

из истории физики

535.33(09)

**УСПЕХИ В ИССЛЕДОВАНИИ СПЕКТРОВ АТОМОВ И ИОНОВ
И СТЕПЕНЬ ИХ ИЗУЧЕННОСТИ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ****A. P. Стриганов****СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение	719
2. Исследование спектров после создания теории атома	720
3. Изученность спектров в настоящее время	721
4. Заключение	727
Цитированная литература	728

1. ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной задачей атомной спектроскопии является изучение спектров атомов и ионов. Опираясь на закономерности, установленные в спектрах, удалось построить модель атома, установить для многих атомов и ионов энергетические уровни и использовать атомную спектроскопию для решения важных научных и практических задач. Атомная спектроскопия как наука по изучению спектров атомов и ионов является далеко не законченной областью.

Началом систематического исследования спектров химических элементов считается 1859 г., когда Кирхгоф и Бунзен сформулировали известный закон об индивидуальности линейчатых эмиссионных спектров для каждого элемента. Это стимулировало изучение атомных спектров и вскоре привело к открытию 14 новых элементов в таблице Менделеева (Cs, Rb, Tl, In, He, Ga, Ge, Pr, Nd, Sm, Ho, Tm, Yb, Lu). Упомянутый закон послужил началом развития качественного спектрального анализа, а позже и количественного анализа на основе зависимости спектральных линий от концентрации данного элемента в анализируемой пробе.

Первые попытки интерпретировать атомные спектры были предприняты Ридбергом. В 1889 г. он установил, что волновые числа спектральных линий некоторых химических элементов могут быть представлены в виде разности двух числовых величин, которые были им названы спектральными термами. На основе различной структуры спектральных линий он подразделил термы на резкие, главные и диффузные. Первые буквы их английских названий стали использоваться в дальнейшем в качестве обозначений электронных оболочек атомов и термов. Физическое истолкование этих символов и ясное представление об атомных энергетических уровнях было дано Бором в 1913 г., создавшим на основе спектроскопических данных теорию атома. Он показал, что атомы могут находиться в различных атомных состояниях с разной энергией. Спектральные линии представляют собой излучение, возникающее при переходе атома из одного состояния в другое, причем частоты излучения пропорциональны разностям энергий

атомных уровней. С этого времени стала развиваться научно обоснованная спектроскопия атомов и ионов, включавшая классификацию спектров и установление энергетических уровней.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОСЛЕ СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ АТОМА

Интересно посмотреть, как происходило изучение спектров атомов и ионов, начиная с 1913 г., и чего достигла спектроскопическая наука в настоящее время. Наша задача облегчается тем, что в 1951 г. выдающимся американским ученым Вильямом Меггерсом была опубликована статья, в которой были собраны полные данные по исследованию и классификации спектров атомов и ионов за период с 1913 по 1951 г.¹. В статье показано, что к 1932 г. был исследован 231 спектр 69 химических элементов. Полученные на основе анализа спектров энергетические уровни были опубликованы тогда в известной книге Бечера и Гаудсмита². В это время в таблице Менделеева из 92 элементов от H до U четыре элемента не были открыты (Tc, Pm, At, Fr). Из известных 88 элементов для 19 спектры не были еще изучены. Поскольку каждый химический элемент может давать столько различных спектров, сколько имеется электронов в оболочке нейтрального атома, то число возможных спектров составляло тогда 4002. Изученность спектров можно характеризовать отношением всех исследованных спектров к общему числу спектров известных элементов. Таким образом, в 1932 г. изученность спектров атомов и ионов достигала 231/4002, т. е. 5,8%.

К 1951 г. было вновь исследовано 273 спектра. Общее число изученных спектров достигло 504 для 84 элементов. Энергетические уровни атомов и ионов были собраны в трехтомной книге (Мур³). В это время были известны 98 химических элементов, включая калифорний. Однако спектры 14 элементов оставались все еще не изученными (Pm, Ho, Er, Po, At, Fr, Ac, Ra, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf). Число возможных спектров 98 элементов составляло 4851. Отсюда изученность спектров в 1951 г. была 504/4851, т. е. 10,4%.

За последующие 30 лет (с 1951 по декабрь 1981 г.) учеными многих стран мира проведена большая работа по исследованию спектров атомов и ионов. Этому способствовали крупные успехи в развитии спектроскопической техники, что было связано с возникшими проблемами, где атомная спектроскопия оказалась очень полезной. Среди них упомянем спектральный элементный и изотопный анализ продуктов и материалов, используемых в атомной технике; исследование сложных спектров актинидных и редкоземельных элементов, их сверхтонкой и изотопической структуры; использование спектроскопической диагностики для определения основных параметров низкотемпературной и высокотемпературной плазмы.

В результате сложилось такое положение, что для самой атомной спектроскопии появились новые возможности для развития. При помощи ядерных реакторов были открыты новые химические элементы и получены их весовые количества. Началось изучение оптических спектров этих элементов, их классификация и установление энергетических уровней нейтральных атомов и первых ионов. В установках по исследованию высокотемпературной плазмы были получены спектры многозарядных ионов.

