

Зоммерфельд А.

Строение атома и спектры

Том 1

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
3-83

3-83 **Зоммерфельд А.**
Строение атома и спектры: Том 1 / Зоммерфельд А. – М.: Книга по Требованию, 2021. – 591 с.

ISBN 978-5-458-33301-6

Классическая монография по квантовой механике, завершающая серию монографий, суммирующих большой этап развития этой весьма важной области физики. Автор является одним из создателей квантовой механики. Ему принадлежат решения многих её задач. В первом томе рассматривается теория атома. Рассчитана на студентов, аспирантов и научных работников.

ISBN 978-5-458-33301-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

А. ЗОММЕРФЕЛЬД

СТРОЕНИЕ АТОМА И СПЕКТРЫ

ТОМ I

Перевод с немецкого

К. П. ГУРОВА

Под редакцией

проф. Н. Б. БОРОВСКОГО

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1956

АННОТАЦИЯ

Классическая монография по квантовой механике, завершающая серию монографий, суммирующих большой этап развития этой весьма важной области физики. Автор является одним из создателей квантовой механики. Ему принадлежат решения многих её задач.

В первом томе рассматривается теория атома.

Рассчитана на студентов, аспирантов и научных работников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода	10
Глава I. Предварительные сведения	11
§ 1. Обзор развития электродинамики	11
§ 2. Атомизм электричества; ион и электрон	12
§ 3. Катодные и каналовые лучи	17
§ 4. α - и β -лучи	22
§ 5. Рентгеновские и γ -лучи	27
§ 6. Фотоэлектрический эффект. Предварительные сведения из квантовой теории	37
§ 7. Волновая и квантовая теории. Эффект Комптона	44
§ 8. Радиоактивность	51
Глава II. Спектр водорода	59
§ 1. Заряд ядра и атомный номер; атом как планетарная система	59
§ 2. Эмпирические сведения о спектрах водорода, комбинационный принцип	65
§ 3. Введение в квантовую теорию. Осциллятор и ротатор	72
§ 4. Боровская теория серии Бальмера	79
§ 5. Учёт движения ядра	85
§ 6. Введение в механику Гамильтона	90
§ 7. Эллиптические орбиты для атома водорода	102
§ 8. Пространственное квантование кеплеровских орбит. Теория магнетона	111
Глава III. Естественная система элементов	120
§ 1. Малые и большие периоды; атомный вес и порядковый номер	120
§ 2. Радиоактивные превращения и теория изотопов	124
§ 3. Периферийные и центральные свойства атома. Химическая систематика. Конфигурация благородных газов	131
§ 4. Введение в теорию периодической системы; принцип Паули	136
§ 5. Построение элементов в периодической системе	141
§ 6. Некоторые сведения из ядерной физики	149
Глава IV. Рентгеновские спектры	158
§ 1. Открытие Лауэ	158
§ 2. Методы измерений длин волн	166
§ 3. Общий обзор K -, L - и M -серий и соответствующих границ возбуждения	177
§ 4. K -серия. Следствия для периодической системы элементов	183
§ 5. L -серия. Дублетные соотношения	190
§ 6. Граница возбуждения и край поглощения. Закономерности в поведении коэффициента поглощения	202
§ 7. Общая систематика рентгеновских спектров; таблица термов. Правила отбора; рентгеновские нескровые спектры; связь с периодической системой	211
Глава V. Теория тонкой структуры	224
§ 1. Релятивистское рассмотрение кеплеровского движения	224
§ 2. Общие следствия. Расщепление и релятивистская поправка	230
§ 3. Сравнение с опытом	234

