

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСОВ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ АТОМОВ

Чуев Анатолий Степанович (chuev@mail.ru)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

УДК 535.538.33

Аннотация

Применяемые в оптической спектроскопии диаграммы Гротриана имеют инверсное изображение электронных энергетических уровней, что в спектроскопии возможно и допустимо. Однако такое изображение энергетических уровней затрудняет создание верного физического представления о строении атомов. С позиций частотного метода анализа спектральные линии излучения и поглощения представляют собой биения более высокочастотных колебаний, принадлежащих, как предполагается, электронным оболочкам атома и имеющих резонансные признаки особого рода: соотношение электронных частот, создающих биения фотонной частоты подчиняется квадратичной зависимости. При этом целочисленные резонансные соотношения частот проявляются при выражении колебаний деброевскими соотношениями. Это дает основание понимать колебательные процессы в атоме, протекающими на трех взаимосвязанных частотных уровнях: фотонном, электронном и внутриатомном (квантовомеханическом). Особенности расположения спектральных энергетических уровней позволяют судить о целостности и первичности электронных оболочек атома, а электроны представлять в виде резонансных колебаний этих оболочек. Частотный метод расчета спектральных линий показывает хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных не только для атома водорода, но и для отдельных серий многоэлектронных атомов.

Оптические спектры, структура спектров, строение атома, частотный анализ.

Optical spectra, the structure of the spectra, the structure of the atom, the frequency analysis

*Косная природа не способна сама себя
измерять или производить вычисления,
отдельные части ее могут только
резонировать.*

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Структура строения атомов находит прямое и непосредственное отражение в структуре оптических спектров атомов, индивидуальных каждому сорту атома или иона. С этим

положением согласны практически все ученые, но имеются разные трактовки и представления о механизме образования этих спектров и взаимосвязи друг с другом указанных двух структур. Если структура оптических спектров наблюдаема и очевидна, то о структуре строения атомов можно только догадываться. Нет точных знаний и о физической сущности электромагнитных волн, создающих оптический спектр колебаний.

Хорошо известно, что любая спектральная линия представима в виде разности двух частотных термов [1, стр.251]. Это указывает на происхождение электромагнитных волн, выборочно излучаемых и поглощаемых атомами, как биений более высокочастотных колебаний, присущих атомам. На этом основании большинство ученых склонны считать оптические частотные спектры отражением колебательных процессов, происходящих внутри атома, но о самих этих процессах имеются весьма смутные представления. Попробуем, насколько это возможно, прояснить этот вопрос с позиций частотного анализа спектральных линий. Исследование будем вести с использованием диаграмм Гротриана [2], обеспечивающих наглядность представления изучаемой области.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АТОМА ВОДОРОДА

Анализ начнем с рассмотрения энергетике строения атома. Классическая электронно-ядерная модель атома исходит из того, что электроны входят в состав атома, причем высокоэнергетические электроны расположены «в глубине» атома и это определенным образом подтверждается на практике. На рис.1 приведена энергетическая диаграмма формирования спектра атома водорода.

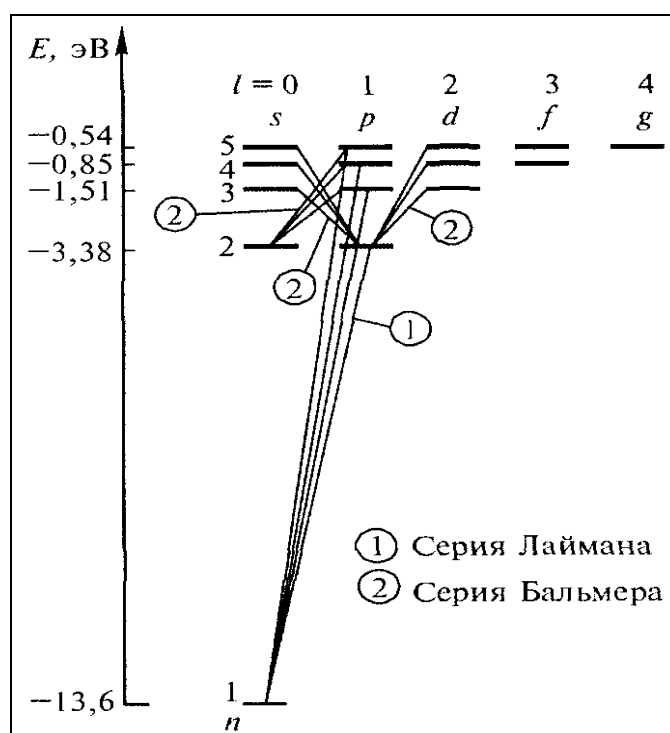


Рис.1. Диаграмма образования спектральных линий в атоме водорода.

В отличие от изображения рис.1 диаграммы Гротриана (рис.2), применяемые в оптической спектроскопии, имеют инверсное изображение электронных энергетических уровней, что в спектроскопии возможно и допустимо. Однако такое изображение энергетических уровней не соответствует частотным представлениям, способным объяснить формирование оптического спектра биением частотных колебаний, происходящих внутри атома. Затрудняется также создание более или менее верных физических представлений о строении атомов.