Начиная с 1967 г., много работ было посвящено изучению спектров высокоионизованных атомов. Существенный вклад был внесен советскими спектроскопистами. В Институте спектроскопии АН СССР под руководством Э. Я. Кононова за последние 15 лет изучены 140 спектров ионов 26 элементов в диапазоне от алюминия до олова. С высокой точностью из-

мерены длины волн спектральных линий, проведена их классификация и установлены энергетические уровни. Большая работа была выполнена в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР под руководством В. А. Бойко. Здесь были экспериментально изучены спектры водородоподобных, гелиеподобных и литиеподобных ионов в диапазоне элементов от натрия до серы, а также спектры ионов других элементов. Всего было исследовано около 50 спектров в рентгеновской области от 20 до 2 Å.

Для оценки изученности спектров атомов и ионов за последние 30 лет были использованы опубликованные журнальные статьи, собранные в библиографических справочниках Национального Бюро стандартов (НБС), США⁴⁻⁷. Кроме того, нами были учтены обобщенные данные избранных таблиц по атомным спектрам некоторых элементов⁸, новые книги по классифицированным спектральным линиям атомов и ионов⁹⁻¹³, по энергетическим уровням редкоземельных элементов¹⁴ и гrottриановским диаграммам¹⁵, а также реферативные статьи по этим же вопросам¹⁶⁻³², расчетные³³ данные по спектрам и уровням водородоподобных ионов^{33,34} и сборники по потенциалам ионизации^{35,36}. К этому следует добавить две обзорные статьи, опубликованные в 1981 г. В одной из них рассматривается классификация спектров высокоионизованных атомов за последние 7 лет³⁷. В ней представлены результаты внеатмосферных исследований спектров излучения Солнца, а также спектры, полученные с помощью различных типов высокотемпературных плазменных установок. Вторая статья посвящена развитию спектроскопии высокоионизованных атомов и ее использованию для диагностики плазмы³⁸.

Помимо этих публикаций, в нашем списке литературы приведены работы³⁹⁻¹⁰⁶ по исследованию спектров атомов и ионов, опубликованные с июля 1979 г., которые не вошли в библиографические справочники НБС. Эти работы позволили нам довести рассмотрение вопроса изученности до декабря 1981 г. По грубым оценкам за 30-летний период было опубликовано около 3000 оригинальных работ по исследованию спектров и энергетических уровней атомов и ионов.

3. ИЗУЧЕННОСТЬ СПЕКТРОВ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Положение с изученностью спектров атомов и ионов в настоящее время приводится в табл. I. В ней в первой вертикальной колонке даны последовательно символы 104 химических элементов от водорода до курчатовия. Каждая строка в таблице характеризует степень экспериментальной изученности всех исследованных спектров данного элемента, начиная с нейтрального атома и последующих ионов с возрастающей кратностью ионизации. В целях сопоставимости оценки степени изученности взята шкала Меггерса¹. Буквой A отмечены хорошо изученные спектры с достаточно полной системой энергетических уровней и с установленной связью между уровнями разной мультиплетности. Буква B означает, что спектр достаточно хорошо изучен, найдено много уровней разной мультиплетности. Буква C характеризует среднюю изученность спектра: найдено до 20 уровней, но связь уровней разной мультиплетности не установлена. Буква D показывает, что известно до 10 уровней. Буква E характеризует предварительную изученность, когда измерены длины волн линий, установлена их принадлежность к определенной ступени ионизации и даны один или несколько переходов. Маленькими буквами a, b, c, d, e отмечена изученность спектров на 1951 г. Это значит, что в последующие годы эти спектры не изучались.

Из табл. I видно, что спектры первых 20 элементов от водорода до кальция изучены довольно хорошо по всем ступеням ионизации. Дальше появляются проблемы. Водородоподобные спектры Sc, V,

Таблица I

Степень изученности спектров и энергетических уровней на декабрь 1981 г.

