,0222	66,92
5s	2,0196	0,5546	1,134	5s	2,3520	0,5436	2,622
5s	1,1471	0,5655	0,0505	5s	1,2920	0,5819	0,0972
$\langle r \rangle = 3,650$; $\langle r^2 \rangle = 15,34$; A=1,28 (C); $\gamma = 0,736$				$\langle r \rangle = 3,237$; $\langle r^2 \rangle = 12,17$; A=1,6 (C); $\gamma = 0,813$			
Z=44, рутений — Ru (5F_5), φ (5s)				Z=49, индий — In ($^2P_{1/2}^\circ$), φ (5p)			
3s	8,9592	0,1704	907,6	3p	9,8279	0,1052	1255
4s	5,3203	-0,2554	208,3	4p	6,2086	-0,1849	417,2
4s	3,5534	-0,0328	33,87	4p	4,0263	-0,0553	59,42
5s	2,0443	0,5238	1,213	5p	2,1421	0,4874	1,568
5s	1,1310	0,5997	0,0468	5p	1,1494	0,6415	0,0511
$\langle 1/r \rangle = 0,324$; $\langle r \rangle = 3,877$; $\langle r^2 \rangle = 17,42$; A=1,22 (C); $\gamma = 0,736$				$\langle r \rangle = 3,778$; $\langle r^2 \rangle = 16,65$; A=0,58 (C); $\gamma = 0,652$			

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=50$, олово — Sn (3P_0), φ (5p)				$Z=55$, цезий — Cs ($^2S_{1/2}$), φ (6s)			
3p	10,18	0,1295	1419	4s	7,4567	0,1010	951,3
4p	6,4839	-0,2121	507,1	4s	5,3771	0,0352	218,4
4p	4,2737	-0,0805	77,71	5s	3,7211	-0,2060	32,69
5p	2,3587	0,5310	2,664	5s	2,4237	-0,0357	3,093
5p	1,3201	0,5938	0,1094	6s	1,3934	0,5029	0,0357
				6s	0,8237	0,6068	0,0012
$\langle r \rangle = 3,286$; $\langle r^2 \rangle = 12,53$; $A = 1,02$ (C); $\gamma = 0,735$				$\langle 1/r \rangle = 0,192$; $\langle r \rangle = 6,30$; $\langle r^2 \rangle = 44,8$; $A = 0,42$ (B); $\gamma = 0,535$			
$Z=51$, сурьма — Sb ($^4S_{3/2}$), φ (5p)				$Z=56$, барий — Ba (1S_0), φ (6s)			
3p	10,59	0,1571	1631	4s	7,4982	0,1473	975,4
4p	6,738	-0,2319	602,9	4s	5,2707	0,0279	199,7
4p	4,5108	-0,1026	99,09	5s	3,8574	-0,2729	39,85
5p	2,5594	0,5610	4,174	5s	2,5976	-0,0307	4,528
5p	1,4736	0,5633	0,2004	6s	1,5886	0,5824	0,0838
				6s	0,9525	0,5294	0,0030
$\langle r \rangle = 2,952$; $\langle r^2 \rangle = 10,07$; $A = 1,67$ (C); $\gamma = 0,797$				$\langle 1/r \rangle = 0,234$; $\langle r \rangle = 5,25$; $\langle r^2 \rangle = 31,2$; $A = 0,78$ (B); $\gamma = 0,619$			
$Z=52$, теллур — Te (3P_2), φ (5p)				$Z=57$, лантан — La ($^2D_{3/2}$), φ (6s)			
3p	11,14	0,2002	1944	4s	7,8105	0,1457	1172
4p	6,9546	-0,2499	695,2	4s	5,7547	0,0474	296,5
4p	4,7319	-0,1156	122,9	5s	4,0678	-0,2912	53,37
5p	2,7367	0,5934	6,033	5s	2,7554	-0,0282	6,263
5p	1,5618	0,5402	0,2759	6s	1,6938	0,5881	0,1271
				6s	1,0087	0,5267	0,0044
$\langle r \rangle = 2,701$; $\langle r^2 \rangle = 8,411$; $A = 1,65$ (C); $\gamma = 0,814$				$\langle 1/r \rangle = 0,250$; $\langle r \rangle = 4,93$; $\langle r^2 \rangle = 27,5$; $A = 0,90$ (B); $\gamma = 0,640$			
$Z=53$, иод — I ($^2P_{3/2}$), φ (5p)				$Z=58$, церий — Ce (3H_4), φ (6s)			
3p	11,34	0,2190	2070	4s	8,1438	0,1310	1414
4p	7,2450	-0,2639	835,7	4s	6,1130	0,0600	389,1
4p	4,9772	-0,1361	154,3	5s	4,1855	-0,2800	62,43
5p	2,9205	0,6140	8,625	5s	2,8240	-0,0363	7,170
5p	1,6711	0,5258	0,4002	6s	1,7238	0,5830	0,1425
				6s	1,0217	0,5344	0,0048
$\langle r \rangle = 2,502$; $\langle r^2 \rangle = 7,201$; $A = 1,94$ (C); $\gamma = 0,876$				$\langle 1/r \rangle = 0,252$; $\langle r \rangle = 4,88$; $\langle r^2 \rangle = 27,0$; $A = 0,88$ (B); $\gamma = 0,638$			
$Z=54$, ксенон — Xe (1S_0), φ (5p)				$Z=59$, празеодим — Pr ($^4I_{9/2}$), φ (6s)			
3p	10,97	0,1679	1844	4s	8,3469	0,1209	1580
4p	7,6011	-0,2787	1037	4s	6,1782	0,0506	408,1
4p	5,2292	-0,1577	192,7	5s	4,2105	-0,2464	64,51
5p	3,0947	0,6344	11,86	5s	2,8012	-0,0511	6,858
5p	1,7808	0,5103	0,5677	6s	1,6796	0,5681	0,1203
				6s	0,9939	0,5503	0,0040
$\langle 1/r \rangle = 0,547$; $\langle r \rangle = 2,338$; $\langle r^2 \rangle = 6,277$; $A = 2,4$ (C); $\gamma = 0,944$				$\langle 1/r \rangle = 0,242$; $\langle r \rangle = 5,06$; $\langle r^2 \rangle = 29,0$; $A = 0,84$ (B); $\gamma = 0,634$			

$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=60$, неодим — Nd ($5I_4$), $\varphi(6s)$				$Z=65$, тербий — Tb ($6H_{15/2}^\circ$), $\varphi(6s)$			
4s	8,4569	0,1262	1676	4s	9,3905	0,1207	2685
4s	6,1672	0,0417	404,8	4s	6,7539	0,0341	609,4
5s	4,2794	-0,2440	70,53	5s	4,6649	-0,2272	113,3
5s	2,8401	-0,0482	7,398	5s	3,0505	-0,0469	10,96
6s	1,7001	0,5671	0,1302	6s	1,8070	0,5584	0,1935
6s	1,0036	0,5512	0,0042	6s	1,0530	0,5625	0,0058
$\langle 1/r \rangle = 0,245$; $\langle r \rangle = 5,01$; $\langle r^2 \rangle = 28,4$; $A = 0,85$ (B); $\gamma = 0,637$				$\langle 1/r \rangle = 0,257$; $\langle r \rangle = 4,77$; $\langle r^2 \rangle = 25,8$; $A = 0,93$ (B); $\gamma = 0,657$			
$Z=61$, прометий — Pm ($6H_{5/2}^\circ$), $\varphi(6s)$				$Z=66$, диспрозий — Dy ($6I_8$), $\varphi(6s)$			
4s	8,6393	0,1260	1845	4s	9,6221	0,1175	2996
4s	6,2631	0,0390	433,9	4s	6,9324	0,0356	685,3
5s	4,3549	-0,2408	77,65	5s	4,7490	-0,2232	125,1
5s	2,8814	-0,0471	8,009	5s	3,0953	-0,0488	11,88
6s	1,7216	0,5655	0,1413	6s	1,8310	0,5548	0,2109
6s	1,0137	0,5531	0,0045	6s	1,0639	0,5672	0,0062
$\langle 1/r \rangle = 0,247$; $\langle r \rangle = 4,96$; $\langle r^2 \rangle = 27,8$; $A = 0,86$ (B); $\gamma = 0,640$				$\langle 1/r \rangle = 0,259$; $\langle r \rangle = 4,73$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 25,3$; $A = 0,94$ (B); $\gamma = 0,661$			
$Z=62$, самарий — Sm ($7F_0$), $\varphi(6s)$				$Z=67$, гольмий — Ho ($4I_{15/2}^\circ$), $\varphi(6s)$			
4s	8,7759	0,1287	1980	4s	9,8303	0,1146	3299
4s	6,2751	0,0326	437,7	4s	7,0869	0,0370	756,7
5s	4,4125	-0,2393	83,47	5s	4,8430	-0,2189	139,3
5s	2,9124	-0,0431	8,495	5s	3,1492	-0,0517	13,06
6s	1,7395	0,5653	0,1511	6s	1,8533	0,5526	0,2281
6s	1,0222	0,5530	0,0048	6s	1,0739	0,5704	0,0066
$\langle 1/r \rangle = 0,250$; $\langle r \rangle = 4,91$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 27,3$; $A = 0,88$ (B); $\gamma = 0,644$				$\langle 1/r \rangle = 0,262$; $\langle r \rangle = 4,69$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 24,9$; $A = 0,96$ (B); $\gamma = 0,665$			
$Z=63$, европий — Eu ($8S_{7/2}^\circ$), $\varphi(6s)$				$Z=68$, эрбий — Er ($3H_6$), $\varphi(6s)$			
4s	8,9826	0,1257	2199	4s	9,9785	0,1154	3529
4s	6,4318	0,0336	489,1	4s	7,1382	0,0337	781,7
5s	4,5009	-0,2344	93,10	5s	4,9111	-0,2168	150,4
5s	2,9622	-0,0459	9,325	5s	3,1869	-0,0505	13,94
6s	1,7632	0,5623	0,1650	6s	1,8721	0,5516	0,2436
6s	1,0330	0,5573	0,0051	6s	1,0825	0,5717	0,0069
$\langle 1/r \rangle = 0,252$; $\langle r \rangle = 4,86$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 26,8$; $A = 0,89$ (B); $\gamma = 0,646$				$\langle 1/r \rangle = 0,264$; $\langle r \rangle = 4,65$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 24,5$; $A = 0,98$ (B); $\gamma = 0,670$			
$Z=64$, гадолиний — Gd ($9D_2^\circ$), $\varphi(6s)$				$Z=69$, тулий — Tm ($2F_{7/2}^\circ$), $\varphi(6s)$			
4s	9,1369	0,1369	2374	4s	10,181	0,1132	3863
4s	6,5080	0,0349	515,7	4s	7,2839	0,0343	856,1
5s	4,6338	-0,2575	109,3	5s	4,9964	-0,2134	165,3
5s	3,0817	-0,0332	11,59	5s	3,2341	-0,0522	15,12
6s	1,8570	0,5742	0,2311	6s	1,8938	0,5493	0,2625
6s	1,0847	0,5453	0,0070	6s	1,0923	0,5749	0,0073
$\langle 1/r \rangle = 0,268$; $\langle r \rangle = 4,58$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 23,9$; $A = 1,01$ (B); $\gamma = 0,672$				$\langle 1/r \rangle = 0,266$; $\langle r \rangle = 4,61$; $\langle r^2 \rangle =$ $= 24,1$; $A = 0,99$ (B); $\gamma = 0,674$			

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=70$, иттербий — Yb ($1S_0$), $\varphi(6s)$				$Z=74$, вольфрам — W ($5D_0$), $\varphi(6s)$			
4s	10,243	0,1185	3970	4s	12,372	0,0735	9287
4s	7,1670	0,0250	796,0	4s	9,1741	0,1139	2418
5s	5,0197	-0,2146	169,6	5s	5,7436	-0,2599	355,9
5s	3,2463	-0,0451	15,43	5s	3,8144	-0,0365	37,47
6s	1,9054	0,5509	0,2732	6s	2,2807	0,5705	0,8790
6s	1,0981	0,5723	0,0076	6s	1,2912	0,5604	0,0218
$\langle 1/r \rangle = 0,268$; $\langle r \rangle = 4,57$; $\langle r^2 \rangle = 23,7$; $A=1,01$ (B); $\gamma=0,678$				$\langle 1/r \rangle = 0,325$; $\langle r \rangle = 3,82$; $\langle r^2 \rangle = 16,7$; $A=1,43$ (C); $\gamma=0,766$			
$Z=71$, лютеций — Lu ($2D_{3/2}$), $\varphi(6s)$				$Z=75$, рений — Re ($6S_{5/2}$), $\varphi(6s)$			
4s	11,412	0,0819	6457	4s	12,407	0,0738	9405
4s	8,4433	0,0825	1664	4s	9,3385	0,1163	2619
5s	5,3283	-0,2196	235,5	5s	5,8936	-0,2673	410,1
5s	3,4966	-0,0674	23,22	5s	3,9277	-0,0286	44,01
6s	2,0541	0,5533	0,4452	6s	2,3463	0,5689	1,057
6s	1,1768	0,5769	0,0119	6s	1,3224	0,5620	0,0254
$\langle 1/r \rangle = 0,289$; $\langle r \rangle = 4,27$; $\langle r^2 \rangle = 20,7$; $A=0,92$ (C); $\gamma=0,632$				$\langle 1/r \rangle = 0,334$; $\langle r \rangle = 3,72$; $\langle r^2 \rangle = 15,8$; $A=1,42$ (B); $\gamma=0,761$			
$Z=72$, гафний — Hf ($3F_2$), $\varphi(6s)$				$Z=76$, осмий — Os ($5D_4$), $\varphi(6s)$			
4s	11,462	0,0854	6585	4s	12,644	0,0797	10 240
4s	8,5797	0,0877	1789	4s	9,4703	0,1175	2789
5s	5,4990	-0,2324	280,1	5s	6,0015	-0,2821	453,1
5s	3,6349	-0,0632	28,74	5s	3,9932	-0,0119	48,20
6s	2,1449	0,5602	0,5898	6s	2,4005	0,5750	1,226
6s	1,2234	0,5717	0,0153	6s	1,3507	0,5533	0,0292
$\langle 1/r \rangle = 0,303$; $\langle r \rangle = 4,08$; $\langle r^2 \rangle = 19,0$; $A=1,31$ (B); $\gamma=0,74$				$\langle 1/r \rangle = 0,334$; $\langle r \rangle = 3,62$; $\langle r^2 \rangle = 15,0$; $A=1,66$ (B); $\gamma=0,801$			
$Z=73$, тантал — Ta ($4F_{3/2}$), $\varphi(6s)$				$Z=77$, иридий — Ir ($4F_{9/2}$), $\varphi(6s)$			
4s	11,941	0,0779	7917	4s	12,996	0,0757	11 590
4s	8,8985	0,1031	2108	4s	9,7095	0,1262	3121
5s	5,6269	-0,2465	317,9	5s	6,1434	-0,2899	515,3
5s	3,7320	-0,0513	33,22	5s	4,0920	-0,0027	55,14
6s	2,2190	0,5655	0,7354	6s	2,4586	0,5765	1,432
6s	1,2608	0,5664	0,0187	6s	1,3786	0,5512	0,0333
$\langle 1/r \rangle = 0,314$; $\langle r \rangle = 3,94$; $\langle r^2 \rangle = 17,7$; $A=1,41$ (B); $\gamma=0,762$				$\langle 1/r \rangle = 0,353$; $\langle r \rangle = 3,53$; $\langle r^2 \rangle = 14,3$; $A=1,67$ (B); $\gamma=0,816$			

$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=78$, платина—Pt(3D_3), φ (6s)				$Z=83$, висмут—Bi ($^4S_{3/2}^o$), φ (6p)			
4s	12,671	0,0686	10 340	4p	9,7163	0,0704	3131
4s	9,8174	0,1142	3280	5p	7,0413	—0,2435	1091
5s	6,3379	—0,2654	611,6	5p	4,7856	—0,1091	130,4
5s	4,1982	0,0035	63,48	6p	3,1649	0,3713	7,394
6s	2,4290	0,5436	1,324	6p	2,0295	0,5668	0,4117
6s	1,3248	0,5906	0,0257	6p	1,3128	0,2253	0,0243
$\langle 1/r \rangle = 0,335$; $\langle r \rangle = 3,72$; $\langle r^2 \rangle = 15,9$; $A=1,53$ (B); $\gamma=0,812$				$\langle 1/r \rangle = 0,403$; $\langle r \rangle = 3,08$; $\langle r^2 \rangle = 10,9$; $A=1,43$ (C); $\gamma=0,732$			
$Z=79$, золото—Au ($^2S_{1/2}$), φ (6s)				$Z=90$, торий—Th (3F_2), φ (7s)			
4s	10,264	0,1246	4007	5s	8,8021	0,1368	3724
5s	6,7013	—0,2183	831,1	5s	6,6025	0,0834	765,9
5s	4,5321	—0,0697	96,70	6s	4,6307	—0,2604	87,75
6s	2,9804	0,3135	5,004	6s	3,1953	—0,0981	7,868
6s	1,7985	0,5632	0,1877	7s	2,2206	0,3728	0,2432
6s	1,1109	0,3106	0,0082	7s	1,4490	0,5617	0,0099
$\langle 1/r \rangle = 0,337$; $\langle r \rangle = 3,70$; $\langle r^2 \rangle = 15,9$; $A=1,58$ (A); $\gamma=0,823$				7s	0,9549	0,2371	0,0004
$Z=80$, ртуть—Hg(1S_0), φ (6s)				$\langle 1/r \rangle = 0,246$; $\langle r \rangle = 5,00$; $\langle r^2 \rangle = 28,2$; $A=1,01$ (A); $\gamma=0,67$			
4s	10,616	0,1573	4663	$Z=91$, протактиний—Pa ($5f^{37} s^{-4}$), φ (7s)			
5s	6,9239	—0,2396	994,7	5s	8,9073	0,1266	3975
5s	4,7445	—0,0945	124,4	5s	6,6099	0,0594	770,6
6s	3,2060	0,3268	8,041	6s	4,6416	—0,2130	89,10
6s	1,9846	0,5658	0,3560	6s	3,1334	—0,1034	6,9283
6s	1,2299	0,2946	0,0159	7s	2,1303	0,3358	0,1782
$\langle 1/r \rangle = 0,376$; $\langle r \rangle = 3,33$; $\langle r^2 \rangle = 12,8$; $A=1,96$ (A); $\gamma=0,876$				7s	1,3842	0,5727	0,0070
$Z=81$, таллий—Tl ($^2P_{1/2}^o$), φ (6p)				7s	0,9090	0,2599	0,0003
4p	9,9954	0,0688	3556	$\langle 1/r \rangle = 0,227$; $\langle r \rangle = 5,35$; $\langle r^2 \rangle = 32,3$; $A=0,90$ (A); $\gamma=0,66$			
5p	7,1101	—0,1213	1151	$Z=92$, уран—U ($5f^{36}d7s^2-^5K$), φ (7s)			
5p	4,8956	—0,1590	147,8	5s	9,0435	0,1392	4321
6p	3,5306	0,1538	15,05	5s	6,7277	0,0598	849,3
6p	2,0206	0,5791	0,4001	6s	4,7475	—0,2333	103,2
6p	1,1626	0,4663	0,0110	6s	3,2296	—0,0939	8,433
$\langle 1/r \rangle = 0,317$; $\langle r \rangle = 3,92$; $\langle r^2 \rangle = 17,7$; $A=0,55$ (C); $\gamma=0,670$				7s	2,2190	0,3540	0,2419
$Z=82$, свинец—Pb (3P_0), φ (6p)				7s	1,4398	0,5681	0,0094
4p	10,121	0,0807	3762	7s	0,9435	0,2484	0,0004
5p	7,2008	—0,1586	1234	$\langle 1/r \rangle = 0,240$; $\langle r \rangle = 5,08$; $\langle r^2 \rangle = 29,2$; $A=0,99$ (A); $\gamma=0,674$			
5p	4,9840	—0,1722	163,1				
6p	3,6385	0,1793	18,30				
6p	2,1973	0,6018	0,6899				
6p	1,3144	0,4073	0,0244				

Таблица 3.4. Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в положительных атомных ионах, а. е.

$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n,l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
Z=3, литий — $\text{Li}^+ ({}^1S_0)$, $\varphi(1s)$				Z=9, фтор — $\text{F}^+ ({}^3P_2)$, $\varphi(2p)$			
1s	2,4638	0,8946	7,734	2p	2,3317	0,6033	9,586
1s	4,7036	0,1184	20,40	2p	4,2480	0,2913	42,95
1s	6,4669	-0,0023	32,89	2p	1,6422	0,1609	3,991
1s	1,3579	0,0044	3,165	2p	9,5323	0,0111	323,9
A=6,5 (C); $\gamma=2,358$				A=3,1 (C); $\gamma=1,603$			
Z=4, бериллий — $\text{Be}^+ ({}^2S_{1/2})$, $\varphi(2s)$				Z=10, неон — $\text{Ne}^+ ({}^2P_{3/2}^\circ)$, $\varphi(2p)$			
1s	3,4977	-0,2046	13,08	2p	2,5710	0,5872	12,24
1s	6,5023	-0,0157	33,16	2p	4,7236	0,3052	56,00
2s	1,1838	1,1080	1,761	2p	1,7524	0,1672	4,694
2s	2,6277	-0,1329	12,92	2p	9,811	0,0138	348,1
A=2,67 (A); $\gamma=1,157$				A=3,4 (C); $\gamma=1,735$			
Z=5, бор — $\text{B}^+ ({}^1S_0)$, $\varphi(2s)$				Z=11, натрий — $\text{Na}^+ ({}^1S_0)$, $\varphi(2p)$			
1s	4,4299	-0,2029	18,65	2p	2,8948	0,5428	16,46
1s	7,8634	-0,0194	44,10	2p	5,2651	0,3048	73,45
2s	1,5924	0,7349	3,695	2p	1,9589	0,2163	6,201
2s	4,0102	-0,0922	37,19	2p	10,69	0,0141	431,8
2s	1,2502	0,3453	2,018	A=3,7 (C); $\gamma=1,864$			
A=6,7 (C); $\gamma=1,360$				Z=12, магний — $\text{Mg}^+ ({}^2S_{1/2})$, $\varphi(3s)$			
Z=6, углерод — $\text{C}^+ ({}^2P_{1/2}^\circ)$, $\varphi(2p)$				2s	4,5253	-0,2058	50,30
2p	1,8778	0,3998	5,580	3s	1,4135	0,65	1,416
2p	3,078	0,1230	19,19	3s	1,0632	0,4065	0,523
2p	1,3927	0,5119	2,643	3s	3,5536	-0,0958	35,67
2p	7,0112	0,0078	150,3	A=2,31 (A); $\gamma=1,051$			
A=2,53 (C); $\gamma=1,339$				Z=13, алюминий — $\text{Al}^+ ({}^1S_0)$, $\varphi(3s)$			
Z=7, азот — $\text{N}^+ ({}^3P_0)$, $\varphi(2p)$				2s	4,8362	-0,2429	59,39
2p	1,9759	0,5629	6,337	3s	1,7751	0,5546	3,142
2p	3,3858	0,2026	24,36	3s	1,2538	0,5263	0,9306
2p	1,4789	0,2761	3,071	3s	3,8880	-0,0981	48,86
2p	8,0019	0,0088	209,1	A=3,1 (C); $\gamma=1,176$			
A=2,9 (C); $\gamma=1,475$				Z=14, кремний — $\text{Si}^+ ({}^2P_{1/2}^\circ)$, $\varphi(3p)$			
Z=8, кислород — $\text{O}^+ ({}^4S_{3/2})$, $\varphi(2p)$				2p	5,7813	-0,1658	92,80
2p	2,2445	0,5537	8,715	3p	1,7078	0,6127	2,745
2p	3,8417	0,2331	33,40	3p	1,1477	0,4500	0,6830
2p	1,6413	0,2588	3,985	3p	4,2737	-0,0895	68,04
2p	8,5940	0,0107	250,0	A=1,8 (C); $\gamma=1,096$			
A=3,3 (C); $\gamma=1,607$							

$\chi_{n_i} l$ -базис	ξ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i} l$ -базис	ξ_i	C_i	N_i
Z=15, фосфор — $P^+ (^3P_0)$, $\varphi(3p)$				Z=22, титан — $Ti^+ (^4F_{3/2})$, $\varphi(4s)$			
2p	6,4620	-0,1775	122,6	3s	4,8903	-0,2565	109,0
3p	2,0224	0,5888	4,960	3s	0,3421	0,0007	0,0099
3p	1,3437	0,4831	1,186	4s	3,7168	-0,1538	41,46
3p	4,8429	-0,1044	105,4	4s	1,7424	0,4723	1,371
A=2,5 (C); $\gamma=1,204$				4s	1,1924	0,6000	0,2487
Z=16, сера — $S^+ (^4S_{3/2}^o)$, $\varphi(3p)$				4s	0,9598	0,0113	0,0937
2p	6,8792	-0,1940	143,3	A=2,06 (B); $\gamma=0,999$			
3p	2,3323	0,5724	8,169	Z=26, железо — $Fe^+ (^6D_{9/2})$, $\varphi(4s)$			
3p	1,5361	0,5079	1,894	3s	7,0523	-0,0591	392,7
3p	5,2639	-0,1054	141,1	3s	4,7126	-0,3075	95,80
A=3,2 (C); $\gamma=1,309$				4s	3,8393	0,0340	47,97
Z=17, хлор — $Cl^+ (^3P_2)$, $\varphi(3p)$				4s	1,8653	0,6795	1,863
2p	7,4953	-0,1995	177,6	4s	1,1933	0,4029	0,2496
3p	2,6483	0,5730	12,74	4s	0,8315	-0,0279	0,0491
3p	1,6571	0,5213	2,470	A=2,68 (B); $\gamma=1,091$			
3p	5,8297	-0,1145	201,7	Z=29, медь — $Cu^+ (^1S_0)$, $\varphi(3d)$			
A=3,1 (C); $\gamma=1,323$				3d	4,7056	0,3357	95,30
Z=18, аргон — $Ar (^2P_{3/2}^o)$, $\varphi(3p)$				3d	7,3863	0,2380	461,8
2p	7,9504	-0,2094	205,8	3d	2,9366	0,3617	18,30
3p	2,9565	0,5752	18,73	3d	1,6928	0,2292	2,661
3p	1,7999	0,5296	3,298	A=0,46 (D); $\gamma=1,221$			
3p	6,3001	-0,1166	264,6	Z=30, цинк — $Zn^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(4s)$			
A=3,4 (C); $\gamma=1,425$				3s	6,9485	-0,0448	372,9
Z=19, калий — $K^+ (^1S_0)$, $\varphi(3p)$				3s	5,7019	-0,2575	186,6
2p	8,6173	-0,2100	251,7	4s	5,0410	0,0237	163,4
3p	3,2482	0,5822	26,04	4s	2,1523	0,6092	3,548
3p	1,9456	0,5298	4,332	4s	1,3285	0,4852	0,4046
3p	6,8838	-0,1264	360,9	4s	0,9337	-0,0296	0,0827
A=3,9 (C); $\gamma=1,525$				A=3,01 (B); $\gamma=1,149$			
Z=20, кальций — $Ca^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(4s)$				Z=35, бром — $Br^+ (^3P_2)$, $\varphi(4p)$			
3s	3,9588	-0,2037	52,05	3p	8,6400	-0,1204	799,4
3s	3,0161	-0,1088	20,09	3p	5,8999	-0,2374	210,3
4s	3,091	-0,0560	18,07	4p	4,7239	0,0360	122,0
4s	1,4260	0,6048	0,5564	4p	2,8909	0,5699	13,38
4s	1,0026	0,5348	0,1140	4p	1,8189	0,4931	1,663
4s	0,8683	-0,0699	0,0597	4p	1,3175	0,0191	0,3898
A=1,62 (B); $\gamma=0,934$				A=2,5 (D); $\gamma=1,266$			
Z=20, кальций — $Ca^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(4s)$				Z=36, криптон — $Kr^+ (^2P_{3/2}^o)$, $\varphi(4p)$			
3p	9,3140	-0,1004	1040	3p	6,5114	-0,2558	297,0
3p	6,5114	-0,2558	297,0	4p	5,1030	-0,0293	172,6
4p	5,1030	-0,0293	172,6	4p	3,3385	0,5171	25,58
4p	3,3385	0,5171	25,58	4p	2,0615	0,5726	2,922
4p	2,0615	0,5726	2,922	4p	1,3318	0,0409	0,4091
4p	1,3318	0,0409	0,4091	A=3,7 (C); $\gamma=1,338$			

$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i l}$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=37$, рубидий — $Rb^+ (^1S_0)$, $\varphi(4p)$				$Z=54$, ксенон — $Xe^+ (^2P_{3/2}^o)$, $\varphi(5p)$			
3p	8,2772	-0,2204	687,9	3p	13,25	-0,1174	3572
3p	5,7561	-0,1811	192,9	3p	12,23	0,3505	2696
4p	3,8396	0,3530	47,99	4p	7,5294	-0,2548	993,8
4p	2,6913	0,4829	9,699	4p	5,3351	-0,2065	210,9
4p	1,8758	0,3079	1,911	5p	3,4263	0,4312	20,76
$A=3,82 (B)$; $\gamma=1,416$				5p	2,4313	0,4318	3,147
				5p	1,7727	0,2832	0,5538
				$A=3,2 (C)$; $\gamma=1,249$			
$Z=38$, стронций — $Sr^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(4p)$				$Z=55$, цезий — $Cs^+ (^1S_0)$, $\varphi(5p)$			
3p	8,5295	-0,2413	764,1	4p	8,0550	-0,2269	1346
3p	6,0050	-0,1957	223,7	4p	5,6750	-0,2904	278,4
4p	4,0192	0,4121	58,95	5p	4,4297	0,1671	85,28
4p	2,7693	0,5428	11,03	5p	3,0135	0,6225	10,25
4p	1,9765	0,1899	2,418	5p	1,9471	0,3876	0,9277
$A=1,39 (B)$; $\gamma=0,900$				$\langle 1/r \rangle = 0,608$; $\langle r \rangle = 2,10$; $\langle r^2 \rangle = 5,01$; $A=3,62 (C)$; $\gamma=1,358$			
$Z=47$, серебро — $Ag^+ (^1S_0)$, $\varphi(4d)$				$Z=56$, барий — $Ba^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(6s)$			
3d	16,52	-0,0757	7731	4s	7,7939	0,1468	1161
3d	9,3647	-0,2533	1060	4s	5,8169	0,0644	311,2
4d	5,7044	0,3214	285,0	5s	4,0202	-0,2665	50,02
4d	3,5287	0,5448	32,82	5s	2,7249	-0,1338	5,891
4d	2,0105	0,3180	2,610	6s	1,9612	0,2782	0,3295
$A=0,7 (D)$; $\gamma=1,257$				6s	1,4065	0,5472	0,0380
				6s	1,0525	0,2924	0,0058
				$\langle 1/r \rangle = 0,261$; $\langle r \rangle = 4,69$; $\langle r^2 \rangle = 24,5$; $A=1,54 (D)$; $\gamma=0,857$			
$Z=48$, кадмий — $Cd^+ (^2S_{1/2})$, $\varphi(5s)$							
4s	5,9977	-0,289	357,1	$Z=71$, лутеций — $Lu^+ (^1S_0)$, $\varphi(6s)$			
4s	4,0741	-0,0834	62,66	4s	11,326	0,1056	6240
5s	3,3311	0,1504	17,78	4s	8,4320	0,0989	1654
5s	2,1883	0,5485	1,764	5s	5,5825	-0,2217	304,3
5s	1,4477	0,4366	0,1818	5s	3,7421	-0,1613	33,72
$A=2,8 (C)$; $\gamma=1,115$				6s	2,4780	0,3923	1,507
				6s	1,6445	0,5975	0,1049
				6s	1,1677	0,1436	0,0113
				$\langle 1/r \rangle = 0,336$; $\langle r \rangle = 3,66$; $\langle r^2 \rangle = 15,0$; $A=2,63 (B)$; $\gamma=1,011$			
$Z=53$, иод — $I^+ (^3P_2)$, $\varphi(5p)$							
3p	11,65	0,2860	2279				
4p	7,3691	-0,2397	902,1				
4p	5,1336	-0,2002	177,3				
5p	3,3611	0,3261	18,68				
5p	2,4710	0,4539	3,440				
5p	1,7320	0,3598	0,4873				
$A=2,9 (C)$; $\gamma=1,186$							

$x_{n_i} l$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$x_{n_i} l$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=72$, гафний — $\text{Hf}^+ (^2D_{3/2})$, $\Phi(6s)$				$Z=81$, таллий — $\text{Tl}^+ (^1S_0)$, $\Phi(6s)$			
4s	11,700	0,0961	7223	4s	13,972	0,0772	16 050
4s	8,7814	0,1181	1986	4s	10,701	0,1813	4834
5s	5,8335	-0,2113	387,6	5s	6,9235	-0,3276	994,4
5s	3,9729	-0,1895	46,87	5s	4,7041	-0,0633	118,7
6s	2,7515	0,3034	2,977	6s	3,1913	0,4388	7,804
6s	1,8496	0,5950	0,2252	6s	2,1003	0,5299	0,5145
6s	1,2954	0,2464	0,0222	6s	1,4712	0,1669	0,0509
$\langle 1/r \rangle = 0,351$; $\langle r \rangle = 3,51$; $\langle r^2 \rangle = 13,8$; $A=2,88$ (C); $\gamma=1,046$				$\langle 1/r \rangle = 0,443$; $\langle r \rangle = 2,81$; $\langle r^2 \rangle = 8,93$; $A=4,30$ (C); $\gamma=1,225$			
$Z=79$, золото — $\text{Au}^+ (^1S_0)$, $\Phi(5d)$				$Z=82$, свинец — $\text{Pb}^+ (^2P_{1/2}^o)$, $\Phi(6p)$			
4d	13,192	0,1792	12 400	4p	12,536	0,1233	9853
4d	8,9100	0,2154	2120	4p	9,8439	0,0706	3320
5d	5,6869	-0,4241	337,0	5p	7,0393	-0,1865	1089
5d	3,4795	-0,5414	22,60	5p	5,0087	-0,1776	167,6
5d	2,0680	-0,2394	1,292	6p	4,0239	0,1177	35,22
$\langle 1/r \rangle = 0,856$; $\langle r \rangle = 1,53$; $\langle r^2 \rangle = 2,75$; $A=0,56$ (C); $\gamma=1,227$				6p	2,4688	0,5758	1,471
$Z=80$, ртуть — $\text{Hg}^+ (^2S_{1/2})$, $\Phi(6s)$				6p	1,5579	0,4654	0,0738
4s	13,504	0,0725	13 770	$\langle 1/r \rangle = 0,393$; $\langle r \rangle = 3,14$; $\langle r^2 \rangle = 11,1$; $A=1,73$ (C); $\gamma=1,051$			
4s	10,491	0,1651	4421	$Z=83$, висмут — $\text{Bi}^+ (^3P_0)$, $\Phi(6p)$			
5s	6,9412	-0,2690	1008	4p	12,745	0,1265	10 610
5s	4,7650	-0,1123	127,4	4p	10,107	0,0946	3738
6s	3,2739	0,3364	9,214	5p	7,3046	-0,2197	1335
6s	2,1067	0,5876	0,5247	5p	5,0862	-0,1785	182,4
6s	1,4330	0,2266	0,0429	6p	3,6661	0,2055	19,22
$\langle 1/r \rangle = 0,413$; $\langle r \rangle = 3,00$; $\langle r^2 \rangle = 10,2$; $A=3,71$ (C); $\gamma=1,174$				6p	2,4650	0,5780	1,457
				6p	1,6336	0,3679	0,1005
				$\langle 1/r \rangle = 0,429$; $\langle r \rangle = 2,89$; $\langle r^2 \rangle = 9,41$; $A=2,24$ (C); $\gamma=1,108$			

Таблица 3.5. Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в отрицательных атомных ионах, а. е.

$x_{n_i} l$ -базис	ζ_i	C_i	N_i	$x_{n_i} l$ -базис	ζ_i	C_i	N_i
$Z=3$, литий — $\text{Li}^- (^1S)$, $\Phi(2s)$				$Z=5$, бор — $\text{B}^- (^3P)$, $\Phi(2p)$			
1s	2,4747	-0,1003	7,786	2p	1,3068	0,1684	2,254
1s	4,6921	-0,0110	20,33	2p	2,0109	0,1587	6,621
2s	0,2676	0,3977	0,0428	2p	0,8673	0,4544	0,8089
2s	0,5340	0,5609	0,2406	2p	0,4205	0,3629	0,1324
2s	1,0113	0,2048	1,188	$A=0,39$ (D); $\gamma=0,148$			
2s	1,6628	-0,0791	4,117				
$A=1,0$ (D); $\gamma=0,212$							

$\chi_{n_i} I^{-\text{базис}}$	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i} I^{-\text{базис}}$	ζ_i	C_i	N_i
$Z=6$, углерод — $C^{-}(^4S)$, $\varphi(2p)$				$Z=15$, фосфор — $P^{-}(^3P)$, $\varphi(3p)$			
2p	1,4705	0,3871	3,028	2p	6,5044	-0,1370	124,6
2p	2,4996	0,2037	11,41	3p	2,2228	0,3228	6,904
2p	0,8837	0,3691	0,8476	3p	0,7470	0,3101	0,1519
2p	0,5368	0,1583	0,2438	3p	4,9018	-0,0918	109,9
2p	5,7105	0,0134	89,98	3p	1,3676	0,5174	1,261
$A=0,74 (D)$; $\gamma=0,306$				$A=0,9 (D)$; $\gamma=0,238$			
$Z=8$, кислород — $O^{-}(^2P)$; $\varphi(2p)$				$Z=16$, сера — $S^{-}(^2P)$, $\varphi(3p)$			
2p	1,7440	0,5275	4,638	2p	7,0774	-0,1515	153,9
2p	3,4297	0,3056	25,16	3p	2,6206	0,2974	12,28
2p	0,8639	0,2889	0,8011	3p	0,8997	0,3330	0,2913
2p	0,4083	0,0089	0,1230	3p	5,4249	-0,1043	156,8
$A=0,65 (D)$; $\gamma=0,328$				3p	1,6580	0,5236	2,474
$Z=9$, фтор — $F^{-}(^1S_0)$, $\varphi(2p)$				$A=0,1 (E)$; $\gamma=0,391$			
2p	2,0754	0,4704	7,165	$Z=17$, хлор — $Cl^{-}(^1S)$, $\varphi(3p)$			
2p	3,9334	0,3084	35,43	2p	7,6297	-0,1622	185,7
2p	1,4660	0,0988	3,005	3p	2,9265	0,3296	18,08
2p	0,9568	0,2470	1,034	3p	1,0156	0,3027	0,4452
$A=0,84 (C)$; $\gamma=0,500$				3p	5,9400	-0,1134	215,4
$Z=11$, натрий — $Na^{-}(^1S)$, $\varphi(3s)$				3p	1,8319	0,5244	3,508
2s	4,1303	-0,0954	40,03	$A=1,34 (C)$; $\gamma=0,516$			
3s	0,9574	0,5117	0,3620	$Z=19$, калий — $K^{-}(^1S)$, $\varphi(4s)$			
3s	0,4169	0,6262	0,0197	2s	7,585	0,0464	183,0
3s	3,1346	-0,0291	22,99	3s	3,9935	-0,0762	53,66
$A=1,0 (D)$; $\gamma=0,201$				3s	2,6383	-0,0923	12,58
$Z=13$, алюминий — $Al^{-}(^3P)$, $\varphi(3p)$				4s	0,3520	0,3923	0,0010
3p	1,7365	0,1501	2,909	4s	1,2652	0,2439	0,3248
3p	0,4698	0,4561	0,0300	4s	0,7045	0,5658	0,0233
3p	3,9148	-0,0627	50,05	$A=0,9 (E)$; $\gamma=0,192$			
3p	1,0069	0,5603	0,4319	$Z=26$, железо — $Fe^{-}(^4S)$, $\varphi(4s)$			
$A=0,51 (D)$; $\gamma=0,192$				3s	4,7306	-0,1188	97,08
$Z=14$, кремний — $Si^{-}(^4S)$, $\varphi(3p)$				4s	1,9328	0,2895	2,186
2p	6,1438	-0,1147	108,0	4s	0,9992	0,5668	0,1123
3p	2,0551	0,1838	5,246	4s	0,4855	0,3736	0,0044
3p	0,6855	0,3953	0,1125	$A=0,93 (D)$; $\gamma=0,171$			
3p	4,4933	-0,0856	81,08	$Z=27$, кобальт — $Co^{-}(^3F)$, $\varphi(4s)$			
3p	1,2940	0,5570	1,039	3s	5,2702	-0,1156	141,7
$A=1,1 (D)$; $\gamma=0,320$				4s	2,0219	0,2713	2,678
				4s	1,0777	0,5407	0,1578
				4s	0,5259	0,4133	0,0062
				$A=1,1 (D)$; $\gamma=0,257$			

$\chi_{n_i} l^-$ - базис	ζ_i	C_i	N_i	$\chi_{n_i} l^-$ - базис	ζ_i	C_i	N_i
Z=28, никель — Ni ⁻ (² D), $\varphi(4s)$				Z=47, серебро — Ag ⁻ (¹ S), $\varphi(5s)$			
3s	6,0288	-0,1491	226,9	4s	5,8596	-0,1751	321,6
4s	2,198	0,2311	3,899	4s	3,9820	-0,0186	56,53
4s	1,2013	0,5154	0,2572	5s	2,2709	0,3327	2,162
4s	0,5850	0,4742	0,0101	5s	1,2026	0,5534	0,0655
				5s	0,5962	0,3754	0,0014
A=1,3 (E); $\gamma=0,309$				A=1,3 (E); $\gamma=0,309$			
Z=29, медь — Cu ⁻ (¹ S), $\varphi(4s)$				Z=50, олово — Sn ⁻ (⁴ S), $\varphi(5p)$			
3s	6,6632	0,2757	322,0	3p	10,33	0,1177	1491
3s	6,3797	0,4153	276,5	4p	6,4872	-0,1781	508,3
4s	2,0688	0,3062	2,969	4p	4,2862	-0,0809	78,74
4s	1,0758	0,5415	0,1565	5p	2,4685	0,3899	3,421
4s	0,5267	0,3820	0,0063	5p	1,4281	0,5598	0,1686
				5p	0,8017	0,2471	0,0070
A=1,2 (E); $\gamma=0,301$				A=1,3 (D); $\gamma=0,303$			
Z=34, селен — Se ⁻ (² P), $\varphi(4p)$				Z=51, сурьма — Sb ⁻ (³ P), $\varphi(5p)$			
3p	8,7108	-0,0767	822,5	3p	10,63	0,1405	1650
3p	5,8440	-0,2	203,4	4p	6,7509	-0,2009	608,1
4p	2,6621	0,4699	9,234	4p	4,5451	-0,1007	102,5
4p	1,5616	0,4889	0,8373	5p	2,6459	0,4433	5,011
4p	0,8938	0,1964	0,0680	5p	1,5355	0,5471	0,2512
				5p	0,8545	0,2089	0,0100
A=1,3 (C); $\gamma=0,385$				A=1,2 (D); $\gamma=0,278$			
Z=35, бром — Br ⁻ (¹ S), $\varphi(4p)$				Z=52, теллур — Te ⁻ (² P), $\varphi(5p)$			
3p	8,6078	-0,0915	789,0	3p	11,03	0,1707	1881
3p	5,8779	-0,2293	207,6	4p	6,9706	-0,2238	702,4
4p	2,8155	0,5170	11,88	4p	4,7572	-0,1156	125,9
4p	1,6858	0,4350	1,182	5p	2,8219	0,4836	7,141
4p	1,0414	0,1889	0,1353	5p	1,6523	0,5322	0,3761
				5p	0,9349	0,1790	0,0164
A=1,49 (B); $\gamma=0,498$				A=1,5 (D); $\gamma=0,374$			
Z=37, рубидий — Rb ⁻ (¹ S), $\varphi(5s)$				Z=53, иод — I ⁻ (¹ S), $\varphi(5p)$			
4s	3,8861	-0,1106	50,66	3p	11,69	0,2207	2306
4s	2,5250	-0,0697	7,278	4p	7,1112	-0,2449	768,5
5s	1,5190	0,2348	0,2368	4p	4,9399	-0,1226	149,1
5s	0,9375	0,3586	0,0167	5p	3,0017	0,5122	10,03
5s	0,5629	0,5857	0,0010	5p	1,7759	0,5207	0,5592
				5p	1,0267	0,1574	0,0275
A=0,8 (E); $\gamma=0,189$				A=1,9 (D); $\gamma=0,475$			

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТОМОВ

4.1. ПОТЕНЦИАЛ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

В табл. 4.1 приведены значения потенциала ионизации (IP) нейтральных атомных частиц, т. е. минимальной энергии, затрачиваемой на переход валентного электрона в непрерывный спектр. Кроме того, представлены предельные значения для серий оптических переходов, отсчитанные от уровня основного состояния атома. Эти значения также являются потенциалами ионизации, выраженными в единицах см^{-1} (переводной множитель: $1 \text{ эВ} = 8065,48 \text{ см}^{-1}$). В отдельном столбце табл. 4.1 указаны конфигурация валентной электронной оболочки и электронный терм основного состояния атома.

Собранная здесь информация получена, главным образом, в результате экстраполяции серий оптических переходов, инициируемых с помощью различных источников возбуждения спектров нейтральных частиц. При этом либо находят предельное значение известной функции (скажем, формулы Ритца), аппроксимирующей ридберговские уровни энергии атомной частицы, либо сравнивают реальные уровни с водородоподобными, внося поправки на поляризацию атомного остова [1]. Кроме того, часть данных была получена методами измерения порога фотоионизации, фотоэлектронной спектроскопии и лазерной спектроскопии ридберговских состояний атомов. Наконец, в случае одноэлектронных систем мы воспользовались расчетными значениями потенциала ионизации Эриксона [2], при получении которых учитывались многие квантово-электродинамические эффекты.

Основная информация о потенциалах ионизации атомных частиц содержится в [3—8]. Кроме того, были использованы данные более поздних по времени журнальных статей. Погрешность определения искоемых величин была учтена при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней цифры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Edlén B. Atomic spectra. — In: Encyclopedia of Physics. Vol. 27/Ed. by S. Flugge. — Berlin: Springer, 1964, p. 79—220.
2. Erickson G. W. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1977, vol. 6, p. 831.
3. Moore C. E. Ionization potentials and ionization limits derived from optical spectra: NSRDS-NBS, vol. 34. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1970.
4. Martin W. C., Hagan L., Reader J., Sugar J. Ground levels and IP's for lanthanide and actinide atoms and ions. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1974, vol. 3, p. 771; Martin W. C., Zalubas R., Hagan L. Atomic energy levels. — The rare earth elements: NSRDS-NBS vol. 60. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1978.
5. Kelly R. L., Harrison D. E. IP's experimental and theoretical of the elements hydrogen to krypton. — Atomic Data, 1971, vol. 3, p. 177.
6. Rauh E. G., Ackermann R. J. The first ionization potentials of the transition metals. — J. Chem. Phys., 1979, vol. 70, p. 1004.
7. Worden E. F., Conway J. G. Multistep laser photoionization of the lanthanides and actinides. — In: Lanthanide and Actinide Chemistry and Spectroscopy: Amer. Chem. Soc. Symp. Ser. 131/Ed. by N. M. Edelstein. — Washington, D. C.: Amer. Chem. Soc., 1980, Ch. 19, p. 381—425.
8. Odabasi H. Regularities in ionization potentials. — Phys. Scripta, 1979, vol. 19, p. 313.

Таблица 4.1. Потенциал ионизации атомов

Атомный номер Z	Элемент X	XI	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхняя цифра); потенциал ионизации IP, эВ (нижняя цифра)
1	H	1s — ² S _{1/2}	109 678,774 13,5985
	D	1s — ² S _{1/2}	109 708,617 13,6022
	T	1s — ² S _{1/2}	109 718,546 13,6035
2	³ He	1s ² — ¹ S ₀	198 300,3 24,5863
	⁴ He	1s ² — ¹ S ₀	198 310,77 24,5876
3	Li	2s — ² S _{1/2}	43 487,15 5,3918
4	Be	2s ² — ¹ S ₀	75 192,5 9,3228
5	B	2p — ² P _{1/2} ^o	66 928,1 8,2981
6	C	2p ² — ³ P ₀	90 820,4 11,260
7	N	2p ³ — ⁴ S _{3/2} ^o	117 225,7 14,534
8	O	2p ⁴ — ³ P ₂	109 837,0 13,618
9	F	2p ⁵ — ² P _{3/2} ^o	140 524,5 17,423
10	Ne	2p ⁶ — ¹ S ₀	173 929,7 21,565
11	Na	3s — ² S _{1/2}	41 449,4 5,13912
12	Mg	3s ² — ¹ S ₀	61 671,0 7,6463
13	Al	3p — ² P _{1/2} ^o	48 278,42 5,98581
14	Si	3p ² — ³ P ₀	65 747,8 8,1517
15	P	3p ³ — ⁴ S _{3/2} ^o	84 580,8 10,4868
16	S	3p ⁴ — ³ P ₂	83 559,3 10,36012
17	Cl	3p ⁵ — ² P _{3/2} ^o	104 591 12,968
18	Ar	3p ⁶ — ¹ S ₀	127 109,8 15,760
19	K	4s — ² S _{1/2}	35 009,81 4,34070
20	Ca	4s ² — ¹ S ₀	49 306,0 6,1132

Атомный номер Z	Элемент X	XI	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхняя цифра); потенциал ионизации IP, эВ (нижняя цифра)
21	Sc	$3d4s^2—^2D_{3/2}$	52 922
22	Ti	$3d^24s^2—^3F_2$	6,5615 55 000
23	V	$3d^34s^2—^4F_{3/2}$	6,82 54 360
24	Cr	$3d^54s—^7S_3$	6,74 54 570
25	Mn	$3d^54s^2—^6S_{5/2}$	6,766 59 959,4
26	Fe	$3d^64s^2—^5D_4$	7,43408 63 740
27	Co	$3d^74s^2—^4F_{9/2}$	7,9024 63 400
28	Ni	$3d^84s^2—^3F_4$	7,86 61 600
29	Cu	$4s—^2S_{1/2}$	7,637 62 317,4
30	Zn	$4s^2—^1S_0$	7,7264 75 769,3
31	Ga	$4p—^2P_{1/2}^{\circ}$	9,3943 48 387,63
32	Ge	$4p^2—^3P_0$	5,99935 63 713,2
33	As	$4p^3—^4S_{3/2}^{\circ}$	7,8995 78 950
34	Se	$4p^4—^3P_2$	9,789 78 658,2
35	Br	$4p^5—^2P_{3/2}^{\circ}$	9,752 95 284, 8
36	Kr	$4p^6—^1S_0$	11,814 112 914,5
37	Rb	$5s—^2S_{1/2}$	13,9997 33 690,88
38	Sr	$5s^2—^1S_0$	4,17717 45 932,1
39	Y	$4d5s^2—^2D_{3/2}$	5,69490 50 144
40	Zr	$4d^25s^2—^3F_2$	6,217 55 100
41	Nb	$4d^45s—^6D_{1/2}^{\circ}$	6,837 55 500
42	Mo	$4d^55s—^7S_3$	6,88 57 300
43	Tc	$4d^55s^2—^6S_{5/2}$	7,039 58 700
44	Ru	$4d^75s—^5F_5$	7,28 59 410
45	Rh	$4d^85s—^4F_{9/2}$	7,366 60 200
			7,46

Атомный номер Z	Элемент X	XI	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхняя цифра); потенциал ионизации IP, эВ (нижняя цифра)
46	Pd	$4d^{10}—1S_0$	67 236 8,336
47	Ag	$5s—2S_{1/2}$	61 106,6 7,5763
48	Cd	$5s^2—1S_0$	72 540,1 8,9939
49	In	$5s^25p—2P_{1/2}^{\circ}$	46 670,11 5,78640
50	Sn	$5p^2—3P_0$	59 232,7 7,3440
51	Sb	$5p^3—4S_{3/2}^{\circ}$	69 430 8,609
52	Te	$5p^4—3P_2$	72 670 9,010
53	I	$5p^5—2P_{3/2}^{\circ}$	84 295,0 10,451
54	Xe	$5p^6—1S_0$	97 833,8 12,1299
55	Cs	$6s—2S_{1/2}$	31 406,47 3,89394
56	Ba	$6s^2—1S_0$	42 034,90 5,21171
57	La	$5d6s^2—2D_{3/2}$	44 980 5,577
58	Ce	$4f^5d6s^2—1G_4^{\circ}$	44 670 5,539
59	Pr	$4f^66s^2—4I_{9/2}^{\circ}$	44 100 5,47
60	Nd	$4f^46s^2—5I_4$	44 560 5,525
61	Pm	$4f^66s^2—6H_{5/2}^{\circ}$	45 000 5,58
62	Sm	$4f^66s^2—7F_0$	45 520 5,644
63	Eu	$4f^76s^2—8S_{7/2}^{\circ}$	45 735 5,6704
64	Gd	$4f^75d6s^2—9D_2^{\circ}$	49 603 6,150
65	Tb	$4f^86s^2—6H_{15/2}^{\circ}$	47 300 5,864
66	Dy	$4f^{10}6s^2—5I_8$	47 900 5,939
67	Ho	$4f^{11}6s^2—4I_{15/2}^{\circ}$	48 570 6,022

Атомный номер Z	Элемент X	XI	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхняя цифра); потенциал ионизации IP, эВ (нижняя цифра)
68	Er	$4f^{12}6s^2—^3H_6$	49 260 6,108
69	Tm	$4f^{13}6s^2—^2F_{7/2}^{\circ}$	49 880 6,184
70	Yb	$4f^{14}6s^2—^1S_0$	50 441 6,254
71	Lu	$4f^{14}5d6s^2—^2D_{3/2}$	43 762,4 5,426
72	Hf	$5d^26s^2—^3F_2$	55 600 6,8
73	Ta	$5d^36s^2—^4F_{3/2}$	63 600 7,89
74	W	$5d^46s^2—^5D_0$	64 000 7,98
75	Re	$5d^56s^2—^6S_{5/2}$	64 000 7,88
76	Os	$5d^66s^2—^5D_4$	70 450 8,73
77	Ir	$5d^76s^2—^4F_{9/2}$	73 000 9,05
78	Pt	$5d^96s—^3D_3$	72 300 8,96
79	Au	$5d^{10}6s—^2S_{1/2}$	74 409,0 9,2256
80	Hg	$6s^2—^1S_0$	84 184,1 10,4376
81	Tl	$6s^26p—^2P_{1/2}^{\circ}$	49 266,7 6,1083
82	Pb	$6p^2—^3P_0$	59 819,6 7,4167
83	Bi	$6p^3—^4S_{3/2}^{\circ}$	58 762 7,2856
84	Po	$6p^4—^3P_2$	67 885,3 8,4168
85	At	$6p^5—^2P_{3/2}^{\circ}$	— 9,0
86	Rn	$6p^6—^1S_0$	86 692 10,75
87	Fr	$7s—^2S_{1/2}$	— 4,0
88	Ra	$7s^2—^1S_0$	42 573,4 5,2785
89	Ac	$6d7s^2—^2D_{3/2}$	42 000 5,2
90	Th	$6d^27s^2—^3F_2$	49 000 6,1
91	Pa	$5f^2 (^3H_4) 6d7s^2$ $(4,3/2)_{11/2}$	47 000 6,0

Атомный номер Z	Элемент X	XI	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхняя цифра); потенциал ионизации IP, эВ (нижняя цифра)
92	U	$5f^3(^4I_{9/2}^\circ)6d7s^2$ $(9/2, 3/2)_6^\circ$	49 960 6,194
93	Np	$5f^4(^5I_4)6d7s^2$ $(4, 3/2)_{11/2}$	50 540 6,266
94	Pu	$5f^87s^2—^7F_0$	49 000 6,06
95	Am	$5f^77s^2—^8S_{7/2}^\circ$	48 300 6,0
96	Cm	$5f^7(^8S_{7/2}^\circ)6d7s^2$ $(7/2, 3/2)_2^\circ$	48 600 6,02
97	Bk	$5f^97s^2—^6H_{15/2}^\circ$	50 200 6,23
98	Cf	$5f^{10}7s^2—^5I_8$	50 800 6,30
99	Es	$5f^{11}7s^2—^4I_{15/2}^\circ$	51 800 6,42
100	Fm	$5f^{12}7s^2—^3H_6$	52 000 6,5
101	Md	$5f^{13}7s^2—^2F_{7/2}^\circ$	53 000 6,6
102	No	$5f^{14}7s^2—^1S_0$	54 000 6,6

4.2. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОНОВ ВНУТРЕННИХ ОБОЛОЧЕК АТОМОВ

Ниже приводятся значения энергии связи электронов, заполняющих внутренние оболочки атомов, — минимальной энергии, затрачиваемой на вырывание электронов из замкнутых оболочек. После отрыва электрона от атома образующийся ион может оказаться в различных состояниях. Взаимодействие между внешней (валентной) электронной оболочкой и внутренней оболочкой с вакансией приводит к относительно небольшому расщеплению энергии этих состояний. Приведенные значения энергии связи электронов соответствуют образованию наименее энергичного по энергии состояния иона.

Энергия связи электронов соответствует свободным атомам, т. е. отнесена к нулевому потенциалу вакуума. В случае проводящих твердых тел измеряемую энергию связи электронов в атомах, естественно, относят к уровню Ферми соответствующего проводника, так что для пересчета искомой энергии к вакуумному уровню в этом случае требуется к измеренному значению прибавить работу выхода элемента, которая составляет в среднем около 4 эВ.

В табл. 4.2 расшифрованы символы электронных подоболочек атома, отвечающие разным главным квантовым числам электрона n , его орбитальному l и полному j моментам. Значения энергии связи электронов во внутренних оболоч-

ках свободных атомов представлены в табл. 4.3. При отборе материала для этой таблицы были использованы работы [1—10]. Погрешность определения искомым значений энергии учитывалась при округлении значащих цифр в пределах ± 1 — ± 3 для последней приведенной цифры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bearden J. A., Burr A. F. — Rev. Mod. Phys., 1967, vol. 39, p. 125.
2. Lotz W. — J. Opt. Soc. Amer., 1970, vol. 60, p. 206.
3. Карлсон Т. А. Фотоэлектронная и оже-спектроскопия: Пер. с англ.— Л.: Машиностроение, 1981. Приложение 1.
4. Shirley D. A., Martin R. L., Kowalczyk S. P. e. a. — Phys. Rev., 1977, vol. B15, p. 544.
5. Mehlhorn W., Breuckmann B., Hausamann D. — Phys. Scripta, 1977, vol. 16, p. 177.
6. Porter F. T., Freedman M. S. — J Phys. Chem. Ref. Data, 1978, vol. 7, p. 1267 ($Z=84 \div 103$).
7. Sevier K. D. — At. Data Nucl. Data Tables, 1979, vol. 24, p. 323.
8. Photoemission in Solids II: Topics in Applied Physics. Vol. 27/Ed. by L. Ley, M. Cardona. — Berlin: Springer, 1979, Appendix, p. 373—384.
9. Fuggle J. C., Martensson N. — J. Electron Spectr. Relat. Phenomena, 1980, vol. 21, p. 275.
10. Siegbahn H., Karlsson L. Photoelectron spectroscopy. — In: Encyclopedia of Physics. Vol. 31/Ed. by W. Mehlhorn. — Berlin: Springer, 1982. p. 215—467.

Т а б л и ц а 4.2. Символы электронных подоболочек атомных частиц

Главное квантовое число электрона (или вакансии)	Угловой момент вылетающего электрона						
	$s_{1/2}$	$p_{1/2}$	$p_{3/2}$	$d_{3/2}$	$d_{5/2}$	$f_{5/2}$	$f_{7/2}$
1	K						
2	L_1	L_2	L_3				
3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5		
4	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7
5	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7
6	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5		
7	Q_1	Q_2					

Т а б л и ц а 4.3. Энергия связи электронов внутренних оболочек свободных атомов, эВ

I. $Z=3 \div 18$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки				
		K	L_1	L_2	L_3	M_1
3	Li	64,40				
4	Be	123,6				
5	B	201	12,93			
6	C	296	16,59			
7	N	403	20,33			
8	O	538	28,48			
9	F	694	37,86			
10	Ne	870,27	48,47			
11	Na	1079	70,9	38,46	38,0	

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки				
		K	L_1	L_2	L_3	M_1
12	Mg	1311,4	96,5	57,8	57,6	
13	Al	1567	126	81	80	10,62
14	Si	1844	154	104	104	13,46
15	P	2148	191	135	134	16,15
16	S	2476	232	170	168	20,20
17	Cl	2829	277	208	206	24,59
18	Ar	3206	326,3	250,6	248,6	29,24
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$

II. $Z=19\div36$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки									
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1
19	K	3614	384	303,3	300,7	37	24,82	24,49			
20	Ca	4048	441	360	357	48	34,7	34,3			
21	Sc	4494	503	408	404	56	33	33			
22	Ti	4970	567	465	459	64	39	38			
23	V	5470	633	525	518	72	44	43			
24	Cr	5995	702	589	580	80	49	48			
25	Mn	6544	755	656	645	89	55	53			
26	Fe	7117	851	726	713	98	61	59			
27	Co	7715	931	800	785	107	68	66			
28	Ni	8338	1015	877	860	117	75	73			
29	Cu	8986	1103	958	938	127	82	80			
30	Zn	9663	1198	1052	1029	141	98,7	96,1			
31	Ga	10 371	1302	1146	1119	162	111	107	21	20	11,87
32	Ge	11 107	1413	1251	1220	184	130	125	33	32	14,28
33	As	11 871	1531	1362	1327	208	151	145	46	45	18,96
34	Se	12 662	1656	1479	1439	234	173	166	61	60	22,19
35	Br	13 481	1787	1602	1556	262	197	189	77	76	23,80
36	Kr	14 327	1923	1731	1678	293	222	214,6	95,0	93,8	27,51
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$

III. $Z=37\div54$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки							
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4
37	Rb	15 203	2068	1867	1807	325	254,3	245,4	117,4
38	Sr	16 108	2219	2010	1943	361	288	278	144
39	Y	17 041	2375	2158	2083	397	315	304	163
40	Zr	18 002	2536	2311	2227	434	348	335	187

III. $Z=37 \div 54$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подболочки							
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4
41	Nb	18 990	2702	2469	2375	472	382	367	212
42	Mo	20 006	2872	2632	2527	511	416	399	237
43	Tc	21 050	3048	2800	2683	551	451	432	263
44	Ru	22 123	3230	2973	2844	592	488	466	290
45	Rh	23 225	3418	3152	3010	634	526	501	318
46	Pd	24 357	3611	3337	3180	677	565	537	347
47	Ag	25 520	3812	3530	3357	724	608	577	379
48	Cd	26 715	4022	3732	3542	775	659	625	419
49	In	27 944	4242	3943	3735	830	707	669	455
50	Sn	29 204	4469	4160	3933	888	761	719	497
51	Sb	30 496	4703	4385	4137	949	817	771	542
52	Te	31 820	4945	4618	4347	1012	876	825	589
53	I	33 176	5195	4858	4563	1078	937	881	638
54	Xe	34 561	5453	5107	4787	1149	1002	941	689
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$

III. $Z=37 \div 54$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подболочки						
		M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1
37	Rb	116	114	21,77	20,71			
38	Sr	142	40	29,2	28,2			
39	Y	161	48	30	29			
40	Zr	185	56	35	33			
41	Nb	209	62	40	38			
42	Mo	234	68	45	42			
43	Tc	259	74	49	45			
44	Ru	286	81	53	49			
45	Rh	313	87	58	53			
46	Pd	342	93	63	57			
47	Ag	373	101	69	63			
48	Cd	412	112	78	71	18,28	17,58	
49	In	447	126	90	82	21	20	11,03
50	Sn	489	141	102	93	29	28	13,10
51	Sb	533	157	114	104	38	37	16,86
52	Te	578	174	127	117	48	46	17,84
53	I	626	193	141	131	58	56	20,61
54	Xe	677	213,3	157	145,5	69,5	67,5	23,40
		$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$5s_{1/2}$

IV. $Z=55 \div 83$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки							
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4
55	Cs	35 987	5717	5362	5014	1220	1068	1005	746
56	Ba	37 442	5991	5626	5249	1293	1138	1063	797
57	La	38 928	6269	5894	5486	1365	1207	1124	851
58	Ce	40 446	6552	6167	5726	1437	1275	1184	903
59	Pr	41 995	6839	6444	5968	1509	1342	1244	954
60	Nd	43 575	7132	6727	6213	1580	1408	1303	1005
61	Pm	45 188	7432	7017	6464	1653	1476	1362	1057
62	Sm	46 837	7740	7315	6720	1728	1546	1422	1110
63	Eu	48 522	8056	7621	6981	1805	1618	1484	1164
64	Gd	50 243	8380	7935	7247	1884	1692	1547	1220
65	Tb	51 999	8711	8256	7518	1965	1768	1612	1277
66	Dy	53 792	9050	8585	7794	2048	1846	1678	1335
67	Ho	55 622	9398	8922	8075	2133	1926	1746	1395
68	Er	57 489	9754	9267	8361	2220	2008	1815	1456
69	Tm	59 393	10 118	9620	8651	2309	2092	1885	1518
70	Yb	61 335	10 490	9981	8946	2401	2178	1956	1580
71	Lu	63 320	10 876	10 355	9250	2499	2270	2032	1647
72	Hf	65 350	11 275	10 742	9564	2604	2369	2113	1720
73	Ta	67 419	11 684	11 139	9884	2712	2472	2197	1796
74	W	69 529	12 103	11 546	10 209	2823	2577	2283	1874
75	Re	71 681	12 532	11 963	10 540	2937	2686	2371	1953
76	Os	73 876	12 972	12 390	10 876	3054	2797	2461	2035
77	Ir	76 115	13 422	12 828	11 219	3175	2912	2554	2119
78	Pt	78 399	13 883	13 277	11 567	3300	3030	2649	2206
79	Au	80 729	14 356	13 738	11 923	3430	3153	2748	2295
80	Hg	83 108	14 845	14 214	12 288	3567	3283	2852	2390
81	Tl	85 536	15 350	14 704	12 662	3710	3420	2961	2490
82	Pb	88 011	15 867	15 206	13 041	3857	3560	3072	2592
83	Bi	90 534	16 396	15 719	13 426	4007	3704	3185	2696
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$

IV. $Z=55 \div 83$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки								
		M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1	O_2	O_3
55	Cs	732	233	174	164	81	79	25	19,07	17,21
56	Ba	782	254	193	181	101	98,4	31	24,8	22,8
57	La	834	273	210	196	105	103	36	22	19
58	Ce	885	291	225	209	114	111	39	25	22
59	Pr	934	307	238	220	121	117	41	27	24
60	Nd	983	321	250	230	126	122	42	28	25
61	Pm	1032	335	261	240	131	127	43	28	25
62	Sm	1083	349	273	251	137	132	44	29	25
63	Eu	1135	364	286	262	143	137	45	30	26
64	Gd	1189	380	300	273	150	143	46	31	27

Атомный номер Z	Атом	Электронные подболочки								
		M_6	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1	O_2	O_3
65	Tb	1243	398	315	285	157	150	48	32	28
66	Dy	1298	416	331	297	164	157	50	33	28
67	Ho	1354	434	348	310	172	164	52	34	29
68	Er	1412	452	365	323	181	172	54	35	30
69	Tm	1471	471	382	336	190	181	56	36	30
70	Yb	1531	490	399	349	200	190	58	37	31
71	Lu	1596	514	420	366	213	202	62	39	32
72	Hf	1665	542	444	386	229	217	68	43	35
73	Ta	1737	570	469	407	245	232	74	47	38
74	W	1811	599	495	428	261	248	80	51	41
75	Re	1887	629	522	450	278	264	86	56	45
76	Os	1964	660	551	473	295	280	92	61	49
77	Ir	2044	693	581	497	314	298	99	66	53
78	Pt	2126	727	612	522	335	318	106	71	57
79	Au	2210	764	645	548	357	339	114	76	61
80	Hg	2300	809	686	584	385	366	134	90	72
81	Tl	2394	852	726	615	411	391	139	98	79
82	Pb	2490	899	769	651	441	419	153	111	90
83	Bi	2588	946	813	687	472	448	167	125	101
		$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$5s_{1/2}$	$5p_{1/2}$	$5p_{3/2}$

V. Z=84÷94

Электронная подболочка	Атом					
	$_{81}\text{Po}$	$_{85}\text{At}$	$_{86}\text{Rn}$	$_{87}\text{Fr}$	$_{88}\text{Ra}$	$_{89}\text{Ac}$
K	93 105	95 730	98 400	101 135	103 920	106 760
L_1	16 933	17 485	18 053	18 640	19 240	19 850
L_2	16 242	16 780	17 335	17 905	18 490	19 090
L_3	13 815	14 213	14 615	15 030	15 450	15 875
M_1	4160	4315	4480	4650	4825	5005
M_2	3850	4000	4155	4320	4490	4660
M_3	3300	3415	3535	3660	3790	3920
M_4	2800	2905	3015	3135	3253	3375
M_5	2685	2785	2890	3000	3110	3225
N_1	992	1043	1095	1155	1213	1275
N_2	855	902	950	1005	1062	1118
N_3	720	760	795	840	885	930
N_4	500	533	565	604	640	680
N_5	475	504	535	572	608	645
N_6	190	212	235	265	293	320
N_7	184	205	230	255	285	312
O_1	183	198	215	235	260	280
O_2	137	150	165	184	205	222
O_3	108	118	129	144	158	173
O_4	39	45	53	65	75	90
O_5	35	42	48	60	70	82

Электронная подоболочка	Атом				
	$_{90}\text{Th}$	$_{91}\text{Pa}$	$_{92}\text{U}$	$_{94}\text{Np}$	$_{94}\text{Pu}$
K	109 655	112 600	115 605	118 675	121 795
L_1	20 475	21 115	21 763	22 432	23 103
L_2	19 700	20 320	20 953	21 605	22 270
L_3	16 305	16 735	17 170	17 615	18 062
M_1	5187	5372	5553	5745	5938
M_2	4835	5007	5185	5370	5545
M_3	4050	4180	4308	4440	4560
M_4	3495	3610	3730	3855	3975
M_5	3337	3445	3555	3670	3780
N_1	1335	1390	1445	1505	1565
N_2	1173	1228	1277	1332	1383
N_3	972	1010	1050	1090	1125
N_4	718	748	785	820	852
N_5	682	713	743	775	805
N_6	350	375	395	420	442
N_7	340	365	385	410	430
O_1	295	313	328	345	355
O_2	238	250	265	288	298
O_3	185	190	200	210	220
O_4	100	102	110	115	120
O_5	92	95	100	105	110

4.3. КВАНТОВЫЕ ДЕФЕКТЫ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМНЫХ УРОВНЕЙ

В табл. 4.4 приведены числовые значения квантового дефекта высоковозбужденных (или ридберговских) уровней энергии атомных частиц. Величина квантового дефекта δ_l характеризует вклад некулоновского взаимодействия возбужденного электрона с атомным остовом (главным образом, путем поляризации кора и обменного взаимодействия возбужденного электрона с внутренними электронами) в области порядка размеров последнего. Это взаимодействие приводит к отрицательному сдвигу атомных уровней энергии по отношению к границе непрерывного спектра. В итоге положение электронных уровней энергии $T_{n,l}$ для ридберговских состояний атомных частиц определяется по модифицированной формуле Ридберга—Ритца[1, 2]

$$T_{n,l} = T_{\infty} - \frac{R_M Z_c^2}{n^{*2}} = T_{\infty} - \frac{R_M Z_c^2}{(n - \delta_l)^2},$$

где T_{∞} — ионизационный предел для заданной электронной конфигурации $\{n, l\}$; R_M — ридберговская постоянная для нуклида с массой M , равная $R_{\infty}/(1 + m_e/M)$; Z_c — заряд атомного остова; $n^* = n - \delta_l$ — эффективное главное квантовое число возбужденного электрона. В пределе $n \rightarrow \infty$ квантовый дефект уровня δ_l не зависит от главного квантового числа электрона, а зависит только от его орбитального момента и полного момента атомной частицы J .

В табл. 4.4 представлены предельные (при $n \rightarrow \infty$) значения квантового дефекта δ_l , найденные в результате сопоставления зависимости для $T_{n,l}$ с известными из обработки оптических спектров экспериментальными значениями энергетических уровней сильновозбужденных атомных частиц. Информация о парамет-

рах ридберговских серий в оптических спектрах атомных частиц почерпнута нами из обзоров [3—7] и многочисленных журнальных публикаций последнего времени. В последнем столбце табл. 4.4 приведен диапазон значений главного квантового числа Δn возбужденного электрона, исследованный в эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seaton M. J. — Proc. Phys. Soc. (London), 1966, vol. 88, p. 801; Comments At. Mol. Phys., 1970, vol. D2, p. 37; Rept. Progress Phys., 1983, vol. 46, p. 167.
2. Lu K. T., Fano U. — Phys. Rev., 1970, vol. A2, p. 81; Fano U. — J. Opt. Soc. Amer., 1975, vol. 65, p. 979.
3. Edelstein S. A., Gallagher T. F. Rydberg atoms. — In: Advances in Atomic and Molecular Physics, Vol. 14/Ed. by D. R. Bates, B. Bederson. — N. Y.: Academic Press, 1978, p. 365.
4. Rydberg states. — In: Laser Spectroscopy IV: Proc. Fourth Intern. Conf., held in Rottach—Egern June 11—15, 1979/Ed. by H. Walther, K. W. Rothe. — Berlin: Springer, 1979, Part III, p. 235.
5. Kleppner D. The spectroscopy of highly excited atoms. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part B/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1979, Ch. 16, p. 713.
6. Lindgard A., Nielsen S. E. — At. Data Nucl. Data Tables, 1977, vol. 19, p. 533.
7. Martin W. C. — J. Opt. Soc. Amer., 1980, vol. 70, p. 784.

Таблица 4.4. Квантовые дефекты δ_l ридберговских состояний атомных частиц

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Квантовый дефект δ_l (класс точности)	Исследованный диапазон изменения главного квантового числа Δn
2	He ($1s^2—^1S_0$)	$1sns—^3S_1$	0,297 (A)	8—17
		$1sns—^1S_0$	0,139 (A)	8—15
		$1snp—^3P_{2, 1, 0}^\circ$	0,063 (C)	8—22
		$1snp—^1P_1^\circ$	0,0123 (A)	8—20
		$1snd—^3,^1D$	0,0027 (D)	8—21
3	Li ($1s^2 2s—^2S_{1/2}$)	$ns—^2S_{1/2}$	0,400 (A)	5—12
		$np—^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	0,047 (A)	5—12
		$nd—^2D_{3/2, 5/2}$	0,0021 (A)	5—12
		$nf—^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	—0,00008 (C)	5—8
4	Be ⁺ ($1s^2 2s—^2S_{1/2}$)	$ns—^2S_{1/2}$	0,259 (A)	5—12
		$np—^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	0,050 (A)	5—12
		$nd—^2D_{3/2, 5/2}$	0,002 (A)	5—12
5	B ($2s^2 2p—^2P_{1/2}^\circ$)	$nd—^2D_{3/2, 5/2}$	0,042 (D)	7—30
6	C ($2p^2—^3P_0$)	$2pnd—^3F_3^\circ$	0,06 (D)	7—22
		$2pnd—^1F_3^\circ$	0,04 (D)	10—29
11	Na ($2p^6 3s—^2S_{1/2}$)	$ns—^2S_{1/2}$	1,348 (A)	30—40

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Квантовый дефект δ_l (класс точности)	Исследованный диапазон изменения главного квантового числа Δl
		$np - {}^2P_{2/1}^\circ$	0,855 (A)	20—35
		$np - {}^2P_{3/2}^\circ$	0,855 (A)	20—35
		$nd - {}^2D_{3/2, 5/2}$	0,0155 (A)	10—20
		$nf - {}^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	0,00145 (A)	10—20
		$ng - {}^2G_{7/2, 9/2}$	0,00044 (C)	10—20
12	Mg ($3s^2 - {}^1S_0$)	$3snp - {}^1P_1^\circ$	1,03 (B)	5—40
		$3snd - {}^1D_2$	0,57 (C)	7—25
		$3snf - {}^3F^\circ, {}^1F^\circ$	0,049 (C)	7—15
	Mg ⁺ ($3s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	1,071 (A)	5—10
		$np - {}^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	0,700 (A)	5—10
		$nd - {}^2D_{3/2, 5/2}$	0,043 (C)	5—9
		$nf - {}^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	0,0030 (C)	5—10
13	Al ($3s^2 3p - {}^2P_{1/2}^\circ$)	$nd - {}^2D$	1,0 (D)	8—35
		$nf - {}^2F^\circ$	0,039 (C)	11—55
19	K ($3p^6 4s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	2,180 (A)	6—55
		$np - {}^2P_{1/2}^\circ$	1,714 (A)	10—20
		$np - {}^2P_{3/2}^\circ$	1,711 (A)	10—20
		$nd - {}^2D_{3/2, 5/2}$	0,277 (A)	10—50
		$nf - {}^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	0,010 (C)	7—14
20	Ca ($4s^2 - {}^1S_0$)	$4sns - {}^3S_1$	2,46 (A)	6—18
		$4sns - {}^1S_0$	2,34 (A)	7—30
		$4snp - {}^3P_2^\circ$	1,96 (B)	6—60
		$4snp - {}^1P_1^\circ$	1,85 (B)	10—80
		$4snd - {}^3D_3$	0,75 (C)	10—17
		$4snf - {}^3F_4^\circ$	0,095 (C)	6—13
		$4snf - {}^1F_3^\circ$	0,09 (D)	7—28
		$3dnp - {}^1P_1^\circ$	1,70 (B)	4—61
		$3dnp - {}^3P_1^\circ$	2,2 (C)	4—33
		$3dnp - {}^3D_1^\circ$	1,75 (C)	4—58
		$3dnf - {}^1P_1^\circ$	0,20 (D)	4—39
	Ca ⁺ ($4s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	1,805 (A)	5—12
		$np - {}^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	1,437 (A)	5—12

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Квантовый эффект δ_l (класс точности)	Исследованный диапазон изменения главного квантового числа Δn
		$nd - ^2D_{3/2, 5/2}$	0,627 (A)	5—12
		$nf - ^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	0,028 (A)	5—12
25	Mn ($3d^5 4s^2 - ^6S_{5/2}$)	$4s (^7S) np - ^8P^\circ$ $4s (^7S) np - ^6P^\circ$ $4s (^5S) np - ^6P^\circ$	2,139 (A) 2,030 (A) 2,135 (A)	10—23 15—42 13—35
29	Cu ($3d^{10} 4s - ^2S_{1/2}$)	$ns - ^2S_{1/2}$	2,60 (A)	5—10
30	Zn ($4s^2 - ^1S_0$)	$4snp - ^1P_1^\circ$ $4snd - ^1D_2$ $4snp - ^3P_1^\circ$	2,10 (A) 1,23 (A) 2,20 (B)	10—66 10—20 6—12
31	Ga ($4s^2 4p - ^2P_{1/2}^\circ$)	$np - ^2P_{1/2}^\circ$ $np - ^2P_{3/2}^\circ$	2,275 (A) 2,266 (A)	20—56 20—56
37	Rb ($4p^6 5s - ^2S_{1/2}$)	$ns - ^2S_{1/2}$ $np - ^2P_{1/2}^\circ$ $np - ^2P_{3/2}^\circ$ $nd - ^2D_{3/2, 5/2}$ $nf - ^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	3,131 (A) 2,655 (A) 2,641 (A) 1,347 (A) 0,0163 (A)	9—116 13—68 13—68 7—124 10—12
38	Sr ($4p^6 5s^2 - ^1S_0$)	$5sns - ^1S_0$ $5snp - ^1P_1^\circ$ $5snd - ^1D_2$ $5snd - ^3D_2$	3,269 (A) 2,72 (A) 2,37 (B) 2,63 (B)	10—80 15—84 30—60 25—37
	Sr ⁺ ($4p^6 5s - ^2S_{1/2}$)	$ns - ^2S_{1/2}$ $np - ^2P_{1/2, 3/2}^\circ$ $nd - ^2D_{3/2, 5/2}$ $nf - ^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	2,710 (A) 2,320 (A) 1,455 (A) 0,062 (A)	5—12 5—12 4—12 4—12
47	Ag ($4d^{10} 5s - ^2S_{1/2}$)	$np - ^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	3,03 (A)	10—60
48	Cd ($5s^2 - ^1S_0$)	$5snp - ^1P_1^\circ$ $5snd - ^1D_2$ $5snp - ^3P_1^\circ$	3,07 (A) 2,23 (A) 3,14 (A)	5—50 5—26 5—31
49	In ($5s^2 5p - ^2P_{1/2}^\circ$)	$np - ^2P_{1/2}^\circ$ $np - ^2P_{3/2}^\circ$	3,223 (A) 3,196 (A)	24—54 24—54

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Квантовый дефект δ_l (класс точности)	Исследованный диапазон изменения главного квантового числа Δn
55	Cs ($5p^6 6s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	4,049 (A)	10—54
		$np - {}^2P_{1/2}^\circ$	3,592 (A)	20—50
		$np - {}^2P_{3/2}^\circ$	3,559 (A)	20—50
		$nd - {}^2D_{3/2}$	2,475 (A)	10—60
		$nd - {}^2D_{5/2}$	2,466 (A)	10—60
		$nf - {}^2F_{5/2}^\circ$	0,0334 (A)	20—100
		$nf - {}^2F_{7/2}^\circ$	0,0335 (A)	20—100
		$ng - {}^2G_{7/2, 9/2}$	0,007 (C)	25—35
56	Ba ($6s^2 - {}^1S_0$)	$6sns - {}^1S_0$	4,20 (A)	8—60
		$6snd - {}^3D_2$	2,80 (A)	15—30
		$6snd - {}^1D_2$	2,70 (A)	15—80
	Ba ⁺ ($6s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	3,583 (A)	7—12
		$np - {}^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	3,180 (A)	6—12
		$nd - {}^2D_{3/2, 5/2}$	2,380 (A)	5—12
		$nf - {}^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	0,845 (A)	5—12
70	Yb ($4f^{14} 6s^2 - {}^1S_0$)	$6sns - {}^1S_0$	4,28 (B)	15—65
		$6snd - {}^1D_2$	2,70 (B)	10—80
		$6snd - {}^3D_2$	2,80 (B)	10—60
79	Au ($5d^{10} 6s - {}^2S_{1/2}$)	$np - {}^2P_{1/2}^\circ$	4,03 (A)	10—42
82	Pb ($6p^2 - {}^3P_0$)	$6pnp - [1/2, 3/2]_2$	4,21 (A)	7—48
		$6pnp - [1/2, 3/2]_1$	4,23 (A)	7—20
		$6pnp - [1/2, 1/2]_0$	4,30 (A)	7—23
		$6pnf - \frac{1}{2} [5/2]_2$	1,02 (B)	7—26
83	Bi ($6p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ$)	$6p^2 ({}^3P_0) ns - {}^4P_{1/2}$	4,89 (A)	7—18
		$6p^2 nd - {}^2D_{3/2}$	3,20 (B)	6—42
		$6p^2 nd - {}^2D_{5/2}$	3,23 (B)	6—20
88	Ra ($7s^2 - {}^1S_0$)	$7snp - {}^1P_1^\circ$	4,63 (A)	13—52
	Ra ⁺ ($7s - {}^2S_{1/2}$)	$ns - {}^2S_{1/2}$	4,585 (A)	8—12
		$np - {}^2P_{1/2, 3/2}^\circ$	4,135 (A)	7—12
		$nd - {}^2D_{3/2, 5/2}$	3,270 (A)	6—12
		$nf - {}^2F_{5/2, 7/2}^\circ$	1,845 (A)	6—12

4.4. ТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Взаимодействие между орбитальными и спиновыми моментами электронов, называемое спин-орбитальным взаимодействием, приводит к тому, что энергия атомных уровней (в приближении LS -связи) зависит как от орбитального L и спинового S моментов атома, так и от полного момента атома $J=L+S$, пробегающего диапазон значений $L+S, L+S-1, \dots, |L-S|$. Разность энергий между соседними компонентами расщепленного уровня энергии с заданными значениями L и S можно представить в виде [1]

$$E_J - E_{J-1} = AJ,$$

где A — постоянная спин-орбитального взаимодействия, зависящая только от L и S ; нижний индекс у E характеризует полный момент атома.

Написанной формулой выражается правило интервалов Ландé в приближении LS -связи моментов. Постоянная A может быть как положительной, так и отрицательной, и в соответствии с этим заданный мультиплет называют либо нормальным (нижней компоненте отвечает при этом минимальное значение $J=|L-S|$), либо обращенным (нижней компоненте отвечает максимальное значение $J=L+S$).

Измеренные значения энергии расщепления $\Delta E_{J,J-1}$ (в см^{-1}) соседних компонент низлежащих мультиплетов атомов представлены на рис. 6.1—6.43.

В случае высоковозбужденных атомных уровней интервалы между соседними компонентами расщепленного уровня с фиксированными значениями моментов L и S можно аппроксимировать зависимостью [2]

$$E_J - E_{J-1} = K/n^{*3},$$

где $n^* = n - \delta_l$ — эффективное главное квантовое число электрона. Значения коэффициента K для некоторых ридберговских состояний атомов щелочного металла включены в табл. 4.5 [3—9].

Погрешности определения энергии тонкого расщепления атомных уровней были учтены при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней цифры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Condon E. U., Shortley G. H. The theory of atomic spectra. 4th ed. — L.: Cambridge University Press, 1957.
2. Pendrill L. R. — Phys. Scripta, 1983, vol. 27, p. 371.
3. Gallagher T. F., Hill R. M., Edelstein S. A. — Phys. Rev., 1976, vol. A14, p. 744 ($\text{Na}-n^2F, n^2G$).
4. Cooke W. E., Gallagher T. F., Hill R. M., Edelstein S. A. — Phys. Rev., 1977, vol. A16, p. 1141 ($\text{Li}-n^2F, n^2G$).
5. Liberman S., Pinard J. — Phys. Rev., 1979, vol. A20, p. 507 ($\text{Rb}-n^2P$).
6. Chang T. N., Larijani F. — J. Phys., 1980, vol. B13, p. 1307 ($\text{Li, Na, K, Rb, Cs}-n^2D$).
7. Thompson D. C., O'Sullivan M. S., Stoicheff B. P., Gen-Xing Xu. — Can. J. Phys., 1983, vol. 61, p. 949 ($\text{K}-n^2D$).
8. O'Sullivan M. S., Stoicheff B. P. — Can. J. Phys., 1983, vol. 61, p. 940 ($\text{Cs}-n^2D$).
9. Goy P., Raimond J. M., Vitrant G., Haroche S. — Phys. Rev., 1982, vol. A26, p. 2733 ($\text{Cs}-n^2P, n^2D, n^2F$).

4.5. СВЕРХТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Положение атомных уровней энергии и структура спектров элементов определяются также особенностями взаимодействия электронов с ядром. Такие свойства ядра, как конечная масса нуклонов, распределение зарядов и спин, отличают

Таблица 4.5. Параметры тонкого дублетного расщепления ридберговских состояний атомов щелочного металла: $\Delta J_s = K/n^{*3}$ ($n^* = n - \delta_l$ — квантовый дефект, Δn — диапазон изменения главного квантового числа электрона, наблюдаемый при измерениях тонкой структуры спектров)

Параметры тонкого расщепления уровней		Li	Na	K	Rb	Cs
$^2P^\circ_{1/2,3/2}$	$K, 10^6 \text{ МГц}$	—	5,37 (A)	20,4 (B)	86,0 (A)	214 (A)
	$K, \text{ см}^{-1}$	—	179 (A)	680 (B)	2870 (A)	7140 (A)
	δ_l	0,047	0,855	1,712	2,647	3,5699
	Δn	7—10	10—40	9—21	13—58	10—80
$^2D_{3/2,5/2}$	$K, 10^6 \text{ МГц}$	0,029 (B)	—0,092 (B)	—1,17 (B)	10,6 (B)	60,1 (A)
	$K, \text{ см}^{-1}$	0,97 (B)	—3,07 (B)	—39 (B)	350 (B)	2006 (A)
	δ_l	0,002	0,0155	0,277	1,347	2,471
	Δn	7—10	7—30	10—36	10—40	10—50
$^2F^\circ_{5/2,7/2}$	$K, 10^6 \text{ МГц}$	0,0144 (B)	0,014 (D)	—	—	—0,975 (C)
	$K, \text{ см}^{-1}$	0,48 (B)	0,47 (D)	—	—	—32,5 (C)
	δ_l	—0,00008	0,00145	0,010	0,016	0,0335
	Δn	7—10	11—17	7—14	7—12	10—30
$^2G_{7/2,9/2}$	$K, 10^6 \text{ МГц}$	0,009 (C)	—	—	—	—
	$K, \text{ см}^{-1}$	0,3 (C)	—	—	—	—
	δ_l	~0	0,00044	—	—	0,0070
	Δn	8—9	10—20	—	—	25—35

его от неподвижного точечного заряда и приводят к появлению в гамильтониане атома дополнительных членов, ответственных за соответствующие взаимодействия. Учет взаимодействия электронов с угловыми моментами (спином) ядра приводит к расщеплению атомных уровней энергии на ряд сверхтонких компонент, каждая из которых характеризуется набором четырех квантовых чисел $\{J, i, F, m_F\}$, где J — полный (орбитальный и спиновый) момент электронов; i — спин ядра; $F = J + i$ — полный момент атома; m_F — проекция полного момента F на ось квантования.

Основную роль в сверхтонком расщеплении уровней играет взаимодействие электронов с мультипольными моментами ядра наиболее низких порядков. В первом приближении моменты i и J можно считать сохраняющимися и тогда полная энергия атомного уровня представляется в виде суммы [1, 2]

$$E_F = E_J + E_{M1} + E_{E2} = E_J + \frac{h}{2} AK + \frac{3h}{8} B \times$$

$$\times \frac{K(K+1) - \frac{4}{3} i(i+1) J(J+1)}{i(2i-1) J(2J-1)}, \quad i, J \geq 1,$$

где E_J — энергия уровня без учета взаимодействия электронов с ядерными моментами; E_{M1} — энергия взаимодействия электронов с магнитным дипольным моментом ядра; E_{E2} — энергия взаимодействия электронов с электрическим квадрупольным моментом ядра. Далее, величина $K = F(F+1) - i(i+1) - J(J+1)$ и, наконец, A, B — параметры сверхтонкого расщепления уровней, причем магнит-

ное взаимодействие примерно на полтора порядка больше квадрупольного взаимодействия. Константа квадрупольного взаимодействия B обращается в нуль для состояний с электронным моментом $J \leq 1/2$ вследствие сферической симметрии в распределении электронного заряда.

Сверхтонкое расщепление уровней энергии принято обозначать следующим образом: $\Delta\nu(F, F') = \Delta E_{FF'}/h$, где $\Delta E_{FF'}$ — расстояние между двумя сверхтонкими компонентами с полными моментами F и $F' = F - 1$, измеренное в отсутствие внешнего магнитного поля. Зависимость сверхтонкого расщепления уровней $\Delta\nu(F, F')$ от параметров A, B имеет вид

$$\Delta\nu(F, F') = AF + \frac{3BF(F^2 + 1/2)}{i(2i - 1)J(2J - 1)}, \quad i, J \geq 1.$$

В табл. 4.6 приведены измеренные значения $\Delta\nu(F, F')$, а также параметры A, B , МГц, сверхтонкого расщепления низколежащих атомных уровней для ряда наиболее устойчивых изотопов. Погрешности определения рассмотренных величин были учтены при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней цифры. При отборе материала мы воспользовались данными обзоров [3—5], которые были дополнены результатами более поздних публикаций.

Список литературы

1. Freeman A. J., Frankel R. H. Hyperfine interactions. — N. Y.: Academic Press, 1967.
2. Lindgren I., Rosen A. — Case Studies in Atomic Physics, 1974, vol. 4, p. 93.
3. Fuller G. H. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1976, vol. 5, p. 835; Fuller G. H., Cohen V. W. — Nucl. Data Tabl., 1969, vol. A5, p. 433.
4. Arimondo E., Inguscio M., Violino P. — Rev. Mod. Phys., 1977, vol. 49, p. 31.
5. Penselin S. Recent developments and results of the atomic-beam magnetic-resonance method. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part A/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1978, Ch. 10, p. 463—490.