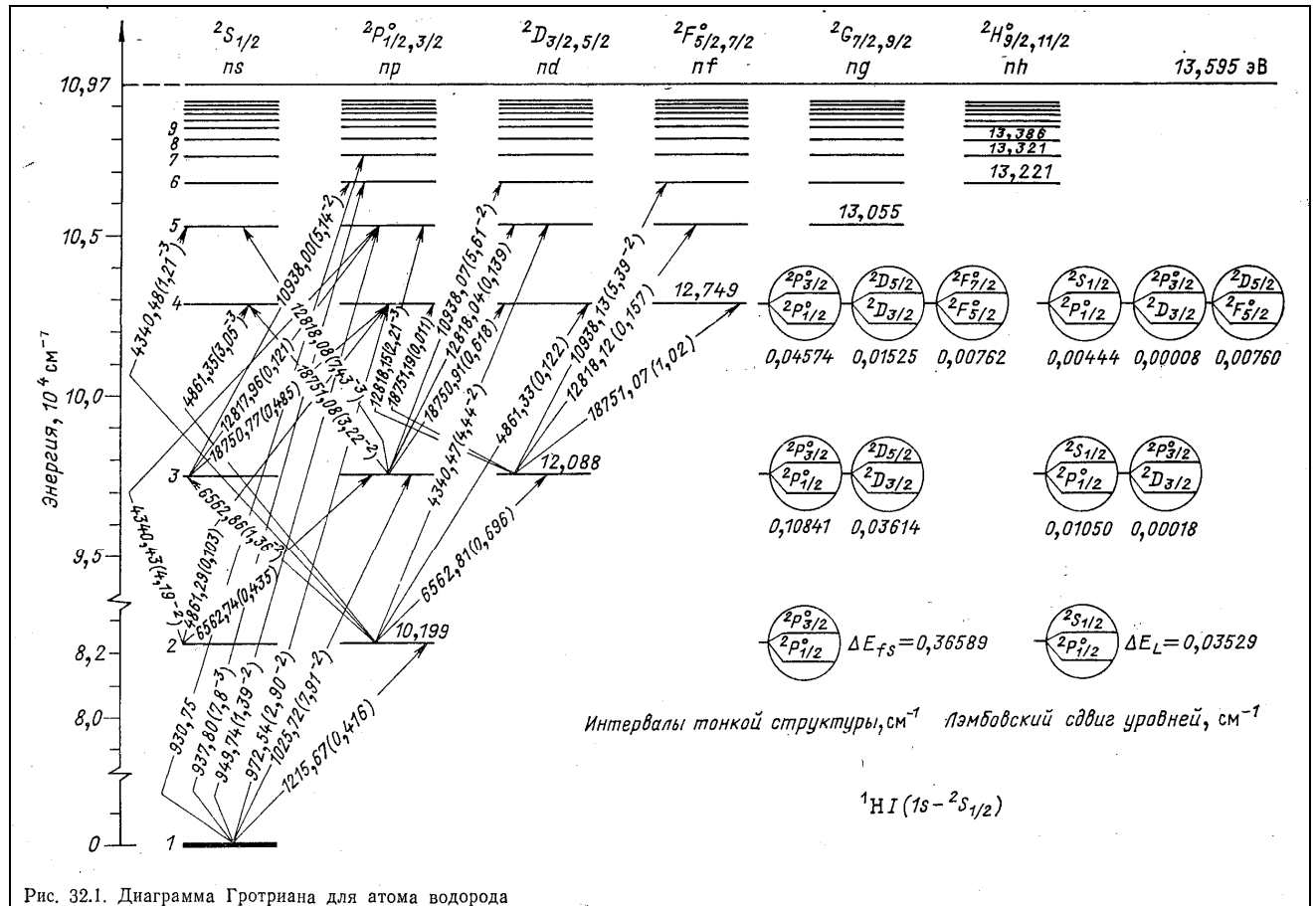


Рис.2. Традиционное в спектроскопии представление диаграммы образования спектральных линий на примере атома водорода.

Если исходить из частотных представлений, то большим значениям энергии должны соответствовать и большие частоты. Самые высокочастотные колебания должны характеризовать и наиболее высокоэнергетические электроны. Можно предположить, что внутриатомные колебания это и есть сами электроны в составе атома. В этом случае оптические спектральные линии, отражающие процессы излучения и поглощения атомом электромагнитных волн, можно объяснить известным в природе процессом биения волн. Мысль о биении электронных частот, приводящих к излучению атомами электромагнитного излучения, высказывалась и ранее [3, стр. 486], но применительно к структуре оптических спектров атомов и анализу строения самих атомов должного развития не получила.

Данное положение автор связывает не только с неудачным обозначением в оптических спектрах (рис.2) энергетических уровней электронов, но и с устоявшимся представлением о материальности и постоянном нахождении электронов в составе атома. В действительности электроны могут и не быть постоянно в составе атома, а возникать в нем на короткое время нахождения атома в возбужденном состоянии. Это вполне допустимо, если внутриатомные электроны представлять в виде специфических колебаний, возникающих в атоме как резонансный отклик на внешние энергетические воздействия.

Из этих предпосылок можно сделать вывод о том, что атомы разных химических элементов – это природные *неделимые* образования (атом снова становится соответствующим своему понятию), способные к избирательному (резонансному) преобразованию внешних воздействий во внутренние колебания (электроны). Эти колебания по истечении малого времени (определяемого соотношением неопределенностей Гейзенберга) могут обратно преобразовываться во внешнее излучение. Внешние воздействия могут быть механическими, тепловыми или в виде электромагнитных волн. Рассматриваемая тема касается последнего вида воздействий.

Воздействие внешнего электромагнитного излучения переводит атом в возбужденное состояние, характеризуемое, на наш взгляд, появлением одного или нескольких электронов (их число определяется сортом атома и энергетикой воздействия). Это возбужденное состояние через некоторое время переходит в исходное состояние с излучением во вне одного или нескольких фотонов, не обязательно идентичных ранее поглощенному. Частоты поглощаемых и излучаемых фотонов определяются строением и резонансными свойствами электронной оболочки атома, о строении которой можно судить, изучая спектральные линии.

Попробуем подкрепить наши рассуждения анализом оптических спектров с обозначенной частотной точки зрения. Анализ начнем с самого простого атома водорода. Традиционная диаграмма образования его спектральных линий приведена на рис.2 [4].

Частотный анализ требует инверсного изменения численных величин, характеризующих энергетические уровни. Уровню, обозначенному на рис.1 с нулевой энергией, приписываем энергию ионизации 13,595 эВ и находим соответствующую этой энергии частоту колебаний электронной оболочки атома $\omega_i = \omega_1 = 2,06544 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$. Эта частота для атома водорода максимальная. Если ее значение поделить на 2π , то получится частотная постоянная Ридбега, справочное значение которой равно $3,289841960364 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

Соответствующим образом изменяем значения энергии и устанавливаем частоты колебаний электронной оболочки для остальных энергетических уровней, включая значение действительно нулевого энергетического уровня, к которому сходятся все уровни на рис.2. Далее выполняем расчеты по определению разности частот (биений) и соответствующих им

длин волн излучения. Диаграмма с описываемым инверсным (в действительности, верным) энергетическим и частотным представлением «стационарных энергетических уровней» для атома водорода представлена на рис.3. Результаты расчетов приведены в таблице рис.4.