11*

27Co	A	A	A	C	A	B	B	B	C	C	C	D	D	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	-																										
28Ni	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	C	B	C	C	A	B	B	C	C	B	B	B	B	-																											
29Cu	-	A	A	A	A	B	A	B	B	C	C	C	D	E	C	D	C	B	C	B	C	C	D	D	C																										
30Zn	A	A	B	B	D	D	E	D	D	C	D	D	D	C	D	C	B	C	C	C	C	C	C	C	D	-																									
31Ga	A	A	B	B	B	B	B	B	E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	B	C	D	D	D	D	-																										
32Ge	A	A	G	G	B	B	B	B	E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	B	C	C	D	D	E	-																										
33As	A	A	G	C	B	B	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	B	C	C	D	D	D	-																										
34Se	A	A	B	B	C	B	B	B	E	E	E	E	E	E	E	E	E	D	D	C	C	D	D	D	-																										
35Br	A	B	C	C	C	D	C	C	B	E	E	E	E	E	E	E	E	D	C	C	D	D	D	D	-																										
36Kr	A	A	B	C	C	C	D	D	B	C	C	D	D	D	D	D	D	E	E	D	D	D	D	E	E	-																									
37Rb	-	A	A	A	C	D	D	C	d	e	e	e	e	e	e	e	e	E	E	E	E	E	E	E	E	-																									
38Sr	A	A	A	A	C	D	A	b	d	C	e	e	e	e	e	e	e	E	E	E	E	E	E	E	E	-																									
39Y	A	A	A	A	B	B	A	C	D	B	A	D	G	E	E	E	E	E	D	D	D	D	D	D	D	-																									
40Zr	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	B	A	D	C	C	C	C	E	E	D	D	D	D	D	-																										
41Nb	A	A	A	b	B	B	A	B	A	C	D	B	B	D	B	C	C	E	E	D	D	D	D	D	-																										
42Mo	A	A	B	D	C	C	C	B	B	B	C	D	D	B	D	B	B	D	E	E	E	E	E	E	E	D	D																								
43Tc	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-																								
44Ru	A	A	C	C	C	D	D	D	C	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
45Rh	B	B	B	B	B	B	B	B	C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
46Pd	A	A	A	A	A	A	A	A	C	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
47Ag	-	A	A	B	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	Li																								
48Cd	A	A	A	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
49In	A	A	B	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
50Sn	A	A	C	C	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	Rb	E	D	D	D	D	D	D	D	-																								
51Sb	A	C	C	C	D	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
52Te	A	B	C	C	C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
53I	A	B	C	C	C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	-																								
54Xe	A	A	A	C	E	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E																								
55Cs	A	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E																								
56Ba	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	E	Na																								
																		Ag																																	
																			Cu																																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52

Таблица I (продолжение)

П р и м е ч а н и я . *A*—спектр классифицирован и дана полная система уровней. *B*—найдено до 30 уровней разной мультиплетности. *C*—найдено до 20 уровней, связь разной мультиплетности не установлена. *D*—найдено до 10 уровней. *E*—установлен один или несколько переходов. Большие буквы—изученность на январь 1982 г., маленькие буквы—на 1951 г.

Mn, Co, Ni и последующих элементов, за исключением молибдена, экспериментально до сих пор не изучены. Для спектров этих одноэлектронных ионов имеются расчетные данные³⁴. Начиная с меди до молибдена многие спектры также не изучены или степень изученности низкая (*E*). После молибдена изученность спектров резко снижается. В этой области хорошо проанализированы лишь спектры нейтральных атомов и некоторых ионов. Изученные спектры более высоких степеней ионизации группируются в таблице в виде изоэлектронных последовательностей, которые отмечены наклонными линиями для Li I, Na I, K I, Cu I, Rb I, Ag I, Er I, Au I. Okolo этих линий располагаются изученные спектры многократно заряженных ионов соседних изоэлектронных последовательностей. Наиболее высокие ионизации с кратностью 45–52 получены для тяжелых элементов в районе Hf — Au в случае Ni-, Cu-, Zn-подобных ионов.

Таблица II
Изученность спектров по различным группам элементов

Диапазон элементов	Число элементов	Всего спектров	За 1951—1981 гг.		Всего изучено на декабрь 1981 г.	Из них изученность			Число неизученных спектров	Односторонняя изученность, %
			вновь изучено	улучшена изученность		<i>A</i> , <i>B</i>	<i>C</i> , <i>D</i>	<i>E</i>		
H—Ar	18	171	30	77	171	138	33		нет	100
K—Zn	12	294	137	117	279	144	130	5	15	94,9
Ga—Mo	12	438	161	43	243	82	99	62	195	55,5
Tc—Ba	14	693	70	22	136	41	51	44	557	19,6
La—Lu	15	960	78	23	106	42	28	36	854	11,0
Hf—Bi	12	930	42	20	75	38	17	20	855	8,1
Po—Ku	21	1974	44	5	53	12	26	15	1921	1,3
По всем спектрам	104	5460	562	307	1063	497	384	182	4397	19,5

В табл. II собраны данные, характеризующие изученность спектров по семи группам элементов и по всем элементам в целом. Из таблицы видно, что с увеличением порядкового номера элементов *Z* изученность спектров падает из-за недостаточной изученности спектров ионов. Объясняется это экспериментальными трудностями возбуждения многократно заряженных ионов и их исследования, поскольку резонансные линии ионов с кратностью ионизации больше 10 и потенциалами ионизации больше 1 кэВ попадают в рентгеновскую область. Высокая изученность первых трех групп элементов связана с расширением исследований высокотемпературной плазмы, которые способствовали изучению спектров многозарядных ионов с *Z* от 10 до 42. Изученность спектров по первым трем группам элементов достигла соответственно 100, 94,9 и 55,5 %. В последующих группах этот показатель падает до 19,6; 11,0 и 8,1 %. Для радиоактивных элементов (Po—Ku) изученность снижается до 1,3 %. В этой области из 1974 спектров изучено всего 53 спектра. Последняя строка табл. II показывает, что все известные в настоящее время химические элементы имеют 5460 спектров. Из них изучено 1063 спектра. Отсюда изученность спектров по всем элементам получается 19,5 %. Причем только одна половина этих спектров изучена хорошо (*A* и *B*) — 47 %, остальные требуют дальнейших исследований. А пятая часть попадает в группу *E* — 17 %, т. е. их исследование только начинается.