Таблица 4.6. Параметры сверхтонкого расщепления низколежащих уровней энергии стабильных изотопов атомов

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Электрон- ный терм	Квантовые числа пол- ного мо- мента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ $A, B, \text{ МГц}$	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см^{-1}
1	$^1\text{H}(^2S_{1/2}), 1/2$	$1\ ^2S_{1/2}$	(1, 0)	1420,40575	47,3796
		$2\ ^2S_{1/2}$	(1, 0)	177,5568	5,92266
	$^2\text{H}(^2S_{1/2}), 1$	$1\ ^2S_{1/2}$	(3/2, 1/2)	327,38435	10,9204
		$2\ ^2S_{1/2}$	(3/2, 1/2)	40,9244	1,36509
2	$^3\text{H}(2S_{1/2}), 1/2$	$1\ ^2S_{1/2}$	(1, 0)	1516,70147	50,5917
	$^3\text{He}(^1S_0), 1/2$	$2\ ^3S_1$	(3/2, 1, 2)	6739,701	224,812
	$^3\text{He}^+(^2S_{1/2})$	$1\ ^2S_{1/2}$	(1, 0)	8665,6499	289,055
3	$^6\text{Li}(^2S_{1/2}), 1$	$2\ ^2S_{1/2}$	(3/2, 1/2)	228,20526	7,61211
		$2\ ^2P_{1/2}$	—	$A = 17,37$	—
		$2\ ^2P_{3/2}$	—	$A = -1,16$	—
				$B = -0,1$	—
	$^7\text{Li}(^2S_{1/2}), 3/2$	$2\ ^2S_{1/2}$	(2, 1)	803,50409	26,80203

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полного момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu (F, F'),$ А, В, МГц	$\Delta E (F, F'),$ 10^{-3} см $^{-1}$
4	${}^9\text{Be} ({}^1S_0), 3/2$	$2 {}^2P_{1/2}$	—	$A=45,9$	—
		$2 {}^2P_{3/2}$	—	$A=-3,06$	—
				$B=-0,2$	—
		$2 {}^3P_1$	(5/2, 3/2)	354,44	11,823
			(3/2, 1/2)	202,95	6,7697
5	${}^{10}\text{B} ({}^2P_{1/2}), 3$ ${}^{11}\text{B} ({}^2P_{1/2}), 3/2$	$2 {}^3P_2$	(7/2, 5/2)	435,48	14,526
			(5/2, 3/2)	312,02	10,408
			(3/2, 1/2)	187,62	6,2583
		$2 {}^2P_{1/2}$	(7/2, 5/2)	429,05	14,312
		$2 {}^2P_{1/2}$	(2, 1)	732,15	24,422
6	${}^{13}\text{C} ({}^3P_0), 1/2$	$2 {}^2P_{3/2}$	(3, 2)	222,7	7,428
			(2, 1)	144,0	4,803
			(1, 0)	71	2,37
		$2 {}^3P_1$	(3/2, 1/2)	4,3	0,14
		$2 {}^3P_2$	(5/2, 3/2)	372,6	12,43
7	${}^{14}\text{N} ({}^4S_{3/2}), 1$	$2 {}^4S_{3/2}$	—	$A=10,45093$	—
8	${}^{17}\text{O} ({}^3P_2), 5/2$			$B=1,3$	—
		$2 {}^3P_2$	—	$A=-219,6$	—
		$2 {}^3P_1$	—	$A=4,7$	—
9	${}^{19}\text{F} ({}^2P_{3/2}), 1/2$	$2 {}^2P_{3/2}$	(2, 1)	4020	134
		$2 {}^2P_{1/2}$	(1, 0)	10 250	342
10	${}^{21}\text{Ne} ({}^1S_0), 3/2$				
		$3 {}^3P_2$	(7/2, 5/2)	1034,5	34,51
			(5/2, 3/2)	599,4	19,99
			(3/2, 1/2)	303,9	10,14
11	${}^{23}\text{Na} ({}^2S_{1/2}), 3/2$	$3 {}^2S_{1/2}$	(2, 1)	1771,62613	59,09513
		$3 {}^2P_{1/2}$	—	$A=94,3$	—
		$3 {}^2P_{3/2}$	—	$A=18,7$	—
				$B=2,9$	—
12	${}^{25}\text{Mg} ({}^1S_0), 5/2$	$3 {}^3P_1$	(7/2, 5/2)	516,1	17,22
			(5/2, 3/2)	350,0	11,7
		$3 {}^3P_2$	(9/2, 7/2)	567,3	18,92
			(7/2, 5/2)	452,3	15,09
			(5/2, 3/2)	329,0	10,97
13	${}^{27}\text{Al} ({}^2P_{1/2}), 5/2$		(3/2, 1/2)	199,8	6,66
		$3 {}^2P_{1/2}$	(3, 2)	1506,1	50,24
		$3 {}^2P_{3/2}$	(4, 3)	392	13,1
			(3, 2)	274	9,14
		$4 {}^2S_{1/2}$	—	$A=420$	—
15	${}^{31}\text{P} ({}^4S_{3/2}), 1/2$	$3 {}^4S_{3/2}$	—	$A=55,06$	—

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полного момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ $A, B, \text{МГ ц}$	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см^{-1}
17	$^{35}\text{Cl} ({}^2P_{3/2}), 3/2$	$3 {}^2P_{3/2}$	(3, 2)	670,0135	22,349
			(2, 1)	355,2210	11,849
		$3 {}^2P_{1/2}$	(1, 0)	150,1736	5,009
			(2, 1)	2074,38	69,19
		$3 {}^2P_{3/2}$	(3, 2)	555,3043	18,523
			(2, 1)	298,1277	9,944
19	$^{37}\text{Cl} ({}^2P_{3/2}), 3/2$	$3 {}^2P_{1/2}$	(1, 0)	127,4408	4,251
			(2, 1)	1726,7	57,60
		$4 {}^2S_{1/2}$	(2, 1)	461,71972	15,40132
			—	$A=27,8$	—
		$4 {}^2P_{3/2}$	—	$A=6,1$	—
			—	$B=2,8$	—
	$^{40}\text{K} ({}^2S_{1/2}), 4$	$4 {}^2S_{1/2}$	—	$A=-285,73$	—
			—	$A'=-34,5$	—
		$4 {}^2P_{3/2}$	—	$A=-7,5$	—
			—	$B=-3$	—
		$4 {}^2S_{1/2}$	(2, 1)	254,01387	8,47300
			—	$A=15,2$	—
21	$^{41}\text{K} ({}^2S_{1/2}), 3/2$	$4 {}^2P_{3/2}$	—	$A=3,4$	—
			—	$B=3,3$	—
		$3 {}^2D_{3/2}$	(5, 4)	1329	44,3
			(4, 3)	1085,8	36,22
		$3 {}^2D_{5/2}$	(6, 5)	635,0	21,18
			(5, 4)	543,8	18,14
	$^{45}\text{Sc} ({}^2D_{3/2}), 7/2$	$4 {}^4F_{3/2}$	(4, 3)	444,7	14,83
			—	$A=158,5$	—
		$4 {}^4F_{5/2}$	—	$B=-5,2$	—
			—	$A=154,0$	—
		$4 {}^4F_{7/2}$	—	$B=-6,5$	—
			—	$A=250,0$	—
22	$^{47}\text{Ti} ({}^3F_2), 5/2$	$4 {}^4F_{9/2}$	—	$B=-9,1$	—
			—	$A=286,0$	—
		$3 {}^3F_2$	—	$B=-15$	—
			—	$A=-85,703$ $B=25,70$	—

Атом- ный номер <i>Z</i>	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра <i>i</i>	Элект- ронный терм	Квантовые числа полно- го момента <i>F, F'</i>	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ <i>A, B, МГц</i>	$\Delta E(F, F'),$ <i>10—3 см—1</i>
23	⁴⁹ Ti (³ F ₂), 7/2	3 ³ F ₂	—	<i>A</i> = —85,726 <i>B</i> = 21,07	— —
	⁵¹ V (⁴ F _{3/2}), 7/2	3 ⁴ F _{3/2}	—	<i>A</i> = 560,07 <i>B</i> = 3,98	— —
24	⁵³ Cr (⁷ S ₃), 3/2	3 ⁷ S ₃	(9/2, 7/2) (7/2, 5/2) (5/2, 3/2)	371,7 289,09 206,50	12,40 9,643 6,888
25	⁵⁵ Mn (⁶ S _{5/2}), 5/2	3 ⁶ S _{5/2}	—	<i>A</i> = —72,4208 <i>B</i> = —0,018	— —
		4 ⁶ D _{9/2}	—	<i>A</i> = 510,3 <i>B</i> = 132,2	— —
		4 ⁶ D _{7/2}	—	<i>A</i> = 458,9 <i>B</i> = 21,7	— —
		4 ⁶ D _{5/2}	—	<i>A</i> = 436,7 <i>B</i> = —46,8	— —
		4 ⁶ D _{3/2}	—	<i>A</i> = 469,4 <i>B</i> = —65,1	— —
		4 ⁶ D _{1/2}	—	<i>A</i> = 882,1	—
26	⁵⁷ Fe (⁵ D ₄), 1/2	3 ⁵ D ₄	—	<i>A</i> = 38,08	—
		4 ⁵ F ₅	—	<i>A</i> = 87,25	—
		4 ⁵ F ₄	—	<i>A</i> = 78,43	—
		4 ⁵ F ₃	—	<i>A</i> = 69,63	—
		4 ⁵ F ₂	—	<i>A</i> = 55,99	—
27	⁵⁹ Co (⁴ F _{9/2}), 7/2	3 ⁴ F _{9/2}	(8,7)	3655	121,9
			(7,6)	3169,4	105,7
			(6,5)	2695	89,9
			(5,4)	2230,6	74,40
			(4,3)	1774,5	59,19
28	⁶¹ Ni (³ F ₄), 3/2	3 ³ F ₄	—	<i>A</i> = —215,04 <i>B</i> = —56,9	— —
29	⁶³ Cu (² S _{1/2}), 3/2	4 ² S _{1/2}	(2,1)	11733,8174	391,398
30	⁶⁵ Cu (² S _{1/2}), 3/2	4 ² S _{1/2}	(2,1)	12568,780	419,250
	⁶⁷ Zn (¹ S ₀), 5,2	4 ³ P ₂	(9/2, 7/2)	2418,1	80,66
			(7/2, 5/2)	1855,7	61,90
(5/2, 3/2)			1312,1	43,77	
31	⁶⁹ Ga (² P _{1/2}), 3/2	4 ² P _{1/2}	(3/2, 1/2)	781,9	26,08
			(2,1)	2677,987	89,328
			4 ² P _{3/2}	—	<i>A</i> = 190,794 <i>B</i> = 62,522

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Электрон- ный терм	Квантовые числа пол- ного момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu (F, F'),$ $A, B, \text{ МГц}$	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см^{-1}
32	$^{71}\text{Ga} ({}^2P_{1/2}), 3/2$	$5 {}^2S_{1/2}$	(2,1)	2140	71,3
		$4 {}^2P_{1/2}$	(2,1)	3402,69	113,50
		$4 {}^2P_{3/2}$	(3,2)	766,696	25,574
			(2,1)	445,470	14,859
			(1,0)	203,043	6,773
32	$^{73}\text{Ge} ({}^3P_0), 9/2$	$5 {}^2S_{1/2}$	(2,1)	2720	90,6
		$4 {}^3P_1$	—	$A=15,55$	—
		$4 {}^3P_2$	—	$B=-54,57$	—
33	$^{75}\text{As} ({}^4S_{3/2}), 3/2$	$4 {}^4S_{3/2}$	—	$A=-64,427$	—
				$B=111,8$	—
				$A=-66,20$	—
36	$^{83}\text{Kr} ({}^1S_0), 9/2$			$B=-0,53$	—
			(3,2)	819,45	27,33
			(2,1)	595,12	19,85
37	$^{85}\text{Rb} ({}^2S_{1/2}), 5/2$	$5p [{}^1/2]_1$	—	$A=-143,0$	—
		$5 {}^2S_{1/2}$	(3,2)	3035,732	101,261
		$5 {}^2P_{1/2}$	—	$A=120,7$	—
		$5 {}^2P_{3/2}$	—	$A=25,0$	—
				$B=26,0$	—
		$4 {}^2D_{5/2}$	—	$A=-5$	—
		$4 {}^2D_{3/2}$	—	$A=7$	—
		$6 {}^2S_{1/2}$	—	$A=239$	—
39	$^{87}\text{Rb} ({}^2S_{1/2}), 3/2$	$5 {}^2S_{1/2}$	(2,1)	6834,6826	227,98
		$5 {}^2P_{1/2}$	—	$A=406$	—
		$5 {}^2P_{3/2}$	—	$A=84,9$	—
				$B=12,6$	—
		$4 {}^2D_{5/2}$	—	$A=-17$	—
		$4 {}^2D_{3/2}$	—	$A=25$	—
		$6 {}^2S_{1/2}$	—	$A=810$	—
		$4 {}^2D_{3/2}$	—	$A=-57,2$	—
		$4 {}^2D_{5/2}$	—	$A=-28,7$	—
47	$^{107}\text{Ag} ({}^2S_{1/2}), 1/2$	$5 {}^2P_{3/2}$	—	$A=-32$	—
49	$^{113}\text{In} ({}^2P_{1/2}), 9/2$	$5 {}^2P_{1/2}$	(5,4)	11 385	379,8
		$6 {}^2S_{1/2}$	(5,4)	8410	281

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полно- го момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней		
				$\Delta\nu(F, F'),$ A, B, МГц	$\Delta E(F, F'),$ 10-3 см-1	
51	$^{115}\text{In} ({}^2P_{1/2}), 9/2$	$5 {}^2P_{1/2}$	—	$A=2281,955$	—	
		$5 {}^2P_{3/2}$	—	$A=242,165$	—	
		$6 {}^2S_{1/2}$	(5,4)	8430	281	
		$5 {}^4S_{3/2}$	(5,4)	815,6	27,20	
			(4,3) (3,2)	648,5 484,0	21,63 16,1	
52	$^{125}\text{Te} ({}^3P_2), 1/2$	$5 {}^3P_2$	—	$A=-1010,3$	—	
53	$^{127}\text{I} ({}^2P_{3/2}), 5/2$	$5 {}^3P_1$	—	$A=782,5$	—	
		$5 {}^1D_2$	—	$A=-2887,0$	—	
		$5 {}^2P_{3/2}$	(4,3) (3,2) (2,1)	4226,17 1965,9 737,49	140,97 65,58 24,60	
54	$^{129}\text{Xe} ({}^1S_0), 1/2$ $^{131}\text{Xe} ({}^1S_0), 3/2$	$6 {}^3P_2$	(5/2, 3/2) (7/2, 5/2)	5961,258 2693,623	198,85 89,850	
		$6 {}^3P_2$	(5/2, 3/2) (3/2, 1/2)	1608,348 838,764	53,649 27,978	
55	$^{133}\text{Cs} ({}^2S_{1/2}), 7/2$	$6 {}^2S_{1/2}$	(4,3)	9192,63177	306,63342	
		$6 {}^2P_{1/2}$	—	$A=292$	—	
		$6 {}^2P_{3/2}$	—	$A=50,3$	—	
				$B=-0,4$	—	
		$5 {}^2D_{3/2}$	—	$A=16,3$	—	
		$5 {}^2D_{5/2}$	—	$A=-22$	—	
		$7 {}^2S_{1/2}$	—	$A=550$	—	
56	$^{135}\text{Ba} ({}^1S_0), 3/2$	$5 {}^3D_1$	—	$A=-470$	—	
				$B=12$	—	
		$5 {}^3D_2$	—	$A=371$	—	
				$B=18$	—	
		$5 {}^3D_3$	—	$A=408$	—	
				$B=20$	—	
		$5 {}^1D_2$	—	$A=-73,4$	—	
				$B=38,7$	—	
		$^{137}\text{Ba} ({}^1S_0), 3/2$	$5 {}^3D_1$	—	$A=-520$	—
					$B=17$	—
			$5 {}^3D_2$	—	$A=414$	—
					$B=27$	—
		$5 {}^3D_3$	—	$A=455$	—	
				$B=40$	—	
		$5 {}^1D_2$	—	$A=-82,2$	—	
				$B=59,6$	—	

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полно- го момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta v(F, F'),$ A, B МГц	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см $^{-1}$
57	$^{139}\text{La} ({}^2D_{3/2}), 7/2$	5 ${}^2D_{3/2}$	(5,4)	737,97	24,62
			(4,3)	551,98	18,41
			(3,2)	391,6	13,06
		5 ${}^2D_{5/2}$	(6,5)	1120,90	37,39
			(5,4)	912,79	30,45
			(4,3)	716,29	23,89
			(3,2)	529,1	17,65
		6 ${}^4F_{3/2}$	(5,4)	2390,6	79,74
			(4,3)	1925,5	64,23
		6 ${}^4F_{5/2}$	(6,5)	1808,9	60,34
			(5,4)	1503,2	50,14
			(4,3)	1199,8	40,02
		6 ${}^4P_{1/2}$	(4,3)	9840,6	328,2
		6 ${}^4P_{3/2}$	(4,3)	3707,8	123,68
		6 ${}^4P_{5/2}$	(4,3)	3216,5	107,3
59	$^{141}\text{Pr} ({}^4I_{9/2}), 5/2$	4 ${}^4I_{9/2}$	—	$A=926,209$	—
				$B=-11,88$	—
		4 ${}^4I_{11/2}$	—	$A=730,393$	—
				$B=-11,88$	—
		4 ${}^4I_{13/2}$	—	$A=613,240$	—
				$B=-12,85$	—
		4 ${}^4I_{15/2}$	—	$A=541,575$	—
				$B=-14,56$	—
60	$^{143}\text{Nd} ({}^5I_4), 7/2$	4 5I_4	(15/2, 13/2) (13/2, 11/2) (11/2, 9/2) (9/2, 7/2) (7/2, 5/2)	1418	47,3
				1257,5	41,95
				1084,7	36,18
				901,5	30,07
				710	23,7
				$A=-153,68$	—
	$^{145}\text{Nd} ({}^5I_4), 7/2$	4 5I_4	—	$B=115,7$	—
				$A=-121,63$	—
				$B=64,6$	—
				$A=-95,53$	—
62	$^{147}\text{Sm} ({}^7F_0), 7/2$	4 7F_1	—	$B=61,0$	—
				$A=-33,494$	—
				$B=-58,692$	—
				$A=-41,184$	—
				$B=-62,23$	—
		4 7F_2	—	$A=-50,240$	—
				$B=-33,68$	—
		4 7F_3	—		

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полно- го момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ А, В, МГц	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см $^{-1}$
63	$^{149}\text{Sm} (^7F_0), 7/2$	$4 ^7F_1$	—	$A = -27,611$	—
		$4 ^7F_2$	—	$B = 16,962$	—
		$4 ^7F_3$	—	$A = -33,951$ $B = 17,99$	—
	$^{151}\text{Eu} (^8S_{7/2}), 5/2$	$4 ^8S_{7/2}$	—	$A = -41,418$ $B = 9,75$	—
			(6,5)	120,67	4,025
			(5,4) (4,3)	100,29 80,05	3,345 2,67
64	$^{153}\text{Eu} (^8S_{7/2}), 5/2$	$4 ^8S_{7/2}$	(6,5)	54,04	1,803
			(5,4) (4,3)	44,00 35,00	1,47 1,17
	$^{155}\text{Gd} (^9D_2), 3/2$	$5 ^9D_2$	—	$A = 36,575$ $B = 179,4$	—
		$5 ^9D_3$	—	$A = 4,92$ $B = -406,67$	—
		$5 ^9D_4$	—	$A = -6,86$ $B = -352,8$	—
	$^{157}\text{Gd} (^9D_2), 3/2$	$5 ^9D_2$	—	$A = 47,96$ $B = 191,2$	—
		$5 ^9D_3$	—	$A = 6,45$ $B = -433,2$	—
		$5 ^9D_4$	—	$A = -9,00$ $B = -375,9$	—
	$^{159}\text{Tb} (^6H_{15/2}), 3/2$	$4 ^6H_{15/2}$	—	$A = 673,75$ $B = 1449,3$	—
		$4 ^6H_{13/2}$	—	$A = 682,91$ $B = 1167,5$	—
		$5 ^8G_{13/2}$	—	$A = 532,20$ $B = 928,9$	—
66	$^{161}\text{Dy} (^5I_8) 5/2$	$4 ^5I_8$	—	$A = -116,232$ $B = 1091,57$	—
	$^{163}\text{Dy} (^5I_8), 5/2$	$4 ^5I_8$	—	$A = 162,7543$ $B = 1152,86$	—
		$4 ^5I_7$	—	$A = 177,53$ $B = 1066,4$	—
	$^{165}\text{Ho} (^4I_{15/2}), 7/2$	$4 ^4I_{15/2}$	(9,8)	7184,8	239,7
			(8,7)	6540,8	218,2
			(7,6) (6,5) (5,4)	5842,4 5096,3 4309,3	194,9 170,0 143,7
68	$^{167}\text{Er} (^3H_6), 7/2$	$4 ^3H_6$	—	$A = -120,486$ $B = -4552,96$	—

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа полно- го момента F, F'	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ $A, B, \text{МГц}$	$\Delta E(F, F'),$ 10^{-3} см^{-1}
69	$^{169}\text{Tm} (^2F_{7/2}), 1/2$	$4 ^2F_{7/2}$	(4,3)	1496,5507	49,920
			—	$A = -374,13766$	—
71	$^{175}\text{Lu} (^2D_{3/2}), 7/2$	$5 ^2D_{3/2}$	(5,4)	2051,2201	68,421
			(4,3)	345,497	11,524
			(3,2)	496,578	16,564
		$5 ^2D_{5/2}$	(6,5)	1837,570	61,295
			(5,4)	800,343	26,70
			(4,3)	161,815	5,398
			(3,2)	157,73	5,26
			(2,1)	238,058	7,941
	$^{176}\text{Lu} (^2D_{3/2}), 7$	$5 ^2D_{3/2}$	—	$A = 137,9$	—
				$B = 2131$	—
		$5 ^2D_{5/2}$	—	$A = 104,0$	—
				$B = 2624$	—
72	$^{177}\text{Hf} (^3F_2), 7/2$	$5 ^3F_2$	(11/2, 9/2)	991,792	33,08
			(9/2, 7/2)	477,008	15,91
			(7/2, 5/2)	162,887	5,433
			(5/2, 3/2)	4,864	0,16
	$^{178}\text{Hf} (^3F_2), 9/2$	$5 ^3F_2$	(13,2, 11/2)	82,132	2,74
			(11/2, 9/2)	392,848	13,104
			(9/2, 7/2)	541,9104	18,076
			(7/2, 5/2)	558,672	18,635
73	$^{181}\text{Ta} (^4F_{3/2}), 7/2$	$5 ^4F_{3/2}$	—	$A = 509,08$	—
				$B = -1012,24$	—
		$5 ^4F_{5/2}$	—	$A = 313,47$	—
				$B = -834,8$	—
		$5 ^4F_{7/2}$	—	$A = 264,41$	—
				$B = -787,5$	—
		$5 ^4F_{9/2}$	—	$A = 256,62$	—
				$B = -650,4$	—
		$5 ^4P_{1/2}$	—	$A = 884,17$	—
		$5 ^4P_{3/2}$	—	$A = 379$	—
				$B = -1350$	—
74	$^{183}\text{W} (^5D_0), 1/2$	$5 ^5D_1$	—	$A = 29,12$	—
		$6 ^7S_3$	—	$A = 505,6$	—
		$5 ^5D_2$	—	$A = 56,3$	—
		$5 ^5D_3$	—	$A = 78,0$	—
		$5 ^5D_4$	—	$A = 88,3$	—
75	$^{185}\text{Re} (^6S_{5/2}), 5/2$	$5 ^6S_{5/2}$	—	$A = -56,596$	—
				$B = 29,635$	—
		$5 ^4P_{5/2}$	—	$A = 880,44$	—
				$B = 1618,5$	—

Атом- ный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра i	Элект- ронный терм	Квантовые числа пол- ного момента	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F'),$ A, B, МГц	$\Delta F(F, F'),$ 10^{-3} см $^{-1}$
77	$^{187}\text{Re} (^6S_{5/2}), 5/2$	5 $^6S_{5/2}$	—	$A = -57,149$	—
		5 $^4P_{5/2}$	—	$B = 28,05$	—
		6 $^6D_{9/2}$	—	$A = 889,24$	—
	$^{191}\text{Ir} (^4F_{9/2}), 3/2$	5 $^4F_{9/2}$	(6,5)	$B = 1531,7$	—
			(5,4)	$A = 2600$	—
			(4,3)	$B = 2000$	—
	$^{193}\text{Ir} (^4F_{9/2}), 3/2$	5 $^4F_{9/2}$	(6,5)	659,265	21,991
			(5,4)	189,440	6,319
			(4,3)	84,050	2,804
78	$^{195}\text{Pt} (^3D_3), 1/2$	5 3D_3	(6,5)	660,090	22,018
			(5,4)	224,478	7,488
			(4,3)	33,535	1,119
			—	$A = 5702,6$	—
79	$^{197}\text{Au} (^2S_{1/2}), 3/2$	5 3D_2	—	$A = 2609,6$	—
		6 3F_4	(9/2, 7/2)	3820,56	127,4
		6 $^2S_{1/2}$	(2,1)	6099,320	203,452
		5 $^2D_{5/2}$	—	$A = 80,24$	—
				$B = 1049,8$	—
		5 $^2D_{3/2}$	—	$A = 199,842$	—
80	$^{199}\text{Hg} (^1S_0), 1/2$ $^{201}\text{Hg} (^1S_0), 3/2$	6 3P_2	—	$B = 911,077$	—
				$A = 9066,45$	—
		6 3P_2	(7,2, 5/2)	11382,629	379,68
			(5,2, 3/2)	8629,522	287,85
		6 3D_3	(3/2, 1/2)	5377,49	179,37
81	$^{203}\text{Tl} (^2P_{1/2}), 1/2$ $^{205}\text{Tl} (^2P_{1/2}), 1/2$	6 3D_3	—	$A = -2450$	—
				$B = 60$	—
		6 $^2P_{1/2}$	(1,0)	21105,45	704,0026
		6 $^2P_{3/2}$	(2,1)	524,0599	17,4808
		6 $^2P_{1/2}$	(1,0)	21310,83	710,8534
82	$^{207}\text{Pb} (^3P_0), 1/2$	6 $^2P_{3/2}$	(2,1)	530,0765	17,6815
83	$^{209}\text{Bi} (^4S_{3/2}), 9/2$	6 1D_2	(5/2, 3/2)	1524,5	50,85
			(6,5)	2884,67	96,22
			(5,4)	2171,42	72,43
		6 $^2P_{3/2}$	(4,3)	1584,50	52,85
			(6,5)	3598,65	120,04
			(5,4)	2251,04	75,09
93	$^{237}\text{Np} (^6L_{11/2}), 5/2$	5 $^6L_{11/2}$	—	1311,9	43,76
				$A = 778$	—
				$B = 645$	—

4.6. ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СДВИГ НИЗКОЛЕЖАЩИХ АТОМНЫХ УРОВНЕЙ

В спектрах элементов, обладающих несколькими изотопами, наблюдается расщепление линий на ряд компонент, каждая из которых характеризует вполне определенный изотоп. Такая изотопическая структура спектров обусловлена влиянием взаимодействия электронов с ядром на положение атомных уровней энергии. Соответствующие члены в гамильтониане атома, записанном в ц-системе, учитывают движение нуклонов относительно центра инерции (нормальный или боровский эффект массы), обменное взаимодействие электронов, зависящее от массы ядра (специфический эффект массы), и взаимодействие валентных электронов (обычно s -электронов и в меньшей степени p -электронов) с распределенным зарядом ядра (объемный эффект) [1]. В итоге наблюдаемое изотопическое смещение в линиях $\Delta\nu$ для двух изотопов какого-либо элемента записывается в виде суммы трех слагаемых [2]:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{BMS} + \Delta\nu_{SS} + \Delta\nu_{VS},$$

где $\Delta\nu_{BMS} = \nu m_e (M_2 - M_1) / M_1 M_2$ — нормальное массовое смещение, наиболее важное для легких элементов ($Z \lesssim 30$), причем ν — частота перехода при бесконечной массе ядра, M_1, M_2 — массы ядер 1 и 2, m_e — масса электрона; $\Delta\nu_{SS}$ — специфическое массовое смещение; $\Delta\nu_{VS}$ — объемное смещение между линиями двух изотопов, доминирующее в спектре тяжелых изотопов ($Z \gtrsim 50$). В спектре средних элементов ($Z \sim 20 \div 55$) изотопическое смещение мало и трудноизмеримо.

Изотопическое смещение в линиях $\Delta\nu$ есть результат смещения термов атомов, оно связано с изотопическими сдвигами верхнего терма ($\Delta T'$) и нижнего терма (ΔT) соотношением

$$\Delta\nu = \Delta T' - \Delta T.$$

Условно принято считать направление смещения $\Delta\nu$ положительным, когда длина волны перехода λ_2 у более тяжелого изотопа (массовое число A_2) смещена в фиолетовую область спектра и соответственно линия более легкого изотопа

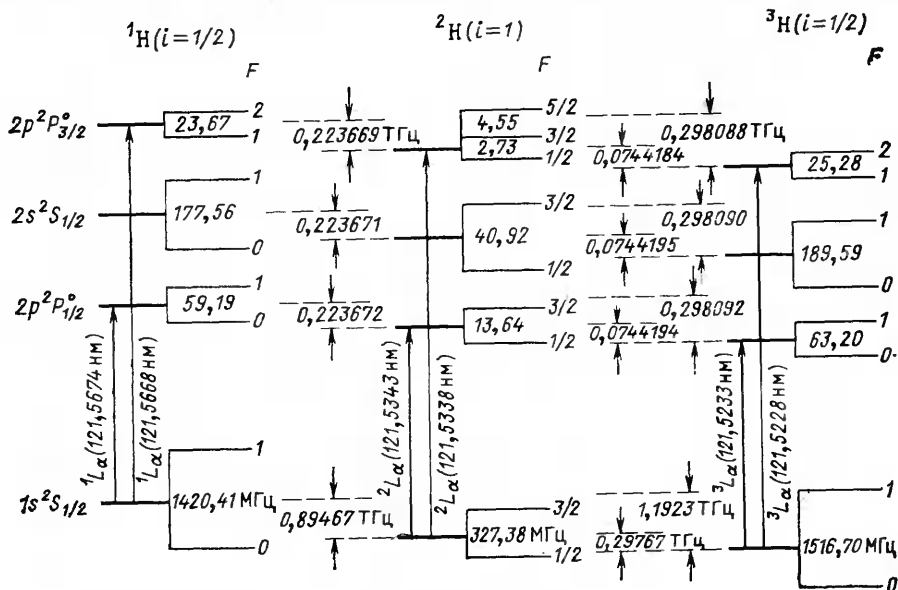


Рис. 4.1. Изотопический сдвиг и сверхтонкое расщепление уровней энергии атома водорода ($n \leq 2$)

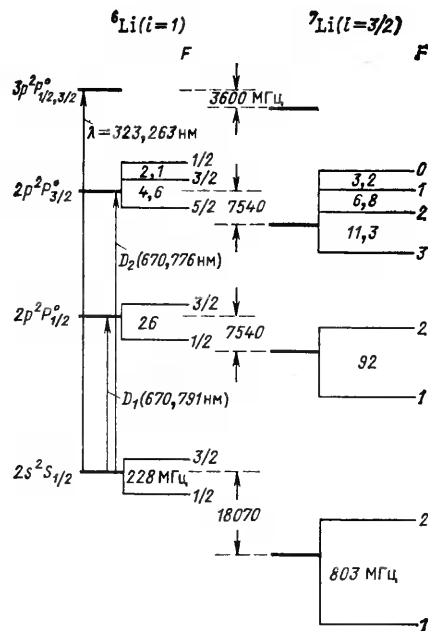


Рис. 4.2. Изотопический сдвиг и сверхтонкое расщепление низколежащих уровней энергии атома лития ($n \leq 3$)

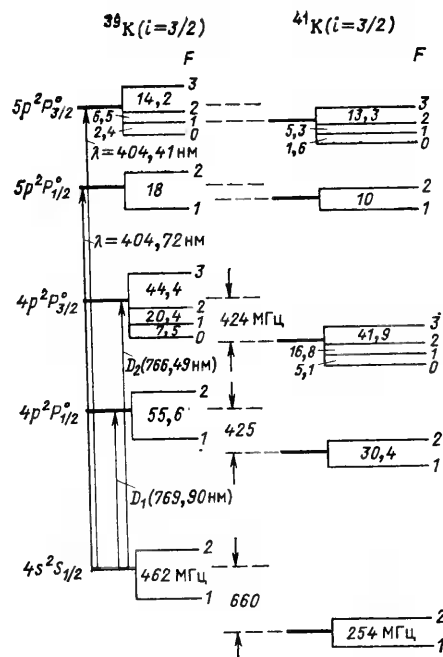


Рис. 4.3. Изотопический сдвиг и сверхтонкое расщепление низколежащих уровней энергии атома калия ($n \leq 5$)

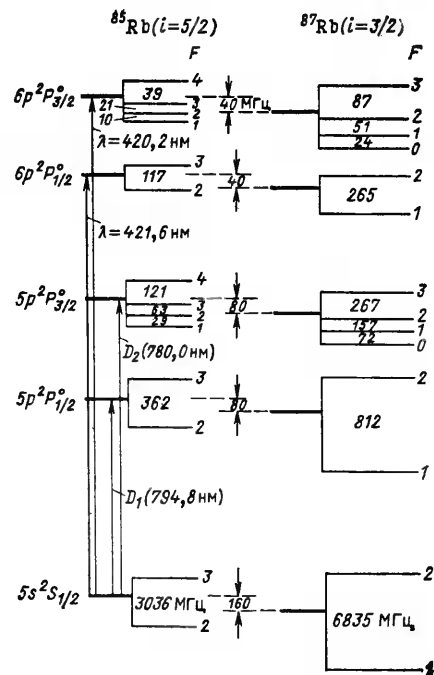


Рис. 4.4. Изотопический сдвиг и сверхтонкое расщепление низколежащих уровней энергии атома рубидия ($n \leq 6$)

λ_1 (массовое число $A_1 < A_2$) смещена в красную область спектра ($\lambda_1 > \lambda_2$). Аналогичным образом принято приписывать смещению термов отрицательный знак, если уровень более тяжелого изотопа лежит глубже (его расстояние до границы непрерывного спектра больше) уровня более легкого изотопа. При наличии у ядер изотопов магнитных моментов и соответственно сверхтонкого расщепления уровней изотопический сдвиг термов следует относить к центрам тяжести компонент сверхтонкой структуры.

В табл. 4.7 собраны значения измеренного изотопического смещения ΔT ($A_2 - A_1$) для низколежащих термов стабильных и долгоживущих элементов с массовыми числами A_1 и A_2 ($A = Z + N$). В табл. 4.8 приведено изотопическое смещение для резонансных линий элементов. В целях иллюстрации относительного вклада изотопического и сверхтонкого расщеплений уровней на рис. 4.1—4.4 построены диаграммы термов для H и щелочных металлов (Li, K, Rb) [11—14].

Представленная информация основана на материале обзоров [2—8], библиографий [9, 10] и более поздних публикациях. В соответствии с установленной погрешностью измерений числовые значения были округлены по последней значащей цифре на интервалы ± 1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kopfermann H. Nuclear moments. 3rd ed. — N. Y.: Academic Press, 1962.
2. Стриганов А. Р., Донцов Ю. П. — Успехи физ. наук, 1955, т. 55, с. 315;
- Головин А. Ф., Стриганов А. Р. — Там же, 1967, т. 93, с. 111.
3. Brix P., Kopfermann H. Hyperfeinstruktur der Atomterme und Atomlinien. — In: Landolt-Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, 6 Auflage, Bd 1, part 5. — Berlin: Springer, 1952, S. 1—69; Brix P., Kopfermann H. — Rev. Mod. Phys., 1958, vol. 30, p. 517.
4. Shirley D. A. — Rev. Mod. Phys., 1964, vol. 36, p. 339.
5. Stacey D. N. — Rept. Progress Phys., 1966, vol. 29, part 1, p. 176.
6. Heilig K., Steudel A. — At. Data Nucl. Data Tables, 1974, vol. 14, p. 613;
- Heilig K., Steudel A. New developments of classical optical spectroscopy. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part A/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1978, p. 263—328.
7. Bauche J., Champeau R. J. — Adv. At. Mol. Phys., 1976, vol. 12, p. 39.
8. Gerstenkorn S. — Comments At. Mol. Phys., 1979, vol. 9, p. 1.
9. Heilig K. Bibliography on experimental optical isotope shifts, 1918 through October 1976. — Spectrochimica Acta, part B, 1977, vol. 32, p. 1—57.
10. Zalubas R., Albright A. Bibliography on atomic energy levels and spectra, July 1975 through June 1979; NBS Spec. Publication 363, Suppl. 2. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, October 1980.
11. Erickson G. W. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1977, vol. 6, p. 831 (H, D, T).
12. Lorenzen C.—J., Niemax K. — J. Phys., 1982, vol. B15, p. L139 (^{6,7}Li).
13. Pendrill L. R., Niemax K. — J. Phys., 1982, vol. B15, p. L147 (^{39,41}K).
14. Grundevik P., Gustavsson M., Rosén A., Svanberg S. — Z. Physik, 1977, vol. A283, p. 127 (^{85,87}Rb).

Т а б л и ц а 4.7. Изотопический сдвиг уровней энергии атомов

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Электронный терм	Изотопический сдвиг уровня энергии ΔT ($A_1 - A_2$)	
			$A_1 - A_2$	ΔT , см ⁻¹
1	H ($1s - {}^2S_{1/2}$)	$1S_{1/2}$	1—2	—29,84284
			1—3	—39,77218
		$2P_{1/2}^o$	1—2	—7,46090
			1—3	—9,94326
		$2S_{1/2}$	1—2	—7,46085
			1—3	—9,94322

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Электронный терм	Изотопический сдвиг уровня энергии $\Delta T (A_1 - A_2)$	
			$A_1 - A_2$	$\Delta T, \text{см}^{-1}$
2	He ($1s^2 - {}^1S_0$)	$2P_{3/2}^\circ$	1—2	—7,46080
			1—3	—9,94313
		$3P_{1/2}^\circ$	1—2	—3,31595
			1—3	—4,41922
		$3S_{1/2}$	1—2	—3,31594
			1—3	—4,41921
		$3P_{3/2}^\circ$	1—2	—3,31592
			1—3	—4,41918
		$3D_{3/2}$	1—2	—3,31592
			1—3	—4,41918
		$3D_{5/2}$	1—2	—3,31591
			1—3	—4,41917
		$1 {}^1S_0$	3—4	—10,5
		$2 {}^3S_1$	3—4	—1,86
		$2 {}^1S_0$	3—4	—1,56
		$2 {}^3P^\circ$	3—4	—0,68
3	Li ($2s - {}^2S_{1/2}$)	$2 {}^1P_1^\circ$	3—4	—1,68
		$3 {}^3S_1$	3—4	—0,7
		$3 {}^1S_0$	3—4	—0,64
		$3 {}^3P^\circ$	3—4	—0,41
		$3 {}^3D$	3—4	—0,54
		$3 {}^1D$	3—4	—0,57
		$3 {}^1P_1^\circ$	3—4	—0,71
		$2 {}^2S_{1/2}$	6—7	—0,603
12	Mg ($3s^2 - {}^1S_0$)	$2 {}^2P^\circ$	6—7	—0,251
		$3 {}^2P^\circ$	6—7	—0,120
		$3 {}^1S_0$	24—25	—0,115
		$3 {}^3P^\circ$	24—25	—0,032
19	K ($4s - {}^2S_{1/2}$)	$3 {}^1P_1^\circ$	24—25	—0,068
		$4 {}^3S_1$	24—25	—0,045
		$4 {}^2S_{1/2}$	39—41	—0,0220
		$4 {}^2P^\circ$	39—41	—0,0142
29	Cu ($4s - {}^2S_{1/2}$)	$4 {}^2S_{1/2}$	63—65	—0,018
		$3d^9 4s^2 - {}^2D_{5/2}$	63—65	—0,085
		$3d^9 4s^2 - {}^2D_{3/2}$	63—65	—0,074
37	Rb ($5s - {}^2S_{1/2}$)	$5 {}^2S_{1/2}$	85—87	—0,0053
		$5 {}^2P^\circ$	85—87	—0,0027
		$6 {}^2P^\circ$	85—87	—0,0013

Т а б л и ц а 4.8. Изотопический сдвиг резонансных линий атомов

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Наблюдаемый переход	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Изотопический сдвиг линии излучения $\Delta \nu(A_1-A_2)$	
				A_1-A_2	$\Delta \nu$, 10^{-3} см $^{-1}$
1	H ($1s-2S_{1/2}$)	$1^2S_{1/2}-2^2P^{\circ}$	1215,7	1—2 1—3 2—3	$2,238 \cdot 10^4$ $2,983 \cdot 10^4$ $7,477 \cdot 10^3$
2	He ($1s^2-1S_0$)	$1^1S_0-2^1P^{\circ}$	584,3	3—4	$8,8 \cdot 10^3$
3	Li ($2s-2S_{1/2}$)	$2^2S_{1/2}-2^2P^{\circ}$	6708	6—7	351,3
5	B ($2p-2^2P_{1/2}^{\circ}$)	$2p^2P^{\circ}-3s^2S_{1/2}$	2497	10—11	—170
6	C ($2p^2-3P_0$)	$2p^2^1S_0-2p3s^1P_1^{\circ}$	2478,6	12—13	—160
7	N ($2p^3-4S_{3/2}^{\circ}$)	$3s^2P_{3/2}-3p^2P_{3/2}^{\circ}$ $3s^4P_{5/2}-3p^4P_{5/2}^{\circ}$	8629,2 8216,3	14—15 14—15	70 —60
8	O ($2p^4-3P_2$)	$3s^3S_1-3p^3P_1$	8446,8	16—18	140
10	Ne ($2p^6-1S_0$)	$3s'[1/2]_1^{\circ}-3p[5/2]_1$ $3s[3/2]_2^{\circ}-3p[1/2]_1$	7173,9 7032,4	20—22 20—22	70 50
11	Na ($3s-2S_{1/2}$)	$3s^2^2S_{1/2}-4p^2P_{1/2}^{\circ}$	3303,0	23—24	24
12	Mg ($3s^2-1S_0$)	$3s^2^1S_0-3s3p^1P_1^{\circ}$	2852,1	24—25 24—26	50 60
18	Ar ($3p^6-1S_0$)	$4s[3/2]_2^{\circ}-4p'[3/2]_1$ $4s'[1/2]_1^{\circ}-5p[1/2]_0$	7147,0 4510,7	36—40 36—40	20 50
19	K ($4s-2S_{1/2}$)	$4s^2S_{1/2}-4p^2P_{1/2}^{\circ}$ $4s^2S_{1/2}-4p^2P_{3/2}^{\circ}$	7699,0 7664,9	39—40 39—41 39—40 39—41	4,19 7,85 4,22 7,88
20	Ca ($4s^2-1S_0$)	$4s^2^1S_0-4s4p^1P_1^{\circ}$ $4s^2^1S_0-4s4p^3P_1^{\circ}$	4226,7 6572,8	40—42 40—43 40—44 40—48 40—41 40—42 40—43 40—44 40—48	13,0 20,4 25,7 50,4 9,37 17,0 26,1 33,2 64,1
29	Cu ($3d^{10}4s-2S_{1/2}$)	$4s^2S_{1/2}-4p^2P_{1/2}^{\circ}$	3274,0	63—65	20
30	Zn ($4s^2-1S_0$)	$4s^2^1S_0-4s4p^1P_1^{\circ}$	2138,6	$\Delta A=2$ (среднее значение)	16
31	Ga ($4p-2^2P_{1/2}^{\circ}$)	$4p^2P_{1/2}^{\circ}-5s^2S_{1/2}$ $4p^2P_{3/2}^{\circ}-5s^2S_{1/2}$	4033,0 4172,1	69—71 69—71	—1,1 —1,3
36	Kr ($4p^6-1S_0$)	$5s[3/2]_1^{\circ}-5p[5/2]_2$	8776,7	82—84	2

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Наблюдаемый переход	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Изотопический сдвиг линии излучения $\Delta\nu$ ($A_1 \rightarrow A_2$)	
				$A_1 - A_2$	$\Delta\nu$, 10^{-3} см $^{-1}$
37	Rb ($5s^2 - {}^2S_{1/2}$)	$5s^2 {}^2S_{1/2} - 5p^2 P_{1/2}^\circ$	7 947,6	85—87	2,6
		$5s^2 {}^2S_{1/2} - 5p^2 P_{3/2}^\circ$	7 800,2	85—87	2,6
38	Sr ($5s^2 - {}^1S_0$)	$5s^2 {}^1S_0 - 5s5p^1 P_1^\circ$	4 607,3	84—88	9,0
				86—88	4,2
				87—88	1,5
		$5s^2 {}^1S_0 - 5s6p^1 P_1^\circ$	2 931,8	84—88	5,9
				86—88	7,5
				87—88	3,2
40	Zr ($4d^2 5s^2 - {}^3F_2$)	$5s^2 {}^1S_0 - 5s6p^3 P_1^\circ$	6 892,6	84—88	4,1
				86—88	6,7
				87—88	2,7
		$4d^3 5s^5 F_5 - 4d^3 5p^5 G_6^\circ$	4 687,8	90—92	-12
				92—94	-7
				94—96	-5
47	Ag ($4d^{10} 5s^2 - {}^2S_{1/2}$)	$4d^{10} 5s^2 {}^2S_{1/2} - 5p^2 P_{1/2}^\circ$	3 382,9	107—109	-15
		$4d^{10} 5s^2 {}^2S_{1/2} - 5p^2 P_{3/2}^\circ$	3 280,7	107—109	-15
48	Cd ($5s^2 - {}^1S_0$)	$5s^2 {}^1S_0 - 5s5p^3 P_1^\circ$	3 261,0	$\Delta A = 2$ (среднее значение)	-15
49	In ($5p^2 - {}^2P_{1/2}^\circ$)	$5p^2 P_{1/2}^\circ - 6s^2 S_{1/2}$	4 101,8	113—115	8,6
		$5p^2 P_{3/2}^\circ - 6s^2 S_{1/2}$	4 511,3	113—115	8,5
54	Xe ($5p^6 - {}^1S_0$)	$6s [3/2]_2^\circ - 6p [3/2]_2$	8 231,6	134—136	-3
55	Cs ($6s^2 - {}^2S_{1/2}$)	$6s^2 S_{1/2} - 6p^2 P_{3/2}^\circ$	8 521,1	133—134	1,2
				133—135	1,2
70	Yb ($4f^{14} 6s^2 - {}^1S_0$)	$6s^2 {}^1S_0 - 6s6p^1 P_1^\circ$	3 988,0	174—176	17
71	Lu ($5d 6s^2 - {}^2D_{3/2}$)		5 736,5	174—172	18
		$5p 6s^2 {}^2D_{3/2} -$ $- 5d 6s 6p^4 F_{3/2}^\circ$		175—176	-13,1
		$5d 6s^2 {}^2D_{5/2} -$ $- 5d 6s 6p^4 F_{5/2}^\circ$	6 055,0	175—176	-13,9
		$5p 6s^2 {}^2D_{5/2} -$ $- 5d 6s 6p^4 F_{7/2}^\circ$	5 421,9	175—176	-13,6
79	Au ($5d^{10} 6s^2 - {}^2S_{1/2}$)	$6s^2 S_{1/2} - 6p^2 P_{1/2}^\circ$	2 675,9	195—197	-97
80	Hg ($5d^{10} 6s^2 - {}^1S_0$)	$6s^2 {}^1S_0 - 6s6p^3 P_1^\circ$	2 536,5	198—199	-9
				198—200	-160
				199—201	-210
				200—202	-180
				202—204	-160
82	Pb ($6p^2 - {}^3P_0$)	$6p^2 {}^3P_0 - 6p 7s^3 P_1^\circ$	2 833,1	207—208	-47
				206—208	-75
				204—208	-140
				202—208	-207

4.7. ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ И МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ АТОМОВ

Электрическое поле. Однородное электрическое поле снимает вырождение атомных уровней по направлениям момента атома J , оставляя нерасщепленными уровни с $M_J = \pm |M_J|$ — проекцией момента на выделенное направление (эффект Штарка). Смещение ΔE_n уровня энергии E_n в достаточно слабом постоянном поле напряженности \mathcal{E} равно в низшем приближении теории возмущений

$$\Delta E_n = -\frac{1}{2} \alpha_{zz}^{(n)} \mathcal{E}^2,$$

где $\alpha_{zz}^{(n)}$ — компонента тензора *поляризуемости* атома в направлении внешнего поля $\mathcal{E} = \mathcal{E}_z$, которая определяет также среднее значение индуцируемого полем дипольного момента атома

$$\bar{d}_z^{(n)} = \frac{\partial \Delta E_n}{\partial \mathcal{E}} = \alpha_{zz}^{(n)} \mathcal{E}_z.$$

Поляризуемость атома зависит от его невозмущенного состояния n , в том числе от квантового числа M_J . В общем виде эта зависимость представляется в форме [1]

$$\alpha^{(n)} = \alpha_n + 2\beta_n \left[M_J^2 - \frac{1}{3} J(J+1) \right], \quad (4.1)$$

где α_n, β_n — постоянные; при суммировании по всем значениям M_J второе слагаемое в (4.1) обращается в нуль; оно равно нулю также и при $J=1/2$. Таким образом, поляризуемость атома, усредненная по всем M -состояниям уровня J , является скалярной величиной.

Поляризуемость атома простым образом связана с диэлектрической проницаемостью газа или пара, которая равна

$$\epsilon = 1 + 4\pi N \alpha. \quad (4.2)$$

Здесь N — плотность частиц газа. Если момент атомов, из которых состоит газ, отличен от нуля, то в (4.2) входит усредненное по проекциям момента M_J значение поляризуемости.

В табл. 4.9 представлены значения скалярной поляризуемости атомных частиц [2—5]. Эти значения распределены по классам точности согласно их определению (см. предисловие).

Магнитное поле. Магнитное поле расщепляет атомные уровни энергии, полностью снимая вырождение по направлениям полного момента атома J (эффект Зеемана). Энергия расщепления уровня, характеризующегося квантовыми числами J, L, S (приводимая зависимость справедлива в случае LS -связи), в достаточно слабом однородном магнитном поле напряженности H определяется соотношением [1]

$$\Delta E_J = \mu_B g M_J H, \quad (4.3)$$

где $\mu_B = e\hbar/2mc$ — магнетон Бора; M_J — проекция полного момента на направление магнитного поля; g — множитель Ланде (гиромангнитный множитель), равный

$$g = 1 + [(J(J+1) - L(L+1) + S(S+1))/2J(J+1)].$$

Формула (4.3) получена в предположении, что квадратичными по полю эффектами можно пренебречь.

Если спин и орбитальный момент атома равны нулю ($L=S=0$), то сдвиг уровня энергии атома определяется соотношением [1]

$$\Delta E = -\chi H^2/2,$$

где коэффициент χ — магнитная восприимчивость атома, характеризующая также индуцируемый полем средний магнитный момент атома

$$\bar{\mu}_z = \chi H, \quad H = H_z.$$

В табл. 4.10 приведены измеренные и рассчитанные значения магнитной восприимчивости атомов χ [6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. 3-е изд. — М.: Наука, 1974.
2. Teachout R. R., Pack R. T. — At. Data, 1971, vol. 3, p. 195.
3. Leonard P. J. — At. Data Nucl. Data Tabl., 1974, vol. 14, p. 21.
4. Miller T. M., Bederson B. Atomic and molecular polarizabilities. — A review of recent advances. — In: Advances in Atomic and Molecular Physics. Vol. 13/Ed. by D. R. Bates, B. Bederson. — N. Y.: Academ. Press, 1977, p. 1—55.
5. Dalgarno A. — Adv. Phys., 1962, vol. 11, p. 281.
6. Reinsch E. A., Meyer W. — Phys. Rev., 1976, vol. A14, p. 915.
7. Johnson W. R., Feiock F. D. — Ibid., 1968, vol. 168, p. 22.

Таблица 4.9. Дипольная поляризуемость атомных частиц

Атомный номер Z	Элемент (терм электронного состояния)	Дипольная поляризуемость		Класс точности
		10^{-30} м^3	a_0^3	
1	H ($2L$)	$\alpha^{(n)}(L) = n^6 + \frac{7}{4} n^4 (l^2 + l + 2) a_0^3$, где n, l — главное и орбитальное квантовые числа электрона		Точное значение
	H ($1s-2S$)	0,6668	4,5	То же
	H ($2p-2P^\circ$)	26,08	176	То же
	H ⁻ ($1S$)	30,5	206	B
2	-He ($1S$)	0,205	1,383	A
	He* (2^3S)	46,8	316	A
	He* (2^1S)	119,0	803	A
3	Li ($2S$)	24	162	B
	Li+ ($1S$)	0,0285	0,1925	A
	Li+ (2^3S)	6,965	47,0	A
	Li+ (2^1S)	14,7	99	B
4	Be ($1S$)	5,6	38	B
5	B ($2P$)	3,0	20,5	B
6	C ($3P$)	1,75	11,8	B
7	N ($4S$)	1,11	7,5	B
8	O ($3P$)	0,80	5,41	B
9	F ($2P$)	0,56	3,76	B
	F ⁻ ($1S$)	0,76	5,1	C
10	Ne ($1S$)	0,397	2,68	A
	Ne* ($3P$)	27,6	186	B
11	Na ($2S$)	24	162	B
	Na+ ($1S$)	1,7	12	C
12	Mg ($1S$)	11	72	C
13	Al ($2P$)	8,7	59	C
14	Si ($3P$)	5,5	37	C
15	P ($4P$)	3,6	24	C
16	S ($3P$)	2,7	18	C
17	Cl ($2P$)	2,1	14	C
	Cl ⁻ ($1S$)	2,8	19	C

Атомный номер Z	Элемент (терм электронного состояния)	Дипольная поляризуемость		Класс точности
		10^{-30} м^3	a_0^3	
18	Ar ($1S$)	1,64	11,08	A
	Ar* ($3P$)	7,1	47,8	B
19	K ($2S$)	43	290	B
	K+ ($1S$)	1,2	8,1	C
20	Ca ($1S$)	25	170	C
21	Sc ($2D$)	23	160	C
22	Ti ($3F$)	22	150	D
23	V ($4F$)	19	130	D
24	Cr ($7S$)	11	74	D
25	Mn ($6S$)	15	100	D
26	Fe ($5D$)	13	90	D
27	Co ($4F$)	11	74	D
28	Ni ($3F$)	10	70	D
29	Cu ($2S$)	6	40	D
30	Zn ($1S$)	7	50	D
35	Br ($2P$)	4	30	D
	Br ⁻ ($1S$)	4,1	28	C
36	Kr ($1S$)	2,48	16,74	A
	Kr* ($3P$)	50,6	341	B
37	Rb ($2S$)	48	320	B
	Rb+ ($1S$)	1,8	12,1	C
38	Sr ($1S$)	28	190	C
47	Ag ($2S$)	10	67	D
48	Cd ($1S$)	9	60	D
53	I ($2P$)	4	27	D
54	Xe ($1S$)	4,01	27,06	A
	Xe* ($3P$)	63,2	426	B
55	Cs ($2S$)	60	400	B
56	Ba ($1S$)	40	270	C
74	W ($5D$)	17	115	D
80	Hg ($1S$)	5,1	34	B
82	Pb ($3P$)	7,3	49	B

Таблица 4.10. Магнитная восприимчивость атомов χ

Атом	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$	Класс точности	Атом	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$	Класс точности
He	1,884	A	Ar	19,3	B
Be	13	C	Ca	44	C
Ne	7,0	B	Kr	29	B
Mg	23	C	Xe	45	B

ГЛАВА 5

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТОМНЫХ ИОНОВ

5.1 ПОТЕНЦИАЛ ИОНИЗАЦИИ ИОНОВ

В табл. 5.1 приведены значения потенциала ионизации (IP) положительных атомных ионов с зарядом $+1$, $+2$ и $+3$ (т. е. для ионов XII, XIII и XIV, если воспользоваться спектроскопическими обозначениями). Данная величина соответ-

ствуется минимальной энергии, затрачиваемой на переход валентного электрона в непрерывный спектр. Помимо этого представлены предельные значения для серий оптических переходов, отсчитанных от уровня основного состояния иона. Эти значения также являются потенциалами ионизации, выраженными в единицах см^{-1} (переводной множитель: $1 \text{ эВ} = 8065,48 \text{ см}^{-1}$). В отдельной графе табл. 5.1 указаны конфигурация валентной электронной оболочки и электронный терм основного состояния иона.

Данные о потенциалах ионизации многозарядных атомных ионов представлены в табл. 5.2, 5.3. Первая из этих таблиц содержит исчерпывающую информацию о значениях IP и оптического предела для ионов с зарядом ядра Z в диапазоне 5—36. Приведенные значения вобрали в себя результаты экспериментальных и теоретических исследований спектров многозарядных ионов. В табл. 5.3 исключены параметры потенциала ионизации ионов в изoeлектронных сериях от водорода и до аргона. Соответствующие значения получены на основе простейших экстраполяционных зависимостей и служат для оценки IP у ионов с произвольным зарядом Z .

Основная информация о потенциалах ионизации и оптических пределах положительных атомных ионов содержится в работах, цитируемых в § 4.1. Собранные в табл. 5.1, 5.2 числовые значения IP даны с таким количеством знаков, чтобы при возможном их уточнении изменение затронуло последнюю значащую цифру в пределах ± 1 — ± 2 .

Таблица 5.1. Потенциал ионизации одно-, двух- и трехкратно ионизованных атомов

Атомный номер Z	Элемент X	XII +4		XIII +2		XIV +3	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см^{-1} (верхнее число); потенциал ионизации IP , эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см^{-1} (верхнее число); потенциал ионизации IP , эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см^{-1} (верхнее число); потенциал ионизации IP , эВ (нижнее число)
2	He	$1s^2$ — $S_{1/2}$	438 908,89 54,418	—	—	—	—
3	Li	$1s^2$ — 1S_0	610 078 75,641	$1s^2$ — $S_{1/2}$	987 661,03 122,45	—	—
4	Be	$2s^2$ — $S_{1/2}$	146 882,9 18,211	$1s^2$ — 1S_0	1 241 250 153,90	$1s^2$ — $S_{1/2}$	1 756 018,8 217,72
5	B	$2s^2$ — 1S_0	202 887 25,155	$2s^2$ — $S_{1/2}$	305 931 37,931	$1s^2$ — 1S_0	2 092 001,4 259,38
6	C	$2p^2$ — $^3P_{1/2}$	196 665 24,384	$2s^2$ — 1S_0	386 241 47,89	$2s^2$ — $S_{1/2}$	520 178 64,49
7	N	$2p^2$ — 3P_0	238 750 29,602	$2p^2$ — $^3P_{1/2}$	382 704 47,45	$2s^2$ — 1S_0	624 866 77,47
8	O	$2p^3$ — $^4S_{3/2}$	283 240 35,118	$2p^2$ — 3P_0	443 085 54,936	$2p^2$ — $^3P_{1/2}$	624 382 77,414
9	F	$2p^4$ — 3P_2	282 059 34,971	$2p^3$ — $^4S_{3/2}$	505 780 62,71	$2p^2$ — 3P_0	702 830 87,14
10	Ne	$2p^5$ — $^2P_{3/2}$	330 389 40,963	$2p^4$ — 3P_2	512 000 63,46	$2p^3$ — $^4S_{3/2}$	783 300 97,12
11	Na	$2p^6$ — 1S_0	381 390 47,287	$2p^5$ — $^2P_{3/2}$	577 650 71,620	$2p^4$ — 3P_2	797 800 98,92
12	Mg	$3s^2$ — $S_{1/2}$	121 267,6 15,0354	$2p^6$ — 1S_0	646 400 80,144	$2p^5$ — $^2P_{3/2}$	881 290 109,27
13	Al	$3s^2$ — 1S_0	151 863 18,829	$3s^2$ — $S_{1/2}$	229 446 28,448	$2p^6$ — 1S_0	967 800 119,99
14	Si	$3p^2$ — $^3P_{1/2}$	131 838 16,3460	$3s^2$ — 1S_0	270 139 33,493	$3s^2$ — $S_{1/2}$	364 093 45,142
15	P	$3p^2$ — 3P_0	159 451 19,770	$3p^2$ — $^3P_{1/2}$	243 601 30,203	$3s^2$ — 1S_0	414 923 51,444
16	S	$3p^3$ — $^4S_{3/2}$	188 233 23,338	$3p^2$ — 3P_0	280 900 34,83	$3p^2$ — $^3P_{1/2}$	381 540 47,305

Атомный номер Z	Элемент X	XII		XIII		XIV	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)
17	Cl	$3p^4-^3P_2$	192 070 23,814	$3p^3-^4S_{3/2}$	319 500 39,61	$3p^2-^3P_0$	431 230 53,47
18	Ar	$3p^5-^2P_{3/2}$	222 848,2 27,630	$3p^4-^3P_2$	329 966 40,911	$3p^3-^4S_{3/2}$	482 400 59,81
19	K	$3p^4-^1S_0$	255 100 31,63	$3p^5-^2P_{3/2}$	369 450 45,81	$3p^4-^3P_2$	491 300 60,91
20	Ca	$4s-^2S_{1/2}$	95 751,9 11,872	$3p^6-^1S_0$	410 642 50,913	$3p^5-^2P_{3/2}$	542 600 67,3
21	Sc	$3d4s-^3D_1$	103 237 12,800	$3d-^2D_{3/2}$	199 677 24,757	$3p^6-^1S_0$	592 730 73,49
22	Ti	$3d^24s-^4F_{3/2}$	109 490 13,58	$3d^2-^3F_2$	221 740 27,49	$3d-^3D_{3/2}$	348 973 43,27
23	V	$3d^3-^5D_0$	118 200 14,66	$3d^3-^4F_{3/2}$	236 400 29,31	$3d^2-^3F_2$	376 700 46,71
24	Cr	$3d^5-^6S_{5/2}$	133 000 16,50	$3d^4-^5D_0$	249 700 31,0	$3d^4-^4F_{3/2}$	396 000 49,2
25	Mn	$3d^54s-^7S_3$	126 145 15,640	$3d^5-^6S_{5/2}$	271 550 33,67	$3d^5-^6D_0$	413 000 51,2
26	Fe	$3d^64s-^6D_{9/2}$	130 560 16,188	$3d^6-^5D_4$	247 200 30,65	$3d^5-^6S_{5/2}$	442 000 54,8
27	Co	$3d^7-^3F_4$	137 790 17,084	$3d^7-^4F_{9/2}$	270 200 33,5	$3d^6-^5D_4$	414 000 51,3
28	Ni	$3d^8-^3D_{5/2}$	146 541,6 18,169	$3d^8-^3F_4$	285 000 35,3	$3d^7-^4F_{9/2}$	443 000 54,9
29	Cu	$3d^{10}-^1S_0$	163 669 20,293	$3d^9-^2D_{5/2}$	297 140 36,84	$3d^8-^3F_4$	463 000 57,4
30	Zn	$4s-^2S_{1/2}$	144 892 17,964	$3d^{10}-^1S_0$	320 390 39,72	$3d^9-^2D_{5/2}$	480 500 59,57
31	Ga	$4s^2-^1S_0$	165 466 20,515	$4s-^2S_{1/2}$	247 700 30,7	$3d^{10}-^1S_0$	517 600 64,2
32	Ge	$4p-^2P_{1/2}$	128 521,3 15,935	$4s^2-^1S_0$	276 036 34,2	$4s-^2S_{1/2}$	368 700 45,7
33	As	$4p^2-^3P_0$	149 900 18,59	$4p-^2P_{1/2}$	228 670 28,4	$4s^2-^1S_0$	404 370 50,1
34	Se	$4p^3-^4S_{3/2}$	170 700 21,16	$4p^2-^3P_0$	248 580 30,82	$4p-^2P_{1/2}$	346 400 42,95
35	Br	$4p^4-^3P_2$	175 900 21,81	$4p^3-^4S_{3/2}$	289 529 35,90	$4p^2-^3P_0$	381 600 47,3
36	Kr	$4p^5-^2P_{3/2}$	196 475 24,360	$4p^4-^3P_2$	298 000 36,95	$4p^3-^4S_{3/2}$	423 600 52,5
37	Rb	$4p^6-^1S_0$	220 105 27,290	$4p^5-^2P_{3/2}$	316 600 39,2	$4p^4-^3P_2$	424 400 52,6
38	Sr	$5s-^2S_{1/2}$	88 964 11,030	$4p^6-^1S_0$	345 880 42,88	$4p^5-^2P_{3/2}$	453 900 56,28
39	Y	$5s^2-^1S_0$	98 700 12,24	$5s-^2S_{1/2}$	165 540 20,525	$4p^6-^1S_0$	488 830 60,61
40	Zr	$4d^25s-^4F_{3/2}$	105 900 13,13	$4d^2-^3F_2$	186 000 23,1	$4d-^2D_{3/2}$	277 606 34,419
41	Nb	$4d^4-^5D_0$	115 500 14,32	$4d^3-^4F_{3/2}$	202 000 25,0	$4d^2-^3F_2$	304 000 37,7
42	Mo	$4d^5-^6S_{5/2}$	130 300 16,16	$4d^4-^5D_0$	219 100 27,2	$4d^3-^4F_{3/2}$	374 180 46,4
43	Tc	$4d^55s-^7S_3$	123 000 15,26	$4d^5-^6S_{5/2}$	238 300 29,5	$4d^4-^5D_0$	—
44	Ru	$4d^7-^4F_{9/2}$	135 200 16,76	$4d^6-^5D_4$	229 600 28,5	$4d^5-^6S_{5/2}$	—

Атомный номер Z	Элемент X	XII		XIII		XIV	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации <i>IP</i> , эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации <i>IP</i> , эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации <i>IP</i> , эВ (нижнее число)
45	Rh	$4d^8-^3F_4$	145 800 18,08	$4d^7-^4F_{9/2}$	250 500 31,1	$4d^6-^5D_4$	—
46	Pd	$4d^9-^2D_{5/2}$	156 700 19,43	$4d^8-^3F_4$	265 600 32,9	$4d^7-^4F_{9/2}$	—
47	Ag	$4d^{10}-^1S_0$	173 300 21,49	$4d^9-^2D_{5/2}$	280 900 34,8	$4d^8-^3F_4$	—
48	Cd	$5s-^2S_{1/2}$	136 374,7 16,908	$4d^{10}-^1S_0$	302 200 37,47	$4d^9-^2D_{5/2}$	—
49	In	$5s^2-^1S_0$	152 195 18,87	$5s-^2S_{1/2}$	226 100 28,0	$4d^{10}-^1S_0$	460 000 57,0
50	Sn	$5s^2 5p-^2P_{1/2}$	118 017 14,632	$5s^2-^1S_0$	246 020 30,50	$5s-^2S_{1/2}$	328 550 40,74
51	Sb	$5p^2-^3P_0$	133 327,5 16,53	$5s^2 5p-^2P_{1/2}$	204 248 25,32	$5s^2-^1S_0$	356 160 44,16
52	Te	$5p^3-^4S_{3/2}$	150 000 18,6	$5p^2-^3P_0$	225 500 27,96	$5s^2 5p-^2P_{1/2}$	301 776 37,42
53	I	$5p^4-^3P_2$	154 304 19,131	$5p^3-^4S_{3/2}$	266 000 33,0	$5p^2-^3P_0$	—
54	Xe	$5p^5-^2P_{3/2}$	169 200 20,98	$5p^4-^3P_2$	250 000 31,0	$5p^3-^4S_{3/2}$	360 000 45
55	Cs	$5p^6-^1S_0$	187 000 23,15	$5p^5-^2P_{3/2}$	270 000 33,4	$5p^4-^3P_2$	370 000 46
56	Ba	$6s-^2S_{1/2}$	80 686,9 10,004	$5p^6-^1S_0$	289 000 35,8	$5p^5-^2P_{3/2}$	380 000 47
57	La	$5d^2-^3F_2$	89 200 11,1	$5d-^2D_{3/2}$	154 675 19,18	$5p^6-^1S_0$	403 000 49,9
58	Ce	$4f^5 d^2-^4H_{7/2}$	87 000 10,8	$4f^2-^3H_4$	162 900 20,20	$4f-^2F_{5/2}$	296 500 36,76
59	Pr	$4f^3(4I_{9/2})$ $6s(9/2, 1/2)_4$	85 000 10,6	$4f^3-^4I_{9/2}$	174 400 21,62	$4f^2-^3H_4$	314 400 38,98
60	Nd	$4f^4 6s-^5I_{7/2}$	86 000 10,7	$4f^4-^5I_1$	179 000 22,1	$4f^3-^4I_{9/2}$	326 000 40,4
61	Pm	$4f^5 6s-^7H_2$	88 000 10,9	$4f^5-^6H_{5/2}$	180 000 22,3	$4f^4-^5I_4$	330 000 41,0
62	Sm	$4f^6 6s-^8F_{1/2}$	89 000 11,1	$4f^6-^7F_0$	189 000 23,4	$4f^5-^6H_{5/2}$	330 000 41,4
63	Eu	$4f^7 6s-^9S_4$	90 660 11,24	$4f^7-^8S_{7/2}$	201 000 24,9	$4f^6-^7F_0$	340 000 42,7
64	Gd	$4f^7 5d 6s-^9D_{5/2}$	97 000 12,1	$4f^7 5d-^9D_2$	166 000 20,6	$4f^7-^8S_{7/2}$	350 000 44,0

Атомный номер Z	Элемент X	XII		XIII		XIV	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)
65	Tb	$4f^9(6H_{15/2})$ $6s(15/2, 1/2)_8$	93 000 11,5	$4f^9-6H_{15/2}$	177 000 21,9	$4f^8-7F_6$	317 000 39,4
66	Dy	$4f^{10}(5I_8)6s$ $(8,1/2)_{17/2}$	94 000 11,7	$\{4f^{10}-5I_8\}$	184 000 22,8	$4f^9-6H_{15/2}$	330 000 41,4
67	Ho	$4f^{11}(4I_{15/2})$ $6s(15/2, 1/2)_8$	95 000 11,8	$4f^{11}-4I_{15/2}$	184 000 22,8	$4f^{10}-5I_8$	340 000 42,5
68	Er	$4f^{12}(3H_6)6s$ $(6,1/2)_{13/2}$	96 000 11,9	$4f^{12}-3H_6$	183 000 22,7	$4f^{11}-4I_{15/2}$	340 000 42,7
69	Tm	$4f^{13}(2F_{7/2})$ $6s(7/2, 1/2)_4$	97 000 12,1	$4f^{13}-2F_{7/2}$	191 000 23,7	$4f^{12}-3H_6$	340 000 42,7
70	Yb	$4f^{14}6s-3S_{1/2}$	98 300 12,18	$4f^{14}-1S_0$	202 100 25,05	$4f^{13}-2F_{7/2}$	351 000 43,6
71	Lu	$4f^{14}6s-1S_0$	112 000 13,9	$4f^{14}6s-3S_{1/2}$	169 050 20,96	$4f^{14}-1S_0$	365 000 45,25
72	Hf	$5d6s^2-3D_{3/2}$	120 000 14,9	$5d^2-3F_2$	187 800 23,3	$5d-2D_{3/2}$	269 000 33,4
73	Ta	$5d^66s-5F_1$	—	—	—	—	—
74	W	$5d^46s-6D_{1/2}$	—	—	—	—	—
75	Re	$5d^56s-7S_2$	—	—	—	—	—
76	Os	$5d^66s-6D_{9/2}$	—	—	—	—	—
77	Ir	$5d^76s-5F_5$	—	—	—	—	—
78	Pt	$5d^9-2D_{5/2}$	149 720 18,56	—	—	—	—
79	Au	$5d^{10}-1S_0$	165 000 20,5	$5d^9-2D_{5/2}$	270 000 34	$5d^8-3F_4$	350 000 43
80	Hg	$5d^{10}6s-2S_{1/2}$	151 280 18,76	$5d^{10}-1S_0$	276 000 34,2	$5d^9-2D_{5/2}$	370 000 46
81	Tl	$6s-1S_0$	164 760 20,43	$6s-2S_{1/2}$	240 770 29,85	—	—
82	Pb	$6s^26p-2P_{1/2}$	121 245,1 15,033	$6s^2-1S_0$	257 590 31,94	$6s-2S_{1/2}$	341 440 42,33
83	Bi	$6p^2-3P_0$	135 000 16,7	$6s^26p-2P_{1/2}$	206 180 25,56	$6s^2-1S_0$	365 500 45,3
84	Po	—	—	—	—	—	—
85	At	—	—	—	—	—	—
86	Rn	—	—	—	—	—	—
87	Fr	—	—	—	—	—	—

Атомный номер Z	Элемент X	XII		XIII		XIV	
		Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)	Конфигурация валентной оболочки—терм	Оптический предел, см ⁻¹ (верхнее число); потенциал ионизации IP, эВ (нижнее число)
88	Ra	7s— ² S _{1/2}	81 842,3 10,15	—	—	—	—
89	Ac	7s ² — ¹ S ₀	95 000 11,75	6p ⁶ 7s— ² S _{1/2}	— 20	—	—
90	Th	6d ² 7s— ⁴ F _{3/2}	96 000 11,9	5f6d— ³ H ₄ ^o	148 000 18,3	5f— ² F _{5/2} ^o	231 900 28,7
91	Pa	5f ² 7s ² — ³ H ₄	—	—	—	{5f ² — ³ H ₄ }	—
92	U	5f ² 7s ² — ⁴ I _{9/2} ^o	96 000 11,9	—	160 000 20	5f ³ — ⁴ I _{9/2} ^o	300 000 37
93	Np	5f ³ 6d7s ² — ⁵ L ₆ ^o	—	—	—	5f ⁴ — ⁵ I ₄	—
94	Pu	5f ⁶ 7s— ⁵ F _{1/2}	—	—	—	5f ⁵ — ⁶ H _{5/2} ^o	—
95	Am	5f ⁷ 7s— ⁹ S ₄ ^o	—	5f ⁷ — ⁸ S _{7/2} ^o	—	5f ⁶ — ⁷ F ₆	—
96	Cm	5f ⁷ 7s ² — ⁸ S _{7/2} ^o	—	—	—	5f ⁷ — ⁸ S _{7/2} ^o	—
97	Bk	5f ⁹ 7s— ⁷ H ₈ ^o	—	—	—	5f ⁸ — ⁷ F ₆	—
98	Cf	5f ¹⁰ (⁵ I ₈)7s (8, 1/2) ¹ 7/2	—	—	—	5f ⁹ — ⁶ H _{15/2} ^o	—
99	Es	5f ¹¹ (⁴ I _{15/2}) ^o 7s (15/2, 1/2) ^o ₈	—	5f ¹¹ — ⁴ I _{15/2} ^o	—	{5f ¹⁰ — ⁵ I ₈ }	—
100	Fm	—	—	—	—	{5f ¹¹ — ⁴ I _{15/2} ^o }	—
101	Md	—	—	—	—	{5f ¹² — ³ H ₆ }	—
102	No	{5f ¹⁴ 7s— ² S _{1/2} }	—	{5f ¹⁴ — ¹ S ₀ }	—	{5f ¹³ — ² F _{7/2} ^o }	—

Таблица 5.2. Потенциал ионизации многозарядных атомных ионов ($5 \leq Z \leq 36$) (верхняя цифра — оптический предел, см⁻¹; нижняя цифра — потенциал ионизации, эВ) [X ζ — спектроскопический символ иона, $\zeta = Z - N + 1$, N — число электронов в системе]

I. $Z = 5 \div 10$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ степени ионизации иона ζ					
		V	VI	VII	VIII	IX	X
5	B	2744107,9 340,229	—	—	—	—	—

I. $Z = 5 \div 10$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ					
		V	VI	VII	VIII	IX	X
6	C	3162400 392,09	3952061,5 489,997	—	—	—	—
7	N	789540 97,891	4452750 552,074	5380089 667,051	—	—	—
8	O	918660 113,900	1114010 138,12	5963110 739,34	7028394 871,417	—	—
9	F	921430 114,24	1267610 157,164	1493630 185,19	7693800 953,91	8897240 1103,126	—
10	Ne	1018000 126,2	1273800 157,9	1671790 207,28	1928460 239,10	9645000 1195,84	10986870 1362,210

II. $Z = 11 \div 18$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ						
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
11	Na	1116300 138,40	1389000 172,2	1682000 208,5	2131000 264,2	2418600 299,87	11816980 1465,13	13297670 1648,714
12	Mg	1139400 141,27	1504300 186,5	1814300 224,9	2145000 266,0	2647400 328,2	2964000 367,5	14210100 1761,84
13	Al	1240700 153,83	1536300 198,48	1947300 241,44	2295400 284,60	2662000 330,1	3221100 399,4	3565000 442,0
14	Si	1345100 166,77	1655600 205,3	1988000 246,5	2448 000 303,5	2832000 351,1	3237000 401,4	3842000 476,4
15	P	1524463 65,026	1777900 220,434	2123000 263,2	2496000 309,4	2998000 371,7	3424000 424,5	3868000 479,6
16	S	585514 72,595	710195 88,05	2266000 280,9	2647000 328,2	3058000 379,1	3606000 447,1	4071000 504,8
17	Cl	547000 67,8	783 000 97,0	921100 114,202	2809000 348,3	3227000 400,1	3675000 455,6	4269000 529,3
18	Ar	605000 75,0	734000 91,01	1002700 124,32	1157060 143,46	3407000 422,4	3861000 478,7	4347000 539,0

II. $Z = 11 \div 18$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ						
		XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
11	Na	—	—	—	—	—	—	—
12	Mg	15829940 1962,678	—	—	—	—	—	—
13	Al	16824700 2086,01	18584120 2304,16	—	—	—	—	—
14	Si	4222000 523,4	19661200 2437,7	21560600 2673,20	—	—	—	—
15	P	4520000 560,4	4935000 611,9	22720000 2816,9	24759900 3069,86	—	—	—
16	S	4554000 564,7	5256000 651,6	5704000 707,2	26002000 3223,9	28182500 3494,21	—	—
17	Cl	4775000 592,0	5297000 656,7	6047000 749,8	6528000 809,4	29507000 3658,4	31828900 3946,31	—
18	Ar	4987000 618,3	5534000 686,1	6095000 755,7	6894000 854,8	7404000 918,0	33235000 4120,7	35699800 4426,24

III. $Z = 19 \div 26$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
19	K	667000 82,7	802000 99,4	948000 117,6	1248000 154,7	1418100 175,82	4060000 504	4555000 564,7	5077000 629,4
20	Ca	682000 84,5	877000 108,8	1026000 127,2	1188000 147,2	1519000 188,3	1704050 211,28	4774000 591,9	5301000 657,2
21	Sc	741000 91,9	893000 110,7	1113000 138,0	1275000 158,1	1452000 180,0	1816000 225,1	2015050 249,84	5544000 687,4
22	Ti	801000 99,30	964000 119,5	1136000 140,8	1374000 170,4	1549000 192,1	1741000 215,9	2137000 265	2351100 291,50
23	V	526530 65,282	1033000 128,1	1215000 150,6	1399000 173,4	1660000 205,8	1859000 230,5	2062000 256	2485000 308
24	Cr	560200 69,5	731020 90,64	1292000 160,2	1490000 184,7	1688000 209,3	1971000 244,4	2184000 271	2404000 298
25	Mn	584000 72,4	766000 95	962000 119,3	1569000 194,5	1789000 221,8	2003000 248,3	2307000 286,0	2536000 314,4
26	Fe	605000 75	800000 99	1008000 124,98	1218400 151,06	1880000 234	2114000 262,1	2340000 290	2670000 331

III. $Z = 19 \div 26$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ						
		XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX
19	K	5764000 714,6	6345000 786,6	6945000 861,1	7810000 968	8344000 1033,4	37189000 4610,9	39795600 4934,07
20	Ca	5861000 726,6	6595000 817,6	7215000 894,5	7860000 974	8770000 1087	9332000 1157	41367000 5128,9
21	Sc	6103000 756,7	6701000 830,8	7481000 927,5	8140000 1009	8820000 1094	9780000 1213	10388000 1288,0
22	Ti	6354000 787,8	6961000 863,1	7597000 941,9	8420000 1044	9120000 1131	9850000 1221	10860000 1346
23	V	2712000 336,3	7227000 896,0	7870000 976	8550000 1060	9420000 1168	10160000 1260	10930000 1355
24	Cr	2862000 354,8	3098000 384,2	8150000 1011	8850000 1097	9560000 1185	10480000 1299	11260000 1396
25	Mn	2771000 343,6	3250000 403,0	3510000 435,2	9139000 1133	9872000 1244	10620000 1317	11590000 1437
26	Fe	2910000 361	3160000 392	3690000 457	3946300 489,3	10180000 1262	10990000 1360	11800000 1470

III. $Z = 19 \div 26$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ						
		XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
19	K	—	—	—	—	—	—	—
20	Ca	44117200 5469,88	—	—	—	—	—	—
21	Sc	45771000 5674,9	48665200 6033,77	—	—	—	—	—
22	Ti	11501000 1426	50402000 6249,1	53440400 6625,8	—	—	—	—
23	V	11990000 1486	12668000 1571	55259000 6851,3	58443500 7246,1	—	—	—
24	Cr	12070000 1496	13180000 1634	13884000 1721	60345000 7482	63675000 7894,8	—	—
25	Mn	12410000 1539	13260000 1644	14420000 1788	15160000 1880	65660000 8141	69137000 8571,9	—
26	Fe	12710000 1582	13600000 1690	14500000 1800	15800000 1960	16500000 2046	71204000 8828	74829000 9277,7

IV. $Z = 27 \div 36$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
27	Co	641000 79,5	823000 102	1040000 129	1270000 158	1501000 186,1	2220000 275	2460000 305	2710000 336
28	Ni	613000 76	870000 108	1070000 133	1310000 162	1560000 193	1812000 225	2590000 321	2840000 352
29	Cu	645000 80	830000 103	1120000 139	1340000 166	1610000 199	1870000 232	2150000 266	2980000 369
30	Zn	670000 83	870000 108	1080000 134	1400000 174	1640000 203	1920000 238	2210000 274	2507000 311
31	Ga	730000 90	940000 117	1190000 147	1440000 179	1730000 214	2000000 248	2420000 284	2590000 321
32	Ge	754000 93,5	970000 120	1220000 151	1480000 183	1750000 217	2060000 255	2350000 291	2830000 330
33	As	505100 62,6	1029000 128	1240000 154	1510000 187	1790000 222	2090000 259	2420000 300	2730000 338
34	Se	550000 68	659000 91,7	1252800 155,33	1540000 191	1830000 227	2130000 264	2450000 304	2800000 347
35	Br	482000 59,7	715000 88,6	830000 103	1555000 192,8	1870000 232	2180000 270	2500000 310	2840000 352
36	Kr	524000 65	633000 78,5	895000 111	1015800 125,94	1862000 230,9	2220000 275	2550000 316	2890000 358

IV. $Z = 27 \div 36$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
27	Co	3060000 379	3310000 411	3580000 444	4129000 512,0	4408000 546,6	11270000 1397	12130000 1486	12930000 1603
28	Ni	3080000 384	3470000 430	3740000 464	4020000 499	4608000 571,3	4896000 607,0	12430000 1541	13290000 1648
29	Cu	3230000 401	3509000 435	3900000 484	4190000 520	4490000 557	5106000 633	5410000 671	13630000 1690
30	Zn	3390000 420	3660000 454	3950000 490	4370000 542	4670000 579	4990000 619	5630000 698	5947000 737
31	Ga	2890000 358	3830000 475	4110000 510	4400000 546	4810000 596	5140000 637	5460000 677	6170000 765
32	Ge	2980000 369	3300000 409	4300000 533	4580000 568	4900000 607	5310000 658	5660000 701	6000000 744
33	As	3270000 379	3400000 421	3730000 462	4790000 594	5080000 630	5404000 670	5840000 724	6203000 769
34	Se	3130000 388	3750000 431	3830000 475	4186000 519	5300000 657	5610000 695	5940000 736	6400000 793
35	Br	3200000 398	3560000 441	4250000 486	4300000 533	4670000 579	5840000 724	6150000 762	6500000 806
36	Kr	3250000 403	3640000 451	4010000 497	4770000 545	4780000 593	5180000 642	6404000 794	6720000 833

IV. $Z = 27 \div 36$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
27	Co	13990000 1735	14890000 1846	15820000 1962	17090000 2119	17900000 2219	76980000 9544	80752000 10012,1	—
28	Ni	14160000 1756	15280000 1894	16220000 2011	17190000 2131	18510000 2295	19350000 2399	82990000 10290	86908000 10775,3
29	Cu	14460000 1793	15360000 1905	16490000 2045	17530000 2173	18530000 2298	19840000 2460	20860000 2585	89220000 11062
30	Zn	14890000 1846	15750000 1953	16700000 2070	17870000 2216	18950000 2350	20000000 2479	21350000 2647	22420000 2780

IV. $Z=27 \div 36$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
31	Ga	6511000 807	16210000 2010	17100000 2120	18080000 2242	19300000 2393	20400000 2533	21520000 2668	22900000 2840
32	Ge	6740000 836	7102000 880	17580000 2180	18500000 2294	19530000 2421	20780000 2577	21960000 2723	23090000 2863
33	As	6660000 813	7340000 910	7720000 957	19010000 2357	19950000 2474	21020000 2606	22330000 2768	23550000 2920
34	Se	6770000 839	7150000 886	7960000 987	8360000 1036	20500000 2542	21460000 2661	22570000 2798	23910000 2965
35	Br	6970000 864	7360000 913	7750000 961	8610000 1068	9030000 1120	22040000 2733	23030000 2855	24170000 2997
36	Kr	7080000 878	7570000 939	7980000 989	8380000 1039	9280000 1151	9720000 1205	23640000 2931	24650000 3056

IV. $Z=27 \div 36$

Атомный номер Z	Элемент X	Спектроскопический символ ступени ионизации иона ζ							
		XXIX	XXX	XXXI	XXXII	XXXIII	XXXIV	XXXV	XXXVI
27	Co	—	—	—	—	—	—	—	—
28	Ni	—	—	—	—	—	—	—	—
29	Cu	93298000 11567,5	—	—	—	—	—	—	—
30	Zn	95700000 11865	99922000 12389	—	—	—	—	—	—
31	Ga	24050000 2982	102400000 12696	106782000 13239	—	—	—	—	—
32	Ge	24530000 3041	25750000 3192	109300000 13550	113880000 14119	—	—	—	—
33	As	24720000 3065	26200000 3248	27470000 3409	116500000 14440	121214000 15029	—	—	—
34	Se	25190000 3123	26410000 3274	27930000 3463	29300000 3633	123900000 15370	128790000 15968	—	—
35	Br	25570000 3170	26890000 3334	28150000 3490	29710000 3684	31170000 3865	131600000 16315	136600000 16937	—
36	Kr	25830000 3203	27270000 3381	28640000 3551	29940000 3712	31550000 3912	33110000 4105	139500000 17290	144660000 17936

Таблица 5.3. Потенциал ионизации атомных ионов в изоэлектронных сериях [потенциал ионизации многозарядного иона аппроксимируется зависимостью

$$IP = \frac{(Z-\sigma)^2}{(n-\delta)^2} IP_N, \text{ где } IP_N = 13,606 \text{ эВ — потенциал ионизации атома водорода;}$$

Z — заряд ядра; n — главное квантовое число вылетающего электрона; σ — экранировочная постоянная; δ — квантовый дефект уровня для серии, сходящейся к границе непрерывного спектра]

Электронная оболочка иона	1s	1s ²	1s ² 2s	1s ² 2s ²	2s ² 2p	2s ² 2p ²	2s ² 2p ³	2s ² 2p ⁴	2s ² 2p ⁵
σ	0	0,75	1,76	2,20	3,23	3,87	4,52	5,46	6,16
δ	0	0,011	0,027	0,016	0,018	0,013	0,011	0,014	0,014
Электронная оболочка иона	2s ² 2p ⁰	2p ⁰ 3s	2p ⁰ 3s ²	3s ² 3p	3s ² 3p ²	3s ² 3p ³	3s ² 3p ⁴	3s ² 3p ⁵	3s ² 3p ⁶
σ	6,97	8,50	9,15	10,36	10,96	11,63	12,56	13,32	14,23
δ	0,023	0,080	0,086	0,080	0,077	0,082	0,089	0,107	0,158

5.2. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ К ЭЛЕКТРОНУ

В табл. 5.4 представлены значения энергии сродства атомов к электрону, т. е. энергии, которую необходимо затратить на отрыв электрона от отрицательного иона. В соответствующих графах таблицы приведены спектроскопические обозначения состояний отрицательного иона, структура внешней электронной оболочки и энергия связи электрона в ионе. Данные об энергии связи электрона распределены по классам точности, определенным в предисловии. Случаи, когда имеется информация об отсутствии отрицательного иона данного сорта, классифицированы на два класса надежности: а — тот факт, что устойчивый отрицательный ион данного элемента не существует, установлен с достоверностью; б — для достоверного утверждения факта несуществования стабильного отрицательного иона требуются некоторые дополнительные исследования.

Включенные в табл. 5.4 данные почерпнуты главным образом из монографии [1]; в ней, а также в монографиях [2, 3] и обзорах [4—9] дано описание современных методов определения искомого значения энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. — М.: Атомиздат, 1978.
2. Месси Г. Отрицательные ионы: Пер. с 3-го англ. изд. — М.: Мир, 1979.
3. Page F. M., Goode G. C. Negative ions and the magnetron. — L.: Wiley-Interscience, 1969.
4. Steiner B. H. Photodetachment cross sections and electron affinities. — In: Case Studies in Atomic Collision Physics II/Ed. by E. W. McDaniel, M. R. C. McDowell. — Amsterdam: North-Holland, 1972, Ch. 7, p. 485—545.
5. Hotop H., Lineberger W. C. Binding energies in atomic negative ions. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1975, vol. 4, p. 539—576.
6. Walther H. Atomic and molecular spectroscopy with lasers. — In: Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules: Topics in Applied Physics. Vol. 2/Ed. by H. Walther. — Berlin: Springer, 1976, p. 1—124.
7. Moiseiwitsch B. L. Negative ions. — In: Atomic Processes and Applications/Ed. by P. G. Burke, B. L. Moiseiwitsch. — Amsterdam: North Holland, 1976, Ch. 9.
8. Corderman R. R., Lineberger W. C. Negative ion spectroscopy. — In: Annual Review of Physical Chemistry. Vol. 30/Ed. by B. S. Rabinovitch, J. M. Schurr, H. L. Strauss. — Palo Alto: Ann. Rev. Inc., 1979, p. 347—378.
9. Mead R. D., Stevens M. E., Lineberger W. C. Photodetachment in negative ion beams. — In: Gas phase ion chemistry, Vol. 3: Ions and Light/Ed. by M. T. Bowers. — N. Y.: Academic Press, 1984, Ch. 22, p. 213—248.