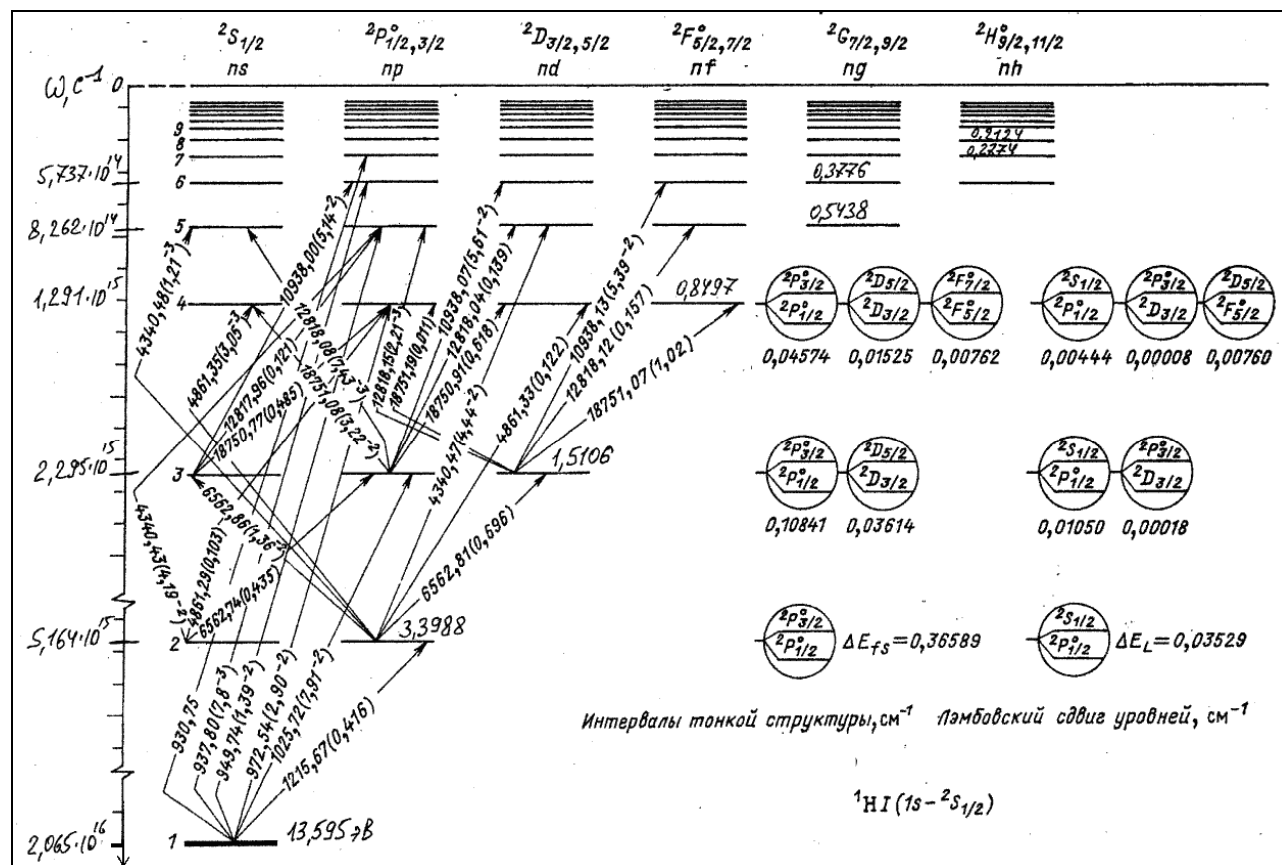


Рис.3. Диаграмма для атома водорода в частотном представлении с показом действительных значений энергетических уровней.

В таблице рис.4 частоты электронных колебаний соответствуют обозначению ω , а их биения, то есть оптические частоты, соответствуют обозначению $\Delta\omega$.

Для справки в таблице приведены значения разности энергий (δE). Естественно, что они оказываются точно совпадающими с разностью энергетических уровней, если их определять и по диаграмме рис.2. Совпадение расчетных данных таблицы рис.4 с экспериментальными данными диаграммы Гротриана и нашей диаграммой по рис.3, можно сказать, идеальное.

G8		=G7*E1/H1										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1			1883651567		1,60E-19			1,05E-34	1,99E-25			
2		Атом										
3		водорода	13,595									
4	1	$1^2S - n^2P$	1	2	3	4	5	6	7	8	N	lim
5		E*справ, эВ	0	10,199	12,088	12,749	13,055	13,221	13,321	13,386		13,595
6		E*расч, эВ	0	10,196	12,084	12,745	13,051	13,217	13,318	13,383	$X6=C3-C3/N^2$	13,595
7		Едейств, эВ	13,595	3,3988	1,5106	0,8497	0,5438	0,3776	0,2774	0,2124	$C3/N^2$	
8		ω , c^{-1}	2,065E+16	5,164E+15	2,295E+15	1,291E+15	8,262E+14	5,737E+14	4,215E+14	3,227E+14	$\omega=X7*E1/H1$	
9		δE , эВ		10,196	12,084	12,745	13,051	13,217	13,318	13,383	$\delta E=C7-X7$	13,595
10		ω излуч, c^{-1}		1,549E+16	1,836E+16	1,936E+16	1,983E+16	2,008E+16	2,023E+16	2,033E+16	$\Delta\omega=C8-X8$	
11		λ изл, А°		1215,978	1025,982	972,783	949,983	938,040	930,983	926,460	$1^2S - n^2P$	Лаймана
12				H_α								
13												
14	2	$2^2P - n^2D$	1	2	3	4	5	6	7	8		
15		E*справ, эВ	0	10,199	12,088	12,749	13,055	13,221	13,321	13,386		13,595
16		E*расч, эВ	0	10,196	12,084	12,745	13,051	13,217	13,318	13,383	$X16=C3-C3/N^2$	13,595
17		Едейств, эВ	13,595	3,3988	1,5106	0,8497	0,5438	0,3776	0,2774	0,2124	$C3/N^2$	
18		ω , c^{-1}	2,065E+16	5,164E+15	2,295E+15	1,291E+15	8,262E+14	5,737E+14	4,215E+14	3,227E+14	$\omega=X17*E1/H1$	
19		δE , эВ			1,888	2,549	2,855	3,021	3,121	3,186	$\delta E=D17-X16$	
20		ω излуч, c^{-1}			2,869E+15	3,873E+15	4,337E+15	4,590E+15	4,742E+15	4,841E+15	$\Delta\omega=C18-X18$	
21		λ изл, А°			6566,283	4863,913	4342,780	4103,927	3972,196	3891,131	$2^2P - n^2D$	Бальмера
22					H_β							
23												
24	3	$3^2D - n^2F$	1	2	3	4	5	6	7	8		
25		E*справ, эВ	0	10,199	12,088	12,749	13,055	13,221	13,321	13,386		13,595
26		E*расч, эВ	0	10,196	12,084	12,745	13,051	13,217	13,318	13,383	$X26=C3-C3/N^2$	13,595
27		Едейств, эВ	13,595	3,3988	1,5106	0,8497	0,5438	0,3776	0,2774	0,2124	$C3/N^2$	
28		ω , c^{-1}	2,065E+16	5,164E+15	2,295E+15	1,291E+15	8,262E+14	5,737E+14	4,215E+14	3,227E+14	$\omega=X27*E1/H1$	
29		δE , эВ				0,661	2,855	3,021	3,121	3,186	$\delta E=C27-X27$	
30		ω излуч, c^{-1}				1,004E+15	1,469E+15	1,721E+15	1,873E+15	1,972E+15	$\Delta\omega=C28-X28$	
31		λ излуч, А°				18760,809	12824,771	10943,805	10054,621	9550,957	$3^2D - n^2F$	Пашена
32						H_γ						

Рис.4. Таблица Excel по расчету спектральных линий атома водорода при инверсном (энергетическом) и частотном представлении диаграммы Гротриана.

Строки 7 и 8 таблицы рис.4 (для упрощения рассматриваем только серию Лаймана) соответствуют обозначениям частот и энергий диаграммы по рис.3. Эти строки представляют собой закономерно убывающий ряд значений. Убывание числовых значений в этих рядах происходит в соответствии с простым квадратичным законом. Имеется также очевидно наблюдаемая закономерность в убывании энергетических (частотных) интервалов между соседними энергетическими уровнями диаграммы.

Следует отметить, что определить закон убывания и производить вычисления энергетических (соответственно, и частотных) интервалов между энергетическими уровнями, в принципе можно, пользуясь привычными диаграммами Гротриана. Для этого в расчетах следует учитывать лишь инверсный характер величин энергии, приводимых в диаграммах Гротриана.