Наша статья по рассмотрению изученности спектров атомов и ионов в основном была подготовлена к середине 1981 г. В декабре стала известна статья Кауэна ³⁸. Оказалось, что таблицы изученности почти во всем совпадают. Различаются они лишь оценками степени изученности ряда спектров, что связано, по-видимому, с некоторым различием установленных критериев, а может быть, и с субъективностью оценок. Согласно работе ³⁸ на март 1981 г. было изучено 1019 спектров. Настоящая статья охватывает опубликованную литературу до декабря 1981 г. включительно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя данные ³⁸ и установленную на декабрь 1981 г. изученность 1063 спектров, можно проследить более детально за развитием исследований спектров, начиная с 1913 г. по настоящее время. В табл. III представ-

Таблица III

Изученность спектров в различные периоды

Год	Полная изученность спектров	Изучено за данный период	Число изученных спектров за год	Год	Полная изученность спектров	Изучено за данный период	Число изученных спектров за год
1913	0	0	0	1951	504	59	11,8
1922	38	38	4,2	1959	511	7	0,9
1932	231	193	19,3	1969	648	137	13,7
1939	400	169	24,1	1981	1063	415	34,6
1946	445	45	6,4				

влено изменение изученности спектров со временем. В первой колонке указан год оценки изученности спектров, во второй — дана полная изученность на этот год, в третьей и четвертой колонках приведено число изученных спектров и среднегодовая изученность за данный период.

Несомненно, первый подъем в исследовании спектров (1922—1939 гг.) вызван развитием боровской теории для сложных атомов, второй максимум связан с успехами в исследовании спектров многозарядных ионов (1969—1981 гг.). Минимум приходится на военные и послевоенные годы. Некоторый рост за период 1946—1951 гг. связан с исследованием спектров вновь открытых актинидных и других радиоактивных элементов.