Т а б л и ц а 5.4. Энергия сродства атомов к электрону ЕА

Атомный номер Z	Отрицательный ион и его терм	Конфигурация валентной электронной оболочки	ЕА, эВ	Классы точности и надежности
1	H ⁻ (¹ S)	1s ²	0,75421	A
2	He ⁻ (⁴ P)	1s2s2p	0,077	B
3	Li ⁻ (¹ S)	1s ² 2s ²	0,618	A
4	Be ⁻ (² S)	2s ² 3s	He существует	a
5	B ⁻ (³ P)	2s ² 2p ²	0,28	C
6	C ⁻ (⁴ S)	2s ² 2p ³	1,263	A
	C ⁻ (² D)	2s ² 2p ³	0,035	B
7	N ⁻	2s ² 2p ⁴	He существует	a
8	O ⁻ (² P)	2s ² 2p ⁵	1,46112	A
9	F ⁻ (¹ S)	2s ² 2p ⁶	3,40	A

Атомный номер Z	Отрицательный ион и его терм	Конфигурация валентной электронной оболочки	ЕА, эВ	Классы точности и надежности
10	Ne ⁻	2p ⁶ 3s	He существует	<i>a</i>
11	Na ⁻ (¹ S)	3s ²	0,5479	<i>A</i>
12	Mg ⁻	—	He существует	<i>a</i>
13	Al ⁻ (³ P ₀)	3p ²	0,44	<i>B</i>
14	Al ⁻ (¹ D ₂)	3p ²	0,33	<i>B</i>
	Si ⁻ (⁴ S)	3p ³	1,39	<i>A</i>
	Si ⁻ (² D)	3p ³	0,526	<i>B</i>
	Si ⁻ (² P)	3p ³	0,034	<i>B</i>
15	P ⁻ (³ P)	3p ⁴	0,746	<i>A</i>
16	S ⁻ (² P)	3p ⁵	2,07712	<i>A</i>
17	Cl ⁻ (¹ S)	3p ⁶	3,62	<i>A</i>
18	Ar ⁻	—	He существует	<i>a</i>
19	K ⁻ (¹ S)	4s ²	0,5015	<i>A</i>
20	Ca ⁻ (² D)	3d4s ²	He существует	<i>a</i>
21	Sc ⁻ (¹ D)	3d4s ² 4p	0,19	<i>C</i>
22	Sc ⁻ (³ D)	3d4s ² 4p	0,04	<i>D</i>
	Ti ⁻ (⁴ F)	3d ³ 4s ²	0,08	<i>D</i>
23	V ⁻ (⁶ D)	3d ⁴ 4s ²	0,53	<i>C</i>
24	Cr ⁻ (⁶ S)	3d ⁵ 4s ²	0,67	<i>B</i>
25	Mn ⁻ (⁶ D)	3d ⁶ 4s ²	He существует	<i>b</i>
26	Fe ⁻ (⁴ F)	3d ⁷ 4s ²	0,16	<i>D</i>
27	Co ⁻ (³ F)	3d ⁸ 4s ²	0,66	<i>B</i>
28	Ni ⁻ (² D)	3d ⁹ 4s ²	1,16	<i>A</i>
29	Cu ⁻ (¹ S)	3d ¹⁰ 4s ²	1,23	<i>A</i>
30	Zn ⁻	—	He существует	<i>b</i>
31	Ga ⁻ (³ P)	4p ²	0,3	<i>D</i>
32	Ge ⁻ (⁴ S)	4p ³	1,2	<i>C</i>
33	As ⁻ (³ P)	4p ⁴	0,8	<i>C</i>
34	Se ⁻ (² P)	4p ⁵	2,021	<i>A</i>
35	Br ⁻ (¹ S)	4p ⁶	3,36	<i>A</i>
36	Kr ⁻	—	He существует	<i>a</i>
37	Rb ⁻ (¹ S)	5s ²	0,4859	<i>A</i>
38	Sr ⁻ (² D)	4d5s ²	He существует	<i>b</i>
39	Y ⁻ (¹ D)	4d5s ² 5p	0,31	<i>C</i>
40	Y ⁻ (³ D)	4d5s ² 5p	0,16	<i>D</i>
	Zr ⁻ (⁴ F)	4d ³ 5s ²	0,43	<i>B</i>
41	Nb ⁻ (⁵ D)	4d ⁴ 5s ²	0,89	<i>B</i>
42	Mo ⁻ (⁶ S)	4d ⁵ 5s ²	0,75	<i>B</i>
43	Tc ⁻ (⁶ D)	4d ⁶ 5s ²	0,5	<i>D</i>
44	Ru ⁻ (⁴ F)	4d ⁷ 5s ²	1,1	<i>C</i>
45	Rh ⁻ (³ F)	4d ⁸ 5s ²	1,14	<i>A</i>
46	Pd ⁻ (² D)	4d ⁹ 5s ²	0,56	<i>B</i>
47	Ag ⁻ (¹ S)	4d ¹⁰ 5s ²	1,30	<i>A</i>
48	Cd ⁻	—	He существует	<i>a</i>
49	In ⁻ (³ P)	5p ²	0,3	<i>D</i>
50	Sn ⁻ (⁴ S)	5p ³	1,2	<i>C</i>
51	Sb ⁻ (³ P)	5p ⁴	1,1	<i>C</i>
52	Te ⁻ (² P)	5p ⁵	1,971	<i>A</i>
53	I ⁻ (¹ S)	5p ⁶	3,059	<i>A</i>
54	Xe ⁻	—	He существует	<i>a</i>
55	Cs ⁻ (¹ S)	6s ²	0,4716	<i>A</i>

Атомный номер Z	Отрицательный ион и его терм	Конфигурация валентной электронной оболочки	EA, эВ	Классы точности и надежности
56	$Ba^{-}(^2D)$	$5d6s^2$	He существует	<i>a</i>
57	$La^{-}(^3F)$	$5d^26s^2$	0,5	<i>D</i>
72	$Hf^{-}(^4F)$	$5d^36s^2$	He существует	<i>b</i>
73	$Ta^{-}(^5D)$	$5d^46s^2$	0,32	<i>C</i>
74	$W^{-}(^6S)$	$5d^56s^2$	0,82	<i>A</i>
75	$Re^{-}(^5D)$	$5d^66s^2$	0,1	<i>D</i>
76	$Os^{-}(^4F)$	$5d^76s^2$	1,1	<i>D</i>
77	$Ir^{-}(^3F)$	$5d^86s^2$	1,57	<i>A</i>
78	$Pt^{-}(^2D)$	$5d^96s^2$	2,13	<i>A</i>
79	$Au^{-}(^1S)$	$5d^{10}6s^2$	2,3086	<i>A</i>
80	Hg^{-}	$6s^26p, 6s^27s$	He существует	<i>a</i>
81	$Tl^{-}(^3P)$	$6p^2$	0,3	<i>D</i>
82	$Pb^{-}(^4S)$	$6p^3$	0,37	<i>B</i>
83	$Bi^{-}(^3P)$	$6p^4$	0,95	<i>B</i>
84	$Po^{-}(^2P)$	$6p^5$	1,9	<i>D</i>
85	$At^{-}(^1S)$	$6p^6$	2,8	<i>C</i>

5.3. УРОВНИ ЭНЕРГИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В табл. 5.5 представлены расчетные значения энергии возбуждения $2S$ - и $2P$ -состояний водородоподобных ионов в широком диапазоне изменения заряда ядра ($Z \lesssim 90$), а также значения потенциала ионизации ионов. Эти данные заимствованы из [1, 2], в которых учитывались многие тонкие эффекты квантово-

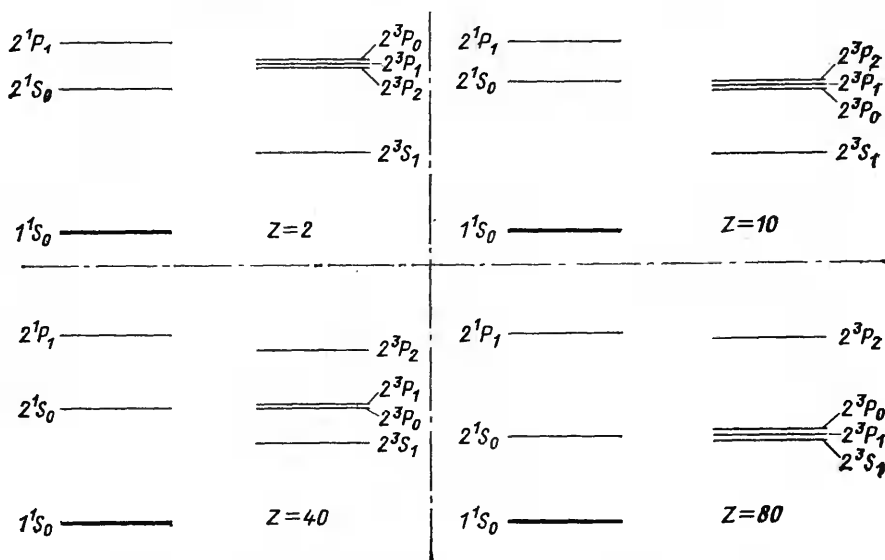


Рис. 5.1. Диаграмма относительного положения низколежащих уровней энергии для изoeлектронного ряда гелия

электродинамической теории одноэлектронных систем. Точность приведенных результатов для энергетических уровней многозарядных ионов пока что существенно превосходит точность их восстановления по наблюдаемому спектру соответствующих переходов в области длин волн $\lambda \lesssim 1$ нм.

Количественная и качественная информация относительно потенциалов ионизации и энергии возбуждения уровней с главным квантовым числом $n=2$ в гелиеподобных ионах ($Z < 100$) представлена в табл. 5.6 и на рис. 5.1. С целью облегчить идентификацию низколежащих уровней энергии и соответствующих длин волн оптических переходов мы привели на рис. 5.1 схематические диаграммы энергетических уровней для некоторых ионов ($Z=2, 10, 40$ и 80) изоэлектронного ряда гелия. Как видно, по мере роста Z вдоль изоэлектронной серии наблюдается изменение взаимного положения некоторых из этих уровней, что обусловлено конкуренцией вкладов в энергию двухэлектронных ионов от межэлектронного взаимодействия, релятивистских эффектов и квантово-электродинамических поправок.

Числовые данные для энергии возбуждения и потенциала ионизации гелиеподобных ионов включены в табл. 5.6. В случае ионов с зарядом ядра $Z \leq 10$ мы воспользовались результатами спектроскопических наблюдений [3—6] и «точных» нерелятивистских вариационных расчетов [7]; для ионов с зарядом ядра $10 < Z < 42$ приведенные значения основываются на результатах теоретических работ [8—11], в которых сделана попытка учесть практически все эффекты, дающие вклад в энергию многозарядных ионов в рамках релятивистского приближения; наконец, в случае $Z > 43$ мы привлекли результаты релятивистских расчетов энергии в [12—14]. Все эти данные находятся в согласии с имеющимися результатами наблюдений спектра излучения гелиеподобных ионов для интервала изменения заряда ядра $10 < Z \leq 30$.

Исходя из оцениваемой погрешности вычислений включенные в табл. 5.5 и 5.6 значения энергии уровней были округлены таким образом, что возможные в дальнейшем уточнения могут изменить лишь последнюю значащую цифру в пределах ± 1 — ± 2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Erickson G. W. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1977, vol. 6, p. 831.
2. Mohr P. J. Energy levels of hydrogen-like atoms predicted by quantum electrodynamics, $10 \leq Z \leq 40$. — At. Data Nucl. Data Tabl., 1983, vol. 29, p. 453—466.
3. Стриганов А. Р., Одинцова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов. Справочник. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. Davis W. A., Marrus R. — Phys. Rev., 1977, vol. A15, p. 1963.
5. Hata J., Grant I. P. — J. Phys., 1981, vol. B14, p. 2111.
6. Stamp M. F., Armour I. A., Peacock N. J., Siever J. D. — J. Phys., 1981, vol. B14, p. 3551.
7. Accad Y., Pekeris C. L., Schiff B. — Phys. Rev., 1971, vol. A4, p. 516; Schiff B., Accad Y., Pekeris C. L. — Phys. Rev., 1973, vol. A8, p. 2272; Frankowski K., Pekeris C. L. — Phys. Rev., 1966, vol. 146, p. 46.
8. Ermolaev A. M. — Phys. Rev., 1973, vol. A8, p. 1651; Ermolaev A. M., Jones M. — J. Phys., 1974, vol. B7, p. 199.
9. Safronova U. I. — Phys. Scripta, 1981, vol. 23, p. 241.
10. Martin W. C. — Phys. Scripta, 1981, vol. 24, p. 725.
11. DeSerio R., Berry H. G., Brooks R. L. et al. — Phys. Rev., 1981, vol. A24, p. 1872.
12. Johnson W. R., Lin C. D. — Phys. Rev., 1976, vol. A14, p. 565.
13. Ivanov L. N., Ivanova E. P., Safronova U. I. — JQSRT, 1975, vol. 15, p. 553.
14. Drake G. W. F. — Phys. Rev., 1979, vol. A19, p. 1387.

Т а б л и ц а 5.5. Низколежащие термы для изoeлектронной серии водорода $H(nl)$
 $n=1,2; 2 \leq Z \leq 94$

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
2	${}^4\text{He II } (1s-{}^2S_{1/2})$ 0,43890888	$2p-{}^2P_{1/2}$	0,3291793
		$2s-{}^2S_{1/2}$	0,3291798
		$2p-{}^2P_{3/2}$	0,3291852
3	${}^7\text{Li III } (1s-{}^2S_{1/2})$ 0,9876610	$2p-{}^2P_{1/2}$	0,7407344
		$2s-{}^2S_{1/2}$	0,7407364
		$2p-{}^2P_{3/2}$	0,7407640
4	${}^9\text{Be IV } (1s-{}^2S_{1/2})$ 1,7560188	$2p-{}^2P_{1/2}$	1,316979
		$2s-{}^2S_{1/2}$	1,316985
		$2p-{}^2P_{3/2}$	1,317073
5	${}^{11}\text{B V } (1s-{}^2S_{1/2})$ 2,744108	$2p-{}^2P_{1/2}$	2,057998
		$2s-{}^2S_{1/2}$	2,058012
		$2p-{}^2P_{3/2}$	2,058227
6	${}^{12}\text{C VI } (1s-{}^2S_{1/2})$ 3,9520615	$2p-{}^2P_{1/2}$	2,963878
		$2s-{}^2S_{1/2}$	2,963904
		$2p-{}^2P_{3/2}$	2,964353
7	${}^{14}\text{N VII } (1s-{}^2S_{1/2})$ 5,380089	$2p-{}^2P_{1/2}$	4,034761
		$2s-{}^2S_{1/2}$	4,034807
		$2p-{}^2P_{3/2}$	4,035642
8	${}^{16}\text{O VIII } (1s-{}^2S_{1/2})$ 7,028394	$2p-{}^2P_{1/2}$	5,270782
		$2s-{}^2S_{1/2}$	5,270855
		$2p-{}^2P_{3/2}$	5,272285
9	${}^{19}\text{F IX } (1s-{}^2S_{1/2})$ 8,897240	$2p-{}^2P_{1/2}$	6,672119
		$2s-{}^2S_{1/2}$	6,672231
		$2p-{}^2P_{3/2}$	6,674527
10	${}^{20}\text{Ne X } (1s-{}^2S_{1/2})$ 10,986873	$2p-{}^2P_{1/2}$	8,238937
		$2s-{}^2S_{1/2}$	8,239100
		$2p-{}^2P_{3/2}$	8,242610
11	${}^{23}\text{Na XI } (1s-{}^2S_{1/2})$ 13,29767	$2p-{}^2P_{1/2}$	9,971493
		$2s-{}^2S_{1/2}$	9,971720
		$2p-{}^2P_{3/2}$	9,976874

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации IP , 10^6 см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения T_K , 10^6 см^{-1}
12	$^{24}\text{Mg XII } (1s-^2S_{1/2})$ 15,82994	$2p-^2P_{1/2}$	11,869985
		$2s-^2S_{1/2}$	11,870294
		$2p-^2P_{3/2}$	11,877612
13	$^{27}\text{Al XIII } (1s-^2S_{1/2})$ 18,58412	$2p-^2P_{1/2}$	13,93472
		$2s-^2S_{1/2}$	13,93513
		$2p-^2P_{3/2}$	13,94524
14	$^{28}\text{Si XIV } (1s-^2S_{1/2})$ 21,56060	$2p-^2P_{1/2}$	16,16596
		$2s-^2S_{1/2}$	16,16649
		$2p-^2P_{3/2}$	16,18011
15	$^{31}\text{P XV } (1s-^2S_{1/2})$ 24,7599	$2p-^2P_{1/2}$	18,56405
		$2s-^2S_{1/2}$	18,56473
		$2p-^2P_{3/2}$	18,58272
16	$^{32}\text{S XVI } (1s-^2S_{1/2})$ 28,1825	$2p-^2P_{1/2}$	21,12930
		$2s-^2S_{1/2}$	21,13015
		$2p-^2P_{3/2}$	21,15349
17	$^{35}\text{Cl XVII } (1s-^2S_{1/2})$ 31,8289	$2p-^2P_{1/2}$	23,86212
		$2s-^2S_{1/2}$	23,86316
		$2p-^2P_{3/2}$	23,89298
18	$^{40}\text{Ar XVIII } (1s-^2S_{1/2})$ 35,6998	$2p-^2P_{1/2}$	26,76290
		$2s-^2S_{1/2}$	26,76417
		$2p-^2P_{3/2}$	26,80174
19	$^{39}\text{K XIX } (1s-^2S_{1/2})$ 39,7956	$2p-^2P_{1/2}$	29,83198
		$2s-^2S_{1/2}$	29,83352
		$2p-^2P_{3/2}$	29,88027
20	$^{40}\text{Ca XX } (1s-^2S_{1/2})$ 44,1172	$2p-^2P_{1/2}$	33,06990
		$2s-^2S_{1/2}$	33,07174
		$2p-^2P_{3/2}$	33,12926
21	$^{45}\text{Sc XXI } (1s-^2S_{1/2})$ 48,6652	$2p-^2P_{1/2}$	36,47716
		$2s-^2S_{1/2}$	36,47934
		$2p-^2P_{3/2}$	36,54940

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
22	$^{48}\text{Ti XXII } (1s-^2S_{1/2})$ 53,4404	$2p-^2P_{1/2}$	40,05419
		$2s-^2S_{1/2}$	40,05675
		$2p-^2P_{3/2}$	40,14133
23	$^{51}\text{V XXIII } (1s-^2S_{1/2})$ 58,443	$2p-^2P_{1/2}$	43,80155
		$2s-^2S_{1/2}$	43,80453
		$2p-^2P_{3/2}$	43,90581
24	$^{52}\text{Cr XXIV } (1s-^2S_{1/2})$ 63,675	$2p-^2P_{1/2}$	47,7198
		$2s-^2S_{1/2}$	47,7232
		$2p-^2P_{3/2}$	47,8436
25	$^{55}\text{Mn XXV } (1s-^2S_{1/2})$ 69,137	$2p-^2P_{1/2}$	51,8095
		$2s-^2S_{1/2}$	51,8135
		$2p-^2P_{3/2}$	51,9555
26	$^{56}\text{Fe XXVI } (1s-^2S_{1/2})$ 74,829	$2p-^2P_{1/2}$	56,0713
		$2s-^2S_{1/2}$	56,0759
		$2p-^2P_{3/2}$	56,2425
27	$^{59}\text{Co XXVII } (1s-^2S_{1/2})$ 80,752	$2p-^2P_{1/2}$	60,5059
		$2s-^2S_{1/2}$	60,5111
		$2p-^2P_{3/2}$	60,7053
28	$^{58}\text{Ni XXVIII } (1s-^2S_{1/2})$ 86,908	$2p-^2P_{1/2}$	65,1139
		$2s-^2S_{1/2}$	65,1198
		$2p-^2P_{3/2}$	65,3449
29	$^{63}\text{Cu XXIX } (1s-^2S_{1/2})$ 93,298	$2p-^2P_{1/2}$	69,8961
		$2s-^2S_{1/2}$	69,9027
		$2p-^2P_{3/2}$	70,1624
30	$^{64}\text{Zn XXX } (1s-^2S_{1/2})$ 99,922	$2p-^2P_{1/2}$	74,8532
		$2s-^2S_{1/2}$	74,8606
		$2p-^2P_{3/2}$	75,1588
31	$^{68}\text{Ga}^{30+} (1s-^2S_{1/2})$ 106,782	$2p-^2P_{1/2}$	79,9860
		$2s-^2S_{1/2}$	79,9943
		$2p-^2P_{3/2}$	80,3351

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
32	$^{74}\text{Ge}^{31+} (1s-^2S_{1/2})$ 113,879	$2p-^2P_{1/2}$	85,2952
		$2s-^2S_{1/2}$	85,3045
		$2p-^2P_{3/2}$	85,6925
33	$^{75}\text{As}^{32+} (1s-^2S_{1/2})$ 121,214	$2p-^2P_{1/2}$	90,7818
		$2s-^2S_{1/2}$	90,7921
		$2p-^2P_{3/2}$	91,2322
34	$^{80}\text{Se}^{33+} (1s-^2S_{1/2})$ 128,79	$2p-^2P_{1/2}$	96,4466
		$2s-^2S_{1/2}$	96,4580
		$2p-^2P_{3/2}$	96,9552
35	$^{79}\text{Br}^{34+} (1s-^2S_{1/2})$ 136,60	$2p-^2P_{1/2}$	102,290
		$2s-^2S_{1/2}$	102,303
		$2p-^2P_{3/2}$	102,863
36	$^{84}\text{Kr}^{35+} (1s-^2S_{1/2})$ 144,66	$2p-^2P_{1/2}$	108,314
		$2s-^2S_{1/2}$	108,328
		$2p-^2P_{3/2}$	108,957
37	$^{85}\text{Rb}^{36+} (1s-^2S_{1/2})$ 152,96	$2p-^2P_{1/2}$	114,520
		$2s-^2S_{1/2}$	114,535
		$2p-^2P_{3/2}$	115,238
38	$^{88}\text{Sr}^{37+} (1s-^2S_{1/2})$ 161,51	$2p-^2P_{1/2}$	120,907
		$2s-^2S_{1/2}$	120,924
		$2p-^2P_{3/2}$	121,708
39	$^{89}\text{Y}^{38+} (1s-^2S_{1/2})$ 170,30	$2p-^2P_{1/2}$	127,477
		$2s-^2S_{1/2}$	127,496
		$2p-^2P_{3/2}$	128,369
40	$^{90}\text{Zr}^{39+} (1s-^2S_{1/2})$ 179,35	$2p-^2P_{1/2}$	134,232
		$2s-^2S_{1/2}$	134,252
		$2p-^2P_{3/2}$	135,222
41	$^{93}\text{Nb}^{40+} (1s-^2S_{1/2})$ 188,64	$2p-^2P_{1/2}$	141,16
		$2s-^2S_{1/2}$	141,19
		$2p-^2P_{3/2}$	142,26

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
42	$^{98}\text{Mo } 41+ (1s-^2S_{1/2})$ 198, 18	$2p-^2P_{1/2}$	148, 29
		$2s-^2S_{1/2}$	148, 32
		$2p-^2P_{3/2}$	149, 50
47	$^{107}\text{Ag } 46+ (1s-^2S_{1/2})$ 249, 74	$2p-^2P_{1/2}$	186, 76
		$2s-^2S_{1/2}$	186, 80
		$2p-^2P_{3/2}$	188, 69
48	$^{114}\text{Cd } 47+ (1s-^2S_{1/2})$ 260, 84	$2p-^2P_{1/2}$	195, 04
		$2s-^2S_{1/2}$	195, 08
		$2p-^2P_{3/2}$	197, 14
49	$^{115}\text{In } 48+ (1s-^2S_{1/2})$ 272, 20	$2p-^2P_{1/2}$	203, 50
		$2s-^2S_{1/2}$	203, 55
		$2p-^2P_{3/2}$	205, 80
50	$^{120}\text{Sn } 49+ (1s-^2S_{1/2})$ 283, 83	$2p-^2P_{1/2}$	212, 17
		$2s-^2S_{1/2}$	212, 22
		$2p-^2P_{3/2}$	214, 67
51	$^{121}\text{Sb } 50+ (1s-^2S_{1/2})$ 295, 7	$2p-^2P_{1/2}$	221, 0
		$2s-^2S_{1/2}$	221, 1
		$2p-^2P_{3/2}$	223, 7
52	$^{130}\text{Te } 51+ (1s-^2S_{1/2})$ 307, 9	$2p-^2P_{1/2}$	230, 1
		$2s-^2S_{1/2}$	230, 2
		$2p-^2P_{3/2}$	233, 1
53	$^{127}\text{I } 52+ (1s-^2S_{1/2})$ 320, 4	$2p-^2P_{1/2}$	239, 4
		$2s-^2S_{1/2}$	239, 4
		$2p-^2P_{3/2}$	242, 6
54	$^{132}\text{Xe } 53+ (1s-^2S_{1/2})$ 333, 1	$2p-^2P_{1/2}$	248, 9
		$2s-^2S_{1/2}$	248, 9
		$2p-^2P_{3/2}$	252, 3
55	$^{133}\text{Cs } 54+ (1s-^2S_{1/2})$ 346, 1	$2p-^2P_{1/2}$	258, 5
		$2s-^2S_{1/2}$	258, 6
		$2p-^2P_{3/2}$	262, 3

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
56	$^{138}\text{Ba}^{55+} (1s-^2S_{1/2})$ 359,4	$2p-^2P_{1/2}$	268,4
		$2s-^2S_{1/2}$	268,5
		$2p-^2P_{3/2}$	272,4
72	$^{180}\text{Hf}^{71+} (1s-^2S_{1/2})$ 613,7	$2p-^2P_{1/2}$	457,0
		$2s-^2S_{1/2}$	457,2
		$2p-^2P_{3/2}$	469,0
73	$^{181}\text{Ta}^{72+} (1s-^2S_{1/2})$ 632,4	$2p-^2P_{1/2}$	470,9
		$2s-^2S_{1/2}$	471,0
		$2p-^2P_{3/2}$	483,5
74	$^{184}\text{W}^{73+} (1s-^2S_{1/2})$ 651,4	$2p-^2P_{1/2}$	484,9
		$2s-^2S_{1/2}$	485,1
		$2p-^2P_{3/2}$	498,3
75	$^{187}\text{Re}^{74+} (1s-^2S_{1/2})$ 670,8	$2p-^2P_{1/2}$	499,2
		$2s-^2S_{1/2}$	499,4
		$2p-^2P_{3/2}$	513,5
76	$^{192}\text{Os}^{75+} (1s-^2S_{1/2})$ 691	$2p-^2P_{1/2}$	514
		$2s-^2S_{1/2}$	514
		$2p-^2P_{3/2}$	529
77	$^{193}\text{Ir}^{76+} (1s-^2S_{1/2})$ 711	$2p-^2P_{1/2}$	529
		$2s-^2S_{1/2}$	529
		$2p-^2P_{3/2}$	545
78	$^{195}\text{Pt}^{77+} (1s-^2S_{1/2})$ 731	$2p-^2P_{1/2}$	544
		$2s-^2S_{1/2}$	544
		$2p-^2P_{3/2}$	561
79	$^{197}\text{Au}^{78+} (1s-^2S_{1/2})$ 752	$2p-^2P_{1/2}$	559
		$2s-^2S_{1/2}$	560
		$2p-^2P_{3/2}$	577
80	$^{202}\text{Hg}^{79+} (1s-^2S_{1/2})$ 774	$2p-^2P_{1/2}$	575
		$2s-^2S_{1/2}$	575
		$2p-^2P_{3/2}$	594

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения $T_{K'}', 10^6 \text{ см}^{-1}$
81	$^{205}\text{Tl}^{80+} (1s-^2S_{1/2})$ 795	$2p-^2P_{1/2}$	591
		$2s-^2S_{1/2}$	591
		$2p-^2P_{3/2}$	611
82	$^{208}\text{Pb}^{81+} (1s-^2S_{1/2})$ 818	$2p-^2P_{1/2}$	607
		$2s-^2S_{1/2}$	608
		$2p-^2P_{3/2}$	629
83	$^{209}\text{Bi}^{82+} (1s-^2S_{1/2})$ 840	$2p-^2P_{1/2}$	624
		$2s-^2S_{1/2}$	624
		$2p-^2P_{3/2}$	647
90	$^{232}\text{Th}^{89+} (1s-^2S_{1/2})$ 1011	$2p-^2P_{1/2}$	749
		$2s-^2S_{1/2}$	750
		$2p-^2P_{3/2}$	783
92	$^{238}\text{U}^{91+} (1s-^2S_{1/2})$ 1064	$2p-^2P_{1/2}$	788
		$2s-^2S_{1/2}$	789
		$2p-^2P_{3/2}$	825
94	$^{244}\text{Pu}^{93+} (1s-^2S_{1/2})$ 1120	$2p-^2P_{1/2}$	829
		$2s-^2S_{1/2}$	830
		$2p-^2P_{3/2}$	870

Т а б л и ц а 5.6. Низколежащие термы для изоэлектронной серии гелия He (n, l):
 $n=1,2; 2 \leq Z \leq 100$

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения $T_{K'}', 10^6 \text{ см}^{-1}$
2	He I ($1s^2-^1S_0$) 0,1983108	$1s2s-^3S_1$	0,1598561
		1S_0	0,1662775
		$1s2p-^3P_2$	0,1690869
		3P_1	0,1690869
		3P_0	0,1690871
		1P_1	0,1711350
3	Li II ($1s^2-^1S_0$) 0,610078	$1s2s-^3S_1$	0,476035
		1S_0	0,491375
		$1s2p-^3P_1$	0,494260
		3P_2	0,494262
		3P_0	0,494265
		1P_1	0,501811

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения $T_K, 10^6 \text{ см}^{-1}$
4	Be III ($1s^2-^1S_0$) 1,241250	$1s2s-^3S_1$ 1S_0 $1s2p-^3P_1$ 3P_0 3P_2 1P_1	0,956515 0,981178 0,983368 0,983380 0,983383 0,997454
5	B IV ($1s^2-^1S_0$) 2,092001	$1s2s-^3S_1$ 1S_0 $1s2p-^3P_1$ 3P_0 3P_2 1P_1	1,60116 1,63572 1,63654 1,63655 1,63659 1,65798
6	C V ($1s^2-^1S_0$) 3,16240	$1s2s-^3S_1$ 1S_0 $1s2p-^3P_1$ 3P_0 3P_2 1P_1	2,41127 2,45501 2,45516 2,45517 2,45529 2,48337
7	N VI ($1s^2-^1S_0$) 4,45275	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	3,38589 3,43830 3,43832 3,43861 3,43930 3,47379
8	O VII ($1s^2-^1S_0$) 5,96311	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	4,52464 4,58562 4,58568 4,58624 4,58850 4,62920
9	F VIII ($1s^2-^1S_0$) 7,69381	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	5,83031 5,89990 5,90005 5,90101 5,90290 5,94990
10	Ne IX ($1s^2-^1S_0$) 9,64500	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	7,30205 7,38032 7,38062 7,38217 7,38260 7,43660
11	Na X ($1s^2-^1S_0$) 11,8170	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	8,9353 9,0223 9,0229 9,0252 9,0280 9,0887

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации IP , 10^6 см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения T_K , 10^6 см^{-1}
12	Mg XI ($1s^2-^1S_0$) 14,2101	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	10,7364 10,8325 10,8331 10,8366 10,8390 10,9069
13	Al XII ($1s^2-^1S_0$) 16,8247	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	12,7035 12,8082 12,8095 12,8146 12,8161 12,8915
14	Si XIII ($1s^2-^1S_0$) 19,6612	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 3P_2 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^1P_1$	14,8367 14,9505 14,9523 14,9594 14,9595 15,0428
15	P XIV ($1s^2-^1S_0$) 22,720	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^3P_2$ 1P_1	17,136 17,259 17,261 17,269 17,271 17,360
16	S XV ($1s^2-^1S_0$) 26,002	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^3P_2$ 1P_1	19,602 19,734 19,738 19,746 19,751 19,846
17	Cl XVI ($1s^2-^1S_0$) 29,507	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^3P_2$ 1P_1	22,235 22,377 22,382 22,390 22,398 22,500
18	Ar XVII ($1s^2-^1S_0$) 33,235	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^3P_2$ 1P_1	25,036 25,187 25,193 25,201 25,215 25,322
19	K XVIII ($1s^2-^1S_0$) 37,189	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ 3P_1 $1s2s-^1S_0$ $1s2p-^3P_2$ 1P_1	28,005 28,166 28,173 28,181 28,201 28,313

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $I_P, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K' 10^6 см^{-1}
20	Ca XIX ($1s^2-1S_0$) 41,367	$1s2s-^3S_1$	31,145
		$1s2p-^3P_0$	31,316
		3P_1	31,324
		$1s2s-^1S_0$	31,331
		$1s2p-^3P_2$	31,359
		1P_1	31,477
21	Sc XX ($1s^2-1S_0$) 45,77	$1s2s-^3S_1$	34,45
		$1s2p-^3P_0$	34,63
		3P_1	34,64
		$1s2s-^1S_0$	34,65
		$1s2p-^3P_2$	34,68
		1P_1	34,81
22	Ti XXI ($1s^2-1S_0$) 50,40	$1s2s-^3S_1$	37,93
		$1s2p-^3P_0$	38,12
		3P_1	38,13
		$1s2s-^1S_0$	38,14
		$1s2p-^3P_2$	38,18
		1P_1	38,31
23	V XXII ($1s^2-1S_0$) 55,26	$1s2s-^3S_1$	41,57
		$1s2p-^3P_0$	41,77
		3P_1	41,78
		$1s2s-^1S_0$	41,79
		$1s2p-^3P_2$	41,85
		1P_1	41,98
24	Cr XXIII ($1s^2-1S_0$) 60,35	$1s2s-^3S_1$	45,38
		$1s2p-^3P_0$	45,60
		3P_1	45,61
		$1s2s-^1S_0$	45,61
		$1s2p-^3P_2$	45,69
		1P_1	45,83
25	Mn XXIV ($1s^2-1S_0$) 65,66	$1s2s-^3S_1$	49,37
		$1s2p-^3P_0$	49,59
		3P_1	49,61
		$1s2s-^1S_0$	49,61
		$1s2p-^3P_2$	49,71
		1P_1	49,85
26	Fe XXV ($1s^2-1S_0$) 71,20	$1s2s-^3S_1$	53,53
		$1s2p-^3P_0$	53,76
		3P_1	53,78
		$1s2s-^1S_0$	53,78
		$1s2p-^3P_2$	53,90
		1P_1	54,04
27	Co XXVI ($1s^2-1S_0$) 76,98	$1s2s-^3S_1$	57,86
		$1s2p-^3P_0$	58,10
		3P_1	58,12
		$1s2s-^1S_0$	58,12
		$1s2p-^3P_2$	58,26
		1P_1	58,41

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации IP , 10^6 см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения $T_{\text{в}}$, 10^6 см^{-1}
28	Ni XXVII ($1s^2-1S_0$) 82,99	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	62,36 62,62 62,64 62,64 62,80 62,95
29	Cu XXVIII ($1s^2-1S_0$) 89,22	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	67,04 67,30 67,33 67,33 67,52 67,67
30	Zn XXIX ($1s^2-1S_0$) 95,70	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	71,90 72,16 72,20 72,20 72,41 72,58
31	Ga XXX ($1s^2-1S_0$) 102,4	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	76,9 77,2 77,2 77,2 77,5 77,7
32	Ge $^{30+}$ ($1s^2-1S_0$) 109,3	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	82,1 82,4 82,4 82,4 82,7 82,9
33	As $^{31+}$ ($1s^2-1S_0$) 116,5	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	87,5 87,8 87,8 87,8 88,2 88,3
34	Se $^{32+}$ ($1s^2-1S_0$) 123,9	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	93,0 93,4 93,4 93,4 93,8 94,0
35	Br $^{33+}$ ($1s^2-1S_0$) 131,6	$1s2s-^3S_1$ $1s2p-^3P_0$ $1s2s-1S_0$ $1s2p-^3P_1$ 3P_2 1P_1	98,8 99,1 99,1 99,1 99,6 99,8

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), потенциал ионизации IP , 10^6 см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения T_K' , 10^6 см^{-1}
36	$Kr^{34+} (1s^2-1S_0)$ 139,5	$1s2s-^3S_1$	104,7
		$1s2p-^3P_0$	105,0
		$1s2s-^1S_0$	105,1
		$1s2p-^3P_1$	105,1
		3P_2	105,6
		1P_1	105,8
37	$Rb^{35+} (1s^2-1S_0)$ 147,6	$1s2s-^3S_1$	110,7
		$1s2p-^3P_0$	111,1
		$1s2s-^1S_0$	111,1
		$1s2p-^3P_1$	111,1
		3P_2	111,7
		1P_1	111,9
38	$Sr^{36+} (1s^2-1S_0)$ 156,0	$1s2s-^3S_1$	117,0
		$1s2p-^3P_0$	117,4
		$1s2s-^1S_0$	117,5
		$1s2p-^3P_1$	117,5
		3P_2	118,1
		1P_1	118,3
39	$Y^{37+} (1s^2-1S_0)$ 164,7	$1s2s-^3S_1$	123,5
		$1s2p-^3P_0$	123,9
		$1s2s-^1S_0$	124,0
		$1s2p-^3P_1$	124,0
		3P_2	124,7
		1P_1	124,9
40	$Zr^{38+} (1s^2-1S_0)$ 173,5	$1s2s-^3S_1$	130,1
		$1s2p-^3P_0$	130,6
		$1s2s-^1S_0$	130,6
		$1s2p-^3P_1$	130,6
		3P_2	131,4
		1P_1	131,6
41	$Nb^{39+} (1s^2-1S_0)$ 182,6	$1s2s-^3S_1$	136,9
		$1s2p-^3P_0$	137,3
		$1s2s-^1S_0$	137,3
		$1s2p-^3P_1$	137,4
		3P_2	138,3
		1P_1	138,5
42	$Mo^{40+} (1s^2-1S_0)$ 192,0	$1s2s-^3S_1$	144,0
		$1s2p-^3P_0$	144,4
		$1s2s-^1S_0$	144,4
		$1s2p-^3P_1$	144,4
		3P_2	145,5
		1P_1	145,6
50	$Sn^{48+} (1s^2-1S_0)$ 276,9	$1s2s-^3S_1$	207,1
		$1s2p-^3P_1$	207,7
		$1s2s-^1S_0$	207,7
		$1s2p-^3P_0$	207,7
		3P_2	209,9
		1P_1	210,2

Атомный номер Z	Ион (терм основного состоя- ния), потенциал ионизации $IP, 10^6 \text{ см}^{-1}$	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения T_K , 10^6 см^{-1}
60	Nd $^{68+}$ ($1s^2-1S_0$) 407,1	$1s2s-^3S_1$	303,8
		$1s2p-^3P_1$	304,6
		$1s2s-^1S_0$	304,7
		$1s2p-^3P_0$	304,8
		3P_2	309,6
		1P_1	309,9
70	Yb $^{68+}$ ($1s^2-1S_0$) 567,5	$1s2s-^3S_1$	422,6
		$1s2p-^3P_1$	423,6
		$1s2s-^1S_0$	423,7
		$1s2p-^3P_0$	423,8
		3P_2	433,4
		1P_1	433,8
80	Hg $^{78+}$ ($1s^2-1S_0$) 762	$1s2s-^3S_1$	566
		$1s2p-^3P_1$	567
		$1s2s-^1S_0$	567
		$1s2p-^3P_0$	568
		3P_2	585
		1P_1	586
90	Th $^{88+}$ ($1s^2-1S_0$) 998	$1s2s-^3S_1$	739
		$1s2p-^3P_1$	740
		$1s2s-^1S_0$	741
		$1s2p-^3P_0$	741
		3P_2	772
		1P_1	773
100	Fm $^{88+}$ ($1s^2-1S_0$) 1285	$1s2s-^3S_1$	948
		$1s2p-^3P_1$	950
		$1s2s-^1S_0$	950
		$1s2p-^3P_0$	951
		3P_2	1003
		1P_1	1004

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТОМОВ

6.1. НИЗКОЛЕЖАЩИЕ ТЕРМЫ АТОМОВ

В табл. 6.1 представлены значения энергии возбуждения T низколежащих состояний нейтральных атомов. Эти состояния характеризуют, как правило, несколько первых термов основных электронных конфигураций для данной частицы. Уровни энергии восстанавливались в результате обработки спектров оптических переходов между различными состояниями частиц. Они расположены в порядке возрастания энергии от уровня основного состояния атома ($T_0=0$); дается также классификация соответствующего электронного терма и электронной конфигурации возбужденных валентных электронов. В отдельной колонке приведено значение оптического предела (потенциала ионизации) для серии переходов, сходящейся к уровню основного состояния однократно ионизованного атома.

В случае, когда расстояние между отдельными уровнями энергии T_J, T_J, \dots данного мультиплетного терма невелико, в табл. 6.1 дается значение «центра тяжести» мультиплета \bar{T} , характеризующегося равенством $\bar{T} = \Sigma g_i T_i / \Sigma g_i$, где $g_i = 2J + 1$ — статистический вес уровня; J — квантовое число полного момента электронов; T_i — компонента мультиплета.

Основная информация об уровнях энергии атомов содержится в монографиях и отдельных выпусках Национального бюро стандартов США [1—4] и продолжающемся сериальном издании [5]; мы использовали также многочисленные публикации по отдельным элементам последнего десятилетия (см. библиографию в [6—10]). Исходя из погрешности восстановления уровней энергии атомов приведенные значения термов T округлялись таким образом, чтобы возможные уточнения могли затронуть лишь последнюю значащую цифру в пределах ± 1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore C. E. Atomic Energy Levels. — NBS Circular 467. — Washington: US Government Printing Office: Vol. 1, 1949; Vol. 2, 1952; Vol. 3, 1958.
2. Martin W.C., Zalubas R., Hagan L. Atomic Energy Levels. — The Rare Earth Elements. — NSRDS-NBS. Vol. 60. — Washington: US Government Printing Office, 1978.
3. Moore C. E. Selected Tables of Atomic Spectra. — NSRDS-NBS Vol. 3, Sections 2, 3, 5, 6, 7. — Washington: US Government Printing Office, 1967—1976.
4. Martin W. C., Zalubas R. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1983, vol. 12, p. 323 (см. также ссылки на работы по другим элементам из периодов для Na и K).
5. Bashkin S., Stoner J. Jr. Atomic Energy Levels and Grotrian Diagrams: Vol. 1 (Hf—P XV), 1975; Addenda to vol. 1, 1978; Vol. 2 (Si—Ti XXII), 1978; Vol. 3, (VI—Cr XXIV), 1981; Vol. 4 (Mn—XV), 1982. — Amsterdam, North-Holland.
6. Edlén B. Term Analysis of Atomic Spectra. — In: Beam-Foil Spectroscopy Vol. 1/Ed. by I. Sellin, C. Pegg. — N. Y.: Plenum, 1976, p. 1—9.
7. Blaise J., Wyart J. F., Conway J. G., Worden E. F. — Phys. Scripta, 1980, vol. 2, p. 224 (в работе имеются ссылки на исследования спектров радиоактивных элементов)
8. Hagan L., Martin W. C. Bibliography on Atomic Energy Levels and Spectra, July 1968 through June 1971. — NBS Spec. Publ. 363. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, June 1972; Hagan L. Bibliography on Atomic Energy Levels and Spectra, July 1971 through June 1975. — NBS Spec. Publ. 363, Suppl. I. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, Jan. 1977; Zalubas R., Albright A. Bibliography on Atomic Energy Levels and Spectra, July 1975 through June 1979. — NBS Spec. Publ. 363, Suppl. 2. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, Oct. 1980.
9. Стриганов А. Р. Успехи в исследовании спектров атомов и ионов и степень их изучения в настоящее время. — Успехи физ. наук, 1983, т. 139, с. 719.
10. Fawcett B. C. — Phys. Scripta, 1981, vol. 24, p. 663; Fawcett B. C. — J. Opt. Soc. Am., 1984, vol. B1, p. 195.

Т а б л и ц а 6.1. Низколежащие электронные термы атомов

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
1	^1H ($1s \rightarrow ^2S_{1/2}$) 109678,77	$2p$ ($^2P_{1/2}^\circ$)	82 258,921
		$2s$ ($^2S_{1/2}$)	82 258,956
		$2p$ ($^2P_{3/2}^\circ$)	82 259,286
		$3p$ ($^2P_{1/2}^\circ$)	974 92,213
		$3s$ ($^2S_{1/2}$)	974 92,223
		$3p$ ($^2P_{3/2}^\circ$), $3d$ ($^2D_{3/2}$)	974 92,321
		$3d$ ($^2D_{5/2}$)	974 92,357
2	^1He ($1s^2 \rightarrow ^1S_0$) 198 310,77	$2s$ (3S_1)	159 856,08
		$2s$ (1S_0)	166 277,54
		$2p$ ($^3P_2^\circ$)	169 086,87
		$2p$ ($^3P_1^\circ$)	169 086,95
		$2p$ ($^3P_0^\circ$)	169 087,93
		$2p$ ($^1P_1^\circ$)	171 135,00
		$3s$ (3S_1)	183 236,89
		$3s$ (1S_0)	184 864,93
		$3p$ ($^3P_2^\circ$)	185 564,65
		$3p$ ($^3P_1^\circ$)	185 564,68
		$3p$ ($^3P_0^\circ$)	185 564,95
		$3d$ (3D_3)	186 101,65
		$3d$ (3D_2)	186 101,65
		$3d$ (3D_1)	186 101,70
		$3d$ (1D_2)	186 105,07
3	^1Li ($2s \rightarrow ^2S_{1/2}$) 43 487,15	$3p$ ($^1P_1^\circ$)	186 209,47
		$2p$ ($^2P_{1/2}^\circ$)	14 903,7
		$2p$ ($^2P_{3/2}^\circ$)	14 904,0
		$3s$ ($^2S_{1/2}$)	27 206,1
		$3p$ ($^2P_{1/2}^\circ, 3/2$)	30 925,4
		$3d$ ($^2D_{3/2}$)	31 283,1
		$3d$ ($^2D_{5/2}$)	31 283,1
		$4s$ ($^2S_{1/2}$)	35 012,1

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
4	Be ($2s^2-^1S_0$) 75 192,5	$4p (^2P_{1/2, 3/2}^\circ)$	36 469,6
		$4d (^2D_{3/2, 5/2})$	36 623,4
		$4f (^2F_{5/2, 7/2}^\circ)$	36 630,2
		$2p (^3P_0^\circ)$	21 978,3
		$2p (^3P_1^\circ)$	21 978,9
		$2p (^3P_2^\circ)$	21 981,3
		$2p (^1P_1^\circ)$	42 565,4
		$3s (^3S_1)$	52 080,9
		$3s (^1S_0)$	54 677,3
		$2p^2 (^1D_2)$	56 882,4
		$3p (^3P_{0,1}^\circ)$	58 907,4
		$3p (^3P_2^\circ)$	58 907,8
		$2p^2 (^3P_0)$	59 693,6
		$2p^2 (^3P_1)$	59 695,1
		$2p^2 (^3P_2)$	59 697,1
5	B ($2p-^2P_{1/2}^\circ$) 66 928,1	$3p (^1P_1^\circ)$	60 187,3
		$2p (^2P_{3/2}^\circ)$	15,26
		$2s2p^2 (^4P_{1/2})$	28 870
		$2s2p^2 (^4P_{3/2})$	28 875
		$2s2p^2 (^4P_{5/2})$	28 881
		$3s (^2S_{1/2})$	40 039,65
		$2s2p^2 (^2D_{3/2, 5/2})$	47 857,12
		$3p (^2P_{1/2, 3/2}^\circ)$	48 613,01
		$3d (^2D_{3/2, 5/2})$	54 767,74
		$4s (^2S_{1/2})$	55 010,18
6	C ($2p^2-^3P_0$) 90 820,4	$4p (^2P_{1/2, 3/2}^\circ)$	57 786,80
		$2p^2 (^3P_1)$	16,4
		$2p^2 (^3P_2)$	43,4
		$2p^2 (^1D_2)$	10 192,6
		$2p^2 (^1S_0)$	21 648,0
		$2s2p^2 (^5S_2^\circ)$	33 735,2
		$2p3s (^3P_0^\circ)$	60 333,4

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
7	$\text{N}(2p^3 \rightarrow {}^4S_{3/2}^\circ)$ 117 225,7	$2p3s({}^3P_1^\circ)$	60 352,6
		$2p3s({}^3P_2^\circ)$	60 393,1
		$2p3s({}^1P_1^\circ)$	61 981,8
		$2s2p^3({}^3D_3^\circ)$	64 086,9
		$2s2p^3({}^3D_1^\circ)$	64 089,8
		$2s2p^3({}^3D_2^\circ)$	64 090,9
		$2p({}^2P_{5/2}^\circ)$	19 224,46
		$2p({}^2D_{3/2}^\circ)$	19 233,18
		$2p({}^2P_{1/2}^\circ)$	28 838,92
		$2p({}^2P_{3/2}^\circ)$	28 839,31
		$3s({}^4P_{1/2})$	83 284,07
		$3s({}^4P_{3/2})$	83 317,83
		$3s({}^4P_{5/2})$	83 364,62
		$3s({}^2P_{1/2})$	86 137,35
		$3s({}^2P_{3/2})$	86 220,51
		$2s2p^4({}^4P_{5/2})$	88 107,26
		$2s2p^4({}^4P_{3/2})$	88 151,17
		$2s2p^4({}^4P_{1/2})$	88 170,57
8	$\text{O}(2p^4 \rightarrow {}^3P_2)$ 109 837,0	$2p({}^3P_1)$	158,26
		$2p({}^3P_0)$	226,98
		$2p({}^1D_2)$	15 867,86
		$2p({}^1S_0)$	33 792,58
		$3s({}^5S_2^\circ)$	73 768,20
		$3s({}^3S_1^\circ)$	76 794,98
		$3p({}^5P_1)$	86 625,76
		$3p({}^5P_2)$	86 627,78
		$3p({}^5P_3)$	86 631,45
		$3p({}^3P_1)$	88 630,59
		$3p({}^3P_2)$	88 631,15
		$3p({}^3P_0)$	88 631,30
		$4s({}^5S_2^\circ)$	95 476,73
		$4s({}^3S_1^\circ)$	96 225,05

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
9	$F (2p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$ 140 524,5	$2p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	404,1
		$3s ({}^4P_{5/2})$	102 405,7
		$3s ({}^4P_{3/2})$	102 680,4
		$3s ({}^4P_{1/2})$	102 840,4
		$3s ({}^2P_{3/2})$	104 731,0
		$3s ({}^2P_{1/2})$	105 056,3
		$3p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	115 917,9
		$3p ({}^4P_{3/2}^\circ)$	116 040,9
		$3p ({}^4P_{1/2}^\circ)$	116 143,6
		$3p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	116 987,4
		$3p ({}^4D_{5/2}^\circ)$	117 164,0
		$3p ({}^4D_{3/2}^\circ)$	117 308,6
		$3p ({}^4D_{1/2}^\circ)$	117 392,0
		$3p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	117 622,9
		$3p ({}^2D_{3/2}^\circ)$	117 872,9
		$3p ({}^2S_{1/2}^\circ)$	118 405,3
		$3p ({}^4S_{3/2}^\circ)$	118 427,8
		$3p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	118 936,8
		$3p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	119 081,8
10	$Ne (2p^6 - {}^1S_0)$ 173 929,7	$2p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 3s [3/2]_2^\circ$	134 041,84
		$3s [3/2]_1^\circ$	134 459,29
		$2p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 3s' [1/2]_0^\circ$	134 818,64
		$3s' [1/2]_1^\circ$	135 888,72
		$3p [1/2]_1$	148 257,79
		$3p [5/2]_3$	149 657,04
		$3p [5/2]_2$	149 824,22
		$3p [3/2]_1$	150 121,59
		$3p [3/2]_2$	150 315,86
		$3p' [3/2]_1$	150 772,11
		$3p' [3/2]_2$	150 858,51
		$3p [1/2]_0$	150 917,43
		$3p' [1/2]_1$	151 038,45
		$3p' [1/2]_0$	152 970,73

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
11	Na ($3s-^2S_{1/2}$) 41 449,4	$3p (^2P_{1/2}^\circ)$	16 956,17
		$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	16 973,37
		$4s (^2S_{1/2})$	25 739,99
		$3d (^2D_{5/2})$	29 172,84
		$3d (^2D_{3/2})$	29 172,89
		$4p (^2P_{1/2}^\circ)$	30 266,99
		$4p (^2P_{3/2}^\circ)$	30 272,58
		$5s (^2S_{1/2})$	33 200,68
		$4d (^2D_{5/2})$	34 548,73
		$4d (^2D_{3/2})$	34 548,77
		$4f (^2F_{5/2}, 7/2)$	34 586,92
12	Mg ($3s^2-^1S_0$) 61 671,0	$3p (^3P_0^\circ)$	21 850,41
		$3p (^3P_1^\circ)$	21 870,46
		$3p (^3P_2^\circ)$	21 911,18
		$3p (^1P_1^\circ)$	35 051,26
		$4s (^3S_1)$	41 197,40
		$4s (^1S_0)$	43 503,33
		$3d (^1D_2)$	46 403,06
		$4p (^3P_0^\circ)$	47 841,12
		$4p (^3P_1^\circ)$	47 844,41
		$4p (^3P_2^\circ)$	47 851,16
		$3d (^3D_2)$	47 957,03
		$3d (^3D_3)$	47 957,04
		$3d (^3D_1)$	47 957,06
		$4p (^1P_1^\circ)$	49 346,73
			112,06
13	Al ($3p-^3P_{1/2}^\circ$) 48 278,4	$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	25 347,76
		$4s (^2S_{1/2})$	29 020,4
		$s3p^2 (^4P_{1/2})$	29 067,0
		$3s3p^2 (^4P_{3/2})$	29 142,8
		$3s3p^2 (^4P_{5/2})$	

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
14	Si ($3p^2 \rightarrow {}^3P_0$) 65 747,8	$3d ({}^2D_{3/2})$	32 435,43
		$3d ({}^2D_{5/2})$	32 436,78
		$4p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	32 949,80
		$4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	32 965,64
		$5s ({}^2S_{1/2})$	37 689,41
		$3p^2 ({}^3P_1)$	77,12
		$3p^2 ({}^3P_2)$	223,16
		$3p^2 ({}^1D_2)$	6 298,85
		$3p^2 ({}^1S_0)$	15 394,37
		$3s3p^3 ({}^5S_2^\circ)$	33 326,05
		$4s ({}^3P_0^\circ)$	39 683,16
		$4s ({}^3P_1^\circ)$	39 760,28
		$4s ({}^3P_2^\circ)$	39 955,05
		$4s ({}^1P_1^\circ)$	40 991,88
		$3s3p^3 ({}^3D_1^\circ)$	45 276,19
		$3s3p^3 ({}^3D_2^\circ)$	45 293,63
		$3s3p^3 ({}^3D_3^\circ)$	45 321,85
		$4p ({}^1P_1)$	47 284,06
		$3d ({}^1D_2^\circ)$	47 351,55
		$4p ({}^3D_1)$	48 020,07
		$4p ({}^3D_2)$	48 102,32
		$4p ({}^3D_3)$	48 264,29
		$4p ({}^3P_0)$	49 028,29
		$4p ({}^3P_1)$	49 060,60
		$4p ({}^3P_2)$	49 188,62
		$4p ({}^3S_1)$	49 399,67
15	P ($3p^3 \rightarrow {}^4S_{3/2}^\circ$) 84 580,8	$3p^3 ({}^2D_{3/2}^\circ)$	11 361,0
		$3p^3 ({}^2D_{5/2}^\circ)$	11 376,6
		$3p^3 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	18 722,7
		$3p^3 ({}^2P_{3/2}^\circ)$	18 748,0
		$4s ({}^4P_{1/2})$	55 939,42
		$4s ({}^4P_{3/2})$	56 090,63

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
16	S ($3p^4$ — 3P_2) 83 559	$4s (^4P_{5/2})$	56 339,66
		$4s (^2P_{1/2})$	57 876,57
		$4s (^2P_{3/2})$	58 174,37
		$3s3p^4 (^4P_{5/2})$	59 534,55
		$3s3p^4 (^4P_{3/2})$	59 715,92
		$3s3p^4 (^4P_{1/2})$	59 820,37
		$4p (^2S_{1/2}^\circ)$	64 239,59
		$3p^2 (^1D) 4s (^2D_{3/2})$	65 156,24
		$4s (^2D_{5/2})$	65 157,13
		$4p (^4D_{1/2}^\circ)$	65 373,56
		$4p (^4D_{3/2})$	65 450,13
		$4p (^4D_{5/2}^\circ)$	65 585,13
		$4p (^4D_{7/2}^\circ)$	65 788,46
		$4p (^4P_{1/2}^\circ)$	66 343,44
		$4p (^4P_{3/2})$	66 360,28
		$4p (^4P_{5/2}^\circ)$	66 544,24
		$4p (^2D_{3/2}^\circ)$	66 813,27
		$4p (^4S_{3/2}^\circ)$	66 834,65
		$4p (^2D_{5/2}^\circ)$	67 113,87
		$3p^3 (^4S^\circ) 3p (^3P_1)$	396,05
		$3p (^3P_0)$	573,64
		$3p (^1D_2)$	9 238,61
		$3p (^1S_0)$	22 179,95
		$4s (^5S_2^\circ)$	52 623,64
		$4s (^3S_1^\circ)$	55 330,81
		$4p (^5P_1)$	63 446,4
		$4p (^5P_2)$	63 457,3
		$4p (^5P_3)$	63 475,3
		$4p (^3P_1)$	64 889,2
		$4p (^3P_0)$	64 891,7
		$4p (^3P_2)$	64 892,9
		$3p^3 (^2D^\circ) 4s' (^3D_1^\circ)$	67 816,35

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
17	Cl ($3p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ$) 104 591	$4s' ({}^3D_2^\circ)$	67 825,19
		$4s' ({}^3D_3^\circ)$	67 842,87
		$3d ({}^5D_4^\circ)$	67 878,0
		$3d ({}^5D_0^\circ)$	67 884,7
		$3d ({}^5D_1^\circ)$	67 885,53
		$3d ({}^5D_2^\circ)$	67 887,80
		$3d ({}^5D_3^\circ)$	67 890,02
		$3p^4 ({}^3P) 3p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	882,35
		$4s ({}^4P_{5/2})$	71 958,36
		$4s ({}^4P_{3/2})$	72 488,57
		$4s ({}^4P_{1/2})$	72 827,04
		$4s ({}^2P_{3/2})$	74 225,85
		$4s ({}^2P_{1/2})$	74 865,67
		$4p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	82 918,89
		$4p ({}^4P_{3/2}^\circ)$	83 130,90
		$4p ({}^4P_{1/2}^\circ)$	83 364,93
		$4p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	83 894,04
		$3p^4 ({}^1D) 4s' ({}^2D_{5/2})$	84 120,26
		$4s' ({}^2D_{3/2})$	84 121,87
		$4p ({}^4D_{5/2}^\circ)$	84 132,26
		$4p ({}^4D_{3/2}^\circ)$	84 485,31
		$4p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	84 648,10
		$4p ({}^4D_{1/2}^\circ)$	84 688,64
		$4p ({}^2D_{3/2}^\circ)$	84 988,48
		$4p ({}^2S_{1/2}^\circ)$	85 244,33
		$4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	85 442,43
		$3s3p^6 ({}^2S_{1/2})$	85 678,9
		$4p ({}^4S_{3/2}^\circ)$	85 735,09

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
18	Ar ($3p^6—^1S_0$) 127 109,8	$4p (^2S_{1/2}^\circ)$	85 917,94
		$3p^5 (^2P_{3/2}^\circ) 4s [3/2]_2^\circ$	93 143,76
		$4s [3/2]_1^\circ$	93 750,60
		$3p^5 (^2P_{1/2}^\circ) 4s' [1/2]_0^\circ$	94 553,67
		$4s' [1/2]_1^\circ$	95 399,83
		$4p [1/2]_1$	104 102,10
		$4p [5/2]_3$	105 462,76
		$4p [5/2]_2$	105 617,27
		$4p [3/2]_1$	106 087,26
		$4p [3/2]_2$	106 237,55
		$4p [1/2]_0$	107 054,27
		$4p' [3/2]_1$	107 131,71
		$4p' [3/2]_2$	107 289,70
		$4p' [1/2]_1$	107 496,42
		$4p' [1/2]_0$	108 722,62
19	K ($4s—^2S_{1/2}$) 35 009,81	$4p (^2P_{1/2}^\circ)$	12 985,17
		$4p (^2P_{3/2}^\circ)$	13 042,88
		$5s (^2S_{1/2})$	21 026,55
		$3d (^2D_{5/2})$	21 534,68
		$3d (^2D_{3/2})$	21 536,99
		$5p (^2P_{1/2}^\circ)$	24 701,38
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	24 720,14
		$4d (^2D_{5/2})$	27 397,08
		$4d (^2D_{3/2})$	27 398,15
		$6s (^2S_{1/2})$	27 450,71
		$4f (^2F_{7/2, 5/2}^\circ)$	28 127,8
		$6p (^2P_{1/2}^\circ)$	28 999,3
		$6p (^2P_{3/2}^\circ)$	29 007,7
20	Ca ($4s^2—^1S_0$) 49306,0	$4p (^3P_0^\circ)$	15 157,90
		$4p (^3P_1^\circ)$	15 210,06
		$4p (^3P_2^\circ)$	15 315,94
		$3d (^3D_1)$	20 335,36

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
21	Sc ($3d4s^2-^2D_{3/2}$) 52 922	$3d (^3D_2)$ $3d (^3D_3)$ $3d (^1D_2)$ $4p (^1P_1^\circ)$ $5s (^3S_1)$ $5s (^1S_0)$ $3d4s^2 (^2D_{5/2})$ $3d^24s (^4F_{3/2})$ $3d^24s (^4F_{5/2})$ $3d^24s (^4F_{7/2})$ $3d^24s (^4F_{9/2})$ $3d^24s (^2F_{5/2})$ $3d^24s (^2F_{7/2})$ $3d4s (^3D) 4p (^4F_{3/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4F_{5/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4F_{7/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4D_{1/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4D_{3/2}^\circ)$ $3d4s (1D) 4p (^2D_{5/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4F_{9/2}^\circ)$ $3d4s4p (^2D_{3/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4D_{5/2}^\circ)$ $3d4s4p (^4D_{7/2}^\circ)$	20 349,26 20 371,00 21 849,63 23 652,30 31 539,49 33 317,26 168,3 11 520,0 11 557,7 11 610,3 11 677,4 14 926,1 15 041,9 15 672,6 15 756,6 15 881,7 16 009,8 16 021,8 16 022,7 16 026,6 16 096,9 16 141,1 16 210,8
22	Ti ($3d^24s^2-^3F_2$) 55 000	$3d^24s^2 (^3F_3)$ $3d^24s^2 (^3F_4)$ $3d^3 (^4F) 4s (^5F_1)$ $4s (^5F_2)$ $4s (^5F_3)$ $4s (^5F_4)$ $4s (^5F_5)$ $3d^24s^2 (^1D_2)$ $3d^24s^2 (^3P_0)$	170,13 386,87 6556,83 6598,75 6661,00 6742,76 6842,96 7255,37 8436,62

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
23	V ($3d^3 4s^2$ — $^4F_{3/2}$) 54 360	$3d^2 4s^2$ (3P_1)	8492,42
		$3d^2 4s^2$ (3P_2)	8602,34
		$3d^3$ (4F) $4s$ (3F_2)	11 531,76
		$4s$ (3F_3)	11 639,80
		$4s$ (3F_4)	11 776,81
		$3d^2 4s^2$ (1G_4)	12 118,39
		$3d^3 4s^2$ ($^4F_{5/2}$)	137,38
		($^4F_{7/2}$)	323,46
		($^4F_{9/2}$)	552,96
		$3d^4$ (5D) $4s$ ($^6D_{1/2}$)	2112,28
		$4s$ ($^6D_{3/2}$)	2153,21
		$4s$ ($^6D_{5/2}$)	2220,11
		$4s$ ($^6D_{7/2}$)	2311,35
		$4s$ ($^6D_{9/2}$)	2424,78
		$3d^4$ (5D) $4s$ ($^4D_{1/2}$)	8413,00
		$4s$ ($^4D_{3/2}$)	8476,23
		$4s$ ($^4D_{5/2}$)	8578,53
		$4s$ ($^4D_{7/2}$)	8715,76
		$3d^3 4s^2$ ($^4P_{1/2}$)	9544,63
		($^4P_{3/2}$)	9637,03
		($^4P_{5/2}$)	9824,61
24	Cr ($3d^5 4s$ — 7S_3) 54 570	$3d^5$ (6S) $4s$ (5S_2)	7593,2
		$3d^4 4s^2$ (5D_0)	7750,8
		(5D_1)	7810,8
		(5D_2)	7927,5
		(5D_3)	8095,2
		(5D_4)	8307,6
25	Mn ($3d^5 4s^2$ — $^6S_{5/2}$) 59 959,4	$3d^5$ (5D) $4s$ ($^6D_{9/2}$)	17 052,3
		$4s$ ($^6D_{7/2}$)	17 282,0
		$4s$ ($^6D_{5/2}$)	17 451,5
		$4s$ ($^6D_{3/2}$)	17 568,5
		$4s$ ($^6D_{1/2}$)	17 637,1

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
26	Fe ($3d^6 4s^2$ — 5D_4) 63 740	$3d^5 4s$ (7S) $4p$ ($^8P_{5/2}^\circ$)	18 402,5
		$4p$ ($^8P_{7/2}^\circ$)	18 531,6
		$4p$ ($^8P_{9/2}^\circ$)	18 705,4
		$3d^6 4s^2$ (5D_3)	415,93
		(5D_2)	704,00
		(5D_1)	888,13
		(5D_0)	978,07
		$3d^7$ (4F) $4s$ (5F_5)	6 928,27
		$4s$ (5F_4)	7 376,76
		$4s$ (5F_3)	7 728,06
		$4s$ (5F_2)	7 985,78
		$4s$ (5F_1)	8 154,71
		$3d^7$ (4F) $4s$ (3F_4)	11 976,23
		$4s$ (3F_3)	12 560,93
		$4s$ (3F_2)	12 968,55
		$3d^7$ (4P) $4s$ (5P_3)	17 550,17
		$4s$ (5P_2)	17 726,98
		$4s$ (5P_1)	17 927,38
27	Co ($3d^7 4s^2$ — $^4F_{9/2}$) 63 400	$3d^7 4s^2$ ($^4F_{7/2}$)	816,0
		($^4F_{5/2}$)	1 406,8
		($^4F_{3/2}$)	1 809,3
		$3d^8$ (3F) $4s$ ($^4F_{9/2}$)	3 482,8
		$4s$ ($^4F_{7/2}$)	4 142,7
		$4s$ ($^4F_{5/2}$)	4 690,2
		$4s$ ($^4F_{3/2}$)	5 075,8
		$3d^8$ (3F) $4s$ ($^2F_{7/2}$)	7 442,4
		$4s$ ($^2F_{5/2}$)	8 460,8
28	Ni ($3d^8 4s^2$ — 3F_4) 61 600	$3d^9$ (2D) $4s$ (3D_3)	204,79
		$4s$ (3D_2)	879,81
		$3d^8 4s^2$ (3F_3)	1 332,15
		$4s$ (3D_1)	1 713,08
		$3d^8 4s^2$ (3F_2)	2 216,52
		$3d^9$ (2D) $4s$ (1D_2)	3 409,92
		$3d^8 4s^2$ (1D_2)	13 521,35
		$3d^{10}$ (1S_0)	14 728,85
		$3d^8 4s^2$ (3P_2)	15 609,86
		$3d^8 4s^2$ (3P_1)	15 734,02
		$3d^8 4s^2$ (3P_0)	16 017,32
		$3d^8 4s^2$ (1G_4)	22 102,35
29	Cu ($3d^{10} 4s$ — $^2S_{1/2}$) 62 317,4	$3d^9 4s^2$ ($^2D_{5/2}$)	11 202,56
		$3d^9 4s^2$ ($^2D_{3/2}$)	13 245,42

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
30	Zn ($3d^{10}4s^2 - {}^1S_0$) 75 769,3	$4p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	30 535,30
		$4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	30 783,69
		$3d^9 4s ({}^3D) 4p' ({}^4P_{5/2}^\circ)$	39 018,65
		$4p' ({}^4P_{3/2}^\circ)$	40 114,0
		$4p' ({}^4F_{9/2}^\circ)$	40 909,14
		$4p' ({}^4P_{1/2}^\circ)$	40 943,7
		$4p' ({}^4F_{7/2}^\circ)$	41 153,43
		$4p' ({}^4F_{5/2}^\circ)$	41 562,89
		$4p' ({}^4F_{3/2}^\circ)$	42 302,5
		$5s ({}^3S_{1/2})$	43 137,21
		$4p ({}^3P_0^\circ)$	32 311,33
		$4p ({}^3P_1^\circ)$	32 501,41
		$4p ({}^3P_2^\circ)$	32 890,34
		$4p ({}^1P_1^\circ)$	46 745,40
		$5s ({}^3S_1)$	53 672,26
		$5s ({}^1S_0)$	55 789,22
		$5p ({}^3P_0^\circ)$	61 247,90
		$5p ({}^3P_1^\circ)$	61 274,42
		$5p ({}^3P_2^\circ)$	61 330,89
		$4d ({}^1D_2)$	62 458,52
31	Ga ($4s^2 4p - {}^2P_{1/2}^\circ$) 48 387,63	$4d ({}^3D_1)$	62 768,76
		$4d ({}^3D_2)$	62 772,02
		$4d ({}^3D_3)$	62 776,99
		$5p ({}^1P_1^\circ)$	62 910,43
		$4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	826,2
		$5s ({}^2S_{1/2})$	24 788,53
		$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	33 044,1
		$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	33 155,0
		$4d ({}^2D_{3/2})$	34 781,7
		$4d ({}^5D_{5/2})$	34 787,9

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
32	Ge ($4p^2 - {}^3P_0$) 63 713,2	$4p^2 ({}^3P_1)$	557,13
		$4p^2 ({}^3P_2)$	1 409,96
		$4p^2 ({}^1D_2)$	7 125,30
		$4p^2 ({}^1S_0)$	16 367,33
		$5s ({}^3P_0^\circ)$	37 451,69
		$5s ({}^3P_1^\circ)$	37 702,31
		$5s ({}^3P_2^\circ)$	39 117,90
		$5s ({}^1P_1^\circ)$	40 020,56
		$4s4p^3 ({}^5S_2^\circ)$	41 926,73
		$4p^3 ({}^2D_{3/2}^\circ)$	10 592,7
33	As ($4p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ$) 78 950	$4p^3 ({}^2D_{5/2}^\circ)$	10 914,9
		$4p^3 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	18 186,3
		$4p^3 ({}^2P_{3/2}^\circ)$	18 647,7
		$5s ({}^4P_{1/2})$	50 693,9
		$5s ({}^4P_{3/2})$	51 610,4
		$5s ({}^4P_{5/2})$	52 898,1
		$5s ({}^2P_{1/2})$	53 135,7
		$5s ({}^2P_{3/2})$	54 605,5
		$4p^4 ({}^3P_1)$	1 989,50
		$4p^4 ({}^3P_0)$	2 534,36
34	Se ($4p^4 - {}^3P_2$) 78 658,2	$4p^4 ({}^1D_2)$	9 576,15
		$4p^4 ({}^1S_0)$	22 446,20
		$5s ({}^5S_2^\circ)$	48 182,2
		$5s ({}^3S_1^\circ)$	50 996,9
		$5p ({}^5P_1)$	59 242,8
		$5p ({}^5P_2)$	59 287,9
		$5p ({}^5P_3)$	59 391,4
		$5p ({}^3P_2)$	60 677,5
		$5p ({}^3P_1)$	60 622,4
		$5p ({}^3P_0)$	60 696,1
35	Br ($4p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ$) 95 284,8	$4p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	3 685
		$5s ({}^4P_{5/2})$	63 429,8
		$5s ({}^4P_{3/2})$	64 900,5
		$5s ({}^4P_{1/2})$	66 877,2

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
36	Kr ($4p^6—^1S_0$) 112 914,5	$5s (^2P_{3/2})$	67 176,9
		$5s (^2P_{1/2})$	68 963,5
		$5p (^4P_{5/2}^\circ)$	74 665,7
		$5p (^4P_{3/2}^\circ)$	75 002,5
		$5p (^4D_{7/2}^\circ)$	75 514,8
		$5p (^4D_{5/2}^\circ)$	75 690,4
		$5p (^4P_{1/2}^\circ)$	75 807,3
		$4p^4 (^1S) 5s'' (^2S_{1/2})$	75 901,9
		$5p (^4D_{3/2}^\circ)$	76 736,4
		$4p^4 (^1D) 5s' (^2D_{3/2})$	77 305,9
		$5s' (^2D_{5/2})$	77 324,1
		$5p (^4D_{1/2}^\circ)$	78 069,3
		$4p^5 (^2P_{3/2}^\circ) 5s [3/2]_2^\circ$	79 971,8
		$5s [3/2]_1^\circ$	80 916,8
		$4p^5 (^2P_{1/2}^\circ) 5s' [1/2]_0^\circ$	85 191,7
		$5s' [1/2]_1^\circ$	85 846,8
		$5p [1/2]_1$	91 168,6
		$5p [5/2]_3$	92 294,5
		$5p [5/2]_2$	92 307,4
		$5p [3/2]_1$	92 964,5
37	Rb ($5s—^2S_{1/2}$) 33 690,88	$5p [3/2]_2$	93 123,4
		$5p [1/2]_0^\circ$	94 092,9
		$4d [1/2]_0^\circ$	96 771,6
		$4d [1/2]_1$	97 085,3
		$5p (^2P_{1/2}^\circ)$	12 578,95
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	12 816,55
		$4d (^2D_{5/2})$	19 355,20
		$4d (^2D_{3/2})$	19 355,65
		$6s (^2S_{1/2})$	20 132,51
		$6p (^2P_{1/2}^\circ)$	23 715,08
		$6p (^2P_{3/2}^\circ)$	23 792,59
		$5d (^2D_{3/2})$	25 700,54

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
38	Sr ($5s^2—^1S_0$) 45 932,1	$5d (^3D_{5/2})$	25 703,50
		$7s (^2S_{1/2})$	26 311,44
		$4f (^2F_{7/2}^\circ)$	26 792,09
		$4f (^2F_{5/2}^\circ)$	26 792,12
		$5p (^3P_0^\circ)$	14 317,52
		$5p (^3P_1^\circ)$	14 504,35
		$5p (^3P_2^\circ)$	14 898,56
		$4d (^3D_1)$	18 159,06
		$4d (^3D_2)$	18 218,79
		$4d (^3D_3)$	18 319,27
		$4d (^1D_2)$	20 149,7
		$5p (^1P_1^\circ)$	21 698,48
		$6s (^3S_1)$	29 038,79
		$6s (^1S_0)$	30 591,8
39	Y ($4d5s^2—^2D_{3/2}$) 50 144	$4d (^2D_{5/2})$	530,4
		$5p (^2P_{1/2}^\circ)$	10 529,2
		$4d^2 (^3F) 5s (^4F_{3/2})$	10 937,3
		$5s (^4F_{5/2})$	11 078,6
		$5s (^4F_{7/2})$	11 278,0
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	11 359,7
		$4d^2 (^3F) 5s (^4F_{9/2})$	11 532,1
		$4d^2 5s^2 (^3F_3)$	570,4
		$4d^2 5s^2 (^3F_4)$	1 240,8
		$4d^2 5s^2 (^3P_2)$	4 186,1
40	Zr ($4d^2 5s^2—^3F_2$) 55 100	$4d^2 5s^2 (^3P_0)$	4 196,8
		$4d^2 5s^2 (^3P_1)$	4 376,3
		$4d^3 (^4F) 5s (^5F_1)$	4 870,5
		$5s (^5F_2)$	5 023,4
		$4d^2 5s^2 (^1D_2)$	5 101,7
		$4d^3 (^4F) 5s (^5F_3)$	5 249,1
		$5s (^5F_4)$	5 540,5
		$5s (^5F_5)$	5 888,9
		$4d^2 5s^2 (^1G_4)$	8 057,3
		$5s (^6D_{3/2})$	154,2
		$(^6D_{5/2})$	392,0
		$(^6D_{7/2})$	695,2
41	Nb ($4d^4 5s—^6D_{1/2}$) 55 500		

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
42	Mo ($4d^5 5s - {}^7S_3$) 57 300	$({}^6D_{9/2})$	1 050,3
		$4d^3 5s^2 ({}^4F_{3/2})$	1 142,8
		$({}^4F_{5/2})$	1 586,9
		$({}^4F_{7/2})$	2 154,1
		$({}^4F_{9/2})$	2 805,4
		$4d^3 5s^2 ({}^4P_{1/2})$	4 998,2
		$({}^4P_{3/2})$	5 297,9
		$({}^4P_{5/2})$	5 965,4
		$4d^5 ({}^6S) 5s ({}^5S_2)$	10 768,3
		$4d^4 5s^2 ({}^5D_0)$	10 966,0
		$({}^5D_1)$	11 142,8
		$({}^5D_2)$	11 454,4
		$({}^5D_3)$	11 858,5
		$({}^5D_4)$	12 346,3
		$4d^5 ({}^4G) 5s ({}^5G_2)$	16 641,1
		$5s ({}^6G_3)$	16 693,0
		$5s ({}^6G_4)$	16 747,7
		$5s ({}^6G_5)$	16 784,6
		$5s ({}^6G_6)$	16 784,0
		$4d^5 ({}^4P) 5s ({}^5P_3)$	18 229,2
43	Tc ($4d^5 5s^2 - {}^6S_{5/2}$) 58 700	$5s ({}^6P_2)$	18 356,5
		$5s ({}^6P_1)$	18 479,6
		$4d^6 ({}^6D) 5s ({}^6D_{9/2})$	2 572,9
		$({}^6D_{7/2})$	3 250,9
		$({}^6D_{5/2})$	3 700,5
		$({}^6D_{3/2})$	4 002,6
		$({}^6D_{1/2})$	4 178,7
		$4d^6 ({}^5D) 5s ({}^4D_{7/2})$	10 516,5
		$({}^4D_{5/2})$	11 063,1
		$({}^4D_{3/2})$	11 578,6
44	Ru ($4d^7 5s - {}^5F_5$) 59 410	$({}^4D_{1/2})$	11 891,0
		$4d^7 ({}^4F) 5s ({}^5F_4)$	1 190,6
		$({}^5F_3)$	2 091,5
		$({}^5F_2)$	2 713,2
45	Rh ($4d^8 5s - {}^4F_{9/2}$) 60 200	$({}^5F_1)$	3 105,5
		$4d^8 ({}^3F) 5s ({}^4F_{7/2})$	1 530,0
		$5s ({}^4F_{5/2})$	2 598,0
		$4d^9 ({}^2D_{5/2})$	3 309,9

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
46	Pd ($4d^{10}—^1S_0$) 67 236	$5s (^4F_{3/2})$	3 472,7
		$4d^9 (^2D_{3/2})$	5 658,0
		$4d^8 (^3F) 5s (^2F_{7/2})$	5 691,0
		$5s (^3F_{5/2})$	7 791,2
		$4d^9 (^2D_{5/2}) 5s (^3D_3)$	6 564,1
		$5s (^3D_2)$	7 755,0
		$4d^9 (^2D_{3/2}) 5s (^3D_1)$	10 093,9
47	Ag ($4d^{10}5s—^2S_{1/2}$) 61 106,6	$4d^9 (^2D_{3/2}) 5s (^1D_2)$	11 721,8
		$4d^{10} (^1S) 5p (^2P_{1/2}^\circ)$	29 552,0
		$4d^9 5s^2 (^2D_{5/2})$	30 242,3
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	30 472,7
		$5s^2 (^2D_{3/2})$	34 714,2
48	Cd ($4d^{10}5s^2—^1S_0$) 72 540,1	$6s (^2S_{1/2})$	42 556,1
		$5p (^3P_0^\circ)$	30 113,99
		$(^3P_1^\circ)$	30 656,09
		$(^3P_2^\circ)$	31 826,95
		$5p (^1P_1^\circ)$	43 692,38
		$6s (^3S_1)$	51 483,98
		$6s (^1S_0)$	53 310,10
		$6p (^3P_0^\circ)$	58 391
		$(^3P_1^\circ)$	58 462
		$(^3P_2^\circ)$	58 636
		$5d (^1D_2)$	59 219,73
		$5d (^3D_1)$	59 485,77
		$(^3D_2)$	59 497,87
49	In ($5p—^2P_{1/2}^\circ$) 46 670,11	$(^3D_3)$	59 515,98
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	2 212,6
		$6s (^2S_{1/2})$	24 372,9
		$6p (^2P_{1/2}^\circ)$	31 816,6
		$6p (^2P_{3/2}^\circ)$	32 114,8

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см ⁻¹
50	Sn ($5p^2-^3P_0$) 59 232,7	$5d (^2D_{3/2})$	32 892,1
		$5d (^2D_{5/2})$	32 915,4
		$5p^2 (^3P_1)$	1 692
		$5p^2 (^3P_2)$	3 428
		$5p^2 (^1D_2)$	8 613
		$5p^2 (^1S_0)$	17 163
		$6s (^3P_0^\circ)$	34 640,8
		$6s (^3P_1^\circ)$	34 914,3
		$6s (^3P_2^\circ)$	38 628,9
		$6s (^1P_1^\circ)$	39 257,1
51	Sb ($5p^3-^4S_{3/2}^\circ$) 69 430	$5s5p^3 (^6S_2^\circ)$	39 625,5
		$5p^3 (^2D_{3/2}^\circ)$	8 512
		$5p^3 (^2D_{5/2}^\circ)$	9 854
		$5p^3 (^2P_{1/2}^\circ)$	16 396
		$5p^3 (^2P_{3/2}^\circ)$	18 464
52	Te ($5p^4 ^3P_2 +$ $+5p^4 ^1D_2$) 72 670	$5p^4 (^3P_0) + 5p^4 (^1S_0)$	4 706,49
		$5p^4 (^3P_1)$	4 750,71
		$5p^4 (^1D_2) + 5p^4 (^3P_2)$	10 557,88
		$5p^4 (^1S_0) + 5p^4 (^3P_0)$	23 198,39
53	I ($5p^5-^2P_{3/2}^\circ$) 84 295,0	$5p^5 (^2P_{1/2}^\circ)$	7 603,1
		$5p^4 (^3P_2) 6s [2]_{5/2}$	54 633,5
		$6s [2]_{3/2}$	56 092,9
		$6s [0]_{1/2}$	60 896,2
		$6s [1]_{3/2}$	61 819,8
		$6s [1]_{1/2}$	63 186,7
		$6p [2]_{5/2}^\circ$	64 906,3
		$6p [2]_{3/2}^\circ$	64 990,0
		$6p [3]_{5/2}^\circ$	65 644,5
		$6p [3]_{7/2}^\circ$	65 670,0
		$6p [1]_{1/2}^\circ$	65 857,0
		$5d [3]_{7/2}$	66 015,0

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
54	$\text{Xe} (5p^6 - ^1S_0)$ 97 833,8	$5d [3]_{5/2}$ $5d [1]_{3/2}$ $6p [1]_{3/2}^\circ$ $5d [1]_{1/2}$ $5d [4]_{9/2}$ $5p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 6s [3/2]_2^\circ$ $6s [3/2]_1^\circ$ $5p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 6s' [1/2]_0^\circ$ $6s' [1/2]_1^\circ$ $6p [1/2]_1$ $6p [5/2]_2$ $6p [5/2]_3$ $6p [3/2]_1$ $6p [3/2]_2$ $5d [1/2]_0^\circ$ $5d [1/2]_1^\circ$ $6p [1/2]_0$ $5d [7/2]_4$ $5d [3/2]_2^\circ$ $5d [7/2]_3^\circ$	66020,5 66355,1 67062,1 67298,3 67726,4 67068,05 68045,66 76197,27 77185,54 77269,64 78120,29 78403,56 78956,53 79212,96 79771,76 79987,12 80119,46 80197,13 80323,24 80970,94
55	$\text{Cs} (6s - ^2S_{1/2})$ 31 406,47	$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$ $6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$ $5d ({}^2D_{3/2})$ $5d ({}^2D_{5/2})$ $7s ({}^2S_{1/2})$ $7p ({}^2P_{1/2}^\circ)$ $7p ({}^2P_{3/2}^\circ)$ $6d ({}^2D_{3/2})$ $6d ({}^2D_{5/2})$ $8s ({}^2S_{1/2})$	11178,27 11732,31 14499,25 14596,84 18535,52 21765,36 21946,43 22588,82 22631,69 24317,15

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня $T, \text{см}^{-1}$
56	Ba ($6s^2-^1S_0$) 42 034,90	$4f (^3F_{7/2})$	24472,05
		$4f (^3F_{5/2})$	24472,23
		$5d (^3D_1)$	9033,96
		$5d (^3D_2)$	9215,49
		$5d (^3D_3)$	9596,52
		$5d (^1D_2)$	11395,38
		$6p (^3P_0^\circ)$	12266,02
		$6p (^3P_1^\circ)$	12636,62
		$6p (^3P_2^\circ)$	13514,74
		$6p (^1P_1^\circ)$	18060,26
		$5d (^2D) 6p' (^3F_2^\circ)$	22064,66
		$6p' (^3F_3^\circ)$	22947,44
		$5d^2 (^1D_2)$	23062,1
		$6p' (^1D_2^\circ)$	23074,42
		$5d^2 (^3P_0)$	23209,1
		$(^3P_1)$	23480,0
		$(^3P_2)$	23918,9
57	La ($5d6s^2-^2D_{3/2}$) 44 980	$6p' (^3F_4^\circ)$	23757,08
		$5d6s^2 (^2D_{5/2})$	1053,16
		$5d^2 (^3F) 6s (^4F_{3/2})$	2668,19
		$6s (^4F_{5/2})$	3010,00
		$6s (^4F_{7/2})$	3494,53
		$6s (^4F_{9/2})$	4121,57
		$6s (^2F_{5/2})$	7011,91
		$5d^2 (^3P) 6s (^4P_{1/2})$	7231,41
		$6s (^4P_{3/2})$	7490,52
		$6s (^4P_{5/2})$	7679,94
		$5d^2 (^3F) 6s (^2F_{7/2})$	8052,16
		$5d^2 (^1D) 6s (^3D_{3/2})$	8446,04
		$5d^2 (^3P) 6s (^3P_{1/2})$	9044,21
		$5d^2 (^1D) 6s (^2D_{5/2})$	9183,80

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
58	Ce ($4f5d6s^2 - {}^1G_4^\circ$) 44 670	$5d^2 ({}^3P) 6s ({}^2P_{3/2})$	9719,44
		$5d^2 ({}^1G) 6s ({}^2G_{9/2})$	9919,82
		$6s ({}^2G_{7/2})$	9960,90
		$5d^3 ({}^4F_{3/2})$	12430,61
		$5d^3 ({}^4F_{5/2})$	12787,40
		$5d^3 ({}^4F_{7/2})$	13238,32
		$5d6s ({}^3D) 6p ({}^4F_{3/2}^\circ)$	13260,4
		$6p ({}^4F_{5/2}^\circ)$	13631,0
		$5d^3 ({}^4F_{9/2})$	13747,28
		$4f5d6s^2 ({}^3F_2^\circ)$	228,85
		$6s^2 ({}^3H_4^\circ)$	1279,42
		$6s^2 ({}^3G_3^\circ)$	1388,94
		$6s^2 ({}^3F_3^\circ)$	1663,12
		$6s^2 ({}^3H_5^\circ)$	2208,66
		$4f ({}^2F^\circ) 5d^2 ({}^3F) 6s ({}^4F)$	2369,07
		$({}^5H_3^\circ)$	
		$4f5d6s^2 ({}^1D_2^\circ)$	2378,83
		$4f5d^26s ({}^5H_4^\circ)$	2437,63
		$4f5d6s^2 ({}^3F_4^\circ)$	3100,15
		$4f5d^26s ({}^5I_4^\circ)$	3196,61
		$4f5d^26s ({}^3G_5^\circ + {}^5H_5^\circ)$	3210,58
		$4f5d6s^2 ({}^3F_4^\circ + {}^3G_4^\circ)$	3312,24
		$4f5d6s^2 ({}^3D_1^\circ)$	3710,51
		$4f5d^26s ({}^5I_5^\circ)$	3764,01
		$4f5d^26s ({}^5D_0^\circ + {}^3P_0^\circ)$	3974,50
		$4f5d6s^2 ({}^3H_6^\circ)$	3976,10
		$4f5d^26s ({}^3S_1^\circ + {}^3P_1^\circ)$	4020,95
		$4f5d^26s ({}^3G_3^\circ)$	4160,28

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
59	Pr ($4f^3 6s^2 - {}^4I_{9/2}^\circ$) 44 100	$4f5d^2 6s ({}^3G_4^\circ + {}^5H_4^\circ)$	4173,49
		$4f5d6s^2 ({}^3G_5^\circ)$	4199,37
		$4f5d^2 6s ({}^3G_5^\circ) +$ $+ 4f5d6s^2 ({}^3G_5^\circ)$	4417,62
		$4f5d^2 6s ({}^5I_6^\circ)$	4455,76
		$4f5d^2 6s ({}^5H_6^\circ)$	4746,63
		$4f^2 6s^2 ({}^3H_4)$	4762,72
		$4f5d6s^2 ({}^3D_2^\circ)$	4766,32
		$4f5d6s^2 ({}^3D_3^\circ)$	5006,72
		$4f5d^2 6s ({}^3S_1^\circ)$	5097,78
		$4f^3 6s^2 ({}^4I_{11/2}^\circ)$	1376,6
		$4f^3 6s^2 ({}^4I_{13/2}^\circ)$	2846,7
		$4f^3 6s^2 ({}^4I_{15/2}^\circ)$	4381,1
		$4f^2 ({}^3H) 5d6s^2 ({}^4I_{9/2})$	4432,2
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4K_{11/2})$	4866,5
		$4f^2 5d6s^2 ({}^2H_{9/2})$	5822,9
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4I_{11/2})$	6313,2
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4H_{7/2})$	6535,5
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4K_{13/2})$	6603,6
		$4f^2 ({}^3H) 5d^2 ({}^3F) ({}^5L) 6s ({}^6L_{11/2})$	6714,2
		$4f^2 5d6s^2 ({}^2H_{11/2})$	6892,9
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4G_{7/2})$	7617,4
		$4f^2 5d^2 ({}^5L) 6s ({}^6L_{13/2})$	7630,2
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4I_{13/2})$	7951,3
		$4f^2 5d^2 6s ({}^6I_{7/2})$	8013,1
		$4f^2 5d6s^2 ({}^4H_{9/2})$	8029,2
		$4f^3 ({}^4I^\circ) 5d6s ({}^3D) ({}^6L_{11/2}^\circ)$	8080,5
		$4f^3 5d6s ({}^6K_{9/2}^\circ)$	8250,2

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
60	Nd ($4f^4 6s^2 - {}^5I_4$) 44 560	$4f^2 ({}^3H) 5d^2 ({}^3F) ({}^5K) 6s ({}^6K_{9/2})$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^4K_{15/2})$ $4f^2 5d^2 6s ({}^6I_{9/2})$ $4f^3 5d 6s ({}^6L_{13/2}^\circ)$ $4f^2 5d^2 ({}^5K) 6s ({}^6K_{11/2})$ $4f^3 5d 6s ({}^6K_{11/2}^\circ)$ $4f^2 5d^2 6s ({}^6I_{11/2})$ $4f^4 6s^2 ({}^5I_5)$ $4f^4 6s^2 ({}^5I_6)$ $4f^4 6s^2 ({}^5I_7)$ $4f^4 6s^2 ({}^5I_8)$ $4f^3 ({}^4I^\circ) 5d 6s^2 ({}^5L_6^\circ)$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^5K_5^\circ)$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^5L_7^\circ)$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^5K_6^\circ)$ $4f^4 ({}^5I) 5d 6s ({}^3D) ({}^7L_8)$ $4f^3 ({}^4I^\circ) 5d^2 ({}^3F)$ $({}^6M^\circ) 6s ({}^7M_6^\circ)$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^5I_4^\circ)$ $4f^4 5d 6s ({}^7L_8)$ $4f^3 5d^2 6s ({}^7M_7^\circ)$ $4f^4 5d 6s ({}^7K_4)$ $4f^3 5d 6s^2 ({}^5H_3^\circ)$ $4f^4 5d 6s ({}^7L_7)$	8320,3 8363,9 8643,8 8733,5 8829,1 8835,4 9268,7 1128,06 2366,60 3681,70 5048,60 6764,21 6853,99 8402,49 8411,90 8475,36 8800,39 9083,81 9115,09 9692,28 9814,68 9927,39 9939,70
61	Pm ($4f^5 6s^2 - {}^6H_{5/2}^\circ$) 44 800	$4f^5 6s^2 ({}^6H_{7/2}^\circ)$ $4f^5 6s^2 ({}^6H_{9/2}^\circ)$ $4f^5 6s^2 ({}^6H_{11/2}^\circ)$ $4f^5 6s^2 ({}^6H_{13/2}^\circ)$ $4f^5 6s^2 ({}^6H_{15/2}^\circ)$ $4f^5 6s^2 ({}^6F_{1/2}^\circ)$	803,8 1748,8 2797,1 3919,0 5089,8 5249,5

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
62	Sm ($4f^6 6s^2 - {}^7F_0$) 45 520	$4f^5 6s^2 ({}^6F_{3/2}^{\circ})$	5460,5
		$4f^5 6s^2 ({}^6F_{5/2}^{\circ})$	5872,8
		$4f^5 6s^2 ({}^6F_{7/2}^{\circ})$	6562,9
		$4f^5 6s^2 ({}^6F_{9/2}^{\circ})$	7498,0
		$4f^5 6s^2 ({}^6F_{11/2}^{\circ})$	8609,2
		$4f^4 5d 6s^2 + 4f^5 6s 6p (J = 7/2)$	17104,7
		$4f^4 5d 6s^2 + 4f^5 6s 6p (J = 3/2)$	2.006,0
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_1)$	292,6
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_2)$	811,9
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_3)$	1489,5
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_4)$	2273,1
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_5)$	3125,5
		$4f^6 6s^2 ({}^7F_6)$	4020,7
		$4f^6 ({}^7F) 5d ({}^8H) 6s ({}^9H_1)$	10801,1
		$4f^6 5d 6s ({}^9H_2)$	11044,9
		$4f^6 5d 6s ({}^9H_3)$	11406,5
		$4f^6 5d 6s ({}^9H_4)$	11877,5
		$4f^6 5d ({}^8D) 6s ({}^9D_2)$	12313,1
		$4f^6 5d ({}^8H) 6s ({}^9H_5)$	12445,3
		$4f^6 5d ({}^8D) 6s ({}^9D_1)$	12846,6
		$4f^6 5d ({}^8H) 6s ({}^9H_2)$	13050,0
		$4f^6 5d ({}^8H) 6s ({}^9H_6)$	13095,7
		$4f^6 5d ({}^8F) 6s ({}^9F_1 + {}^9G_1)$	13369,3
		$4f^6 5d ({}^8D) 6s ({}^9D_4)$	13458,5
		$4f^6 5d ({}^8H) 6s ({}^7H_3)$	13542,8
		$4f^6 5d ({}^8G) 6s ({}^9G_0)$	13551,2
		$4f^6 5d ({}^8G) 6s ({}^9G_2)$	13687,7
		$4f^6 5d ({}^8G) 6s ({}^9G_1)$	13 732,5

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
63	Eu ($4f^7 6s^2 - {}^8S_{7/2}^\circ$) 45 735	$4f^6 6s 6p ({}^3P^\circ) ({}^9G_0^\circ)$	13796,4
		$4f^6 5d ({}^8H) 6s ({}^9H_7)$	13814,9
		$4f^6 6s 6p ({}^3P^\circ) ({}^9G_1^\circ)$	13999,5
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d ({}^9D^\circ) 6s ({}^{10}D_{5/2}^\circ)$	12923,7
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{7/2}^\circ)$	13048,9
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{9/2}^\circ)$	13222,0
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{11/2}^\circ)$	13457,2
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{13/2}^\circ)$	13778,7
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 6s 6p ({}^3P^\circ) ({}^{10}P_{7/2})$	14067,9
		$4f^7 6s 6p ({}^{10}P_{9/2})$	14563,6
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{3/2}^\circ)$	15137,7
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{5/2}^\circ)$	15248,8
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{7/2}^\circ)$	15421,2
		$4f^7 6s 6p ({}^{10}P_{11/2})$	15581,6
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{9/2}^\circ)$	15680,3
		$4f^7 6s 6p ({}^6P_{5/2})$	15890,5
		$4f^7 6s 6p ({}^8P_{7/2})$	15952,3
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{11/2}^\circ)$	16079,8
		$4f^7 6s 6p ({}^8P_{9/2})$	16611,8
		$4f^7 6s 6p ({}^6P_{7/2})$	17340,6
64	Gd ($4f^7 5d 6s^2 - {}^9D_2^\circ$) 49 603	$4f^7 6s 6p ({}^6P_{5/2})$	17707,4
		$4f^7 6s 6p ({}^6P_{3/2})$	17945,5
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d 6s^2 ({}^9D_3^\circ)$	215,12
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^9D_4^\circ)$	532,98
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^9D_5^\circ)$	999,12
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^9D_6^\circ)$	1719,09
		$4f^7 5d^2 ({}^3F) ({}^{10}F^\circ) 6s ({}^{11}F_2^\circ)$	6378,15