Воспользуемся этим и мы. При расчетах частот, служащих исходными для частот биений, приводящих к излучению (или поглощению) оптических частот, будем, в основном, использовать справочные данные общепринятых диаграмм по типу рис.1. При этом в расчетах будем учитывать инверсный характер приводимых числовых значений энергии.

Прежде чем перейти к дальнейшему анализу и изучению спектральных линий более сложных атомов попробуем ответить с позиций частотного анализа на вполне естественный вопрос: если, как мы предполагаем, атомные электроны представляют собой колебания электронной оболочки, а электромагнитные волны возникают как частотные биения этих колебаний, то как объяснить несоответствие обычному резонансному соотношению (1:1, в общем случае, 1: n) частот колебаний электронной оболочки. При этом определенная упорядоченность частот колебаний вполне очевидна.

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Объяснение определенной стройности и упорядоченности в расположении частот оптического спектра атомов можно найти в следующих математических выкладках и рассуждениях.

Для наиболее простого атома водорода, способного иметь только один электрон, но в разных энергетических состояниях выражение для частот излучения и поглощения при различных переходах $n \rightarrow k$ имеет хорошо известный вид [1, стр.259]:

$$\omega_{nk} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (1)$$

Здесь R - постоянная Ридберга

$$R = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^3} \approx 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Соотношение (1) иллюстрирует закономерную связь частот оптического излучения ω_{nk} с «переходами» $n \rightarrow k$ между энергетическими (частотными) уровнями электронов по квадратичному закону, не встречающемуся в обычных резонансах. Это и создает проблему понимания и физического представления такой связи.

Математически эту связь можно объяснить разными соотношениями, определяющими обозначенные частоты через одно и то же значение энергии E . Считается, что частота и энергия, как для фотонов, так и для электронов связаны универсальным соотношением:

$$\omega_f = \frac{E}{\hbar}. \quad (2)$$

Однако дебройлевская частота электронов, находящихся в составе атома, связана с их энергией иной (квадратичной) зависимостью, а фотонная частота ω_f , как можно видеть по диаграмме рис.3, формируется в виде разности (биений) электронных частот ω_e .

Подтвердим это следующими соотношениями. Длина волны де Бройля и соответствующая ей частота, которые назовем атомными и обозначим λ_a и ω_a , определяются известными выражениями:

$$\lambda_a = \frac{2\pi\hbar}{p}, \quad p = \sqrt{2m_e E}, \quad \omega_a = \frac{2\pi c}{\lambda_a}. \quad (3)$$

При подстановке в эти выражения электронной частоты ω_e , определяемой по формуле (2), но равновеликой по энергии дебройлевской частоте, получим соотношение:

$$\omega_a = \frac{c\sqrt{2m_e\hbar\omega_e}}{\hbar} = c\sqrt{\frac{2m_e\omega_e}{\hbar}}. \quad (4)$$

Из последнего соотношения следует, что внутриатомная частота ω_a и электронная частота ω_e , энергетически завязанные на формировании спектра внешнего оптического излучения ω_f , связаны квадратичной зависимостью

$$\omega_e = \frac{\hbar}{2m_e c^2} \omega_a^2. \quad (5)$$

При этом частота излучаемого (или поглощаемого) фотона, представляемая в виде разности двух электронных частот, определится выражением:

$$\omega_f = \Delta\omega_e = \frac{\hbar}{2m_e c^2} \Delta\omega_a^2. \quad (6)$$

Данное соотношение достаточно простое и почти очевидное, но оно почему-то ранее не замечалось.

Можно показать, что последнее соотношение можно выразить формулой с участием постоянной Ридберга, которая проще всего представима в виде соотношения внутренней энергии электрона и постоянной Планка:

$$R = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} = \frac{m_e}{32\pi^2 \hbar^3} \frac{e^2}{\varepsilon_0} = \frac{m_e}{32\pi^2 \hbar^3} 4\pi c \alpha \hbar = \frac{2m_e c^2}{\hbar} \frac{\alpha^2}{4}. \quad (7)$$

С учетом формулы (7) соотношение атомных (дебройлевских) и электронных частот представимо в таком виде:

$$\omega_e = \frac{\hbar}{2m_e c^2} \omega_a^2 = \frac{\alpha^2}{4R} \omega_a^2. \quad (8)$$

В выражении (8) присутствует постоянная тонкой структуры α , физический смысл которой ученые давно ищут. Возможно, главный физический смысл постоянной тонкой структуры и заключен в соотношении (8). Смысл α в этом соотношении – осуществлять (при участии постоянной Ридберга, размер которой зависит от принятой системы единиц) нелинейную квадратичную связь двух видов частот – электронной и внутриатомной.

Отметим также весьма интересное соотношение рассматриваемых частот с частотой и длиной волны Комптона (последние обозначим, как ω_k и λ_k) для электрона:

$$\omega_e = \frac{\hbar}{2m_e c^2} \omega_a^2 = \lambda_k \frac{1}{4\pi c} \omega_a^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega_a^2}{\omega_k}. \quad (9)$$

Формулу (9) можно представить и в таком виде:

$$\omega_e \omega_k = \frac{1}{2} \omega_a^2. \quad (10)$$

Приводимым формулам, выражающим квадратичное соотношение частот разных видов, есть простой и наглядный пример из области механики: длина математического маятника (размерный аналог потенциальной ямы, определяющей длину и частоту волн де Бройля) и частота его колебаний связаны обратной квадратичной зависимостью. При периодических изменениях длины маятника частота его колебаний будет изменяться по квадратичному закону. Еще один наглядный пример – увеличение частоты колебаний конца линейки при уменьшении длины колеблющейся части (например, при протаскивании через щель).

Отталкиваясь от модели математического маятника можно предположить, что рассматриваемые электронные колебания, это поперечные (относительно электростатического поля атома) колебания или, скорее всего, местные вихреобразные вращения электронной оболочки. Сравнительно более высокочастотные внутриатомные колебания – это продольные (толщинные) колебания той же электронной оболочки.

Известна монография по описанию особого типа резонансов, называемых вихреволновыми и структурными [5]. Рассматриваемый нами тип резонанса в строении атома, возможно, относится к подобным конусным вихревым структурам. Электроны могут возникать и исчезать в пузырьреподобной атомной оболочке подобно циклонам и антициклонам в атмосфере планет. В этих структурах глубинные частоты (вращения в вершине конуса) вполне могут соотноситься с поверхностными частотами (частотами вращений у основания конуса) по квадратичному закону.