В заключение отметим, что исследованию спектров атомов и ионов уделяется в настоящее время большое внимание и в последнее десятилетие достигнуты значительные успехи. К 1982 г. изученность спектров по всем элементам составила 19,5% против 10,4% в 1951 г. Если учитывать теоретические расчеты водородоподобных атомов ³⁴, то для первых 28 элементов (H — Ni) спектры изучены для всех ступеней ионизации. Изученность спектров последующих элементов от Cu до Mo остается все еще недостаточной и достигает 60,8%. Здесь из 497 спектров не изучено 195 спектров, а для 68 спектров установлено лишь по несколько классифицированных линий. Несомненно, эти спектры будут иметь важное значение в исследованиях высокотемпературной плазмы. И поэтому в ближайшее время усилия спектроскопистов, изучающих спектры ионов, будут направлены на решение этой проблемы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Meggers W. F.—J. Opt. Soc. Amer., 1951, v. 41, p. 143.
2. Bachelder R., Coudsmo S. Atomic Energy States as Derived from Analysis Spectra.—N. Y.: McGraw-Hill, 1932.
3. Moore C. E. Atomic Energy Levels.—Washington: Nat. Bur. Stand., v. 1 (H-V), 1949; v. 2 (Cr-Nb), 1952; v. 3 (Mo-La, Hf-Ac), 1958.
4. Moore C. E. Bibliography on the Analyses of Optical Atomic Spectra.—Washington: Nat. Bur. Stand., Sect. 1 (H-V), 1966; Sect. 2 (Cr.-Nb), 1969; Sect. 3 (Mo-La, Hf-Ac), 1969; Sect. 4 (La-Lu, Ac-Es), 1969.
5. Hagan L., Martin W. C. Bibliography on Atomic Levels and Spectra. July 1968 through June 1971.—Washington: Nat. Bur. Stand., 1972.
6. Hagan L. Bibliography on Atomic Levels and Spectra. July 1971 through June 1975.—Washington: Nat. Bur. Stand., 1977.
7. Zalubas R., Albright A. Bibliography on Atomic Levels and Spectra. July 1975 through June 1979.—Washington: Nat. Bur. Stand., 1980.
8. Moore C. E. Selected Tables of Atomic Spectra, Atomic Energy Levels and Multiplet Tables.—Washington: Nat. Bur. Stand., Sect. 1 (Si II-Si IV), 1965; Sect. 2 (Si I), 1967, Sect. 3 (C I — C VI), 1970; Sect. 5 (N I — N III), 1975; Sect. 6 (H, D, T), 1972; Sect. 7 (O I), 1976; Sect. 8 (O VI—O VIII), 1979; Sect. 9 (O V), 1980.
9. Kelly R. L., Palumbo L. J. Atomic and Ionic Emission Lines, Below 2000 Angstroms (H-Kr).—Washington: Naval Research Lab., 1973.
10. Kelly R. L. Atomic Emission Lines in the Near Ultraviolet (H—Kr). Sect. 1, 2.—Washington: NASA, 1979.
11. Meggers W. F., Moore C. E. The First Spectrum of Hafnium (Hf I); Monograph.—Washington: Nat. Bur. Stand., 1976.
12. Стриганов А. Р., Одинцова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов (H—Ar).—М.: Энергоиздат, 1982.
13. Стриганов А. Р. Атомный спектр и энергетические уровни нейтрального атома плутония.—М.: Энергоиздат, 1983.
14. Martin W. C., Zalubas R., Hagan L. Atomic Energy Levels. The Rare-earth Elements (La-Lu).—Washington: Nat. Bur. Stand., 1978.
15. Bashkin S., Stoner J. O. Atomic Energy Levels and Grotrian Diagrams.—Amsterdam: North-Holland, v. 1 (H I—P XV), 1975; Addenda v. 1, 1978; v. 2 (S I—Ti XXII), 1978.
16. Martin W. C. Energy Levels of Neutral Helium.—J. Phys. Chem. Ref. Data, 1973, v. 2, p. 257.
17. Odintzova G. A., Striganov A. R. The Spectrum and Energy Levels of Neutral Atom Boren.—Ibid., 1979, v. 8, p. 63.
18. Martin W. C., Zalubas R. Energy Levels of Sodium (Na I — Na XI).—Ibid., 1981, v. 10, p. 153.
19. Martin W. C., Zalubas R. Energy Levels of Magnesium (Mg. I — Mg XII).—Ibid., 1980, v. 9, p. 1.
20. Martin W. C., Zalubas R. Energy Levels of Aluminium (Al I — Al XIII).—Ibid., 1979, v. 8, p. 817.
21. Corliss C., Sugar J. Energy Levels of Potassium (K I — K XIX).—Ibid., p. 1109.
22. Sugar J., Corliss C. Energy Levels of Calcium (Ca I — Ca XX).—Ibid., p. 865.
23. Sugar J., Corliss C. Energy Levels of Scandium (Sc I — Sc XXI).—Ibid., 1980, v. 9, p. 473.
24. Corliss C., Sugar J. Energy Levels of Titanium (Ti I — Ti XXII).—Ibid., 1979, v. 8, p. 1.
25. Sugar J., Corliss C. Energy Levels of Vanadium (V I—V XXIII).—Ibid., 1978, v. 7, p. 4191.
26. Sugar J., Corliss C. Energy Levels of Chromium (Cr I — Cr XXIV).—Ibid., 1977, v. 6, p. 317.
27. Corliss C., Sugar J. Energy Levels of Manganese (Mn I — Mn XXV).—Ibid., p. 1253.
28. Reeder J., Sugar J. Energy Levels of Iron (Fe I — Fe XXVI).—Ibid., 1975, v. 4, p. 353.
29. Corliss C., Sugar J. Energy Levels of Nickel (Ni I — Ni XXVIII).—Ibid., 1981, v. 10, p. 197.
30. Zalubas R. Energy Levels, Classified Lines and Zeeman Effect of Neutral Thorium (Th I).—J. Res. Nat. Bur. Stand. Ser. A, 1976, v. 80, p. 221.