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
65	$\text{Tb} (4f^9 6s^2 - {}^6H_{15/2}^\circ)$ 47300	$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_3^\circ)$	6550,40
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_4^\circ)$	6786,18
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^7D_5^\circ)$	6976,51
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_5^\circ)$	7103,42
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^7D_4^\circ)$	7234,91
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^7D_3^\circ)$	7426,71
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_6^\circ)$	7480,35
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^7D_2^\circ)$	7562,46
		$4f^7 5d 6s^2 ({}^7D_1^\circ)$	7653,93
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_7^\circ)$	7947,29
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}F_8^\circ)$	8498,43
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_1^\circ)$	10222,23
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_2^\circ)$	10359,91
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_3^\circ)$	10576,41
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_4^\circ)$	10883,51
		$4f^8 6s^2 ({}^7F_6)$	10947,21
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_5^\circ)$	11296,47
		$4f^7 5d^2 ({}^3P) ({}^{10}P^\circ) 6s ({}^{11}P_4^\circ)$	11685,59
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_6^\circ)$	11830,39
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}P_5^\circ)$	12057,16
		$4f^7 5d^2 6s ({}^{11}P_6^\circ)$	12345,97
		$4f^7 5d^2 6s ({}^9F_7^\circ)$	12486,55
		$4f^8 6s^2 ({}^7F_5^\circ)$	12520,00
		$4f^8 ({}^7F) 5d 6s^2 ({}^8G_{13/2})$	285,50
		$4f^8 5d 6s^2 ({}^8G_{15/2})$	462,08
		$4f^8 5d 6s^2 ({}^8G_{11/2})$	509,85
		$4f^8 5d 6s^2 (J=9/2)$	1371,05

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня $T, \text{см}^{-1}$
66	$\text{Dy}(4f^{10}6s^2-^5I_8)$ 47900	$4f^8 5d 6s^2(^8D_{11/2})$	2310,09
		$4f^8 5d 6s^2(^8G_{7/2})$	2419,48
		$4f^9 6s^2(^6H_{13/2}^\circ)$	2771,68
		$4f^8 5d 6s^2(^8G_{9/2})$	2840,17
		$4f^8 5d 6s^2(^8G_{5/2})$	3174,58
		$4f^8 5d 6s^2(^8G_{3/2})$	3705,82
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{13/2})$	3719,71
		$4f^8 5d 6s^2(^8D_{7/2})$	3819,85
		$4f^8 5d 6s^2(^8G_{1/2})$	4018,21
		$4f^8 5d 6s^2(^8H_{17/2})$	4646,83
		$4f^9 6s^2(^6H_{11/2}^\circ)$	4670,46
		$4f^8 5d 6s^2(^8D_{5/2})$	4695,51
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{11/2})$	5353,37
		$4f^8 5d 6s^2(^8H_{15/2})$	5425,06
		$4f^8 5d 6s^2(^8D_{3/2})$	5483,98
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{9/2})$	5829,86
		$4f^9 6s^2(^6H_{9/2}^\circ)$	6174,93
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{1/2})$	6259,09
		$4f^8 5d 6s^2(^8H_{13/2})$	6351,75
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{7/2})$	6488,28
		$4f^8 5d 6s^2(^6F_{11/2})$	6674,16
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{5/2})$	6801,19
		$4f^8 5d 6s^2(^8F_{3/2})$	6849,72
		$4f^8 5d 6s^2(^8H_{11/2})$	6988,82
		$4f^{10} 6s^2(^5I_7)$	4134,2
		$4f^{10} 6s^2(^5I_6)$	7050,6
		$4f^9(^6H^\circ) 5d 6s^2(^7H_8^\circ)$	7565,6
		$4f^9 5d 6s^2(^7H_7^\circ)$	8519,2
		$4f^{10} 6s^2(^5I_5)$	9211,6
		$4f^9 5d 6s^2(^7I_9^\circ)$	9990,9

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
67	Ho ($4f^{11}6s^2 - {}^4I_{15/2}^\circ$) 48570	$4f^9 5d 6s^2 ({}^7H_6^\circ)$ $4f^{10} 6s^2 ({}^5I_4)$ $4f^9 5d 6s^2 ({}^7F_6^\circ)$ $4f^9 5d 6s^2 ({}^7I_8^\circ)$ $4f^9 5d 6s^2 ({}^7H_5^\circ)$ $4f^9 5d 6s^2 ({}^7G_7^\circ)$ $4f^9 5d 6s^2 ({}^7K_{10}^\circ)$ $4f^{11} 6s^2 ({}^4I_{13/2}^\circ)$ $4f^{10} ({}^5I_8) 5d 6s^2 (8, 3/2)_{17/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 3/2)_{15/2}$ $4f^{11} 6s^2 ({}^4I_{11/2}^\circ)$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 3/2)_{13/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 3/2)_{19/2}$ $4f^{11} 6s^2 ({}^4I_{9/2}^\circ)$ $4f^{10} ({}^5I_8) 5d 6s^2 (8, 5/2)_{21/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 5/2)_{17/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 5/2)_{19/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (8, 5/2)_{15/2}$ $4f^{10} ({}^5I_7) 5d 6s^2 (7, 3/2)_{13/2}$ $4f^{10} 5d 6s^2 (7, 3/2)_{11/2}$	10088,8 10925,2 11673,5 12007,1 12298,6 12655,1 12892,8 5419,7 8378,9 8427,1 8605,2 9147,1 9741,5 10695,7 11322,3 11530,6 11689,8 12339,0 12344,5 13082,9
68	Er ($4f^{12} 6s^2 - {}^3H_6$) 49260	$4f^{12} 6s^2 ({}^3F_4)$ $4f^{12} 6s^2 ({}^3H_6)$ $4f^{11} ({}^4I_{15/2}^\circ) 5d 6s^2 (15/2, 3/2)_6^\circ$ $4f^{11} 5d 6s^2 (15/2, 3/2)_7^\circ$ $4f^{11} 5d 6s^2 (15/2, 3/2)_9^\circ$ $4f^{11} 5d 6s^2 (15/2, 3/2)_8^\circ$ $4f^{11} ({}^4I_{15/2}^\circ) 5d 6s^2 (15/2, 5/2)_{10}^\circ$ $4f^{11} 5d 6s^2 (15/2, 5/2)_9^\circ$ $4f^{12} 6s^2 ({}^3H_4)$	5035,19 6958,33 7176,50 7696,96 8620,57 9350,11 9655,85 10557,92 10750,98

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня $T, \text{см}^{-1}$
69	$\text{Tm}(4f^{13}6s^2 - {}^2F_{7/2}^\circ)$ 49 880	$4f^{11}5d6s^2(15/2, 5/2)_5^\circ$	11401,20
		$4f^{11}5d6s^2(15/2, 5/2)_8^\circ$	11557,67
		$4f^{11}5d6s^2(15/2, 5/2)_6^\circ$	11799,78
		$4f^{11}5d6s^2(15/2, 5/2)_7^\circ$	11887,50
		$4f^{12}6s^2({}^3F_3)$	12377,53
		$4f^{12}6s^2({}^3F_2)$	13097,91
		$4f^{13}6s^2({}^2F_{5/2}^\circ)$	8771,24
		$4f^{12}({}^3H_6)5d6s^2(6, 3/2)_{9/2}$	13119,61
		$4f^{12}5d6s^2(6, 3/2)_{15/2}$	15271,00
		$4f^{12}5d6s^2(6, 3/2)_{11/2}$	15587,81
		$4f^{12}5d6s^2(6, 5/2)_{17/2}$	16456,91
		$4f^{13}({}^2F_{7/2}^\circ)6s6p({}^3P_0^\circ)$ (7/2, 0) $_{7/2}$	16742,24
		$4f^{12}5d6s^2(6, 5/2)_{7/2}$	16957,01
		$4f^{13}6s6p({}^3P_1^\circ)(7/2, 1)_{7/2}$	17343,37
		$4f^{12}5d6s^2(6, 3/2)_{13/2}$	17454,82
		$4f^{13}6s6p({}^3P_1^\circ)(7/2, 1)_{9/2}$	17613,66
		$4f^{13}6s6p({}^3P_1^\circ)(7/2, 1)_{5/2}$	17752,63
70	$\text{Yb}(4f^{14}6s^2 - {}^1S_0)$ 50 441	$4f^{14}6s6p({}^3P_0^\circ)$	17288,44
		$4f^{14}6s6p({}^3P_1^\circ)$	17992,01
		$4f^{14}6s6p({}^3P_2^\circ)$	19710,39
		$4f^{13}({}^2F_{7/2}^\circ)5d6s^2(7/2, 3/2)_2^\circ$	23188,52
		$4f^{14}5d6s({}^3D_1)$	24489,10
		$4f^{14}5d6s({}^3D_2)$	24751,95
		$4f^{14}6s6p({}^1P_1^\circ)$	25068,23
		$4f^{14}5d6s({}^3D_3)$	25270,90
71	$\text{Lu}(4f^{14}5d6s^2 - {}^2D_{3/2})$ 43762,4	$4f^{13}({}^2F_{7/2}^\circ)5d6s^2(7/2, 3/2)_5^\circ$	25859,68
		$5d6s^2({}^2D_{5/2})$	1993,9
		$6s^26p({}^2P_{1/2}^\circ)$	4136,0

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
72	Hf($5d^2 6s^2 \rightarrow {}^3F_2$) 55 600	$6s^2 6p({}^2P_{3/2})$	7476,3
		$5d 6s({}^3D) 6p({}^4F_{3/2})$	17427,3
		$5d 6s({}^3D) 6p({}^4F_{5/2})$	18504,6
		$5d^2({}^3F) 6s({}^4F_{3/2})$	18851,3
		$5d^2({}^3F) 6s({}^4F_{5/2})$	19403,3
		$5d^2 6s^2({}^3F_3)$	2356,7
		$5d^2 6s^2({}^3F_4)$	4567,6
		$5d^2 6s^2({}^3P_0)$	5521,8
		$5d^2 6s^2({}^1D_2)$	5638,6
		$5d^2 6s^2({}^3P_1)$	6572,6
		$5d^2 6s^2({}^3P_2)$	8983,8
		$5d^2 6s^2({}^1G_4)$	10532,5
		$5d^3({}^4F) 6s({}^6F_1)$	14092,3
		$6s({}^5F_2)$	14740,7
73	Ta($5d^3 6s^2 \rightarrow {}^4F_{3/2}$) 63 600	$6s({}^5F_3)$	15673,3
		$6s({}^5F_4)$	16766,6
		$6s({}^5F_5)$	17901,3
		$5d^3 6s^2({}^4F_{5/2})$	2010,1
		$({}^4F_{7/2})$	3963,9
		$({}^4F_{9/2})$	5621,0
		$5d^3 6s^2({}^4P_{1/2})$	6049,4
		$({}^4P_{3/2})$	6068,9
74	W($5d^4 6s^2 \rightarrow {}^5D_0$) 64 000	$({}^4P_{5/2})$	9253,4
		$5d^4 6s^2({}^5D_1)$	1670,3
		$5d^5({}^6S) 6s({}^7S_3)$	2951,3
		$5d^4 6s^2({}^5D_2)$	3325,5
		$({}^5D_3)$	4830,0
		$({}^5D_4)$	6219,3
75	Re($5d^5 6s^2 \rightarrow {}^6S_{5/2}$) 64 000	$5d^4 6s^2({}^3P_0)$	9528,1
		$5d^5 6s^2({}^4P_{5/2})$	11584,0
		$5d^6({}^5D) 6s({}^6D_{9/2})$	11754,5
		$5d^5 6s^2({}^4P_{3/2})$	13826,1
		$5d^6({}^5D) 6s({}^6D_{7/2})$	14216,9
		$5d^6 6s^2({}^4G_{5/2})$	14621,5
76	Os($5d^6 6s^2 \rightarrow {}^5D_4$) 70 450	$5d^6 6s^2({}^5D_2)$	2740,5
		$({}^5D_3)$	4159,3
		$5d^7({}^4F) 6s({}^6F_5)$	5143,9
		$5d^6 6s^2({}^5D_1)$	5766,1
		$({}^5D_0)$	6092,8
		$5d^7({}^4F) 6s({}^6F_4)$	8742,8

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический пре- дел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
77	Ir (5d ⁷ 6s ² — ⁴ F _{9/2})	5d ⁸ (³ F)6s(⁴ F _{9/2})	2835,0
		5d ⁷ 6s ² (⁴ F _{3/2})	4078,9
	73 000	(⁴ F _{5/2})	5784,6
		(⁴ F _{7/2})	6323,9
		5d ⁸ (³ F)6s(⁴ F _{7/2})	7106,6
		(⁴ F _{5/2})	9877,5
78	Pt (5d ⁹ 6s— ³ D ₃)	5d ⁹ (² D _{5/2})6s(³ D ₂)	776
		5d ⁸ 6s ² (³ F ₄)	824
	72 300	5d ¹⁰ (¹ S ₀)	6140
		5d ⁸ 6s ² (³ P ₂)	6567
79	Au (5d ¹⁰ 6s— ² S _{1/2})	5d ⁹ 6s ² (² D _{5/2})	9161,18
		(² D _{3/2})	21 435
	74409,0	6p(² P _{1/2})	37 359
		(² P _{3/2})	41 174
80	Hg (5d ¹⁰ 6s ² — ¹ S ₀)	6p(³ P ₀)	37645,24
		(³ P ₁)	39412,46
	84184,1	(³ P ₂)	44043,14
		6p(¹ P ₁)	54068,90
		7s(³ S ₁)	62350,54
		7s(¹ S ₀)	63928,34
		5d ⁹ 6s ² (² D _{5/2})6p(³ P ₂)	68886,6
		7p(³ P ₀)	69516,7
		(³ P ₁)	69661,9
		(³ P ₂)	71207,5
		7p(¹ P ₁)	71295,1
		6d(¹ D ₂)	71333,30
		6d(³ D ₁)	71336,26
		(³ D ₂)	71396,33
		(³ D ₃)	71431,42
81	Tl (6s ² 6p— ² P _{1/2})	6p(² P _{3/2})	7793
		7s(² S _{1/2})	26 477
	49266,7	7p(² P _{1/2})	34 160

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
82	Pb ($6p^2-(1/2, 1/2)_0$) 59819,6	$7p (^2P_{3/2}^\circ)$	35 161
		$6d (^2D_{3/2})$	36 118
		$6d (^2D_{5/2})$	36 200
		$6p^2 (3/2, 1/2)_1$	7819,26
		$6p^2 (3/2, 1/2)_2$	10650,33
		$6p^2 (3/2, 3/2)_2$	21457,80
		$6p^2 (3/2, 3/2)_0$	29466,83
		$6p7s (1/2, 1/2)_0^\circ$	34959,91
		$6p7s (1/2, 1/2)_1^\circ$	35287,22
		$6p7p (1/2, 1/2)_1$	42918,64
		$6p7p (1/2, 1/2)_0$	44400,89
		$6p7p (1/2, 3/2)_1$	44674,99
		$6p7p (1/2, 3/2)_2$	44809,36
		$6p6d-1/2 [5/2]_2^\circ$	45443,17
83	Bi ($6p^3-^4S_{3/2}^\circ$) 58 762	$6p^3 (^2D_{3/2}^\circ)$	11419,0
		$6p^3 (^2D_{5/2}^\circ)$	15437,5
		$6p^3 (^2P_{1/2}^\circ)$	21660,9
		$6p^2 (^3P_0)7s (^4P_{1/2})$	32588,2
		$6p^3 (^2P_{3/2}^\circ)$	33164,80
		$7p (^2P_{1/2}^\circ)$	41125,0
		$7p (^2P_{3/2}^\circ)$	42940,5
		$6d (^2D_{3/2})$	43912,3
		$6d (^2D_{5/2})$	44817,1
		$6p^2 (^3P_1)7s (^4P_{3/2})$	44865,1
		$7s (^2P_{1/2})$	45915,6
		$6p^2 (^3P_0)8s (^4P_{1/2})$	47373,3
		$6p^2 (^3P_2)7s (^4P_{5/2})$	48489,76
		$7s (^2P_{3/2})$	49460,80
88	Ra ($6p^67s^2-^1S_0$) 42573,4	$7p (^3P_0^\circ)$	13078,4
		$6d (^3D_1)$	13715,9
		$6d (^3D_2)$	13994,0
		$7p (^3P_1^\circ)$	13999,4

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
89	Ac ($6d7s^2$ — $^2D_{3/2}$) 42 000	$6d (^3D_3)$	14707,4
		$7p (^3P_2^\circ)$	16688,5
		$6d (^1D_2)$	17081,5
		$7p (^1P_1^\circ)$	20715,7
		$6d7s^2 (^2D_{5/2})$	2231,4
		$6d^27s (^4F_{3/2})$	9217,3
		$6d^27s (^4F_{5/2})$	9863,6
		$6d^27s (^4F_{7/2})$	10906,0
		$6d^27s (^4F_{9/2})$	12078,1
		$7s^2 (^1S) 7p (^2P_{1/2}^\circ)$	—
		$7s^27p (^2P_{3/2}^\circ)$	—
		$6d7s (^3D)7p (^4F_{3/2}^\circ)$	13712,9
		$6d7s7p (^4F_{5/2}^\circ)$	14940,7
		$6d7s7p (^4D_{1/2}^\circ)$	17199,7
		$6d7s7p (^4F_{7/2}^\circ)$	17683,9
		$6d7s7p (^2D_{3/2}^\circ)$	17736,3
		$6d7s7p (^2D_{5/2}^\circ)$	17950,7
		$6d7s7p (^4D_{3/2}^\circ)$	19012,5
90	Th ($6d^27s^2$ — 3F_2) 49 000	$6d^27s^2 (^3P_0)$	2558,06
		$6d^27s^2 (^3F_3)$	2869,26
		$6d^27s^2 (^3P_2)$	3687,99
		$6d^27s^2 (^3P_1)$	3865,48
		$6d^27s^2 (^3F_4)$	4961,66
		$6d^37s (^5F_1)$	5563,14
		$6d^37s (^5F_2)$	6362,40
		$6d^27s^2 (^1D_2)$	7280,13
		$6d^37s (^5F_3)$	7502,29
		$5f6d7s^2 (^3H_4^\circ)$	7795,27
		$6d^27s^2 (^1G_4)$	8111,01
		$5f6d7s^2 (^3F_2^\circ)$	8243,60
		$6d^37s (^5F_4)$	8800,25
		$6d^37s (^5F_5)$	9804,81
		$5f6d7s^2 (^1G_4^\circ)$	10414,13

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический пре- дел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
91	Pa ($5f^2 6d 7s^2$ — $^4K_{11/2}$) 47 000	$5f 6d 7s^2 (^3G_3^\circ)$	10526,54
		$6d 7s^2 7p (^3F_2^\circ)$	10783,15
		$5f^2 (^3H) 6d 7s^2 (^4I_{9/2})$	825,42
		—	1375,78
		$5f^2 (^3F) 6d 7s^2 (^4G_{5/2})$	1618,33
		—	2840,25
		$5f^2 (^3F) 6d 7s^2 (^4H_{7/2})$	2966,52
		—	3033,92
		—	3188,27
		—	3292,50
		$5f^2 (^3H) 6d 7s^2 (^4H_{9/2})$	3323,86
		—	3588,97
		—	3670,56
		$5f^2 (^3H) 6d 7s^2 (^4K_{13/2})$	3711,62
		—	3794,19
		—	3819,00
92	U ($5f^3 6d 7s^2$ — $^5L_6^\circ$) 49 960	—	3935,46
		—	3991,59
		$5f^2 (^3H) 6d 7s^2 (^4I_{11/2})$	4121,44
		—	4195,27
		$5f^3 6d 7s^2 (^5K_5^\circ)$	620,32
		$5f^3 6d 7s^2 (^5L_7^\circ)$	3800,83
		$5f^3 6d 7s^2 (^5H_3^\circ + ^3G_3^\circ)$	3868,49
		$5f^3 6d 7s^2 (^5K_6^\circ)$	4275,71
		$5f^3 6d 7s^2 (^5I_4^\circ)$	4453,42
		$5f^3 6d 7s^2 (^3I_5^\circ)$	5762,08
		$5f^3 6d 7s^2 (^3P_0^\circ)$	5988,06
		$5f^3 6d 7s^2 (^5H_4^\circ + ^3H_4^\circ)$	5991,31
		$5f^3 6d^2 7s (^7M_6^\circ)$	6249,03
		$5f^3 6d 7s^2 (J=6)_6^\circ$	7005,53
		$5f^4 7s^2 (^5I_4)$	7020,71
		$5f^3 6d 7s^2 (^5G_3^\circ + ^5H_3^\circ)$	7103,92
		$5f^3 6d 7s^2 (^5G_2^\circ)$	7191,68

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
93	Np ($5f^4 6d 7s^2 - {}^6L_{11/2}$) 50 540	$5f^3 6d 7s^2 ({}^5K_7^\circ)$	7326,12
		$5f^3 6d 7s^2 ({}^5L_8^\circ)$	7645,65
		$5f^3 6d 7s^2 ({}^5I_5^\circ)$	7864,20
		$5f^3 6d^2 7s ({}^7M_7^\circ)$	8118,63
		$5f^3 6d 7s^2 (J=4)_4^\circ$	8133,29
		$5f^3 6d 7s^2 ({}^5G_2^\circ)$	8856,99
		$5f^3 6d 7s^2 ({}^5H_3^\circ)$	8878,55
		$5f^4 7s^2 ({}^5I_5)$	10051,31
		$5f^3 6d 7s^2 ({}^3L_7^\circ)$	10069,18
		$5f^3 6d^2 7s ({}^7L_5^\circ)$	10081,03
		$5f^4 ({}^5I) 6d 7s^2 ({}^6K_{9/2})$	2033,94
		$5f^5 7s^2 ({}^6H_{5/2}^\circ)$	2831,14
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6I_{7/2})$	3450,97
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6L_{13/2})$	3502,83
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^4G_{5/2})$	4615,71
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6K_{11/2})$	5185,00
		$5f^5 7s^2 ({}^6H_{7/2}^\circ)$	5456,13
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6G_{3/2})$	6474,29
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6I_{9/2})$	6643,50
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^4H_{7/2}, {}^6I_{7/2})$	6892,08
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6L_{15/2})$	6903,45
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6H_{5/2})$	7015,18
		$5f^4 ({}^6I) 6d^2 ({}^3F) 7s ({}^8M_{11/2})$	7112,43
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6K_{13/2})$	7792,02
		$5f^5 7s^2 ({}^6H_{9/2}^\circ)$	7805,80
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^4H_{9/2})$	7871,86
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6H_{7/2})$	8278,30
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6I_{11/2})$	8706,56
		$5f^4 6d^2 7s ({}^8M_{13/2})$	8950,61

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T , см^{-1}
94	Pu ($5f^6 7s^2 - {}^7F_0$) 49 000	$5f^4 6d 7s^2 ({}^6H_{7/2})$	9507,73
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6H_{5/2})$	9524,44
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^6I_{11/2})$	9694,04
		$5f^5 7s^2 ({}^6H_{11/2}^\circ)$	9854,96
		$5f^4 6d^2 7s ({}^6L_{9/2})$	9869,64
		$5f^4 6d 7s^2 ({}^4L_{13/2})$	9955,10
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_1)$	2203,61
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_2)$	4299,66
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_3)$	6144,32
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 3/2]_4^\circ$	6313,65
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_4)$	7774,66
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 3/2]_2^\circ$	8767,90
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_5)$	9179,27
		$5f^5 6d 7s^2 [7/2, 3/2]_5^\circ$	9386,60
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 3/2]_3^\circ$	9724,14
		$5f^6 7s^2 ({}^6D_0)$	9772,54
		$5f^6 7s^2 ({}^7F_6)$	10238,48
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 3/2]_1^\circ$	10486,70
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_0^\circ$	11746,92
		$5f^5 6d 7s^2 [7/2, 3/2]_3^\circ$	11840,48
		$5f^5 6d 7s^2 [7/2, 3/2]_4^\circ$	12159,21
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_1^\circ$	12177,69
		$5f^5 6d 7s^2 [7/2, 3/2]_2^\circ$	12322,38
		$5f^5 6d 7s^2 [9/2, 3/2]_6^\circ$	12351,29
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_2^\circ$	13517,45
		$5f^6 6d 7s ({}^9H_2)$	13528,27
		$5f^6 7s^2 (J=1)$	13677,91
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_3^\circ$	13726,44
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_5^\circ$	14291,85
		$5f^6 6d 7s ({}^9H_2)$	14342,04
		$(J=1)^\circ$	14416,06
		$5f^5 6d 7s^2 [5/2, 5/2]_4^\circ$	14853,14
96	Cm ($5f^7 6d 7s^2 - {}^9D_2^\circ$) 48 600	$5f^7 6d 7s^2 ({}^9D_3^\circ)$	302,15
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^9D_4^\circ)$	815,65
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_6)$	1214,18
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^9D_5^\circ)$	1764,26
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^9D_6^\circ)$	3809,35
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_4)$	4877,58

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния); оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня T, см ⁻¹
97	Bk ($5f^9 7s^2 - {}^6H_{15/2}^\circ$) 50 200	$5f^8 7s^2 ({}^7F_5)$	5136,50
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_3)$	7208,81
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_2)$	7521,10
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_1)$	8696,66
		$5f^8 7s^2 ({}^7F_0)$	8887,23
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^1D_4^\circ)$	8958,45
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^1D_5^\circ)$	9064,87
		$5f^7 7s^2 7p ({}^9P_3)$	9263,36
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^1D_3^\circ)$	9458,05
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^1D_2^\circ)$	9671,69
		$5f^7 7s^2 7p ({}^9P_4)$	9784,52
		$5f^7 6d 7s^2 ({}^1D_1^\circ)$	10133,86
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_2^\circ)$	10144,93
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_3^\circ)$	10484,87
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_4^\circ)$	10971,17
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_5^\circ)$	11641,68
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_6^\circ)$	12534,98
		$5f^7 6d^2 7s ({}^{11}F_7^\circ)$	13720,28
		$5f^9 7s^2 ({}^6F_{11/2}^\circ)$	5416,69
		$5f^9 7s^2 ({}^6F_{9/2}^\circ)$	5757,44
		$5f^9 7s^2 ({}^6H_{13/2}^\circ)$	6530,71
		$5f^8 6d 7s^2 ({}^8G_{13/2})$	9141,12
		$5f^8 6d 7s^2 ({}^8G_{11/2})$	9300,58
		$5f^9 7s^2 ({}^6H_{11/2}^\circ)$	9535,12
		$5f^8 6d 7s^2 ({}^8G_{15/2})$	10587,34
		$5f^9 7s^2 ({}^6H_{9/2})$	10605,57
		$5f^8 6d 7s^2 ({}^8G_{9/2})$	10735,96
		$5f^8 6d 7s^2 ({}^8G_{7/2})$	13191,92
98	Cf ($5f^{10} 7s^2 - {}^5I_8$) 50 800	$5f^{10} 7s^2 ({}^5F_5)$	8516,4
		$5f^{10} 7s^2 ({}^5I_7)$	9078,14
		$5f^{10} 7s^2 ({}^3P_2)$	10589,2
		$5f^{10} 7s^2 ({}^5I_6)$	11074,4
		$5f^{10} 7s^2 ({}^5F_4)$	13965,7
		$5f^{10} 7s^2 ({}^5I_4)$	15375,5
		$5f^{10} 7s^2 ({}^5I_5)$	15846,14
99	Es ($5f^{11} 7s^2 - {}^4I_{15/2}^\circ$) 51 800	$5f^{11} 7s^2 ({}^2H_{11/2}^\circ)$	8759,25
		$5f^{11} 7s 7p ({}^6I_{15/2})$	17802,89
		$5f^{11} 7s 7p ({}^6I_{17/2})$	19209,15
		$5f^{10} 6d 7s^2 ({}^6I_{17/2})$	19367,93

6.2. ДИАГРАММЫ УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ И СПЕКТРОВ АТОМОВ

На рис. 6.1—6.43 построены диаграммы уровней энергии и спектров (их называют также диаграммами Гроттриана) нейтральных элементов с атомным номером $Z=1\div 30$ (H—Zn) и некоторых атомов из I, II и VIII групп таблицы Менделеева с валентной электронной оболочкой вида ns , ns^2 и np^6 (Kr, Rb, Sr, Cd, Xe, Cs, Ba и Tl). Основное назначение этих диаграмм сводится к тому, чтобы дать наглядное представление о распределении возбужденных состояний по электронным конфигурациям атомов и отметить наиболее интенсивные переходы в наблюдаемом спектре излучения или поглощения.

Были рассмотрены лишь состояния, лежащие ниже ионизационного предела атома. Из рассмотрения исключались слишком высокие ридберговские уровни возбуждения и автоионизационные состояния, соответствующие двухэлектронному возбуждению и расположенные в непрерывном спектре атома. Положение атомных уровней энергии (обычно под ними подразумевалось положение центров тяжести мультиплетов T , см. § 6.1) определяется по шкале ординат, и, кроме того, цифры над горизонтальными линиями уровней отмечают соответствующее значение энергии возбуждения в эВ. Понятные из вида диаграмм дополнительные метки (штрихи) используются для обозначения электронных конфигураций и термов атомного остова для валентных электронов nl' и nl'' . Интервалы тонкой структуры с нужным знаком, отвечающим либо нормальному (+), либо обращенному (—) мультиплету, проставлены рядом с линиями уровней и заключены в прямоугольную рамку.

Рядом с численным значением длины волны перехода λ (в ед. 10^{-10} м) в круглых скобках иногда отмечены значения соответствующей силы осцилляторов в поглощении f_{ik} . (Некоторые значения f_{ik} даны в сокращенной записи, например $2^{-3}\equiv 2\cdot 10^{-3}\equiv 0,002$ и т. д.) Нижний индекс у λ или f_{ik} отмечает либо соответствующее квантовое число полного электронного момента J_k верхнего уровня, либо оба момента J_i , J_k нижнего и верхнего уровней, обладающих мультиплетной структурой. Наконец, звездочка (*) рядом со значением f_{ik} отмечает усредненное значение силы осцилляторов для мультиплетных уровней, связанных радиационным переходом (см. определение величины f_{ik}^m в § 6.3).

В случае атомов инертного газа (Ne—Xe) были построены отдельно диаграммы энергетических уровней с указанием положения нижней и верхней компонент мультиплетных подуровней (отмеченных соответственно чертой снизу под символом и сверху над символом квантового числа полного момента атома) для заданной электронной конфигурации и квантовых чисел nl валентного электрона. Кроме того, на рис. 6.40—6.43 построены диаграммы Гроттриана для нижних $2p$ — $1s$ -переходов (в обозначениях Пашена) с указанием соответствующей вероятности перехода A_{ki} и радиационного времени жизни уровня τ_k .

Представленная на рис. 6.1—6.43 информация была почерпнута из специальных руководств и отдельных публикаций по атомным уровням энергии (см. библиографию к § 6.1), из таблиц спектральных линий [1—5] и справочных изданий по вероятностям оптических переходов (см. библиографию к § 6.3, к которой добавим ссылку на цикл работ по измерению A_{ki} и τ_k для атомов инертного газа [6]). Погрешности в определении значений T , λ , f_{ik} , A_{ki} и τ_k были учтены при округлении значащих цифр в пределах ± 1 — ± 2 для последней цифры. Напомним некоторые правила отбора, относящиеся к разрешенным радиационным переходам между состояниями атомных частиц [7].

1. Законы сохранения момента и четности атома приводят к определенным правилам отбора, ограничивающим возможные изменения состояний излучающего атома. Наиболее интенсивные электрические дипольные переходы ($E1$) из состояний $i(LSJM)\rightarrow k(L'S'J'M')$ разрешены при условии

$$\Delta J = J - J' = 0, \pm 1 \text{ и } 0 \leftarrow / \rightarrow 0;$$

четный терм \rightleftharpoons нечетный терм.

2. В случае состояний, построенных по типу LS -связи, выполняются дополнительные правила отбора:

$$\Delta S = S - S' = 0;$$

$$\Delta L = L - L' = 0, \pm 1 \text{ и } 0 \leftarrow / \rightarrow 0.$$

Стоит, наконец, отметить, что по принятому в спектроскопии соглашению все длины волн переходов с $\lambda > 200$ нм относят к переходам в воздухе, а более короткие длины волн — к переходам в вакууме. Если σ — волновое число в вакууме, равное энергии перехода между уровнями $\Delta E/h$, то показатель преломления воздуха для такой волны находят по дисперсионной формуле Эдлена [8]:

$$n = 1 + 10^{-4} \left[0,834213 + \frac{2,40603}{1,3 - 10^{-10} \sigma^2} + \frac{0,015997}{0,389 - 10^{-10} \sigma^2} \right],$$

где значение σ выражено в см^{-1} . Зная n , легко пересчитать длину волны излучения в вакууме $\lambda_{\text{вак}}$ к $\lambda_{\text{возд}}$, соответствующей наблюдаемому переходу в воздухе:

$$\lambda_{\text{возд}} = \lambda_{\text{вак}}/n;$$

$$\lambda_{\text{вак}} = 10^8/\Delta E = 12398,5/\Delta E,$$

где λ выражено в 10^{-10} м, ΔE в первом равенстве — в см^{-1} , во втором — в эВ.

В табл. 6.2 включены расчетные значения соответствующей поправки $\Delta\lambda$ для перехода от длины волны в воздухе к длине волны в вакууме: $\Delta\lambda = \lambda_{\text{вак}} - \lambda_{\text{возд}}$.

Напомним в заключение, что по историческим причинам электронные термы некоторых сложных систем (в частности, элементов группы железа) дополнительно маркируют буквами латинского алфавита, проставляемыми в виде приставки перед символом термина: буквы a, b, c, \dots используются для обозначения низколежащих нечетных термов; z, y, x, \dots — низколежащих четных термов, e, f, \dots — высоковозбужденных нечетных термов и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. — М.: Атомиздат, 1966.
2. Стриганов А. Р., Одинова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов. — М.: Энергоиздат, 1982.
3. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий. 4-е изд. — М.: Наука, 1977.
4. Outred M. Tables of Atomic Spectral Lines for the 10^4 Å to $40 \cdot 10^3$ Å Region. — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1978, vol. 7, p. 1—262; Kelly R. L. Atomic and Ionic Spectrum Lines Below 2000 Angstroms (Hydrogen through Argon). — Rept. ORNL-5922 — Oak Ridge, Tenn.: Controlled Fusion Atomic Data Center, October 1982.
5. Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F. Tables of Spectral—Line Intensities. Part I. — NBS Monograph 145: US Gov't Printing Office, Washington, 1975.
6. Horiguchi H., Chang R. S. F., Setser D. W. Radiative lifetimes of Xe ($6p, 6p'$) states. — J. Chem. Phys., 1981, vol. 75, p. 1207; Inoue G., Ku J. K., Setser D. W. — Ibid, 1984, vol. 81, p. 5760 (см. также ссылки на более ранние работы по исследованию атомов Ne, Ar и Kr).
7. Hibbert A. Atomic Structure Theory. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part A/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1978, p. 1—69.
8. Edlén B. — Metrologia, 1966, vol. 2, p. 71.

Т а б л и ц а 6.2. Поправка $\Delta\lambda$ для перехода между длинами волн в вакууме и воздухе: $\lambda_{\text{возд}} = \lambda_{\text{вак}} - \Delta\lambda$; $\lambda_{\text{вак}} = \lambda_{\text{возд}} + \Delta\lambda$, 10^{-10} м

$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$	$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$	$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$
2000	0,648	2300	0,708	2600	0,777
2100	0,666	2400	0,730	2700	0,801
2200	0,687	2500	0,753	2800	0,825

$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$	$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$	$\lambda_{\text{возд}}$	$\Delta\lambda$
2900	0,850	7500	2,065	12 100	3,310
3000	0,874	7600	2,092	12 200	3,338
3100	0,899	7700	2,119	12 300	3,365
3200	0,925	7800	2,146	12 400	3,392
3300	0,950	7900	2,173	12 500	3,419
3400	0,975	8000	2,200	12 600	3,446
3500	1,001	8100	2,227	12 700	3,473
3600	1,027	8200	2,254	12 800	3,501
3700	1,053	8300	2,281	12 900	3,528
3800	1,079	8400	2,308	13 000	3,555
3900	1,105	8500	2,335	13 100	3,582
4000	1,131	8600	2,362	13 200	3,609
4100	1,157	8700	2,389	13 300	3,636
4200	1,183	8800	2,416	13 400	3,663
4300	1,209	8900	2,443	13 500	3,691
4400	1,236	9000	2,470	13 600	3,718
4500	1,262	9100	2,497	13 700	3,745
4600	1,288	9200	2,524	13 800	3,772
4700	1,315	9300	2,551	13 900	3,799
4800	1,341	9400	2,578	14 000	3,827
4900	1,368	9500	2,605	14 100	3,854
5000	1,394	9600	2,632	14 200	3,881
5100	1,421	9700	2,660	14 300	3,908
5200	1,448	9800	2,687	14 400	3,935
5300	1,474	9900	2,714	14 500	3,962
5400	1,501	10 000	2,741	14 600	3,990
5500	1,528	10 100	2,768	14 700	4,017
5600	1,554	10 200	2,795	14 800	4,044
5700	1,581	10 300	2,822	14 900	4,071
5800	1,608	10 400	2,849	15 000	4,10
5900	1,635	10 500	2,876	16 000	4,37
6000	1,661	10 600	2,903	17 000	4,64
6100	1,688	10 700	2,931	18 000	4,91
6200	1,715	10 800	2,958	19 000	5,19
6300	1,742	10 900	2,985	20 000	5,46
				21 000	5,73
6400	1,769	11 000	3,012	22 000	6,00
6500	1,796	11 100	3,039	23 000	6,27
6600	1,822	11 200	3,066	24 000	6,55
6700	1,849	11 300	3,093	25 000	6,82
6800	1,876	11 400	3,120	30 000	8,18
6900	1,903	11 500	3,148	35 000	9,54
7000	1,930	11 600	3,175	40 000	10,9
7100	1,957	11 700	3,202	45 000	12,3
7200	1,984	11 800	3,229	50 000	13,6
7300	2,011	11 900	3,256	75 000	20,4
7400	2,038	12 000	3,283	100 000	27,3

 $\text{He I}(1s^2-1s_0)$

Рис. 6.2. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома гелия

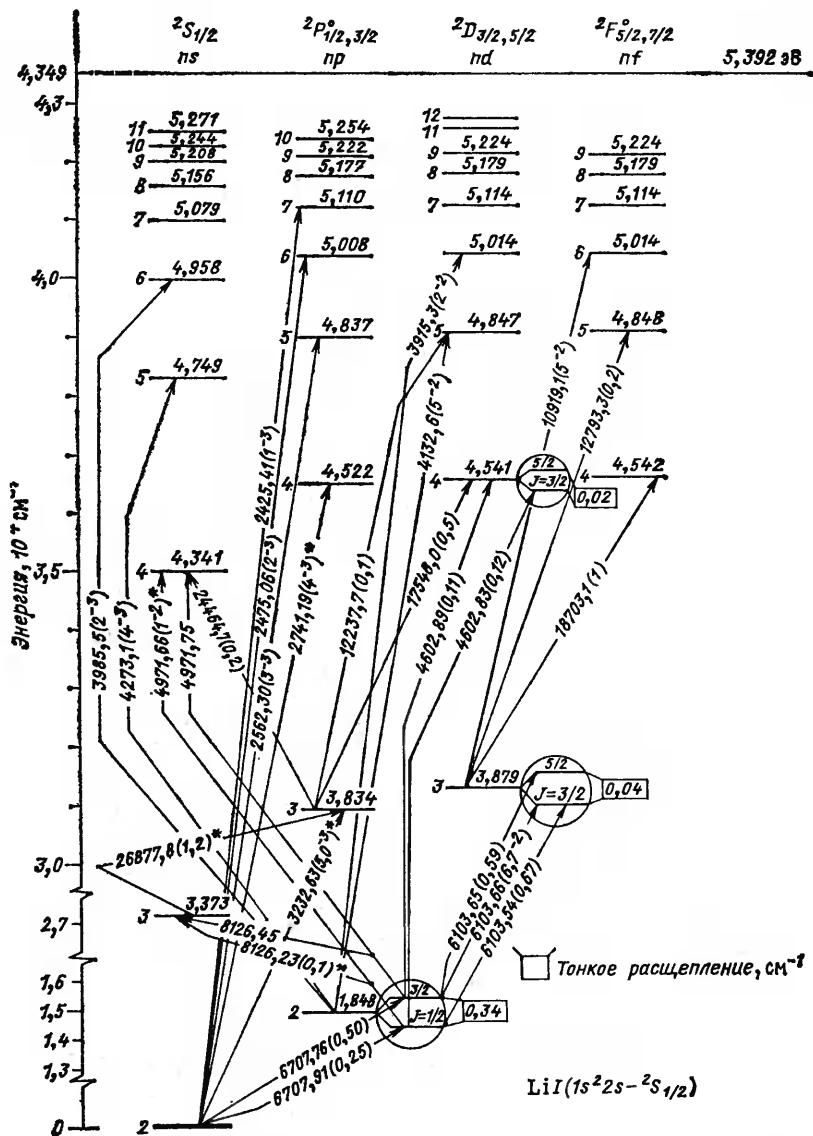


Рис. 6.3. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома лития

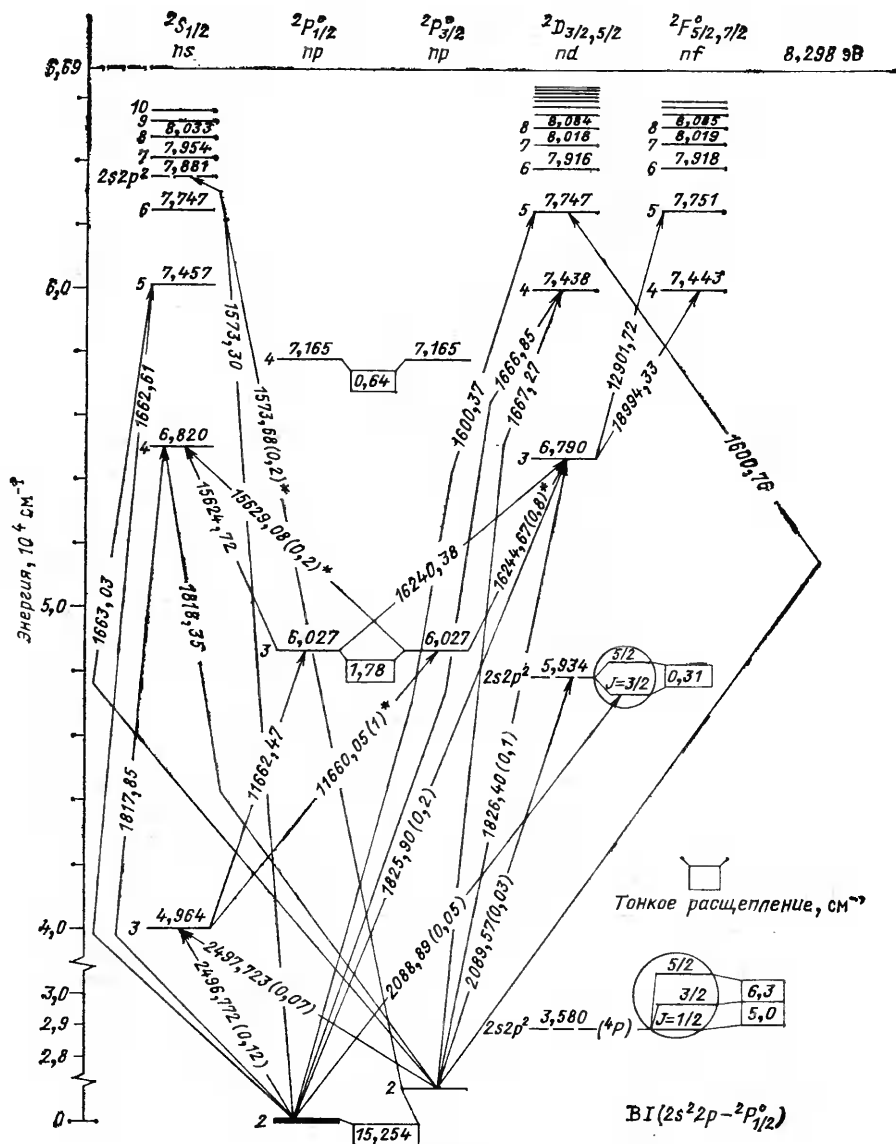


Рис. 6.5. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома бора

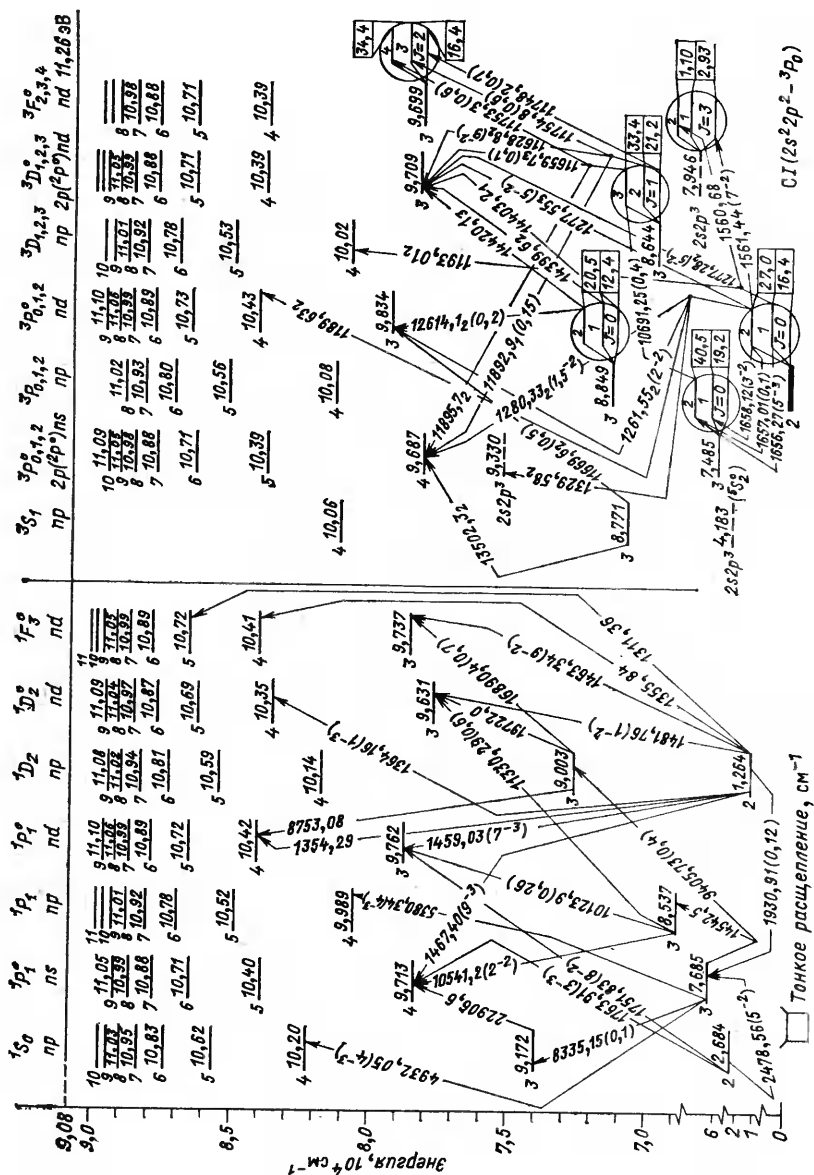


Рис. 6.6. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома углерода

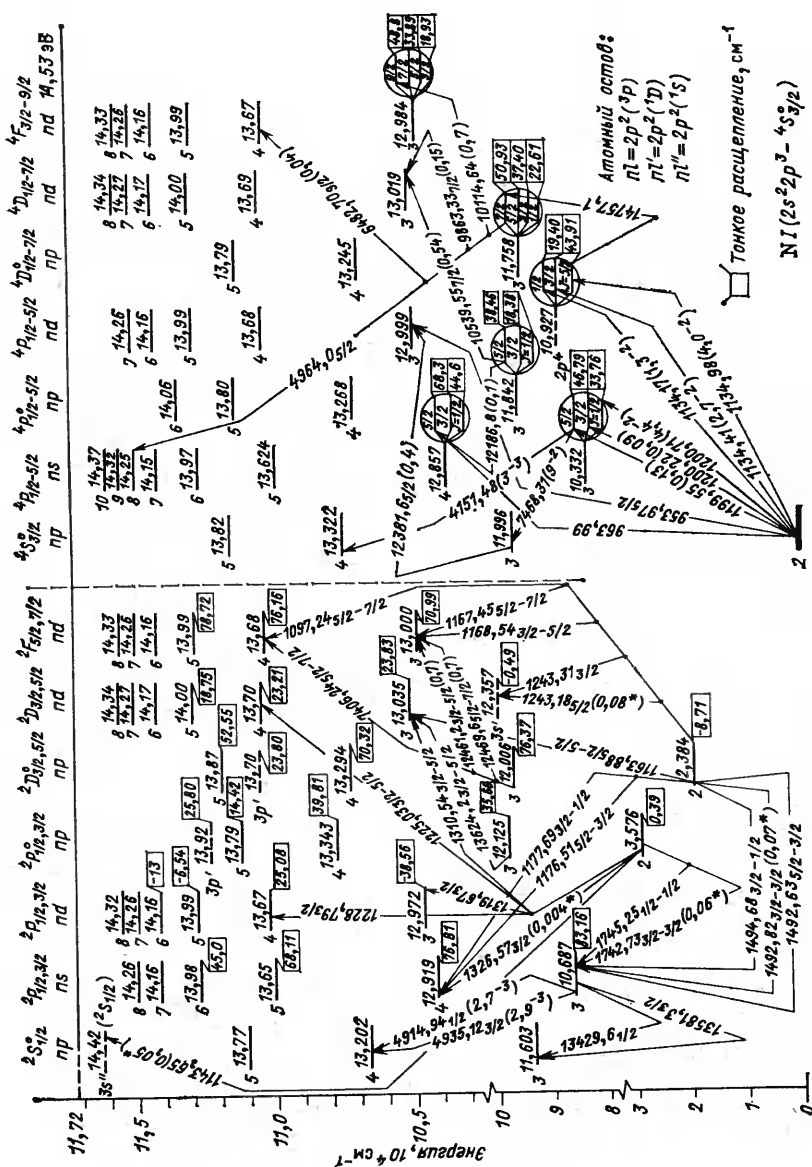


Рис. 6.7. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома азота

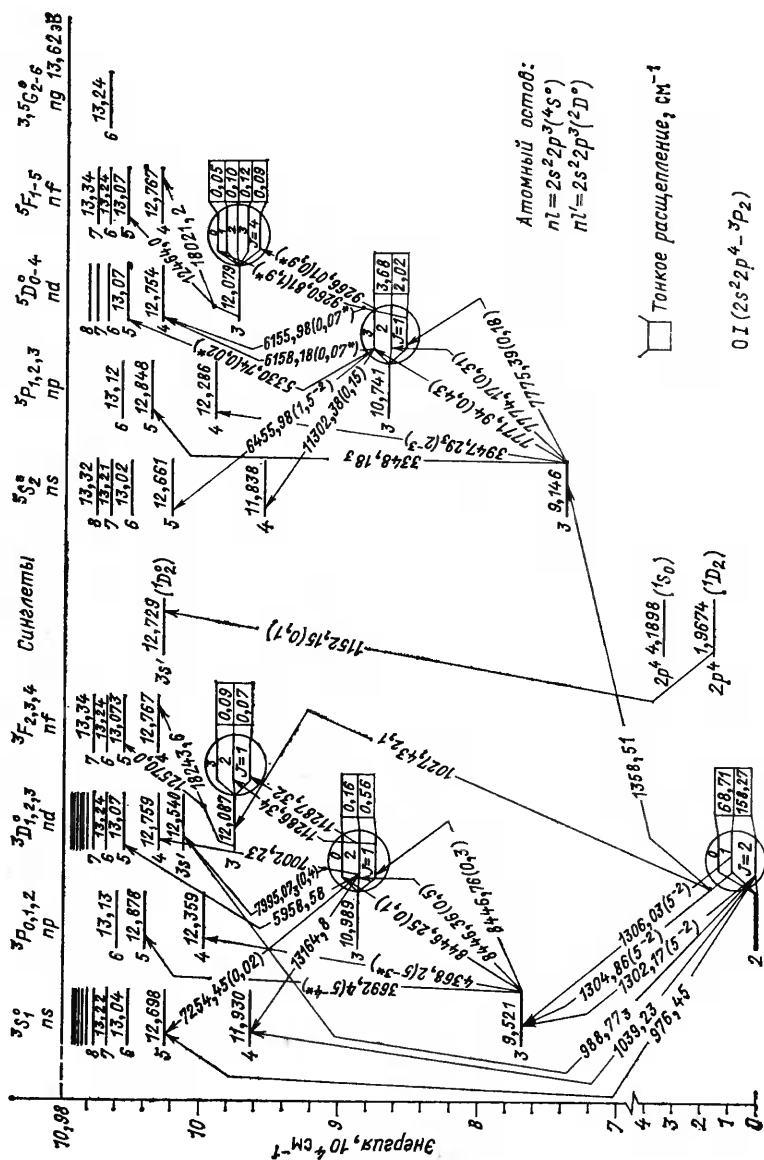


Рис. 6.8. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома кислорода

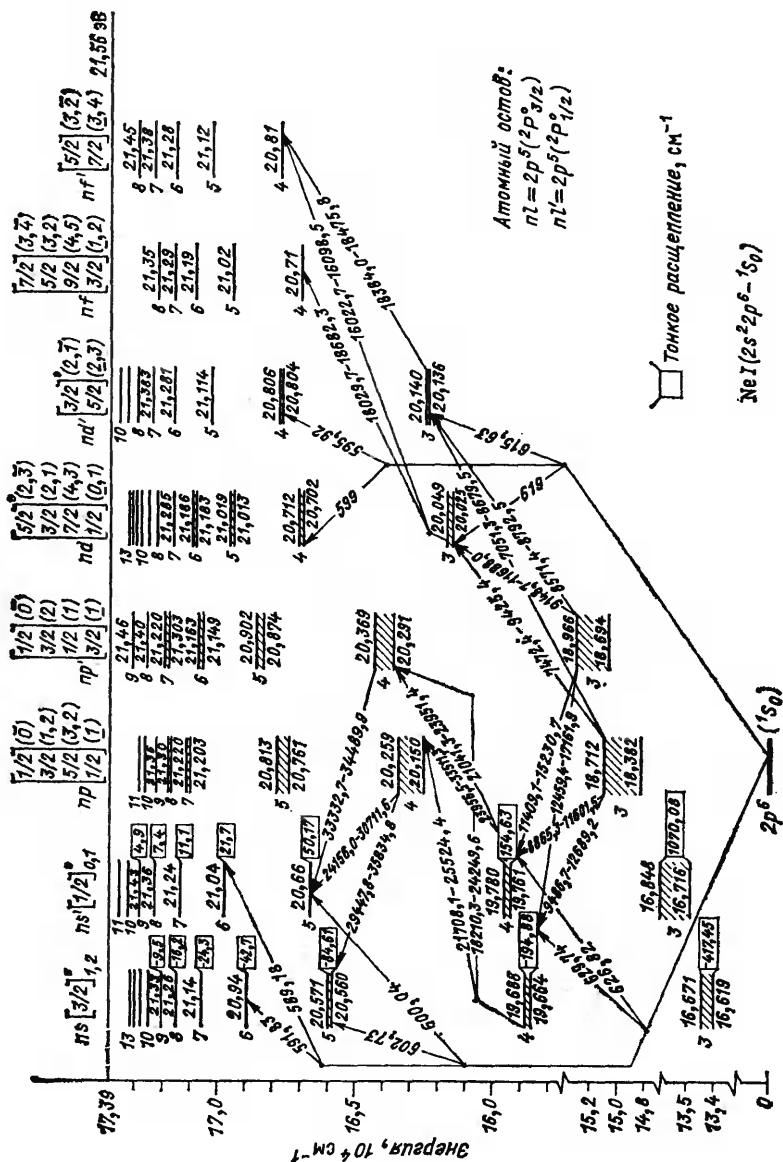


Рис. 6.10. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов. переходов для атома неона

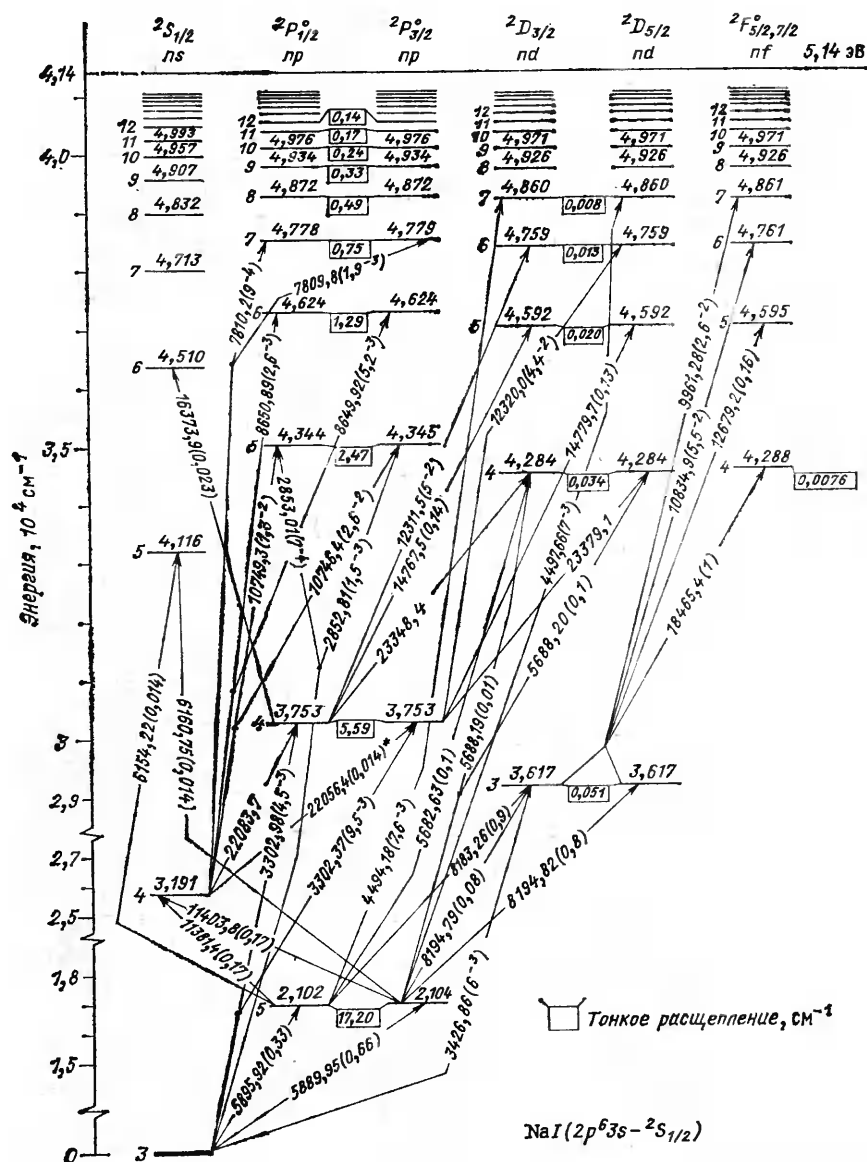


Рис. 6.11. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома натрия

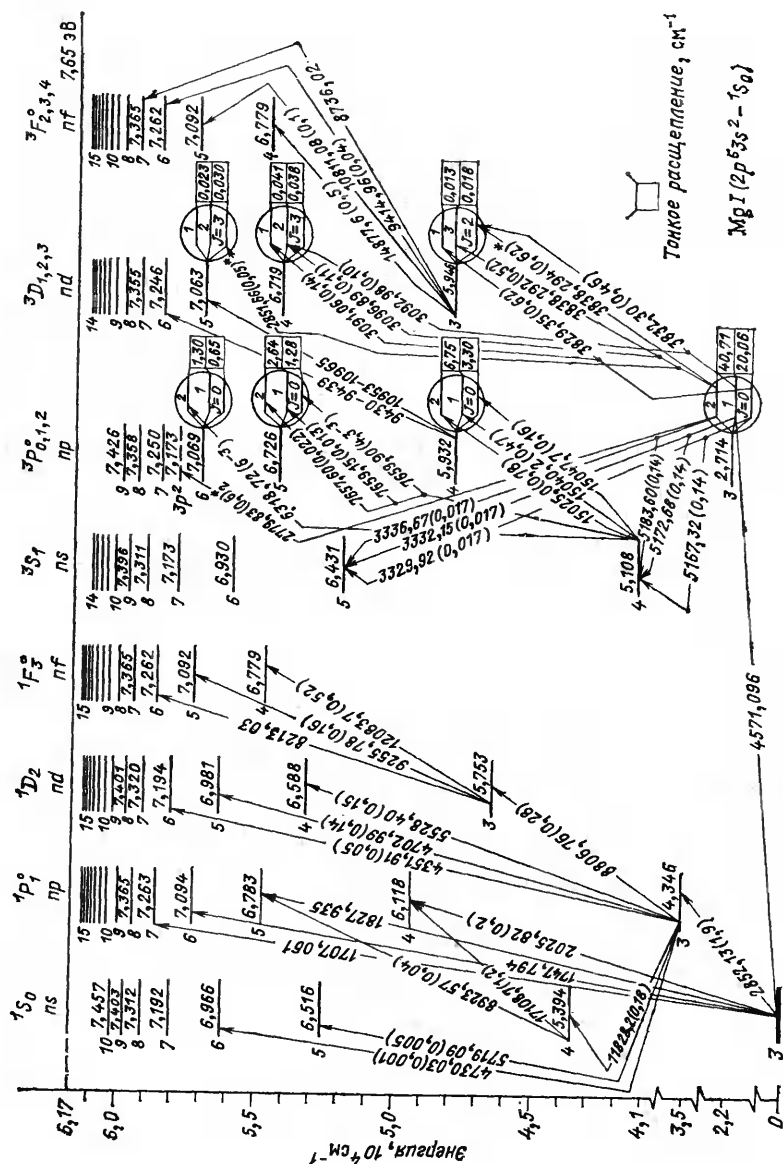


Рис. 6.12. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома магния

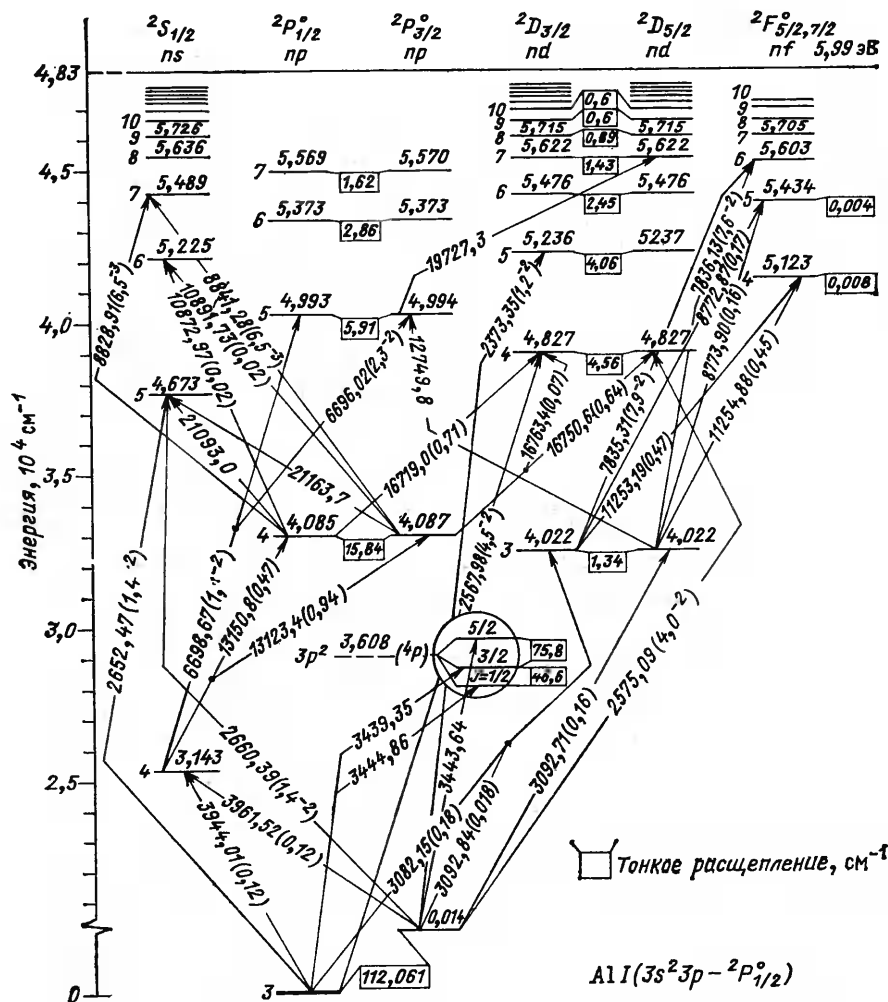


Рис. 6.13. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома алюминия

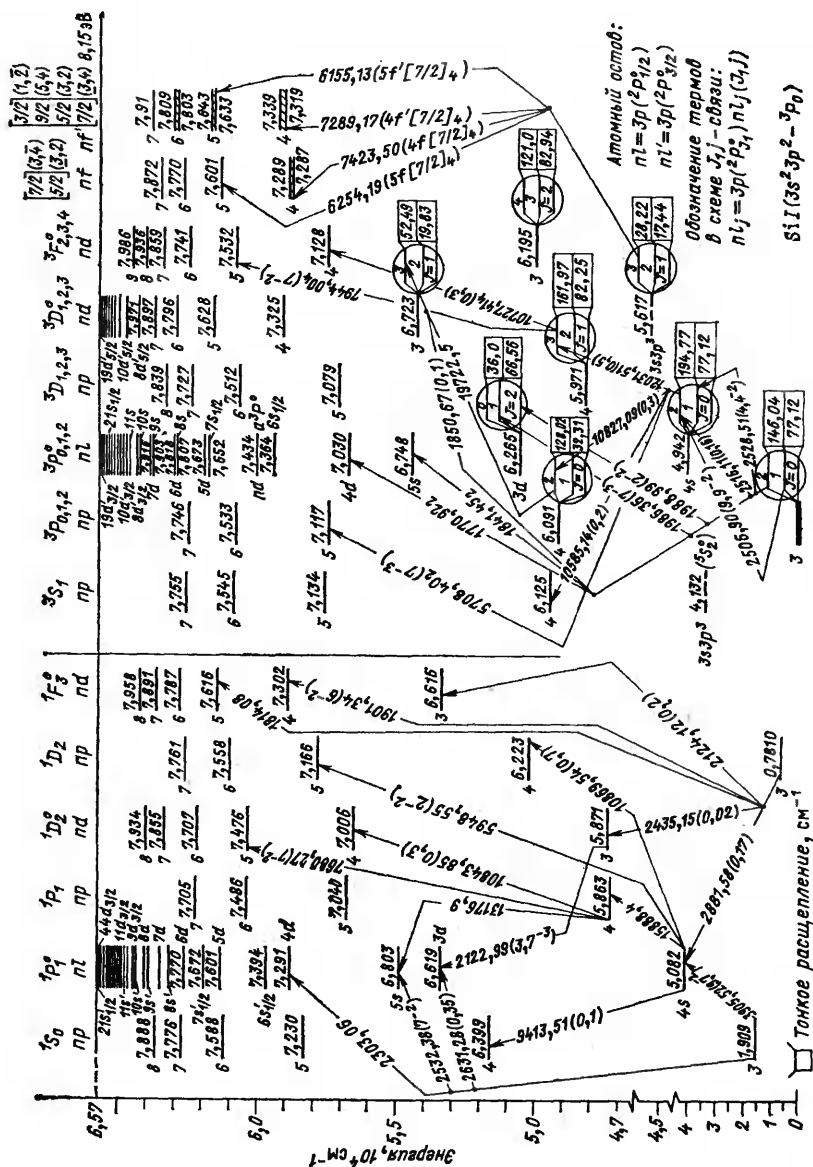


Рис. 6.14. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома кремния

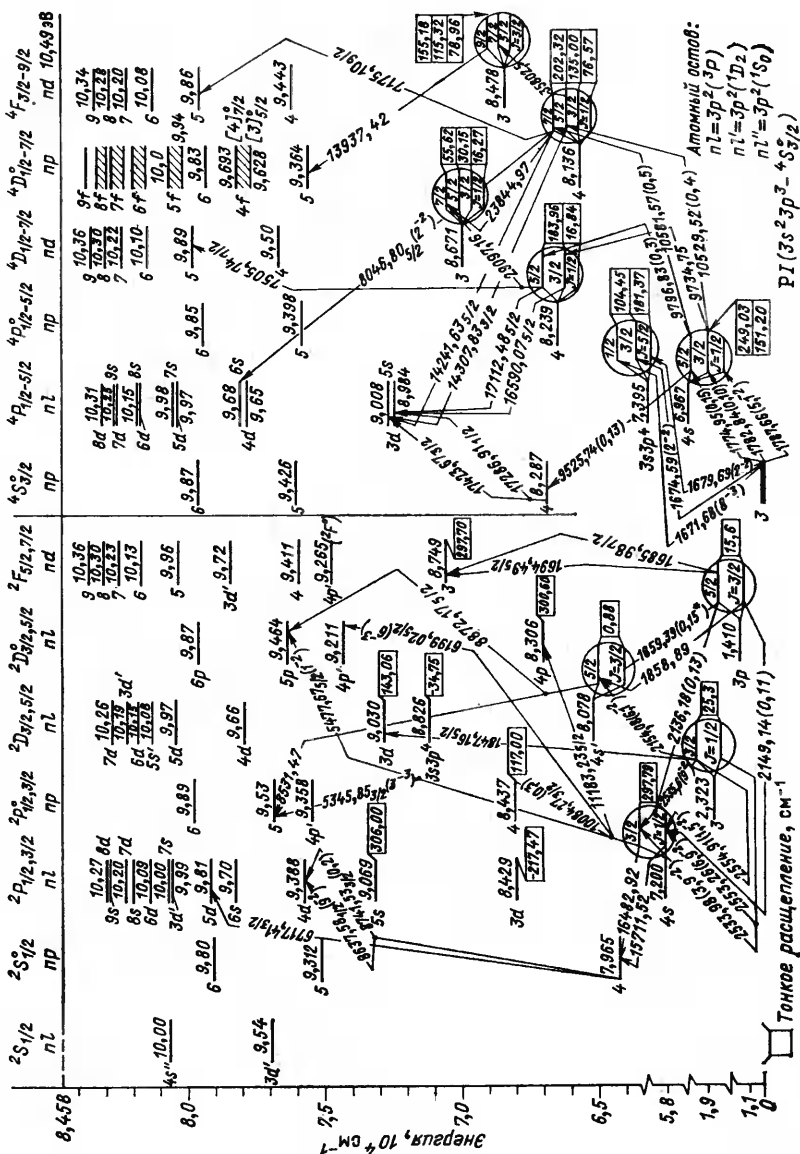


Рис. 6.15. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома фосфора

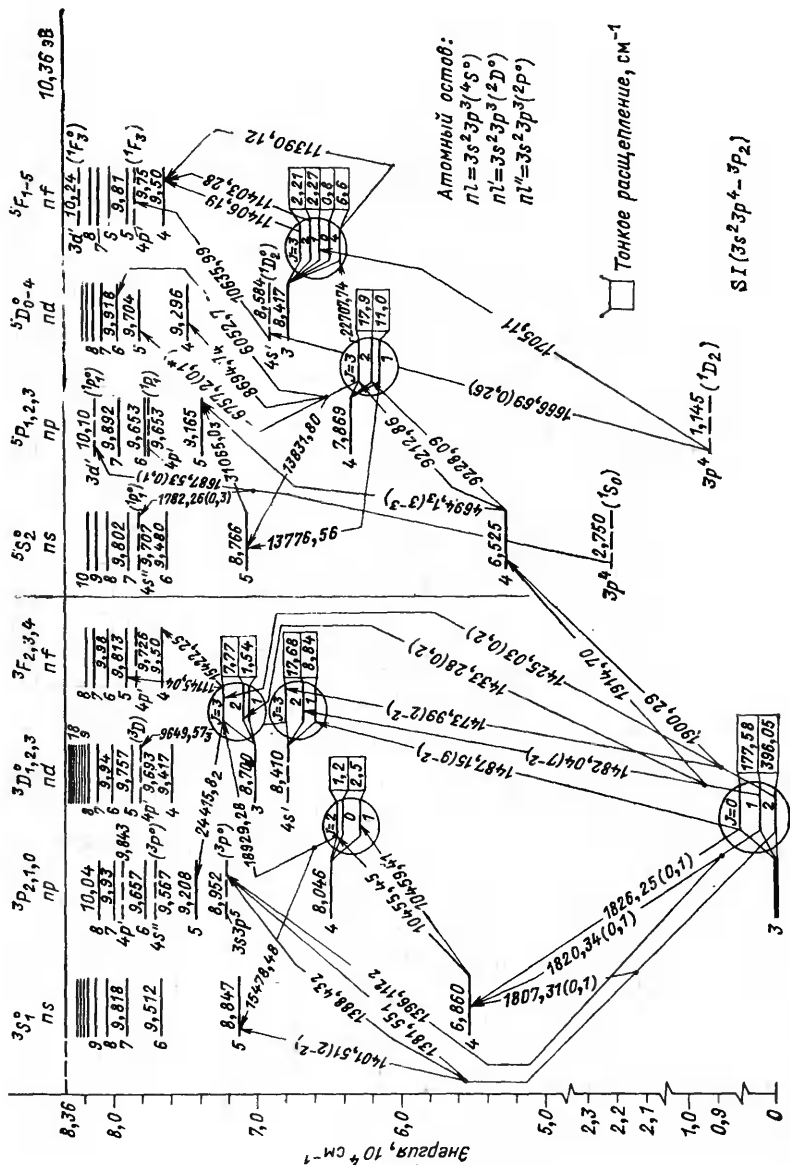


Рис. 6.16. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома селена

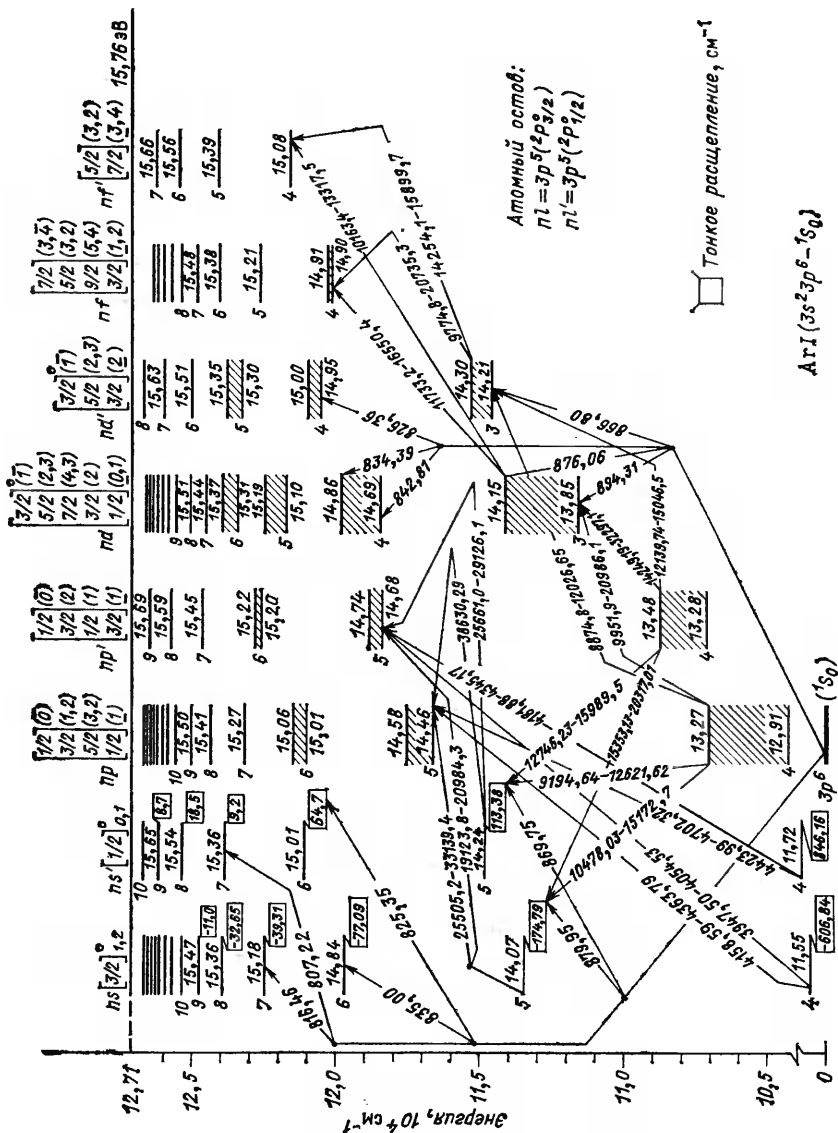


Рис. 6.18. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома аргона

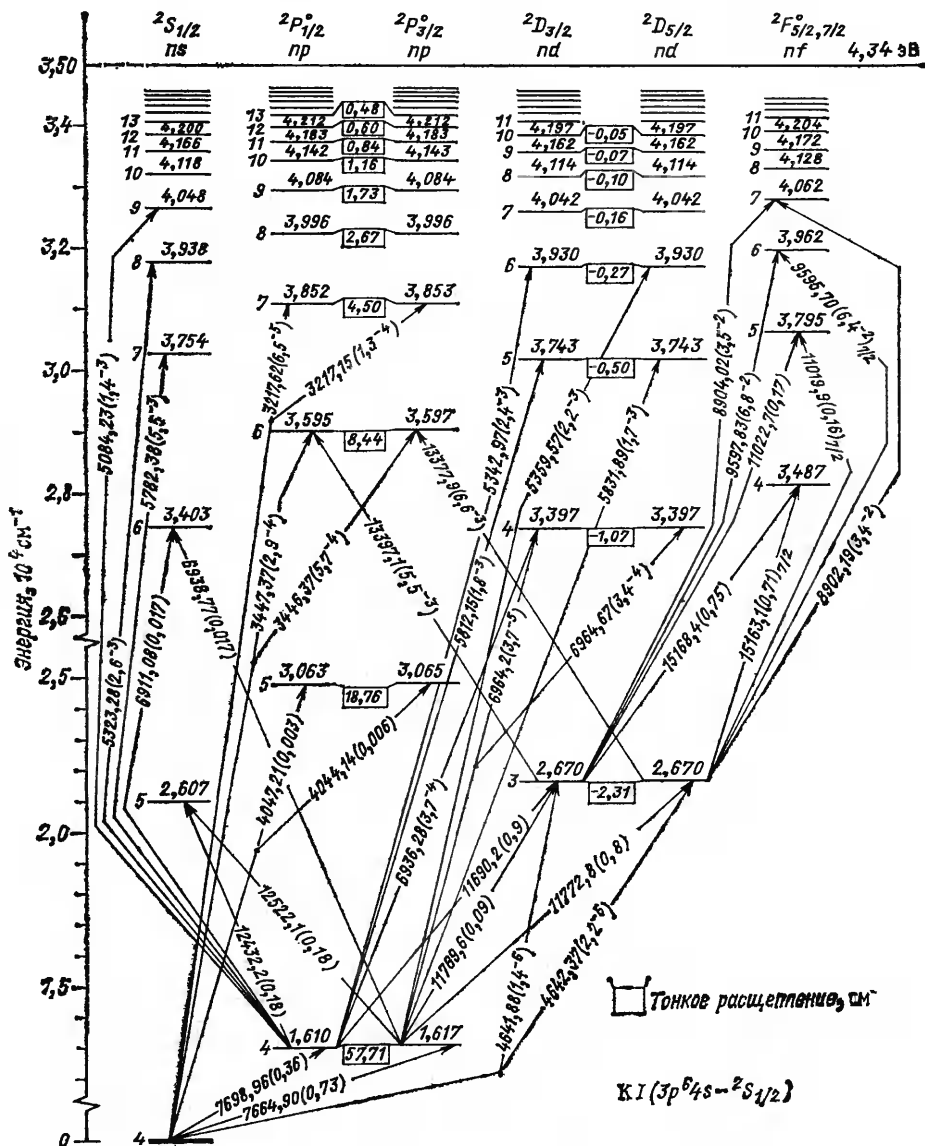


Рис. 6.19. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома калия

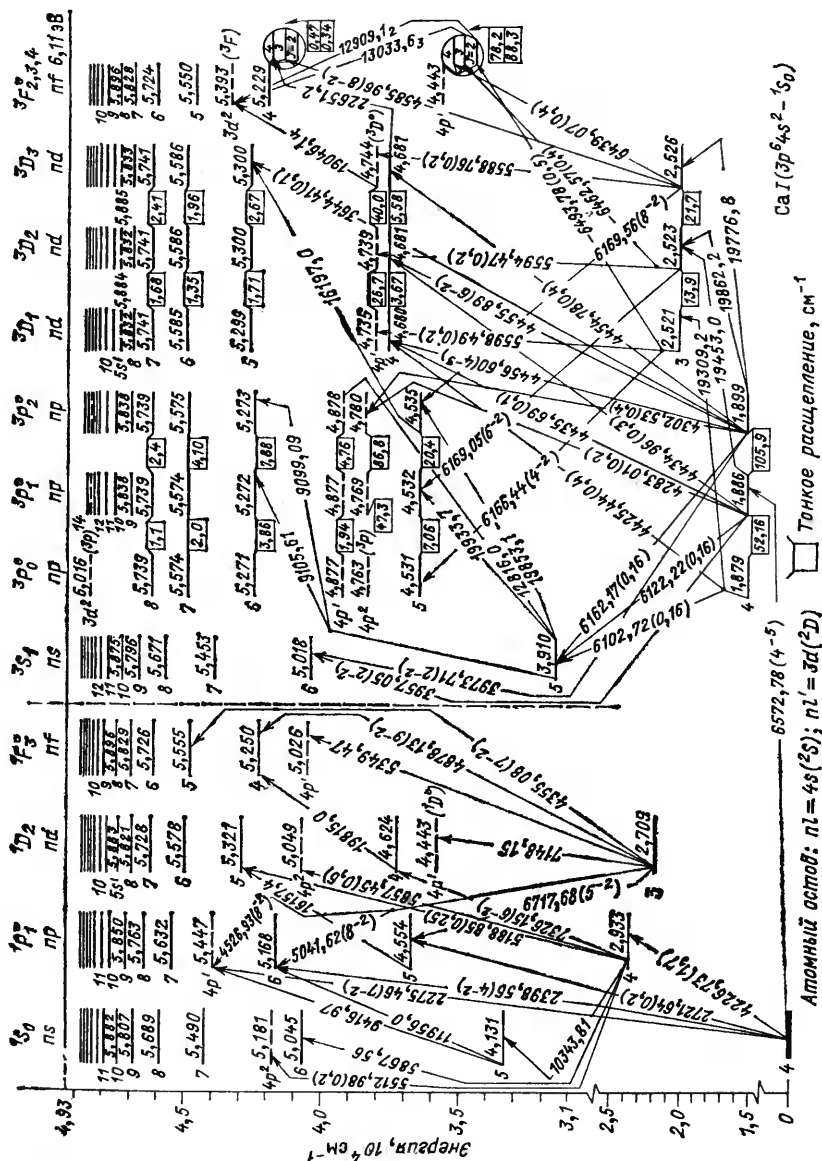


Рис. 6.20. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома кальция

Четность (р)	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Эл. конфигурация	$3d^2 4s$	$3d^2 4p$	$3d 4s^2$	$3d 4s 4p$	$3d^3$	$4s^2 4p$	$3d 4s 4d$
Мультиплетность (2S+1)	2	4	2	4	2	4	2
							4

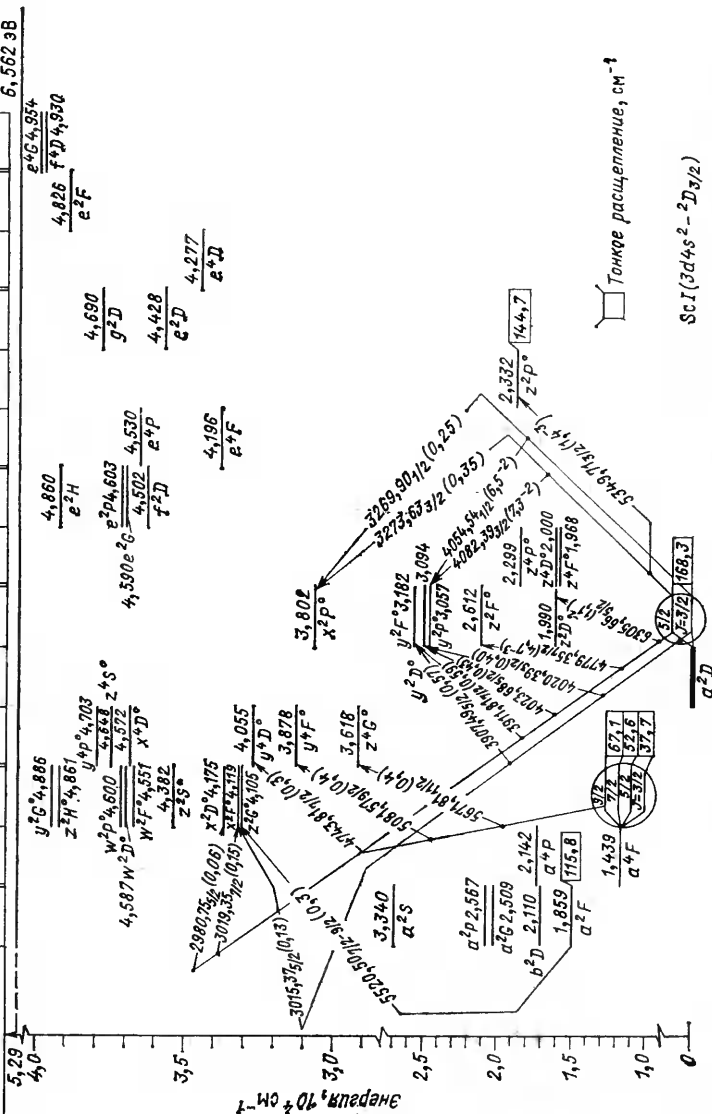


Рис. 6.21. Укороченная диаграмма энергетических уровней и линейчатого спектра атома скандия

Четность (P)	+1	-1	+1	-1	+1
Эп. конфигурация	$3d^4 4s$	$3d^4 4p$	$3d^3 4s^2$	$3d^3 4s 4p$	$3d^5$
Мультиплетность (2S+1)	2	4	6	2	4
	2	4	6	2	4
	2	4	6	2	4
	2	4	6	2	4

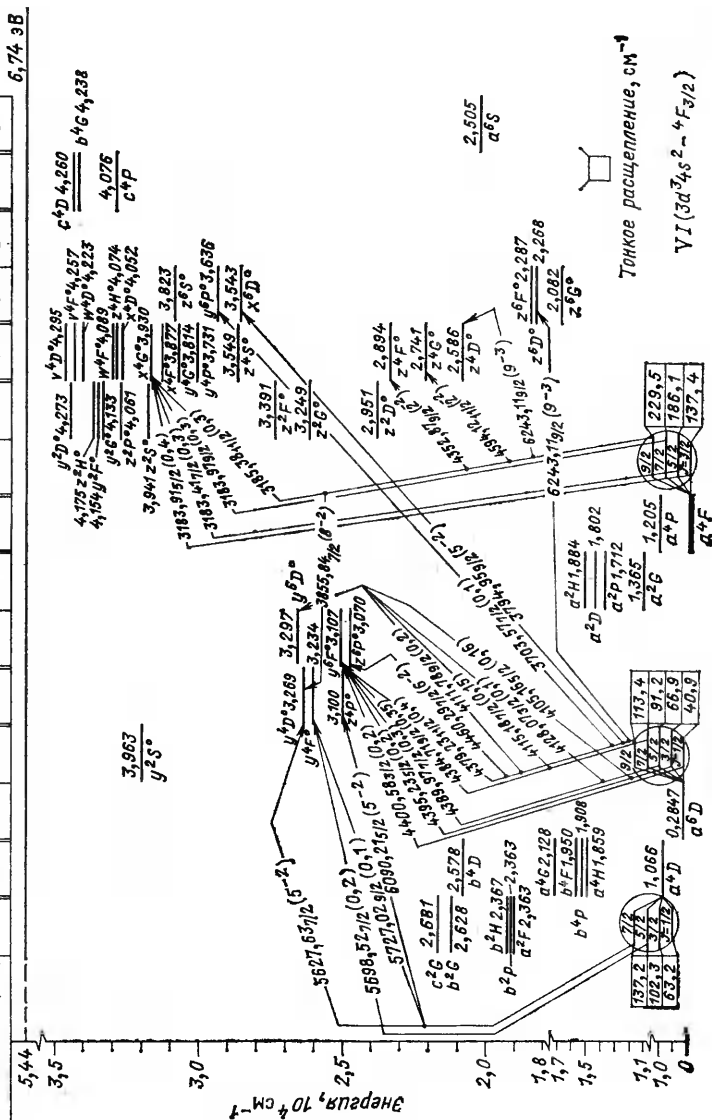


Рис. 6.23. Укороченная диаграмма энергетических уровней и линейчатого спектра атома ванадия

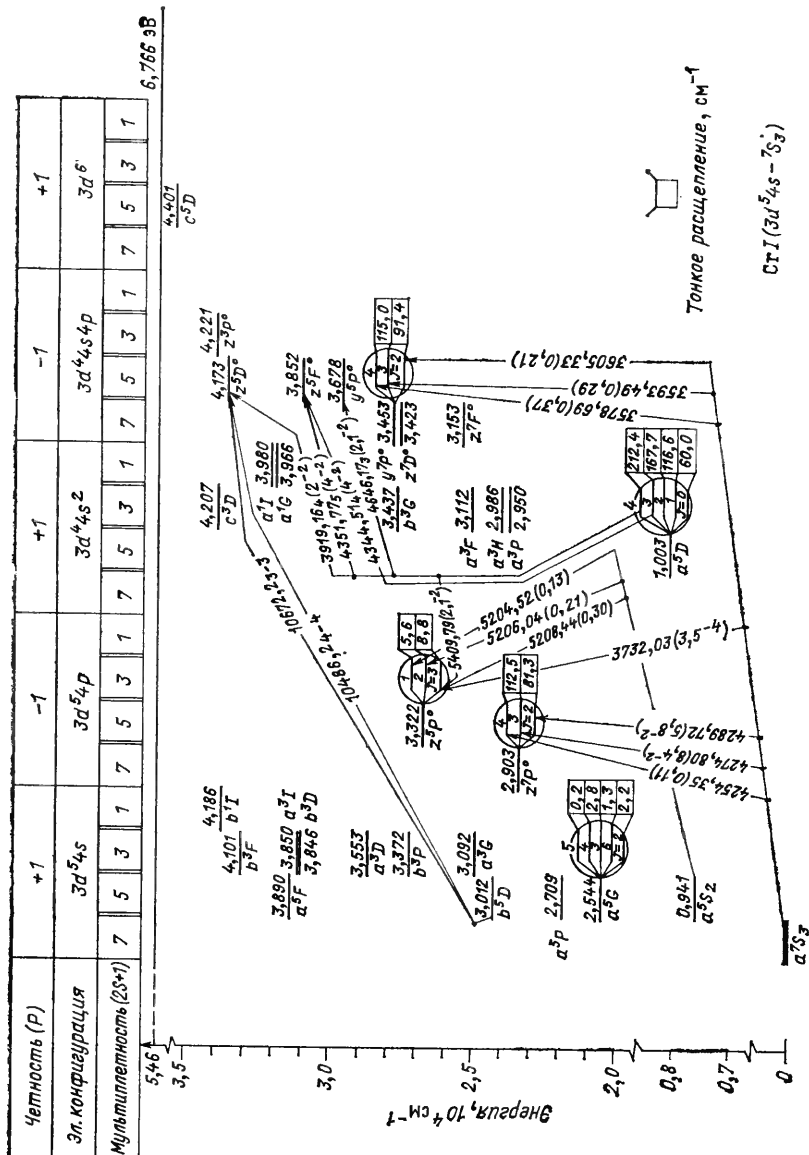


Рис. 6.24. Укороченная диаграмма энергетических уровней и линейчатого спектра атома хрома