Расчетные данные по соотношению электронных и внутриатомных частот для атома водорода приведены в таблице рис.5. По этим данным можно сделать вывод, что целочисленный и упорядоченный резонанс колебаний происходит в атоме на уровне внутриатомных дебройлевских частот. Этот целочисленный резонанс трансформируется и отражается по квадратичному степенному закону в менее высокочастотных колебаниях электронной оболочки, а биения частот последних формируют фотонный спектр внешних излучений (и поглощений). Процесс этот, судя по данным опыта, двухсторонний.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1			1883651567	9,11E-31	1,60E-19	1,79751E+17	9,1093897*E-	1,05E-34	1,99E-25			
2		Атом										
3		водорода	13,595									
4	1	1 ² S - n ² P	1	2	3	4	5	6	7	8	N	lim
5		E*справ, эВ	0	10,199	12,088	12,749	13,055	13,221	13,321	13,386		13,595
6		E*расч, эВ	0	10,196	12,084	12,745	13,051	13,217	13,318	13,383	E*сnp=C3-C3/N ²	13,595
7		Едейств, эВ	13,595	3,3988	1,5106	0,8497	0,5438	0,3776	0,2774	0,2124	Eд=C3/N ²	
8		ω _в , с ⁻¹	2,065E+16	5,164E+15	2,295E+15	1,291E+15	8,262E+14	5,737E+14	4,215E+14	3,227E+14	X7*E1/H1	
9		ω _{ат} , с ⁻¹	5,663E+18	2,832E+18	1,888E+18	1,416E+18	1,133E+18	9,439E+17	8,090E+17	7,079E+17		
10		ω _в ¹ /ω _{ат} ^N	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00		$\omega_e = \frac{\hbar}{2 m_e c^2} \omega_a^2$

Рис.5. Иллюстрация резонансных соотношений электронных и атомных частот в атоме водорода.

Еще раз отметим, что значения разности энергий, определяющих частоту и длину волны фотонов, излучаемых и поглощаемых атомом, одинаковы, как в нашем варианте диаграммы, так и в варианте ее традиционного представления. Однако в нашем варианте значения уровней энергии имеют реальный физический смысл, отражая частоты внутриатомных колебательных процессов. Поэтому анализируя величины и соотношения этих частот, можно судить о структуре самих атомов.

Заметим, что современные модификации диаграмм Гроттриана [6] тоже используют инверсное изображение энергетических линий, что сильно запутывает и затрудняет изучение реальной структуры строения атома.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ БОЛЕЕ СЛОЖНЫХ АТОМОВ

Автор настоящей статьи склоняется к мнению, что внутриатомные колебания (электроны) не постоянно присутствуют внутри атома, а возникают под действием внешних причин. Ведь колокол звонит только при ударах по нему. При таком подходе каждый атом видится как своеобразный колокол – резонатор, имеющий свой определенный спектр частот, индивидуальный для каждого химического элемента (возможно, и изотопа).

Многие (таких большинство) привыкли считать, что электроны постоянно содержатся и движутся или «вибрируют» в атоме с определенными частотами, им свойственными. Так, например, Ф.М. Канарёв в своей модели атома [7] энергию, которую мы приписываем колебаниям электронной оболочки, считает энергией электростатической связи электрона с ядром атома. Поскольку с энергетической точки зрения наша модель и модель Канарёва почти идентичны, то приведем его данные (рис.1) по оценке энергии связи электрона в составе водорода и водородоподобных атомов. В нашей модели вместо энергии связи будут фигурировать частоты, определяемые соотношением (2). Почему автор таблицы рис.1 не привел теоретические данные для $n = 1$ не очень понятно, так как они равны значению при $n = 2$, умножаемому на четыре. При этом совпадение теоретических и экспериментальных данных идеальное.

Таблица 12. Энергии связи электронов с ядрами водородоподобных атомов						
Z	Эле- Мент	Метод опред.	Энергии связи E_b , eV			
			n=1	n=2	n=3	n=4
1	H	Экспер.	13,598	3,398	1,508	0,848
		Теор.	-	3,399	1,511	0,849
2	He	Экспер.	54,416	13,606	6,046	3,396
		Теор.	-	13,604	6,046	3,401
3	Li	Экспер.	122,451	30,611	13,601	7,651
		Теор.	-	30,613	13,607	7,653
4	Be	Экспер.	217,713	54,423	24,183	13,613
		Теор.	-	54,428	24,190	13,607
5	B	Экспер.	340,217	85,047	37,797	21,257
		Теор.	-	85,054	37,801	21,263
6	C	Экспер.	489,981	122,461	54,431	30,611
		Теор.	-	122,495	54,446	30,624
7	N	Экспер.	667,029	166,689	74,089	41,669
		Теор.	-	166,757	74,114	41,689

Рис.6. Энергия связи электрона для водорода и водородоподобных атомов.
(При n=1 теоретические данные можно определить по формуле 12).

Энергия связи электрона (по-нашему, максимальная энергия поперечных колебаний электронной оболочки) любого водородоподобного атома, определяется формулой:

$$E_i = 13,598 * Z^2 \text{ эВ.} \quad (11)$$

Заметим, что для атомов химических элементов с порядковыми номерами в районе сотни величина энергии составит десятые доли от МэВ, а это уже рентгеновский диапазон волн и соответствующих им частот.

Важным достижением работы [7] можно считать эмпирическое обнаружение математической упорядоченности в расположении энергетических уровней не только для водорода и водородоподобных атомов, но и для отдельных спектральных серий атомов более сложного строения, не подчиняющихся формуле (1). Как можно понять из работ Ф.М. Канарева, структура оптического спектра атомов определяется энергией ионизации атома и величиной энергии уровня, ближайшего к ионизационному уровню. Энергия других уровней определяется дробно-целочисленным распределением соотношения этих двух энергий обратно пропорционально второй степени номеров энергетических уровней.

Применительно к нашей частотной модели это будет аналогичное дробно-целочисленное уменьшение частот на электронном и фотонном уровнях, при целочисленном соотношении частот на внутриатомном дебройлевском уровне. В большинстве спектральных линий соблюдается следующее (или близкое к нему) соотношение электронных частот двух соседних уровней, создающих биения оптического спектра:

$$\omega_{en} = \frac{n^2}{(n+1)^2} \omega_{e(n+1)}, \quad (12)$$

где: ω_{en} частота произвольного n – го уровня; $\omega_{e(n+1)}$ – частота последующего энергетического уровня. Аналогичным соотношением связаны и значения энергии соседних уровней.

При $n = 1$ (s - оболочка) частота ω_{e1} будет соответствовать энергии ионизации внешнего электрона в пересчете формулой (1) $\omega_{e1} = \omega_i$, а частота $\omega_{e(n+1)}$ будет соответствовать действительной энергии (обозначение в таблицах $E_{\text{действ.}}$) второго энергетического уровня.

Если из приводимых таблиц для атома водорода взять уменьшающийся по величине ряд энергий, соответствующих увеличивающемуся ряду номеров энергетических уровней, то можно обнаружить простую числовую закономерность в последовательности их значений, а также величин межуровневых интервалов энергии и, соответственно, интервалов частот, создающих биения. Расчеты приведены в таблице 1. Конкретные значения энергии для атома водорода приведены в нижней части таблицы 1.