§ 4. Релятивистский дублет в рентгеновской области	243
§ 5. Экранирующие, или иррегулярные, дублеты	249
§ 6. Спектроскопические универсальные единицы измерения; спектроскопическое подтверждение теории относительности	253
Глава VI. Поляризация и интенсивность спектральных линий	259
§ 1. Принцип соответствия Бора в случае атома водорода	259
§ 2. Орбиты водородного электрона при эффекте Штарка	265
§ 3. Расщепление бальмеровских линий при эффекте Штарка	275
§ 4. Нормальный эффект Зеемана	283
§ 5. Аномальный эффект Зеемана	290
§ 6. Адиабатическая гипотеза	299
Глава VII. Общие закономерности серий	309
§ 1. Эмпирический материал, касающийся <u>схем серий</u>	309
§ 2. Представление серий математическими формулами. Принцип отбора для азимутального квантового числа	316
§ 3. Изучение схем серий <u>методом электронных ударов</u>	325
§ 4. Квантовая теория серийной формулы. <u>Проникающие и непроникающие орбиты</u>	338
§ 5. Приращение представления термов рентгеновских спектров	345
§ 6. Величины термов; <u>взаимосвязь с периодической системой</u>	347
§ 7. Серийные системы с различными границами, с различным строением атомного <u>остова</u>	351
§ 8. Искровые спектры различного порядка. «Оголенный» атом и присутствующие ему закономерности	355
Глава VIII. Сложная структура серий термов	365
§ 1. Внутренние квантовые числа; теория мультиплетов	365
§ 2. Чередование четных и нечетных термов в периодической системе	375
§ 3. Связь Рэсселла — Сауидерса. Система термов для заданной конфигурации при двух внешних электронах	384
§ 4. Многоэлектронные конфигурации. Группа железа и группа редких земель. Спектры благородных металлов в сравнении со спектрами щелочных элементов. Спектр железа	395
§ 5. Другие связи	409
§ 6. Аномальный эффект Зеемана мультиплетов	414
§ 7. Эффект Пашена — Бака	427
§ 8. К теории магнетона	442
§ 9. Интенсивность спектральных линий	456
§ 10. Расщепления мультиплетных термов. Сверхтонкая структура	471
Глава IX. Полосатые спектры	485
§ 1. Исторические сведения. Единство в <u>представлениях</u> десландровского и бальмеровского термов	485
§ 2. Инфракрасные полосы поглощения. Вращательные и вращательно-колебательные спектры	488
§ 3. Полосы в <u>видимой области спектра</u> . Истолкование кантов	496
§ 4. Правило для кантов полос и системы полос	501
§ 5. Многолинейчатые спектры	505
§ 6. Прецессионное движение молекул	510
§ 7. Мультиплетная структура полосатых спектров	513
Математические дополнения	520
1. Рассеяние связанным электроном	520
2. Доказательство инвариантности уравнений Гамильтона относительно преобразований в любую систему координат. Касательные преобразования	523
3. Относительно соотношения между кинетической и потенциальной энергиями в кулоновском поле	528
4. Оценка отдельных интегралов по комплексному контуру	529

5. Дальнейшие подробности, касающиеся механики Гамильтона, угловых координат, теории возмущений, сил, не имеющих потенциала	534
6. Теория Гамильтона в релятивистской механике	541
7. Принцип соответствия Бора	544
8. Сохранение момента количества движения при излучении	556
9. Эффект Штарка второго порядка	567
10. Адиабатическая инвариантность фазового интеграла	569
11. Относительно спектров водородоподобных атомов. Замечания об атомном дополнительном поле при непроникающих орбитах	571
12. Расщепление мультиплетных термов	573
13. Квантование ангармонического осциллятора при наличии одновременного вращения	583
Алфавитный указатель	587

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга А. Зоммерфельда «Строение атома и спектры» выходит в переводе на русский язык второй раз. Первый раз этот перевод, выполненный со второго немецкого издания, вышел в 1927 г.; второй раз перевод с немецкого издания, значительно расширенного и переработанного, выходит почти через 30 лет.

За эти годы в развитии теоретической и экспериментальной физики произошли огромные сдвиги, созданы совершенно новые разделы физики атома и атомного ядра. Эти достижения отражены в большом числе монографий и учебников, вышедших у нас в Советском Союзе и за рубежом. Поэтому если первое издание перевода книги А. Зоммерфельда сыграло большую роль как одна из первых книг по новейшим вопросам строения атомов и спектров, то настоящий перевод с издания 1952 г. представляет большой интерес как подробное учебное пособие для широкого круга читателей: студентов младших курсов вузов, преподавателей вузов и средних школ.

Значение книги А. Зоммерфельда определяется тем, что, во-первых, она написана одним из крупнейших современных физиков-теоретиков, которому принадлежит разработка ряда разделов теории строения атома и спектров, тонкой структуры спектров, релятивистской теории характеристических рентгеновских спектров, квантовой теории непрерывного спектра и т. д., и, во-вторых, тем, что в ней даны подробные выводы основных закономерностей строения атомов и спектров в рамках классической и боровской квантовой механики. Выводы даны настолько подробно (с включением необходимых методов решения в математические приложения), что, пользуясь книгой, не приходится прибегать к специальным руководствам других авторов. Наконец, в книге удачно сочетаются достаточно строгие математические доказательства с ясной физической интерпретацией с единой точки зрения сложных явлений микромира атома. Кроме того, в книге собран богатый фактический материал по истории развития атомной физики.