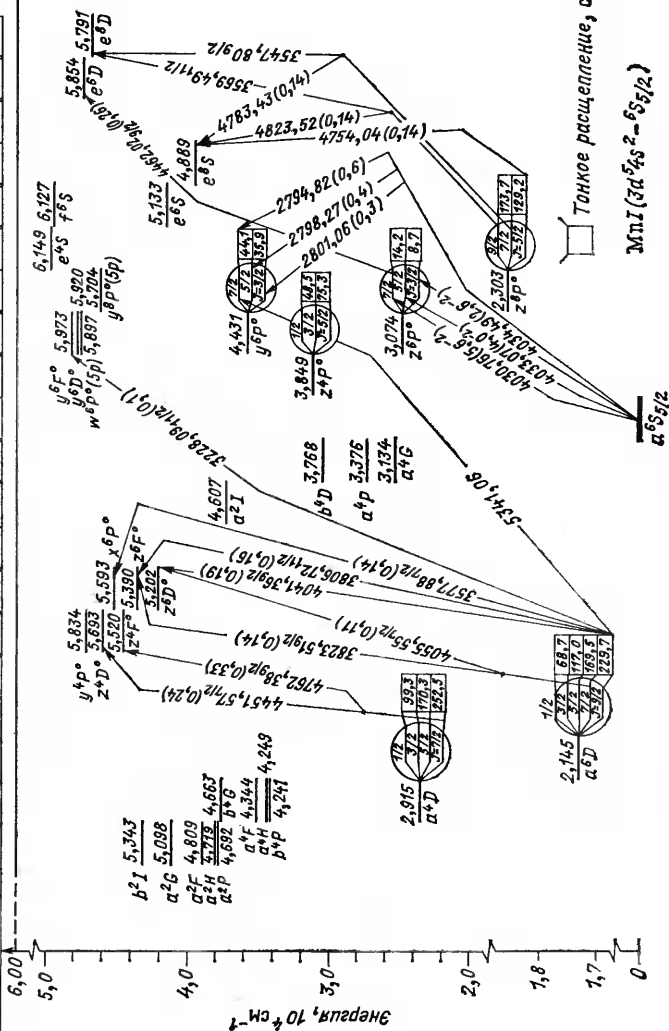
[illegible]

Рис. 6.25. Укороченная диаграмма энергетических уровней и линейчатого спектра атома марганца



Рис. 6.28. Укороченная диаграмма энергетических уровней и линейчатого спектра атома никеля

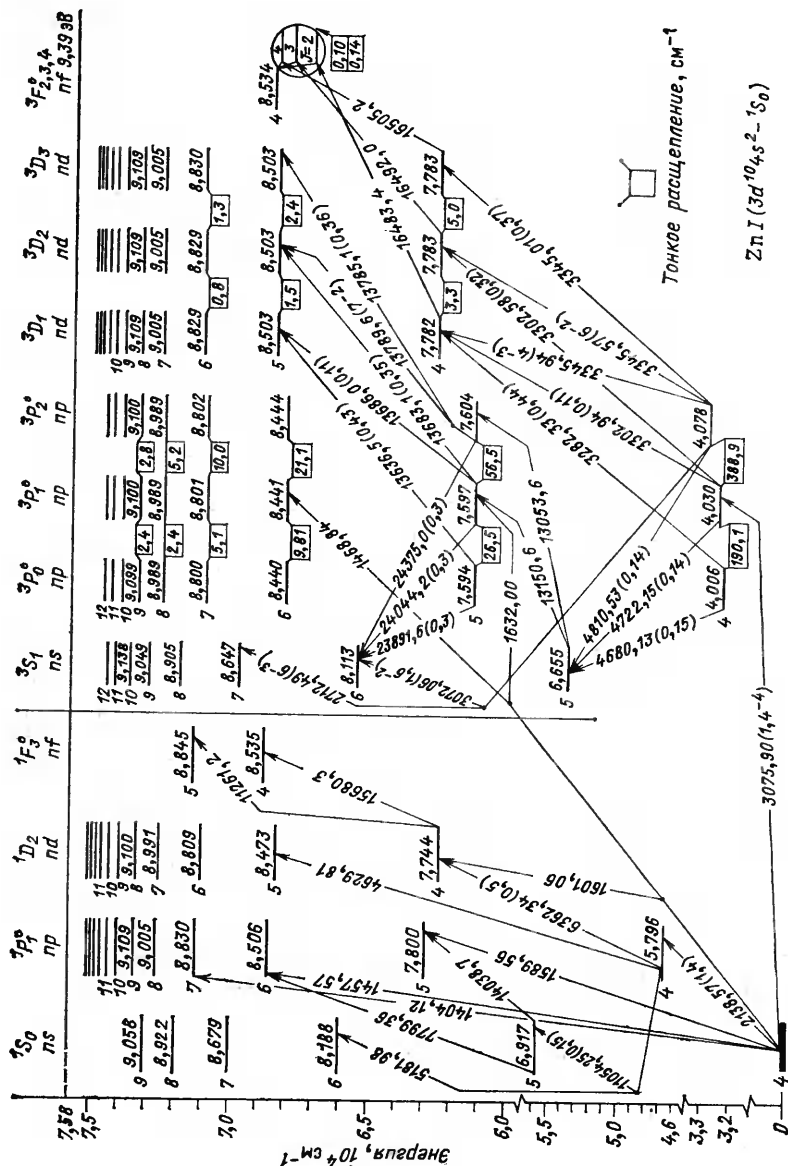


Рис. 6.30. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома цинка



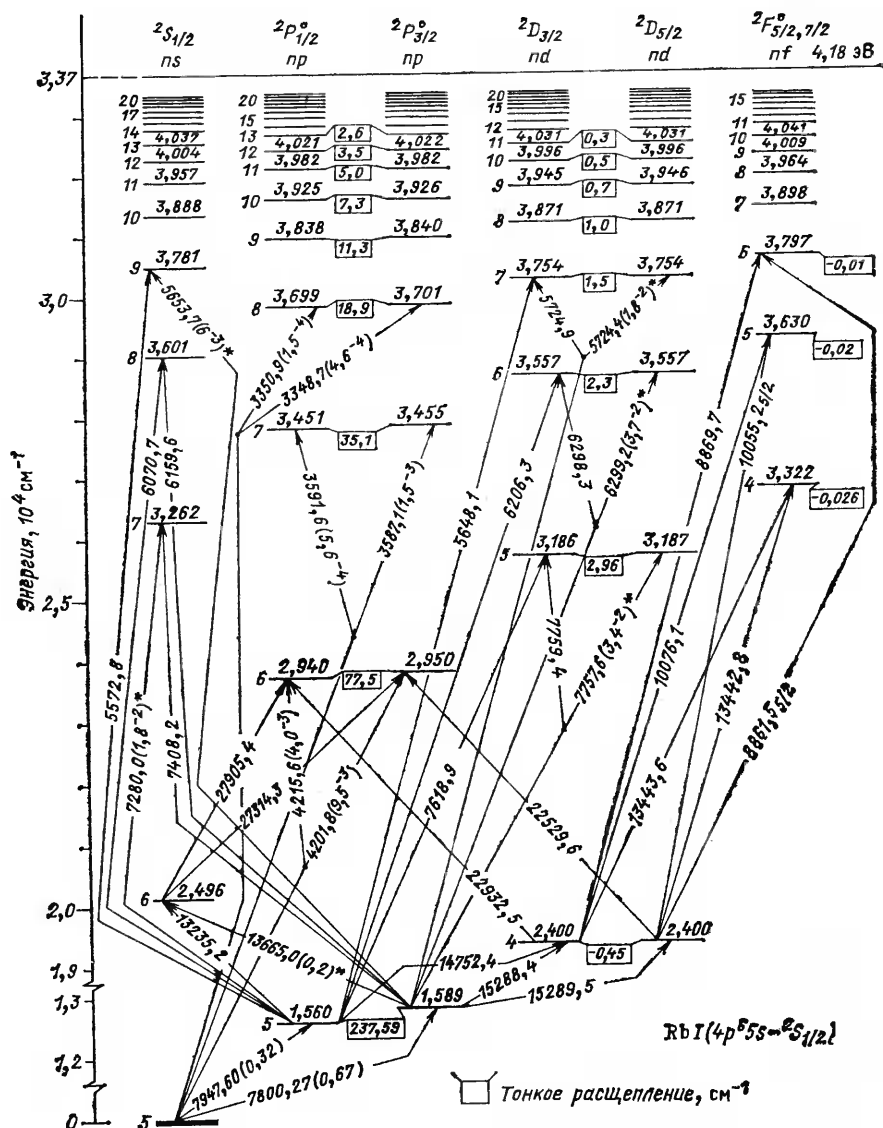
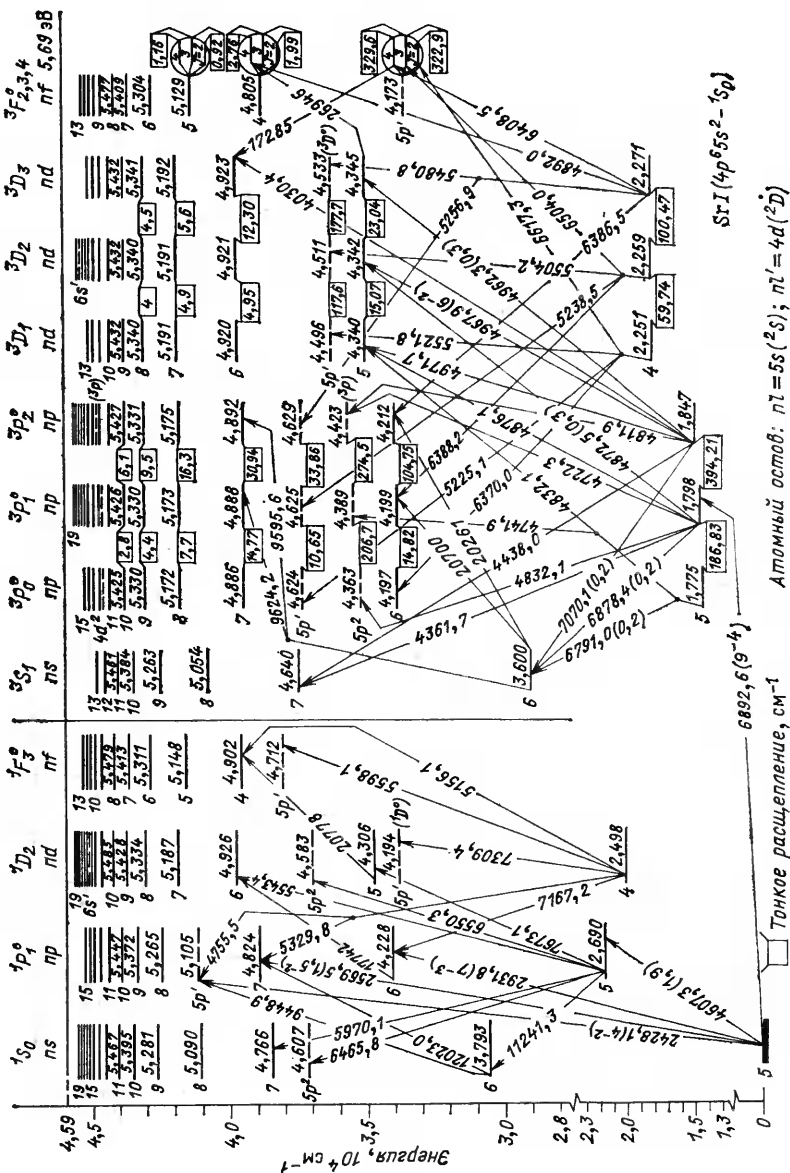


Рис. 6.32. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома рубидия



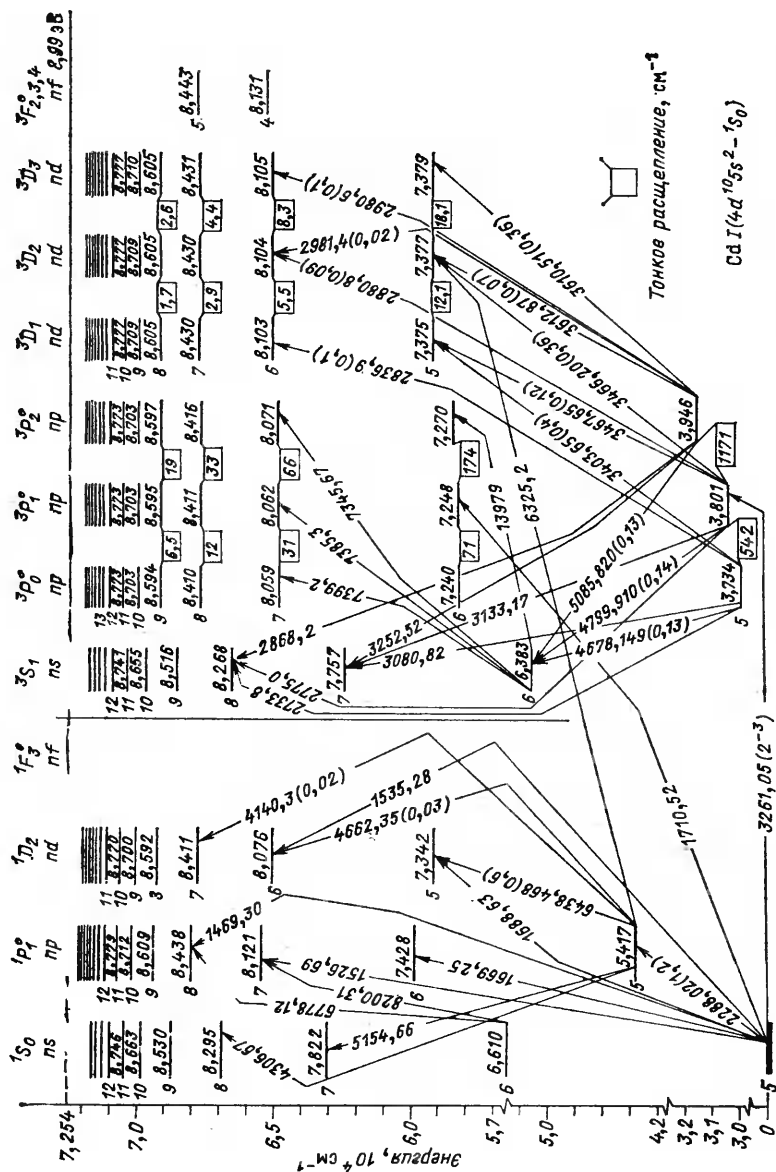


Рис. 6.34. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома кадмия

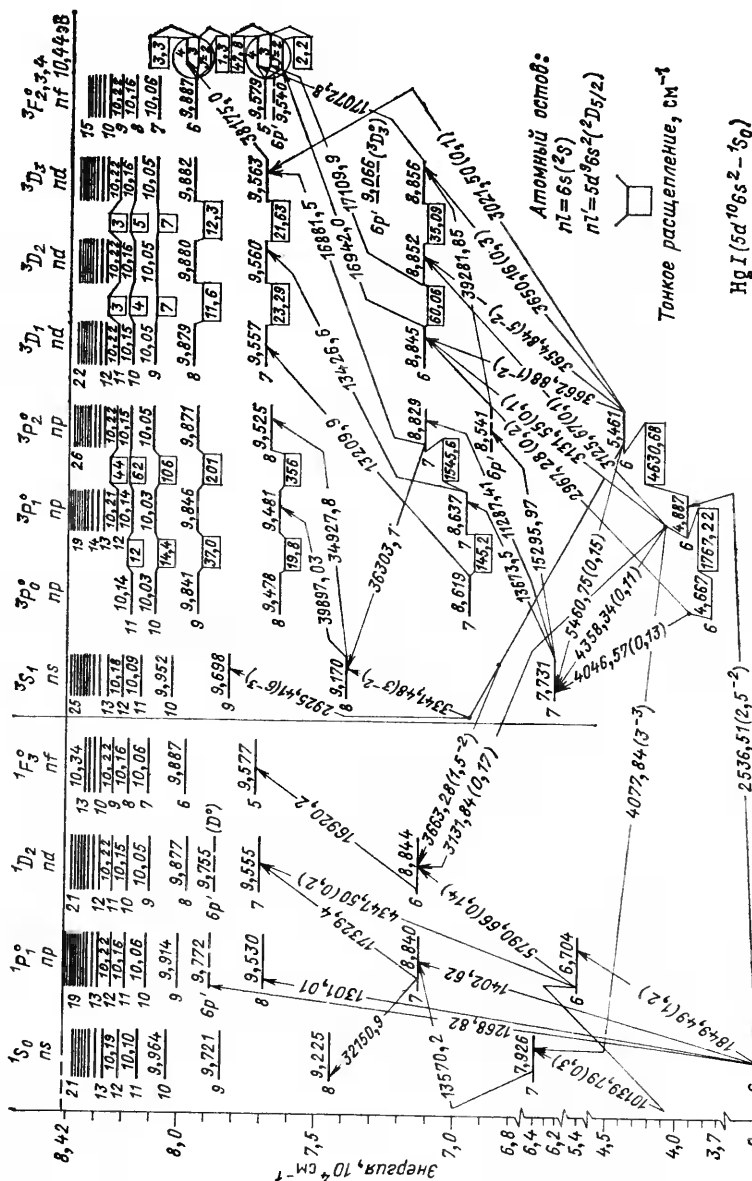


Рис. 6.38. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома ртути

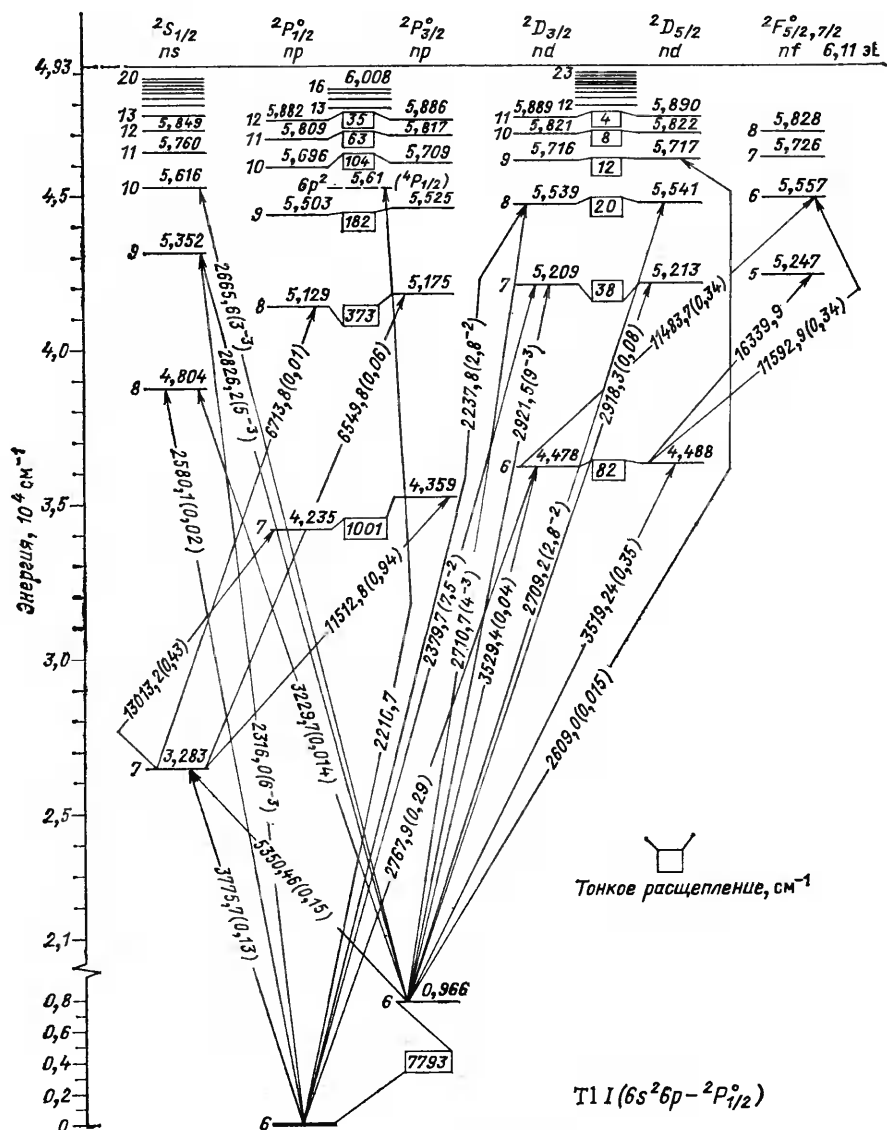


Рис. 6.39. Комбинированная диаграмма уровней энергии, спектра и сил осцилляторов переходов для атома таллия

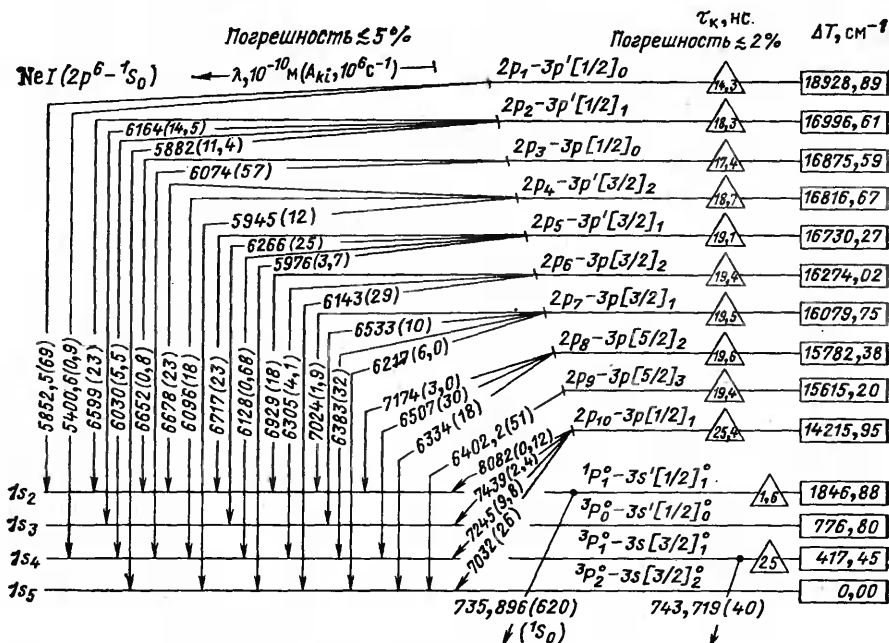


Рис. 6.40. Диаграмма ($1s-2p$)-переходов в Ne I с отмеченными значениями величин A_{ki} и τ_k

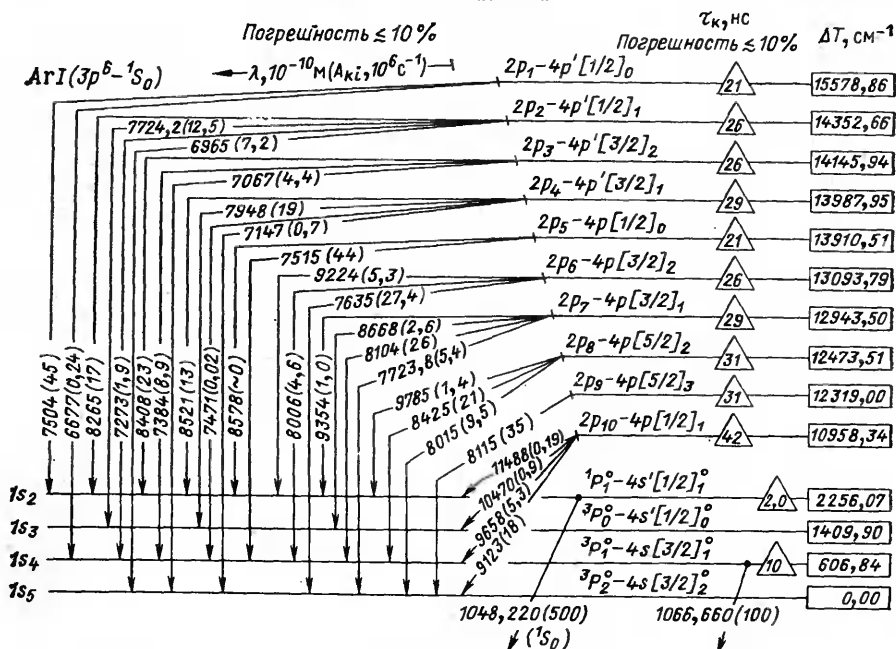


Рис. 6.41. Диаграмма ($1s-2p$)-переходов в Ar I с отмеченными значениями величин A_{ki} и τ_k

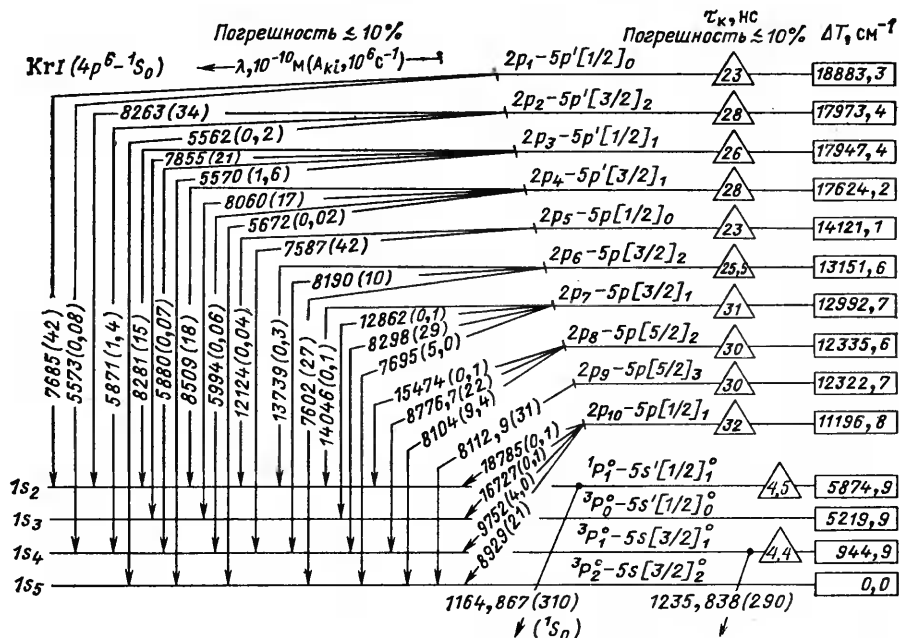


Рис. 6.42. Диаграмма (1s—2p)-переходов в KrI с отмеченными значениями A_{ki} и τ_k

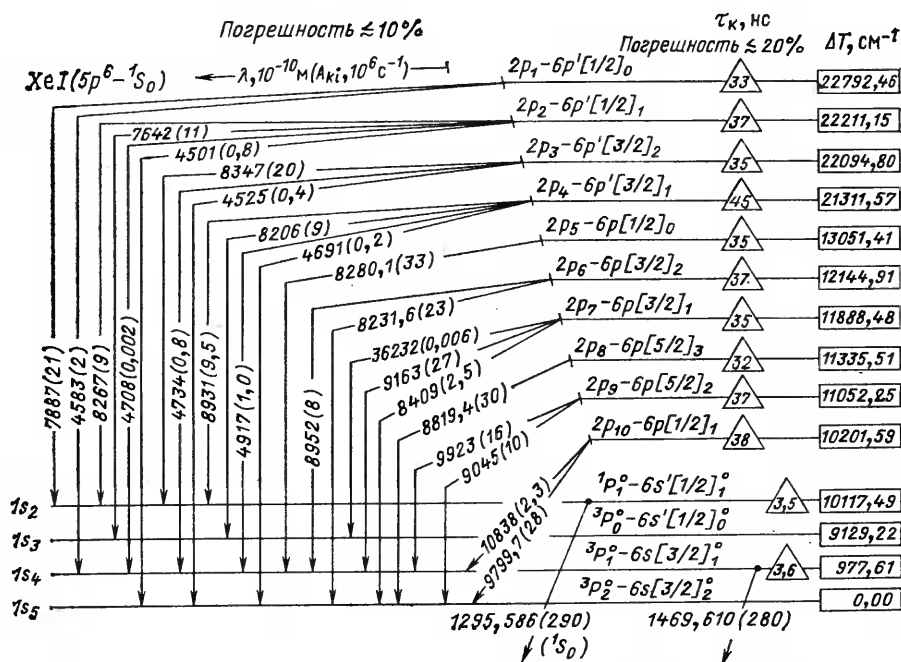


Рис. 6.43. Диаграмма (1s—2p)-переходов в XeI с отмеченными значениями величин A_{ki} и τ_k

6.3. СИЛА ОСЦИЛЛЯТОРОВ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ АТОМОВ

В табл. 6.3 приведены значения силы осцилляторов некоторых наиболее интенсивных оптических переходов в поглощении для нейтральных атомных частиц. В ряде случаев эти данные дополняют значения f_{ik} , приведенные на диаграммах Гроттриана на рис. 6.1—6.43, и, кроме того, здесь рассматриваются элементы, не попавшие в число представленных на этих диаграммах.

Напомним некоторые определения характеристик разрешенных оптических переходов между уровнями атомных частиц [1].

1. Вероятность спонтанного излучения (EI) в единицу времени A_{ki} с переходом из верхнего состояния k в нижнее состояние i дается выражением

$$A_{ki} = \frac{4e^2 \omega_{ik}^3}{3\hbar c^3 (2J_k + 1)} | \langle i | D | k \rangle |^2,$$

где $\omega_{ik} = (E_k - E_i)/\hbar$ — частота излучаемого фотона; $\langle i | D | k \rangle$ — матричный элемент дипольного момента атома; J_k — полный момент атома в состоянии k .

2. Сила осцилляторов перехода ($i \rightarrow k$) в поглощении f_{ik} характеризует безразмерную величину

$$f_{ik} = \frac{2m_e}{3\hbar} \frac{\omega_{ik}}{(2J_i + 1)} | \langle i | D | k \rangle |^2 = \frac{m_e c^3}{2e^2 \omega_{ik}^2} \frac{(2J_k + 1)}{(2J_i + 1)} A_{ki};$$

здесь J_i — полный электронный момент атома в состоянии i . Если вместо ω_{ik} ввести длину волны перехода $\lambda = 2\pi c/\omega_{ik}$ и измерять ее в единицах 10^{-10} м, а A_{ki} измерять в единицах c^{-1} , то получим следующую таблицу преобразования величин f_{ik} и A_{ki} :

	A_{ki}, c^{-1}	f_{ik}
$A_{ki} =$	1	$6,6705 \cdot 10^{15} \frac{(2J_i + 1)}{\lambda^2 (2J_k + 1)}$
$f_{ik} =$	$1,4992 \cdot 10^{-16} \lambda^2 \frac{2J_k + 1}{2J_i + 1}$	1

3. В ряде случаев оказывается удобной усредненная (по мультиплетам нижнего и верхнего термов) сила осцилляторов f_{ik}^m , которая связана с силой осцилляторов для отдельных компонент мультиплетов соотношением

$$f_{ik}^m = \frac{1}{\bar{\lambda}_{ik} \Sigma J_i (2J_i + 1)} \sum_{J_k, J_i} (2J_i + 1) \lambda(J_i, J_k) f(J_i, J_k).$$

Обычно разница в длинах волн переходов внутри определенного мультиплета довольно мала и в итоге можно пренебречь в написанном выражении факторами, характеризующими различные длины волн.

Основная информация по вероятностям оптических переходов в атомных частицах представлена в справочных изданиях [1—3], обзорах [4, 5] и отдельных статьях, включенных в библиографии [6]. С учетом погрешностей определения f_{ik} представленные в табл. 6.3 значения были распределены по классам точности (см. предисловие).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wiese W. L., Smith M. W., Glennon B. M. Atomic Transition Probabilities — H through Ne/Vol. 1: NSRDS—NBS, vol. 4. Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1966; Wiese W. L., Smith M. W., Miles B. M. Atomic Transition Probabilities — Na through Ca/Vol. 2: NSRDS—NBS, vol. 22. — Washington: US Gov't Printing Office 1969; Wiese W. L., Glennon B. M. Atomic Transition Probabilities — In: American Institute of Physics Handbook, 3rd ed./Coord. ed. D. E. Gray. — N. Y.: McGraw-Hill Book Comp., 1972, Ch. 7, p. 200—263; Wiese W. L., Martin G. A. Transition Probabilities. — In: Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions. Part II: NSRDS—NBS, vol. 68. — Washington: US Gov't Printing Office, 1980, p. 359—406.

2. Fuhr J. R., Martin G. A., Wiese W. L., Younger S. M. Atomic transition probabilities for Fe, Co and Ni — J. Phys. Chem. Ref. Data, 1981, vol. 10, p. 305 (см. также ссылки на более ранние труды Национального бюро стандартов США).

3. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. Справочник. — М.: Атомиздат, 1973.

4. Wiese W. L. Atomic Transition Probabilities and Lifetimes. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part B/ Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1979, p. 1101—1155.

5. Huber M. C. E., Sandeman R. J. Transition probabilities and their accuracy. — Phys. Scripta, 1980, vol. 22, p. 373.

6. Fuhr J. R., Miller B. J., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (1914 through Oct. 1977): NBS Spec. Publ. 505. — Washington: US Gov't Printing Office, 1978; Miller B. J., Fuhr J. R., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (Nov. 1977 through March 1980): Rept. NBS-SP-505/1. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1980.

Таблица 6.3. Вероятности оптических переходов A_{ki} и сила осцилляторов в поглощении f_{ik} для низколежащих состояний атомов (индекс i отмечает нижнее состояние; k — верхнее состояние)

Атом (основной терм)	Переход ($i-k$)	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осциллято- ров f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
H (1^2S)	$1S-2P^\circ$	1215,67	6,262	0,416 (A)	6/2
	$3P^\circ$	1025,72	1,672	0,0791 (A)	6/2
	$4P^\circ$	972,54	0,681	0,0290 (A)	6/2
	$2S-3P^\circ$	6562,74	0,225	0,435 (A)	6/2
	$4P^\circ$	4861,29	0,0967	0,103 (A)	6/2
	$2P^\circ-3S$	6562,86	0,0631	0,0136 (A)	2/6
	$3D$	6562,81	0,647	0,696 (A)	10/6
	$4S$	4861,35	0,0258	0,00305 (A)	2/6
	$4S$	4861,33	0,206	0,122 (A)	10/6
	$1^1S-2^1P^\circ$	584,33	17,99	0,276 (A)	3/1
He (1^1S_0)	3^1P°	537,03	5,66	0,073 (B)	3/1
	4^1P°	522,21	2,46	0,030 (B)	3/1
	$2^3S-2^3P^\circ$	10830	0,1022	0,539 (A)	9/3
	3^3P°	3888,65	0,0948	0,0645 (A)	9/3
	4^3P°	3187,75	0,0564	0,0258 (A)	9/3

Атом (основной терм)	Переход($i-k$)	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точнос- ти)	g_k/g_i
Li($2^2S_{1/2}$)	$2^1S-2^1P^\circ$	20581,3	0,020	0,376 (B)	3/1
	3^1P°	5015,68	0,1338	0,151 (A)	3/1
	4^1P°	3964,73	0,069	0,049 (B)	3/1
	$2^3P^\circ-3^3S$	7065,2	0,2786	0,0695 (A)	3/9
	3^3D	5875,7	0,7053	0,608 (A)	15/9
	4^3S	4713,2	0,095	0,011 (B)	3/9
	4^3D	4471,5	0,25	0,12 (B)	15/9
	$2^1P^\circ-3^1S$	7281,35	0,1829	0,0485 (A)	1/3
	3^1D	6678,15	0,6339	0,706 (A)	5/3
	4^1S	5047,74	0,0675	0,0086 (B)	1/3
	4^1D	4921,93	0,20	0,12 (B)	5/3
	$2^2S-2^2P_{1/2}^\circ$	6707,91	0,366	0,247 (A)	2/2
	$2^2P_{3/2}^\circ$	6707,76	0,366	0,494 (A)	4/2
	3^2P°	3232,6	0,01	0,005 (C)	6/2
	$2^2P_{1/2}^\circ-3^2S$	8126,2	0,012	0,11 (C)	2/2
	3^2D	6103,5	0,60	0,67 (C)	4/2
	$2^2P_{3/2}^\circ-3^2S$	8126,5	0,023	0,11 (C)	2/4
	$3^2D_{3/2}$	6103,7	0,12	0,067 (C)	4/4
	$3^2D_{5/2}$	6103,7	0,71	0,59 (C)	6/4
Be(2^1S_0)	$2^1S-2^1P^\circ$	2348,6	5,40	1,34 (B)	3/1
	$2^1P^\circ-3^1S$	8254,1	0,38	0,13 (D)	1/3
	3^1D	4572,7	0,79	0,41 (D)	5/3
	$2^3P^\circ-3^3S$	3321,2	1,56	0,086 (B)	3/9
B($2^2P_{1/2}^\circ$)	$2^2P_{1/2}^\circ-3^2S$	2496,77	1,3	0,12 (C)	2/2
	$2s2p^2(^2D_{3/2})$	2088,9	0,35	0,046 (D)	4/2
	$3^2D_{3/2}$	1825,9	2,0	0,2 (D)	4/2
	$2^2P_{3/2}^\circ-3^2S$	2497,72	1,5	0,07 (C)	2/4
	$2s2p^2(^2D)$	2089,6	0,15	0,025 (D)	10/4
C($2p^2-^3P_0$)	3^2D	1826,4	0,8	0,1 (D)	10/4
	$2^3P_0-2p^3\ ^3D_1^\circ$	1560,3	0,8	0,1 (E)	3/1
	$2^3P_1-3s^3P_2^\circ$	1656,3	0,8	0,05 (E)	5,3
	$3s^3P_0^\circ$	1657,9	3,2	0,04 (E)	1/3
	$2^3P_2-3s^3P_2^\circ$	1657,01	2,4	0,1 (E)	5/5
	$3s^3P_1^\circ$	1658,1	1,3	0,03 (E)	3/5

Атом (основной терм)	Переход ($i \rightarrow k$)	Длина волны перехода λ 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
N($2p^3 -$ $4S_{3/2}^\circ$)	$2p^3 3D_3^\circ$	1561,4	1,2	0,06 (E)	7/5
	$2^1D_2 - 3s^1P_1^\circ$	1930,9	3,0	0,10 (D)	3/5
	$2^1S_0 - 3d^1P_1^\circ$	1751,8	0,9	0,13 (E)	3/1
	$3s^1P_1^\circ$	2478,6	0,2	0,06 (D)	3/1
	$2^4S_{3/2}^\circ - 3s^4P$	1200	4,2	0,27 (C)	12/4
	$2p^4 4P$	1134	1,36	0,080 (B)	12/4
	$2p^3 2D^\circ - 3s^2P$	1493	3,4	0,07 (C)	6/10
	$3s' 2D$	1243	3,6	0,08 (C)	10/10
	$2p^3 2P^\circ - 3s^2P$	1743	1,2	0,06 (C)	6/6
	$4s^2P$	1328	0,15	0,004 (C)	6/6
	$3s' 2D$	1412	0,40	0,02 (C)	10/6
	$3s'' 2S$	1144	8	0,05 (D)	2/6
O($2p^4 - 3P_2$)	$2p^4 3P - 3s^3S^\circ$	1304	6,0	0,05 (C)	3/9
	$3d^3D^\circ$	1027	0,4	0,01 (D)	15/9
	$3s^5S_2^\circ - 3p^5P$	7774	1,0	2,7 (C)	15/5
	$3s^3S_1^\circ - 3p^3P$	8446,5	0,28	0,9 (C)	9/3
	$2p^5 2P_{1/2}^\circ - 3s^2P_{1/2}$	955,5	5,1	0,07 (D)	2/2
F($2p^5 -$ $2P_{3/2}^\circ$)	$3s^2P_{3/2}$	958,5	1,3	0,035 (D)	4/2
	$2p^5 2P_{3/2}^\circ - 3s^2P_{1/2}$	951,9	2,6	0,02 (D)	2/4
	$3s^2P_{3/2}$	954,8	6,4	0,09 (D)	4/4
	$3s^4P_{5/2} - 3p^4D_{7/2}^\circ$	6856,0	0,4	0,4 (E)	8/6
	$3p^4S_{3/2}^\circ$	6239,7	0,25	0,1 (E)	4/6
	$3s^2\bar{P}_{3/2} - 3p^2P_{3/2}^\circ$	7037,5	0,3	0,2 (E)	4/4
	$3p^2D_{5/2}^\circ$	7754,7	0,3	0,4 (E)	6/4
	$3s^2P_{1/2} - 3p^2P_{1/2}^\circ$	7127,9	0,4	0,3 (E)	2/2
	$2^1S_0 - 3s[3/2]_1^\circ$	743,72	0,40	0,010 (C)	3/1
	$3s'[1/2]_1^\circ$	735,90	6,2	0,15 (C)	3/1
Ne($2p^6 - 1S_0$)	$4s[3/2]_1^\circ$	629,74	0,48	0,008 (D)	3/1
	$4s'[1/2]_1^\circ$	626,82	0,74	0,013 (D)	3/1
	$3d[3/2]_1^\circ$	619,10	0,33	0,013 (D)	3/1
	$3d[1/2]_1^\circ$	618,67	0,93	0,016 (D)	3/1

Атом (основной терм)	Переход ($i-k$)	Длина волны перехода λ , 10 ⁻¹⁰ м	Вероятность перехода A_{ki} , 10 ⁸ с ⁻¹	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
Na(3s— ² S _{1/2})	3d' [3/2] ₁ ^o	615,63	0,38	0,0065 (D)	3/1
	3 ² S _{1/2} —3 ² P _{1/2} ^o	5895,92	0,610	0,318 (A)	2/2
	3 ² P _{3/2} ^o	5889,95	0,612	0,637 (A)	4/2
	4 ² P _{1/2} ^o	3303,0	0,028	0,0046 (D)	2/2
	4 ² P _{3/2} ^o	3302,4	0,028	0,092 (D)	4/2
	3 ² P _{1/2} ^o —4 ² S _{1/2}	11381,5	0,089	0,17 (D)	2/2
	3 ² D _{3/2}	8183,26	0,45	0,91 (D)	4/2
	3 ² P _{3/2} ^o —4 ² S _{1/2}	11403,8	0,176	0,17 (D)	2/4
	3 ² D _{5/2}	8194,82	0,52	0,78 (D)	6/4
	3 ² D _{3/2}	8194,79	0,086	0,087 (D)	4/4
Mg(3s ² — ¹ S ₀)	3 ¹ S ₀ —3 ¹ P ₁ ^o	2852,1	5,3	1,9 (D)	3/1
	3 ³ P ₁ ^o	4571,1	2,8·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶ (D)	3/1
	3 ³ P ₀ ^o —4 ³ S ₁	5167,3	0,116	0,14 (C)	3/1
	3 ³ P ₁ ^o —4 ³ S ₁	5172,7	0,35	0,14 (C)	3/3
	3 ³ P ₂ ^o —4 ³ S ₁	5183,6	0,58	0,14 (C)	3/5
Al(3p— ² P _{1/2} ^o)	3 ² P _{1/2} ^o —4 ² S _{1/2}	3944,0	0,50	0,12 (D)	2/2
	3 ² D _{3/2}	3082,2	0,63	0,18 (D)	4/2
	5 ² S _{1/2}	2652,5	0,13	0,014 (D)	2/2
	4 ² D _{3/2}	2568,0	0,23	0,045 (D)	4/2
	3 ² P _{3/2} ^o —4 ² S _{1/2}	3961,5	1,0	0,12 (D)	2/4
	3 ² D _{3/2}	3092,8	0,12	0,017 (D)	4/4
	3 ² D _{5/2}	3092,7	0,74	0,16 (D)	6/4
	5 ² S _{1/2}	2660,4	0,26	0,014 (D)	2/4
	4 ² D _{3/2}	2575,4	0,044	0,0044 (D)	4/4
	4 ² D _{5/2}	2575,1	0,28	0,042 (D)	6/4
Si (3p ² — ³ P ₀)	3 ³ P ₀ —4s ³ P ₁ ^o	2514,3	0,61	0,17 (D)	3/1
	3 ³ P ₁ —4s ³ P ₀ ^o	2524,1	1,81	0,058 (D)	1/3
	4s ³ P ₁ ^o	2519,2	0,46	0,044 (D)	3/3

Атом (основной терм)	Переход ($i-k$)	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осцилля- торов f_{ik} (в класс точности)	g_k/g_i
P($3p^3-4S_{3/2}$)	$4s^3P_2^\circ$	2506,9	0,63	0,099 (C)	5/3
	$3^3P_2-4s^3P_1^\circ$	2528,5	0,77	0,044 (C)	3/5
	$4s^3P_2^\circ$	2516,1	1,64	0,16 (C)	5/5
	$3^4S_{3/2}^\circ-4s^4P_{1/2}$	1787,7	2,1	0,050 (D)	2/4
	$4s^4P_{3/2}$	1782,8	2,1	0,10 (D)	4/4
	$4s^4P_{5/2}$	1775,0	2,2	0,15 (D)	6/4
	$3p^4^4P_{5/2}$	1679,7	0,39	0,025 (D)	6/4
	$3p^4^4P_{3/2}$	1674,6	0,40	0,016 (D)	4/4
	$3p^4^4P_{1/2}$	1671,7	0,39	0,008 (D)	2/4
S($3p^4-3P_2$)	$3^3P_2-4s^3S_1^\circ$	1807,3	3,8	0,11 (D)	3/5
	$3^3P_1-4s^3S_1^\circ$	1820,3	2,2	0,11 (D)	3/3
	$3^3P_0-4s^3S_1^\circ$	1826,2	0,72	0,11 (D)	3/1
Cl($3p^5-2P_{3/2}^\circ$)	$3^2P_{3/2}^\circ-4s^2P_{3/2}$	1347,2	4,2	0,11 (D)	4/4
	$4s^2P_{1/2}$	1335,7	1,7	0,023 (D)	2/4
	$3^2P_{1/2}^\circ-4s^2P_{3/2}$	1363,4	0,75	0,042 (D)	4/2
	$4s^2P_{1/2}$	1351,7	3,2	0,088 (D)	2/2
Ar($3p^6-1S_0$)	$3^1S_0-4s[3/2]_1^\circ$	1066,6	1,0	0,051 (D)	3/1
	$4s'[1/2]_1^\circ$	1048,2	5,0	0,25 (D)	3/1
K($4s-2S_{1/2}$)	$4^2S_{1/2}-4^2P_{1/2}^\circ$	7699,0	0,39	0,35 (C)	2/2
	$4^2P_{3/2}^\circ$	7664,9	0,40	0,70 (C)	4/2
	$5^2P_{1/2}^\circ$	4047,2	0,012	0,003 (D)	2/2
	$5^2P_{3/2}^\circ$	4044,1	0,012	0,006 (D)	4/2
	$4^2P_{1/2}^\circ-5^2S_{1/2}$	12432,2	0,078	0,18 (D)	2/2
	$4^3D_{3/2}$	11690,2	0,22	0,90 (D)	4/2
	$4^2P_{3/2}^\circ-5^2S_{1/2}$	12522,1	0,15	0,18 (D)	2/4
	$4^2D_{3/2}$	11769,6	0,043	0,09 (D)	4/4
	$4^2D_{5/2}$	11772,8	0,26	0,81 (D)	6/4

Атом (основной терм)	Переход ($i-k$)	Длина волны перехода λ , 10 ⁻¹⁰ м	Вероятность перехода A_{ki} , 10 ⁸ с ⁻¹	Сила осциллято- ров f_{ik} (н класс точности)	g_k/g_i
Ca ($4s^2-1S_0$)	$4^1S_0-4^1P_1^\circ$	4226,7	2,2	1,7 (C)	3/1
	$4^3P_1^\circ$	6572,8	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$ (D)	3/1
	$4^3P_0^\circ-4^3D_1$	4425,4	0,50	0,40 (D)	3/1
	$5 \ ^3S_1$	6102,7	0,096	0,16 (D)	3/1
	$4^3P_1^\circ-4^3D_1$	4435,7	0,34	0,10 (D)	3/3
	$4 \ ^3D_2$	4435,0	0,67	0,33 (D)	5/3
	$5 \ ^3S_1$	6122,2	0,29	0,16 (D)	3/3
	$4^3P_2^\circ-4^3D_1$	4456,6	0,025	0,004 (D)	3/5
	$4 \ ^3D_2$	4455,9	0,20	0,059 (D)	5/5
	$4 \ ^3D_3$	4454,8	0,87	0,36 (D)	7/5
	$5 \ ^3S_1$	6162,2	0,48	0,16 (D)	3/5
Cu ($4s-2S_{1/2}$)	$4^2S_{1/2}-4^2P_{1/2}^\circ$	3274,0	1,37	0,22 (C)	2/2
	$4^2P_{3/2}^\circ$	3247,5	1,39	0,44 (C)	4/2
Zn ($4s^2-1S_0$)	$4^1S_0-4^1P_1^\circ$	2138,6	7,4	1,5 (C)	3/1
	$4^3P_1^\circ$	3075,9	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$ (C)	3/1
	$4^3P_0^\circ-5^3S_1$	4680,1	0,14	0,14 (D)	3/1
	4^3D_1	3282,3	0,90	0,44 (C)	3/1
	$4^3P_1^\circ-5^3S_1$	4722,2	0,43	0,14 (D)	3/3
	$4 \ ^3D_1$	3302,9	0,67	0,11 (C)	3/3
	$4 \ ^3D_2$	3302,6	1,2	0,33 (C)	5/3
	$4^3P_2^\circ-5^3S_1$	4810,5	0,67	0,14 (D)	3/5
	$4 \ ^3D_1$	3345,9	0,045	0,0045 (C)	3/5
	$4 \ ^3D_2$	3345,6	0,40	0,067 (C)	5/5
	$4 \ ^3D_3$	3345,0	1,7	0,40 (C)	7/5
Ga ($4p-2P_{1/2}^\circ$)	$4^2P_{1/2}^\circ-5^2S_{1/2}$	4033,0	0,49	0,12 (D)	2/2
	$4 \ ^2D_{3/2}$	2874,2	1,2	0,30 (D)	4/2
	$6 \ ^2S_{1/2}$	2659,9	0,12	0,013 (D)	2/2
	$5 \ ^2D_{3/2}$	2450,1	0,28	0,050 (D)	4/2
	$4^2P_{3/2}^\circ-5^2S_{1/2}$	4172,0	0,92	0,12 (D)	2/4
	$4 \ ^2D_{3/2}$	2944,2	0,27	0,035 (D)	4/4
	$4 \ ^2D_{5/2}$	2943,6	1,4	0,27 (D)	6/4

Атом (основной терм)	Переход ($i \rightarrow k$)	Длина волны перехода λ , 10 ⁻¹⁰ м	Вероятность перехода A_{ki} , 10 ⁸ с ⁻¹	Сила осциллято- ров f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
Kr(4p ⁶ —1S ₀)	6 ² S _{1/2}	2719,7	0,23	0,013 (D)	2/4
	5 ² D _{5/2}	2500,2	0,34	0,048 (D)	6/4
	4 ¹ S ₀ —5s[3/2] ₁ ^o	1235,8	2,2	0,15 (C)	3/1
	5s'[1/2] ₁ ^o	1164,6	2,2	0,14 (C)	3/1
Rb(5s— 2S _{1/2})	5 ² S _{1/2} —5 ² P _{1/2} ^o	7947,6	0,34	0,32 (C)	2/2
	5 ² P _{3/2} ^o	7800,3	0,37	0,67 (C)	4/2
	6 ² P _{1/2} ^o	4215,5	0,015	0,004 (D)	2/2
	6 ² P _{3/2} ^o	4201,8	0,018	0,0095 (D)	4/2
	5 ² P _{1/2} ^o —6 ² S _{1/2}	13237,3	0,071	0,19 (D)	2/2
	5 ² D _{3/2}	7618,9	0,024	0,0425 (B)	4/2
	5 ² P _{3/2} ^o —6 ² S _{1/2}	13667,0	0,26	0,364 (D)	2/4
	5 2D _{3/2}	7759,4	0,0048	0,0043 (B)	4/4
	5 2D _{5/2}	7757,6	0,027	0,037 (B)	6/4
	5 ¹ S ₀ —5 ¹ P ₁ ^o	4607,3	2,1	2,0 (C)	3/1
Sr(5s ² —1S ₀)	5 ³ P ₁ ^o	6892,6	4,0·10 ⁻⁴	8,6·10 ⁻⁴ (D)	3/1
	5 ³ P ₀ ^o —6 ³ S ₁	6791,0	0,087	0,18 (D)	3/1
	5 ³ P ₁ ^o —6 ³ S ₁	6878,4	0,24	0,17 (D)	3/3
	5 3D ₂	4872,5	0,52	0,31 (D)	5/3
	5 ³ P ₂ ^o —6 ³ S ₁	7070,1	0,40	0,18 (D)	3/5
	5 3D ₂	4967,9	0,16	0,06 (D)	5/5
	5 3D ₃	4962,2	0,64	0,33 (D)	7/5
	5 ² S _{1/2} —5 ² P _{1/2} ^o	3382,9	1,3	0,22 (C)	2/2
Ag (5s— 2S _{1/2})	5 ² P _{3/2} ^o	3280,7	1,4	0,45 (C)	4/2
	5 ¹ S ₀ —5 ¹ P ₁ ^o	2288,0	6,0	1,4 (C)	3/1
Cd(5s ² —1S ₀)	5 ³ P ₁ ^o	3261,1	0,0041	0,0019 (D)	3/1
	5 ³ P ₀ ^o —6 ³ S ₁	4678,1	0,13	0,13 (D)	3/1
	5 3D ₁	3403,7	0,77	0,40 (D)	3/1

Атом (основной терм)	Переход ($i-k$)	Длина вол- ны перехода λ , 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
In($5p-^2P_{1/2}^\circ$)	$5^3P_1^\circ-6^3S_1$	4799,9	0,41	0,14 (D)	3/3
	5^3D_1	3467,7	0,67	0,12 (D)	3/3
	5^3D_2	3466,2	1,2	0,36 (D)	5/3
	$5^3P_2^\circ-6^3S_1$	5085,8	0,56	0,13 (D)	3/5
	5^3D_2	3612,9	0,35	0,068 (D)	5/5
	5^3D_3	3610,5	1,3	0,36 (D)	7/5
	$5^2P_{1/2}^\circ-6^2S_{1/2}$	4101,8	0,56	0,14 (D)	2/2
	$5^2D_{3/2}$	3039,4	1,3	0,36 (D)	4/2
	$7^2S_{1/2}$	2753,9	0,15	0,017 (D)	2/2
	$6^2D_{3/2}$	2560,2	0,23	0,045 (D)	4/2
	$5^2P_{3/2}^\circ-6^2S_{1/2}$	4511,3	1,02	0,157 (C)	2/4
	$5^2D_{3/2}$	3258,6	0,38	0,06 (D)	4/4
	$5^2D_{5/2}$	3256,1	1,3	0,31 (D)	6/4
	$7^2S_{1/2}$	2932,6	1,1	0,007 (D)	2/4
	$6^2D_{3/2}$	2713,9	0,15	0,017 (D)	4/4
	$6^2D_{5/2}$	2710,3	0,36	0,059 (D)	6/4
Xe($5p^6-^1S_0$)	$5^1S_0-6s[3/2]_1^\circ$	1469,6	2,8	0,27 (C)	3/1
	$6s'[1/2]_1^\circ$	1295,6	2,9	0,22 (C)	3/1
	$5d[1/2]_1^\circ$	1250,2	0,14	0,010 (E)	3/1
	$5d[3/2]_1^\circ$	1192,0	6,2	0,40 (D)	3/1
	$7s[3/2]_1^\circ$	1170,4	1,6	0,10 (D)	3/1
	$6d[1/2]_1^\circ$	1129,3	0,044	0,0025 (D)	3/1
	$6d[3/2]_1^\circ$	1110,7	1,5	0,083 (D)	3/1
	$5d'[3/2]_1^\circ$	1068,2	4,0	0,20 (D)	3/1
Cs($6s-^2S_{1/2}$)	$6^2S_{1/2}-6^2P_{1/2}^\circ$	8943,5	0,33	0,39 (C)	2/2
	$6^2P_{3/2}^\circ$	8521,1	0,37	0,81 (C)	4/2
	$7^2P_{1/2}^\circ$	4593,2	0,008	$2,5 \cdot 10^{-3}$ (D)	2/2
	$7^2P_{3/2}^\circ$	4555,3	0,019	0,012 (D)	4/2
	$6^2P_{1/2}^\circ-5^2D_{3/2}$	30 103	0,0092	0,25 (D)	4/2

Атом (основ- ной терм)	Переход ($i \rightarrow k$)	Длина волны перехода λ , 10 ⁻¹⁰ м	Вероятность перехода A_{ki} , 10 ⁸ с ⁻¹	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
Ba(6s ² — ¹ S ₀)	7 ² S _{1/2}	13 588	0,076	0,21 (D)	2/2
	6 ² D _{3/2}	8761,4	0,13	0,30 (D)	4/2
	6 ² P _{3/2} ^o —5 ² D _{3/2}	36 130	0,0011	0,021 (D)	4/4
	5 ² D _{5/2}	34 900	0,0074	0,20 (D)	6/4
	7 ² S _{1/2}	14 695	0,11	0,17 (D)	2/4
	6 ² D _{3/2}	9208,5	0,031	0,040 (D)	4/4
	6 ² D _{5/2}	9172,3	0,17	0,33 (D)	6/4
	6 ¹ S ₀ —6 ¹ P ₁ ^o	5535,5	1,2	1,6 (C)	3/1
	6 ³ P ₁ ^o	7911,3	0,0030	0,084 (D)	3/1
	6 ³ P ₀ ^o —7 ³ S ₁	7195,2	0,23	0,53 (D)	3/1
	6 ³ D ₁	5424,5	0,53	0,4 (D)	3/1
	6 ³ P ₁ ^o —7 ³ S ₁	7392,4	0,48	0,39 (D)	3/3
	6 ³ D ₂	5519,0	0,50	0,38 (D)	5/3
	6 ³ P ₂ ^o —7 ³ S ₁	7905,7	0,60	0,34 (D)	3/5
	6 ³ D ₂	5800,2	0,10	0,05 (D)	5/5
	6 ³ D ₃	5777,6	0,64	0,45 (D)	7/5
Au(6s— ² S _{1/2})	6 ² S _{1/2} —6 ² P _{1/2} ^o	2676,0	1,1	0,12 (D)	2/2
	6 ² P _{3/2} ^o	2428,0	1,5	0,26 (D)	4/2
Hg(6s ² — ¹ S ₀)	6 ¹ S ₀ —6 ¹ P ₁ ^o	1849,5	7,6	1,17 (B)	3/1
	6 ³ P ₁ ^o	2536,5	0,085	0,0245 (B)	3/1
	6 ³ P ₀ ^o —7 ³ S ₁	4046,6	0,18	0,13 (D)	3/1

Атом (основной терм)	Переход ($i \rightarrow k$)	Длина волны перехода λ , 10^{-10} м	Вероятность перехода A_{ki} , 10^8 с $^{-1}$	Сила осцилля- торов f_{ik} (и класс точности)	g_k/g_i
Tl($6p-2P_{1/2}^\circ$)	$6\ ^3D_1$	2967,3	0,45	0,18 (D)	3/1
	$6^3P_1^\circ-7^3S_1$	4358,3	0,40	0,11 (D)	3/3
	$6\ ^3D_1$	3131,6	0,7	0,1 (D)	3/3
	$6\ ^3D_2$	3125,7	0,5	0,12 (D)	5/3
	$6^3P_2^\circ-7^3S_1$	5460,7	0,56	0,15 (D)	3/5
	$6\ ^3D_1$	3662,9	0,083	0,01 (D)	3/5
	$6\ ^3D_2$	3654,8	0,25	0,05 (D)	5/5
	$6\ ^3D_3$	3650,2	1,1	0,30 (D)	7/5
	$6^1P_1^\circ-7^1S_0$	10139,8	0,53	0,27 (D)	1/3
	$6^2P_{1/2}^\circ-7^2S_{1/2}$	3775,7	0,625	0,133 (C)	2/2
	$6\ ^2D_{3/2}$	2767,9	1,3	0,29 (D)	4/2
	$6^2P_{3/2}^\circ-7^2S_{1/2}$	5350,5	0,705	0,151 (C)	2/4
	$6\ ^2D_{3/2}$	3529,4	0,22	0,041 (D)	4/4
	$6\ ^2D_{5/2}$	3519,2	1,2	0,34 (D)	6/4
	$7^2S_{1/2}-7^2P_{1/2}^\circ$	13013,2	0,171	0,434 (A)	2/2
Pb($6p^2-3P_0$)	$7^2P_{3/2}^\circ$	11512,8	0,237	0,942 (A)	4/2
	$6^3P_0-7^3P_1^\circ$	2833,1	0,6	0,21 (D)	3/1
	$6^3P_1-7s^3P_0^\circ$	3683,5	1,5	0,10 (D)	1/3
	$6^3P_2-7s^3P_1^\circ$	4057,8	0,9	0,13 (D)	3/5
	$6d^3F_3^\circ$	2802,0	1,6	0,26 (D)	7/5
Bi($6p^3-4S_{3/2}^\circ$)	$6^4S_{3/2}^\circ-7s^4P_{1/2}$	3067,7	2,1	0,15 (D)	2/4
	$6^2D_{3/2}^\circ-7s^4P_{1/2}$	4722,5	0,12	0,020 (D)	2/4

6.4. РАДИАЦИОННОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ

Радиационное время жизни уровня k обратно пропорционально суммарной вероятности перехода на нижележащие уровни, т. е.

$$\tau_k = \left(\sum_i A_{ki} \right)^{-1},$$

где A_{ki} — коэффициент Эйнштейна, определяющий вероятность спонтанного перехода в единицу времени с верхнего уровня k на нижний уровень i . Величина τ_k характеризует среднее время спада населенности k -го уровня $N_k(t)$ в e раз по отношению к началу процесса его радиационного распада в момент $t=0$ (т. е. в отсутствие процессов столкновений, поглощения излучения с переходом на данный уровень и вынужденного излучения с этого уровня):

$$N_k(t) = N_k(0) \exp(-t/\tau_k).$$

В табл. 6.4 собраны значения радиационного времени жизни для низколежащих возбужденных состояний атомов. В четвертой графе таблицы даны значения энергии возбуждения отдельного уровня относительно основного состояния или указано положение центра тяжести мультиплета \bar{T} (см. § 6.1). При составлении табл. 6.4 для атомного времени жизни мы использовали рекомендуемые значения τ_k для отдельных элементов [1, 2], обзоры [3—7] и данные многочисленных журнальных публикаций (см. библиографию [8]) последних лет. Числовые значения τ_k сгруппированы по классам точности, определенным в предисловии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thompson R. T., Fowler R. G. Lifetimes for the upper states in atomic helium. — JQSRT, 1975, vol. 15, p. 1017; Theodosiou C. E. Lifetimes of singly excited states in He I. — Phys. Rev., 1984, vol. A30, p. 2910.
2. Head M. E. M., Head C. E., Lawrence T. N. Review of experimental lifetimes: third period elements. — In: Beam-Foil Spectroscopy. Vol. 1: Atomic structure and lifetimes/Ed. by I. A. Sellin, D. J. Pegg. — N. Y.: Plenum, 1976, p. 147—154; Head C. E., Lawrence T. N., Head M. E. M. Review of experimental lifetimes: fourth period elements. — In: Beam-Foil Spectroscopy. Vol. 1: Atomic structure and lifetimes/Ed. by I. A. Sellin, D. J. Pegg. — N. Y.: Plenum, 1976, p. 155—163.
3. Penkin N. P. Experimental Determination of Electronic Transition Probabilities and Lifetimes of the Excited Atomic and Ionic States — In: 6th International Conference on Atomic Physics Proceedings/Ed. by R. Damburg. — N. Y.: Plenum, 1979, p. 33—64.
4. Ошерович А. Л., Веролайнен Я. Ф. Метод задержанных совпадений в атомной и молекулярной спектроскопии. — В кн.: Проблемы атмосферной оптики/Под ред. А. Л. Ошеровича. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1979, с. 80—154.
5. Wiese W. L. Atomic Transition Probabilities and Lifetimes. — In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part B/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen. — N. Y.: Plenum, 1979, p. 1101—1155.
6. Веролайнен Я. Ф., Николаич А. Я. Радиационные времена жизни возбужденных атомов первой группы периодической таблицы элементов. — Успехи физ. наук, 1982, т. 137, с. 305.
7. Hannaford P., Lowe R. M. Determination of atomic lifetimes using laser — induced fluorescence from sputtered metal vapor. — Opt. Eng., 1983, vol. 22, p. 532—544.
8. Fuhr J. R., Miller B. J., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (1914 through October 1977): NBS Special Publication N 505. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1978; Miller B. J., Fuhr J. R., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (November 1977 through March 1980): Report NBS-SP-505/I. — Washington, D. C.: US Gov't Printing Office, 1980.

Таблица 6.4. Радиационное время жизни низколежащих состояний атомов

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультимета, эВ	Время жизни τ_k , нс
1	$H(1s-^2S_{1/2})$	$2p(^2P^\circ)$	10,20	1,60 (A)
		$3p(^2P^\circ)$	12,09	5,30 (A)
		$3s(^2S)$	12,09	159 (A)
		$3d(^2D)$	12,09	15,5 (A)
		$4p(^2P^\circ)$	12,75	12,7 (A)
		$4s(^2S)$	12,75	227 (A)
		$4d(^2D)$	12,75	36,0 (A)
		$4f(^2F^\circ)$	12,75	72,5 (A)
		$5p(^2P^\circ)$	13,06	23,8 (A)
		$5s(^2S)$	13,06	352 (A)
		$5d(^2D)$	13,06	69,5 (A)
		$5f(^2F^\circ)$	13,06	140 (A)
		$5g(^2G)$	13,06	235 (A)
		$6p(^2P^\circ)$	13,22	40,7 (A)
		$6s(^2S)$	13,22	534 (A)
		$6d(^2D)$	13,22	119 (A)
		$6f(^2F^\circ)$	13,22	240 (A)
		$6g(^2G)$	13,22	403 (A)
		$6h(^2H^\circ)$	13,22	608 (A)
2	$He(1s^2-^1S_0)$	$2p(^3P^\circ)$	20,96	97,85 (A)
		$2p(^1P^\circ)$	21,22	0,555 (A)
		$3s(^3S)$	22,72	36,0 (B)
		$3s(^1S)$	22,92	54,2 (B)
		$3p(^3P^\circ)$	23,01	94,7 (A)
		$3d(^3D)$	23,07	14,2 (B)
		$3d(^1D)$	23,07	15,8 (B)
		$3p(^1P^\circ)$	23,09	1,724 (A)
		$4s(^3S)$	23,59	64 (C)
		$4s(^1S)$	23,67	87 (C)
		$4p(^3P^\circ)$	23,71	150 (C)
		$4d(^3D)$	23,74	31,5 (B)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
3	Li ($2s-^2S_{1/2}$)	$4d (^1D)$	23,74	37,4 (B)
		$4p (^1P^\circ)$	23,74	3,97 (B)
		$4f (^3F^\circ)$	23,74	72 (C)
		$4f (^1F^\circ)$	23,74	72 (C)
		$2p (^2P^\circ)$	1,85	27,3 (A)
		$3s (^2S)$	3,37	27,9 (A)
		$3p (^2P^\circ)$	3,83	200 (C)
		$3d (^2D)$	3,88	14,7 (B)
		$4s (^2S)$	4,34	56 (C)
		$4p (^2P^\circ)$	4,52	450 (C)
		$4d (^2D)$	4,54	33 (C)
		$4f (^2F^\circ)$	4,54	72 (D)
		$5s (^2S)$	4,75	103 (C)
		$5p (^2P^\circ)$	4,84	670 (D)
		$5d (^2D)$	4,85	64 (C)
		$5f (^2F^\circ)$	4,85	140 (D)
		$6s (^2S)$	4,96	175 (C)
		$6p (^2P^\circ)$	5,01	1500 (C)
		$6d (^2D)$	5,01	108 (C)
		$6f (^2F^\circ)$	5,01	240 (D)
4	Be ($2s^2-^1S_0$)	$2p (^1P^\circ)$	5,28	1,9 (D)
		$3s (^3S)$	6,46	6,4 (C)
		$3d (^3D)$	7,69	5,2 (C)
5	B ($2p-^2P_{1/2}^\circ$)	$3s (^2S)$	4,96	3,6 (C)
		$2s\ 2p^2 (^2D)$	5,93	20 (D)
		$3p (^2P^\circ)$	6,03	51 (D)
6	C ($2p^2-^3P_0$)	$3d (^2D)$	6,79	4,3 (D)
		$3s (^3P_0^\circ)$	7,48	3,1 (C)
		$3s (^1P_1^\circ)$	7,68	2,9 (D)
7	N ($2p^3-^4S_{3/2}^\circ$)	$2s\ 2p^3 (^3D^\circ)$	7,95	8,0 (C)
		$3s (^4P)$	10,33	2,5 (D)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_k , нс
8	$O (2p^4 - {}^3P_2)$	$3s ({}^2P)$	10,68	2,2 (D)
		$2s 2p^4 ({}^4P)$	10,92	7,2 (C)
		$3s ({}^3S_1^0)$	9,52	1,8 (D)
		$4p ({}^5P)$	12,29	193 (C)
		$4p ({}^3P)$	12,36	160 (C)
		$3s' ({}^3D^0)$	12,54	5,0 (C)
		$3s' ({}^1D_2^0)$	12,73	2,0 (C)
9	$F (2p^5 - {}^2P_{3/2}^0)$	$4d ({}^5D^0)$	12,75	96 (C)
		$3s ({}^4P)$	12,72	7 (E)
		$3s ({}^2P)$	13,0	3,5 (D)
		$3p ({}^4P_{5/2}^0)$	14,37	33 (C)
		$3p ({}^4D^0)$	14,52	29 (C)
		$3p ({}^2D^0)$	14,60	31,5 (C)
		$3p ({}^4S_{3/2}^0)$	14,68	22 (C)
10	$Ne (2p^6 - {}^1S_0)$	$3p ({}^2P^0)$	14,75	25 (C)
		$3s [3/2]_1^0 (1s_4)$	16,67	25 (D)
		$3s' [1/2]_1^0 (1s_2)$	16,85	1,6 (D)
		$3p [1/2]_1 (2p_{10})$	18,38	25,4 (B)
		$3p [5/2]_3 (2p_9)$	18,56	19,4 (B)
		$3p [5/2]_2 (2p_8)$	18,58	19,6 (B)
		$3p [3/2]_1 (2p_7)$	18,61	19,5 (B)
		$3p [3/2]_2 (2p_6)$	18,64	19,4 (B)
		$3p' [3/2]_1 (2p_5)$	18,69	19,1 (B)
		$3p' [3/2]_2 (2p_4)$	18,70	18,7 (B)
		$3p [1/2]_0 (2p_3)$	18,71	17,4 (B)
		$3p' [1/2]_1 (2p_2)$	18,73	18,3 (B)
		$3p' [1/2]_0 (2p_1)$	18,97	14,3 (B)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
11	Na ($3s - {}^2S_{1/2}$)	$3p ({}^2P^\circ_{1/2})$	2,103	16,4 (A)
		$3p ({}^2P^\circ_{3/2})$	2,104	16,3 (A)
		$4s ({}^2S_{1/2})$	3,19	38 (D)
		$3d ({}^3D)$	3,62	20 (C)
		$4p ({}^2P^\circ)$	3,75	110 (C)
		$5s ({}^2S_{1/2})$	4,12	75 (C)
		$4d ({}^2D)$	4,28	54 (C)
		$4f ({}^2F^\circ)$	4,29	70 (D)
		$5p ({}^2P^\circ)$	4,34	360 (C)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	4,51	150 (C)
		$5d ({}^2D)$	4,59	110 (C)
		$5f ({}^2F^\circ)$	4,59	135 (D)
		$6p ({}^2P^\circ)$	4,62	860 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	4,71	270 (C)
		$6d ({}^2D)$	4,76	190 (D)
		$6f ({}^2F^\circ)$	4,76	235 (D)
		$7p ({}^2P^\circ)$	4,78	1500 (C)
		$7d ({}^2D)$	4,86	320 (D)
12	Mg ($3s^2 - {}^1S_0$)	$3p ({}^1P^\circ_1)$	4,35	2,1 (C)
		$4s ({}^3S_1)$	5,11	10 (C)
		$4s ({}^1S_0)$	5,39	47 (C)
		$3d ({}^1D_2)$	5,75	80 (C)
		$3d ({}^3D)$	5,95	6,0 (C)
		$4p ({}^1P^\circ_1)$	6,12	9,7 (B)
		$5s ({}^1S_0)$	6,52	100 (C)
		$4d ({}^1D_2)$	6,59	55 (C)
		$4d ({}^3D)$	6,72	16 (C)
		$6s ({}^3S_1)$	6,97	52 (C)
		$5d ({}^1D_2)$	6,98	50 (C)
		$5d ({}^3D)$	7,06	34 (C)
		$3p^2 ({}^3P^\circ)$	7,17	2,2 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
13	$Al (3s^2 3p - {}^2P_{1/2}^\circ)$	$6d ({}^3D)$	7,25	56 (C)
		$7d ({}^3D)$	7,35	92 (C)
		$4s ({}^2S_{1/2})$	3,14	6,8 (B)
		$3d ({}^2D)$	4,02	13,4 (B)
14	$Si (3p^2 - {}^3P_0)$	$4s ({}^3P^\circ)$	4,942	5,9 (C)
		$4s ({}^1P_1^\circ)$	5,082	4,1 (C)
		$3s 3p^3 ({}^3D^\circ)$	5,617	21 (C)
		$3d ({}^1D_2^\circ)$	5,871	21 (C)
		$3d ({}^1P_1^\circ)$	6,619	8,1 (C)
		$3d ({}^1F_3^\circ)$	6,616	3,0 (D)
15	$P (3p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ)$	$4s ({}^4P)$	6,97	4,0 (D)
		$3d ({}^2F)$	8,75	4 (D)
		$4s' ({}^3D^\circ)$	8,41	11 (D)
16	$S (3p^4 - {}^3P_2)$	$3s 3p^5 ({}^3P^\circ)$	8,95	2,8 (D)
		$4s ({}^2P)$	9,23	1,0 (D)
17	$Cl (3p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$	$4s' ({}^2D)$	10,43	4,1 (D)
		$4s [3/2]_1^\circ (1s_4)$	11,62	10 (D)
18	$Ar (3p^6 - {}^1S_0)$	$4s' [1/2]_1^\circ (1s_2)$	11,83	2,0 (D)
		$4p [1/2]_1 (2p_{10})$	12,91	42 (C)
		$4p [5/2]_3 (2p_9)$	13,08	31 (C)
		$4p [5/2]_2 (2p_8)$	13,09	31 (C)
		$4p [3/2]_1 (2p_7)$	13,15	29 (C)
		$4p [3/2]_2 (2p_6)$	13,17	26 (C)
		$4p [1/2]_0 (2p_5)$	13,27	21 (C)
		$4p' [3/2]_1 (2p_4)$	13,28	29 (C)
		$4p' [3/2]_2 (2p_3)$	13,30	26 (C)
		$4p' [1/2]_1 (2p_2)$	13,33	26 (C)
		$4p [1/2]_0 (2p_1)$	13,48	21 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
19	$K (4s - {}^2S_{1/2})$	$5p [1/2]_1 (3p_{10})$	14,46	200 (D)
		$5p [5/2]_3 (3p_9)$	14,50	160 (D)
		$5p [5/2]_2 (3p_8)$	14,51	150 (D)
		$5p [3/2]_1 (3p_7)$	14,52	195 (C)
		$5p [3/2]_2 (3p_6)$	14,53	220 (C)
		$5p [1/2]_0 (3p_5)$	14,58	100 (D)
		$5p' [3/2]_1 (3p_4)$	14,68	—
		$5p' [1/2]_1 (3p_3)$	14,69	200 (C)
		$5p' [3/2]_2 (3p_2)$	14,69	180 (C)
		$5p' [1/2]_0 (3p_1)$	14,74	107 (C)
		$4p ({}^2P^\circ)$	1,61	27 (C)
		$5s ({}^2S_{1/2})$	2,61	46 (D)
		$3d ({}^2D)$	2,67	42 (C)
		$5p ({}^2P^\circ)$	3,06	130 (C)
		$4d ({}^2D)$	3,40	280 (D)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	3,40	75 (D)
		$4f ({}^2F^\circ)$	3,49	65 (D)
		$6p ({}^2P^\circ)$	3,60	310 (C)
		$5d ({}^2D)$	3,74	720 (D)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	3,75	160 (D)
20	$Ca (4s^2 - {}^1S_0)$	$5f ({}^2F^\circ)$	3,80	120 (D)
		$7p ({}^2P^\circ)$	3,85	570 (C)
		$6d ({}^2D)$	3,93	1100 (D)
		$6f ({}^2F^\circ)$	3,96	190 (D)
		$4p ({}^3P_1^\circ)$	1,89	$4 \cdot 10^5$ (D)
		$4p ({}^1P_1^\circ)$	2,93	4,6 (C)
		$5s ({}^3S_1)$	3,91	11 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультимета, эВ	Время жизни $\tau_{\text{ж.нс}}$
21	Sc ($3d\ 4s^2 - {}^2D_{3/2}$)	$3d\ 4p\ ({}^1D_2^\circ)$	4,44	17 (C)
		$5p\ ({}^1P_1^\circ)$	4,55	19 (C)
		$4d\ ({}^1D_2)$	4,62	80 (D)
		$4d\ ({}^3D_1)$	4,68	12 (C)
		$3d\ 4p\ ({}^1F_3^\circ)$	5,03	60 (C)
		$6s\ ({}^1S_0)$	5,05	13 (C)
		$6p\ ({}^1P_1^\circ)$	5,17	15 (C)
		$4p^2\ ({}^1S_0)$	5,18	89 (B)
		$4f\ ({}^3F_3^0)$	5,23	42 (C)
		$5d\ ({}^1D_2)$	5,32	25 (B)
		$4s\ 4p - z^4F_{3/2}^\circ$	1,943	$2 \cdot 10^3$ (D)
		$4s\ 4p - z^2D_{5/2}^\circ$	1,987	420 (C)
		$z^2D_{3/2}^\circ$	1,996	510 (C)
		$4s\ 4p - z^4D_{5/2}^\circ$	2,001	1000 (C)
		$4s^2\ 4p - z^2P^\circ$	2,332	1500 (C)
		$4s\ 4p - z^2F_{5/2}^\circ$	2,608	700 (C)
		$z^2F_{3/2}^\circ$	2,614	1000 (C)
		$4s\ 4p - y^2P^\circ$	3,057	22 (C)
		$4s\ 4p - y^2D^\circ$	3,094	5,7 (C)
		$4s\ 4p - y^2F^\circ$	3,182	5,5 (C)
22	Ti ($3d^2\ 4s^2 - {}^3F_2$)	$y^3F_2^\circ$	3,113	23 (D)
		$y^3F_3^\circ$	3,129	20 (C)
		$y^3F_4^\circ$	3,148	21 (C)
		$y^3D_2^\circ$	3,154	18 (C)
		$y^3D_3^\circ$	3,179	18 (C)
		$y^5G_5^\circ$	3,319	15 (D)
		$y^3G_3^\circ$	3,409	10 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
23	$V (3d^3 4s^2 - {}^4F_{3/2})$	$y^3G_5^\circ$	3,441	10,5 (C)
		$z^4G_{7/2}^\circ$	2,723	12 (D)
		$z^4G_{11/2}^\circ$	2,767	12 (D)
		$z^4F_{9/2}^\circ$	2,916	7 (D)
		$y^6F_{7/2}^\circ$	3,099	11 (D)
		$y^6D_{9/2}^\circ$	3,315	9,0 (C)
		x^4G°	3,930	6 (D)
		$z^4I_{11/2}^\circ$	4,627	15 (D)
		$z^4I_{13/2}^\circ$	4,638	14 (D)
		$z^4I_{15/2}^\circ$	4,652	12 (C)
		$y^4H_{9/2}^\circ$	4,652	12 (D)
		$x^4H_{13/2}^\circ$	4,771	9 (D)
		$y^2I_{11/2}^\circ$	4,836	7,4 (D)
		$w^4H_{13/2}^\circ$	5,026	9 (D)
		$4p - z^7P_2^\circ$	2,889	32 (B)
24	$Cr (3d^5 4s - {}^7S_3)$	$z^7P_3^\circ$	2,900	32 (B)
		$z^7P_4^\circ$	2,914	31,6 (A)
		$4p - z^5P_3^\circ$	3,321	17,5 (C)
		$z^5P_2^\circ$	3,322	16,7 (C)
		$z^5P_1^\circ$	3,323	17,3 (C)
		$4s 4p - y^7P_2^\circ$	3,438	6,3 (C)
		$y^7P_3^\circ$	3,449	7,1 (B)
		$y^7P_4^\circ$	3,464	6,9 (B)
		$4s 4p - y^5P_1^\circ$	3,648	73 (C)
		$y^5P_2^\circ$	3,668	71 (C)
		$y^5P_3^\circ$	3,698	63 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни $\tau_{\text{ж.нс}}$
25	Mn ($3d^5 4s^2 - {}^6S_{5/2}$)	$4d - e^7D_{4/5}$	5,240	16 (C)
		$6s - f^7S_3$	5,659	43 (C)
		$4p - y^5H^\circ$	5,663	9,5 (D)
		$4p - y^3F^\circ$	5,705	11 (C)
		$4s 5s - f^7D$	5,796	9,5 (C)
		$4p - z^6P_{7/2}^\circ$	3,075	55 (C)
		$5s - e^8S_{7/2}$	4,889	8,3 (C)
		$5s - e^6S_{5/2}$	5,133	18 (C)
		$3d^6 4p - z^6F^\circ$	5,390	17,5 (C)
		$3d^6 4p - z^4F^\circ$	5,520	15,5 (C)
26	Fe ($3d^6 4s^2 - {}^5D_4$)	$3d^6 4p - z^4D^\circ$	5,693	12,5 (C)
		$4d - e^6D$	5,854	16,5 (C)
		$z^5D_4^\circ$	3,211	81 (C)
		z^5D°	3,242	83 (C)
		$z^5F_5^\circ$	3,332	62 (C)
		z^5F°	3,375	64 (C)
		$z^5P_3^\circ$	3,603	44 (B)
		$y^5D_4^\circ$	4,103	6,2 (C)
		$z^3P_2^\circ$	4,209	37 (C)
		y^5F°	4,230	8,2 (C)
		$z^3P_1^\circ$	4,260	94 (C)
		$z^3P_0^\circ$	4,284	110 (C)
		z^5G°	4,357	11 (C)
		$y^5P_2^\circ$	4,607	7,7 (C)
		e^5G_6	6,264	13 (C)
		$4s 4p - z^4F_{9/2}^\circ$	3,514	63 (C)
		$z^4F_{7/2}^\circ$	3,568	77 (C)
27	Co ($3d^7 4s^2 - {}^4F_{9/2}$)			

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни $\tau_{\text{ж.нс}}$
28	Ni ($3d^8 4s^2 - {}^3F_4$)	$z^4 F_{5/2}^\circ$	3,622	73 (C)
		$4s 4p - z^4 D_{7/2}^\circ$	3,632	27 (C)
		$z^4 D_{5/2}^\circ$	3,713	31 (C)
		$3d^8 4p - y^4 G^\circ$	4,068	8,4 (C)
		$3d^8 4p - y^4 F^\circ$	4,120	7,2 (C)
		$3d^8 4p - y^2 G^\circ$	4,184	9,0 (C)
		$3d^8 4p - y^2 F^\circ$	4,442	6,5 (C)
		$z^3 P^\circ$	3,603	10 (C)
		$z^5 F_4^\circ$	3,606	30 (C)
		$z^3 F_3^\circ$	3,635	12 (C)
		$z^3 F_4^\circ$	3,655	15 (C)
		$z^3 D_2^\circ$	3,706	17 (C)
		$z^3 F_2^\circ$	3,796	14 (C)
		$z^1 F_3^\circ$	3,847	11 (C)
		$z^1 D_2^\circ$	3,898	16 (C)
		$y^3 F_4^\circ$	4,088	16 (C)
		$y^3 F_3^\circ$	4,105	9,1 (C)
		$y^3 F_2^\circ$	4,167	8,6 (C)
		$y^1 D_2^\circ$	4,538	7,4 (C)
29	Cu ($3d^{10} 4s - {}^2S_{1/2}$)	$4p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	3,786	7 (D)
		$4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	3,817	7,2 (C)
		$4s 4p' ({}^4P_{3/2}^\circ)$	4,92	320 (B)
		$5s ({}^2S_{1/2})$	5,35	22 (D)
		$4s 4p' ({}^4D_{3/2}^\circ)$	5,47	370 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
30	$Zn (3d^{10} 4s^2 - {}^1S_0)$	$4s 4p' ({}^2F_{7/2}^\circ)$	5,51	420 (C)
		$4s 4p' ({}^2P_{3/2}^\circ)$	5,69	12 (C)
		$4s 4p' ({}^2D_{3/2}^\circ)$	5,76	20 (C)
		$4s 4p' ({}^2D_{5/2}^\circ)$	5,76	170 (C)
		$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	6,12	35 (D)
		$4d ({}^2D)$	6,19	13 (C)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	6,55	50 (C)
		$5d ({}^2D)$	6,87	28 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	7,03	93 (C)
		$6d ({}^2D)$	7,18	53 (C)
		$4s 4p ({}^1P_1^\circ)$	5,796	1,40 (B)
		$4s 5s ({}^3S_1)$	6,655	8,1 (C)
		$4s 5s ({}^1S_0)$	6,917	41 (A)
		$4s 4d ({}^1D_2)$	7,744	22 (B)
		$4s 4d ({}^3D)$	7,783	6,3 (C)
		$4s 6s ({}^3S_1)$	8,113	22 (C)
		$4s 6s ({}^1S_0)$	8,188	103 (B)
		$4s 5d ({}^1D_2)$	8,473	86 (C)
		$4s 5d ({}^3D)$	8,503	14 (C)
31	$Ga (4s^2 4p - {}^2P_{1/2}^\circ)$	$5s ({}^2S_{1/2})$	3,073	6,2 (C)
		$5p ({}^2P^\circ)$	4,106	50 (C)
		$4d ({}^2D_{3/2})$	4,312	4,7 (C)
		$4d ({}^2D_{5/2})$	4,313	5,8 (C)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	4,660	28 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
32	$\text{Ge} (4p^2 - {}^3P_0)$	$6p ({}^2P^\circ)$	5,009	155 (C)
		$5s ({}^3P_0^\circ)$	4,643	3,6 (D)
		$5s ({}^3P_1^\circ)$	4,675	3,7 (D)
		$5s ({}^3P_2^\circ)$	4,850	4,0 (D)
		$5s ({}^1P_1^\circ)$	4,962	4,0 (D)
33	$\text{As} (4p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ)$	$4p^2 ({}^3P) 5s ({}^4P)$	6,460	3,7 (C)
		$5s ({}^2P)$	6,710	3,4 (C)
		$4p^2 ({}^1D) 5s' ({}^2D_{5/2})$	7,540	2,9 (C)
34	$\text{Se} (4p^4 - {}^3P_2)$	$4p^3 ({}^4S^\circ) 5s ({}^3S_1^\circ)$	6,323	1,7 (D)
		$4p^3 ({}^2D^\circ) 5s' ({}^1D_2^\circ)$	7,870	1,9 (D)
		$4p^3 ({}^2P^\circ) 5s'' ({}^3P_2^\circ)$	8,885	2,6 (D)
35	$\text{Br} (4p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$	$5p ({}^4S_{3/2}^\circ)$	9,754	43 (C)
36	$\text{Kr} (4p^6 - {}^1S_0)$	$5s [3/2]_1^\circ (1s_4)$	9,24	4,4 (C)
		$5s' [1/2]_1^\circ (1s_2)$	9,83	4,5 (C)
		$5p [1/2]_1 (2p_{10})$	10,13	32 (C)
		$5p [5/2]_3 (2p_9)$	10,20	30 (C)
		$5p [5/2]_2 (2p_8)$	10,34	30 (C)
		$5p [3/2]_1 (2p_7)$	10,48	31 (C)
		$5p [3/2]_2 (2p_6)$	10,51	25,5 (C)
		$5p [1/2]_0 (2p_5)$	10,54	23 (C)
		$5p' [3/2]_1 (2p_4)$	10,56	28 (C)
		$5p' [1/2]_1 (2p_3)$	10,63	26 (C)
		$5p' [3/2]_2 (2p_2)$	10,69	28 (C)
		$5p' [1/2]_0 (2p_1)$	10,72	23 (C)
		$6p [5/2]_2 (3p_8)$	12,79	160 (D)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
37	Rb ($5s - {}^2S_{1/2}$)	$6p [3/2]_1 (3p_7)$	12,809	145 (D)
		$6p [3/2]_2 (3p_6)$	12,815	115 (C)
		$6p' [3/2]_2 (3p_2)$	13,46	125 (C)
		$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	1,560	28,5 (C)
		$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	1,589	26,5 (C)
		$4d ({}^2D)$	2,40	85 (C)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	2,496	46 (C)
		$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	2,940	125 (C)
		$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	2,950	112 (B)
		$5d ({}^2D)$	3,19	230 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	3,262	90 (C)
		$4f ({}^2F^\circ)$	3,32	59 (D)
		$7p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	3,451	270 (C)
		$7p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	3,455	250 (C)
		$6d ({}^2D)$	3,56	270 (C)
		$8s ({}^2S_{1/2})$	3,601	155 (C)
		$5f ({}^2F^\circ)$	3,63	100 (D)
		$7d ({}^2D)$	3,75	360 (C)
		$6f ({}^2F^\circ)$	3,80	165 (D)
38	Sr ($5s^2 - {}^1S_0$)	$5p ({}^3P_1^\circ)$	1,80	$2,1 \cdot 10^4 (C)$
		$5p ({}^1P_1^\circ)$	2,690	6,2 (D)
		$5d ({}^3D)$	4,343	16,3 (A)
		$5p^2 ({}^3P_2)$	4,423	7,9 (A)
		$5p^2 ({}^1D_2)$	4,583	9,5 (C)
		$4f ({}^1F_3^\circ)$	4,902	34 (B)
39	Y ($4d5s^2 - {}^2D_{3/2}$)	$5s5p - z^2 D_{5/2}^\circ$	1,992	130 (C)
		$z^2 D_{3/2}^\circ$	2,002	170 (C)
		$5s5p - z^2 F_{5/2}^\circ$	2,669	39 (B)
		$z^2 F_{7/2}^\circ$	2,717	62 (B)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_k , нс
40	Zr ($4d^25s^2 - {}^3P_2$)	$5s5p - y^2D_{3/2}^\circ$	2,992	5,5 (C)
		$y^2P_{3/2}^\circ$	3,035	15,5 (B)
		$y^2F_{5/2}^\circ$	3,040	6,4 (C)
		$y^2P_{1/2}^\circ$	3,062	14 (C)
		$y^2D_{5/2}^\circ$	3,068	6,1 (C)
		$y^2F_{7/2}^\circ$	3,087	6,7 (B)
		$5s5p - z^3G_3^\circ$	2,709	120 (B)
		$z^3G_4^\circ$	2,746	110 (B)
		$z^3G_5^\circ$	2,798	107 (B)
		$4d^35p - y^5G^\circ$	3,293	13 (C)
		$4d^35p - y^3G_3^\circ$	3,190	16 (B)
		$y^3G_4^\circ$	3,225	21,5 (B)
		$y^3G_5^\circ$	3,277	27,6 (B)
41	Nb ($4d^45s - {}^6D_{1/2}$)	$5s5p - z^6F_{7/2}^\circ$	2,469	550 (C)
		$z^6F_{9/2}^\circ$	2,533	1050 (C)
		$5s5p - z^6D^\circ$	2,513	160 (C)
		$5s5p - z^4D^\circ$	2,597	95 (C)
		$4d^45p - y^6F^\circ$	3,098	8,0 (C)
		$4d^45p - x^6D^\circ$	3,393	7,5 (C)
		$5s5p - y^6D_{9/2}^\circ$	3,400	15 (C)
42	Mo ($4d^55s - {}^7S_3$)	$5p - z^7P^\circ$	3,224	16 (C)
		$5p - z^5P^\circ$	3,577	21 (C)
		$5s5p - z^7D_2^\circ$	3,863	36 (C)
		$5s5p - y^7P^\circ$	3,923	7,0 (D)
		$5s5p - z^7D_3^\circ$	3,925	21 (C)
44	Ru ($4d^75s - {}^5F_5$)	$z^7D_4^\circ$	3,983	120 (C)
		$4d^7({}^4F)5p - z^5D^\circ$	3,415	16 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
45	Rh ($4d^8 5s - {}^4F_{9/2}$)	$5p - z^5F^\circ$	3,491	12 (C)
		$5p - z^3G_5^\circ$	3,533	12 (C)
		$z^3G_4^\circ$	3,706	16 (C)
		$5p - z^5G^\circ$	3,734	10 (C)
		$5p - z^3F_4^\circ$	3,763	12 (C)
		$z^3F_3^\circ$	4,016	10 (C)
		$4d^8 ({}^3F) 5p - z^4D^\circ$	3,556	10,3 (C)
		$5p - z^4G_{9/2}^\circ$	3,539	10,1 (C)
		$z^4G_{7/2}^\circ$	3,856	8,6 (C)
		$5p - z^4F^\circ$	3,769	9,1 (C)
		$5p - z^2G_{9/2}^\circ$	3,920	8,2 (C)
		$z^2G_{7/2}^\circ$	4,097	9,2 (C)
		$5p - z^2F_{7/2}^\circ$	3,968	8,7 (C)
		$z^2F_{5/2}^\circ$	4,209	7,3 (C)
		$5p - z^2D_{5/2}^\circ$	3,973	8,1 (C)
		$z^2D_{3/2}^\circ$	4,199	7,0 (C)
46	Pd ($4d^{10} - {}^1S_0$)	$4d^8 ({}^3P) 5p - z^4P^\circ$	4,391	12 (C)
		$4d^9 ({}^2D_{5/2}) 5p ({}^3P_2^\circ)$	4,224	7 (D)
		$({}^3P_1^\circ)$	4,486	7,5 (C)
		$5p ({}^3F_4^\circ)$	4,455	7,1 (C)
		$5p ({}^3D_3^\circ)$	4,636	7,0 (C)
		$4d^9 ({}^2D_{3/2}) 5p' ({}^3D_1^\circ)$	5,005	4,9 (C)
		$5p' ({}^1P_1^\circ)$	5,063	5,0 (C)
47	Ag ($4d^{10} 5s - {}^2S_{1/2}$)	$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	3,664	7,9 (C)
		$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	3,778	6,7 (B)
		$5d ({}^2D)$	6,05	13 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	6,43	41 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_k , нс
48	Cd ($5s^2 - {}^1S_0$)	$6d ({}^2D)$	6,72	30 (D)
		$8s ({}^2S_{1/2})$	6,89	140 (C)
		$7d ({}^2D)$	7,03	61 (C)
		$8d ({}^2D)$	7,20	110 (C)
		$5p ({}^1P_1^\circ)$	5,42	1,7 (D)
		$6s ({}^3S_1)$	6,38	8,2 (C)
		$5d ({}^1D_2)$	7,34	20 (D)
		$5d ({}^3D)$	7,38	6,4 (C)
		$7s ({}^3S_1)$	7,76	22 (C)
		$6d ({}^3D)$	8,10	16 (C)
		$8s ({}^3S_1)$	8,27	48 (C)
		$7d ({}^3D)$	8,43	31 (C)
		$8d ({}^3D)$	8,60	56 (C)
		$6s ({}^2S_{1/2})$	3,022	7,4 (C)
49	In ($5p - {}^2P_{1/2}^\circ$)	$6p ({}^2P^\circ)$	3,969	55 (C)
		$5d ({}^2D)$	4,080	7,0 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	4,501	20 (C)
		$5p ({}^2P_{1/2}^\circ) 6s ({}^3P_0^\circ)$	4,295	6,0 (D)
		$6s ({}^3P_1^\circ)$	4,329	4,8 (C)
50	Sn ($5p^2 - {}^3P_0$)	$5p ({}^2P_{3/2}^\circ) 6s' ({}^3P_2^\circ)$	4,789	4,4 (C)
		$6s' ({}^1P_1^\circ)$	4,867	4,5 (C)
		$5p ({}^2P_{1/2}^\circ) 5d ({}^3D_2^\circ)$	5,473	5,3 (C)
		$5d ({}^3D_1^\circ)$	5,518	4,1 (C)
		$5d ({}^3D_3^\circ)$	5,527	5,8 (C)
		$5p^2 ({}^3P) 6s ({}^4P_{1/2})$	5,36	5,0 (C)
		$6s ({}^4P_{3/2})$	5,70	5,0 (C)
		$6s ({}^4P_{5/2})$	5,99	4,8 (C)
		$6s ({}^2P_{3/2})$	6,12	4,0 (C)
		$5p^2 ({}^1D) 6s' ({}^2D_{3/2})$	6,85	3,7 (D)
51	Sb ($5p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ$)			