Таблица 1. Формулы для расчета межуровневых энергетических и частотных интервалов

$\otimes \cdot 4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) = \otimes \cdot 4 \frac{3^2 - 2^2}{3^2 \cdot 2^2} = \otimes \cdot 4 \frac{5}{36} = \otimes \cdot \frac{20}{36}$ $\otimes \cdot 4 \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{16} \right) = \otimes \cdot 4 \frac{4^2 - 3^2}{4^2 \cdot 3^2} = \otimes \cdot 4 \frac{7}{144} = \otimes \cdot \frac{28}{144}$ $\otimes \cdot 4 \left(\frac{1}{16} - \frac{4}{25} \right) = \otimes \cdot 4 \frac{5^2 - 4^2}{5^2 \cdot 4^2} = \otimes \cdot 4 \frac{9}{400} = \otimes \cdot \frac{36}{400}$ $\otimes \cdot 4 \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{36} \right) = \otimes \cdot 4 \frac{6^2 - 5^2}{6^2 \cdot 5^2} = \otimes \cdot 4 \frac{11}{900} = \otimes \cdot \frac{44}{900}$ $\otimes \cdot 4 \left(\frac{1}{36} - \frac{1}{49} \right) = \otimes \cdot 4 \frac{7^2 - 6^2}{7^2 \cdot 6^2} = \otimes \cdot 4 \frac{13}{1764} = \otimes \cdot \frac{52}{1764}$ <p style="text-align: center;">.....</p>					
13,598 = $E_1 = E_i$	3,3988 = $E_2 =$ = $\frac{E_1}{4}$	1,5106 = $E_3 =$ = $\frac{E_1}{9} = E_2 \cdot \frac{4}{9}$	0,8497 = $E_4 =$ = $\frac{E_1}{16} = E_3 \cdot \frac{9}{16}$	0,5438 = $E_5 =$ = $\frac{E_1}{25} = E_4 \cdot \frac{16}{25}$	0,3776 = ...
10,1964 эВ	1,8882 эВ	0,6609 эВ	0,3059 эВ	0,1662 эВ	
$\Delta E_{1-2} = E_i \cdot \frac{3}{4}$	$\Delta E_{2-3} = E_i \cdot \frac{5}{36}$	$\Delta E_{3-4} = E_i \cdot \frac{7}{144}$	$\Delta E_{4-5} = E_i \cdot \frac{9}{400}$	$\Delta E_{5-6} = E_i \cdot \frac{11}{900}$	

В верхней части таблицы приведены общие формулы, где значком \otimes обозначено значение энергии или частоты, соответствующие второму энергетическому уровню. Почему

именно второму будет ясно из дальнейшего изложения. Такая форма записи позволяет уяснить общность формул, определяющих спектр и более сложных атомов.

Данные таблицы 1 показывают, что зная энергию ионизации и интервал между двумя соседними (не соседними тоже) энергетическими уровнями можно легко определить значения энергетических уровней и интервалы между ними для любых других уровней. Примечательно, что приводимые формулы оказываются пригодными для расчета отдельных серий оптических спектров других атомов с несравненно более сложными диаграммами.

Отметим, что для расчета структуры оптических спектров атомов, следующих за водородом, приходится брать частоты (и энергии) электронных уровней, по значению меньшие, чем соответствующие энергии ионизации и с некоторыми поправками. Рассмотрим это положение на конкретных примерах.

На рис.7 приведена диаграмма Гротриана для атома гелия. Укажем основные отличия этой диаграммы от диаграммы атома водорода. Подобные отличия присущи и более сложным атомам. Основные отличия состоят в следующем.

Между первым (ионизационным) энергетическим уровнем и вторым, ближайшим к первому, имеется значительный разрыв, не позволяющий первый уровень брать базовым для расчетов энергии других уровней и межуровневых интервалов по формулам таблицы 1.

В каждом столбце энергетических уровней, которые предположительно можно отнести к отдельным электронным оболочкам, начиная со второго энергетического уровня, имеет место сдвиг. Этот сдвиг тем меньше, чем больше порядковый номер энергетического уровня. По рис.7 видно, что пропорциональной деформации (очевидно, растяжению) в разных электронных оболочках оказываются подвержены все интервалы между соседними энергетическими уровнями. Можно заметить, что деформация интервала между первым и вторым энергетическими уровнями максимальная. Возможно, это происходит за счет смещения энергетической (частотной) линии первого уровня, который может быть разным для различных оболочек, что на диаграммах Гротриана не показывается.

Заметим, что в диаграмме спектральных линий водорода, которую следует считать идеальной, все интервалы между энергетическими уровнями (включая самый большой первый интервал) строго закономерно пропорциональны. То есть, там деформаций в столбцах энергетических уровней (в отдельных оболочках) нет, а первый уровень можно считать общим для всех столбцов (оболочек).

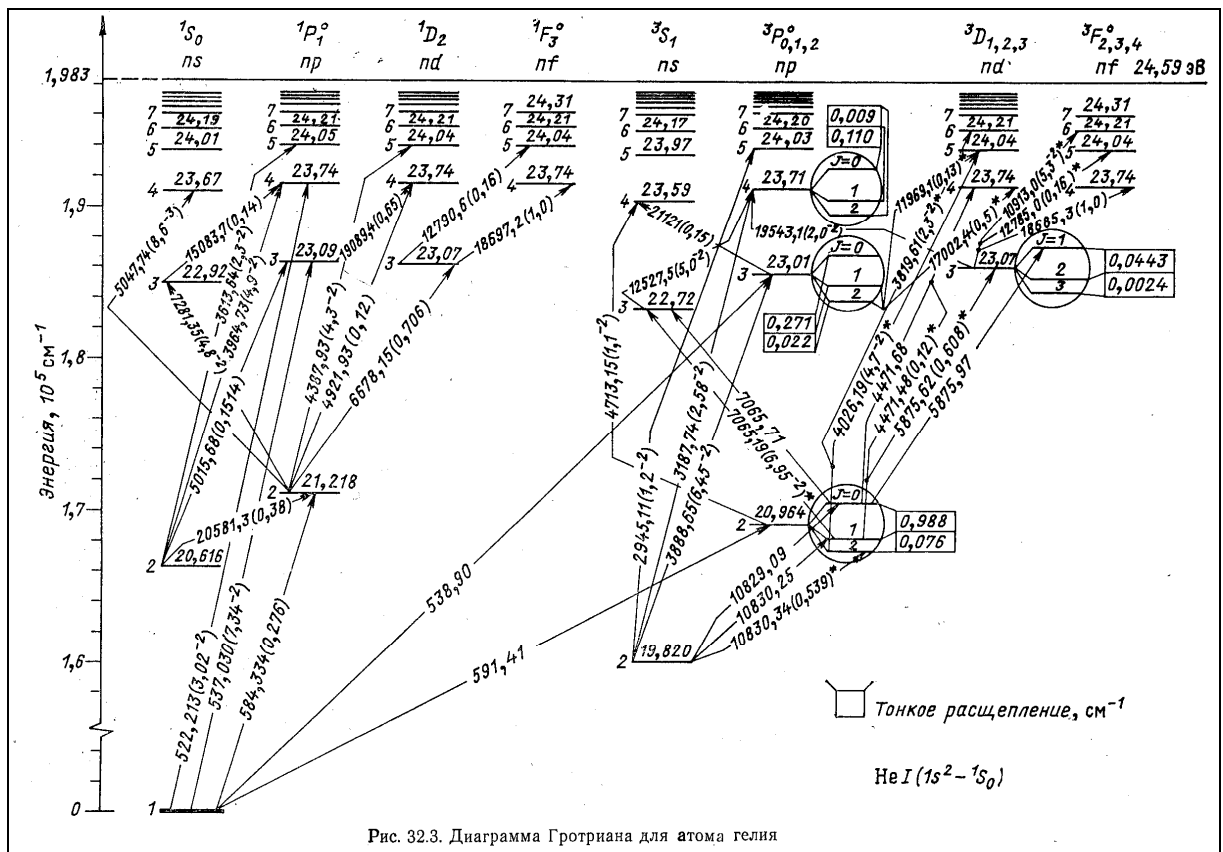


Рис.7. Диаграмма для атома гелия.