Книга не свободна от некоторых недостатков. Как и большинство зарубежных авторов, А. Зоммерфельд почти совершенно не освещает результатов работ русских и советских ученых (Д. И. Менделеева, Н. А. Умова, А. Г. Столетова, П. Н. Лебедева, Д. С. Рождественского, В. П. Линника и др.).

Недостаточно полно освещены новейшие опытные результаты по тонкой и сверхтонкой структуре спектров атомов и др. Вместе с тем для пояснения рассматриваемых теоретических выводов приводимый экспериментальный материал в подавляющем большинстве случаев достаточен. Поэтому в настоящем переводе при редактировании мы ограничились лишь небольшим числом примечаний.

ГЛАВА I

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1. ОБЗОР РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

В первой половине XIX века электродинамика представляла собой ряд различных элементарных законов. Копируя ньютоновские законы тяготения, они утверждали наличие непосредственного дальнего действия, которое с места нахождения одного электрического заряда, или магнита, «перепрыгивая» через всё промежуточное пространство, действует на место нахождения другого электрического заряда или магнита.

Во второй половине XIX века возникло представление, согласно которому электромагнитное поле при своём непрерывном расширении распространяется от точки к точке в пространстве и во времени; это была «*полевая теория*», противоположная «*теории дальнего действия*». Эта теория была заложена трудами Фарадея, разработана Максвеллом и увенчана Герцем. Согласно этим представлениям электромагнитное поле постепенно распространяется в пространстве и во времени. Уравнения Максвелла показывают, как векторы электрического и магнитного полей устанавливаются перпендикулярно друг к другу, как в каждом месте поля вследствие изменения магнитной напряжённости возникает электрическая напряжённость, как электрический ток создаёт вокруг себя магнитное поле. Промежуточная среда, в том числе и непроводящая, обладает определённой «пропускной способностью» (проницаемостью) и восприимчивостью (диэлектрическая способность как относительно магнитных, так и электрических силовых линий); соответственно этому в каждом месте пространства свойства среды в этом месте влияют на характер дальнейшего распространения электромагнитного поля.

Это воззрение отпраздновало свой полный триумф, когда Герц смог причислить к электромагнитным явлениям такое явление природы, как свет, который был в то время полной загадкой. После того как Максвелл высказал догадку, что свет является векторным полем (он смог вычислить скорость света, исходя только из чисто электрических измерений Кольрауша). Герц провёл свой опыт с «потоком электрической напряжённости», который прямо продемонстрировал, как излучение отражается, преломляется, фокусируется подходящим вогнутым зеркалом и распространяется в пространстве со скоростью света. Воспроизведённые Герцем электрические волны имели длину волны порядка нескольких метров. От них почти через непрерывную цепь явлений, связанных с тепловым излучением, или инфракрасными волнами, можно перейти к собственно световым волнам, длина волны которых всё ещё составляет несколько микрон (μ). В качестве наибольшего и наиболее грубого звена этой цепи в дальнейшем (причем непосредственно исходя из опытов Герца) были добавлены волны беспроволочной телеграфии, длина волн которых исчисляется километрами (с кораблей

посылают сообщения при помощи 12-километровых волн); как мы увидим в дальнейшем, на другом конце этой цепи она замыкается наиболее малым и тонким звеном — рентгеновским излучением и ему подобным, но более коротковолновым γ -излучением, а также волновыми излучениями, в общем случае встречающимися при ядерных процессах.

Герц умер 1 января 1894 г. в возрасте 37 лет. Можно было бы думать, что работы Герца в последние годы его короткой жизни, а также работы его последователей были посвящены дальнейшим экспериментам с волнами для уточнения и упрочения теории электромагнитных волн. Однако уже последняя экспериментальная работа Герца «Относительно прохождения катодных лучей через тонкие металлические слои» (1891 г.) была нацелена в другом направлении.