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_k , нс
52	Te ($5p^4 - {}^3P_2$)	$6s' ({}^2D_{5/2})$	6,91	3,8 (C)
		$5p^2 ({}^3P) 7s ({}^4P_{1/2})$	7,141	12 (C)
		$7s ({}^4P_{3/2})$	7,559	10 (C)
		$7s ({}^4P_{5/2})$	7,875	10 (C)
		$7s ({}^2P_{1/2})$	7,611	7,9 (C)
		$7s ({}^2P_{3/2})$	7,663	8,4 (C)
		$5p^2 ({}^1S) 6s'' ({}^2S_{1/2})$	8,140	24 (C)
		$5p^2 ({}^3P) 8s ({}^4P_{5/2})$	8,512	20 (C)
		$6s ({}^5S_2^\circ)$	5,487	72 (C)
		$6s ({}^3S_1^\circ)$	5,784	2,4 (D)
53	I ($5p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ$)	$6s ({}^4P_{5/2})$	6,774	58 (C)
		$6s ({}^4P_{3/2})$	7,665	58 (C)
		$6s ({}^2P_{3/2})$	6,955	3 (D)
		$6p ({}^4P_{3/2}^\circ)$	8,315	39 (C)
		$6p ({}^4D_{5/2})$	8,993	42 (C)
		$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	9,058	50 (C)
54	Xe ($5p^6 - {}^1S_0$)	$6s [3/2]_1^\circ (1s_4)$	8,44	3,6 (C)
		$6s' [1/2]_1^\circ (1s_2)$	9,57	3,5 (C)
		$6p [1/2]_1 (2p_{10})$	10,03	38 (C)
		$6p [5/2]_2 (2p_9)$	10,13	37 (C)
		$6p [5/2]_3 (2p_8)$	10,26	34 (C)
		$6p [3/2]_1 (2p_7)$	10,34	35 (C)
		$6p [3/2]_2 (2p_6)$	10,37	40 (C)
		$6p [1/2]_0 (2p_5)$	10,41	35 (C)
		$6p' [3/2]_1 (2p_4)$	10,44	42 (C)
		$6p' [3/2]_2 (2p_3)$	10,46	35 (C)
		$6p' [1/2]_1 (2p_2)$	10,47	37 (C)
		$6p' [1/2]_0 (2p_1)$	10,49	33 (C)
		$7p [1/2]_1 (3p_{10})$	10,90	150 (C)
		$7p [5/2]_2 (3p_9)$	10,95	100 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
55	Cs ($6s - {}^2S_{1/2}$)	$7p [5/2]_3 (3p_8)$	10,97	130 (C)
		$7p [3/2]_2 (3p_7)$	10,996	120 (C)
		$7p [3/2]_1 (3p_6)$	11,003	130 (C)
		$7p [1/2]_0 (3p_5)$	11,015	80 (C)
		$6p ({}^2P^\circ)$	1,432	31 (C)
		$7s ({}^2S_{1/2})$	2,298	50 (D)
		$7p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	2,699	157 (B)
		$7p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	2,721	135 (B)
		$6d ({}^2D)$	2,804	60 (C)
		$8s ({}^2S_{1/2})$	3,015	95 (C)
		$4f ({}^2F^\circ)$	3,034	50 (D)
		$8p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	3,188	330 (C)
		$8p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	3,198	305 (C)
		$7d ({}^2D)$	3,231	90 (C)
		$9s ({}^2S_{1/2})$	3,337	170 (D)
		$5f ({}^2F^\circ)$	3,344	90 (D)
56	Ba ($6s^2 - {}^1S_0$)	$8d ({}^2D)$	3,449	150 (C)
		$6p ({}^1P_1^\circ)$	2,239	8,5 (C)
		$5d6p ({}^3D_1^\circ)$	3,00	17 (B)
		$5d6p ({}^3D_3^\circ)$	3,10	10 (C)
		$5d6p ({}^3P_1^\circ)$	3,19	12 (C)
		$5d6p ({}^1F_3^\circ)$	3,32	44 (C)
		$5d6p ({}^1P_1^\circ)$	3,54	12,2 (B)
		$7p ({}^1P_1^\circ)$	4,04	14 (C)
		$8p ({}^1P_1^\circ)$	4,45	9,5 (C)
		$7d ({}^1D_2)$	4,64	22 (C)
60	Nd ($4f^4 6s^2 - {}^5I_4$)	$5d^2 6s ({}^7K_3^\circ)$	2,105	615 (C)
		$5d6s^2 ({}^6H^\circ)$	2,347	80 (C)
		$5d^2 6s ({}^5H_4^\circ)$	2,286	320 (C)
		$6s6p ({}^5K^\circ)$	2,778	14 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_R , нс
64	Gd ($4f^7 5d 6s^2 - {}^9D_2^\circ$)	$5d ({}^9D^\circ) 6s 7p ({}^9D_{2-4})$	2,212	130 (C)
		$({}^9D_{5, 6})$	2,241	105 (C)
		$6s 6p ({}^9F_2)$	2,155	600 (D)
		$({}^9F_4)$	2,229	440 (C)
		$({}^9F_5)$	2,295	540 (D)
		$5d ({}^7D^\circ) 6s 6p ({}^9D_3)$	2,798	15,6 (C)
		$({}^9D_4)$	2,829	20,5 (C)
		$({}^9D_6)$	2,876	61 (C)
		$({}^9D_8)$	2,880	54 (C)
66	Dy ($4f^{10} 6s^2 - {}^5I_8$)	$6s 6p ({}^3P_1^\circ) ({}^7I_9^\circ)$	1,98	1200 (C)
		$4f^9 ({}^6H^\circ) 5d 6s^2 ({}^7K_7^\circ)$	2,19	2000 (C)
		$6s 6p ({}^3P_2^\circ) ({}^5K_9^\circ)$	2,20	2700 (D)
		$4f^9 ({}^6F^\circ) 5d 6s^2 ({}^7H_7^\circ)$	2,34	1000 (C)
		$({}^5H_7^\circ)$	2,69	115 (C)
		$4f^9 ({}^6H^\circ) 5d 6s^2 ({}^5K_7^\circ)$	2,70	73 (C)
		$4f^{10} ({}^5I_7) 6s 6p ({}^3P_2^\circ)$	2,71	500 (D)
		$({}^7K_9^\circ)$		
		$4f^{10} ({}^5I_7) 6s 6p ({}^3P_2^\circ) ({}^7I_8^\circ)$	2,72	1200 (C)
		$6s 6p ({}^1P_1^\circ) ({}^5K_9^\circ)$	2,94	4,8 (C)
		$4f^9 ({}^6H^\circ) 5d^2 ({}^3F) ({}^8K^\circ)$	2,95	12 (C)
		$6s ({}^9K_8^\circ)$		
		$6s 6p ({}^1P_1^\circ) ({}^5I_8^\circ)$	2,96	8 (C)
67	Ho ($4f^{11} 6s^2 - {}^4I_{15/2}^\circ$)	$4f^{10} 5d 6s^2 ({}^4I_{13/2})$	2,51	400 (C)
		$({}^4K_{13/2})$	2,85	109 (C)
		$({}^4L_{13/2})$	2,91	250 (C)
		$4f^{11} 6s 6p ({}^6K_{17/2})$	2,91	102 (C)
		$6s 6p (13/2, 2)_{13/2}$	2,97	38 (C)
		$(15/2, 1)_{13/2}$	2,98	11 (C)
		$4f^{10} 5d^2 6s ({}^8I_{17/2})$	3,01	70 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
70	Yb ($4f^{14}6s^2—1S_0$)	$4f^{11}6s6p (^4K_{17/2})$	3,02	6,3 (C)
		$4f^{11}6s6p (^4I_{15/2})$	3,06	6,0 (C)
		$4f^{10}5d6s^2 (J = 13/2)$	3,07	25 (C)
		$4f^{10}5d6s^2 (^6H_{15/2})$	3,13	155 (C)
72	Hf ($5d^26s^2—3F_2$)	$6s6p (^3P_1^o)$	2,231	850 (D)
73	Ta ($5d^36s^2—4F_{3/2}$)	$6s6p — z^5G_2^o$	2,233	1100 (C)
		$z^5G_4^o$	2,599	2200 (D)
		$6s6p — z^5F_1^o$	2,695	290 (C)
		$z^5F_2^o$	2,784	370 (C)
		$z^5F_4^o$	3,073	410 (C)
		$6s6p — z^1F_3^o$	2,932	120 (C)
		$6s6p — z^5D_2^o$	3,178	103 (C)
		$z^5D_3^o$	3,262	80 (C)
		$z^5D_4^o$	3,412	170 (C)
		$6s6p — z^3S_1^o$	3,478	41 (C)
		$6s^2(a^3F) 6p — z^4D_{1/2}^o$	2,294	570 (C)
		$z^4D_{5/2}^o$	2,624	910 (C)
		$6a^2(a^3P) 6p — z^2D_{3/2}^o$	2,575	680 (C)
		$5d^36s(a^5F) 6p — z^4F_{3/2}^o$	2,710	450 (C)
		$s^4F_{5/2}^o$	2,897	390 (C)
		$6s — z^6F_{7/2}^o$	3,296	260 (C)
		$z^6F_{9/2}^o$	3,439	265 (C)
		$z^6F_{11/2}^o$	3,764	300 (C)
		$6p — z^6D_{3/2}^o$	3,067	170 (C)
		$z^6D_{5/2}^o$	3,322	110 (C)
		$z^6D_{7/2}^o$	3,444	120 (C)
		$z^6D_{9/2}^o$	3,567	140 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
74	W ($5d^4 6s^2 - {}^5D_0$)	$6s6p \quad {}^7D_1^\circ$ $z^7D_2^\circ$ $z^7D_3^\circ$ $z^7D_4^\circ$ $z^7D_5^\circ$ $z^5F_1^\circ$ $z^5F_2^\circ$ $z^5F_3^\circ$ $z^5F_4^\circ$ $z^7P_2^\circ$ $z^7P_3^\circ$ $z^7P_4^\circ$ $z^5P_1^\circ$ $z^5P_2^\circ$ $z^5P_3^\circ$	2,660 2,971 3,247 3,570 3,691 3,222 3,430 3,613 3,897 3,252 3,408 3,458 3,496 3,644 3,792	275 (C) 250 (C) 160 (C) 190 (C) 700 (C) 820 (C) 180 (C) 260 (C) 480 (C) 74 (C) 86 (C) 63 (C) 130 (C) 80 (C) 60 (C)
75	Re ($5d^5 6s^2 - {}^6S_{5/2}$)	$6s (a^7S) 6p - z^8P_{7/2}^\circ$ $6p - z^6P_{5/2}^\circ$ $z^6P_{7/2}^\circ$ $z^6P_{3/2}^\circ$	2,535 3,577 3,582 3,591	860 (C) 40 (C) 30 (C) 50 (C)
77	Ir ($5d^7 6s^2 - {}^4F_{9/2}$)	$6s ({}^5F) 6p - z^6D_{9/2}^\circ$ $z^6D_{7/2}^\circ$ $z^6D_{5/2}^\circ$ $z^6D_{3/2}^\circ$ $6s ({}^5F) 6p - z^6F_{11/2}^\circ$ $z^6F_{9/2}^\circ$ $z^6F_{7/2}^\circ$	3,262 3,785 4,100 4,025 3,528 4,031 4,200	580 (C) 820 (C) 170 (C) 100 (C) 340 (C) 340 (C) 28 (C)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуждения для центра тяжести мультиплета, эВ	Время жизни τ_h , нс
78	Pt ($5d^9 6s - {}^3D_3$)	$z^6 F_{5/2}^\circ$	4,330	95 (C)
		$z^6 F_{3/2}^\circ$	4,512	90 (C)
		$6s ({}^5F) 6p - z^6 G_{11/2}^\circ$	4,238	70 (C)
		$z^6 G_{9/2}^\circ$	4,349	30 (C)
		$z^6 G_{7/2}^\circ$	4,390	40 (C)
		$5d^8 6s 6p - z^5 D_4^\circ$	3,74	680 (C)
		$5d^8 6p (1_2^\circ)$	4,04	14 (D)
		$5d^8 6s 6p (2_5^\circ)$	4,18	130 (C)
		$5d^8 6p (3_3^\circ)$	4,23	17 (D)
		$5d^8 6s 6p (4_3^\circ)$	4,38	27 (C)
79	Au ($5d^{10} 6s - {}^2S_{1/2}$)	$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	4,63	6,0 (C)
		$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	5,105	4,6 (C)
		$5d^9 6s 6p ({}^4F_{7/2}^\circ)$	5,646	83 (C)
		$6d ({}^2D)$	7,687	11,5 (C)
		$8s ({}^2S_{1/2})$	8,027	53 (C)
		$7d ({}^2D)$	8,368	28 (C)
		$8d ({}^2D_{5/2})$	8,680	49 (C)
		$6p ({}^3P_3^\circ)$	4,887	118 (B)
80	Hg ($5d^{10} 6s^2 - {}^1S_0$)	$6p ({}^1P_1^\circ)$	6,704	—
		$7s ({}^3S_1)$	7,731	9,5 (D)
		$7s ({}^1S_0)$	7,926	30 (B)
		$7p ({}^3P_2^\circ)$	8,829	170 (D)
		$6d ({}^3D_1)$	8,845	7,2 (C)
		$6d ({}^3D_2)$	8,852	9,1 (C)
		$6d ({}^3D_3)$	8,856	8,3 (C)
		$6d ({}^1D_2)$	8,844	11 (B)
		$8s ({}^3S_1)$	9,170	21 (C)
		$8s ({}^1S_0)$	9,225	84 (C)
		$7d ({}^1D_2)$	9,555	40 (B)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия возбуж- дения для центра тяжести мульти- плета, эВ	Время жизни τ_R , нс
81	$Tl (6s^2 6p - ^2P_{1/2}^\circ)$	$7s (^2S_{1/2})$	3,283	7,6 (C)
		$6d (^2D)$	4,484	7,0 (C)
		$8s (^2S_{1/2})$	4,804	20 (C)
		$7d (^2D)$	5,212	18 (C)
		$9s (^2S_{1/2})$	5,352	43 (C)
		$9p (^2P^\circ)$	5,518	16,4 (C)
		$8d (^2D)$	5,540	47 (C)
82	$Pb (6p^2 - ^3P_0)$	$7s (^3P_1^\circ)$	4,375	5,6 (C)
		$6d (^2F_2^\circ)$	5,634	26 (C)
		$6d (^3D_2^\circ)$	5,711	4,2 (C)
		$6d (^3D_1^\circ)$	5,712	3,8 (C)
		$6d (^3F_3^\circ)$	5,744	6,1 (C)
		$7s (^3P_2^\circ)$	5,975	5,9 (C)
		$8s (^3P_1^\circ)$	6,036	12,7 (C)
		$7s (^1P_1^\circ)$	6,130	5,0 (C)
83	$Bi (6p^3 - ^4S_{3/2}^\circ)$	$7s (^4P_{1/2})$	4,04	4,6 (C)
		$6d (^2D_{3/2})$	5,44	28 (C)
		$6d (^2D_{5/2})$	5,557	4 (D)
		$7s (^4P_{3/2})$	5,563	6 (D)
		$7s (^2P_{1/2})$	6,693	5,8 (C)
		$8s (^4P_{1/2})$	5,874	8 (D)
		$7s (^4P_{5/2})$	6,012	5,2 (C)
		$7s (^2P_{3/2})$	6,132	5,1 (C)
92	$U (5f^3 6d 7s^2 - ^5L_6^\circ)$	$7d (^2D_{5/2})$	6,343	7,8 (C)
		$6d 7s 7p (^7M_7)$	2,095	220 (C)
		$6d^2 7p (^7N_7)$	3,458	11 (C)

6.5. ТЕРМЫ И РАДИАЦИОННОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ

Метастабильными состояниями атомных частиц называют такие возбужденные состояния, излучательный переход из которых в более низкие состояния запрещен правилами отбора для электрического дипольного излучения (см. § 6.4).

Строгие правила отбора, ограничивающие возможные изменения состояния излучающей частицы, возникают из соблюдения законов сохранения момента и четности для замкнутой системы излучатель+поле излучения [1]. Именно, правило сложения моментов начального состояния частицы J_i , конечного состояния частицы J_f и фотона J ($j=1, 2, 3...$) ($J_i - J_f = j$) требует выполнения соотношений

$$|J_i - J_f| \leq j \leq J_i + J_f,$$

$$M_i - M_f = M_j,$$

где M_i , M_f и M_j — проекции моментов J_i , J_f и j на ось квантования. Кроме того, четности P_i и P_f начального и конечного состояний излучающей частицы, а также четность излученного фотона P_{ph} должны удовлетворять условию

$$P_f P_{ph} = P_i \text{ или } P_i P_f = P_{ph}.$$

Четность фотона электрического типа $P_{ph}(Ej) = (-1)^j$, а четность фотона магнитного типа $P_{ph}(Mj) = (-1)^{j+1}$, так что правило отбора по четности для электрического мультипольного излучения имеет вид $P_i P_f = (-1)^j$, а в случае магнитного мультипольного излучения аналогично получим $P_i P_f = (-1)^{j+1}$. Отметим, наконец, что четность электронной подсистемы в атоме $P = (-1)^{\sum l_i}$, где l_i — орбитальный момент i -го электрона.

Кроме отмеченных строгих правил отбора могут существовать и другие, приближенные правила, отражающие свойства конкретного излучателя. Так, в распространенном случае атома, термы которого построены по типу LS -связи, имеют место дополнительные правила отбора для наиболее интенсивного дипольного ($j=1$) и квадрупольного ($j=2$) излучений [2]:

$$M1: \Delta S = \Delta L = 0; \Delta J = 0, 1 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0$$

$$E2: \Delta S = 0; \Delta L = 0, 1, 2 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0; \Delta J = 0, 1, 2 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0, 1, 1/2 \leftarrow \rightarrow 1/2$$

$$M2: \Delta S = 1; \Delta L = 0, 1 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0; \Delta J = 0, 1, 2 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0, 1, 1/2 \leftarrow \rightarrow 1/2 \text{ или } \Delta S = 0; \Delta L = 0, 1, 2 \text{ и } 0 \leftarrow \rightarrow 0, 1$$

Запрет на излучение фотона из метастабильного состояния атома снимается за счет наличия релятивистских и других типов взаимодействия электронов между собой и с ядром. В итоге индуцируются однофотонные переходы между состояниями частиц типа $M1$, $E2$ и $M2$, двухфотонный распад состояния $2E1$ с вылетом двух коррелированных фотонов и т. д.

На рис. 6.44 и 6.45 представлены данные о метастабильных состояниях атомов C, N, Si, P и халькогенов. На диаграммах отмечены числовые значения энергий возбуждения метастабильных уровней, длины волн переходов, вероятности оптических переходов и радиационного времени жизни уровней (пояснения даны в центральной части рисунка).

В табл. 6.5 собрана более полная информация об энергии возбуждения T_k низколежащих метастабильных состояний атомов, длине волны излучения λ при их распаде (каналы распада с наибольшими значениями коэффициентов Эйнштейна отмечены первыми, а следующие в порядке убывания заключены в круглые скобки) и радиационном времени жизни τ_m исследованных состояний, причем данные о вероятности излучательных переходов (коэффициентах Эйнштейна) были получены за редким исключением расчетным путем. В ряде случаев значения T_k и λ были отнесены к положениям центров тяжести мультиплетов (см. определение \bar{T} в § 6.1). При работе над этим материалом были использованы обзоры [3—5], справочные издания [6, 7] и некоторые информативные журнальные публикации [8—11], а также обширные библиографии [12, 13]. Данные для времени жизни метастабильных уровней τ_m распределены нами по классам точности (см. предисловие) в соответствии с оценкой точности использованного метода их получения. Числовые значения энергии возбуждения уровней и длин волн излуча-

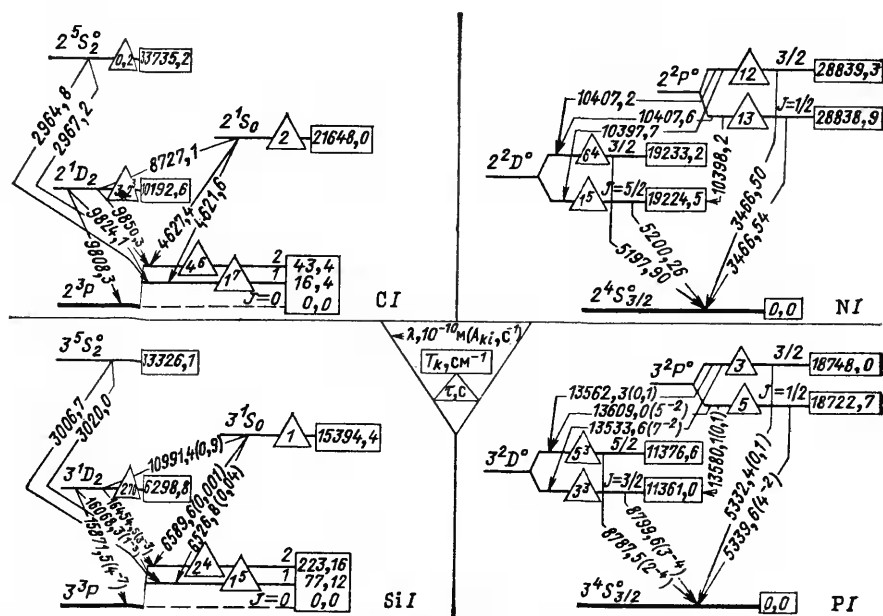


Рис. 6.44. Диаграммы метастабильных уровней энергии атомов C, N, Si и P с отмеченными значениями величин λ и τ_k

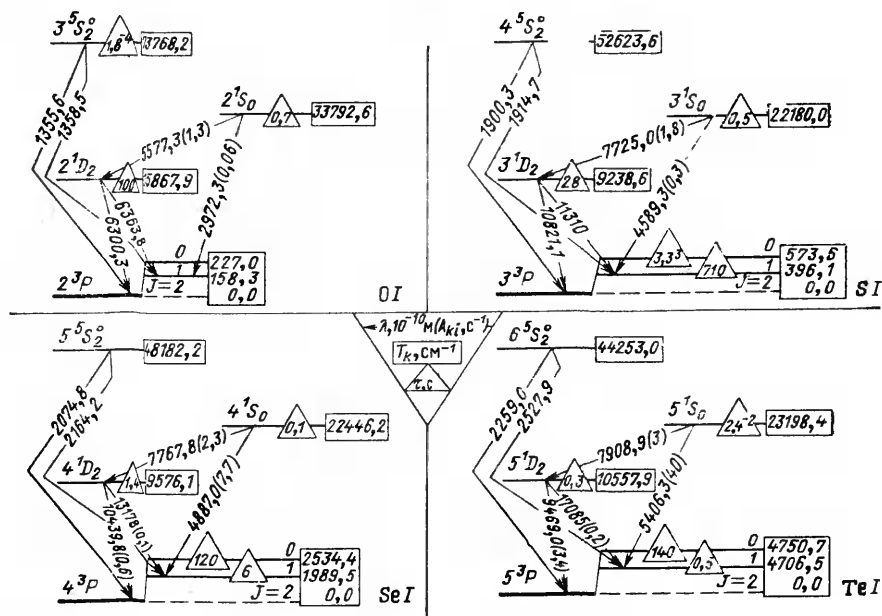


Рис. 6.45. Диаграммы метастабильных уровней энергии атомов халькогенов с отмеченными значениями величин λ и τ_k

тельных переходов были округлены таким образом, что возможные в дальнейшем уточнения могут затронуть лишь последнюю значащую цифру в пределах ± 1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Релятивистская квантовая теория. Часть 1.— М.: Наука, 1968, гл. 5.
2. Hibbert A. Atomic Structure Theory.— In: Progress in Atomic Spectroscopy, Part A/Ed. by W. Hanle, H. Kleinpoppen.— N. Y.: Plenum, 1978, p. 1—69.
3. Гарстэнг Р. Запрещенные переходы.— В кн.: Атомные и молекулярные процессы/Под ред. Д. Бейтса; Пер. с англ. под ред. Л. М. Бибермана, В. А. Фабриканта.— М.: Мир, 1964, с. 9—47.
4. Marrus R., Mohr P. J. Forbidden Transitions in One- and Two-Electron Atoms.— In: Advances in Atomic and Molecular Physics. Vol. 14/Ed. by D. R. Bates, B. Bederson.— N. Y.: Academic Press, 1978, p. 181.
5. Schofield K. Critically evaluated rate constants for gaseous reactions of several electronically excited species.— J. Phys. Chem. Ref. Data, 1979, vol. 8, p. 723.
6. Wiese W. L., Smith M. W., Glennon B. M.— NSRDS-NBS 4. Vol. 1.— Washington: US Gov't Print. Office, 1966; Wiese W. L., Smith M. W., Miles B. M.— NSRDS-NBS 22. Vol. 2.— Washington: US Gov't Printing Office, 1969.
7. Smith M. W., Wiese W. L.— J. Phys. Chem. Ref. Data, 1973, vol. 2, p. 85.
8. Garstang R. H.— J. Res. NBS, 1964, vol. 68, p. 61; Layzer D., Garstang R. H.— Ann. Rev. Astronom. Astrophys., 1968, vol. 6, p. 449.
9. Warner B.— Z. Astrophysik, 1968, Bd 69. S. 399.
10. Czyzak S. J., Krueger T. K.— Month. Not. Roy. Astronom. Soc., 1963, vol. 126, p. 177.
11. Kafatos M., Lynch J. P.— Astrophys. J., Suppl. ser., 1980, vol. 42, p. 611.
12. Fuhr J. R., Miller B. J., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (1914 through October 1977): NBS Spec. Publ. 505.— Washington: US Gov't Printing Office, 1978.
13. Miller B. J., Fuhr J. R., Martin G. A. Bibliography on Atomic Transition Probabilities (November 1977 through March 1980): Rept NBS-SP-505/1.— Washington: US Gov't Printing Office, 1980.

Таблица 6.5. Энергия возбуждения и радиационное время жизни метастабильных состояний атомов

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Метастабильный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиационного распада метастабильного уровня	Длина волны излучения при переходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см $^{-1}$	эВ			
1	H ($1^2S_{1/2}$)	$2^2S_{1/2}$	82258,96	10,20	$1^2S_{1/2}$	(2E1)	0,1215 (A)
2	He (1^1S_0)	2^3S_1 2^1S_0 $2^3P_2^o$	159856,1 166277,6 169086,9	19,82 20,62 20,96	1^1S_0	625,6 601,4 591,4	7900 (B) 0,020 (C) $A_{M2}=0,22$ с $^{-1}$
4	Be (2^1S_0)	$2^3P_2^o$	21981,3	2,726	2^1S_0	4548	$5,6 \cdot 10^3$ (D)
5	B ($2^2P^o_{1/2}$)	$2^2P^o_{3/2}$ $2s2p^2$ $-4P_{1/2}-5/2$	15,25 28 877	0,0019 3,580	$2^2P^o_{1/2}$ $2^2P^o_{3/2}$	$6,6 \cdot 10^6$ 3460	$3,2 \cdot 10^7$ (D) —

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Метаустойчивый уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада метастабиль- ного уровня	Длина волны излучения при пере- ходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см $^{-1}$	эВ			
6	C (2^3P_0)	2^3P_1	16,4	0,0020	2^3P_0	$6,1 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^7$ (D)
		2^3P_2	43,4	0,0054	2^3P_1	$3,7 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^6$ (D)
		2^1D_2	10192,6	1,264	2^3P	9850—9808	3200 (D)
		2^1S_0	21648,0	2,684	2^1D_2 (2^3P)	8727 (4620)	2 (D)
7	N ($2^4S_{3/2}$)	$2s2p^3-^5S_2$	33735,2	4,183	2^3P	2966	0,18 (C)
		$2^2D_{5/2}$	19224,5	2,384	$2^4S_{3/2}$	5200	$1,6 \cdot 10^5$ (D)
		$2^2D_{3/2}$	19233,2	2,385	$2^4S_{3/2}$	5198	$4,4 \cdot 10^4$ (D)
		$2^2P_{1/2}$	28838,9	3,576	2^2D° ($2^4S_{3/2}$)	10 400 (3467)	12,6 (C)
		$2^2P_{3/2}$	28839,3	3,576	2^2D° ($2^4S_{3/2}$)	10 400 (3466)	11,4 (C)
8	O (2^3P_1)	2^3P_1	158,3	0,0196	2^3P_1 (2^3P_2)	$6,3 \cdot 10^8$	—
		2^3P_0	227,0	0,028	2^3P	$1,5 \cdot 10^8$	—
		2^1D_2	15867,9	1,967	2^3P	6300	150 (C)
		2^1S_0	33792,6	4,190	2^1D_2 (2^3P_1)	5577 (2972)	0,7 (C)
		3^5S_2	73768,2	9,146	2^3P	1357	$1,8 \cdot 10^{-4}$ (C)
9	F ($2^2P_{3/2}$)	$2^2P_{1/2}$	404,08	0,0501	$2^2P_{3/2}$	$2,5 \cdot 10^8$	660 (D)
10	Ne (2^1S_0)	$3s$ [$3/2$] $_2$	134041,8	16,62	2^1S_0	746	20 (E)
		(3^1P_2)					
		$3s'$ [$1/2$] $_0$	134818,6	16,72	2^3P_1	$2,8 \cdot 10^8$	400 (E)
12	Mg (3^1S_0)	(3^1P_0)					
		3^3P_1	21870,5	2,712	3^1S_0	4571	0,0022 (C)
		3^3P_2	21911,2	2,717	3^1S_0	4563	$5 \cdot 10^3$ (E)
13	Al ($3^2P_{1/2}$)	$3^2P_{3/2}$	112,06	0,0139	$3^2P_{1/2}$	$8,9 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^4$ (D)
		$3s3p^2-$	29 097	3,608	$32P^\circ$	3440	—
		$-^4P_{1/2}-5/2$					
14	Si (3^3P_0)	3^3P_1	77,12	0,0096	3^3P_0	$1,3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^5$ (E)
		3^3P_2	223,16	0,0277	3^3P_1	$6,8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^4$ (E)
		3^1D_2	6298,8	0,781	3^3P_2 (3^3P_1)	16 455	270 (E)
		3^1S_0	15394,4	1,909	3^1D_2 (3^3P_1)	10 991 (6527)	1,1 (E)
		3^5S_2	33326,1	4,132	3^3P	3010	—
15	P ($3^4S_{3/2}$)	$3^2D_{3/2}$	11361,0	1,409	$3^4S_{3/2}$	8800	$3,4 \cdot 10^3$ (D)
		$3^2D_{5/2}$	11376,6	1,411	$3^4S_{3/2}$	8787	$5,2 \cdot 10^3$ (D)
					($3^2D_{3/2}$)		

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состоя- ния)	Метастабиль- ный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада метастабиль- ного уровня	Длина волны излучения при пере- ходе в нижнее состояние λ , 10 ⁻¹⁰ м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см ⁻¹	эВ			
16	S (3 ² P ₂)	3 ² P _{1/2} ^o	18722,7	2,321	3 ² D ^o (3 ⁴ S _{3/2} ^o)	13 600 (5340)	5,1 (D)
		3 ² P _{3/2} ^o	18748,0	2,324	3 ² D ^o (3 ⁴ S _{3/2} ^o)	13 560 (5330)	3,4 (D)
		3 ² P ₁ ^o	396,1	0,0491	3 ² P ₂ ^o	2,5 · 10 ⁵	710 (D)
		3 ² P ₀ ^o	573,6	0,0711	3 ² P ₁ ^o	5,6 · 10 ⁵	3300 (D)
		3 ¹ D ₂ ^o	9238,6	1,145	3 ² P ₂ (3 ² P ₁)	10 821 (11 310)	28 (D)
		3 ¹ S ₀ ^o	22180,0	2,750	3 ¹ D ₂ (3 ² P ₁)	7725 (4589)	0,47 (D)
17	Cl (3 ² P _{3/2} ^o)	4 ⁵ S ₂ ^o	52623,6	6,525	3 ² P	1900	—
		3 ² P _{1/2} ^o	882,4	0,109	3 ² P _{3/2} ^o	1,1 · 10 ⁵	82 (D)
		4 ⁴ P _{5/2-1/2} ^o	72 280	8,962	3 ² P ^o	1380	—
18	Ar (3 ¹ S ₀)	4s [3/2] ₂ ^o	93143,8	11,55	3 ¹ S ₀	1073,6	60 (E)
		(3 ¹ P ₂ ^o)					
		4s' [1/2] ₀ ^o (3 ¹ P ₀ ^o)	94553,7	11,72	4 ³ P ₁ ^o	1,2 · 10 ⁵	50 (E)
20	Ca (4 ¹ S ₀)	4 ³ P ₀ ^o	15157,9	1,879		6595	—
		4 ³ P ₁ ^o	15210,1	1,886	4 ¹ S ₀	6573	0,35 · 10 ⁻³ (C)
		4 ³ P ₂ ^o	15315,9	1,899		6527	—
21	Sc (4 ² D _{3/2})	3 ¹ D ₂	21849,6	2,709	4 ³ P _{1,2} ^o (4 ¹ S ₀)	15057, 15300 (4575)	2,0 · 10 ⁻³ (D)
		4 ² D _{5/2}	168,3	0,0209	4 ² D _{3/2}	5,9 · 10 ⁵	—
		4 ² F ₅	170,1	0,0211	4 ² F ₃	5,9 · 10 ⁵	—
22	Ti (4 ² F ₂)	4 ² F ₄	386,9	0,0480	4 ² F ₃	4,6 · 10 ⁵	—
		4 ² F ₁₋₅	6721,4	0,833	4 ² F	15 000	—
		4 ² F _{5/2}	137,4	0,0170	4 ² F _{3/2}	7,3 · 10 ⁵	—
23	V (4 ¹ F _{3/2})	4 ¹ F _{7/2}	323,4	0,0400	4 ¹ F _{5/2}	5,4 · 10 ⁵	—
		4 ¹ F _{9/2}	553,0	0,0686	4 ¹ F _{7/2}	4,4 · 10 ⁵	—
		4 ¹ S ₂	7593,2	0,941	4 ¹ S ₂	13 166	—
24	Cr (4 ² S ₂)	4 ² D ₀₋₄	8090,2	1,003	4 ² S ₂ (4 ² S ₂)	2 · 10 ⁶ (12 000)	—
		4 ² D _{9/2}	17052,3	2,114		5863	3,4 (E)
		4 ² D _{7/2}	17282,0	2,143	4 ² S _{5/2}	5785	3,2 (E)
		4 ² D _{5/2}	17451,5	2,164		5729	3,0 (E)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состоя- ния)	Метастабиль- ный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада метастабиль- ного уровня	Длина волны излучения при пере- ходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см $^{-1}$	эВ			
		$4^6D_{3/2}$	17568,5	2,178		5690	2,9 (E)
		$4^6D_{1/2}$	17637,1	2,187	$4^6S_{5/2}$	5668	2,9 (E)
26	Fe (4^5D_4)	$4^5D_3-4^5D_0$	415,9— 978,1	0,0516— —0,121	4^5D	$2,4 \cdot 10^5$ — $—5,4 \cdot 10^5$	400—1700 (E)
		4^5F_6	6928,3	0,859	4^5D_1	14 430	50 (E)
		4^5P_3	17550,2	2,176	4^5D_4	5696	4 (E)
		4^5P_3	18 378	2,279	(4^5D_3)	5566	2,5 (E)
27	Co ($4^4F_{9/2}$)	$4^4F_{7/2}$	816,0	0,101	(4^5D_3)	5566	2,5 (E)
		$4^4F_{5/2}$	1406,8	0,174	$4^4F_{9/2}$	$1,2 \cdot 10^5$	—
		$4^4F_{3/2}$	1809,3	0,224	$4^4F_{7/2}$	$1,7 \cdot 10^5$	—
28	Ni (4^3F_4)	4^3F_3	1332,2	0,165	4^3F_4	$7,5 \cdot 10^4$	16 (E)
		4^3F_3	2216,5	0,275	4^3F_3	$1,1 \cdot 10^5$	40 (E)
		$3d^4s^2 - b^1D_2$	13521,3	1,676	4^3F_3	8202 (8843)	1,7 (E)
29	Cu ($4^2S_{1/2}$)	$4^2D_{5/2}$	11202,6	1,389	$4^2S_{1/2}$	8924	—
		$4^2D_{3/2}$	13245,4	1,642	$4^2S_{1/2}$	7548	—
30	Zn (4^1S_0)	$4^3P_0^{\circ}$	32311,3	4,006		3094	—
		$4^3P_1^{\circ}$	32501,4	4,030	4^1S_0	3076	$25 \cdot 10^{-6}$ (D)
		$4^3P_2^{\circ}$	32890,3	4,078		3040	$1 \cdot 10^3$ (E)
31	Ga ($4^2P_{1/2}^{\circ}$)	$4^2P_{3/2}^{\circ}$	826,2	0,102	$4^2P_{1/2}^{\circ}$	$1,2 \cdot 10^5$	200 (D)
32	Ge (4^3P_0)	4^3P_1	557,1	0,069	4^3P_0	$1,8 \cdot 10^5$	320 (D)
		4^3P_2	1410,0	0,175	4^3P_1	$1,2 \cdot 10^5$	120 (D)
		4^1D_3	7125,3	0,883	4^3P_2	17 490	6,7 (D)
		4^1S_0	16367,3	2,029	(4^3P_1)	(15 220)	
					4^1D_3	10 817	0,46 (D)
					(4^3P_1)	(6323)	
33	As ($4^4S_{3/2}^{\circ}$)	$4^2D_{3/2}^{\circ}$	10 592	1,313	$4^4S_{3/2}^{\circ}$	9439	13 (D)
		$4^2D_{5/2}^{\circ}$	10 915	1,353	$4^4S_{3/2}^{\circ}$	9160 ($3 \cdot 10^4$)	180 (D)
		$4^2P_{1/2}^{\circ}$	18 186	2,255	($4^2D_{3/2}^{\circ}$)	5497 (13 165)	0,85 (D)
		$4^2P_{3/2}^{\circ}$	18 647	2,312	($4^2D_{3/2}^{\circ}$)	5361 (12 411)	0,37 (D)
34	Se (4^3P_3)	4^3P_1	1989,5	0,247	4^3P_3	$5,0 \cdot 10^4$	5,9 (D)
		4^3P_0	2534,4	0,314	4^3P_1	$1,8 \cdot 10^5$	115 (D)
					(4^3P_3)	($3,9 \cdot 10^4$)	

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состояния)	Метастабиль- ный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада метастабиль- ного уровня	Длина волны излучения при пере- ходе в нижнее состояние λ , 10 ⁻¹⁰ м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см ⁻¹	эВ			
35	Br (² P _{3/2})	4 ¹ D ₂	9576,1	1,187	4 ³ P ₂ (4 ³ P ₁)	10 440 (13 177)	1,4 (D)
		4 ¹ S ₀	22446,2	2,783	4 ³ P ₁ (4 ¹ D ₂)	4887 (7768)	0,10 (D)
		4 ² P _{1/2}	3685	0,457	4 ² P _{3/2}	27 129	1,0 (D)
36	Kr (4 ¹ S ₀)	5s[3/2] ₂ ^o (³ P ₂)	79971,8	9,915	4 ¹ S ₀	1250,4	85 (E)
		5s' [1/2] ₀ ^o (¹ P ₀)	85191,7	10,56	5 ³ P ₁	2,3·10 ⁴	0,5 (E)
38	Sr (5 ¹ S ₀)	5 ³ P ₁	14504,4	1,798	5 ¹ S ₀	6893	20·10 ⁻⁶ (C) A _{E2} = =60 (D) с ⁻¹
		4 ¹ D ₂	20149,7	2,498		4961	
39	Y (4 ² D _{3/2})	4 ² D _{5/2}	530,4	0,0658	4 ² D _{3/2}	1,9·10 ⁵	—
40	Zr (5 ² F ₂)	5 ² F ₃	570,4	0,0707	5 ² F ₃	1,8·10 ⁵	—
		5 ² F ₄	1240,8	0,154	5 ² F ₃	1,5·10 ⁵	—
42	Mo (5 ² S ₃)	5 ² S ₃	10768,3	1,335	5 ² S ₃	9284	—
		5 ² D ₀₋₄	11831,7	1,467	5 ² S ₂ (5 ² S ₃)	9·10 ⁴ (8449)	—
48	Cd (5 ¹ S ₀)	5 ³ P ₀ ^o	30114,0	3,734	5 ¹ S ₀	3320	—
		5 ³ P ₁ ^o	30656,1	3,800		3261	2,40·10 ⁻⁶ (B)
		5 ³ P ₂ ^o	31827,0	3,946		3141	130 (D)
49	In (5 ² P _{1/2})	5 ² P _{3/2}	2212,6	0,274	5 ² P _{1/2}	4,5·10 ⁴	10 (D)
50	Sn (5 ³ P ₀)	5 ³ P ₁	1692	0,210	5 ³ P ₀	5,9·10 ⁴	12 (D)
		5 ³ P ₂	3428	0,425	5 ³ P ₁	5,8·10 ⁴	16 (D)
		5 ³ D ₃	8613	1,068	5 ³ P ₂ (5 ³ P ₁)	1,9·10 ⁴ (14 444)	1,0 (D)
		5 ¹ S ₀	17 163	2,128	5 ³ P ₁ (5 ¹ D ₂)	6462 (11 693)	0,12 (D)
51	Sb (5 ⁴ S _{3/2})	5 ² D _{3/2}	8512	1,055	5 ⁴ S _{3/2}	11 745	0,90 (D)
		5 ² D _{5/2}	9854	1,222	5 ⁴ S _{3/2}	10 145	10 (D)
		5 ² P _{1/2}	16 396	2,033	(5 ² D _{3/2})	(7,5·10 ⁴)	0,21 (D)
					5 ⁴ S _{3/2} (5 ² D _{3/2})	6097,5 (12 681)	

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состоя- ния)	Метастабиль- ный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада метастабиль- ного уровня	Длина волны излучения при пере- ходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см^{-1}	эВ			
52	Te (5^1P_2)	$5^2P_{3/2}^\circ$	18 464	2,289	$5^4S_{3/2}^\circ$ ($5^2D_{3/2}^\circ$)	5414 (10 045)	0,089 (D)
		$5^2P_0^\circ$	4706,5	0,584	$5^2P_2^\circ$	21 250	140 (D)
		$5^2P_1^\circ$	4750,7	0,589	$5^2P_2^\circ$	21 040	0,45 (D)
		5^1D_2	10557,9	1,309	$5^2P_2^\circ$ (5^2P_1)	9469 (17 220)	0,28 (D)
53	I ($5^2P_{3/2}^\circ$)	5^1S_0	23198,4	2,876	$5^2P_1^\circ$ (5^1D_2)	5419 (7909)	0,024 (D)
		$5^2P_{1/2}^\circ$	7603,1	0,943	$5^2P_{3/2}^\circ$	13 149	0,11 (D)
54	Xe (5^1S_0)	$6s[3/2]_2^\circ$	67068,0	8,315	5^1S_0	1491,0	150 (E)
		($3^1P_2^\circ$)					
		$6s'[1/2]_0^\circ$	76197,3	9,447	$6^3P_1^\circ$	12 264	0,08 (E)
56	Ba (6^1S_0)	($3^1P_0^\circ$)					
		5^2D_{1-3}	9034,0— 9596,6	1,120— 1,190	6^1S_0	11 066— 10 418	—
		5^1D_2	11395,4	1,413	6^1S_0	8773	$A_{E2}=$ $=3,0$ (D) с^{-1}
74	W (6^2D_5)	6^2D_1	1670,3	0,207	6^2D	$6,0 \cdot 10^4$	—
		6^2S_1	2951,3	0,366		$3,4 \cdot 10^4$	—
		6^2D_2	3325,5	0,412		$3,0 \cdot 10^4$	—
		6^2D_3	4830,0	0,599		$2,1 \cdot 10^4$	—
		6^2D_4	6219,3	0,771		$1,6 \cdot 10^4$	—
79	Au ($6^2S_{1/2}$)	$6^2D_{5/2}$	9161,2	1,136	$6^2S_{1/2}$	10 913	—
		$6^2D_{3/2}$	21 435	2,658		4664	—
80	^{100}Hg (6^1S_0)	$6^3P_0^\circ$	37645,1	4,667	6^1S_0	2656	1,45 (B)
		$6^3P_1^\circ$	39412,3	4,887		2537	—
		$6^3P_2^\circ$	44043,0	5,461		2270	6,5 (D)
81	Tl ($6^2P_{1/2}^\circ$)	$6^2P_{3/2}^\circ$	7793	0,966	$6^2P_{1/2}^\circ$	12 829	0,23 (D)
82	Pb (6^2P_0)	6^2P_1	7819,3	0,969	6^2P_0	12 785	0,14 (D)
		6^2P_2	10650,3	1,320	6^2P_0	9387	2,6 (D)
		6^1D_2	21457,8	2,660	(6^2P_1)	(3532)	
		6^1S_0	29466,8	3,653	6^2P_1 (6^2P_2)	7330 (9250)	0,037 (D)
83	Bi ($6^4S_{3/2}^\circ$)				6^2P_1 (6^2P_2)	4618 (5313)	0,011 (D)
		$6^2D_{3/2}^\circ$	11419,0	1,416	$6^4S_{3/2}^\circ$	8755	0,032 (D)

Атомный номер Z	Элемент (терм основного состоя- ния)	Метастабиль- ный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиа- ционного распада мета- стабильного уровня	Длина волны излуче- ния при переходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ , с (класс точности)
			см $^{-1}$	эВ			
		$6^2 D_{5/2}^{\circ}$	15437,7	1,914	$6^4 S_{3/2}^{\circ}$ ($6^2 D_{3/2}^{\circ}$)	6476 (24 900)	0,12 (D)
		$6^2 P_{1/2}^{\circ}$	21661,0	2,686	$6^4 S_{3/2}^{\circ}$ ($6^2 D_{3/2}^{\circ}$)	4615 (9761)	0,016 (D)
		$6^2 P_{3/2}^{\circ}$	33164,8	4,112	$6^2 D_{3/2}^{\circ}$ ($6^2 D_{5/2}^{\circ}$)	4597 (5640)	$5,8 \cdot 10^{-8}$ (D)

6.6. РАДИАЦИОННОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ

В табл. 6.6—6.7 представлены значения излучательного времени жизни τ_k для высоковозбужденных (ридберговских) состояний атомов водорода и щелочного металла. Характерной особенностью излучательных переходов между такими состояниями является наличие закономерностей в поведении величины τ_k для соответствующих спектральных серий, т. е. набора возбужденных состояний с одинаковыми орбитальными и спиновыми моментами.

При больших значениях главного квантового числа электрона n радиационное время жизни высоковозбужденного атома водорода можно аппроксимировать зависимостью

$$\tau_k = \tau_0 n^3 + \tau_1 n,$$

где τ_0 , τ_1 — параметры, зависящие только от орбитального квантового числа электрона l . В табл. 6.6 включены значения параметров τ_0 , τ_1 , полученные в результате обработки расчетных данных для радиационного времени жизни уровней атома водорода с $n=8 \div 12$ [1].

В случае многоэлектронных атомных частиц τ_k для высоковозбужденных состояний можно представить в виде

$$\tau_k = \tau_0 n^{*3} = \tau_0 (n - \delta_l)^3,$$

где n^* — эффективное главное квантовое число валентного электрона; δ_l — квантовый дефект уровня (см. § 4.3); τ_0 — константа для данной спектральной серии атома. Приведенные в табл. 6.7 значения константы τ_0 для атомов щелочного металла получены в результате обработки данных измерений времени жизни ридберговских состояний атомов [2, 3].

Числовые значения рассматриваемых параметров радиационного времени жизни высоковозбужденных атомных уровней были распределены по классам точности (см. предисловие) согласно оцениваемой погрешности получения значений τ_k и надежности введенных аппроксимационных формул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindgrád A., Nielsen S. E. — At. Data Nucl. Data Tables, 1977, vol. 19, p. 533.

2. Theodosiou C. E. Lifetimes of alkali-metal-atom Rydberg states. — Phys. Rev., 1984, vol. A30, p. 2881.

3. Веролайн Я. Ф., Николаич А. Я. — Успехи физ. наук, 1982, т. 137, с. 305.

Т а б л и ц а 6.6. Параметры τ_0 и τ_1 , характеризующие радиационное время жизни ридберговских состояний атома водорода

Состояние электрона	l	τ_0 , нс	τ_1 , нс	Состояние электрона	l	τ_0 , нс	τ_1 , нс
s	0	1,75 (A)	26 (C)	h	5	2,67 (A)	8 (D)
p	1	0,185 (A)	0,16 (E)	i	6	3,76 (A)	11 (D)
d	2	0,528 (A)	0,9 (E)	k	7	5,08 (B)	13 (E)
f	3	1,05 (A)	2,7 (E)	l	8	6,59 (A)	9 (E)
g	4	1,76 (A)	4,8 (D)	m	9	8,2 (B)	23 (E)

Т а б л и ц а 6.7. Параметр τ_0 , характеризующий радиационное время жизни ридберговских состояний атомов щелочного металла, нс

Атом	Состояние валентного электрона						
	s	p	d	f	g	h	i
Li	0,84 (D)	3,4 (C)	0,47 (D)	1,1 (C)	—	—	—
Na	1,36 (C)	2,7 (C)	0,93 (C)	1,0 (B)	1,76 (B)	2,7 (B)	3,8 (B)
K	1,21 (C)	3,9 (D)	2,6 (D)	0,76 (C)	1,77 (B)	—	—
Rb	1,18 (C)	2,9 (D)	1,4 (D)	0,66 (C)	—	—	—
Cs	1,3 (D)	3,4 (D)	0,7 (D)	0,67 (C)	1,7 (C)	—	—

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТОМНЫХ ИОНОВ

7.1. НИЗКОЛЕЖАЩИЕ ТЕРМЫ ОДНОЗАРЯДНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

В табл. 7.1 приведены значения энергии возбуждения T низколежащих состояний однократно ионизованных атомных частиц. Эти состояния характеризуют, как правило, несколько первых термов основных электронных конфигураций для данной частицы. Уровни энергии восстанавливались в результате обработки спектров оптических переходов между различными состояниями частиц. Они расположены в порядке возрастания от уровня основного состояния иона; дается также классификация соответствующего электронного терма и электронной конфигурации возбужденных валентных электронов. Приведено значение оптического предела (потенциала ионизации) для серии переходов, сходящейся к уровню основного состояния положительного иона с зарядом $+2$.

При отборе включенных в табл. 7.1 данных мы опирались на литературу, процитированную в § 6.1.

Т а б л и ц а 7.1. Низколежащие электронные термы однозарядных положительных ионов

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
2	$\text{He}^+ (1s-^2S_{1/2})$ 438908,89	$2p (^2P^{\circ}_{1/2})$	329 179,299
		$2s (^2S_{1/2})$	329 179,768
		$2p (^2P^{\circ}_{3/2})$	329 185,157
		$3p (^2P^{\circ}_{1/2})$	390 140,832
		$3s (^2S_{1/2})$	390 140,971
		$3d (^2D_{3/2})$	390 142,564
		$3p (^2P^{\circ}_{3/2})$	390 142,567
		$3d (^2D_{5/2})$	390 143,143
3	$\text{Li}^+ (1s^2-^1S_0)$ 610 078	$2s (^3S_1)$	476 034,6
		$2s (^1S_0)$	491 374,6
		$2p (^3P^{\circ}_1)$	494 261,2
		$2p (^3P^{\circ}_2)$	494 263,4
		$2p (^3P^{\circ}_0)$	494 266,6
		$2p (^1P^{\circ}_1)$	501 808,6

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
4	$\text{Be}^+ (2s-^2S_{1/2})$ 146 883	$2p (^2P_{1/2}^\circ)$	31 928,8
		$2p (^2P_{3/2}^\circ)$	31 935,3
		$3s (^2S_{1/2})$	88 231,9
		$3p (^2P_{1/2}^\circ)$	96 495,4
		$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	96 497,3
		$3d (^2D_{3/2})$	98 054,6
		$3d (^2D_{5/2})$	98 055,1
5	$\text{B}^+ (2s^2-^1S_0)$ 202 887	$2p (^3P_0^\circ)$	37 337
		$2p (^3P_1^\circ)$	37 342
		$2p (^3P_2^\circ)$	37 358
		$2p (^1P_1^\circ)$	73 396,6
		$2p^2 (^3P_0)$	98 913
		$2p^2 (^3P_1)$	98 922
		$2p^2 (^3P_2)$	98 934
6	$\text{C}^+ (2p-^2P_{1/2}^\circ)$ 196 665	$2p (^2P_{3/2}^\circ)$	63,4
		$2s2p^2 (^4P_{1/2})$	43003,7
		$2s2p^2 (^4P_{3/2})$	43025,7
		$2s2p^2 (^4P_{5/2})$	43054,0
		$2s2p^2 (^2D_{5/2})$	74930,6
		$2s2p^2 (^2D_{3/2})$	74933,1
		$2s2p^2 (^2S_{1/2})$	96494,2
7	$\text{N}^+ (2p^2-^3P_0)$ 238 750	$2p (^3P_1)$	48,7
		$2p (^3P_2)$	130,8
		$2p (^1D_2)$	15316,2
		$2p (^1S_0)$	32688,8
		$2s2p^3 (^5S_2)$	46784,6
		$2s2p^3 (^3D_3^\circ)$	92 237
		$(^3D_2^\circ)$	92 250
		$(^3D_1^\circ)$	92 252
		$2s2p^3 (^3P_1^\circ)$	109216,6
		$(^3P_2^\circ)$	109217,6
		$(^3P_0^\circ)$	109223,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния) оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
8	$\text{O}^+(2p^3-^4S_{3/2})$ 283 240	$2s2p^3(^1D_2^\circ)$	144187,9
		$2p3s(^3P_0^\circ)$	148908,6
		$(^3P_1^\circ)$	148940,2
		$(^3P_2^\circ)$	149076,5
		$2p3s(^1P_1^\circ)$	149187,8
		$2p(^2D_{5/2}^\circ)$	26 808
		$2p(^2D_{3/2}^\circ)$	26 829
		$2p(^2P_{3/2}^\circ)$	40 467
		$2p(^2P_{1/2}^\circ)$	40 468
		$2s2p^4(^4P_{5/2})$	119 838
		$(^4P_{3/2})$	120 001
		$(^4P_{1/2})$	120 083
		$2s2p^4(^2D_{5/2})$	165 988
		$(^2D_{3/2})$	165 996
		$3s(^4P_{1/2})$	185235,4
		$3s(^4P_{3/2})$	185340,7
9	$\text{F}^+(2p^4-^3P_2)$ 282 059	$3s(^4P_{5/2})$	185499,2
		$2p(^3P_1)$	341,0
		$2p(^3P_0)$	489,9
		$2s2p^4(^1D_2)$	20873,4
		$2s2p^4(^1S_0)$	44918,1
		$2s2p^5(^3P_2^\circ)$	164797,9
		$(^3P_1^\circ)$	165106,7
		$(^3P_0^\circ)$	165279,2
		$3s(^5S_2^\circ)$	176493,9
		$3s(^3S_1^\circ)$	182864,4
		$3p(^5P_1)$	202449,3
		$3p(^5P_2)$	202460,7
		$3p(^5P_3)$	202480,3
		$3p(^3P)$	207702,0

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
10	$\text{Ne}^+ (2p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$ 330 389	$2p^4 ({}^3P) 2p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	780,42
		$2s2p^6 ({}^2S_{1/2})$	217047,6
		$3s ({}^4P_{5/2})$	219130,8
		$3s ({}^4P_{1/2})$	219647,5
		$3s ({}^4P_{3/2})$	219948,4
		$3s ({}^2P_{3/2})$	224087,0
		$3s ({}^2P_{1/2}^\circ)$	246192,5
		$3p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	246192,5
		$2p^4 ({}^1D) 3s' ({}^2D_{5/2})$	246394,1
		$3s' ({}^2D_{3/2})$	246397,5
		$3p ({}^4P_{3/2}^\circ)$	246415,0
		$3p ({}^4P_{1/2}^\circ)$	246597,7
		$3p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	249108,6
		$({}^4D_{5/2}^\circ)$	249446,0
		$({}^4D_{3/2}^\circ)$	249695,5
		$({}^4D_{1/2}^\circ)$	249839,6
		$3p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	251011,2
		$({}^2D_{3/2}^\circ)$	251522,1
		$3p ({}^2S_{1/2}^\circ)$	252798,5
		$3p ({}^4S_{3/2}^\circ)$	252953,5
		$3p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	254165,0
		$({}^2P_{1/2}^\circ)$	254292,2
		$2p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 3s [3/2]_2^\circ$	264924,3
		$3s [3/2]_1^\circ$	265689,6
		$2p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 3s' [1/2]_0^\circ$	266281,6
		$3s' [1/2]_1^\circ$	268763,0
		$3p [1/2]_1$	293220,3
		$3p [5/2]_3$	297248,8
		$3p [5/2]_2$	297635,6
		$3p [3/2]_1$	298165,4
11	$\text{Na}^+ (2p^6 - {}^1S_0)$ 381 390		

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
12	$\text{Mg}^+ (3s-^2S_{1/2})$ 121 267,6	$3p [3/2]_2$	299190,0
		$3p' [3/2]_1$	299885,4
		$3p' [3/2]_2$	300103,9
		$3p [1/2]_0$	300387,8
		$3p' [1/2]_1$	300507,1
		$3p' [1/2]_0$	308860,8
		$3p (^2P_{1/2}^\circ)$	35669,3
		$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	35760,9
		$4s (^2S_{1/2})$	69805,0
		$3d (^2D_{5/2})$	71490,2
		$3d (^2D_{3/2})$	71491,1
		$4p (^2P_{1/2}^\circ)$	80619,5
13	$\text{Al}^+ (3s^2-^1S_0)$ 151 863	$4p (^2P_{3/2}^\circ)$	80650,0
		$3p (^3P_0^\circ)$	37393,0
		$3p (^3P_1^\circ)$	37453,9
		$3p (^3P_2^\circ)$	37577,8
		$3p (^1P_1^\circ)$	59852,0
		$3p^2 (^1D_2)$	85481,3
		$4s (^3S_1)$	91274,5
		$3p^2 (^3P_0)$	94085,0
		$3p^2 (^3P_1)$	94147,5
		$3p^2 (^3P_2)$	94268,7
		$4s (^1S_0)$	95350,6
		$3d (^3D_3)$	95549,4
14	$\text{Si}^+ (3p-^2P_{1/2}^\circ)$ 131 838	$3d (^3D_2)$	95550,5
		$3d (^3D_1)$	95551,4
		$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	287,2
		$3s3p^2 (^4P_{1/2})$	42824,3
		$(^4P_{4/2})$	42932,6
		$(^4P_{5/2})$	43107,9
		$3s3p^2 (^2D_{3/2})$	55309,4
		$(^2D_{5/2})$	55325,2
		$4s (^2S_{1/2})$	65500,5
		$3s3p^2 (^2S_{1/2})$	76665,4
		$3d (^2D_{3/2})$	79338,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
15	P ⁺ (3p ² — ³ P ₀) 159 451	3d (² D _{5/2})	79355,0
		4p (² P _{1/2} ^o)	81191,3
		4p (² P _{3/2} ^o)	81251,3
		3s3p ² (² P _{1/2})	83802,0
		(² P _{3/2})	84004,3
		3p ² (³ P ₁)	164,9
		3p ² (³ P ₂)	469,1
		3p ² (¹ D ₂)	8882,3
		3p ² (¹ S ₀)	21575,6
		3s3p ³ (⁵ S ₂ ^o)	45697,4
		3s3p ³ (³ D ₁ ^o)	65251,4
		(³ D ₂ ^o)	65272,3
		(³ D ₃ ^o)	65307,2
		3s3p ³ (³ P ₂ ^o)	76764,1
		(³ P ₁ ^o)	76812,3
		(³ P ₀ ^o)	76823,1
		3s3p ³ (¹ D ₂ ^o)	77710,2
		4s (³ P ₀ ^o)	86597,5
		4s (³ P ₁ ^o)	86744,0
		4s (³ P ₂ ^o)	87124,6
		3d (³ F ₂ ^o)	87804,1
		3d (³ F ₃ ^o)	87966,8
		3d (³ F ₄ ^o)	88192,1
		4s (¹ P ₁ ^o)	88893,2
		3p4p (¹ P ₁)	101635,7
		3s3p ³ (¹ P ₁ ^o)	102798,3
16	S ⁺ (3p ³ — ⁴ S _{3/2} ^o) 188 233	3p (¹ D _{3/2} ^o)	14 853
		3p (² D _{5/2} ^o)	14 885
		3p (² P _{1/2} ^o)	24 525

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
17	$\text{Cl}^+ (3p^4 \text{—} ^3P_2)$ 192 070	$3p (^2P_{3/2}^\circ)$	24 572
		$3s3p^4 (^4P_{5/2})$	79395,4
		$(^4P_{3/2})$	79756,8
		$(^4P_{1/2})$	79962,6
		$3s3p^4 (^2D_{3/2})$	97890,7
		$(^2D_{5/2})$	97918,9
		$3d (^2P_{3/2})$	105599,1
		$(^2P_{1/2})$	106044,2
		$4s (^4P_{1/2})$	109560,7
		$4s (^4P_{3/2})$	109831,6
		$3d (^4F_{3/2})$	110177,0
		$4s (^4P_{5/2})$	110268,6
		$3d (^4F_{5/2})$	110313,4
		$3d (^4F_{7/2})$	110508,7
		$3d (^4F_{9/2})$	110766,6
		$3p (^3P_1)$	696,0
		$3p (^3P_0)$	996,5
		$3p (^1D_2)$	11653,6
		$3p (^1S_0)$	27878,0
		$3s3p^5 (^3P_2^\circ)$	93367,6
		$(^3P_1^\circ)$	93999,9
		$(^3P_0^\circ)$	94333,8
		$4s (^5S_2^\circ)$	107879,7
		$3d (^5D_4^\circ)$	110296,8
		$3d (^5D_3^\circ)$	110297,7
		$3d (^5D_2^\circ)$	110300,6
		$3d (^5D_1^\circ)$	110303,1
		$3d (^5D_0^\circ)$	110304,5
		$4s (^3S_1^\circ)$	112609,4
		$3p^3 (^2D) 3d (^1P_1^\circ)$	115657,8

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
18	$\text{Ar}^+ (3p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$ 222848,2	$3p ({}^2P_{1/2}^\circ)$ $3s3p^6 ({}^2S_{1/2})$ $3d ({}^4D_{7/2})$ $3d ({}^4D_{5/2})$ $3d ({}^4D_{3/2})$ $3d ({}^4D_{1/2})$ $4s ({}^4P_{5/2})$ $4s ({}^4P_{3/2})$ $4s ({}^4P_{1/2})$ $4s ({}^2P_{3/2})$ $4s ({}^2P_{1/2})$	1431,58 108722,5 132327,36 132481,21 132630,73 132737,70 134241,74 135086,00 135601,73 138243,64 139258,34
19	$\text{K}^+ (3p^6 - {}^1S_0)$ 255 100	$3p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 4s [3/2]_2^\circ$ $4s [3/2]_1^\circ$ $3d [1/2]_0^\circ$ $3d [1/2]_1^\circ$ $3d [3/2]_2^\circ$ $3p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 4s' [1/2]_0^\circ$ $4s' [1/2]_1^\circ$ $3d [7/2]_3^\circ$ $3d [5/2]_2^\circ$	162507,0 163237,0 163436,3 164496,1 164932,3 165149,5 166461,5 170835,4 171526,8
20	$\text{Ca}^+ (4s - {}^3S_{1/2})$ 95751,9	$3d ({}^2D_{3/2})$ $3d ({}^2D_{5/2})$ $4p ({}^2P_{1/2}^\circ)$ $4p ({}^2P_{3/2}^\circ)$ $5s ({}^2S_{1/2})$ $4d ({}^2D_{3/2})$ $4d ({}^2D_{5/2})$	13650,2 13710,9 25191,5 25414,4 52166,9 56839,2 56858,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
21	Sc+ (3d4s— ³ D ₁) 103 237	5p (² P _{1/2} ^o)	60533,0
		5p (² P _{3/2} ^o)	60611,3
		3d4s (³ D ₂)	67,7
		3d4s (³ D ₃)	177,8
		3d4s (¹ D ₂)	2540,9
		3d ² (³ F ₂)	4802,9
		3d ² (³ F ₃)	4883,6
		3d ² (³ F ₄)	4987,8
		3d ² (¹ D ₂)	10944,6
		4s ² (¹ S ₀)	11736,4
		3d ² (³ P ₀)	12074,1
		3d ² (³ P ₁)	12101,5
		3d ² (³ P ₂)	12154,4
		3d ² (¹ G ₄)	14261,3
22	Ti+ (3d ² 4s— ⁴ F _{3/2}) 109 490	3d ² (³ F) 4s (⁴ F _{5/2})	94,1
		4s (⁴ F _{7/2})	225,7
		4s (⁴ F _{9/2})	393,4
		3d ³ (⁴ F _{3/2})	908,0
		3d ³ (⁴ F _{5/2})	983,9
		3d ³ (⁴ F _{7/2})	1087,3
		3d ³ (⁴ F _{9/2})	1215,8
		3d ² 4s (² F _{5/2})	4628,6
		3d ² 4s (² F _{7/2})	4897,6
		3d ² (¹ D) 4s (² D _{3/2})	8710,4
		4s (² D _{5/2})	8744,2
		3d ³ (² G _{7/2})	8997,7
		3d ³ (² G _{9/2})	9118,3
		3d ³ (⁴ P _{1/2})	9363,6
		3d ³ (⁴ P _{3/2})	9395,7
		3d ³ (⁴ P _{5/2})	9518,1
23	V+ (3d ⁴ — ⁵ D ₀) 118 200	3d ⁴ (⁵ D ₁)	36,0
		(⁵ D ₂)	106,6
		(⁵ D ₃)	208,9
		(⁵ D ₄)	339,2
		3d ³ (⁴ F) 4s (⁵ F ₁)	2604,8
		4s (⁵ F ₂)	2687,0
		4s (⁵ F ₃)	2808,7
		4s (⁵ F ₄)	2968,2

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
24	$\text{Cr}^+ (3d^5 - {}^6S_{5/2})$ 133 000	$4s ({}^5F_5)$	3162,8
		$3d^3 ({}^4F) 4s ({}^3F_2)$	8640,2
		$4s ({}^3F_3)$	8842,0
		$4s ({}^3F_4)$	9097,8
		$3d^4 ({}^3P_0)$	11295,6
		$({}^3P_1)$	11514,8
		$({}^3P_2)$	11908,3
		$3d^4 ({}^3H_4)$	12545,1
		$({}^3H_6)$	12621,5
		$({}^3H_8)$	12706,2
		$3d^4 ({}^5D) 4s ({}^6D_{1/2})$	11962,0
		$4s ({}^6D_{3/2})$	12032,7
		$4s ({}^6D_{5/2})$	12148,0
		$4s ({}^6D_{7/2})$	12304,0
		$4s ({}^6D_{9/2})$	12496,8
		$3d^4 ({}^5D) 4s ({}^4D_{1/2})$	19528,4
		$4s ({}^4D_{3/2})$	19631,3
		$4s ({}^4D_{5/2})$	19798,0
		$4s ({}^4D_{7/2})$	20024,2
		$3d^5 ({}^4G_{5/2})$	20512,6
		$({}^4G_{11/2})$	20512,7
		$({}^4G_{7/2})$	20518,3
		$({}^4G_{9/2})$	20519,8
		$3d^5 ({}^4P_{5/2})$	21822,9
		$({}^4P_{1/2})$	21824,2
		$({}^4P_{3/2})$	21824,8
25	$\text{Mn}^+ (3d^5 4s - {}^7S_3)$ 126 145	$3d^5 ({}^6S) 4s ({}^5S_2)$	9473,0
		$3d^5 ({}^5D_4)$	14325,9
		$({}^5D_3)$	14593,8
		$({}^5D_2)$	14781,2
		$({}^5D_1)$	14901,2
		$({}^5D_0)$	14959,8
		$3d^5 ({}^4G) 4s ({}^5G_6)$	27547,2
		$4s ({}^5G_5)$	27571,2
		$4s ({}^5G_4)$	27583,6
		$4s ({}^5G_3)$	27588,5
		$4s ({}^5G_2)$	27589,3
		$3d^5 ({}^3P_2)$	29869,5
		$3d^5 ({}^4P) 4s ({}^5P_3)$	29889,5
		$4s ({}^5P_2)$	29919,4

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
26	$\text{Fe}^+ (3d^6 4s - {}^6D_{9/2})$ 130 560	$4s ({}^6P_1)$	29951,4
		$3d^6 ({}^3H_6)$	30523,7
		$3d^6 ({}^3H_5)$	30679,5
		$3d^6 ({}^3P_1)$	30685,1
		$3d^6 ({}^3H_4)$	30796,1
		$3d^6 ({}^3P_0)$	31022,0
		$3d^6 ({}^6D) 4s ({}^6D_{7/2})$	384,79
		$4s ({}^6D_{5/2})$	667,68
		$4s ({}^6D_{3/2})$	862,61
		$4s ({}^6D_{1/2})$	977,05
		$3d^7 ({}^4F_{9/2})$	1872,57
		$({}^4F_{7/2})$	2430,10
		$({}^4F_{5/2})$	2837,95
		$({}^4F_{3/2})$	3117,46
		$3d^6 ({}^6D) 4s ({}^4D_{7/2})$	7955,30
		$4s ({}^4D_{5/2})$	8391,94
		$4s ({}^4D_{3/2})$	8680,45
		$4s ({}^4D_{1/2})$	8846,77
		$3d^7 ({}^4P_{5/2})$	13474,41
		$({}^4P_{3/2})$	13673,18
		$({}^4P_{1/2})$	13904,82
27	$\text{Co}^+ (3d^8 - {}^3F_4)$ 137 790	$3d^8 ({}^3F_3)$	950,5
		$3d^8 ({}^3F_2)$	1597,3
		$3d^7 ({}^4F) 4s ({}^5F_5)$	3350,6
		$4s ({}^5F_4)$	4029,0
		$4s ({}^5F_3)$	4560,8
		$4s ({}^5F_2)$	4950,2
		$4s ({}^5F_1)$	5204,8
		$4d^7 ({}^4F) 4s ({}^3F_4)$	9813,0
		$4s ({}^3F_3)$	10708,5
		$4s ({}^3F_2)$	11322,0
		$3d^8 ({}^1D_2)$	11651,5
		$3d^8 ({}^3P_2)$	13260,8
		$3d^8 ({}^3P_1)$	13404,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня см^{-1}
28	$\text{Ni}^+ (3d^9—^2D_{5/2})$ 146541,6	$3d^8 (^3P_0)$	13593,3
		$3d^7 (^4P) 4s (^5P_3)$	17771,7
		$4s (^5P_2)$	18031,7
		$4s (^5P_1)$	18338,8
		$3d^8 (^1G_4)$	19190,1
		$3d^9 (^2D_{3/2})$	1506,94
		$3d^8 (^3F) 4s (^4F_{9/2})$	8393,90
		$4s (^4F_{7/2})$	9330,04
		$4s (^4F_{5/2})$	10115,66
		$4s (^4F_{3/2})$	10663,89
		$3d^8 (^3F) 4s (^2F_{7/2})$	13550,39
		$4s (^2F_{5/2})$	14995,57
		$3d^8 (^3P) 4s (^4P_{5/2})$	23108,3
		$3d^8 (^1D) 4s (^2D_{3/2})$	23796,2
		$4s (^4P_{3/2})$	24788,2
		$4s (^4P_{1/2})$	24835,9
		$4s (^2D_{5/2})$	25036,4
29	$\text{Cu}^+ (3d^{10}—^1S_0)$ 163 669	$3d^9 (^2D_{5/2}) 4s (^3D_3)$	21928,6
		$4s (^3D_2)$	22847,0
		$3d^9 (^2D_{3/2}) 4s (^3D_1)$	23998,3
		$3d^9 (^2D_{3/2}) 4s (^1D_2)$	26264,5
30	$\text{Zn}^+ (3d^{10}4s—^2S_{1/2})$ 144 892	$4p (^2P^{\circ}_{1/2})$	48 481
		$4p (^2P^{\circ}_{3/2})$	49 354
		$4s^2 (^2D_{5/2})$	62 722
		$(^2D_{3/2})$	65 441
		$5s (^2S_{1/2})$	88 437
		$4d (^2D_{3/2})$	96 909
		$4d (^2D_{5/2})$	96 960

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
31	$\text{Ga}^+ (4s^2 - ^1S_0)$ 165 466	$4p (^3P_0^\circ)$	47 3767,5
		$4p (^3P_1^\circ)$	47 814,0
		$4p (^3P_2^\circ)$	48 749,7
		$4p (^1P_1^\circ)$	70 701,3
		$5s (^3S_1)$	102 944,5
		$5s (^1S_0)$	106 662,2
		$4p^2 (^1D_2)$	107 720,6
32	$\text{Ge}^+ (4p - ^2P_{1/2}^\circ)$ 128521,3	$4p (^2P_{3/2}^\circ)$	1767,4
		$4s4p^2 (^4P_{1/2})$	51575,9
		$(^4P_{3/2})$	52290,9
		$(^4P_{5/2})$	53366,7
		$5s (^2S_{1/2})$	62403,1
		$4p^2 (^2D_{3/2})$	65015,7
		$(^2D_{5/2})$	95184,8
		$5p (^2P_{1/2}^\circ)$	79006,9
		$5p (^2P_{3/2}^\circ)$	79366,6
		$4d (^2D_{3/2})$	80836,9
		$4d (^2D_{5/2})$	81012,7
		$6s (^2S_{1/2})$	94784,5
33	$\text{As}^+ (4p^2 - ^3P_0)$ 149 900	$4p^2 (^3P_1)$	1063,5
		$(^3P_2)$	2541,3
		$4p^2 (^1D_2)$	10095,8
		$4p^2 (^1S_0)$	22598,6
		$4s4p^3 (^5S_2^\circ)$	54817,1

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
34	$\text{Se}^+(4p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ)$ 170 700	$4p^3 ({}^2D_{3/2}^\circ)$	13 168
		$({}^2D_{5/2}^\circ)$	13 784
		$4p^3 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	23 038
		$({}^2P_{3/2}^\circ)$	23 895
		$4s4p^4 ({}^4P_{5/2})$	83 877
		$({}^4P_{3/2})$	85 579
		$({}^4P_{1/2})$	86 438
35	$\text{Br}^+(4p^4 - {}^3P_2)$ 175 900	$4p^4 ({}^3P_1)$	3140
		$4p^4 ({}^3P_0)$	3840
		$4p^4 ({}^1D_2)$	11 410
		$5s ({}^5S_2^\circ)$	93927,5
36	$\text{Kr}^+(4p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$ 196 475	$4p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	5370,1
		$5s ({}^4P_{5/2})$	112828,3
		$5s ({}^4P_{3/2})$	115092,0
		$5s ({}^4P_{1/2})$	117603,0
		$5s ({}^2P_{3/2})$	118474,3
		$4d ({}^4D_{7/2})$	120209,9
		$4d ({}^4D_{5/2})$	120426,9
		$4d ({}^4D_{3/2})$	121000,4
		$5s ({}^2P_{1/2})$	121002,1
		$4d ({}^4D_{1/2})$	121779,5
37	$\text{Rb}^+(4p^6 - {}^1S_0)$ 220 105	$5s [3/2]_2^\circ$	133341,4
		$5s [3/2]_1^\circ$	134869,5
		$5s [1/2]_0^\circ$	138794,2
		$5s [1/2]_1^\circ$	140609,8
		$4d ({}^3P_0^\circ)$	143022,1
		$4d ({}^3P_1^\circ)$	143461,8
		$4d ({}^3P_2^\circ)$	143955,7

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
38	Sr+ (5s — ² S _{1/2}) 88 964	4d (³ F ₃ ^o)	146834,4
		4d (³ F ₂ ^o)	148688,5
		4d (³ D ₃ ^o)	151878,7
		4d (² D _{3/2})	14555,9
		4d (² D _{5/2})	14836,2
		5p (² P _{1/2} ^o)	23715,2
		5p (² P _{3/2} ^o)	24516,6
		6s (² S _{1/2})	47736,5
39	Y+ (5s ² — ¹ S ₀) 98 700	4d (² D) 5s (³ D ₁)	840,2
		5s (³ D ₂)	1045,1
		5s (³ D ₃)	1449,7
		4d (² D) 5s (¹ D ₂)	3296,2
		4d ² (³ F ₂)	8003,1
		(³ F ₃)	8328,0
		(³ F ₄)	8743,3
		4d ² (³ F) 5s (⁴ F _{5/2})	314,7
40	Zr+ (4d ² 5s — ⁴ F _{3/2}) 105 900	5s (⁴ F _{7/2})	763,4
		5s (⁴ F _{9/2})	1322,9
		4d ² (⁴ F _{3/2})	2572,2
		(⁴ F _{5/2})	2895,0
		(⁴ F _{7/2})	3299,6
		(⁴ F _{9/2})	3757,7
		4d ² (¹ D) 5s (² D _{3/2})	4248,3
		5s (² D _{5/2})	4505,5
	Nb+ (4d ⁴ — ⁵ D ₀) 115 500	4d ⁴ (⁵ D ₁)	159,0
		(⁵ D ₂)	438,4
		(⁵ D ₃)	801,4
		(⁵ D ₄)	1224,9
		4d ³ (⁴ F) 5s (⁵ F ₁)	2356,8
		(⁵ F ₂)	2629,1
		(⁵ F ₃)	3029,6
		(⁵ F ₄)	3542,5
		(⁵ F ₅)	4146,0
		4d ⁴ (³ P ₀)	5562,3
		(³ P ₁)	6192,3
		(³ P ₂)	7261,3

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
42	Mo ⁺ ($4d^5 - {}^6S_{5/2}$) 130 300	$4d^4 ({}^5D) 5s ({}^6D_{1/2})$	11783,4
		$({}^6D_{3/2})$	12034,1
		$({}^6D_{5/2})$	12417,3
		$({}^6D_{7/2})$	12900,3
		$({}^6D_{9/2})$	13460,7
		$4d^5 ({}^4G_{5/2})$	15199,2
		$({}^4G_{7/2})$	15330,6
		$({}^4G_{9/2})$	15427,7
		$({}^4G_{11/2})$	15447,0
		$4d^5 ({}^4P_{5/2})$	15691,2
		$({}^4P_{3/2})$	15699,2
		$({}^4P_{1/2})$	15890,1
		$4d^5 ({}^4D_{1/2})$	16796,1
		$({}^4D_{7/2})$	16946,8
		$({}^4D_{3/2})$	17174,1
		$({}^4D_{5/2})$	17344,1
43	Tc ⁺ ($4d^5 5s - {}^7S_3$) 123 000	$4d^6 ({}^5D_4)$	3461,3
		$({}^5D_3)$	4217,2
		$({}^5D_2)$	4669,2
		$({}^5D_1)$	4961,1
		$({}^5D_0)$	5101,0
		$4d^6 ({}^6S) 5s ({}^6S_2)$	12617,2
44	Ru ⁺ ($4d^7 - {}^4F_{9/2}$) 135 200	$4d^7 ({}^4F_{7/2})$	1523
		$({}^4F_{5/2})$	2494
		$({}^4F_{3/2})$	3105
		$4d^7 ({}^4P_{5/2})$	8257
		$({}^4P_{3/2})$	8477
		$4d^6 ({}^5D) 5s ({}^6D_{9/2})$	9151
		$4d^7 ({}^4P_{1/2})$	9373
45	Rh ⁺ ($4d^8 - {}^3F_4$) 145 800	$4d^8 ({}^3F_3)$	2401
		$({}^3F_2)$	3581
		$4d^8 ({}^1D_2)$	8164
		$4d^8 ({}^3P_1)$	10 515
		$({}^3P_0)$	10 761
		$({}^3P_2)$	11 644

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
46	$\text{Pd}^+ (4d^9 - {}^2D_{5/2})$ 156 700	$4d^9 ({}^2D_{3/2})$ $4d^8 ({}^3F) 5s ({}^4F_{9/2})$ $({}^4F_{7/2})$ $({}^4F_{5/2})$ $({}^4F_{3/2})$	3540 25 081 27 094 28 927 29 946
47	$\text{Ag}^+ (4d^{10} - {}^1S_0)$ 173 300	$4d^9 ({}^2D_{5/2}) 5s ({}^3D_3)$ $5s ({}^3D_2)$ $4d^9 ({}^2D_{3/2}) 5s ({}^3D_1)$ $4d^9 ({}^2D_{3/2}) 5s ({}^1D_2)$	39 164 40 741 43 739 46 046
48	$\text{Cd}^+ (5s - {}^2S_{1/2})$ 136374,7	$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$ $5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$ $4d^9 ({}^2D_{5/2}) 5s^2 ({}^2D_{5/2})$ $4d^9 ({}^2D_{3/2}) 5s^2 ({}^2D_{3/2})$ $6s ({}^2S_{1/2})$	44136,1 46618,5 69258,9 74893,7 82990,7
49	$\text{In}^+ (5s^2 - {}^1S_0)$ 152 195	$5p ({}^3P_0^\circ)$ $5p ({}^3P_1^\circ)$ $5p ({}^3P_2^\circ)$ $5p ({}^1P_1^\circ)$ $6s ({}^3S_1)$	42 270 43 350 45 830 63033,8 93919,0
50	$\text{Sn}^+ (5p - {}^2P_{1/2}^\circ)$ 118 017	$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$ $5s 5p^2 ({}^4P_{1/2})$ $({}^4P_{3/2})$ $({}^4P_{5/2})$	4251,5 46 464 48 368 50 730
51	$\text{Sb}^+ (5p^2 - {}^3P_0)$ 133327,5	$6s ({}^2S_{1/2})$ $5p^2 ({}^3P_1)$ $({}^3P_2)$ $5p^2 ({}^1D_2)$ $5p^2 ({}^1S_0)$	56 886 3055 5659 12 790 23 905
52	$\text{Te}^+ (5p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ)$ 150 000	$5p^3 ({}^2D_{3/2})$ $({}^2D_{5/2}^\circ)$ $5p^3 ({}^2P_{1/2}^\circ)$	10222,38 12421,85 20546,59

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
53	$\text{I}^+ (5p^4 \ ^3P_2 + 5p^4 \ ^1D_2)$ 154 304	$(^2P_{3/2}^\circ)$ $5p^4 \ (^3P_0) + 5p^4 \ (^1S_0)$ $5p^4 \ (^3P_1)$ $5p^4 \ (^1D_2) + 5p^4 \ (^3P_2)$ $5p^4 \ (^1S_0) + 5p^4 \ (^3P_0)$	24032,10 6448 7086,9 13 727 29 501
54	$\text{Xe}^+ (5p^5 - ^2P_{3/2}^\circ)$ 169 200	$5p^5 \ (^2P_{1/2}^\circ)$ $5s \ 5p^6 \ (^2S_{1/2})$ $6s \ (^4P_{5/2})$ $6s \ (^4P_{3/2})$ $5d \ (^4D_{5/2})$ $5d \ (^4D_{7/2})$ $5d \ (^4D_{3/2})$ $5d \ (^4D_{1/2})$	10537,1 90873,8 93068,4 95064,3 95396,7 95437,6 96033,4 96858,1
55	$\text{Cs}^+ (5p^6 - ^1S_0)$ 187 000	$5p^5 \ (^2P_{3/2}^\circ) \ 5d \ [7/2]_3^\circ$ $5d \ [1/2]_1^\circ$ $6s \ [3/2]_2^\circ$ $5d \ [1/2]_0^\circ$ $6s \ [3/2]_1^\circ$ $5d \ [3/2]_2^\circ$ $5d \ [3/2]_1^\circ$ $5d \ [7/2]_4^\circ$ $5d \ [5/2]_2^\circ$ $5d \ [5/2]_3^\circ$	105949,7 106222,8 107392,3 107563,1 107905,0 108304,2 110945,2 112236,5 112795,1 113716,6
56	$\text{Ba}^+ (6s - ^2S_{1/2})$ 80686,9	$5d \ (^2D_{3/2})$ $5d \ (^2D_{5/2})$ $6p \ (^2P_{1/2}^\circ)$ $6p \ (^2P_{3/2}^\circ)$ $7s \ (^2S_{1/2})$	4873,85 5674,82 20261,56 21952,42 42355,18
57	$\text{La}^+ (5d^2 - ^3F_2)$ 89 200	$5d^2 \ (^3F_3)$ $5d^2 \ (^1D_2) + 5d \ 6s \ (^1D_2)$	1016,1 1394,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
58	Ce+ ($4f\ 5d^2 - {}^4H_{7/2}^\circ$) 87 000	$5d\ 6s\ ({}^3D_1)$	1895,1
		$5d^2\ ({}^3F_4)$	1970,7
		$5d\ 6s\ ({}^3D_2)$	2591,6
		$5d\ 6s\ ({}^3D_3)$	3250,3
		$5d^2\ ({}^3P_0)$	5249,7
		$5d^2\ ({}^3P_1)$	5718,1
		$5d^2\ ({}^3P_2)$	6227,4
		$6s^2\ ({}^1S_0)$	7394,6
		$5d^2\ ({}^1G_4)$	7473,3
		$4f\ ({}^2F^\circ)\ 5d^2\ ({}^3F)\ ({}^4I_{9/2}^\circ + {}^2G_{9/2}^\circ)$	987,61
		$4f\ 5d^2\ ({}^3F)\ ({}^4I_{9/2}^\circ)$	1410,30
		$4f\ 5d^2\ (J = 7/2)^\circ$	1873,93
		$4f\ 5d^2\ (J = 1/2)^\circ$	2140,49
		$4f5d\ ({}^1G^\circ)\ 6s\ (J = 9/2)^\circ$	2382,25
		$4f5d^2\ ({}^4I_{11/2}^\circ)$	2563,23
		$4f5d^2\ ({}^4H_{9/2}^\circ)$	2581,26
		$4f5d\ ({}^3F^\circ)\ 6s\ ({}^4F_{3/2}^\circ)$	2595,64
		$4f5d\ ({}^3F^\circ)\ 6s\ (J = 5/2)^\circ$	2634,67
		$4f5d\ ({}^1G^\circ)\ 6s\ (J = 7/2)^\circ$	2641,56
		$4f5d^2\ ({}^4H_{11/2}^\circ)$	2879,70
		$4f5d\ ({}^3F^\circ)\ 6s\ ({}^4F_{5/2}^\circ)$	3363,43
		$4f5d^2\ ({}^2S_{1/2}^\circ)$	3508,47
		$4f5d\ ({}^1G^\circ)\ 6s\ (J = 9/2)^\circ$	3593,88
		$4f5d^2\ (J = 7/2)^\circ$	3703,59
		$4f5d^2\ ({}^4D_{3/2}^\circ)$	3745,48
		$4f5d^2\ ({}^4I_{13/2}^\circ)$	3793,63
		$4f^2\ ({}^3H)\ 6s\ ({}^4H_{7/2}^\circ)$	3854,01
		$4f5d\ ({}^3H^\circ)\ 6s\ ({}^4H_{7/2}^\circ)$	3995,46
		$4f^2\ ({}^3H)\ 6s\ ({}^4H_{9/2}^\circ)$	4165,55
		$4f5d^2\ ({}^4F_{3/2}^\circ)$	4201,89
		$4f5d^2\ ({}^4H_{13/2}^\circ)$	4203,93

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
59	$\text{Pr}^+ (4f^3 6s - (9/2, 1/2)_4^\circ)$ 85 000	$4f^3 ({}^4I_{9/2}^\circ) 6s (9/2, 1/2)_5^\circ$ $4f^3 ({}^4I_{11/2}^\circ) 6s (11/2, 1/2)_6^\circ$ $4f^3 6s (11/2, 1/2)_5^0$ $4f^3 ({}^4I_{13/2}^\circ) 6s (13/2, 1/2)_7^\circ$ $4f^3 6s (13/2, 1/2)_6^\circ$ $4f^3 ({}^4I^\circ) 5d ({}^5L_6^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5K_5^\circ)$ $4f^3 ({}^4I_{15/2}^\circ) 6s (15/2, 1/2)_8^\circ$ $4f^3 6s (15/2, 1/2)_7^\circ$ $4f^3 ({}^4I^\circ) 5d ({}^5L_7^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5K_6^\circ)$ $4f^2 ({}^3H) 5d^2 ({}^3F) ({}^5L_6)$ $4f^3 5d ({}^5K_7^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5L_8^\circ)$ $4f^2 ({}^3H) 5d^2 ({}^3F) ({}^5I_4)$ $4f^3 5d ({}^3I_5^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5I_4^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5K_8^\circ)$ $4f^3 5d ({}^5H_3^\circ)$	441,9 1649,0 1743,7 2998,4 3403,2 3893,5 4097,6 4437,1 5079,3 5108,4 5226,5 5854,6 6413,9 6417,8 7228,0 7438,2 7446,4 7659,8 7744,3
60	$\text{Nd}^+ (4f^4 6s - {}^6I_{7/2})$ 86 000	$4f^4 ({}^6I) 6s ({}^6I_{9/2})$ $4f^4 6s ({}^6I_{11/2})$ $4f^4 ({}^6I) 6s ({}^4I_{9/2})$ $4f^4 6s ({}^6I_{13/2})$ $4f^4 6s ({}^4I_{11/2})$ $4f^4 6s ({}^6I_{15/2})$ $4f^4 ({}^6I) 5d ({}^6L_{11/2})$ $4f^4 6s ({}^4I_{13/2})$ $4f^4 6s ({}^6I_{17/2})$ $4f^4 5d ({}^6L_{13/2})$	513,33 1470,10 1650,20 2585,46 3066,75 3801,93 4437,56 4512,49 5085,64 5487,66