Данное обстоятельство, а также характер расположения на рис.7 спектральных переходов позволяют выдвинуть два предположения. Первое предположение, естественно формируемое изображением рис.7 и уже используемое нами выше, это очевидная принадлежность каждого вертикального столбца значений энергии (по Гротриану, «энергетической лестницы») одной общей для них электронной оболочке атома. Главный довод в пользу данного предположения - упорядоченность значений энергии и пропорциональность сдвигов энергетических уровней в каждом отдельном столбце энергий. В этом случае каждая электронная оболочка представляется целостным образованием, первичным относительно входящих в нее энергетических уровней (частот). Наблюдаемые сдвиги энергетических уровней строго пропорциональны внутри каждой оболочки. Наибольший сдвиг имеет место для второго энергетического уровня, а для других уровней этот сдвиг закономерно уменьшается.

По рис.7 можно заметить, что во всех, кроме одной, электронных оболочках нижние (по номеру) энергетические уровни (максимальные частоты) отсутствуют. Правда, с частотных позиций, принадлежность первого энергетического уровня именно оболочке ns^1S_0 , выглядит не столь явно и однозначно. Но этот факт оставим на совести спектроскопистов и составителей диаграммы рис.7.

Второе предположение вытекает из первого и касается места расположения оболочек. Принимая за истину вертикально - кластерное строение энергетических уровней внешней

электронной оболочки атома, мы должны признать эту оболочку многослойной (другой вариант, многослойной), состоящей из нескольких оболочек, или признать принадлежность каждой из оболочек разным атомам. В том и другом случаях механизм формирования оптического спектра видится как биения частот электронных колебаний, принадлежащих разным электронным оболочкам. В пределах одной оболочки такие переходы не происходят. (Если приписать принадлежность первого энергетического уровня оболочке $np^1 P_1^o$, а для этого, как мы увидим далее, есть предпосылки, то последний вывод не верен).

Диаграмма для атома гелия, идентичная рис.7, но с действительными значениями энергетических уровней и соответствующих частот, приведена на рис.8.

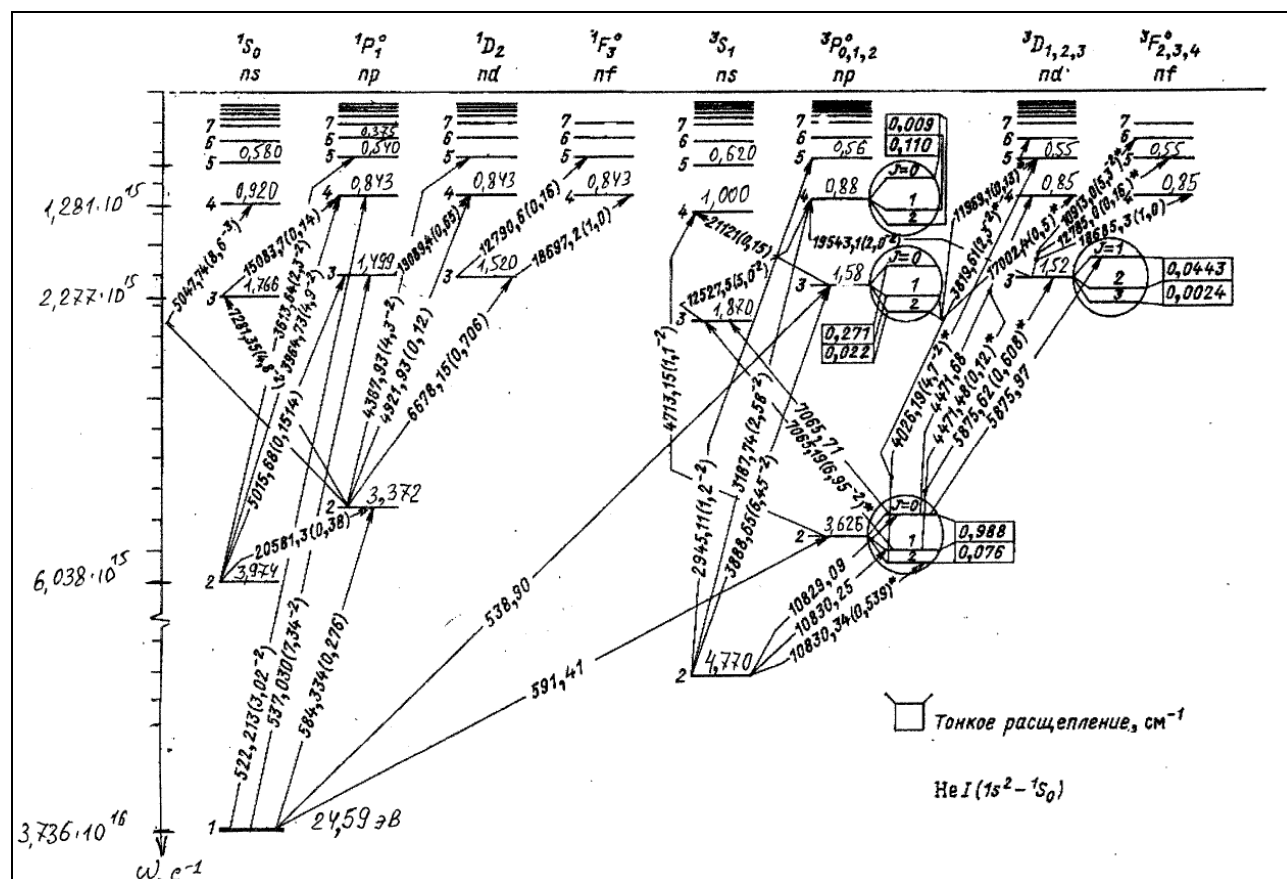


Рис.8. Диаграмма для атома гелия в частотном представлении с показом действительных значений энергетических уровней.

Энергетические кластеры рис.8, в которых отсутствуют нижние энергетические уровни, можно объяснить относительно слабыми внешними воздействиями на атом. А единый для всех переходов (биений частот) первый энергетический уровень можно объяснить предельно сильным внешним воздействием, при котором из атома «вылетает» свободный электрон (эффект ионизации атома).