31. O ut red M. Tables of Atomic Spectral Lines for the 10 000 Å to 40 000 Å Region.— *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1978, v. 7, p. 1.
32. K auf man V., E d l é n B. Reference Wavelengths From Atomic Spectra in the Range 15 Å to 25 000 Å.— *Ibid.*, 1974, v. 3, p. 825.
33. G arcia J. D., M ack J. E. Energy Level and Line Tables for One-Plertron Atomic Spectra (Z=1 to 20).— *J. Opt. Soc. Amer.*, 1965, v. 55, p. 654.
34. E rick s o n G. W. Energy Levels of One-Electron Atoms (Z=1 to 105).— *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1977, v. 6, p. 831.
35. M oore C. E. Ionization Potentials and Ionization Limits (H — Po).— Washington: Nat. Bur. Stand., 1970.
36. M artin W.C., H agan L., R eader J., S ug ar J. Ground Levels and Ionization Potentials for Lanthanide and Actinide Atoms and Ions.— *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1974, v. 3, p. 771.
37. F awcett B. C. Classification of the Spectra of Highly Ionised Atoms during the Last Seven Years.— *Phys. Scripta*, 1981, v. 24, p. 663.
38. C ow an R. D. Progress in Spectroscopy of Highly Ionized Atoms and Its Use in Plasma Diagnostics.— *Ibid.*, p. 615.
39. E d l é n B.— *Ibid.*, 1981, v. 23, p. 1079.— В-подобные спектры В I-Ni XXIV, дл. волн, клас., уровни.
40. B azzon i M., T ozz i G. P., C ant u A. M., P ettini M.— *Physica*, Ser. C, 1981, v. 111, p. 379.— С I, обл. 12000—1100 Å, дл. волн, класс. уровни.
41. E d l é n B.— *Phys. Scripta*, 1979, v. 20, p. 129.— Ве-подобные спектры ионов С III — Fe XXII, дл. волн, клас., уровни.
42. F awcett B. C., R idgeley A.— *J. Phys. Ser.*, B., 1981, v. 14, p. 203.— Li-подобные спектры ионов Mg X — Fe XXIV, Р XI, Р XII, дл. волн, клас., уровни.
43. S v endenius N.— *Phys. Scripta*, 1980, v. 22, p. 240.— Р I, обл. 11 500—1100 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $84\ 580,83 \pm 0,05\ \text{см}^{-1}$.
44. S v endenius N., V erges J.— *Ibid.*, p. 288.— Р I, обл. 1—4 мк, дл. волн, клас., сверх. тонк. структ.
45. J oelsson I., Z etterberg P. O., M agnusson C. E.— *Ibid.*, 1981, v. 23, p. 1087.— S V, обл. 7800—130 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $585514,1 \pm 1,0\ \text{см}^{-1}$.
46. J oelsson I., Z etterberg P. O., M agnusson C. E.— *Ibid.*, 1979, v. 20, p. 145.— S. VI, обл. 8000—100 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $710194,7\ \text{см}^{-1}$.
47. F awcett B. C., R idgeley A., H atter A. T.— *J. Opt. Soc. Amer.*, 1980, v. 70, p. 1349.— Li-, Be-, B-, C-, N-подобные спектры ионов от Ar до V, дл. волн, клас., уровни.
48. B rown C. M., G inter M. L.— *Ibid.*, p. 87.— Ca I, спектр поглощения, обл. 1430—1340 Å.
49. J ohansson S., L itzen U.— *Phys. Scripta*, 1980, v. 22, p. 49.— Sc II, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $103237,4 \pm 2\ \text{см}^{-1}$.
50. K astner S. O., B hatia A. K.— *J. Opt. Soc. Amer.*, 1979, v. 69, p. 1391.— Mg-подобные спектры V XII, Cr XIII, Mn XIV, Co XVI, дл. волн, клас., уровни.
51. B retton C., M ichelis C. D., F inkenthal M., M attioli M.— *Ibid.*, p. 1652.— Be-, F-подобные спектры Cr XXI—XXI; Fe XVIII—XXIII, Ni XX—XXV, обл. 200-80 Å, дл. волн, клас.
52. L awson K. D., P easock N. J.— *J. Phys. Ser. B*, 1980, v. 13, p. 3313.— Li-, F-, Na-подобные спектры Cr XIV—XXII, Mn XV—XXIII, Fe XVI—XXIV, Co XVII—XXV, Ni XVIII—XXVI, дл. волн, клас., уровни.
53. Р амонас А. А., Р ябцев А. Н.— Опт. и спектр., 1980, т. 48, с. 631.— К-подобные спектры Mn VII — Cu XI, обл. 260—90 Å, дл. волн, клас., уровни.
54. К овалев В. И., Р амонас А. А., Р ябцев А. Н.— Лит. физ. сб., 1975, т. 15, с. 915.— Fe VI, дл. волн, клас., уровни.
55. E kberg J. D.— *Phys. Scripta*, 1981, v. 23, p. 7.— Fe VII, обл. 1362—104 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $1\ 008\ 000 \pm 100\ \text{см}^{-1}$.
56. G ordon H., Hobly M. G., P easock N. J.— *J. Phys. Ser. B*, 1980, v. 13, p. 1985.— Ne-, F-, O-подобные спектры от Fe до Br, Na-подобные спектры от Ga до Br, обл. 17—5 Å, дл. волн, клас., уровни.
57. Р ябцев А. Н., Р амонас А. А.— Опт. и спектр., 1980, т. 49, с. 1050.— Co VII, обл. 260—200 Å, дл. волн, клас., уровни.
58. F awcett B. C., R idgeley A., E kberg J. O.— *Phys. Scripta*, 1980, v. 21, p. 155.— Co VIII, обл. 182—105 Å, дл. волн, клас., уровни, а также изоэлектр. линии Ni IX, Cu X.