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
61	$\text{Pm}^+ (4f^5 6s - {}^7H_2^\circ)$ 88 000	$4f^4 6s ({}^4I_{15/2})$	5985,58
		$4f^4 5d ({}^6K_{9/2})$	6005,27
		$4f^4 5d ({}^6L_{15/2})$	6637,43
		$4f^4 5d ({}^6K_{11/2})$	6931,80
		$4f^4 5d ({}^6I_{7/2})$	7524,74
		$4f^4 5d ({}^6L_{17/2})$	7868,91
		$4f^4 5d ({}^6K_{13/2})$	7950,07
		$4f^3 ({}^4I^\circ) 5d^2 ({}^3F) ({}^6M_{13/2}^\circ)$	8009,81
		$4f^4 5d ({}^6I_{9/2})$	8420,32
		$4f^4 5d ({}^6G_{3/2})$	8716,45
		$4f^4 5d ({}^6G_{5/2})$	8796,36
		$4f^4 5d ({}^6K_{15/2})$	9042,76
		$4f^4 5d ({}^6L_{19/2})$	9166,21
		$4f^4 5d ({}^6G_{7/2})$	9198,40
		$4f^4 5d ({}^6I_{11/2})$	9357,91
		$4f^3 ({}^4I^\circ) 5d^2 ({}^3F) ({}^6M_{15/2}^\circ)$	9448,18
		$4f^4 5d ({}^6H_{5/2})$	9674,84
		$4f^5 ({}^6H^\circ) 6s ({}^7H_3^\circ)$	446,4
		$4f^5 6s ({}^7H_4^\circ)$	1133,4
		$4f^5 6s ({}^5H_3^\circ)$	1603,0
		$4f^5 6s ({}^7H_5^\circ)$	1983,5
		$4f^5 6s ({}^5H_4^\circ)$	2666,8
		$4f^5 6s ({}^7H_6^\circ)$	2950,3
		$4f^5 6s ({}^5H_5^\circ)$	3812,3
		$4f^5 6s ({}^7H_7^\circ)$	4000,1
		$4f^5 6s ({}^5H_6^\circ)$	5017,8
		$4f^5 ({}^6F^\circ) 6s ({}^7F_0^\circ)$	5280,9
		$4f^5 ({}^6H^\circ) 5d ({}^7K_4^\circ)$	5332,4
		$4f^5 ({}^6F^\circ) 6s ({}^7F_1^\circ)$	5391,5
		$4f^5 6s ({}^7F_2^\circ)$	5632,4
		$4f^5 6s ({}^7F_3^\circ)$	6048,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
62	Sm ⁺ (4f ⁶ 6s — ⁸ F _{1/2}) 89 000	4f ⁵ (⁶ F°) 6s (⁵ F ₁ °)	6629,4
		4f ⁵ 6s (⁷ F ₄ °)	6705,2
		4f ⁵ 6s (⁵ F ₂ °)	7012,9
		4f ⁵ 6s (⁵ F ₃ °)	7701,1
		4f ⁶ (⁷ F) 6s (⁸ F _{3/2})	326,6
		4f ⁶ 6s (⁸ F _{5/2})	838,2
		4f ⁶ 6s (⁸ F _{7/2})	1489,2
		4f ⁶ (⁷ F) 6s (⁶ F _{1/2})	1518,3
		4f ⁶ 6s (⁶ F _{3/2})	2003,2
		4f ⁶ 6s (⁸ F _{9/2})	2238,0
		4f ⁶ 6s (⁶ F _{5/2})	2688,7
		4f ⁶ 6s (⁸ F _{11/2})	3052,6
		4f ⁶ 6s (⁶ F _{7/2})	3499,1
		4f ⁶ 6s (⁸ F _{13/2})	3909,6
		4f ⁶ 6s (⁶ F _{9/2})	4386,0
		4f ⁶ 6s (⁶ F _{11/2})	5317,6
		4f ⁶ (⁷ F) 5d (⁸ H _{3/2})	7135,1
		4f ⁶ 5d (⁸ H _{5/2})	7524,9
		4f ⁶ 5d (⁸ H _{7/2})	8046,0
		4f ⁶ 5d (⁸ D _{3/2})	8578,7
		4f ⁶ 5d (⁸ H _{9/2})	8679,2
		4f ⁶ 5d (⁸ H _{11/2})	9406,6
		4f ⁶ 5d (⁸ D _{5/2})	9410,0
63	Eu ⁺ (4f ⁷ 6s — ⁹ S ₄) 90 660	4f ⁷ (⁸ S°) 6s (⁷ S ₃ °)	1669,2
		4f ⁷ (⁸ S°) 5d (⁹ D ₂ °)	9923,0
		4f ⁷ 5d (⁹ D ₃ °)	10081,6
		4f ⁷ 5d (⁹ D ₄ °)	10312,8
		4f ⁷ 5d (⁹ D ₅ °)	10643,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
64	$\text{Gd}^+ (4f^7 5d 6s - {}^{10}D_{5/2}^\circ)$ 97 500	$4f^7 5d ({}^9D_6^\circ)$	11128,2
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d ({}^7D_5^\circ)$	16860,7
		$4f^7 5d ({}^7D_4^\circ)$	17004,1
		$4f^7 5d ({}^7D_3^\circ)$	17140,9
		$4f^7 5d ({}^7D_2^\circ)$	17247,7
		$4f^7 5d ({}^7D_1^\circ)$	17324,7
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d ({}^9D^\circ) 6s ({}^{10}D_{7/2}^\circ)$	261,84
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{9/2}^\circ)$	633,27
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{11/2}^\circ)$	1158,94
		$4f^7 5d 6s ({}^{10}D_{13/2}^\circ)$	1935,31
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{3/2}^\circ)$	2856,68
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{5/2}^\circ)$	3082,01
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{7/2}^\circ)$	3427,27
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 6s^2 ({}^8S_{7/2}^\circ)$	3444,24
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{9/2}^\circ)$	3972,17
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d^2 ({}^3F) ({}^{10}F_{3/2}^\circ)$	4027,16
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{5/2}^\circ)$	4212,76
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{7/2}^\circ)$	4483,85
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{11/2}^\circ)$	4841,11
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{9/2}^\circ)$	4852,30
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{11/2}^\circ)$	5339,48
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{13/2}^\circ)$	5897,26
		$4f^7 5d^2 ({}^{10}F_{15/2}^\circ)$	6605,15
		$4f^8 ({}^7F) 6s ({}^8F_{13/2})$	7992,27
		$4f^7 ({}^8S^\circ) 5d ({}^7D^\circ) 6s ({}^8D_{11/2}^\circ)$	8551,05
		$4f^7 5d 6s ({}^8D_{9/2}^\circ)$	8884,81

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
65	$\text{Tb}^+ (4f^9 6s - (15/2, 1/2)_8^\circ)$ 93 000	$4f^8 ({}^7F) 6s ({}^8F_{11/2})$ $4f^7 5d 6s ({}^8D_{7/2}^\circ)$ $4f^7 5d 6s ({}^8D_{5/2}^\circ)$ $4f^7 5d 6s ({}^8D_{3/2}^\circ)$ $4f^9 ({}^6H_{15/2}^\circ) 6s (15/2, 1/2)_7^\circ$ $4f^9 ({}^6H_{13/2}^\circ) 6s (13/2, 1/2)_7^\circ$ $4f^8 ({}^7F) 5d ({}^8G) 6s ({}^8G_7)$ $4f^8 5d 6s ({}^8G_8)$ $4f^8 5d 6s (J = 6)$ $4f^9 6s (13/2, 1/2)_6^\circ$ $4f^8 5d 6s (J = 5)$ $4f^8 ({}^7F) 5d ({}^8D) 6s (J = 6)$ $4f^9 ({}^6H_{11/2}^\circ) 6s (11/2, 1/2)_6^\circ$ $4f^9 6s (11/2, 1/2)_5^\circ$ $4f^8 5d ({}^8G) 6s (J = 5)$ $4f^8 6s^2 ({}^7F_6)$ $4f^8 5d ({}^8G) 6s (J = 7)$ $4f^9 ({}^6F_{11/2}^\circ) 6s (11/2, 1/2)_6^\circ$ $4f^8 5d ({}^8G) 6s ({}^7G_6)$ $4f^8 5d ({}^8G) 6s (J = 5)$ $4f^9 ({}^6H_{9/2}^\circ) 6s (9/2, 1/2)_5^\circ$	9092,49 9142,90 9328,86 9451,70 1016,4 3010,0 3235,2 3423,3 3440,8 3542,4 4158,7 5147,2 5171,8 5235,0 5761,3 5898,3 6223,4 6372,9 6428,7 6582,9 6912,5
66	$\text{Dy}^+ (4f^{10} 6s - (8, 1/2)_{17/2})$ 94 100	$4f^{10} ({}^5I_8) 6s (8, 1/2)_{15/2}$ $4f^{10} ({}^5I_7) 6s (7, 1/2)_{15/2}$ $4f^{10} 6s (7, 1/2)_{13/2}$ $4f^{10} ({}^5I_6) 6s (6, 1/2)_{11/2}$ $4f^{10} 6s (6, 1/2)_{13/2}$ $4f^{10} ({}^5I_5) 6s (5, 1/2)_{9/2}$ $4f^{10} 6s (5, 1/2)_{11/2}$ $4f^9 ({}^6H^\circ) 5d ({}^7H^\circ) 6s ({}^8H_{17/2}^\circ)$ $4f^{10} ({}^5I_4) 6s (4, 1/2)_{7/2}$	828,3 4341,1 4755,7 7463,9 7485,1 9432,1 9871,0 10594,2 10953,9

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см ⁻¹	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см ⁻¹
67	Ho ⁺ (4f ¹¹ 6s—(15/2, 1/2) ₈) 95 200	4f ⁹ (⁶ H°)5d(⁷ H°)6s(⁸ H _{15/2} °)	11394,9
		4f ¹⁰ (⁵ I ₄)6s(4, 1/2) _{9/2}	11801,0
		4f ⁹ 6s ² (⁶ H _{15/2} °)	12336,3
		4f ⁹ 5d6s(⁸ H _{13/2} °)	12674,7
		4f ¹¹ (⁴ I _{15/2} °)6s(15/2, 1/2) ₇ °	637,4
		4f ¹¹ (⁴ I _{13/2} °)6s(13/2, 1/2) ₇ °	5617,0
		4f ¹¹ 6s(13/2, 1/2) ₆ °	5849,7
		4f ¹¹ (⁴ I _{11/2} °)6s(11/2, 1/2) ₅ °	8850,5
		4f ¹¹ 6s(11/2, 1/2) ₆ °	9001,6
		4f ¹¹ (⁴ I _{9/2} °)6s(9/2, 1/2) ₄ °	10838,8
68	Er ⁺ (4f ¹² 6s—(6, 1/2) _{13/2}) 96 200	4f ¹¹ 6s(9/2, 1/2) ₅ °	11204,5
		4f ¹² (³ H ₆)6s(6, 1/2) _{11/2}	440,43
		4f ¹² (³ F ₄)6s(4, 1/2) _{9/2}	5132,61
		4f ¹² 6s(4, 1/2) _{7/2}	5403,69
		4f ¹¹ 6s ² (⁴ I _{15/2} °)	6824,77
		4f ¹² (³ H ₅)6s(5, 1/2) _{11/2}	7149,63
		4f ¹² 6s(5, 1/2) _{9/2}	7195,36
		4f ¹¹ (⁴ I°)5d6s(J = 13/2)°	10667,19
		4f ¹² (³ H ₄)6s(4, 1/2) _{7/2}	10893,94
		4f ¹² 6s(4, 1/2) _{9/2}	11042,64
		4f ¹¹ (⁴ I°)5d6s(J = 15/2)°	11309,18
		4f ¹¹ 5d6s(J = 11/2)°	12388,09
		4f ¹² (³ F ₃)6s(3, 1/2) _{7/2}	12588,00
		4f ¹² 6s(3, 1/2) _{5/2}	12600,09
		4f ¹¹ 5d6s(J = 19/2)°	12815,07
69	Tm ⁺ (4f ¹³ 6s—(7/2, 1/2) ₄) 97 200	4f ¹³ (² F _{7/2} °)6s(7/2, 1/2) ₃ °	236,9
		4f ¹³ (² F _{5/2} °)6s(5/2, 1/2) ₂ °	8769,7
		4f ¹³ 6s(5/2, 1/2) ₃ °	8957,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния). оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
70	$\text{Yb}^+ (4f^{14}6s - {}^2S_{1/2})$ 98 300	$4f^{12} ({}^3H)6s^2 ({}^3H_8)$	12457,3
		$4f^{12} ({}^3H_8)5d6s ({}^3D_1)(6,1)_5$	16567,5
		$4f^{13} ({}^2F_{7/2}^\circ) 5d (7/2, 3/2)_2^\circ$	17624,6
		$4f^{12} ({}^3F)6s^2 ({}^3F_4)$	17974,3
		$4f^{12} ({}^3H_8)5d6s ({}^3D_2) (6,2)_4$	18291,4
		$4f^{13} ({}^2F^\circ) 6s^2 ({}^2F_{7/2}^\circ)$	21418,7
		$4f^{14}5d ({}^2D_{3/2})$	22960,8
		$4f^{14}5d ({}^2D_{5/2})$	24332,7
		$4f^{13} ({}^2F_{7/2}^\circ) 5d6s ({}^3D)^3 [3/2]_{5/2}^\circ$	26759,0
		$4f^{14}6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	27061,8
71	$\text{Lu}^+ (4f^{14}6s^2 - {}^1S_0)$ 112 000	$4f^{13} ({}^2F_{7/2}^\circ) 5d6s ({}^3D)^3 [3/2]_{3/2}^\circ$	28758,0
		$5d6s ({}^3D_1)$	11796,2
		$5d6s ({}^3D_2)$	12435,3
		$5d6s ({}^3D_3)$	14199,1
		$5d6s ({}^1D_2)$	17332,6
		$6s6p ({}^3P_0^\circ)$	27264,4
		$6s6p ({}^3P_1^\circ)$	28503,2
		$5d^2 ({}^3F_2)$	29406,7
		$5d^2 ({}^3F_3)$	30889,1
		$6s6p ({}^3P_2^\circ)$	32453,3
72	$\text{Hf}^+ (5d6s^2 - {}^2D_{3/2})$ 120 000	$5d^2 ({}^3F_4)$	32503,6
		$5d6s^2 ({}^2D_{5/2})$	3050,9
		$5d^2 ({}^3F)6s ({}^4F_{3/2})$	3644,6
		$({}^4F_{5/2})$	4904,8
		$({}^4F_{7/2})$	6344,3
73	$\text{Ta}^+ (5d^36s - {}^5F_1)$	$({}^4F_{9/2})$	8361,8
		$5d^3 ({}^5F)6s ({}^5F_2)$	1031,3
		$6s ({}^5F_3)$	2642,2
		$5d^26s^2 ({}^3F_2)$	3180,0
		$5d^26s^2 ({}^3P_0)$	4124,8
		$6s ({}^5F_4)$	4415,7

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
74	$\text{W}^+ (5d^4 6s - {}^6D_{1/2})$	$5d^2 6s^2 ({}^3P_1)$	5330,7
		$({}^3P_2)$	5658,0
		$6s ({}^5F_5)$	6186,7
		$5d^2 6s^2 ({}^3F_3)$	6831,3
		$5d^4 ({}^5D) 6s ({}^6D_{3/2})$	1518,8
		$({}^6D_{5/2})$	3172,5
		$({}^6D_{7/2})$	4716,3
		$({}^6D_{9/2})$	6147,2
75	$\text{Re}^+ (5d^5 6s - {}^7S_3)$	$5d^4 ({}^6S_{5/2})$	7420,4
		$5d^4 6s^2 ({}^5D_0)$	13 777
		$({}^5D_2)$	14 352
		$({}^5D_1)$	14 824
		$({}^5D_4)$	14 883
		$({}^5D_3)$	14 930
76	$\text{Os}^+ (5d^6 6s - {}^6D_{9/2})$	$5d^5 ({}^6S) 6s ({}^5S_2)$	17 223
		$5d^6 ({}^5D) 6s ({}^6D_{7/2})$	3593,1
		$({}^6D_{5/2})$	3928,9
		$({}^6D_{3/2})$	5592,0
		$({}^6D_{1/2})$	6636,6
		$5d^7 ({}^4F_{9/2})$	7401,2
77	$\text{Ir}^+ (5d^7 6s - {}^5F_5)$	$5d^8 ({}^3F_4)$	2265,7
		$5d^8 ({}^3P_2)$	3090,2
		$5d^7 ({}^4F) 6s ({}^5F_4)$	4787,9
		$({}^5F_3)$	8187,0
		$({}^5F_2)$	8975,0
		$5d^8 ({}^3P_1)$	9062,1
		$5d^8 ({}^3F_3)$	9927,8
		$5d^8 ({}^3P_0)$	11211,9
		$5d^8 ({}^1D_2)$	11307,3
		$5d^7 ({}^4F) 6s ({}^3F_4)$	11719,1
		$6s ({}^5F_1)$	11957,7
		$5d^7 ({}^4P) 6s ({}^5P_3)$	12714,6
		$6s ({}^5P_2)$	15676,3
		$5d^8 ({}^1G_4)$	17210,1

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел. см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
78	$\text{Pt}^+ (5d^8 - {}^2D_{5/2})$ 149 720	$5d^8 ({}^3F) 6s ({}^4F_{9/2})$	4787
		$5d^8 ({}^2D_{3/2})$	8420
		$6s ({}^4F_{7/2})$	9356
		$6s ({}^4F_{5/2})$	13 329
		$6s ({}^4F_{3/2})$	15 791
		$5d^8 ({}^3P) 6s' ({}^4P_{5/2})$	16 821
		$5d^8 ({}^3F) 6s ({}^2F_{7/2})$	18 098
79	$\text{Au}^+ (5d^{10} - {}^1S_0)$ 165 000	$5d^9 ({}^2D_{5/2}) 6s ({}^3D_3)$	15 039
		$6s ({}^3D_2)$	17 639
		$5d^9 ({}^2D_{3/2}) 6s ({}^3D_1)$	27 764
80	$\text{Hg}^+ (6s - {}^2S_{1/2})$ 151 280	$5d^9 6s^2 ({}^2D_{5/2})$	35 510
		$6s^2 ({}^2D_{3/2})$	50 550
		$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	51 480
		$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	60 610
81	$\text{Tl}^+ (6s^2 - {}^1S_0)$ 164 760	$6p ({}^3P_0^\circ)$	49 448
		$6p ({}^3P_1^\circ)$	52 390
		$6p ({}^3P_2^\circ)$	61 722
		$6p ({}^1P_1^\circ)$	75 660
		$7s ({}^3S_1)$	105 220
82	$\text{Pb}^+ (6p - {}^2P_{1/2}^\circ)$ 121245,1	$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	14081,07
		$6s6p^2 ({}^4P_{1/2})$	57910,48
		$7s ({}^2S_{1/2})$	59448,56
		$6s6p^2 ({}^4P_{3/2})$	66124,53
		$6d ({}^2D_{5/2})$	68964,31
		$6d ({}^2D_{3/2})$	69739,60
		$6s6p^2 ({}^4P_{5/2})$	73905,71
		$7p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	74459,0
		$7p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	77272,6
		$6s6p^2 ({}^2D_{5/2})$	88972,2
		$8s ({}^2S_{1/2})$	89180,2

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
83	$\text{Bi}^+ (6p^2 - {}^3P_0)$ 135 000	$6p^2 ({}^3P_1)$	13 320
		$6p^2 ({}^3P_2)$	17 030
		$6p^2 ({}^1D_2)$	33 940
		$6p^2 ({}^1S_0)$	44 170
88	$\text{Ra}^+ (6p^6 7s - {}^2S_{1/2})$ 81842,3	$6d ({}^2D_{3/2})$	12084,4
		$6d ({}^2D_{5/2})$	13743,1
		$7p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	21351,2
		$7p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	26208,9
89	$\text{Ac}^+ (7s^2 - {}^1S_0)$ 95 000	$8s ({}^2S_{1/2})$	43405,0
		$6d ({}^2D) 7s ({}^3D_1)$	4739,6
		$6d 7s ({}^3D_2)$	5267,2
		$6d 7s ({}^3D_3)$	7426,5
		$6d ({}^2D) 7s ({}^1D_2)$	9087,5
		$6d^2 ({}^3F_2)$	13236,5
		$6d^2 ({}^3F_3)$	14949,2
		$6d^2 ({}^3F_4)$	16756,9
		$6d^2 ({}^3P_0)$	17737,1
		$6d^2 ({}^3P_1)$	19015,3
		$6d^2 ({}^1D_2)$	19203,0
		$6d^2 ({}^1G_4)$	20848,2
		$7s ({}^2S) 7p ({}^3P_0^\circ)$	20956,4
		$7s 7p ({}^3P_1^\circ)$	22180,5
		$6d^2 ({}^3P_2)$	22199,5
90	$\text{Th}^+ (6d^2 7s ({}^4F_{3/2}) +$ $+ 6d 7s^2 ({}^2D_{3/2}))$ 96 000	$6d^2 ({}^3F) 7s ({}^4F_{5/2})$	1521,89
		$6d^2 ({}^3F) 7s ({}^4F_{3/2})$	1859,94
		$6d ({}^2D) 7s^2 ({}^2D_{5/2}) +$	4113,36
		$+ 6d^2 ({}^3F) 7s ({}^4F_{5/2})$	
		$6d^2 ({}^3F) 7s ({}^4F_{7/2})$	4146,58
		$5f ({}^2F^\circ) 7s^2 ({}^2F_{5/2}^\circ)$	4490,26
		$5f 6d ({}^3H^\circ) 7s ({}^4H_{5/2}^\circ)$	6168,35
		$6d^2 ({}^3F) 7s ({}^4F_{9/2})$	6213,49

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
92	$\text{U}^+ (5f^3 7s^2 - {}^4I_{9/2}^\circ)$ 96 000	$6d^2 ({}^3P) 7s ({}^4P_{1/2})$	6244,29
		$5f6d ({}^3F^\circ) 7s ({}^4F_{3/2}^\circ)$	6691,39
		$5f6d ({}^3H^\circ) 7s ({}^4H_{9/2}^\circ) +$ $+ 5f ({}^1G^\circ) 6d^2 ({}^2G_{9/2}^\circ)$	6700,18
		$6d^3 ({}^4F_{3/2}) +$ $+ 6d ({}^2D) 7s^2 ({}^2D_{3/2})$	7001,43
		$5f6d ({}^3F^\circ) 7s ({}^4F_{5/2}^\circ)$	7331,49
		$6d^2 ({}^1P) 7s ({}^2P_{1/2}) + 6d^3 ({}^2P_{1/2})$	7828,56
		$6d^2 ({}^3P) 7s ({}^4P_{3/2})$	8018,19
		$5f ({}^2F^\circ) 7s^2 ({}^2F_{7/2}^\circ)$	8378,85
		$6d^3 ({}^4F_{3/2}) + 6d ({}^2P) 7s^2 ({}^2P_{3/2})$	8460,3
		$6d^2 ({}^1F) 7s ({}^2F_{5/2})$	8605,8
		$6d^2 ({}^3P) 7s ({}^4P_{5/2})$	9061,1
		$5f6d ({}^1G^\circ) 7s ({}^2G_{7/2}^\circ)$	9202,3
		$5f6d ({}^1G^\circ) 7s ({}^2G_{9/2}^\circ) +$ $+ 5f ({}^3H^\circ) 6d^2 ({}^4H_{9/2}^\circ)$	9238,0
		$6d^3 ({}^4F_{5/2})$	9401,0
		$5f6d ({}^3G^\circ) 7s ({}^4G_{5/2}^\circ)$	9585,4
		$6d^2 ({}^1G) 7s ({}^2G_{7/2})$	9712,0
		$5f6d ({}^3F^\circ) 7s ({}^4F_{7/2}^\circ)$	9720,3
		$5f^3 6d 7s ({}^6L_{11/2}^\circ)$	289,04
		$5f^3 6d 7s ({}^6K_{9/2}^\circ)$	914,76
		$5f^3 6d 7s ({}^6L_{13/2}^\circ)$	1749,12
		$5f^3 6d 7s ({}^6K_{11/2}^\circ)$	2294,70
		$5f^3 7s^2 ({}^4I_{11/2}^\circ)$	4420,87

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
		$(5f^3 6d^2 + 5f^3 6d 7s) (^6M_{13/2}^\circ)$	4585,43
		$5f^4 7s (^6I_{7/2})$	4663,80
		$5f^3 6d 7s (^6H_{5/2}^\circ)$	4706,27
		$5f^3 6d 7s (^6L_{15/2}^\circ)$	5259,65
		$5f^3 6d 7s (J = 7/2)^\circ$	5401,50
		$5f^3 6d 7s (^6K_{13/2}^\circ)$	5526,75
		$5f^3 6d 7s (^6I_{7/2}^\circ)$	5667,33
		$5f^4 7s (^6I_{9/2})$	5716,45
		$5f^3 6d 7s (^6K_{11/2}^\circ)$	5790,64
		$(\bar{5}f^3 6d 7s + 5f^3 6d^2) (J = 13/2)^\circ$	6283,43
		$5f^3 6d 7s (^6I_{9/2}^\circ)$	6445,03
		$(5f^3 7s^2 + 5f^3 6d 7s) (^4F_{3/2}^\circ)$	7017,17
		$5f^3 6d 7s (J = 9/2)^\circ$	7166,63
		$(5f^3 6d 7s + 5f^3 6d^2) (^4H_{7/2}^\circ)$	7547,37
		$5f^3 6d 7s (J = 11/2)^\circ$	7598,35
93	$\text{Np}^+ (5f^3 6d 7s^2 - ^5L_6^\circ)$	$5f^5 7s (J = 2)$	83,5
		$5f^5 7s (J = 3)$	1053,1
94	$\text{Pu}^+ (5f^6 7s - ^8F_{1/2})$	$5f^6 7s (1, 1/2)_{3/2}$	2014,97
		$5f^6 7s (1, 1/2)_{1/2}$	3235,8
		$5f^6 7s (2, 1/2)_{5/2}$	3969,85
		$5f^6 7s (2, 1/2)_{3/2}$	5502,1

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
96	$\text{Cm}^+ (5f^7 7s^2 - {}^3S_{7/2}^\circ)$	$5f^6 7s (3, 1/2)_{7/2}$	5717,98
		$5f^6 7s (4, 1/2)_{9/2}$	7278,86
		$5f^6 7s (3, 1/2)_{5/2}$	7498,36
		$5f^6 7s (5, 1/2)_{11/2}$	8638,23
		$5f^6 7s (4, 1/2)_{7/2}$	9242,36
		$5f^6 7s (6, 1/2)_{13/2}$	9707,98
		$5f^6 7s (J = 1/2)$	10188,46
		$5f^6 7s (5, 1/2)_{9/2}$	10726,32
		$5f^6 7s (6, 1/2)_{11/2}$	11799,24
		$5f^6 7s (J = 3/2)$	13990,95
		$5f^6 7s (J = 1/2)$	14693,1
		$5f^6 7s (J = 13/2)$	2093,88
		$5f^6 7s (J = 11/2)$	3941,46
		$5f^6 7s (J = 9/2)$	5919,28
		$5f^6 7s (J = 11/2)$	6347,92
		$5f^6 7s (J = 7/2)$	7067,13
		$5f^6 7s (J = 9/2)$	8144,32
		$5f^6 7s (J = 5/2)$	8436,11
		$5f^6 7s (J = 7/2)$	9073,60
		$5f^6 7s (J = 3/2)$	9127,87
		$5f^6 7s (J = 1/2)$	9801,32
97	$\text{Bk}^+ (5f^9 7s - {}^7H_8^\circ)$	$5f^8 7s ({}^5H_7^\circ)$	1487,5

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния), оптический предел, см^{-1}	Терм возбужденного состояния	Энергия уровня, см^{-1}
98	$\text{Cf}^+ (5f^{10}7s - {}^6I_{17/2})$	$5f^97s ({}^7F_6^\circ)$	5598,1
		$5f^97s ({}^5F_5^\circ)$	6051,2
		$5f^97s ({}^7H_7^\circ)$	6809,5
		$5f^97s ({}^7F_5^\circ)$	6906,1
		$5f^97s ({}^5F_4^\circ)$	7038,5
		$5f^97s ({}^5H_6^\circ)$	7786,7
		$5f^97s (J = 6)$	10034,0
		$5f^96d (J = 6)$	10282,4
		$5f^97s (J = 5)$	10711,2
		$5f^{10}7s ({}^4I_{15/2})$	1180,5
		$5f^{10}7s (J = 11/2)$	8852,0
		$5f^{10}7s (J = 15/2)$	9350,2
		$5f^{10}7s (J = 9/2)$	9633,1
		$5f^{10}7s (J = 13/2)$	9922,26
		$5f^{10}7s (J = 5/2)$	11114,47
		$5f^{10}7s (J = 13/2)$	11647,9
		$5f^{10}7s (J = 11/2)$	12029,5
99	$\text{Es}^+ (5f^{11}7s - {}^5I_8^\circ)$	$5f^{11} ({}^4I_{15/2}^\circ) 7s ({}^5I_7^\circ)$	938,2
		$5f^{11} ({}^2H_{11/2}^\circ) 7s ({}^3I_6^\circ)$	9085,3
		$5f^{11} ({}^2H_{11/2}^\circ) 7s ({}^3I_5^\circ)$	9580,2
		$5f^{11}7p ({}^6I_7)$	27751,1
		$5f^{11}7p (J = 8)$	28178,8

7.2. РАДИАЦИОННОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ ИОНОВ

В табл. 7.2 включены значения радиационного времени жизни τ_d низколежащих уровней положительных атомных ионов с зарядом $+1$. В четвертом столбце этой таблицы представлены значения энергии возбуждения рассматриваемого уровня относительно основного состояния иона или указано положение центра тяжести мультиплета \bar{T} (см. § 6.1).

При отборе данных для табл. 7.2 мы опирались на работы, процитированные в § 6.4.

Т а б л и ц а 7.2. Радиационное время жизни низколежащих состояний однозарядных положительных ионов

Атом- ный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
2	He ⁺ ($1s-^2S_{1/2}$)	$2p (^2P^o)$ $3s (^2S)$ $3p (^2P^o)$ $3d (^2D)$	40,814 48,3717 48,3718 48,3719	0,10 (A) 9,94 (A) 0,33 (A) 0,97 (A)
3	Li ⁺ ($1s^2-^1S_0$)	$2p (^3P^o)$ $2p (^1P_1^o)$ $3p (^1P_1^o)$	61,28 62,22 69,65	37 (B) 0,039 (B) 0,13 (B)
4	Be ⁺ ($2s-^2S_{1/2}$)	$2p (^2P^o)$	3,959	8,7 (B)
5	B ⁺ ($2s^2-^1S_0$)	$2p (^1P_1^o)$ $2p^2 (^3P)$	9,100 12,266	0,9 (D) 1,0 (D)
6	C ⁺ ($2p-^2P_{1/2}^o$)	$2s2p^2 (^2D)$	9,290	3,9 (C)
7	N ⁺ ($2p^2-^3P_0$)	$2s2p^3 (^3P^o)$ $2p3s (^3P^o)$ $3s (^1P_1^o)$ $2s2p^3 (^1P_1^o)$ $3d (^1P_1^o)$	13,54 18,48 18,50 20,68 23,57	2,7 (C) 0,9 (C) 0,21 (C) 0,24 (C) 0,47 (C)
8	O ⁺ ($2p^3-^4S_{3/2}$)	$2s2p^4 (^4P)$ $2s2p^4 (^2D)$ $3s (^4P)$ $3s (^2P)$ $2s2p^4 (^2S_{1/2})$ $2s2p^4 (^2P)$ $2p^2 (^1D) 3p' (^2P^o)$ $3d (^2P)$ $5p (^4P^o)$	14,87 20,58 22,99 23,43 24,27 26,37 28,83 28,95 32,40	1,2 (C) 0,45 (C) 0,9 (C) 0,27 (C) 0,20 (C) 0,14 (C) 4,9 (C) 0,58 (C) 1,4 (C)

Атом- ный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , ис (класс точности)
9	$F^+ (2p^4 - {}^3P_2)$	$2s2p^5 ({}^3P^\circ)$	2,045	0,32 (C)
10	$Ne^+ (2p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$	$2p^4 ({}^3P) 3p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	30,52	7,8 (C)
		$({}^4P_{3/2}^\circ)$	30,55	10,4 (C)
		$3p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	30,89	6,1 (D)
		$({}^4D_{5/2}^\circ)$	30,93	6,3 (D)
		$3p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	31,12	7,5 (D)
		$({}^2D_{3/2}^\circ)$	31,18	8,4 (C)
		$3p ({}^2S_{1/2}^\circ)$	31,34	4,9 (C)
		$3p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	31,51	5,4 (C)
		$({}^2P_{1/2}^\circ)$	31,53	5,7 (C)
		$2p^4 ({}^1D) 3p' ({}^2F_{7/2}^\circ)$	34,02	8,4 (C)
		$3p' ({}^2D_{5/2}^\circ)$	34,39	6,5 (D)
11	$Na^+ (2p^6 - {}^1S_0)$	$3p ({}^3S_1) (2p_{10})$	36,35	9,7 (C)
		$3p ({}^3D_3) (2p_9)$	36,85	8,0 (C)
		$({}^3D_2) (2p_8)$	36,90	7,8 (C)
		$({}^3D_1) (2p_7)$	36,97	—
		$3p ({}^1D_2) (2p_6)$	37,10	7,1 (C)
		$3p ({}^1P_1) (2p_5)$	37,18	6,5 (C)
		$3p ({}^3P_2) (2p_4)$	37,21	—
		$({}^3P_0) (2p_3)$	37,24	5,4 (C)
		$({}^3P_1) (2p_2)$	37,26	6,5 (C)
		$3p ({}^1S_0) (2p_1)$	38,29	2,9 (C)
12	$Mg^+ (3s - {}^2S_{1/2})$	$3p ({}^2P^\circ)$	4,430	3,7 (C)
		$4s ({}^2S_{1/2})$	8,655	2,7 (D)
		$3d ({}^2D)$	8,864	2,1 (D)
		$4p ({}^2P^\circ)$	9,998	21 (C)
		$4d ({}^2D)$	11,57	12 (C)
		$4f ({}^2F^\circ)$	11,63	4,5 (D)
13	$Al^+ (3s^2 - {}^1S_0)$	$3p ({}^1P_1)$	7,421	0,68 (D)
14	$Si^+ (3p - {}^2P_{1/2}^\circ)$	$3p ({}^2S_{1/2})$	9,505	0,6 (D)
		$3d ({}^2D)$	9,838	0,5 (E)
		$4p ({}^2P^\circ)$	10,07	9,6 (C)
		$4f ({}^2F^\circ)$	12,84	3,7 (C)

Атом- ный номер <i>Z</i>	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
15	$P^+ (3p^2 - {}^3P_0)$	$3s3p^3 ({}^3P^\circ)$	9,521	5,4 (D)
		$4s ({}^3P^\circ)$	10,78	0,8 (D)
		$4s ({}^1P_1^\circ)$	11,02	0,7 (D)
		$3d ({}^3D^\circ)$	12,88	0,2 (D)
16	$S^+ (3p^3 - {}^4S_{3/2}^\circ)$	$3s3p^4 ({}^4P)$	9,871	22 (C)
17	$Cl^+ (3p^4 - {}^3P_2)$	$3p^3 ({}^4S^\circ) 4p ({}^3P)$	16,337	12 (C)
		$3p^3 ({}^2D^\circ) 4p' ({}^3D_3)$	18,160	9 (C)
		$4p' ({}^1F_3)$	18,301	13 (C)
		$4p' ({}^3P_2)$	18,573	5,0 (D)
18	$Ar^+ (3p^5 - {}^2P_{3/2}^\circ)$	$3p^3 ({}^2P^\circ) 4p'' ({}^3P_2)$	20,040	7 (D)
		$3s3p^6 ({}^2S_{1/2})$	13,48	4,8 (C)
		$3p^4 ({}^3P) 4s ({}^2P)$	17,18	0,32 (C)
		$4p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	19,223	7,4 (B)
		$({}^4P_{3/2}^\circ)$	19,261	7,0 (B)
		$4p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	19,495	6,9 (B)
		$({}^4D_{5/2}^\circ)$	19,549	7,5 (C)
		$({}^4D_{3/2}^\circ)$	19,610	7,4 (C)
		$4p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	19,680	9,6 (B)
		$({}^2D_{3/2}^\circ)$	19,762	8,9 (C)
		$4p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	19,801	8,7 (C)
		$({}^2P_{3/2}^\circ)$	19,867	9,4 (C)
		$4p ({}^4S_{3/2}^\circ)$	19,968	7,2 (C)
		$4p ({}^2S_{1/2})$	19,973	8,8 (C)
		$3p^4 ({}^1D) 4p' ({}^2F_{5/2}^\circ)$	21,13	8,0 (B)
		$4p' ({}^2F_{7/2}^\circ)$	21,14	8,8 (B)
		$4p' ({}^2P^\circ)$	21,38	4,3 (C)
		$4p' ({}^2D^\circ)$	21,50	7,6 (C)
19	$K^+ (3p^6 - {}^1S_0)$	$4p ({}^3D_2) ({}^2p_8)$	23,15	8,4 (C)
		$({}^3D_1) ({}^2p_7)$	23,25	8,3 (C)

Атом- ный номер <i>Z</i>	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
		$(^1D_2) (2p_6)$	23,33	8,6 (C)
		$(^1P_1) (2p_3)$	23,46	9,6 (C)
		$(^3P_2) (2p_3)$	23,515	8,3 (C)
		$(^3P_0) (2p_6)$	23,529	6,7 (C)
		$(^3P_1) (2p_2)$	23,57	7,2 (C)
20	$\text{Ca}^+ (4s-^2S_{1/2})$	$3p^5 (^2P_{3/2}^\circ) 5s' [3/2]_2 (2s_6)$	26,36	3,3 (C)
		$4p (^2P^\circ)$	3,142	6,8 (C)
		$5s (^2S_{1/2})$	6,468	4,0 (D)
21	$\text{Sc}^+ (3d4s-^3D_1)$	$4d (^2D)$	7,049	3,1 (D)
		$4p (^3F_2^\circ)$	3,403	6,2 (C)
24	$\text{Cr}^+ (3d^5-^6S_{5/2})$	$4p (^1P_1^\circ)$	3,821	9,2 (C)
		$4p-z^6P$	6,017	3,3 (D)
25	$\text{Mn}^+ (3d^54s-^7S_3)$	$3d^5 (^6S) 4p-z^7P_2^\circ$	4,757	3,7 (C)
		$z^7P_3^\circ$	4,779	3,8 (C)
		$4p-z^5P^\circ$	5,387	4,0 (C)
		$3d^5 (^4G) 4p-z^5G_4^\circ$	7,996	4,8 (D)
		$z^5G_6^\circ$	8,003	3,9 (D)
		$4p-z^5H_3^\circ$	8,119	4,3 (D)
		$z^5H_4^\circ$	8,129	4,0 (D)
		$z^5H_5^\circ$	8,141	3,2 (D)
		$4p-z^5F_5^\circ$	8,250	4,2 (C)
		$3d^6 (^5D) 4p-z^6D^\circ$	4,799	4,0 (C)
		$4p-z^6F_{9/2}^\circ$	5,222	3,4 (C)
		$4p-z^6P_{3/2}^\circ$	5,408	3,9 (C)
26	$\text{Fe}^+ (3d^64s-^6D_0)$	$4p-z^4F^\circ$	5,544	4,0 (C)
		$4p-z^4D_{7/2}^\circ$	5,511	3,7 (C)
		$z^4D_{5/2}^\circ$	5,553	3,4 (C)
		$z^4D_{3/2}^\circ$	5,585	3,4 (C)
		$4p-z^4P_{3/2}^\circ$	5,876	3,8 (C)

Атом- ный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяжести мульт- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
29	$\text{Cu}^+ (3d^{10}—1S_0)$	$3d^9 4p ({}^3F^\circ)$	8,543	2,5 (C)
		$4p ({}^1F_3^\circ)$	8,917	2,1 (D)
		$4p ({}^1D_2^\circ)$	9,095	13 (C)
		$4p ({}^1P_1^\circ)$	9,125	1,8 (D)
		$5s ({}^1D_2)$	13,68	2,3 (D)
		$5p ({}^3P_1^\circ)$	14,99	12 (C)
		$5f ({}^1F_3^\circ)$	18,36	16 (C)
30	$\text{Zn}^+ (3d^{10}4s—2S_{1/2})$	$4p ({}^2P^\circ)$	6,083	2,75 (D)
		$3d^9 4s^2 ({}^2D_{5/2})$	7,777	$1,6 \cdot 10^3$ (C)
		$({}^2D_{3/2})$	8,114	$2,2 \cdot 10^3$ (C)
		$5s ({}^2S_{1/2})$	10,96	2,5 (D)
		$4d ({}^2D)$	12,02	2,3 (D)
		$5p (2p)$	12,59	17 (D)
		$4f ({}^2F_{5/2}^\circ)$	14,54	6,4 (D)
31	$\text{Ga}^+ (4s^2—1S_0)$	$4p ({}^1P_1^\circ)$	8,77	0,5 (C)
		$4p^2 ({}^1D_2)$	13,36	55 (C)
		$4d ({}^1D_2)$	15,65	0,75 (C)
36	$\text{Kr}^+ (4p^5—2P_{1/2}^\circ)$	$4s 4p^6 ({}^2S_{1/2})$	13,515	0,33 (D)
		$4p^4 ({}^3P) 5p ({}^4P_{5/2}^\circ)$	16,60	7,9 (B)
		$({}^4P_{3/2}^\circ)$	16,65	8,1 (B)
		$({}^4P_{1/2}^\circ)$	16,84	8,5 (C)
		$5p ({}^4D_{7/2}^\circ)$	16,84	7,2 (C)
		$({}^4D_{5/2}^\circ)$	16,87	9,6 (B)
		$({}^4D_{3/2}^\circ)$	17,16	8,4 (B)
		$({}^4D_{1/2}^\circ)$	17,38	8,1 (B)
		$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	17,25	9,1 (B)
		$({}^2P_{3/2}^\circ)$	17,37	8,5 (B)
		$5p ({}^2D_{5/2}^\circ)$	17,37	8,2 (B)
		$({}^2D_{3/2}^\circ)$	17,61	8,7 (B)

Атом- ный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
37	$\text{Rb}^+ (4p^6 - {}^1S_0)$	$5p ({}^4S_{3/2})$	17,57	8,3 (B)
		$5p ({}^2S_{1/2})$	17,65	9,4 (B)
		$4p^4 ({}^1D) 5p' ({}^2F_{5/2}^\circ)$	18,50	8,6 (B)
		$({}^2F_{7/2}^\circ)$	18,56	8,3 (B)
		$5p' ({}^2P_{3/2}^\circ)$	18,62	6,3 (B)
		$({}^2P_{1/2}^\circ)$	18,88	6,0 (B)
		$5p' ({}^2D_{3/2}^\circ)$	18,87	7,7 (B)
		$({}^2D_{5/2}^\circ)$	18,88	7,8 (B)
		$4p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 4d [1/2]_1^\circ$	15,68	2,0 (D)
		$5s [3/2]_1^\circ$	16,72	1,2 (C)
		$4d [3/2]_1^\circ$	17,43	1,1 (D)
		$4p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 5s' [1/2]_1^\circ$	17,79	0,9 (C)
		$4d' [3/2]_1^\circ$	18,06	0,8 (E)
		$4p^5 ({}^2P_{3/2}^\circ) 5p [1/2]_1 (5p_1)$	19,13	8,0 (B)
		$5p [5/2]_2 (5p_2)$	19,43	8,5 (D)
		$[5/2]_3 (5p_3)$	19,45	7 (D)
		$5p [3/2]_1 (5p_4)$	19,61	7,5 (D)
		$[3/2]_2 (5p_5)$	19,68	—
		$5p [1/2]_0 (5p_6)$	19,99	6 (D)
		$4p^5 ({}^2P_{1/2}^\circ) 5p' [3/2]_1 (5p_7)$	20,32	9,5 (D)
		$[3/2]_2 (5p_8)$	20,45	8 (D)
		$5p' [1/2]_1 (5p_9)$	20,47	7,5 (D)
		$[1/2]_0 (5p_{10})$	20,78	6 (D)
38	$\text{Sr}^+ (4p^6 5s - {}^2S_{1/2})$	$5p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	2,940	7,5 (B)
		$5p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	3,040	6,7 (B)
39	$\text{Y}^+ (5s^2 - {}^1S_0)$	$4d ({}^2D) 5p - z {}^1D_2^\circ$	3,242	6,3 (C)
		$5p - z {}^3F^\circ$	3,450	6 (C)
		$5p - z {}^3D^\circ$	3,587	4,3 (C)
40	$\text{Zr}^+ (4d^2 5s - {}^4F_{3/2})$	$4d^2 5s - z {}^4G_{5/2}^\circ$	3,450	7,1 (C)

Атом- ный номер <i>Z</i>	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
41	Nb ⁺ ($4d^4—^5D_0$)	$4d^3(^4F) 5p—z^5G^\circ$ $5p—z^3D^\circ$	4,353 4,448	5,5 (C) 5,5 (C)
42	Mo ⁺ ($4d^5—^6S_{5/2}$)	$4d^4(^5D) 5p—z^6F^\circ$ $5p—z^6P^\circ$ $5p—z^6D^\circ$	5,908 6,128 6,255	4,9 (C) 3,0 (D) 4,3 (C)
48	Cd ⁺ ($4d^{10}5s—^2S_{1/2}$)	$5p(^2P_{1/2}^\circ)$ $5p(^2P_{3/2}^\circ)$ $4d^95s^2(^2D_{5/2})$ $(^2D_{3/2})$ $6p(^2P_{3/2}^\circ)$ $4f(^2F^\circ)$ $6d(^2D)$ $5f(^2F_{7/2})$	5,472 5,780 8,587 9,286 11,83 13,44 13,67 14,69	3,5 (C) 3,5 (C) 830 (C) 300 (C) 19 (C) 6,0 (C) 6,5 (D) 15 (C)
53	I ⁺ ($5p^4—^3P_2$)	$5p^3(^4S^\circ) 6p(^5P_3)$ $6p(^3P_2)$ $6p(^3P_1)$ $5p^3(^2D^\circ) 6p'(^3D)$ $6p'(^3F)$ $6p'(^3P_2)$ $6p'(^1D_2)$	12,45 12,72 12,60 13,96 14,18 14,35 14,77	13 (C) 13,5 (C) 14 (C) 15 (C) 16 (C) 11 (C) 12 (C)
54	Xe ⁺ ($5p^5—^2P_{3/2}^\circ$)	$5s5p^6(^2S_{1/2})$ $5p^4(^3P) 6p(^4P_{3/2}^\circ)$ $(^4P_{5/2}^\circ)$ $(^4P_{1/2}^\circ)$ $6p(^4D_{5/2}^\circ)$ $(^4D_{7/2}^\circ)$ $(^4D_{3/2}^\circ)$ $(^4D_{1/2}^\circ)$ $6p(^2S_{1/2}^\circ)$ $6p(^2D_{5/2}^\circ)$ $(^2D_{3/2}^\circ)$ $6p(^2P_{3/2}^\circ)$ $(^2P_{1/2}^\circ)$	11,267 13,86 13,88 14,09 14,07 14,10 14,48 14,93 15,02 15,26 15,41 15,28 15,45	34 (B) 9 (C) 7,9 (B) 11 (D) 7,3 (B) 6,9 (B) 9 (C) 7,4 (C) 8,4 (C) 7,5 (C) 9 (C) 10 (C) 8,5 (C)

Атом- ный номер <i>Z</i>	Ион (терм основного состояния)	Терм возбужденного состояния	Энергия воз- буждения для центра тяже- сти мульти- плета, эВ	Время жизни τ , нс (класс точности)
55	$\text{Cs}^+ (5p^6 \text{—} ^1S_0)$	$5p^4 ({}^1D) 6p' ({}^2P_{3/2}^\circ)$	16,08	7,6 (C)
		$6p' ({}^2P_{1/2}^\circ)$	16,46	7,8 (C)
		$6p' ({}^2D_{3/2}^\circ)$	16,36	9 (C)
		$6p' ({}^2D_{5/2}^\circ)$	16,39	10 (C)
		$6p [1/2]_1$	15,69	9,2 (C)
56	$\text{Ba}^+ (6s \text{—} ^2S_{1/2})$	$6p [5/2]_3$	16,009	6,6 (C)
		$6p [3/2]_1$	16,118	7,8 (C)
		$6p [3/2]_2$	16,214	9,6 (C)
		$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	2,512	7,9 (B)
		$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	2,722	6,31 (A)
57	$\text{La}^+ (5d^2 \text{—} ^3F_2)$	$6d ({}^2D_{3/2})$	5,697	60 (C)
		$5d ({}^2D) 4f \text{—} y {}^3F_2^\circ$	2,134	510 (B)
		$y {}^3F_3^\circ$	2,261	430 (B)
		$y {}^3F_4^\circ$	2,382	450 (B)
		$4f \text{—} z {}^1D_2^\circ$	2,343	570 (C)
73	$\text{Ta}^+ (5d^3 6s \text{—} ^5F_1)$	$4f \text{—} z {}^3D_1^\circ$	2,658	44 (B)
		$z {}^3D_2^\circ$	2,741	51 (C)
		$z {}^3D_3^\circ$	2,794	68 (B)
		$({}^5G_2^\circ)$	4,616	5,5 (C)
		$({}^5F_2^\circ)$	4,775	13 (C)
74	$\text{W}^+ (5d^4 6s \text{—} ^6D_{1/2})$	$({}^5F_1^\circ)$	4,778	7 (C)
		$({}^5F_3^\circ)$	4,872	15 (C)
		$5d^4 ({}^5D) 6p ({}^6F_{1/2}^\circ)$	4,48	14 (C)
		$5d^4 ({}^3P) 6p ({}^2S_{1/2}^\circ)$	4,78	11 (C)
		$6p ({}^2P_{1/2}^\circ)$	6,383	2,3 (D)
80	$\text{Hg}^+ (5d^{10} 6s \text{—} ^3S_{1/2})$	$6p ({}^2P_{3/2}^\circ)$	7,514	1,9 (C)
		$5d^9 6s 6p ({}^2\bar{D}_{5/2})$	9,88	250 (C)
		$({}^4\bar{D}_{7/2})$	10,44	39 (C)
		$({}^4F_{5/2})$	10,52	150 (C)
		$6d ({}^2D_{3/2})$	13,02	1,7 (D)
		$6d ({}^2D_{5/2})$	13,09	1,9 (D)

7.3. ТЕРМЫ И РАДИАЦИОННОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОДНОЗАРЯДНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

В табл. 7.3 собраны значения энергии возбуждения T_k низколежащих метастабильных состояний положительных атомных ионов с зарядом $+1$, длин волн излучения λ при их распаде (в ряде случаев значения T_k и λ были отнесены к положению центров тяжести мультиплетных уровней) и значения радиационного времени жизни таких состояний τ_m , которые были получены в основном расчетным путем. Некоторая информация о возможных каналах радиационного распада метастабильных уровней частиц была представлена нами ранее, в § 6.5. Длины волн излучения λ , характеризующие каналы распада с наибольшими значениями коэффициентов Эйнштейна, отмечены первыми, а другие значения в порядке убывания A_{ki} заключены в круглые скобки.

Данные для времени жизни метастабильных уровней ионов τ_m распределялись по классам точности в соответствии с оценкой погрешности использованного метода их получения. Значения T_k и λ округлялись по последней приведенной значащей цифре. При отборе включенных в табл. 7.3 результатов мы опирались на литературу, процитированную в § 6.5.

Т а б л и ц а 7.3. Энергия возбуждения и радиационное время жизни метастабильных состояний однозарядных положительных ионов

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Метастабильный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиационного распада метастабильного уровня	Длина волны излучения при переходе в нижнее состояние λ , 10 ⁻¹⁰ м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см ⁻¹	эВ			
2	He ⁺ (1 ² S _{1/2})	2 ² S _{1/2}	329179,8	40,81	1 ² S _{1/2}	(2E1 + M1)	0,00190 (A)
3	Li ⁺ (1 ¹ S ₀)	2 ² S ₁	476034,6	59,02	1 ¹ S ₀	210,1	49 (B)
		2 ¹ S ₀	491374,6	60,92	1 ¹ S ₀	203,5	0,51 · 10 ⁻³ (C)
6	C ⁺ (2 ² P _{1/2} ^o)	2 ² P _{3/2} ^o	63,4	0,0079	2 ² P _{1/2} ^o	1,6 · 10 ⁶	4 · 10 ⁶ (E)
7	N ⁺ (2 ² P ₀)	2 ² P ₁	48,7	0,0060	2 ² P ₀	2,1 · 10 ⁶	5 · 10 ⁶ (E)
		2 ² P ₂	130,8	0,016	2 ² P ₁	1,2 · 10 ⁶	1 · 10 ⁶ (E)
		2 ¹ S ₀	32688,8	4,053	2 ¹ D ₂	5755	0,92 (C)
8	O ⁺ (2 ² S _{3/2} ^o)	2 ² P _{3/2} ^o	40467	5,017	2 ² D ^o	7320—7330	7,7 (C)
		2 ² P _{1/2} ^o	40468	5,017	2 ² D ^o	7320—7330	7,6 (C)
10	Ne ⁺ (2 ² P _{3/2} ^o)	2 ² P _{1/2} ^o	780,3	0,097	2 ² P _{3/2} ^o	1,3 · 10 ⁵	120 (D)
14	Si ⁺ (3 ² P _{1/2} ^o)	3 ² P _{3/2} ^o	287,4	0,036	3 ² P _{1/2} ^o	3,5 · 10 ⁵	5 · 10 ⁵ (E)
15	P ⁺ (3 ² P ₀)	3 ² P ₁	165	0,0204	3 ² P ₀	6,1 · 10 ⁵	1,2 · 10 ⁴ (D)
		3 ² P ₂	469	0,0581	3 ² P ₁	3,3 · 10 ⁵	2,7 · 10 ⁴ (D)
		3 ¹ D ₂	8883	1,101	3 ² P ₂ (3 ² P ₁)	11882 (11468)	43 (D)
		3 ¹ S ₀	21576	2,675	3 ¹ D ₂ (3 ² P ₁)	7876 (4669)	0,46 (D)

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Метабильный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиационного распада метабильного уровня	Длина волны излучения при переходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни $\tau_{\text{р}}$, с (класс точности)
			см ⁻¹	эВ			
16	S^+ ($3^4S_{3/2}^{\circ}$)	$3^2D_{3/2}^{\circ}$	14852	1,841	$3^4S_{3/2}^{\circ}$	6731	$3,4 \cdot 10^8$ (D)
		$3^2D_{5/2}^{\circ}$	14883	1,845	$3^4S_{3/2}^{\circ}$	6717	$5,2 \cdot 10^8$ (D)
		$3^2P_{1/2}^{\circ}$	24524	3,041	$3^2D_{3/2}^{\circ}$	10336 (4076)	5,1 (D)
		$3^2P_{3/2}^{\circ}$	24573	3,047	($3^4S_{3/2}^{\circ}$)	10318 (4068)	3,4 (D)
					($3^4S_{3/2}^{\circ}$)		
17	Cl^+ (3^3P_2)	3^3P_1	696,0	0,0863	3^3P_2	$1,4 \cdot 10^5$	720 (D)
		3^3P_0	996,5	0,124	3^3P_1	$3,3 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^8$ (D)
		3^1D_2	11653,6	1,445	3^3P_2	8579 (9124)	28 (D)
		3^1S_0	27878,0	3,456	(3^3P_1) 3^1D_2	6162 (3678)	0,47 (D)
18	Ar^+ ($3^2P_{3/2}^{\circ}$)	$3^2P_{1/2}^{\circ}$	1432	0,178	$3^2P_{3/2}^{\circ}$	$7 \cdot 10^4$	20 (D)
26	Fe^+ ($4^6D_{9/2}$)	$3d^6 4s - a^6D_{7/2}$	384,79	0,0477	$a^6D_{9/2}$	$2,6 \cdot 10^5$	470 (D)
		$a^6D_{5/2}$	667,68	0,0828	$a^6D_{7/2}$	$3,5 \cdot 10^5$	630 (D)
		$a^6D_{3/2}$	862,61	0,107	$a^6D_{5/2}$	$5,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^8$ (D)
		$a^6D_{1/2}$	977,05	0,121	$a^6D_{3/2}$	$8,7 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^8$ (D)
		$3d^7 - a^4F_{9/2}$	1872,6	0,232	$a^6D_{9/2}$	$5,3 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^8$ (D)
		$a^4F_{7/2}$	2439,1	0,302	$a^4F_{9/2}$ ($a^6D_{7/2}$)	$1,8 \cdot 10^5$ ($4,9 \cdot 10^4$)	150 (D)
		$a^4F_{5/2}$	2837,9	0,352	$a^4F_{7/2}$ ($a^6D_{5/2}$)	$2,5 \cdot 10^5$ ($4,6 \cdot 10^4$)	260 (D)
		$a^4F_{3/2}$	3117,5	0,387	$a^4F_{5/2}$ ($a^6D_{3/2}$)	$3,6 \cdot 10^5$ ($4,4 \cdot 10^4$)	670 (D)
		$3d^6 4s - a^4D_{7/2}$	7955,3	0,986	$a^4D_{9/2}$ ($a^4F_{9/2}$)	12567 (16436)	96 (D)
		$a^4D_{5/2}$	8391,9	1,040	$a^4D_{7/2}$ ($a^6D_{5/2}$)	$2,3 \cdot 10^5$ (12943)	108 (D)
		$a^4D_{3/2}$	8680,5	1,076	$a^4D_{3/2}$ ($a^4F_{7/2}$, $a^4D_{5/2}$)	12788 (16018; $3,5 \cdot 10^5$)	124 (D)

Атомный номер Z	Ион (терм основного состояния)	Метастабильный уровень	Энергия возбуждения		Нижнее состояние для радиационного распада метастабильного уровня	Длина волны излучения при переходе в нижнее состояние λ , 10^{-10} м	Радиационное время жизни τ_m , с (класс точности)
			см ⁻¹	эВ			
29	Cu ⁺ (3'S ₀)	<i>a</i> ¹ D _{1/2}	8846,8	1,097	<i>a</i> ¹ D _{1/2} (<i>a</i> ¹ F _{5/2})	12703 (16637)	133 (D)
		3 <i>d</i> ⁷ — <i>a</i> ¹ P _{5/2}	13474,4	1,671	<i>a</i> ¹ F _{9/2} (<i>a</i> ¹ F _{7/2})	8617 (9059)	38 (D)
		<i>a</i> ¹ P _{3/2}	13673,2	1,695	<i>a</i> ¹ F _{7/2} (<i>a</i> ¹ F _{5/2})	8899 (9227)	43 (D)
		<i>a</i> ¹ P _{1/2}	13904,8	1,724	<i>a</i> ¹ F _{5/2} (<i>a</i> ¹ F _{3/2})	9033 (9268)	43 (D)
32	Ge ⁺ (⁴² P _{1/2} ^o)	4 ¹ D ₂	22847,0	2,833	3 ¹ S ₀	4376	8,3 (D)
35	Br ⁺ (4 ³ P ₂)	4 ² P _{3/2} ^o	26264,5	3,256	3 ¹ S ₀	3806	0,53 (D)
36	Kr ⁺ (⁴² P _{3/2} ^o)	4 ² P _{1/2} ^o	1767,4	0,219	4 ² P _{1/2} ^o	5,7 · 10 ⁴	20 (D)
		4 ³ P ₁	3140	0,389	4 ³ P ₂	3,2 · 10 ⁴	1,5 (D)
		4 ³ P ₀	3840	0,476	4 ³ P ₁	1,4 · 10 ⁵	56 (D)
		4 ¹ D ₂	11410	1,415	4 ³ P ₂ (4 ³ P ₁)	8762	0,46 (D)
50	Sn ⁺ (⁵² P _{1/2} ^o)	4 ¹ S ₀	—	—	4 ³ P ₁ (4 ¹ D ₂)	—	0,04 (E)
		4 ² P _{1/2} ^o	5370,1	0,666	4 ² P _{3/2} ^o	1,9 · 10 ⁴	0,36 (D)
		5 ² P _{3/2} ^o	4251,5	0,527	5 ² P _{1/2} ^o	2,4 · 10 ⁴	1,4 (D)
		5 ³ P ₀	6448	0,799	5 ³ P ₂	1,6 · 10 ⁴	45 (D)
53	I ⁺ (5 ³ P ₂)	5 ³ P ₁	7086,9	0,879	5 ³ P ₂	1,4 · 10 ⁴	0,14 (D)
		5 ¹ D ₂	13727	1,702	5 ³ P ₂ (5 ³ P ₁)	7283	0,11 (D)
		5 ¹ S ₀	29501	3,658	5 ³ P ₁ (5 ¹ D ₂)	3389	0,011 (D)
		5 ² P _{1/2} ^o	10537	1,306	5 ² P _{1/2} ^o	9487	0,047 (D)
82	Pb ⁺ (⁶² P _{1/2} ^o)	6 ² P _{3/2} ^o	14081,1	1,746	6 ² P _{1/2} ^o	7100	0,038 (D)
83	Bi ⁺ (6 ³ P ₀)	6 ³ P ₁	13320	1,651	6 ³ P ₀	7505	0,03 (D)
		6 ³ P ₂	17030	2,111	6 ³ P ₂ (6 ³ P ₁)	5870	0,51 (D)
		6 ¹ D ₂	33940	4,208	6 ³ P ₁ (6 ³ P ₂)	4848 (5912)	0,009 (D)
		6 ¹ S ₀	44170	5,476	6 ³ P ₁ (6 ³ P ₂)	3241 (3684)	0,003 (D)

7.4. ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В табл. 7.4, 7.5 представлены спектроскопические параметры низколежащих ($n \leq 2$) состояний атомных ионов, изоэлектронных водороду и гелию, в широком диапазоне изменения заряда ядра $Z \leq 90$. Характерной особенностью спектра многозарядных ионов является наличие интенсивных «запрещенных» переходов между состояниями, которые обусловлены вкладом сильных релятивистских эффектов [1, 2].

На рис. 7.1 построена диаграмма энергетических уровней для изоэлектронного ряда водорода, иллюстрирующая характер разрешенных и запрещенных оптических переходов ($n \leq 2$).

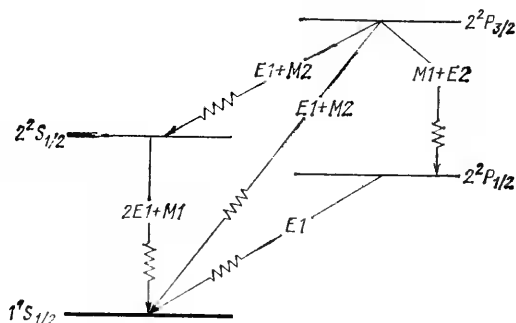


Рис. 7.1. Диаграмма энергетических уровней для изоэлектронного ряда водорода, иллюстрирующая характер разрешенных и запрещенных оптических переходов ($n \leq 2$)

На рис. 7.2 воспроизведена диаграмма относительного положения уровней энергии с $n=2$ у гелиеподобных ионов с зарядом ядра $Z=10$ и $Z=80$, на которой отмечены доминирующие механизмы мультипольных переходов между рассмотренными состояниями. В табл. 7.5 включены расчетные данные для A_{ki} и τ_k [6–13].

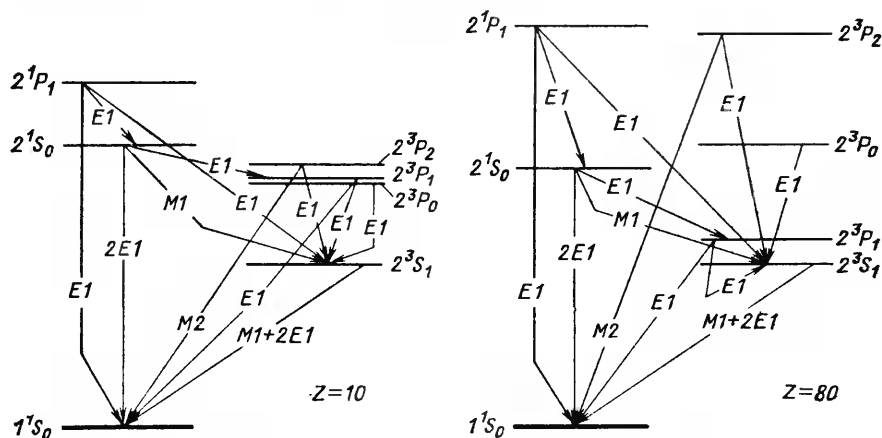


Рис. 7.2. Диаграмма энергетических уровней для изоэлектронного ряда гелия, иллюстрирующая характер разрешенных и запрещенных оптических переходов ($n \leq 2$)

Помимо отмеченных параметров в табл. 7.4, 7.5 приведены значения длин волн переходов λ между различными состояниями с главным квантовым числом $n=1$ и 2 для водородоподобных и гелиеподобных ионов. Эти данные получены расчетным путем, исходя из разностей в энергии, отвечающей уровням многозарядных ионов (см. § 5.3).

Таблица 7.4. Длина волны излучения λ , 10^{-10} м (верхнее число), вероятность оптических переходов A_{ki} , 10^{12} с $^{-1}$ (среднее число), и радиационное время жизни τ_k , нс (нижнее число), для изоэлектронной последовательности водорода $H(nl): n=1,2; \Delta n=0,1; 2 \leq Z \leq 94$ [$X(Y) = X \cdot 10^Y$]

Атомный номер Z	Ион	$2p^2P_{1/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2s^2S_{1/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 2p^2P_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 2s^2S_{1/2}$
2	⁴ He II	303,7858 1,003 (—2) 9,970 (—2)	303,7854 5,265 (—10) 1,899 (+6)	303,7804 1,003 (—2) 9,970 (—2)	1,7 (+7) 3,6 (—21)	1,9 (+7) 9,1 (—16)
3	⁷ Li III	135,0012 5,077 (—2) 1,970 (—2)	135,0008 5,997 (—9) 1,668 (+5)	134,9958 5,077 (—2) 1,970 (—2)	3,4 (+6) 4,7 (—19)	3,6 (+6) 5,2 (—14)
4	⁹ Be IV	75,9313 0,1605 6,231 (—3)	75,9310 3,369 (—8) 2,968 (+4)	75,9259 0,1604 6,234 (—3)	1,1 (+6) 1,5 (—17)	1,1 (+6) 9,3 (—13)
5	¹¹ B V	48,5909 0,392 2,55 (—3)	48,5906 1,285 (—7) 7,783 (+3)	48,5855 0,392 2,55 (—3)	4,4 (+5) 2,1 (—16)	4,7 (+5) 8,7 (—12)
6	¹² C VI	33,7396 0,813 1,23 (—3)	33,7393 3,836 (—7) 2,607 (+3)	33,7342 0,812 1,23 (—3)	2,1 (+5) 1,9 (—15)	2,2 (+5) 5,4 (—11)
7	¹⁴ N VII	24,7846 1,51 6,62 (—4)	24,7843 9,672 (—7) 1,03 (+3)	24,7792 1,50 6,67 (—4)	1,1 (+5) 1,2 (—14)	1,2 (+5) 2,5 (—10)
8	¹⁶ O VIII	18,9725 2,57 3,89 (—4)	18,9723 2,155 (—6) 464	18,9671 2,57 3,89 (—4)	6,7 (+4) 6,1 (—14)	7,0 (+4) 9,6 (—10)
9	¹⁸ F IX	14,9877 4,11 2,43 (—4)	14,9875 4,370 (—6) 229	14,9823 4,11 2,43 (—4)	4,2 (+4) 2,5 (—13)	4,4 (+4) 3,1 (—9)
10	²⁰ Ne X	12,1375 6,27 1,59 (—4)	12,1372 8,226 (—6) 122	12,1321 6,26 1,60 (—4)	2,7 (+4) 8,8 (—13)	2,8 (+4) 9,0 (—9)
11	²² Na XI	10,0286 9,18 1,09 (—4)	10,0284 1,46 (—5) 68,6	10,0232 9,16 1,09 (—4)	1,86 (+4) 2,8 (—12)	1,94 (+4) 2,3 (—8)
12	²⁴ Mg XII	8,4246 13,0 7,69 (—5)	8,4244 2,461 (—5) 40,6	8,4192 13,0 7,69 (—5)	1,311 (+4) 7,9 (—12)	1,366 (+4) 5,6 (—8)
13	²⁷ Al XIII	7,1763 17,9 5,59 (—5)	7,1761 3,98 (—5) 25,1	7,1709 17,9 5,59 (—5)	9509 2,1 (—11)	9894 1,2 (—7)
14	²⁸ Si XIV	6,1858 24,1 4,15 (—5)	6,1856 6,228 (—5) 16,1	6,1804 24,0 4,17 (—5)	7063 5,1 (—11)	7338 2,6 (—7)
15	³¹ P XV	5,3868 31,8 3,14 (—5)	5,3866 9,43 (—5) 10,6	5,3813 31,6 3,16 (—5)	5355 1,2 (—10)	5556 5,2 (—7)
16	³² S XVI	4,7328 41,1 2,43 (—5)	4,7326 1,397 (—4) 7,16	4,7274 40,9 2,44 (—5)	4132 2,5 (—10)	4282 1,0 (—6)
17	³⁵ Cl XVII	4,1907 52,4 1,91 (—5)	4,1906 2,01 (—4) 4,98	4,1853 52,2 1,92 (—5)	3239 5,2 (—10)	3352 1,8 (—6)
18	⁴⁰ Ar XVIII	3,7365 65,9 1,52 (—5)	3,7363 2,859 (—4) 3,50	3,7311 65,5 1,53 (—5)	2574 1,0 (—9)	2661 3,3 (—6)
19	⁴⁰ K XIX	3,3521 81,9 1,22 (—5)	3,3519 3,96 (—4) 2,53	3,3467 81,3 1,23 (—5)	2071 2,0 (—9)	2139 5,6 (—6)
20	⁴⁰ Ca XX	3,0239 101 9,90 (—6)	3,0237 5,458 (—4) 1,83	3,0185 99,8 1,00 (—5)	1684,8 3,7 (—9)	1738,7 9,4 (—6)

АТОМНЫЙ НОМЕР Z	ИОН	$2p^2P_{1/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2s^2S_{1/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 2p^2P_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 2s^2S_{1/2}$
21	$^{45}\text{Sc XXI}$	2,7414 122 8,20 (—6)	2,7413 7,35 (—4) 1,36	2,7360 121 8,26 (—6)	1384,2 6,7 (—9)	1427,2 1,5 (—5)
22	$^{48}\text{Ti XXII}$	2,4966 147 6,80 (—6)	2,4965 9,862 (—4) 1,01	2,4912 146 6,85 (—6)	1147,5 1,2 (—8)	1182,2 2,5 (—5)
23	$^{51}\text{V XXIII}$	2,2830 176 5,68 (—6)	2,2829 1,30 (—3) 0,77	2,2776 174 5,75 (—6)	959,14 2,0 (—8)	987,36 3,8 (—5)
24	$^{52}\text{Cr XXIV}$	2,0956 209 4,78 (—6)	2,0954 1,706 (—3) 0,586	2,0901 206 4,85 (—6)	807,7 3,4 (—8)	830,9 5,9 (—5)
25	$^{55}\text{Mn XXV}$	1,9301 246 4,07 (—6)	1,9300 2,20 (—3) 0,45	1,9247 243 4,12 (—6)	684,9 5,5 (—8)	704,0 8,9 (—5)
26	$^{56}\text{Fe XXVI}$	1,7834 288 3,47 (—6)	1,7833 2,852 (—3) 0,351	1,7780 284 3,52 (—6)	584,4 8,9 (—8)	600,4 1,3 (—4)
27	$^{59}\text{Co XXVII}$	1,6527 335 2,99 (—6)	1,6526 3,62 (—3) 0,28	1,6473 330 3,03 (—6)	501,6 1,4 (—7)	515,0 1,9 (—4)
28	$^{58}\text{Ni XXVIII}$	1,5358 390 2,56 (—6)	1,5356 4,637 (—3) 0,216	1,5303 380 2,63 (—6)	432,9 2,2 (—7)	444,2 2,8 (—4)
29	$^{64}\text{Cu XXIX}$	1,4307 450 2,2 (—6)	1,4306 5,82 (—3) 0,17	1,4253 440 2,3 (—6)	375,5 3,4 (—7)	385,1 4,0 (—4)
30	$^{64}\text{Zn XXX}$	1,3359 510 2,0 (—6)	1,3358 7,376 (—3) 0,136	1,3305 500 2,0 (—6)	327,2 5,1 (—7)	335,4 5,7 (—4)
31	$^{69}\text{Ga}^{30+}$	1,2502 580 1,7 (—6)	1,2501 9,16 (—3) 0,11	1,2448 570 1,8 (—6)	286,4 7,6 (—7)	293,4 7,9 (—4)
32	$^{74}\text{Ge}^{31+}$	1,1724 660 1,5 (—6)	1,1723 1,14 (—2) 0,088	1,1670 650 1,5 (—6)	251,7 1,1 (—6)	257,7 1,1 (—3)
33	$^{75}\text{As}^{32+}$	1,1015 750 1,3 (—6)	1,1014 1,42 (—2) 0,070	1,0961 730 1,4 (—6)	222,0 1,6 (—6)	227,3 1,5 (—3)
34	$^{80}\text{Se}^{33+}$	1,0368 840 1,2 (—6)	1,0367 1,775 (—2) 0,056	1,0314 830 1,2 (—6)	196,6 2,3 (—6)	201,1 2,0 (—3)
35	$^{79}\text{Br}^{31+}$	0,9776 950 1,1 (—6)	0,9775 2,17 (—2) 0,046	0,9722 930 1,1 (—6)	174,7 3,3 (—6)	178,6 2,7 (—3)
36	$^{84}\text{Kr}^{36+}$	0,9232 1060 9,4 (—7)	0,9231 2,67 (—2) 0,037	0,9178 1040 9,6 (—7)	155,7 5,0 (—6)	159,1 3,6 (—3)
37	$^{83}\text{Rb}^{36+}$	0,8732 1200 8,3 (—7)	0,8731 3,29 (—2) 0,030	0,8678 1150 8,7 (—7)	139,1 6,6 (—6)	142,2 4,8 (—3)
38	$^{88}\text{Sr}^{37+}$	0,8271 1300 7,7 (—7)	0,8270 4,068 (—2) 0,025	0,8216 1300 7,7 (—7)	124,7 9,1 (—6)	127,4 6,3 (—3)
39	$^{90}\text{Y}^{38+}$	0,7845 1500 6,7 (—7)	0,7843 4,93 (—2) 0,020	0,7790 1400 7,1 (—7)	112,1 1,3 (—5)	114,5 8,2 (—3)
40	$^{90}\text{Zr}^{38+}$	0,7450 1600 6,2 (—7)	0,7449 6,02 (—2) 0,017	0,7395 1600 6,2 (—7)	101,0 1,7 (—5)	103,1 1,1 (—2)
41	$^{93}\text{Nb}^{40+}$	0,7084 1800 5,6 (—7)	0,7083 7,33 (—2) 0,014	0,7029 1700 5,9 (—7)	90,9 2,3 (—5)	93,5 1,4 (—2)
42	$^{98}\text{Mo}^{41+}$	0,6743 2000 5,0 (—7)	0,6742 8,99 (—2) 0,011	0,6689 1900 5,3 (—7)	82,6 3,1 (—5)	84,7 1,8 (—2)

Атомный номер Z	Ион	$2p^2P_{1/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2s^2S_{1/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 2p^2P_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow$ $\rightarrow 2s^2S_{1/2}$
47	$^{107}\text{Ag}^{10+}$	0,5354 3100 3,2 (—7)	0,5353 0,230 4,3 (—3)	0,5300 3000 3,3 (—7)	51,8 1,3 (—4)	52,9 5,6 (—2)
48	$^{114}\text{Cd}^{17+}$	0,5127 3400 2,9 (—7)	0,5126 0,277 3,6 (—3)	0,5073 3200 3,1 (—7)	47,6 1,6 (—4)	48,5 7,0 (—2)
49	$^{115}\text{In}^{18+}$	0,4914 3700 2,7 (—7)	0,4913 0,332 3,0 (—3)	0,4859 3500 2,9 (—7)	43,5 2,1 (—4)	44,4 8,7 (—2)
50	$^{120}\text{Sn}^{19+}$	0,4713 4000 2,5 (—7)	0,4712 0,402 2,5 (—3)	0,4658 3800 2,6 (—7)	40,0 2,7 (—4)	40,8 0,11
51	$^{121}\text{Sb}^{50+}$	0,4524 4400 2,3 (—7)	0,4523 0,50 2,0 (—3)	0,4469 4100 2,4 (—7)	37,0 4,0 (—4)	38,5 0,14
52	$^{120}\text{Te}^{51+}$	0,4346 4700 2,1 (—7)	0,4345 0,60 1,7 (—3)	0,4291 4800 2,2 (—7)	33,3 5,2 (—4)	34,5 0,18
53	$^{127}\text{I}^{52+}$	0,4177 5100 2,0 (—7)	0,4176 0,70 1,4 (—3)	0,4123 4800 2,1 (—7)	31,2 6,5 (—4)	31,2 0,22
54	$^{122}\text{Xe}^{53+}$	0,4018 5500 1,8 (—7)	0,4017 0,813 1,2 (—3)	0,3963 5200 1,9 (—7)	29,4 7,8 (—4)	29,4 0,26
55	$^{128}\text{Cs}^{54+}$	0,3868 5800 1,7 (—7)	0,3867 1,00 1,0 (—3)	0,3813 5500 1,8 (—7)	26,3 9,0 (—4)	27,0 0,29
56	$^{130}\text{Ba}^{55+}$	0,3726 6300 1,6 (—7)	0,3724 1,20 8,3 (—4)	0,3671 6000 1,7 (—7)	25,0 1,3 (—3)	25,6 0,38
72	$^{180}\text{Hf}^{91+}$	0,2188 1,8 (+4) 5,6 (—8)	0,2187 14,4 6,9 (—5)	0,2132 1,6 (+4) 6,2 (—8)	8,33 3,2 (—2)	8,47 5,7
73	$^{181}\text{Ta}^{72+}$	0,2124 1,9 (+4) 5,3 (—8)	0,2123 16,5 6,1 (—5)	0,2068 1,7 (+4) 5,9 (—8)	7,94 3,7 (—2)	8,00 6,6
74	$^{184}\text{W}^{73+}$	0,2062 2,0 (+4) 5,0 (—8)	0,2061 18,5 5,4 (—5)	0,2007 1,7 (+4) 5,9 (—8)	7,46 4,3 (—2)	7,58 7,5
75	$^{187}\text{Re}^{74+}$	0,2003 2,1 (+4) 4,8 (—8)	0,2002 22,0 4,5 (—5)	0,1947 1,8 (+4) 5,6 (—8)	6,99 4,9 (—2)	7,09 8,3
76	$^{182}\text{Os}^{75+}$	0,195 2,2 (+4) 4,5 (—8)	0,195 25,4 3,9 (—5)	0,189 1,9 (+4) 5,3 (—8)	6,67 6,3 (—2)	6,67 10
77	$^{180}\text{Ir}^{76+}$	0,189 2,3 (+4) 4,3 (—8)	0,189 28,9 3,5 (—5)	0,184 2,0 (+4) 5,0 (—8)	6,25 7,6 (—2) 5,0 (—8)	6,25 12
78	$^{183}\text{Pt}^{77+}$	0,184 2,4 (+4) 4,2 (—8)	0,184 32,3 3,1 (—5)	0,178 2,1 (+4) 4,8 (—8)	5,88 9,0 (—2)	5,88 14
79	$^{187}\text{Au}^{78+}$	0,179 2,5 (+4) 4,0 (—8)	0,179 38,1 2,6 (—5)	0,173 2,2 (+4) 4,5 (—8)	5,56 0,10	5,88 15
80	$^{202}\text{Hg}^{79+}$	0,174 2,7 (+4) 3,7 (—8)	0,174 43,8 2,3 (—5)	0,168 2,3 (+4) 4,3 (—8)	5,3 0,12	5,3 17
81	$^{205}\text{Tl}^{80+}$	0,169 2,8 (+4) 3,6 (—8)	0,169 49,6 2,0 (—5)	0,164 2,5 (+4) 4,0 (—8)	5,0 0,15	5,0 21
82	$^{208}\text{Pb}^{81+}$	0,165 3,0 (+4) 3,3 (—8)	0,165 55,2 1,8 (—5)	0,159 2,6 (+4) 3,8 (—8)	4,5 0,18	4,8 24

Атомный номер Z	Ион	$2p^2P_{1/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2s^2S_{1/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 1s^2S_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 2p^2P_{1/2}$	$2p^2P_{3/2} \rightarrow 2s^2S_{1/2}$
83	$^{209}\text{Bi}^{82+}$	0,160 3,1 (+4) 3,2 (-8)	0,160 64,8 1,5 (-5)	0,155 2,7 (+4) 3,7 (-8)	4,3 0,21	4,3 28
90	$^{232}\text{Th}^{89+}$	0,133 4,3 (+4) 2,3 (-8)	0,133 153 6,5 (-6)	0,128 3,6 (+4) 2,8 (-8)	2,9 0,59	3,0 67
92	$^{238}\text{U}^{91+}$	0,127 4,7 (+4) 2,1 (-8)	0,127 196 5,1 (-6)	0,121 4,0 (+4) 2,5 (-8)	2,7 0,86	2,8 92
94	Pu^{93+}	0,121 5,2 (+4) 1,9 (-8)	0,121 240 4,2 (-6)	0,115 4,3 (+4) 2,3 (-8)	2,4 1,1	2,5 120

Таблица 7.5. Длина волны излучения λ , 10^{-10} м (верхнее число), вероятность оптических переходов A_{ki} , пс^{-1} (среднее число), и радиационное время жизни τ_k , нс (нижнее число), для изоэлектронной последовательности гелия $\text{He}(nl)$: $n=1,2$; $\Delta n=0,1$; $2 \leq Z < 100$ [$X(Y) \equiv X \cdot 10^Y$]

Атомный номер Z	Ион	$2^2S_1 \rightarrow 1^1S_0$	$2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_2 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_2 \rightarrow 2^3S_1$
2	He I	625,56 1,2 (-16) 9,0 (+12) 210,07	601,40 5,10 (-11) 2,0 (+7) 203,51	591,41 3,3 (-13)	10830,34 1,022 (-5) 98
3	Li II	2,0 (-14) 4,9 (+10) 104,55	1,9 (-9) 5,1 (+5) 101,92	202,32 3,5 (-11)	5484,50 2,28 (-5) 44
4	Be III	5,6 (-13) 1,8 (+9) 62,45	1,8 (-8) 5,5 (+4) 61,13	101,69 6,2 (-10)	3720,85 3,42 (-5) 29
5	B IV	6,7 (-12) 1,5 (+8) 41,47	9,3 (-8) 1,1 (+4) 40,73	61,10 5,0 (-9)	2821,66 4,54 (-5) 22
6	C V	4,9 (-11) 2,1 (+7)	3,3 (-7) 3,0 (+3)	40,73 2,6 (-8)	2270,91 5,67 (-5) 18

Атомный номер Z	Ион	$2^3P_1 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_1 \rightarrow 2^3S_1$	$2^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$	$2^1P_1 \rightarrow 1^1S_0$
2	He I	591,412 1,76 (-10)	10830,25 1,022 (-5)	10829,09 1,022 (-5)	584,334 1,80 (-3) 0,556
3	Li II	202,322 1,80 (-8)	5485,09 2,28 (-5)	5483,50 2,28 (-5)	199,278 2,56 (-2) 3,91 (-2)
4	Be III	101,691 4,01 (-7)	3722,91 3,42 (-5)	3721,31 3,42 (-5)	100,255 0,122 8,20 (-3)
5	B IV	61,105 4,23 (-6)	2825,87 4,53 (-5)	2824,56 4,53 (-5)	60,315 0,372 2,69 (-3)
6	C V	40,731 2,83 (-5)	2277,92 5,63 (-5)	2277,25 5,63 (-5)	40,268 0,887 1,13 (-3)

Атом- ный но- мер Z	Ион	$2^2S_{1/2} \rightarrow 1^1S_0$	$2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$	$2^2P_{3/2} \rightarrow 1^1S_0$	$2^2P_{3/2} \rightarrow 2^2S_{1/2}$
7	N VI	29,53 2,5 (-10) 3,9 (+6) 22,10	29,08 9,4 (-7) 1,1 (+3) 21,79	29,08 1,0 (-7) 15	1896,8 6,8 (-5)
8	O VII	1,0 (-9) 9,6 (+5) 17,15	2,3 (-6) 430 16,94	21,80 3,3 (-7) 12,5	1623,5 8,0 (-5)
9	F VIII	3,6 (-9) 2,8 (+5) 13,69	5,1 (-6) 200 13,55	16,95 9,2 (-7) 11	1414,4 9,3 (-5)
10	Ne IX	1,1 (-8) 9,2 (+4)	1,0 (-5) 100	13,55 2,3 (-6) 9,2	1248,1 1,1 (-4)
11	Na X	11,19 2,9 (-8) 3,4 (+4)	11,08 1,8 (-5) 54	11,08 5,1 (-6) 7,5	1112 1,3 (-4)
12	Mg XI	9,314 7,3 (-8) 1,4 (+4)	9,226 3,2 (-5) 31	9,228 1,1 (-5) 6,2	997,4 1,5 (-4)
13	Al XII	7,872 1,7 (-7) 6,0 (+3)	7,803 5,3 (-5) 19	7,804 2,1 (-5) 5,2	900 1,7 (-4)
14	Si XIII	6,740 3,6 (-7) 2,8 (+3)	6,685 8,5 (-5) 12	6,685 3,9 (-5) 4,2	815 2,0 (-4)
15	P XIV	5,836 7,3 (-7) 1,4 (+3)	5,791 1,3 (-4) 7,6	5,790 6,9 (-5) 3,3	740 2,3 (-4)
16	S XV	5,102 1,4 (-6) 700	5,064 2,0 (-4) 5,1	5,063 1,2 (-4) 2,6	670 2,6 (-4)
17	Cl XVI	4,497 2,7 (-6) 360	4,466 2,8 (-4) 3,5	4,465 2,0 (-4) 2,0	610 3,0 (-4)
18	Ar XVII	3,994 4,8 (-6) 205	3,968 4,0 (-4) 2,5	3,966 3,15 (-4) 1,5	560 3,5 (-4)
19	K XVIII	3,571 8,3 (-6) 120	3,548 6 (-4) 2	3,546 4,9 (-4) 1,1	510 4,1 (-4)
20	Ca XIX	3,211 1,4 (-5) 70	3,192 8 (-4) 1	3,189 7,6 (-4) 0,80	470 4,9 (-4)
21	Sc XX	2,903 2,3 (-5) 43	2,886 1 (-3) 0,9	2,884 1,1 (-3) 0,60	430 5,8 (-4)
22	Ti XXI	2,636 3,8 (-5) 26	2,622 1,5 (-3) 0,7	2,619 1,7 (-3) 0,42	390 6,9 (-4)
23	V XXII	2,406 5,9 (-5) 17	2,393 2 (-3) 0,5	2,389 2,4 (-3) 0,30	360 8,3 (-4)
24	Cr XXIII	2,204 9,2 (-5) 11	2,193 2,5 (-3) 0,4	2,189 3,4 (-3) 0,23	325 9,9 (-4)
25	Mn XXIV	2,026 1,4 (-4) 7,2	2,016 3 (-3) 0,3	2,012 4,8 (-3) 0,17	290 1,2 (-3)
26	Fe XXV	1,868 2,1 (-4) 4,8	1,859 4 (-3) 0,2	1,855 6,6 (-3) 0,13	270 1,4 (-3)
27	Co XXVI	1,728 3,1 (-4) 3,3	1,721 5 (-3) 0,2	1,716 8,9 (-3) 9,4 (-2)	250 1,75 (-3)
28	Ni XXVII	1,604 4,4 (-4) 2,3	1,596 7 (-3) 0,15	1,592 1,2 (-2) 7,1 (-2)	230 2,1 (-3)
29	Cu XXVIII	1,492 6,4 (-4) 1,6	1,485 8 (-3) 0,1	1,481 1,6 (-2) 5,4 (-2)	210 2,6 (-3)
30	Zn XXIX	1,391 9,0 (-4) 1,1	1,385 1 (-2) 0,1	1,381 2,1 (-2) 4,1 (-2)	190 3,2 (-3)

Атом- ный но- мер Z	Ион	$2^3P_1 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_1 \rightarrow 2^3S_1$	$2^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$	$2^1P_1 \rightarrow 1^1S_0$
7	N VI	29,084 1,40 (—4)	1907,3 6,7 (—5) 4,8	1907,8 6,7 (—5) 15	28,787 1,81 5,52 (—4)
8	O VII	21,807 5,52 (—4)	1638,3 7,9 (—5) 1,6	1639,9 7,8 (—5) 13	21,602 3,31 3,02 (—4)
9	F VIII	16,949 1,84 (—3)	1433,8 9,0 (—5) 0,52	1437,1 9,0 (—5) 10	16,807 5,59 1,79 (—4)
10	Ne IX	13,549 5,4 (—3)	1272,8 1,0 (—4) 0,18	1277,7 1,0 (—4) 9,9	13,447 8,88 1,12 (—4)
11	Na X	11,083 1,4 (—2)	1142 1,2 (—4) 7,0 (—2)	1149 1,2 (—4) 8,3	11,003 13,4 7,5 (—5)
12	Mg XI	9,231 3,4 (—2)	1034 1,4 (—4) 2,9 (—2)	1041 1,3 (—4) 7,7	9,169 19,5 5,1 (—5)
13	Al XII	7,807 7,5 (—2)	943 1,5 (—4) 1,3 (—2)	955 1,4 (—4) 4,8	7,757 27,5 3,6 (—5)
14	Si XIII	6,688 0,16	865 1,7 (—4) 6,3 (—3)	879 1,5 (—4) 6,7	6,648 37,7 2,6 (—5)
15	P XIV	5,793 0,31	800 1,8 (—4) 3,2 (—3)	810 1,7 (—4) 4,8	5,760 50,4 2,0 (—5)
16	S XV	5,066 0,58	740 2,0 (—4) 1,7 (—3)	760 1,8 (—4) 5,6	5,039 66,1 1,5 (—5)
17	Cl XVI	4,468 1,04	680 2,2 (—4) 9,6 (—4)	700 2,0 (—4) 4,3	4,444 85,0 1,2 (—5)
18	Ar XVII	3,969 1,80	640 2,3 (—4) 5,6 (—4)	660 2,1 (—4) 4,8	3,948 107 9,3 (—6)
19	K XVIII	3,549 2,99	595 2,6 (—4) 3,3 (—4)	620 2,3 (—4) 4,0	3,531 134 7,5 (—6)
20	Ca XIX	3,192 4,82	560 2,8 (—4) 2,1 (—4)	580 2,4 (—4) 4,2	3,176 165 6,0 (—6)
21	Sc XX	2,887 7,2	530 3,1 (—4) 1,4 (—4)	560 2,6 (—4) 0,23	2,872 200 5,0 (—6)
22	Ti XXI	2,623 11	500 3,3 (—4) 9,1 (—5)	530 2,8 (—4) 3,6	2,609 240 4,1 (—6)
23	V XXII	2,393 16	480 3,6 (—4) 6,3 (—5)	500 3,0 (—4) 0,09	2,381 290 3,4 (—6)
24	Cr XXIII	2,192 23	440 3,8 (—4) 4,3 (—5)	450 3,2 (—4) 3,1	2,182 340 2,9 (—6)
25	Mn XXIV	2,016 32	420 4,1 (—4) 3,1 (—5)	450 3,4 (—4) 0,09	2,006 400 2,5 (—6)
26	Fe XXV	1,859 43	400 4,3 (—4) 2,3 (—5)	430 3,6 (—4) 2,8	1,850 460 2,2 (—6)
27	Co XXVI	1,721 58	380 4,6 (—4) 1,7 (—5)	420 3,8 (—4) 0,03	1,712 530 1,9 (—6)
28	Ni XXVII	1,596 76	360 4,8 (—4) 1,3 (—5)	380 4,1 (—4) 2,4	1,588 610 1,6 (—6)
29	Cu XXVIII	1,485 98	340 5,1 (—4) 1,0 (—5)	370 4,3 (—4) 0,05	1,478 700 1,4 (—6)
30	Zn XXIX	1,385 123	330 5,3 (—4) 8,1 (—6)	360 4,6 (—4) 2,2	1,378 790 1,3 (—6)

Атом- ный но- мер Z	Ион	$2^3S_1 \rightarrow 1^1S_0$	$2^1S_0 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_2 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_2 \rightarrow 2^3S_1$
31	Ga XXX	1,30 1,3 (-3) 0,79	1,30 1 (-2) 0,08	1,30 2,8 (-2) 3,1 (-2)	200 3,9 (-3)
32	Ge ³⁰⁺	1,22 1,7 (-3) 0,57	1,21 1,5 (-2) 0,07	1,21 3,6 (-2) 2,5 (-2)	200 4,8 (-3)
33	As ³¹⁺	1,14 2,4 (-3) 0,42	1,14 2 (-2) 0,05	1,13 4,6 (-2) 1,9 (-2)	100 5,8 (-3)
34	Se ³²⁺	1,08 3,2 (-3) 0,31	1,07 2 (-2) 0,05	1,07 5,9 (-2) 1,5 (-2)	100 7,1 (-3)
35	Br ³³⁺	1,01 4,4 (-3) 0,23	1,01 2,5 (-2) 0,04	1,00 7,5 (-2) 1,2 (-2)	100 8,7 (-3)
36	Kr ³⁴⁺	0,96 5,8 (-3) 0,17	0,95 3 (-2) 0,03	0,95 9,4 (-2) 1,1 (-2)	110 1,1 (-2)
37	Rb ³⁵⁺	0,90 7,7 (-3) 0,13	0,90 4 (-2) 0,03	0,90 0,12 7,5 (-3)	100 1,3 (-2)
38	Sr ³⁶⁺	0,85 1,0 (-2) 0,10	0,85 4,5 (-2) 0,02	0,85 0,15 6,0 (-3)	90 1,6 (-2)
39	Y ³⁷⁺	0,81 1,3 (-2) 0,08	0,81 5 (-2) 0,02	0,80 0,18 5,0 (-3)	80 1,9 (-2)
40	Zr ³⁸⁺	0,76 1,7 (-2) 0,06	0,76 6 (-2) 0,02	0,76 0,22 4,0 (-3)	80 2,4 (-2)
41	Nb ³⁹⁺	0,73 2,2 (-2) 0,04	0,73 7 (-2) 0,01	0,72 0,27 3,3 (-3)	70 2,9 (-2)
42	Mo ⁴⁰⁺	0,69 2,9 (-2) 0,03	0,69 8 (-2) 0,01	0,69 0,33 2,7 (-3)	70 3,5 (-2)
50	Sn ⁴⁸⁺	0,48 0,17 6 (-3)	0,48 0,2 4 (-3)	0,48 1,4 6,4 (-4)	40 0,16
60	Nd ⁵⁸⁺	0,33 1 9 (-4)	0,33 0,7 1,5 (-3)	0,32 6,0 1,5 (-4)	20 1,0
70	Yb ⁶⁸⁺	0,24 6 2 (-4)	0,24 2 5 (-4)	0,23 20 4 (-5)	10 5
80	Hg ⁷⁸⁺	0,18 25 4 (-5)	0,18 4 2,5 (-4)	0,17 65 1 (-5)	5 20
90	Th ⁸⁸⁺	0,14 90 1 (-5)	0,13 8 1 (-4)	0,13 150 5 (-6)	3 60
100	Fm ⁹⁸⁺	0,11 300 3 (-6)	0,11 15 6 (-5)	0,10 400 2 (-6)	2 240

С учетом оцененной погрешности вычислений собранные в таблицах значения величин были округлены таким образом, что возможные уточнения могут затронуть лишь последнюю значащую цифру в пределах ± 1 — ± 2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marrus R., Mohr P. J. Forbidden transitions in one- and two-electron atoms. — In: Advances in Atomic and Molecular Physics. Vol. 14/Ed. by D. R. Bates, B. Bederson. — N. Y.: Academic Press, 1978, p. 181.
2. Sellin I. A. Highly ionized ions. — In: Advances in Atomic and Molecular Physics. Vol. 12/Ed. by D. R. Bates, B. Bederson. — N. Y.: Academic Press, 1976, p. 215.
3. Parpia F. A., Johnson W. R. — Phys. Rev., 1982, vol. A26, p. 1142.
4. Goldman S. P., Drake G. W. F. — Phys. Rev., 1981, vol. A24, p. 183.
5. Викторов Д. С., Запругаев С. А., Пальчиков В. Г. Вероятности радиацион-

Атом- ный по- мер Z	Ион	$2^3P_1 \rightarrow 1^1S_0$	$2^3P_1 \rightarrow 2^3S_1$	$2^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$	$2^1P_1 \rightarrow 1^1S_0$
31	Ga XXX	1,30 155	300 5,6 (—4)	300 4,9 (—4)	1,29 900
32	Ge ³⁰⁺	6,5 (—6) 1,21 190	300 5,8 (—4)	300 5,2 (—4)	1,1 (—6) 1,21 990
33	As ³¹⁺	5,3 (—6) 1,14 230	300 6,1 (—4)	1,9 300 5,5 (—4)	1,0 (—6) 1,13 1,1 (+3)
34	Se ³²⁺	4,3 (—6) 1,07 280	300 6,3 (—4)	300 5,8 (—4) 1,7	9 (—7) 1,06 1,3 (+3)
35	Br ³³⁺	3,6 (—6) 1,01 330	300 6,6 (—4)	300 6,1 (—4)	8 (—7) 1,00 1,4 (+3)
36	Kr ³⁴⁺	3,0 (—6) 0,95 390	200 6,9 (—4)	280 6,5 (—4)	7 (—7) 0,95 1,5 (+3)
37	Rb ³⁵⁺	2,6 (—6) 0,90 460	200 7,1 (—4)	1,5 200 6,8 (—4)	7 (—7) 0,89 1,6 (+3)
38	Sr ³⁶⁺	2,2 (—6) 0,85 530	200 7,4 (—4)	— 200 7,2 (—4)	6 (—7) 0,85 1,8 (+3)
39	Y ³⁷⁺	1,9 (—6) 0,81 610	200 7,7 (—4)	1,4 200 7,6 (—4)	6 (—7) 0,80 2,0 (+3)
40	Zr ³⁸⁺	1,6 (—6) 0,77 700	200 7,9 (—4)	— 200 8,0 (—4)	5 (—7) 0,76 2,2 (+3)
41	Nb ³⁹⁺	1,4 (—6) 0,73 800	200 8,2 (—4)	1,3 200 8,5 (—4)	5 (—7) 0,72 2,4 (+3)
42	Mo ⁴⁰⁺	1,2 (—6) 0,69 910	200 8,5 (—4)	— 200 9,0 (—4)	4 (—7) 0,69 2,6 (+3)
50	Sn ⁴⁸⁺	1,1 (—6) 0,48 2,1 (+3)	100 1,1 (—3)	1,1 200 1,4 (—3)	4 (—7) 0,48 5,1 (+3)
60	Nd ⁵⁸⁺	5 (—7) 0,33 4,9 (+3)	100 1,6 (—3)	0,7 100 6,4 (—3)	2 (—7) 0,32 1,0 (+4)
70	Yb ⁶⁸⁺	2 (—7) 0,24 9,5 (+3)	100 2,2 (—3)	0,2 80 1,4 (—2)	1 (—7) 0,23 1,8 (+4)
80	Hg ⁷⁸⁺	1 (—7) 0,18 1,7 (+4)	100 3 (—3)	0,07 50 2,5 (—2)	6 (—8) 0,17 3,0 (+4)
90	Th ⁸⁸⁺	6 (—8) 0,14 2,7 (+4)	100 5 (—3)	0,04 50 0,06	3 (—8) 0,13 5 (+4)
100	Fm ⁹⁸⁺	4 (—8) 0,11 4,3 (+4)	50 7 (—3)	0,02 30 0,09	2 (—8) 0,10 7 (+4)
		2 (—8)		0,01	1 (—8)

ных переходов в одноэлектронном атоме с произвольным зарядом ядра: Препринт ИСАН № 13. — Троицк (Моск. обл.), 1977.