В теории поля главное внимание стали обращать не на разъяснение причины отклонения силовых линий и обсуждения регулярного распространения поля; теперь стало существенным изучить сингулярности поля, заряды. Лучшие возможности для такого изучения представляет *катодная трубка*, высокоэвакуированная заряженная трубка, ещё более сильно выкачанная, чем так называемая *трубка Гейслера*. Здесь получается электричество в «чистом виде», не отягощённое обычным веществом и к тому же прямолинейно движущееся с предельной скоростью: катодные лучи — корпускулярные потоки отрицательного электричества. Правда, сам Герц, а также вначале и его выдающийся ученик Ленард придерживались прямо противоположного представления, считая, что эти лучи имеют волновой характер; однако Герц сознавал значение в будущем исследований с катодными лучами. Этому он содействовал собственными руками, поскольку сам отвлёк внимание людей от только что созданных своих работ и нацелил учёных следующего поколения на решение новых задач: не распространение силовых линий, а источник их возникновения — заряд будет наиболее интересен для последующего. Завершение Герцем собственно максвелловской теории придало последней колоссальную практическую ценность (например, для электротехники, радиотелеграфной связи), причём теория в завершённом виде позволяет в этих случаях удобным способом определять среднее значение электрических величин. Однако для более глубокого проникновения в отдельные детали, для более ясного понимания элементарных актов требуется более углублённое представление. Место *максвелловской электродинамики* занимает *лоренцовская электродинамика*, а место непрерывного поля — дискретный атомизм электричества. Таким образом, вместо *теории дальнего действия* и *теории полевого взаимодействия* появляется атомистическое представление электромагнетизма — *электронная теория*.

§ 2. АТОМИЗМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА; ИОН И ЭЛЕКТРОН

Атомизм вещества был установлен настолько глубоко, насколько это удавалось химической науке; без такого атомизма теряет свой смысл фундаментальный закон химии — закон кратных отношений. Однако нельзя сказать, что не было противников атомистических воззрений. Таким противником был Гёте; однако факты — в особенности факт возможности разложения вещества — свидетельствовали против Гёте, разрушали чисто мысленные человеческие построения. Точно так же и довольно крупный учёный и философ Мах¹⁾ рассматривал «атомистическую гипотезу» как нечто преходящее.

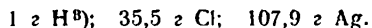
¹⁾ Мах — немецкий философ и физик-теоретик конца XIX века, один из создателей идеалистической теории «принципиальной координации субъекта и объекта», родоначальник современной буржуазной теории индетерминизма. Уничтожающей

Он предпочитал описывать процессы, исходя из представлений о непрерывности вещества и непрерывных законов взаимодействия. Последним (среди достойных внимания) противником представления об атоме был энергетик Оствальд.

В настоящее время ввиду убедительных успехов применения атомистических взглядов во всех областях физической науки замолкли всякие возражения против атомистических воззрений. Этому во многом содействовало исчерпывающее объяснение броуновского движения, чем со всей очевидностью была подтверждена та часть атомистической гипотезы, которая касалась наличия теплового движения в жидкости. Не менее внушительным свидетельством в пользу атомистического строения твёрдого тела явилось открытие Лауэ, о котором мы будем говорить в гл. IV.

Из атомизма вещества вытекает как необходимое следствие *атомизм электричества*. Это одновременно было высказано Гельмгольцем и Стонеем. В своем докладе на Фарадеевском чтении в 1881 г. Гельмгольц, основываясь на открытом и математически сформулированном Фарадеем правиле электролиза, сказал ¹⁾: «Если принять существование атомов химических элементов, то нельзя удержаться от того, чтобы не сделать дальнейшего заключения, что также и электричество, как положительное, так и отрицательное, распадается на определённые элементарные кванты, которые ведут себя как атомы электричества. Каждый ион ²⁾, до тех пор пока он движется в жидкости, каждой своей валентностью остаётся связан с электрическим эквивалентом».

В самом деле, правило Фарадея гласит: *одно и то же количество электричества при своем разряде в различных электролитах всегда выделяет химически эквивалентные количества продуктов разложения*. Химически эквивалентные количества означают количества одновалентных элементов, весовые отношения которых равны отношениям атомных весов соответствующих элементов. Например,



Для выделения указанных количеств (химических эквивалентов), согласно правилу Фарадея, всегда требуется одно и то же количество электричества, пропускаемого через электролиты, а именно «эквивалентный заряд»:

$$F = 96\,494 \text{ кулона}^4) = 9649 \text{ CGSM}.$$

Постоянство весовых отношений: 1 г Н; 35,5 г Cl и 107,9 г Ag можно понять, исходя из *атомизма вещества*: в 1 г Н содержится столько же атомов Н, сколько атомов Cl содержится в 35,5 г Cl и сколько атомов Ag содержится в 107,9 г Ag. Одинаковость эквивалентного заряда, необходимого

критике «философия» Маха была подвергнута В. И. Лениным в труде «Материализм и эмпириокритицизм». (Прим. ред.)