59. Raassen A. J. J.—Physica. Ser. C., 1980, v. 100, p. 404.—Ni VI, обл. 335—220 и 1325—890 Å, дл. волн, клас., уровни.
60. Рябцев А. Н.—Астрон. ж., 1979, т. 56, с. 1293.—Ni IX—Ni XII, дл. волн. клас.
61. Воико В. А., Пикуз С. А., Сафонова А. С., Фаевов А. Я.—Phys. Scripta, 1979, v. 20, с. 138.—Ni XX, Cu XXI, обл. 13—11 Å, дл. волн, клас., уровни.
62. Longmire M. S., Brown G. M., Ginter M. L.—J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 423.—Cu I, абсорбционный спектр, обл. 2500—1570 Å, дл. волн, клас., пот. иониз. $62317, 44 \pm 0,10 \text{ см}^{-1}$.
63. Menders E., Uijlings P.—Physica, Ser. C, 1980, v. 100, p. 389.—Cu IV, обл. 1275—750 Å, дл. волн, клас., уровни.
64. Raassen A. J. J., Van Kleef Th. A. M.—Physica. Ser. C, 1981, v. 103, p. 412.—Cu VI, обл. 1330—950 и 310—210 Å, дл. волн, клас., уровни.
65. Hutchison R. J., Cooke L., Key M. H., Lewis C. L. S., Vromage G. E., Phys. Scripta, 1980, v. 21, p. 89.—Ne-, F-подобные спектры от Cu до Sr, рентгеновская область, дл. волн, клас.
66. Hutchison R. J., Vromage G. E., Coake R. L., Key M. H., Lewis C. L. S.—J. Phys. Ser. B, 1980, v. 13, p. 673.—F-подобные спектры от Cu до As, обл. 9—7 Å, дл. волн, клас.
67. Рамонас А. А., Рябцев А. Н.—Лит. физ. сб., 1979, т. 19, с. 513.—Ge VI, обл. 110—200 Å, дл. волн, клас., уровни.
68. Подобедова Л. И., Рамонас А. А., Рябов А. Н.—Опт. и спектр., 1980, т. 49, с. 453.—Ge VII, обл. 210—160 Å, дл. волн, клас., уровни.
69. Li H. H., Andrew K. L.—J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 719.—As I, обл. 11 244—1937 Å, дл. волн, клас., уровни.
70. Pinnington E. H., Vaughan J. L., Kegnahan J. A., Irwin D. J. G.—J. Phys. Ser. B, 1981, v. 14, p. 1291.—As V, обл. 1903—336 Å, дл. волн, клас., уровни.
71. Van Kleef Th. A. M., Yoshi Y. N.—J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 491.—As VI, As VII, обл. 1200—500 и 300—100 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. As VI $974\ 000 \text{ см}^{-1}$.
72. Yoshi Y. N., Van Kleef Th. A. M.—Phys. Scripta, 1981, v. 23, p. 249.—Br IX, обл. 125—104 Å, дл. волн, клас., уровни.
73. Fawcett B. C., Vromage G. E.—J. Phys. Ser. B, 1980, v. 13, p. 2711.—Kr IV, Kr V, Xe VI, обл. 900—460 Å, дл. волн, клас., уровни.
74. Acquista N., Reader J.—J. Opt. Soc. Amer., 1981, v. 71, p. 569.—Sr X, обл. 630—70 Å, дл. волн, клас., уровни; Sr IX, Sr XI, Sr XII, новые данные по резонансным линиям.
75. Богданович М. И., Кононов Э. Я., Меркелис Г. М., Рамонас А. А., Рябцев А. Н., Чурилов С. С.—Опт. и спектр., 1980, т. 49, с. 447.—Fe-подобные спектры от Y XIV до Mo XVII, обл. 100—60 Å, дл. волн, клас., уровни.
76. Reader J., Ryabtsev A.—J. Opt. Soc. Amer., 1981, v. 71, p. 231.—Fe-подобные спектры от Sr XIII до Mo XVII, обл. 99—66 Å, дл. волн, клас., уровни.
77. Reader J., Acquista N.—Ibid., p. 434. As-подобные спектры Y VII, Zr VIII, Nb IX, Mo X, обл. 824—143 Å, дл. волн, клас., уровни.
78. Wyatt J. F., Reader J., Ryabtsev A.—Ibid., p. 692.—Zn-, Cu-подобные спектры Y XI, Zr XII, Nb XIII, Mo XIV, обл. 78—54 Å, дл. волн, клас., уровни.
79. Reader J., Acquista N.—Ibid., 1979, v. 69, No. 9, p. 1285, Y XI, обл. 630—70 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $1\ 660\ 000 \pm 200 \text{ см}^{-1}$.
80. Schweitzer N. et al.—Ibid., 1981, v. 71, p. 249.—Ni-подобные спектры Y XII, Zr XIII, Nb XIV, Mo XV, Ru XVII, Rh XVIII, Pd XIX, Ag XX, обл. 73—18 Å, дл. волн, клас.
81. Khan Z. A., Chaghtai M. S. Z., Rahimullah K.—Phys. Scripta, 1981, v. 23, p. 29.—Zr III, обл. 2531—640 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $186400 \pm 500 \text{ см}^{-1}$.
82. Rahimullah K., Khan Z. A., Chaghtai M. S. Z.—Phys. Scripta, 1980, v. 22, p. 493.—Zr IV, обл. 2531—377 Å, дл. волн, клас., уровни.