- Lin C. D., Johnson W. R., Dalgarno A. — Phys. Rev., 1977, vol. A15, p. 154.
- Schiff B., Pekeris C. L., Accad Y. — Phys. Rev., 1971, vol. A4, p. 885.
- Drake G. W. F. — Phys. Rev., 1971, vol. A3, p. 908; Phys. Rev., 1979, vol. A19, p. 1387.
- Hata J., Grant I. P. — J. Phys., 1981, vol. B14, p. 2111; J. Phys., 1984, vol. B17, p. 931.
- Vainstein L. A., Safronova U. I. — At. Data Nucl. Data Tabl., 1978, vol. 21, p. 49.
- Sucher J. — Rept. Prog. Phys., 1978, vol. 41, p. 1781.
- Gould H., Marrus R., Mohr P. J. — Phys. Rev. Lett., 1974, vol. 33, p. 676.
- Mohr P. J. Hyperfine quenching of the 2^3P_0 state in heliumlike ions. — In: Beam-Foil Spectroscopy. Vol. 1/Ed. by I. A. Sellin, D. J. Pegg. — N. Y.: Plenum, 1976, p. 97—103.

ПОТЕНЦИАЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

8.1. ПОСТОЯННЫЕ МУЛЬТИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

При большом расстоянии R между центрами атомных частиц по сравнению с их размерами потенциал электростатического взаимодействия частиц определяется взаимодействием их мультипольных моментов и меняется с расстоянием по степенному закону.

В случае взаимодействия иона с атомом потенциал электростатического дальнегодействующего взаимодействия представляется в виде разложения

$$U(R) = -C_4/R^4 - C_6/R^6 - \dots,$$

где $C_4 = \alpha Ze^2/2$, α — поляризуемость атома (см. § 4.7); коэффициент C_6 описывает взаимодействие заряда иона Ze с квадрупольным моментом атома и взаимодействие дипольных моментов частиц во втором порядке теории возмущений и т. д. Приведенный выше потенциал соответствует усредненному по всем возможным ориентациям электронных моментов частиц потенциалу.

Потенциал электростатического дальнегодействующего взаимодействия двух нейтральных атомов, опять же усредненный по всем возможным ориентациям их электронных моментов, записывается в виде ряда

$$U(R) = -C_6/R^6 - C_8/R^8 - C_{10}/R^{10} - \dots$$

Здесь ван-дер-ваальсовские коэффициенты C_{2l+2} ($l=2, 3, 4, \dots$) описывают соответственно взаимодействие индуцированных дипольных моментов атомов ($C_6 > 0$), дипольных и квадрупольных моментов ($C_8 > 0$), двух квадрупольных моментов и дипольных моментов с октупольными моментами ($C_{10} > 0$) и т. д.

В табл. 8.1—8.8 приведены коэффициенты C_6 , C_8 , C_{10} , характеризующие дальнегодействующий потенциал взаимодействия атомных частиц (коэффициент C_6 также для некоторых молекулярных частиц). Эти значения распределены по классам точности и получены в результате численных расчетов в [1—9]. Значения коэффициентов C_{2l+2} даны в атомных единицах; для перехода к единицам измерения энергии взаимодействия в эВ и расстояния R между центрами частиц в единицах 10^{-10} м можно воспользоваться соотношением

$$U = -0,5975 [C_6/R^6 + 0,280 C_8/R^8 + 0,0784 C_{10}/R^{10}].$$

Таблица 8.1. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы (атом водорода, атом щелочного металла — атом водорода, атом щелочного металла), а. е.

Атом	H	Li	Na	K	Rb	Cs
H	6,5 (A)	66,5 (A)	72 (B)	105 (B)	119 (C)	146 (C)
Li	—	1390 (A)	1460 (A)	2300 (A)	2550 (B)	3150 (A)
Na	—	—	1540 (B)	2420 (A)	2680 (A)	3310 (B)
K	—	—	—	3880 (A)	4270 (B)	5300 (A)
Rb	—	—	—	—	4700 (B)	5880 (A)
Cs	—	—	—	—	—	7020 (A)

Таблица 8.2. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы (атом инертного газа — атом водорода, атом щелочного металла, атом инертного газа), а. е.

Атом	He ($1S$)	Ne	Ar	Kr	Xe
H	2,83 (A)	5,7 (B)	20 (B)	29 (B)	41 (B)
Li	22,3 (B)	43 (B)	178 (B)	260 (B)	407 (B)
Na	24,7 (B)	48 (B)	190 (B)	280 (B)	445 (B)
K	36 (C)	70 (C)	280 (C)	420 (C)	650 (B)
Rb	41 (D)	82 (D)	330 (C)	470 (C)	740 (C)
Cs	50 (D)	99 (D)	380 (D)	570 (C)	890 (C)
He ($1S$)	1,46 (A)	3,06 (B)	9,7 (B)	13,3 (B)	18,6 (B)
Ne	—	6,6 (C)	20,4 (B)	28 (B)	38 (B)
Ar	—	—	58 (B)	95 (B)	140 (B)
Kr	—	—	—	130 (B)	187 (C)
Xe	—	—	—	—	296 (B)

Таблица 8.3. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы (атом инертного газа — неклассифицированный выше атом), а. е.

Атом	He	Ne	Ar	Kr	Xe	He* (2^3S)	He* (2^1S)
He* (2^3S)	29,0 (B)	58 (C)	240 (C)	360 (C)	590 (C)	3300 (B)	5800 (B)
He* (2^1S)	41,5 (C)	82 (C)	340 (C)	510 (C)	840 (C)	—	11 000 (B)
Be	14,7 (A)	29,4 (B)	111 (B)	165 (B)	259 (B)	—	—
C	7,9 (D)	16 (D)	54 (D)	75 (D)	110 (D)	—	—
N	6,7 (C)	14 (C)	44 (C)	59 (C)	84 (C)	—	—
O	4,9 (B)	12 (C)	35 (C)	47 (C)	65 (C)	—	—
F	4,7 (C)	10 (C)	28 (C)	38 (C)	52 (C)	—	—
Mg	22 (B)	43 (B)	170 (B)	250 (B)	385 (C)	—	—
P	16 (D)	32 (D)	110 (D)	160 (D)	230 (C)	—	—
S	16 (D)	33 (D)	110 (C)	160 (C)	230 (C)	—	—
Cl	14 (D)	28 (C)	90 (C)	120 (C)	180 (C)	—	—
Ca	32 (B)	63 (C)	250 (C)	370 (C)	590 (C)	—	—
Br	18 (D)	37 (D)	120 (D)	170 (D)	240 (D)	—	—
Sr	36,7 (B)	72 (C)	290 (C)	430 (C)	680 (C)	—	—
I	24 (D)	49 (D)	170 (D)	240 (D)	350 (D)	—	—
Ba	39,5 (B)	77 (C)	310 (C)	460 (C)	740 (C)	—	—
Hg	14 (B)	29 (B)	100 (C)	150 (C)	220 (C)	—	—

Таблица 8.4. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы (щелочноземельный атом, ртуть — атом), а. е.

Атом	H	Li	Na	K	Be	Mg	Ca	Hg
Be	34 (C)	470 (C)	500 (C)	750 (C)	220 (B)	—	—	—
Mg	58 (C)	850 (C)	920 (C)	1400 (C)	370 (C)	650 (B)	—	—
Ca	93 (C)	1600 (C)	1700 (C)	2600 (C)	620 (C)	1100 (C)	2000 (B)	—
Hg	—	—	—	—	—	—	—	220 (B)

Таблица 8.5. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для системы частиц (атом — двухатомная молекула, многоатомная молекула), а. е.

Атом	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	N ₂ O	SF ₆
H	8,7 (C)	21 (C)	—	33,0 (B)	—	65 (C)
Li	83 (C)	180 (C)	—	278 (C)	—	520 (D)
Na	91 (C)	200 (C)	—	340 (C)	—	640 (D)
K	130 (C)	280 (C)	—	503 (C)	—	950 (D)
Rb	140 (C)	310 (C)	—	574 (C)	—	1100 (D)
Cs	170 (C)	370 (C)	—	490 (C)	—	900 (D)
He (1 ¹ S)	4,0 (B)	10 (C)	10,8 (B)	16,7 (B)	17 (C)	35 (C)
Ne	8,1 (B)	21 (C)	23 (C)	36 (C)	35 (D)	77 (D)
Ar	28 (B)	69 (C)	73 (C)	114 (C)	115 (D)	240 (D)
Kr	40 (B)	96 (C)	101 (B)	162 (C)	160 (C)	340 (D)
Xe	58 (C)	140 (C)	150 (C)	282 (C)	240 (D)	590 (D)

Таблица 8.6. Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для системы частиц (двухатомная молекула — двухатомная молекула, многоатомная молекула), а. е.

Молекула	H ₂	N ₂	O ₂	CO	NO	SF ₆
H ₂	12,1 (B)	31 (B)	30 (C)	34 (C)	32 (C)	94 (C)
N ₂	—	73 (B)	73 (C)	80 (C)	76 (C)	250 (D)
O ₂	—	—	73 (B)	79 (C)	75 (C)	230 (D)
CO	—	—	—	87 (D)	82 (D)	270 (D)
NO	—	—	—	—	77 (D)	250 (D)
CO ₂	46,4 (B)	118 (C)	91 (C)	—	—	400 (D)
N ₂ O	48 (C)	—	120 (D)	—	—	390 (D)

Таблица 8.7. Коэффициент C_8 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия атомов, а. е.

Атом	H	Li	Na	K	Rb	Cs
H	124,4 (A)	3260 (B)	4100 (C)	$8,3 \cdot 10^3$ (D)	$1 \cdot 10^4$ (D)	$1,5 \cdot 10^4$ (D)
Li	—	$8,4 \cdot 10^4$ (C)	$9,9 \cdot 10^4$ (C)	$2 \cdot 10^5$ (C)	$2,4 \cdot 10^5$ (C)	$3,3 \cdot 10^5$ (D)
Na	—	—	$1,2 \cdot 10^5$ (C)	$2,3 \cdot 10^5$ (C)	$2,7 \cdot 10^5$ (C)	$3,8 \cdot 10^5$ (D)
K	—	—	—	$4,2 \cdot 10^5$ (C)	$4,9 \cdot 10^5$ (D)	$6,7 \cdot 10^5$ (D)
Rb	—	—	—	—	$5,7 \cdot 10^5$ (D)	$7,8 \cdot 10^5$ (D)
Cs	—	—	—	—	—	$1,1 \cdot 10^6$ (D)
He	—	—	—	—	—	—
Ne	—	—	—	—	—	—
Ar	—	—	—	—	—	—
Kr	—	—	—	—	—	—
Xe	—	—	—	—	—	—

Атом	He	Ne	Ar	Kr	Xe
H	41,75 (A)	97 (C)	422 (C)	590 (C)	945 (B)
Li	1090 (B)	2270 (C)	9430 (C)	$1,3 \cdot 10^4$ (C)	$2,2 \cdot 10^4$ (C)
Na	1320 (C)	2900 (C)	$1,27 \cdot 10^4$ (C)	$1,6 \cdot 10^4$ (D)	$2,65 \cdot 10^4$ (C)
K	2800 (C)	5820 (C)	$2,4 \cdot 10^4$ (C)	$3,3 \cdot 10^4$ (D)	$5,3 \cdot 10^4$ (C)
Rb	3600 (C)	7350 (C)	$2,9 \cdot 10^4$ (C)	$3,9 \cdot 10^4$ (D)	$6,2 \cdot 10^4$ (C)
Cs	5080 (C)	9580 (C)	$4,1 \cdot 10^4$ (D)	$5,3 \cdot 10^4$ (D)	$8,5 \cdot 10^4$ (C)
He	14,2 (B)	34 (C)	146 (D)	206 (C)	340 (D)
Ne	—	82 (D)	330 (D)	440 (C)	760 (D)
Ar	—	—	1345 (D)	1900 (C)	3150 (D)
Kr	—	—	—	2700 (C)	4600 (D)
Xe	—	—	—	—	7000 (D)

Таблица 8.8. Коэффициент C_{10} в мультипольном разложении потенциала взаимодействия атомов, а. е.

Атом	H	Li	Na	K	Rb	Cs
H	$3,29 \times 10^3$ (A)	$1,92 \cdot 10^5$ (B)	$2,5 \cdot 10^5$ (C)	$6,4 \cdot 10^5$ (D)	$7,9 \cdot 10^5$ (C)	$1,2 \cdot 10^6$ (C)
Li	—	$7,2 \cdot 10^6$ (B)	$8,8 \cdot 10^6$ (D)	$2,1 \cdot 10^7$ (C)	$2,5 \cdot 10^7$ (C)	$3,8 \cdot 10^7$ (D)
Na	—	—	$1,1 \cdot 10^7$ (C)	$2,5 \cdot 10^7$ (C)	$3 \cdot 10^7$ (D)	$4,4 \cdot 10^7$ (D)
K	—	—	—	$5,5 \cdot 10^7$ (C)	$6,6 \cdot 10^7$ (D)	$9,7 \cdot 10^7$ (D)
Rb	—	—	—	—	$8 \cdot 10^7$ (D)	$1,2 \cdot 10^8$ (D)
Cs	—	—	—	—	—	$1,7 \cdot 10^8$ (D)
He	—	—	—	—	—	—
Ne	—	—	—	—	—	—
Ar	—	—	—	—	—	—
Kr	—	—	—	—	—	—
Xe	—	—	—	—	—	—

Атом	He	Ne	Ar	Kr	Xe
H	865 (B)	1940 (C)	$1,0 \cdot 10^4$ (C)	$1,6 \cdot 10^4$ (C)	$2,7 \cdot 10^4$ (C)
Li	$6,7 \cdot 10^4$ (C)	$1,5 \cdot 10^5$ (C)	$6,4 \cdot 10^5$ (C)	$9,8 \cdot 10^5$ (C)	$1,6 \cdot 10^6$ (D)
Na	$8,7 \cdot 10^4$ (C)	$1,9 \cdot 10^5$ (C)	$8,2 \cdot 10^5$ (C)	$1,2 \cdot 10^6$ (C)	$2,1 \cdot 10^6$ (D)
K	$2,2 \cdot 10^5$ (D)	$4,5 \cdot 10^5$ (D)	$2,0 \cdot 10^6$ (D)	$3,0 \cdot 10^6$ (D)	$4,9 \cdot 10^6$ (D)
Rb	$2,7 \cdot 10^5$ (D)	$5,6 \cdot 10^5$ (D)	$2,4 \cdot 10^6$ (D)	$3,6 \cdot 10^6$ (D)	$5,9 \cdot 10^6$ (D)
Cs	$3,9 \cdot 10^5$ (D)	$8,1 \cdot 10^5$ (D)	$3,5 \cdot 10^6$ (D)	$5,3 \cdot 10^6$ (D)	$8,6 \cdot 10^6$ (D)
He	180 (C)	405 (C)	2660 (D)	$4,1 \cdot 10^3$ (D)	$8,2 \cdot 10^3$ (D)
Ne	—	880 (D)	$5,9 \cdot 10^3$ (D)	$9 \cdot 10^3$ (D)	$1,9 \cdot 10^4$ (D)
Ar	—	—	$3 \cdot 10^4$ (D)	$4,8 \cdot 10^4$ (D)	$9 \cdot 10^4$ (D)
Kr	—	—	—	$7,0 \cdot 10^4$ (D)	$1,3 \cdot 10^5$ (D)
Xe	—	—	—	—	$2,2 \cdot 10^5$ (D)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalgarno A. New methods for calculating long-range intermolecular forces. — In: Advances in Chemical Physics, Vol. 12/Ed. by J. O. Hirschfelder. — N. Y.: Intersci. Publ., 1967, Ch. 3.
2. Buckingham A. D. Basic theory of intermolecular forces: applications to small molecules. — In: Intermolecular Interactions: From Diatomics to Biopolymers/Ed. by B. Pullman. — N. Y.: Wiley, 1978, Ch. 1, p. 1—67.
3. Tang K. T., Norbeck J. M., Certain P. R. — J. Chem. Phys., 1976, vol. 64, p. 3063.
4. Maeder F., Kutzelnigg W. — Chem. Phys., 1979, vol. 43, p. 95.
5. Ahlberg R., Goscinski O. — J. Phys., 1974, vol. B7, p. 1194.
6. Huxley P., Knowles D. B., Murrell J. N., Watts J. D. — J. Chem. Soc., Faraday Trans. II, 1984, vol. 80, p. 1349.
7. Starkschall G., Gordon R. G. — J. Chem. Phys., 1971, vol. 54, p. 663; *ibid* 1972, vol. 56, p. 2801.
8. Human H. A. — J. Chem. Phys., 1974, vol. 61, p. 4063.
9. Pack R. T. — J. Chem. Phys., 1974, vol. 61, p. 2091; J. Phys. Chem., — 1982, vol. 86, p. 2794.

8.2. ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

В табл. 8.9 приведены параметры обменного взаимодействия двух одинаковых атомов на далеком расстоянии R . Потенциал взаимодействия двух атомов с замкнутыми электронными оболочками при большом расстоянии между ядрами имеет вид

$$U(R) = U_{\text{дал}}(R) + \Delta(R),$$

где $U_{\text{дал}}(R) = -C_6/R^6 - C_8/R^8 \dots$ — потенциал дальнего действующего взаимодействия атомов; $\Delta(R)$ — потенциал обменного взаимодействия атомов, обусловленный перекрытием их электронных оболочек. В пределе большого расстояния между ядрами потенциал обменного взаимодействия равен

$$\Delta(R) = BR^\alpha \exp(-\beta R),$$

где B , α , β — параметры, представленные в табл. 8.9. Потенциал взаимодействия двух атомов со спином $1/2$ следующим образом включает в себя потенциал обменного взаимодействия:

$$U(R) = U_{\text{дал}}(R) \pm (1/2) \Delta(R),$$

Таблица 8.9. Параметры потенциала дальнего действующего обменного взаимодействия двух одинаковых атомов, а. е.

Параметр	H	He	Li	Be	Ne	Na	Mg	Ar	K
α	2,5	1,60	4,56	3,22	1,78	4,59	3,63	2,24	5,17
β	2	2,79	1,26	1,658	2,52	1,252	1,512	2,16	1,134
B	1,65	7,0	0,044	0,64	5,1	0,024	0,27	7,6	0,0056

Продолжение табл. 8.9

Параметр	Ca	Zn	Kr	Rb	Sr	Cd	Xe	Cs	Ba
α	4,16	3,22	2,30	5,29	4,37	3,30	2,71	5,53	4,64
β	1,356	1,66	2,06	1,112	1,304	1,626	1,888	1,072	1,24
B	0,067	0,66	6,1	0,0039	0,044	0,60	3,8	0,0016	0,021

где знак минус соответствует нулевому полному спину системы, знак плюс — единичному спину. В табл. 8.9 включены расчетные значения параметров потенциала обменного взаимодействия двух одинаковых атомов (см. [1]). Оцениваемая погрешность расчетов потенциала $\Delta(R)$ находится в пределах 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Б. М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений.— М.: Атомиздат, 1973, гл. 2.

8.3. КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ

Короткодействующее отталкивательное взаимодействие атомных частиц отвечает расстоянию R между их ядрами, при котором перекрываются их электронные оболочки. Возникающие при этом силы взаимодействия имеют электростатическую и обменную природу, причем потенциал взаимодействия резко изменяется по мере уменьшения расстояния между ними [1]. Это позволяет использовать простые аппроксимационные формулы для потенциала отталкивательного взаимодействия частиц, в частности зависимость экспоненциального вида

$$U(R) = A \exp(-\beta R),$$

так что в рассматриваемой области расстояний ΔR параметры A и β меняются незначительно. (Точнее, это представление отвечает предположению о постоянстве логарифмической производной потенциала $\beta = -d \ln U / dR$ в заданном интервале расстояний.)

В табл. 8.10—8.12 приведены числовые значения параметров A и β для некоторых атомных и молекулярных частиц, а также отмечен диапазон энергий взаимодействия ΔU , в котором справедлива используемая аппроксимация потенциала. Представленные данные основаны на измерении сечений упругого рассеяния при столкновении ионов или атомов с атомами и молекулами, а также на измерении подвижности ионов в газах [2—6]. Потенциал взаимодействия частиц, вычисленный с помощью приведенных параметров, в отмеченной области расстояний между частицами характеризуется погрешностью порядка 20—40 %.

Таблица 8.10. Параметры A , кэВ (верхняя цифра), и β , 10^{-10} м (нижняя цифра), короткодействующего отталкивательного потенциала взаимодействия $U(r) = A \exp(-\beta r)$ для системы частиц

Атом, ион	He (1 ¹ S)	Ne	Ar	Kr	Xe
-----------	-----------------------	----	----	----	----

1. Атом инертного газа; $\Delta U = 0,3$ —2 эВ

He (2 ³ S)	0,054 2,69	0,030 2,50	—	—	—
He (1 ¹ S)	0,2 4,20	0,32 3,80	0,34 3,25	0,38 2,98	0,19 2,65
Ne	—	1,0 3,94	0,39 2,98	1,2 3,21	0,69 2,96
Ar	—	—	0,61 2,83	0,79 2,52	0,21 2,05
Kr	—	—	—	0,31 2,28	0,87 2,61
Xe	—	—	—	—	1,6 2,52

2. H, O, F; 0,1—10 эВ

H	0,087 3,59	0,24 4,22	0,98 4,53	0,87 4,31	3,3 4,63
---	---------------	--------------	--------------	--------------	-------------

Атом, ион	He (1'S)	Ne	Ar	Kr	Xe
O	0,68 4,51	1,1 4,08	1,5 3,72	3,9 4,22	0,53 3,44
F	0,63 4,91	2,7 5,18	9,8 4,82	12 5,23	27 5,38

3. Атом щелочного металла и ртуть; 0,01—0,5 эВ

Na	—	—	0,020 1,69	—	0,039 1,75
K	—	0,0069 1,46	0,034 1,79	0,019 1,65	0,032 1,68
Cs	0,0088 1,42	0,034 1,88	0,224 2,26	0,087 2,02	0,0814 1,97
Hg	0,153 2,79	0,509 3,09	0,717 2,90	1,247 2,88	4,195 3,12

4. Положительный атомный ион; 0,5—10 эВ

Li+	0,33 4,89	1,6 5,3	1,8 4,24	2,2 4,08	—
Na+	1,2 4,92	5,4 5,12	11,3 4,68	9,6 4,33	—
K+	1,1 4,15	4,9 4,4	2,9 3,46	6,4 3,69	—
Rb+	1,1 3,69	3,4 3,87	4,7 3,48	4,6 3,23	7,5 3,23
Cs+	1,4 3,60	5,6 3,86	12,3 3,65	7,2 3,24	10,4 3,25
H+	—0,0064 1,39	—	—	—	—
He+	0,044 2,16	—	—	—	—
O+	—	—	0,02 1,11	—	—
Al+	0,33 3,50	1,2 3,93	3,2 3,86	—	—

Таблица 8.11. Параметры A , кэВ (верхнее число), и β , 10^{10} м (нижнее число), короткодействующего отталкивающего потенциала взаимодействия $U(r)=A \exp(-\beta r)$ для системы частиц: отрицательный атомный ион—атом инертного газа; 0,5—10 эВ

Атом	H^-	Cl^-	Br^-
He	0,018 2,04	0,26 2,88	0,37 2,92
Ne	0,035 2,20	0,82 3,05	0,99 3,05
Ar	0,060 2,23	1,50 3,01	1,4 2,83

Т а б л и ц а 8.12. Параметры A , кэВ (верхнее число), и β , 10^{10} м (нижнее число), короткодействующего отталкивательного сферически-симметричного потенциала взаимодействия $U(r) = A \exp(-\beta r)$ для системы частиц

Атом, молекула	H ₂	N ₂	O ₂	CO	NO	CO ₂	N ₂ O
1. Атом; $\Delta U = 0,1-1$ эВ							
He	0,21 3,54	0,29 3,14	0,16 2,95	—	—	1,4 3,42	0,55 2,98
Ne	—	—	—	—	—	33 4,38	5,7 3,63
Ar	—	5,9 3,26	9,6 3,94	1,4 2,93	—	120 4,40	11 3,53
Kr	—	—	—	—	—	270 4,55	23 3,63
Xe	—	—	—	—	—	10 ³ 4,82	68 3,85
H	—	1,7 4,52	1,2 4,60	—	—	—	—
N	—	0,62 3,31	3,9 4,13	1,6 3,72	5,3 4,21	—	—
O	0,29 3,74	2,8 4,12	5,0 4,28	1,2 3,56	1,6 3,72	7 3,89	—
2. Молекула; 0,1—10 эВ							
H ₂	0,25 3,22	—	—	—	—	—	—
N ₂	—	2,3 3,16	1,4 3,02	7,1 3,66	5,8 3,64	30 3,78	6,8 3,25
O ₂	—	—	0,82 2,85	2,7 3,15	7,6 3,78	8,7 3,33	—
CO	—	—	—	4,7 3,47	4,3 3,49	19 3,55	—
NO	—	—	—	—	2,2 3,26	—	—
CO ₂	—	—	—	—	—	45 3,43	—
N ₂ O	—	—	—	—	—	—	11 3,07

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Margenau H., Kestner N. R. Theory of intermolecular forces, 2nd ed. — Oxford: Pergamon Press, 1971.
2. Леонас В. Б. Межмолекулярные потенциалы и столкновения атомов и молекул: Итоги науки и техники: атомная и молекулярная физика, оптика и магнитный резонанс. Т. 1/Под ред. С. А. Лосева.— М.: Изд. ВИНТИ, 1980, с. 3—206.
3. Mason E. A., Vanderslice J. T. High-energy elastic scattering of atoms, molecules and ions. — In: Atomic and Molecular Processes/Ed. by D. R. Bates. — N. Y.: Acad. Press, 1962, Ch. 17, p. 663—695.
4. Amdur I., Jordan J. E. Elastic scattering of high-energy beams: repulsive forces. — In: Molecular Beams: Advances in Chemical Physics. Vol. 10/Ed. by J. Ross. — N. Y.: Intersci. Publi, 1966, Ch. 2, p. 29.
5. Viehland L. A., Mason E. A. — J. Chem. Phys., 1984, vol. 80, p. 416; ibid 1984, vol. 81, p. 903.
6. Inouye H., Noda K., Kita S. — J. Chem. Phys., 1979, vol. 71, p. 2135.

8.4. ПАРАМЕТРЫ ПОТЕНЦИАЛОВ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВСКИХ МОЛЕКУЛ

По типу связи молекулы можно разделить на две группы. К первой группе относятся молекулы с химической связью, которая обусловлена перекрытием электронных оболочек взаимодействующих атомов (ковалентная связь) или частичным переходом электрона от одного атома к другому (ионная связь). Энергии диссоциации таких устойчивых молекул находятся в диапазоне $\sim (1-10)$ эВ. Вторую группу молекул составляют так называемые ван-дер-ваальсовские молекулы, у которых обменное взаимодействие электронов характеризуется отталкиванием и связь в которых осуществляется за счет слабого дальнего действующего притяжения. Эти ван-дер-ваальсовские силы взаимодействия приводят к появлению неглубокой ямки на кривых электронных термов молекул, так что их энергия диссоциации весьма невелика и примерно на два порядка ниже, чем у молекул с химической связью.

В табл. 8.13—8.18 представлены значения параметров ϵ и r_m , характеризующих потенциал взаимодействия слабосвязанных ван-дер-ваальсовских молекул в области его минимума $U(r_m) = -\epsilon$. В тех случаях, когда во взаимодействии участвуют молекулы, приведены параметры только сферически-симметричной части потенциала взаимодействия атом — молекула. При этом равновесное расстояние отсчитывается от электрического центра молекулы.

Собранные здесь данные были получены на основе обработки результатов наблюдений дифференциальных и полных сечений упругого рассеяния частиц, путем спектроскопических измерений, в результате обработки результатов измерений макроскопических характеристик исследуемых веществ и, наконец, с помощью теоретических расчетов. Цитируемая литература включает ряд обзоров по взаимодействию нейтральных [1—6] и ионизованных [13—15] атомных частиц, а также некоторые информативные публикации по эксперименту (соответственно, [7—11] и [16—19]) и теории ([12] и [20]). Числовые значения величин были распределены по введенным ранее классам точности (см. предисловие).

Таблица 8.13. Параметры ϵ , мэВ (верхнее число), и r_m , 10^{-10} м (нижнее число), потенциала взаимодействия двухатомных ван-дер-ваальсовских молекул для системы частиц

Атом	He (1 ¹ S)	Ne	Ar	Kr	Xe
1. Атом инертного газа					
He (1 ¹ S)	0,92 (B) 2,97 (B)	1,9 (B) 3,0 (B)	2,5 (B) 3,5 (B)	2,6 (B) 3,7 (B)	2,4 (B) 4,0 (B)
Ne	—	3,6 (B) 3,1 (B)	6,0 (B) 3,4 (B)	6,3 (B) 3,6 (B)	6,5 (B) 3,8 (B)
Ar	—	—	12,3 (B) 3,8 (B)	14,4 (B) 3,9 (B)	16,2 (B) 4,1 (B)
Kr	—	—	—	17,2 (B) 4,0 (B)	20,0 (B) 4,2 (B)
Xe	—	—	—	—	24,3 (B) 4,4 (B)
2. Атом щелочного металла					
Li	0,10 (C) 6,2 (C)	1,2 (B) 5,0 (B)	5,4 (B) 4,8 (B)	8,4 (B) 4,8 (B)	12,7 (B) 4,8 (B)
Na	—	1,0 (B) 5,3 (B)	5,3 (B) 5,0 (B)	8,7 (B) 5,0 (B)	12,4 (B) 5,0 (B)
K	—	5,6 (D) 5,0 (D)	5,6 (C) 5,0 (C)	9,0 (C) 5,0 (C)	13 (D) 5,2 (C)
Rb	—	5,4 (D) 5,0 (D)	5,6 (C) 5,2 (C)	9,1 (D) 5,3 (C)	13 (D) 5,3 (D)
Cs	—	5,0 (D) 5,0 (D)	5,8 (D) 5,2 (D)	9,2 (D) 5,4 (C)	13 (D) 5,4 (D)

Атом	He (1'S)	Ne	Ar	Kr	Xe
------	----------	----	----	----	----

3. Атомы Н, О и галогены

H	0,52 (B) 3,6 (B)	1,9 (B) 3,1 (B)	4,2 (B) 3,6 (B)	5,9 (B) 3,6 (B)	7,1 (B) 3,8 (B)
O (3P)	$^3\Pi$	2,5 (D) 3,1 (C)	3,9 (D) 3,2 (C)	7,6 (D) 3,6 (C)	7,8 (C) 3,8 (C)
	$^3\Sigma^-$	1,0 (D) 3,6 (C)	—	3,5 (C) 4,8 (C)	3,7 (C) 3,4 (C)
					4,8 (C)
F ($^2P_{3/2}$)	$A\frac{3}{2}$	—	3,9 (C) 3,0 (B)	6,5 (C) 3,4 (B)	6,7 (C) 3,6 (B)
	$X\frac{1}{2}$	—	5,2 (C) 2,8 (C)	12 (C) 2,9 (C)	13 (C) 3,0 (C)
Cl ($^2P_{3/2}$)	$A\frac{3}{2}$	—	—	—	16 (C) 4,1 (C)
	$X\frac{1}{2}$	—	—	—	35 (C) 3,2 (C)
Br ($^2P_{3/2}$)	$A\frac{3}{2}$	—	—	11 (C) 3,9 (C)	15 (C) 4,1 (C)
	$X\frac{1}{2}$	—	—	16 (C) 3,7 (C)	20 (C) 3,9 (C)
I ($^2P_{3/2}$)	$A\frac{3}{2}$	—	—	16 (C) 4,3 (C)	18 (C) 4,1 (C)
	$X\frac{1}{2}$	—	—	24 (C) 4,0 (C)	28 (C) 3,8 (C)

4. Возбужденный атом

He* (2^3S)	—	0,4 (C) 6,0 (C)	3,6 (C) 5,7 (C)	5,5 (C) 5,4 (C)	—
He* (2^1S)	—	0,4 (C) 6,7 (C)	3,7 (C) 5,7 (C)	6,5 (C) 5,6 (C)	11 (C) 5,7 (C)
Li* (2P)	100 (C) 3,2 (C)	28 (C) 2,6 (C)	— —	— —	— —
Na* (3^2P)	—	15 (C) 4,2 (C)	70 (C) 2,9 (C)	90 (C) 3,2 (C)	140 (C) 3,0 (C)
Ne* (3P)	—	—	—	8,2 (D) 4,9 (C)	—

Таблица 8.14. Параметры ϵ , мэВ (верхнее число) и r_m , 10^{-10} м (нижнее число) потенциала взаимодействия двухатомных ван-дер-ваальсовых молекул, содержащих атом ртути

	Li (2S)	Na (2S)	Na (2P)	K (2S)	K (2P)
Hg (1S)	108 (C)	55 (C)	260 (C)	52 (C)	140 (C)
Терм	3,0 (C) $^2\Sigma$	4,7 (C) $^2\Sigma$	3,7 (C) $^2\Sigma$	4,9 (C) $^2\Sigma$	4,4 (C) $B^2\Sigma$
	Ar	Kr	Xe	Cs (2S)	Hg (6^1S)
Hg (1S)	17 (C)	22 (C)	30 (C)	50 (C)	110 (C)
Терм	3,9 (C) $^1O^+$	4,0 (C) $^1O^+$	4,1 (B) $^1O^+$	5,1 (C) $^2\Sigma$	2,9 (B) $^1\Sigma_g^+$

Таблица 8.15. Параметры ϵ , мэВ (верхнее число), и r_m , 10^{-10} м (нижнее число), потенциала взаимодействия двухатомных ван-дер-ваальсовых молекулярных ионов для системы частиц

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe
-----	----	----	----	----	----

1. Ион щелочного металла

Li+	72 (B)	120 (B)	290 (C)	430 (C)	530 (C)
	1,97 (B)	2,1 (C)	2,3 (C)	2,4 (C)	2,6 (C)
Na+	40 (D)	70 (D)	160 (C)	200 (D)	280 (D)
	2,4 (C)	2,4 (C)	2,7 (C)	2,9 (C)	3,4 (C)
K+	23 (C)	42 (C)	115 (B)	137 (B)	170 (C)
	2,7 (C)	2,8 (C)	3,0 (C)	3,2 (C)	3,4 (B)
Rb+	—	—	90 (C)	120 (C)	130 (C)
			3,4 (C)	3,5 (C)	3,9 (C)
Cs+	15 (C)	25 (C)	75 (C)	110 (C)	110 (C)
	3,0 (C)	3,3 (B)	3,6 (C)	3,6 (C)	4,0 (C)

2. Ион инертного газа

He+	2470 (A)	50 (D)	190 (D)	220 (D)	280 (D)
	1,08 (A)	2,5 (D)	2,5 (D)	2,7 (D)	2,9 (D)
Ne+	—	1300 (D)	—	—	—
		1,7 (D)			
Ar+	—	—	1340 (D)	—	—
			2,4 (D)		
Kr+	—	—	—	1210 (D)	—
				2,6 (D)	
Xe+	—	—	—	—	980 (D)
					3,2 (C)

3. Положительный ион H⁺, B⁺, C⁺, N⁺, O⁺

H+	2040 (A)	2300 (D)	4100 (D)	4590 (D)	5800 (D)
	0,77 (A)	1,0 (D)	1,3 (D)	1,5 (D)	1,7 (D)
B+	—	—	300 (D)	500 (D)	820 (D)
			3,0 (D)	2,7 (D)	2,7 (D)

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe
C ⁺	—	—	940 (C) 2,0 (C)	—	—
N ⁺	—	400 (D) 2,1 (D)	2200 (D) 2,3 (D)	290 (D) 2,5 (D)	920 (D) 2,8 (D)
O ⁺ (⁴ S)	—	—	670 (B) 2,22 (B)	1200 (C) 2,6 (C)	500 (D) 2,5 (C)
O ⁺ (² P)	—	—	—	—	2700 (C) 2,3 (C)

4. Отрицательный ион

H ⁻	0,4 (E) 8 (E)	2 (E) 5 (E)	10 (E) 5 (E)	—	—
F ⁻	—	—	68 (D) 2,8 (D)	140 (C) 2,5 (C)	220 (C) 2,5 (C)
Cl ⁻	—	—	52 (C) 3,1 (C)	51 (C) 3,5 (C)	100 (C) 3,3 (C)
Br ⁻	2 (E) 5 (E)	—	41 (C) 3,4 (C)	45 (C) 3,6 (C)	85 (C) 3,4 (C)

Таблица 8.16. Параметры ε , мэВ (верхнее число), и r_m , 10^{-10} м (нижнее число), сферически-симметричного потенциала взаимодействия для системы частиц: атом инертного газа — двухатомная молекула

Молекула	He	Ne	Ar	Kr	Xe
H ₂	1,2 (C) 3,4 (B)	3,1 (C) 3,3 (C)	6,4 (C) 3,6 (C)	7,4 (C) 3,7 (B)	8,2 (C) 3,9 (B)
N ₂	2,4 (C) 3,8 (B)	5,5 (D) 3,6 (C)	11 (C) 3,7 (C)	14 (C) 4,0 (C)	15 (D) 3,9 (C)
O ₂	2,5 (C) 3,4 (B)	5,8 (C) 3,4 (B)	12 (C) 3,7 (B)	15 (C) 3,9 (C)	16 (C) 3,9 (C)
CO	2,2 (C) 3,8 (C)	—	—	—	—
NO	2,3 (C) 3,7 (C)	6,2 (C) 3,1 (C)	12 (C) 3,8 (C)	14 (C) 3,9 (C)	17 (C) 3,8 (C)
HF	—	—	—	—	16 (C) 3,8 (C)
HCl	2,3 (C) 3,7 (B)	—	23 (D) 4,0 (B)	30 (D) 4,1 (B)	37 (D) 4,3 (B)
HBr	1,9 (D) 4,0 (C)	—	32 (D) 4,1 (C)	—	—
I ₂	—	11 (D)	29 (D)	—	—

Таблица 8.17. Параметры ε , мэВ (верхнее число) и r_m , 10^{-10} м (нижнее число) сферически-симметричного потенциала взаимодействия для системы частиц: атом водорода — двухатомная молекула

	H ₂	HCl	HBr	HI	Cl ₂	Br ₂	CO
H	2,1 (C) 3,43 (B)	6,3 (C) 3,7 (B)	7,7 (C) 3,6 (B)	9,3 (C) 3,7 (B)	8,0 (C) 4,0 (C)	11 (C) 4,2 (C)	3,8 (C) 3,6 (B)

Таблица 8.18. Параметры ϵ , мэВ (верхнее число) и r_m , 10^{-10} м (нижнее число) сферически-симметричного потенциала взаимодействия для системы частиц: атом — многоатомная молекула

Атом	CO ₂	H ₂ O	NH ₃	CF ₄	CH ₄	SF ₆
H	—	—	—	5,3 (C) 3,5 (C)	5 (C) 3,7 (B)	—
He	3,0 (C) 3,3 (C)	2,7 (C) 3,4 (C)	2,3 (C) 3,8 (B)	—	2,3 (C) 3,9 (B)	5,6 (D) 4,2 (B)
Ar	—	—	—	20 (C) 3,8 (C)	—	30 (C) 4,5 (C)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernstein R. B., Muckerman J. T. Determination of intermolecular forces via low-energy molecular beam scattering. — In: Intermolecular Forces/Ed. by J. O. Hirschfelder: Advances in Chemical Physics. Vol. 12. — N. Y.: Wiley, 1967, p. 389—486.
2. Buck U. Elastic scattering. — In: Molecular Scattering: Physical and Chemical Applications/Ed. by K. P. Lawley: Advances in Chemical Physics. Vol. 30. — N. Y.: Wiley, 1975, p. 313.
3. Buck U. — Rev. Mod. Phys., 1974, vol. 46, p. 369.
4. Scoles G. Two-body, spherical, atom—atom and atom—molecule interaction energies. — Ann. Rev. Phys. Chem., 1980, vol. 31, p. 81.
5. Pauly H. Elastic scattering cross sections I: spherical potentials. — In: Atom—Molecule Collision Theory/Ed. by R. B. Bernstein. — N. Y.: Plenum, 1979, p. 111—200.
6. Haberland H., Lee Y. T., Siska P. E. Scattering of noble-gas metastable atoms in molecular beams. — In: The Excited State in Chemical Physics, Part 2/Ed. by J. W. McGowan: Advances in Chemical Physics. Vol. 45. — N. Y.: Wiley, 1981, Ch. 6, p. 487—585.
7. Fraites J. L., Bentley J., Winicur D. H. — J. Phys., 1977, vol. B10, p. 127.
8. Tang K. T., Toennies J. P. — J. Chem. Phys., 1977, vol. 66, p. 1496; Toennies J. P., Welz W., Wolf G. — Ibid, 1979, vol. 71, p. 614.
9. Battaglia F., Gianturco F. A., Casavecchia P. e. a. — Faraday Discussions Chem., Soc., 1982, vol. 73, p. 257.
10. Aziz R. A., Dalen van A. — J. Chem. Phys., 1984, vol. 81, p. 779.
11. Huxley P., Knowles D. B., Murrell J. N., Watts J. D. Groundstate diatomic potentials. Part 2. — Van der Waals molecules. — J. Chem. Soc., Faraday Trans. II, 1984, vol. 80, p. 1349.
12. Kim Y. S., Gordon R. G. — J. Chem. Phys., 1974, vol. 61, p. 1; Staemmler V., Jaquet R. — Chem. Phys., 1985, vol. 92, p. 141.
13. Weise H. P. Elastic scattering of ions. — Berichte der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie, 1973, Bd 1.77, S. 578.
14. Koski W. S. Scattering of positive ions by molecules. — In: Molecular Scattering: Physical and Chemical Applications/Ed. by K. P. Lawley: Advances in Chemical Physics. Vol. 30. — N. Y.: Wiley, 1975, p. 333.
15. Gattland I. R. Ion mobilities and ion—atom interaction potentials. — In: SASP '82 Symposium At. Surf. Phys., Salzburg, 7—13 Febr. 1982. — Innsbruck: Inst. Atomphys, Univ. Innsbruck, 1982, p. 310—317.
16. Rajan M. S., Gislason E. A. — J. Chem. Phys., 1983, vol. 78, p. 2428.
17. Budenholzer F. E., Gislason E. A., Jorgensen A. D. — Ibid., p. 5279.
18. Viehland L. A. — Ibid, vol. 78, p. 279.
19. Lamm D. R., Chelf R. D., Twist J. R. e. a. — Ibid, vol. 79, p. 1965.
20. Waldman M., Gordon R. G. — Ibid, 1979, vol. 71, p. 1325.

II. I. ГЕНЕАЛОГИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Волновая функция Ψ валентных электронов в атоме, находящихся в состояниях с одинаковым значением главного квантового числа, может быть представлена через волновую функцию одного из валентных электронов Φ и волновую функцию атомного остова Φ с помощью следующего разложения:

$$\Psi_{LM_L SM_S}(1, 2, \dots, N) = \hat{P} \sum_{l, m_l, s, m_s} G_{ls}^{LS}(l_e, N) \left(\frac{1}{2} sm_s \left| \frac{1}{2} sSM_S \right. \right) \times \\ \times (l_e l m_l | l_e l M_L) \Phi_{lm_l sm_s}(1, 2, \dots, N-1) \Phi_{l_e \mu l 2\sigma}(N).$$

Здесь L, S — орбитальный и спиновый моменты атома; M_L, M_S — их проекции на выделенное направление; l, s — орбитальный и спиновый моменты атомного остова; m_l, m_s — их проекции на ось квантования; l_e — орбитальный момент валентного электрона; μ, σ — проекции орбитального момента и спина электрона на выделенное направление; \hat{P} — оператор перестановки электронов в атоме. Нижний индекс у волновой функции указывает на то, какими квантовыми числами характеризуется состояние данной частицы, а в аргументе волновой функции записаны номера электронов, от координат (пространственных и спиновых) которых зависят эти функции. Далее, $(\frac{1}{2} sm_s | \frac{1}{2} sSM_S)$, $(l_e l m_l | l_e l M_L)$ — коэффициенты Клебша—Гордана, возникающие при сложении векторов спинов электрона и атомного остова в спин атома, а также векторов орбитальных моментов электрона и атомного остова в орбитальный момент атома; $G_{ls}^{LS}(l_e, N)$ — так называемые генеалогические коэффициенты.

Между генеалогическими коэффициентами $G_{ls}^{LS}(l_e, N)$ и $G_{ls}^{LS}(l_e, 4l_e + 3 - N)$, характеризующими электронные конфигурации l_e^N и $l_e^{4l_e + 3 - N}$, существует соотношение

$$G_{ls}^{LS}(l_e, N) = (-1)^{s-S+l-L-l_e-1/2} \sqrt{\frac{N(2s+1)(2l+1)}{(4l+1-N)(2S+1)(2L+1)}} \times \\ \times G_{ls}^{LS}(l, 4l+3-N).$$

Как следствие этого достаточно рассчитать коэффициенты G_{ls}^{LS} для электронных конфигураций l_e^n с $n \leq 2l_e + 1$, т. е. для электронных оболочек, заполненных менее чем наполовину.

Другое свойство генеалогических коэффициентов вытекает из условия нормировки волновой функции

$$\sum_{l,s} [G_{ls}^{LS}(l_e, N)]^2 = 1.$$

В табл. П.I.1 приведены термы конфигураций, содержащих эквивалентные p -, d - и f -электроны. Электронным конфигурациям l^n и $l^{2(2l+1)-n}$, взаимно дополняющим друг друга до заполненной оболочки, соответствуют наборы одних и тех же термов. Цифра внизу под символом терма указывает на число таких повторяющихся термов.

В табл. П.1.2 представлены значения генеалогических коэффициентов соответственно для конфигураций валентных электронов p^n . Более подробная информация о роли генеалогических коэффициентов при расчетах атомных структур содержится в [1—4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондон Е., Шортли Г. Теория атомных спектров: Пер. с англ.— М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
2. Левинсон И. Б., Никитин А. А. Руководство по теоретическому вычислению интенсивностей линий в атомных спектрах.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1962.
3. Racah G. Theory of complex spectra.— Phys. Rev., 1941, vol. 61, p. 186; *ibid.*, 1942, vol. 62, p. 438; *ibid.*, 1943, vol. 63, p. 367; *ibid.*, 1949, vol. 76, p. 1352. (См. пер. первых трех статей в приложении 2 к книге [2], с. 267—354)
4. Собельман И. И. Введение в теорию атомных спектров.— М.: ГИФМЛ, 1963.

Таблица П.1.1. Электронные термы конфигураций l^n

Конфигурация эквивалентных электронов	Термы		Полный статистический вес электронной конфигурации
s	2S		2
s^2	1S		1
p	$^2P^{\circ}$		6
p^2	1SD	3P	15
p^3	$^2PD^{\circ}$	$^4S^{\circ}$	20
d	2D		10
d^2	1SDG	3PF	45
d^3	2PDFGH 2	4PF	120
d^4	1SDFGI 2 2 2	3PDFGH 2 2	5D 210
d^5	2SPDFGHI 3 2 2	4PDFG	6S 252
f	$^2F^{\circ}$		14
f^2	1SDGI	3PFH	91
f^3	$^2PDFGHIKL^{\circ}$ 2 2 2 2	$^4SDFGI^{\circ}$	364
f^4	1SDFGHIKLN 2 4 4 2 3 2	3PDFGHIKLM 3 2 4 3 4 2 2	5SDFGI 1001
f^5	$^2PDFGHIKLMNO^{\circ}$ 4 5 7 6 7 5 5 3 2	$^4SPDFGHIKLM^{\circ}$ 2 3 4 4 3 3 2	$^6PFH^{\circ}$ 2002
f^6	$^1SPDFGHIKLMNO^{\circ}$ 4 6 4 8 4 7 3 4 2 2	3PDFGHIKLMNO 6 5 9 7 9 6 6 3 3	3003

Конфигурация эквивалентных электронов	Термы		Полный статистический вес электронной конфигурации
f^7	5SPDFGHIKL 3 2 3 2 2	7F	3432
	${}^2SPDF\ GHIKLMNOQ^\circ$ 25 7 10 10 9 9 7 5 4 2	${}^4SPDFGHIKLMN^\circ$ 2 2 6 5 7 5 5 3 3	
	${}^6PDFGHI^\circ$	${}^8S^\circ$	

Таблица П.1.2. Генеалогические коэффициенты для электронных конфигураций p^n

Электронная конфигурация и терм атомного остова $p^{n-1} (ls)$	Конфигурация валентных электронов и терм $p^n (LS)$	$G_{ls}^{LS} (p, n)$
$p ({}^2P)$	$p^2 ({}^3P)$	1
	$p^2 ({}^1D)$	1
	$p^2 ({}^1S)$	1
$p^2 ({}^3P)$	$p^3 ({}^4S)$	1
	$p^3 ({}^2D)$	$1/\sqrt{2}$
	$p^3 ({}^2P)$	$-1/\sqrt{2}$
$p^2 ({}^1D)$	$p^3 ({}^4S)$	0
	$p^3 ({}^2D)$	$-1/\sqrt{2}$
	$p^3 ({}^2P)$	$-\sqrt{5/18}$
$p^2 ({}^1S)$	$p^3 ({}^4S)$	0
	$p^3 ({}^2D)$	0
	$p^3 ({}^2P)$	$\sqrt{2/3}$
$p^3 ({}^4S)$	$p^4 ({}^3P)$	$-1/\sqrt{3}$
	$p^4 ({}^1D)$	0
	$p^4 ({}^1S)$	0
$p^3 ({}^2D)$	$p^4 ({}^3P)$	$\sqrt{5/12}$

Электронная конфигурация и терм атомного остова $p^{n-1}(ls)$	Конфигурация валентных электронов и терм $p^n(LS)$	$G_{ls}^{LS}(p, n)$
$p^3(2P)$	$p^4(1D)$	$\sqrt{3/4}$
	$p^4(1S)$	0
	$p^4(3P)$	$-1/2$
	$p^4(1D)$	$-1/2$
	$p^4(1S)$	1
$p^4(3P)$	$p^5(2P)$	$\sqrt{3/5}$
$p^4(1D)$	$p^5(2P)$	$\sqrt{1/3}$
$p^4(1S)$	$p^5(2P)$	$1/\sqrt{15}$

П. II. КОЭФФИЦИЕНТЫ КЛЕБША—ГОРДАНА

Коэффициенты Клебша—Гордана возникают при сложении моментов двух частиц или моментов различной природы (например, орбитального и спинowego) одной частицы в полный момент системы. Пусть полный момент системы равен j , а моменты отдельных его частей равны j_1 и j_2 . Тогда волновая функция системы может быть представлена через комбинацию волновых функций ее частей следующим образом:

$$\psi_{jm} = \sum (j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 jm) \psi_{j_1 m_1} \psi_{j_2 m_2},$$

где $\psi_{j_1 m_1}$, $\psi_{j_2 m_2}$ — волновые функции складываемых моментов, отвечающие соответствующему значению момента и его проекции на выделенное направление, волновая функция ψ_{jm} описывает состояние всей системы с моментом j и проекцией момента m на выделенное направление. Коэффициенты разложения $(j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 jm)$ называются коэффициентами Клебша—Гордана*.

Далее мы приведем простейшие соотношения, которым удовлетворяют коэффициенты Клебша—Гордана, а также числовые значения этих величин для относительно небольших значений складываемых моментов. Более полную информацию по этому вопросу можно получить в [1—3].

1. Сложение проекций моментов:

$$m = m_1 + m_2.$$

2. Свойство ортогональности:

$$\sum_{m_1 m_2} (j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 jm) (j_1 j_2 m_1' m_2' | j_1 j_2 j' m') = \delta_{jj'} \delta_{mm'},$$

$$\sum_{jm} (j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 jm) (j_1 j_2 m_1' m_2' | j_1 j_2 jm) = \delta_{m_1 m_1'} \delta_{m_2 m_2'}.$$

* Часто используются другие обозначения для коэффициентов Клебша—Гордана, именно: $(j_1 j_2 m_1 m_2 | jm)$, или $C_{m_1 m_2}^{jm}$, или $C_{j_1 m_1 j_2 m_2}^{jm}$.

3. Перестановочное свойство:

$$(j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 j m) = (-1)^{j_1+j_2-j} (j_2 j_1 m_2 m_1 | j_2 j_1 j m) = \\ = (-1)^{j_1+j_2-j} (j_1 j_2 -m_1 -m_2 | j_1 j_2 j -m) = (j_2 j_1 -m_2 -m_1 | j_2 j_1 j -m).$$

4. Связь с $3j$ -символами Вигнера:

$$(j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 j m) = (-1)^{j_1-j_2+m} \sqrt{2j+1} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j \\ m_1 & m_2 & m \end{pmatrix}.$$

Числовые значения коэффициентов Клебша—Гордана для небольших значений моментов $j \leq 3$, $j_{1,2} \leq 5/2$ представлены в табл. П.П.1. Здесь сведены коэффициенты Клебша—Гордана, аргументы которых удовлетворяют соотношениям $j_1 \geq j_2$, $m_1 \geq m_2$. От последних условий можно избавиться, воспользовавшись перестановочными свойствами искоемых коэффициентов. Численные значения коэффициентов взяты из [3]. В табл. П.П.2 собраны формулы для коэффициентов Клебша—Гордана, у которых один из аргументов равен $j_2 = 1/2, 1, 3/2$ и 2 [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондон Е., Шортли Г. Теория атомных спектров: Пер. с англ.— М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
2. Edmonds A. Angular Momentum in Quantum Mechanics. — Princeton: Princeton University Press, 1957.
3. Варшавский Д. А., Москалев А. Н., Херсонский В. К. Квантовая теория углового момента.— Л.: Наука, 1975.
4. Morrison M. A., Estle T. L., Lane N. F. Quantum States of Atoms, Molecules and Solids.— Englewood Cliffs. — N. Y.: 1976, Appendix 4, p. 557.

Т а б л и ц а П.П.1. Коэффициенты Клебша — Гордана при заданных значениях моментов $j \leq 3$, $j_2 \leq j_1 \leq 5/2$

j_1	m_1	j_2	m_2	j	m	$(j_1 j_2 m_1 m_2 j_1 j_2 j m)$	
0	0	0	0	0	0	1	1
1/2	1/2	0	0	1/2	1/2	1	1
		1/2	1/2	1	1	1	1
		-1/2	0	0	0	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				1		$1/\sqrt{2}$	0,7071
1	0	0	0	1	0	1	1
		1/2	1/2	1/2	1/2	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
		1	0	3/2		$\sqrt{2/3}$	0,8165
				0	0	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
	1	0	0	1		0	0
				2		$\sqrt{2/3}$	0,8165
				-1	-1	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				1		$1/\sqrt{2}$	0,7071
	1	0	0	1	1	1	1
		1/2	1/2	3/2	3/2	1	1

l_1	m_1	l_2	m_2	l	m	$(l_1 l_2 m_1 m_2 l_1 l_2 j m)$	
3/2	1/2	1	-1/2	1/2	1/2	$\sqrt{2/3}$	0,8165
				3/2		$1/\sqrt{3}$	0,5774
			0	1	1	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				2		$1/\sqrt{2}$	0,7071
			-1	0	0	$1/\sqrt{3}$	0,5774
				1		$1/\sqrt{2}$	0,7071
		0		2		$1/\sqrt{6}$	0,4082
			1	2	2	1	1
			0	3/2	1/2	1	1
		1/2	1/2	1	1	-1/2	-0,5
				2		$\sqrt{3}/2$	0,8660
			-1/2	1	0	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				2		$1/\sqrt{2}$	0,7071
		1	0	1/2	1/2	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
				3/2		$1/\sqrt{15}$	0,2582
				5/2		$\sqrt{3/5}$	0,7746
		1	-1	1/2	-1/2	$1/\sqrt{6}$	0,4082
				3/2		$2\sqrt{2}/\sqrt{15}$	0,7303
				5/2		$\sqrt{3/10}$	0,5477
		1	1	3/2	3/2	$-\sqrt{2/5}$	-0,6324
				5/2		$\sqrt{3/5}$	0,7746
		3/2	1/2	1	1	$-\sqrt{2/5}$	-0,6324
				2		0	0
				3		$\sqrt{3/5}$	0,7746
			-1/2	0	0	-1/2	-0,5
		-3/2		1		$-1/2\sqrt{5}$	-0,2236
				2		1/2	0,5
				3		$3/2\sqrt{5}$	0,6708
			1	1	-1	$\sqrt{3/10}$	0,5477
				2		$-1/\sqrt{2}$	-0,7071
				3		$1/\sqrt{5}$	0,4472

j_1	m_1	j_2	m_2	i	m	$(j_1 j_2 m_1 m_2 i i_3 j m)$	
3/2	3/2	0	0	3/2	3/2	1	1
				1/2	2	1	1
				-1/2	1	$\sqrt{3}/2$	0,8660
		1	0	2	2	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3/2	3/2	$\sqrt{3/5}$	0,7746
				5/2	3/2	$\sqrt{2/5}$	0,6324
		1	-1	1/2	1/2	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3/2	1/2	$\sqrt{2/5}$	0,6324
				5/2	1/2	$1/\sqrt{10}$	0,3162
		1	1	5/2	5/2	$\sqrt{3/5}$	0,7746
				2	2	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3	2	$1/\sqrt{2}$	0,7071
		3/2	1/2	3/2	3	1	1
				3	3	1/2	0,5
				-3/2	0	0	0,5
		-1/2	-1/2	1	1	$3/2\sqrt{5}$	0,6708
				2	1	1/2	0,5
				3	1	$1/2\sqrt{5}$	0,2236
				1	1	$-1/2\sqrt{5}$	-0,2236
				2	1	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3	1	$1/\sqrt{5}$	0,4472
				1	0	1	1
2	0	0	0	2	0	1	1
				3/2	1/2	$-\sqrt{2/5}$	-0,6325
				5/2	1/2	$\sqrt{3/5}$	0,7746
		1	0	1	0	$-\sqrt{2/5}$	-0,6325
				2	0	0	0
				3	0	$\sqrt{3/5}$	0,7746
2	0	1	-1	1	-1	$1/\sqrt{10}$	0,3162
				2	-1	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3	-1	$\sqrt{2/5}$	0,6325
		3/2	1/2	1/2	1/2	$1/\sqrt{5}$	0,4472
				3/2	1/2	$-1/\sqrt{5}$	-0,4472

j_1	m_1	j_2	m_2	j	m	$(j_1 j_2 m_1 m_2 j_1 j_2 m)$	
2	1	3/2	3/2	5/2	3/2	$-\sqrt{3/35}$	-0,2928
				3/2		$1/\sqrt{5}$	0,4472
				5/2		$-3\sqrt{2/35}$	-0,7171
				1	0	0	0
				2		$-\sqrt{2/7}$	-0,5345
				3		0	0
				1	-1	$-\sqrt{3/10}$	-0,5477
				2		$-1/\sqrt{14}$	-0,2673
				3		$1/\sqrt{5}$	0,4472
		2	-1	2	-2	$\sqrt{2/7}$	0,5345
				3		$1/\sqrt{2}$	0,7071
				2		1	1
				3/2	3/2	$-1/\sqrt{5}$	-0,4472
				5/2		$2/\sqrt{5}$	0,8944
				3/2		$\sqrt{3/5}$	0,7746
			-1/2	5/2	1/2	$\sqrt{2/5}$	0,6325
				1		$-\sqrt{3/10}$	-0,5477
				2		$1/\sqrt{6}$	0,4082
				3		$2\sqrt{2/15}$	0,7303
		1	1	2	2	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
				3		$1/\sqrt{3}$	0,5774
				1	0	$\sqrt{3/5}$	0,7746
				2		$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3		$1/\sqrt{5}$	0,4472
			3/2	3/2	3/2	$-\sqrt{2/5}$	-0,6325
				5/2		$1/\sqrt{35}$	0,1690
				3/2		$-\sqrt{3/7}$	0,6546
				1/2	1/2	$-\sqrt{3/10}$	-0,5477
				3/2		0	0
				5/2		$\sqrt{5/14}$	0,5976
			-3/2	1/2	-1/2	$1/\sqrt{10}$	0,3162

j_1	m_1	j_2	m_2	l	m	$(j_1 j_2 m_1 m_2 l_1 l_2 m)$	
2	2	0	0	3/2		$\sqrt{2/5}$	0,6325
				5/2		$3\sqrt{3}/\sqrt{10}$	0,6211
				2	2	1	1
				5/2	5/2	$\sqrt{3/5}$	0,7746
			-1/2	3/2	3/2	$2/\sqrt{5}$	0,8944
				5/2		$\sqrt{2/5}$	0,6325
				2	2	$\sqrt{2/3}$	0,8165
				3		$1/\sqrt{3}$	0,5774
		1	0	3	3	1	1
				1	1	$\sqrt{3/5}$	0,7746
				2		$1/\sqrt{3}$	0,5774
				3		$1/\sqrt{15}$	0,2582
			1/2	5/2	5/2	$2/\sqrt{7}$	0,7559
				3/2	3/2	$\sqrt{2/5}$	0,6325
				5/2		$4/\sqrt{35}$	0,6761
				1/2	1/2	$\sqrt{2/5}$	0,6325
2	2	2	1	3/2		$\sqrt{2/5}$	0,6325
				5/2		$\sqrt{6/35}$	0,4140
				3	3	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				1	1	$1/\sqrt{5}$	0,4472
			-1	2		$\sqrt{3/7}$	0,6547
				3		$\sqrt{3/10}$	0,5477
				0	0	$1/\sqrt{5}$	0,4472
				1		$\sqrt{2/5}$	0,6325
		2	-2	2		$\sqrt{2/7}$	0,5345
				3		$1/\sqrt{10}$	0,3162
				5/2	1/2	1	1
				2	1	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
			1/2	3		$\sqrt{2/3}$	0,8165
				2	0	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				3		$1/\sqrt{2}$	0,7071
				5/2	1/2	1	1
5/2	1/2	0	0	5/2	1/2	1	1
				2	1	$-1/\sqrt{3}$	-0,5774
				3		$\sqrt{2/3}$	0,8165
				2	0	$1/\sqrt{2}$	0,7071

j_1	m_1	j_2	m_2	j	m	$(j_1 m_1 m_2 j_1 j_2 m)$	
5/2	1/2	1	0	3/2	1/2	$-\sqrt{2/5}$	-0,6325
				5/2		$1/\sqrt{35}$	0,1690
		1	1	3/2	3/2	$1/\sqrt{15}$	0,2582
				5/2		$-4/\sqrt{35}$	-0,6761
		1	-1	3/2	-1/2	$1/\sqrt{5}$	0,4472
				5/2		$3\sqrt{2}/\sqrt{35}$	0,7171
		3/2	1/2	1	1	$\sqrt{3}/2\sqrt{5}$	0,3873
				2		$-5/2\sqrt{21}$	-0,5455
		3/2		3		$-1/2\sqrt{15}$	-0,1291
				2		$1/\sqrt{7}$	0,3780
		3/2		3		$-1/\sqrt{2}$	0,7071
				1	0	$-\sqrt{3/10}$	-0,5477
		-1/2		2		$-1/\sqrt{14}$	-0,2673
				3		$1/\sqrt{5}$	0,4472
		-3/2		1	-1	$1/2\sqrt{5}$	0,2236
				2		$3/2\sqrt{7}$	0,5669
		2	0	3		$3/2\sqrt{5}$	0,6708
				1/2	1/2	$1/\sqrt{5}$	0,4472
		2	1	3/2		$-\sqrt{2/35}$	-0,2391
				5/2		$-2\sqrt{2}/\sqrt{35}$	-0,4781
5/2	1/2	2	1	3/2	3/2	$3/\sqrt{35}$	0,5071
				5/2		$-\sqrt{6/35}$	0,4141
		2	2	5/2	5/2	$\sqrt{3/14}$	0,4629
				1/2	-1/2	$-\sqrt{2/15}$	-0,3651
		2	-1	3/2		$-\sqrt{5/21}$	-0,4880
				5/2		0	0
		-2	3/2	3/2	-3/2	$2/\sqrt{35}$	0,3381
				5/2		$\sqrt{27/70}$	0,6211
		5/2	1/2	1	1	$3/\sqrt{35}$	0,5071
				2		0	0
				3		$-2/\sqrt{15}$	-0,5164

j_1	m_1	j_2	m_2	j	m	$(j_1 j_2 m_1 m_2 j_1 j_2 m)$	
5/2	3/2	0	-1/2	0	0	$-1/\sqrt{6}$	0,4082
				1		$1/\sqrt{70}$	0,1195
				2		$-2/\sqrt{35}$	-0,4364
			-3/2	3		$-2/3\sqrt{5}$	-0,2981
				1	-1	$-\sqrt{8/35}$	-0,4781
				2		$1/\sqrt{7}$	0,3780
			-5/2	3		$1/\sqrt{70}$	0,1826
				2	-2	$-\sqrt{5}/2\sqrt{7}$	-0,4226
				3		$-\sqrt{5}/2\sqrt{3}$	-0,6455
		1/2	0	5/2	3/2	1	1
			1/2	2	2	$-1\sqrt{6}$	-0,4082
				3		$\sqrt{5/6}$	0,9129
			-1/2	2	1	$\sqrt{2/3}$	0,8165
				3		$1/\sqrt{3}$	0,5774
			1	3/2	3/2	$-2/\sqrt{15}$	-0,5164
				5/2		$3/\sqrt{35}$	0,5071
			1	5/2	5/2	$-\sqrt{2/7}$	-0,5345
			-1	3/2	1/2	$\sqrt{2/5}$	0,6324
				5/2		$\sqrt{2/7}$	0,5345
5/2	3/2	3/2	1/2	2	2	$-2\sqrt{2}/\sqrt{21}$	-0,5172
				3		$\sqrt{5}/2\sqrt{2}$	0,7906
			3/2	3	3	$-\sqrt{3}/2\sqrt{2}$	-0,6124
			-1/2	1	1	$-\sqrt{3/10}$	-0,5477
				2		$1/\sqrt{42}$	0,1543
				3		$\sqrt{5}/2\sqrt{3}$	0,6455
			-3/2	1	0	$1/\sqrt{5}$	0,4472
				2		$\sqrt{3/7}$	0,6546
				3		$1/2\sqrt{2}$	0,3536
5/2	3/2	2	0	3/2	3/2	$-2\sqrt{3}/\sqrt{35}$	-0,5855
				5/2		$-1/\sqrt{70}$	-0,1195
			1	5/2	5/2	$-\sqrt{3/7}$	-0,6546

i_1	m_1	i_2	m_2	j	m	$(i_1 i_2 m_1 m_2 j_1 j_2 m)$	
5/2	5/2	5/2	-1	1/2	1/2	$-1/\sqrt{15}$	-0,5164
				3/2		$-\sqrt{2/105}$	-0,1380
				5/2		$\sqrt{6/35}$	0,4140
			-2	1/2	-1/2	$1/\sqrt{15}$	0,2582
				3/2		$4\sqrt{2}/\sqrt{105}$	0,5520
				5/2		$\sqrt{27/70}$	0,6211
			1/2	2	2	$-3/2\sqrt{7}$	-0,5670
				3		$-1/2\sqrt{3}$	-0,2887
				3	3	$-2/3$	-0,6667
			3/2	3		$-2/3$	-0,6667
				1	1	$-\sqrt{8/35}$	-0,4781
				2		$-1/\sqrt{7}$	-0,3780
			-1/2	3		$1/\sqrt{70}$	0,1826
				0	0	$-1/\sqrt{6}$	-0,4082
				1		$-3/\sqrt{70}$	-0,3587
			-3/2	2		$1/2\sqrt{21}$	0,1091
				3		$7/6\sqrt{5}$	0,5218
			-5/2	1	-1	$1/\sqrt{7}$	0,3780
				2		$\sqrt{5/14}$	0,5976
				3		$1/\sqrt{3}$	0,5774
		0	0	5/2	5/2	1	1
				3	3	1	1
				2	2	$\sqrt{5/6}$	0,9129
		1/2	-1/2	3		$1/\sqrt{6}$	0,4082
				5/2	5/2	$\sqrt{5/7}$	0,8452

f_1	m_1	f_2	m_2	j	m	$(f_1 j_2 m_1 m_2 f_1 j_1 j m)$	
			-1	3/2	3/2	$\sqrt{2/3}$	0,8165
				5/2		$\sqrt{2/7}$	0,5345
		3/2	1/2	3	3	$\sqrt{5/8}$	0,7906
			-1/2	2	2	$\sqrt{10/21}$	0,6901
				3		$\sqrt{5/12}$	0,6455
			-3/2	1	1	$1/\sqrt{2}$	0,7071
				2		$\sqrt{5/14}$	0,5976
				3		$1/2\sqrt{2}$	0,3536
		2	0	5/2	5/2	$\sqrt{5/14}$	0,5976
			-1	3/2	3/2	$\sqrt{2/7}$	0,5345
				5/2		$\sqrt{3/7}$	0,6546
			-2	1/2	1/2	$1/\sqrt{3}$	0,5774
				3/2		$2\sqrt{2/21}$	0,6172
				5/2		$\sqrt{3/14}$	0,4629
		5/2	1/2	3	3	$\sqrt{5/3}\sqrt{2}$	0,5270
			-1/2	2	2	$\sqrt{5/2}\sqrt{7}$	0,4226
				3		$\sqrt{5/2}\sqrt{3}$	0,6455
			-3/2	1	1	$1/\sqrt{7}$	0,3780
				2		$\sqrt{5/14}$	0,5976
				3		$1/\sqrt{3}$	0,5774
			-5/2	0	0	$1/\sqrt{6}$	0,4082
				1		$\sqrt{5/14}$	0,5976
				2		$5/2\sqrt{21}$	0,5455
				3		$\sqrt{5/6}$	0,3727

Т а б л и ц а П. II. 2. Алгебраические формулы для коэффициентов Клебша — Гордана при заданных значениях аргумента $j_2 = 1/2, 1, 3/2$ и 2

$(j_1 \ 1/2 \ m_1 \ m_2 \ \ j_1 \ 1/2 \ j m)$		
$j =$	$m_2 = 1/2$	$m_2 = -1/2$
$i_1 + \frac{1}{2}$	$\sqrt{\frac{j_1 + m + 1/2}{2j_1 + 1}}$	$\sqrt{\frac{j_1 - m + 1/2}{2j_1 + 1}}$
$i_1 - \frac{1}{2}$	$-\sqrt{\frac{j_1 - m + 1/2}{2j_1 + 1}}$	$\sqrt{\frac{j_1 + m + 1/2}{2j_1 + 1}}$
$(j_1 \ 1 m_1 \ m_2 \ \ j_1 \ 1 j m)$		
$j =$	$m_2 = 1$	$m_2 = 0$
$i_1 + 1$	$\sqrt{\frac{(j_1 + m)(j_1 + m + 1)}{(2j_1 + 1)(2j_1 + 2)}}$	$\sqrt{\frac{(j_1 - m + 1)(j_1 + m + 1)}{(2j_1 + 1)(2j_1 + 2)}}$
i_1	$-\sqrt{\frac{(j_1 + m)(j_1 - m + 1)}{2j_1(j_1 + 1)}}$	$\sqrt{\frac{m}{j_1(j_1 + 1)}}$
$i_1 - 1$	$\sqrt{\frac{(j_1 - m)(j_1 - m + 1)}{2j_1(2j_1 + 1)}}$	$-\sqrt{\frac{(j_1 - m)(j_1 + m)}{j_1(2j_1 + 1)}}$
$(j_1 \ 3/2 \ m_1 \ m_2 \ \ j_1 \ 3/2 \ j m)$		
$j =$	$m_2 = 3/2$	$m_2 = 1/2$
$i_1 + 3/2$	$\sqrt{\frac{(j_1 + m - 1/2)(j_1 + m + 1/2)(j_1 + m + 3/2)}{(2j_1 + 1)(2j_1 + 2)(2j_1 + 3)}}$	$\sqrt{\frac{3(j_1 + m + 1/2)(j_1 + m + 3/2)(j_1 - m + 3/2)}{(2j_1 + 1)(2j_1 + 2)(2j_1 + 3)}}$
$i_1 + 1/2$	$-\sqrt{\frac{3(j_1 + m - 1/2)(j_1 + m + 1/2)(j_1 - m + 3/2)}{2j_1(2j_1 + 1)(2j_1 + 3)}}$	$-(i_1 - 3m + \frac{3}{2})\sqrt{\frac{j_1 + m + 1/2}{2j_1(2j_1 + 1)(2j_1 + 3)}}$

$i_1 - 1/2$	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m - 1/2)(i_1 - m + 1/2)(i_1 - m + 3/2)}{(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$	$-(i_1 + 3m - \frac{1}{2})\sqrt{\frac{i_1 - m + 1/2}{(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$
$i_1 - 3/2$	$-\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1/2)(i_1 - m + 1/2)(i_1 - m + 3/2)}{2i_1(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)}}$	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m - 1/2)(i_1 - m - 1/2)(i_1 - m + 1/2)}{2i_1(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)}}$
$i =$	$m_2 = -1/2$	$m_2 = -3/2$
$i_1 + 3/2$	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m + 3/2)(i_1 - m + 1/2)(i_1 - m + 3/2)}{(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)}}$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1/2)(i_1 - m + 1/2)(i_1 - m + 3/2)}{(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)}}$
$i_1 + 1/2$	$(i_1 + 3m + 3/2)\sqrt{\frac{i_1 - m + 1/2}{2i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 3)}}$	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m + 3/2)(i_1 - m - 1/2)(i_1 - m + 1/2)}{2i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 3)}}$
$i_1 - 1/2$	$-(i_1 - 3m - 1/2)\sqrt{\frac{i_1 + m + 1/2}{(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m + 1/2)(i_1 + m + 3/2)(i_1 - m - 1/2)}{(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$
$i_1 - 3/2$	$-\sqrt{\frac{3(i_1 + m - 1/2)(i_1 + m + 1/2)(i_1 - m - 1/2)}{2i_1(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)}}$	$\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1/2)(i_1 + m + 1/2)(i_1 + m + 3/2)}{2i_1(2i_1 - 1)(2i_1 + 1)}}$
$i =$	$m_2 = 2$	$m_2 = 1$
$i_1 + 2$	$\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1)(i_1 + m)(i_1 + m + 1)(i_1 + m + 2)}{(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)(2i_1 + 4)}}$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m + 2)(i_1 + m + 2)(i_1 + m + 1)(i_1 + m)}{(2i_1 + 1)(i_1 + 1)(2i_1 + 3)(i_1 + 2)}}$
$i_1 + 1$	$-\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1)(i_1 + m)(i_1 + m + 1)(i_1 - m + 2)}{2i_1(i_1 + 1)(i_1 + 2)(2i_1 + 1)}}$	$-(i_1 - 2m + 2)\sqrt{\frac{(i_1 + m + 1)(i_1 + m)}{2i_1(2i_1 + 1)(i_1 + 1)(i_1 + 2)}}$
i_1	$\sqrt{\frac{3(i_1 + m - 1)(i_1 + m)(i_1 - m + 1)(i_1 - m + 2)}{(2i_1 - 1)2i_1(i_1 + 1)(2i_1 + 3)}}$	$(1 - 2m)\sqrt{\frac{3(i_1 - m + 1)(i_1 + m)}{(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)}}$
$i_1 - 1$	$-\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1)(i_1 - m)(i_1 - m + 1)(i_1 - m + 2)}{2(i_1 - 1)i_1(i_1 + 1)(2i_1 + 1)}}$	$-(i_1 + 2m - 1)\sqrt{\frac{(i_1 - m + 1)(i_1 - m)}{(i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$

$i_1 - 2$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1)(i_1 - m)(i_1 - m + 1)(i_1 - m + 2)}{(2i_1 - 2)(2i_1 - 1)2i_1(2i_1 + 1)}}$	$-\sqrt{\frac{(i_1 - m + 1)(i_1 - m)(i_1 - m - 1)(i_1 + m - 1)}{(i_1 - 1)(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)}}$
$i_1 =$	$m_2 = 0$	$m_2 = -1$
$i_1 + 2$	$\sqrt{\frac{3(i_1 - m + 2)(i_1 - m + 1)(i_1 + m + 2)(i_1 + m + 1)}{(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)(i_1 + 2)}}$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m + 2)(i_1 - m + 1)(i_1 - m)(i_1 + m + 2)}{(2i_1 + 1)(i_1 + 1)(2i_1 + 3)(i_1 + 2)}}$
$i_1 + 1$	$m \sqrt{\frac{3(i_1 - m + 1)(i_1 + m + 1)}{i_1(2i_1 + 1)(i_1 + 1)(i_1 + 2)}}$	$(i_1 + 2m + 2) \sqrt{\frac{(i_1 - m + 1)(i_1 - m)}{i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(i_1 + 2)}}$
i_1	$\frac{3m^2 - i_1(i_1 + 1)}{\sqrt{(2i_1 - 1)i_1(i_1 + 1)(2i_1 + 3)}}$	$(2m + 1) \sqrt{\frac{3(i_1 - m)(i_1 + m + 1)}{(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)}}$
$i_1 - 1$	$-m \sqrt{\frac{3(i_1 - m)(i_1 + m)}{(i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)(i_1 + 1)}}$	$-(i_1 - 2m - 1) \sqrt{\frac{(i_1 + m + 1)(i_1 + m)}{(i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$
$i_1 - 2$	$\sqrt{\frac{3(i_1 - m)(i_1 - m - 1)(i_1 + m)(i_1 + m - 1)}{(2i_1 - 2)(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)}}$	$-\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1)(i_1 + m + 1)(i_1 + m)(i_1 + m - 1)}{(i_1 - 1)(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)}}$
$i_1 =$	$m_2 = -2$	
$i_1 + 2$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1)(i_1 - m)(i_1 - m + 1)(i_1 - m + 2)}{(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)(2i_1 + 4)}}$	
$i_1 + 1$	$\sqrt{\frac{(i_1 - m - 1)(i_1 - m)(i_1 - m + 1)(i_1 + m + 2)}{i_1(2i_1 + 1)(i_1 + 1)(2i_1 + 4)}}$	
i_1	$\sqrt{\frac{3(i_1 - m - 1)(i_1 - m)(i_1 + m + 1)(i_1 + m + 2)}{(2i_1 - 1)i_1(2i_1 + 2)(2i_1 + 3)}}$	
$i_1 - 1$	$\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1)(i_1 + m)(i_1 + m + 1)(i_1 + m + 2)}{(i_1 - 1)i_1(2i_1 + 1)(2i_1 + 2)}}$	
$i_1 - 2$	$\sqrt{\frac{(i_1 + m - 1)(i_1 + m)(i_1 + m + 1)(i_1 + m + 2)}{(2i_1 - 2)(2i_1 - 1)2i_1(2i_1 + 1)}}$	

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица

		Стр.
Гл. 1	1.1 Основные единицы физических величин	5
	1.2 Русские и международные обозначения единиц физических величин	7
	1.3 Десятичные приставки для обозначения кратных и дольных единиц физических величин	8
	1.4 Фундаментальные физические постоянные	10
	1.5 Система атомных единиц Хартри: $m_e = e = \hbar = 1$	12
	1.6 Система релятивистских единиц: $m_e = c = \hbar = 1$	13
	1.7 Распространенные внесистемные единицы измерения массы, длины, энергии, температуры, давления и пр.	15
	1.8 Переводные множители для единиц энергии	16
	1.9 Переводные множители для единиц мощности	16
	1.10 Переводные множители для единиц давления	17
	1.11 Переводные множители для единиц сечения рассеяния	17
Гл. 2	2.1 Параметры стабильных изотопов ($\%$, i , четность, μ)	19
	2.2 Параметры долгоживущих ($T_{1/2} \gtrsim 10,6$ мин) радиоактивных изотопов (i , четность, μ , $T_{1/2}$, каналы распада)	24
	2.3 Атомные массы элементов (1983 г.) и массы наиболее распространенных изотопов (1977 г.)	41
Гл. 3	3.1 Нормальные электронные конфигурации и термы элементов главных групп	52
	3.2 Нормальные электронные конфигурации и термы элементов промежуточных групп	52
	3.3 Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в атомах ($Z=2 \div 83$, $90 \div 92$)	55
	3.4 Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в однозарядных положительных ионах ($Z=3 \div 20$, 22 , 26 , 29 , 30 , $35 \div 38$, 47 , 48 , $53 \div 56$, 71 , 72 , $79 \div 83$)	64
	3.5 Хартри-фоковские и асимптотические параметры волновых функций валентных электронов в отрицательных атомных ионах ($Z=3 \div 53$)	67
Гл. 4	4.1 Потенциалы ионизации нейтральных атомов ($Z=1-102$)	71
	4.2 Символы электронных подоболочек атомных частиц	76
	4.3 Энергия связи электронов внутренних оболочек свободных атомов ($Z=3 \div 94$)	76
	4.4 Квантовые дефекты ридберговских уровней энергии атомных частиц ($Z \leq 88$)	82
	4.5 Параметры тонкого дублетного расщепления ридберговских уровней энергии атомов щелочного металла	87
	4.6 Параметры сверхтонкого расщепления низколежащих уровней энергии атомов (стабильные изотопы, $Z \leq 93$)	88
	4.7 Изотопический сдвиг уровней энергии атомов (H, He, Li, Mg, K, Cu, Rb)	100
	4.8 Изотопический сдвиг резонансных линий атомов ($Z \leq 82$)	102
	4.9 Дипольная поляризуемость атомных частиц ($Z=1 \div 82$)	105
	4.10 Магнитная восприимчивость атомов (He, Be, Ne, Mg, Ar, Ca, Kr, Xe)	106
Гл. 5	5.1 Потенциалы ионизации одно-, двух- и трехзарядных атомных ионов ($Z=2 \div 72$, $78 \div 83$, $88 \div 90$, 92)	107
	5.2 Потенциалы ионизации многозарядных атомных ионов ($Z=5 \div 36$)	111
	5.3 Потенциалы ионизации многозарядных атомных ионов для изoeлектронных серий $NI \div ArI$	115
	5.4 Энергия срoдства атомов к электрону ($Z \leq 85$)	116
	5.5 Низколежащие термы ($n \leq 2$) водородоподобных атомных ионов ($Z=2 \div 42$, $47 \div 56$, $72 \div 83$, 90 , 92 , 94)	120
	5.6 Низколежащие термы ($n \leq 2$) гелиеподобных атомных ионов ($Z=2 \div 42$, 50 , 60 , 70 , 80 , 90 , 100)	126
Гл. 6	6.1 Низколежащие электронные термы атомов ($Z=1 \div 83$, $88 \div 94$, $96 \div 99$)	134
	6.2 Поправка к длине волны излучения $\Delta\lambda$, учитывающая дисперсию света в воздухе	173
	6.3 Коэффициенты Эйнштейна и сила осцилляторов оптических переходов между низколежащими уровнями атомов ($Z=1 \div 20$, $29 \div 31$, $36 \div 38$, $47 \div 49$, $54 \div 56$, $79 \div 83$)	217
	6.4 Радиационное время жизни низколежащих состояний атомов ($Z=1 \div 56$, 60 , 64 , 66 , 67 , 70 , $72 \div 75$, $77 \div 83$, 93)	228
	6.5 Энергии возбуждения, каналы распада и радиационные времена жизни метастабильных состояний атомов ($Z \leq 83$)	253
	6.6 Радиационные времена жизни ридберговских уровней атома водорода	260
	6.7 Радиационные времена жизни ридберговских уровней атомов щелочного металла	260
Гл. 7	7.1 Низколежащие электронные термы однозарядных положительных ионов ($Z=2 \div 83$, $88 \div 90$, $92 \div 94$, $96 \div 99$)	261
	7.2 Радиационные времена жизни низколежащих состояний однозарядных положительных ионов ($Z=2 \div 21$, $24 \div 26$, $29 \div 31$, $36 \div 42$, 48 , $53 \div 57$, 73 , 74 , 80)	294
	7.3 Энергии возбуждения, каналы распада и радиационные времена жизни метастабильных состояний однозарядных положительных ионов ($Z \leq 83$)	302

		Стр.
7.4	Длины волны излучения, коэффициенты Эйнштейна и радиационные времена жизни водородоподобных атомных ионов ($n \lesssim 2$; $Z=2 \div 42$, 47÷56, 72÷83, 90, 92, 94)	306
7.5.	Длины волны излучения, коэффициенты Эйнштейна и радиационные времена жизни гелиеподобных атомных ионов ($n \leq 2$; $Z=2 \div 42$, 50, 60, 70, 80, 90, 100)	309
Гл. 8		
8.1	Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы частиц (H, M—H, M) (M— атом щелочного металла)	314
8.2	Коэффициент C_6 для двухатомной системы частиц (R—H, M, R) (R— атом щелочного металла)	315
8.3	Коэффициент C_6 для двухатомной системы частиц (R—He*, Be, C, N, O, F, Mg, P, S, Cl, Ca, Br, Sr, I, Ba, Hg)	315
8.4	Коэффициент C_6 для двухатомной системы частиц (атом щелочноземельного элемента, Hg— атом)	315
8.5	Коэффициент C_6 для системы частиц (атом— двухатомная, многоатомная молекула)	316
8.6	Коэффициент C_6 для системы частиц (двухатомная молекула— двухатомная многоатомная молекула)	316
8.7	Коэффициент C_6 в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы частиц (H, M, R—H, M, R)	316
8.8.	Коэффициент C_{10} в мультипольном разложении потенциала взаимодействия для двухатомной системы частиц (H, M, R—H, M, R)	317
8.9	Параметры потенциала дальнегодействующего обменного взаимодействия двух одинаковых атомов	318
8.10	Параметры короткодействующего отталкивательного потенциала взаимодействия $U_{\text{отт}}(r)$ для системы частиц (R—R, H, O, F, M, Hg, положительный атомный ион)	319
8.11	Параметры потенциала $U_{\text{отт}}(r)$ для системы частиц (R— отрицательный атомный ион)	320
8.12	Параметры потенциала $U_{\text{отт}}(r)$ для системы частиц (молекула—атом, молекула)	321
8.13	Параметры потенциальной ямы у двухатомных ван-дер-ваальсовых молекул типа (R—R, M, H, O, галогены, возбужденный атом)	322
8.14	Параметры потенциальной ямы у двухатомных ван-дер-ваальсовых молекул типа (Hg—M, R, Hg)	324
8.15	Параметры потенциальной ямы у двухатомных ван-дер-ваальсовых молекулярных ионов типа (R—M ⁺ , R ⁺ , H ⁺ , B ⁺ , C ⁺ , N ⁺ , O ⁺ , H ⁺ , F ⁺ , U ⁺ , Br ⁺)	324
8.16	Параметры потенциальной ямы у ван-дер-ваальсовых молекул типа (R— двухатомная молекула)	325
8.17.	Параметры потенциальной ямы у ван-дер-ваальсовых молекул типа (H— двухатомная молекула)	325
8.18	Параметры потенциальной ямы у ван-дер-ваальсовых молекул типа (H, He, Ar— многоатомная молекула)	326
Математические приложения		
П.1.1	Электронные термы для конфигураций эквивалентных электронов: s^n, p^n, d^n , и f^n	328
П.1.2	Генеалогические коэффициенты для конфигураций эквивалентных электронов: p^n	329
П.1.1	Таблица численных значений коэффициентов Клебша—Гордана при значениях аргумента $j \leq 3$, $j_{1,2} \leq 5/2$	331
П.1.2	Формулы для коэффициентов Клебша—Гордана при значениях аргумента $j_2=1/2, 1, 3/2$ и 2	340