¹⁾ H. L. F. Helmholtz, Vorträge und Reden, Bd 2, стр. 272. Параллельная работа Стоinea опубликована в феврале 1881 г. (Proc. Dublin Phil. Soc., см. также Phil. Mag., Bd. 11).

²⁾ Как известно, ионами являются «странствующие» при электролизе составные части электролитов; «катионы» образуют положительный поток, т. е. положительно заряженные составные части, движущиеся, так сказать, «по течению», а «анионы» — отрицательно заряженные — составные части, движущиеся «против течения». Например, у HCl катионом является Н, а анионом — Cl.

³⁾ Для простоты мы здесь говорим о воображаемом атоме водорода с атомным весом 1. В действительности же, как известно, атомный вес Н равен 1,008. К этому различию мы ещё вернёмся в гл. II, § 5.

⁴⁾ Кулон равен одной десятой единицы заряда в так называемой абсолютной электромагнитной системе.

для выделения всех этих продуктов, тогда сразу следует из *атомизма электричества*: эквивалентный заряд F состоит из столько же атомов электричества или «элементарных зарядов e », сколько атомов H содержится в 1 г H или атомов Cl в 35,5 г Cl , или атомов Ag в 107,9 г Ag . С каждым одновалентным атомом (или, более общо, ионом) связан один элементарный заряд e , с каждым двухвалентным атомом (или ионом) — два элементарных заряда и т. д. Как атомизм вещества непосредственно вытекает из *химических* основных положений, так и атомизм электричества непосредственно вытекает из *электрохимических* основных положений.

Для более краткого способа описания введём ещё два новых термина. Под термином «моль» подразумевается (по Оствальду) такое количество граммов вещества, которое равно молекулярному весу этого вещества. Так, 1 моль $H_2O = 18$ г, 1 моль $H_2 = 2$ г. (Для одноатомных элементов вместо моля говорят о грами-атоме, например 1 грами-атом $H = 1$ г.) Далее, под *числом Лошмидта* L понимают такое количество молекул (или соответственно атомов), которое содержится в 1 моле (или соответственно в 1 грами-атоме) вещества. Так, в случае воды это число L определяется из уравнения $18 \text{ г} = L m_{H_2O}$, а в случае водорода — из уравнения $1 \text{ г} = L m_H$, где m_H — измеренная в граммах масса атома водорода, а m_{H_2O} — измеренная в граммах масса молекулы воды. Относительно названия числа следовало бы ещё заметить, что чаще вместо «число Лошмидта» говорится «число Авогадро», потому что это же число играет роль в законе Авогадро для газов. Однако, поскольку Лошмидт был первым, кто успешно сумел определить это число (исходя из газокинетических соображений), кажется более справедливым связывать это число с его именем. Возражения против этого, заключающиеся в том, что Лошмидт при определении числа L отнёс это число не к одному молю, а к одному кубическому сантиметру, являются чисто формальными. В случае необходимости можно определённое выше число L для большей точности называть «числом Лошмидта, отнесённым к одному молю».

Как мы видим, эквивалентный заряд F содержит столько же элементарных зарядов, сколько атомов H (с массой m_H) содержится в 1 г водорода; теперь мы можем сказать, что заряд F состоит из L элементарных зарядов e . Таким образом, можно написать:

$$[9649 \text{ CGSM} = Le, \quad 1 \text{ г} = L m_H,$$

откуда следует

$$\frac{e}{m_H} = 9649 \frac{\text{CGSM}}{\text{г}}, \quad \frac{1 \text{ г}}{m_H} = L. \quad (1)$$

Отношение заряда к массе называется *удельным зарядом соответствующего иона*. Для положительного иона водорода этот удельный заряд, таким образом, равен 9649, для двухвалентного положительного иона меди получим:

$$\frac{2e}{m_{Cu}} = \frac{2 \cdot 9649}{63,6},$$

для одновалентного отрицательного иона хлора

$$-\frac{e}{m_{Cl}} = -\frac{9649}{35,5}$$

и т. д.

Как уже отметил Гельмгольц, явление электролиза показывает, что как положительное, так и отрицательное электричество состоит из совокупности элементарных зарядов $\pm e$. Однако в других отношениях имеется большое различие между положительным и отрицательным электричеством. *Положи-*