83. Acquista N., Reader J. — J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 789. Zr IV, обл. 2670—440 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. 277605.8 ± 1.5 см $^{-1}$.
84. Khan Z. A., Rahimullah K., Chaghtai M. S. Z. — Phys. Scripta, 1981, v. 23, p. 843. Zr V, обл. 2550—250 Å, дл. волн, клас., уровни.
85. Khan Z. A., Chaghtai M. S. Z., Rahimullah K. — Ibid., p. 837. — Zr VI, обл. 2307—410 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $776\ 500 \pm 500$ см $^{-1}$.
86. Khan Z. A., Chaghtai M. S. Z., Rahimullah K. — J. Phys. Ser. B, 1980, v. 13, p. 2517. — Zr VIII, обл. 2550—250 Å, дл. волн, клас., уровни.
87. Chaghtai M. S. Z., Khan Z. A., Rahimullah K. — Ibid., p. 2523. — Zr IX, обл. 724—330 Å, дл. волн, клас., уровни.
88. Reader J., Acquista N. — J. Opt. Soc. Amer., 1979, v. 69, p. 1659. — Zr XII, обл., 630—70 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $1\ 905\ 500 \pm 200$ см $^{-1}$.
89. Kagan D. T., Conway J. G., Meinder E. — Ibid., 1981, v. 71, p. 1193. Nb V, обл. 5310—310 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $407\ 897 \pm 40$ см $^{-1}$.
90. Reader J., Acquista N. — Ibid., 1980, v. 70, p. 317. — Nb XIII, обл. 70—63 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $2\ 166\ 300 \pm 300$ см $^{-1}$.
91. Burkhalter P. G., Reader J., Cowan R. D. — Ibid., p. 912. — Mo XVI, обл. 48—43 Å, дл. волн, клас., уровни.
92. Aglitsky E. V., Golts E. Ya., Levyn Ya. A., Livshits A. M. — J. Phys. Ser. B, 1981, v. 14, p. 1549. — Не-подобные спектры Ag XXXVIII, Cd XXXIX, In XL, Sn XLI, обл. 3—4 Å, дл. волн, клас.
93. Van Kleef Th. A. M., Yoshi Y. N., Uijlings P. — Phys. Scripta, 1980, v. 22, p. 353. — Cd. III, обл. 2100—500 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $302\ 200$ см $^{-1}$.
94. Van Kleef Th. A. M., Yoshi Y. N. — Ibid., 1981, v. 24, p. 557. — In IV, Sn V, обл. 1500—500 Å, дл. волн, клас., уровни.
95. Van Kleef Th. A. M., Yoshi Y. N. — J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 895. — Sb VII, обл. 2100—600 Å, дл. волн, клас., уровни.
96. Yoshi Y. N., Van Kleef Th. A. M. — Ibid., p. 1344. — I IX, обл. 300—80 Å, дл. волн, клас., уровни.
97. Bashkin S., Hallin R., Leavitt J., Walker D. — Phys. Scripta, 1981, v. 23, p. 5. — Xe VIII, обл. 3000—500 Å, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $854\ 705 \pm 75$ см $^{-1}$.
98. Conturie Y., Yaakobi B., Feldman U., Doschek G. A., Cowan R. D. — J. Opt. Soc. Amer., 1981, v. 71, p. 1309. — Xe XLIV, XLV, XLVI, XLVII, обл. 3.0—2.5 Å, дл. волн, клас.
99. Van Kleef Th. A. M., Yoshi Y. N. — Ibid., p. 55. — Cs XI, обл. 300—80 Å, дл. волн, клас., уровни.
100. Klapisch M. et al. — Phys. Lett. Ser. A, 1980, v. 79, p. 67. — Ni-подобные спектры Tm XLII, Yb XLIII, обл. 9—5 Å, дл. волн., клас.
101. Wyart J. F., Camus P. — Phys. Scripta, 1979, v. 20, p. 43. — Yb I, обл. 24 550—3050 Å, дл. волн, клас. уровни; Yb II, обл. 9820—1630 Å, дл. волн, клас., уровни.
102. Wyart J. F., Kaufman V., Sugar J. — Ibid., 1981, v. 23, p. 1069. — Изоэлектронные спектры Lu IV, Hf V, Ta VI, W VII, дл. волн, клас., уровни.
103. Ziegler A. et al. — J. Opt. Soc. Amer., 1980, v. 70, p. 129. Hf XLV, Ta XLVI, W XLVII, Re XLVIII, обл. 8—5 Å, дл. волн, клас.
104. Yannitti E., Cantu A. M., Grisendi T., Tozzoli G. P. — Phys. Scripta, 1979, v. 20, p. 156. — Абсорбционный спектр, дл. волн, клас. уровни.
105. Wyart J. F., Kaufman V. — Ibid., 1981, v. 24, p. 941. Th III, дл. волн, клас., уровни, пот. иониз. $147\ 800 \pm 400$ см $^{-1}$.
106. Chaptai M. S. Z., Ahmad T. The Molybdenum Spectra Mo I—XLII. — Department of Physics, A. M. U., Aligarh-202001, India; Reproduced by IAEA: Vienna, Wagramerstrasse 5, A-1400, — Vienna, 1982.