Расчетные данные для атома гелия приведены в таблице рис.9. Полученное совпадение расчетных и справочных данных, можно сказать, великолепно. Такая точность недос-

тижима в квантовой механике с использованием уравнения Шредингера, которое не позволяет рассчитывать спектры атомов сложнее водородоподобных [7].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1			1883651567		1,60E-19			1,05E-34				
2												
3		Гелий	24,59									
4			1	2	3	4	5	6	7	8		совпадение
5	$np^1P^o_1$	E*справ, эВ	0	21,218	23,09	23,74	24,05	24,21				
6		Едейств, эВ	24,59	3,372	1,500	0,850	0,540	0,380			C3-XN	
7		Ерасч1, эВ	13,488	3,372	1,499	0,844	0,544	0,375	0,279		$X6*(N-1)^2/N^2$	Отличное
8		Ерасч2, эВ		3,372	1,499	0,843	0,540	0,375	0,275	0,211	$X8*(N-1)^2/N^2$	Отличное
9	$np^3P^o_{0,1,2}$	E*справ, эВ		20,964	23,01	23,71	24,03	24,2				
10		Едейств, эВ		3,626	1,58	0,88	0,56	0,39			C3-XN	
11		Ерасч1, эВ	14,504	3,626	1,612	0,889	0,563	0,389	0,287		$X10*(N-1)^2/N^2$	Отличное
12		Ерасч2, эВ		3,626	1,612	0,907	0,580	0,403	0,296	0,227	$X12*(N-1)^2/N^2$	Хорошее
13	ns^1S_0	E*справ, эВ	0	20,616	22,92	23,67	24,01	24,19				
14		Едейств, эВ		3,974	1,670	0,920	0,580	0,400			C3-XN	
15		Ерасч1, эВ	15,03	3,758	1,766	0,939	0,589	0,403	0,294		$X14*(N-1)^2/N^2$	Хорошее
16		Ерасч2, эВ		3,758	1,670	0,939	0,601	0,417	0,307	0,235	$X16*(N-1)^2/N^2$	Хорошее
17	ns^3S_1	E*справ, эВ	0	19,82	22,72	23,59	23,97	24,17				
18		Едейств, эВ		4,770	1,870	1,000	0,620	0,420			C3-XN	
19		Ерасч1, эВ	16,83	4,208	2,120	1,052	0,640	0,431	0,309		$X18*(N-1)^2/N^2$	Хорошее
20		Ерасч2, эВ		4,208	1,870	1,052	0,673	0,468	0,343	0,263	$X20*(N-1)^2/N^2$	Удовл.
21	nd^1D_2	E*справ, эВ	0		23,07	23,74	24,04	24,21				
22	$nd^3D_{1,2,3}$	Едейств, эВ			1,520	0,850	0,550	0,380			C3-XN	
23		Ерасч1, эВ	13,68		1,520	0,855	0,544	0,382	0,279		$X22*(N-1)^2/N^2$	Отличное
24		Ерасч2, эВ			1,520	0,855	0,547	0,380	0,279	0,214	$X24*(N-1)^2/N^2$	Отличное
25	$nf^4F^o_3$	E*справ, эВ	0		23,74	24,04	24,21	24,31				
26	$nf^3F^o_{2,3,4}$	Едейств, эВ				0,850	0,550	0,380	0,280		C3-XN	
27		Ерасч1, эВ	13,6			0,850	0,544	0,382	0,279		$X22*(N-1)^2/N^2$	Отличное
28		Ерасч2, эВ				0,850	0,544	0,378	0,278		$X24*(N-1)^2/N^2$	Отличное
29												
30	δE, эВ	серия $1s^1S_0 - np^1P^o_1$	21,2180	23,0913	23,7463	24,0460	24,2150	24,3108			(C3-X7)	
31	Δω, c ⁻¹			3,22E+16	3,51E+16	3,61E+16	3,65E+16	3,68E+16	3,69E+16		$X30*E1/N1$	
32	λ изл, А°			584,335	536,930	522,121	515,613	512,014	509,996		$(C1/X31)*10^10$	отличное
33												
34	δE, эВ	серия $2p^1P^o_1 - nd^1D_2$		1,8520	2,5220	2,8220	2,9920				(D7-X22)	
35	Δω, c ⁻¹			2,81E+15	3,83E+15	4,29E+15	4,55E+15				$X34*E1/N1$	
36	λ изл, А°			6694,611	4916,106	4393,487	4143,857				$(C1/X35)*10^10$	хорошее
37												
38	δE, эВ	серия $3d^1D_2 - nf^4F^o_3$			0,6700	0,9700	1,1400	1,2400			(E22-X26)	
39	Δω, c ⁻¹				1,02E+15	1,47E+15	1,73E+15	1,88E+15			$X38*E1/N1$	
40	λ изл, А°				18505,103	12781,875	10875,806	9998,725			$(C1/X39)*10^10$	хорошее

Рис.9. Таблица Excel по расчету трех спектральных серий для атома гелия.

В таблице рис.9 приведены данные по спектральным переходам соответствующим трем электронным оболочкам, одна из которых с обозначением $np^1P^o_1$ на рис.7 характерна наиболее точным совпадением расчетных теоретических и справочных экспериментальных данных. По-видимому, сдвиги энергетических уровней в этой оболочке минимальны или вообще нулевые. Последнее служит основанием считать обозначенный на рис.9 первый энергетический уровень принадлежащим оболочке $np^1P^o_1$. Тогда первый энергетический уровень двух s – оболочек, вероятнее всего, имеет значение больше 24,59 эВ, что и служит причиной сравнительно больших сдвигов энергетических уровней этих оболочек.

В колонке «С» таблицы рис.9 помещены гипотетические данные по энергии связи электрона первого энергетического уровня. Расчет проведен по методике работы [7]. Однако

насчет необходимости и полезности этих данных у автора есть большие сомнения. Ввиду упорядоченности расположения энергетических уровней (частот) каждой оболочки базовым для расчетов можно принять любой уровень, кроме уровня, обозначенного на рис.8 первым.

Как видно из приводимых таблиц, идеальное совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается не для всех электронных оболочек. S – оболочки характеризуются наибольшим сдвигом энергетических уровней и меньшей точностью совпадения расчетных и экспериментальных данных. Для этих оболочек расчет проводился исходя из значения данных третьего энергетического уровня, влияние сдвига которого заметно меньше.

Подобное наблюдается и в диаграммах оптических спектров других более сложных атомов. Наблюдаемые отклонения в расчетных данных по разным оптическим сериям (сдвиг энергетических линий) нуждаются в поиске адекватного математического описания и физического объяснения.

К сожалению, формула Блохинцева [8, стр.31], определяющая частотный сдвиг энергетических уровней позволяет рассчитать только среднюю величину сдвига для энергетических уровней, без дифференциации сдвига по отдельным электронным оболочкам, как мы их здесь представляем. Формула Блохинцева достаточно сложная, хотя логарифмическая закономерность в частотных сдвигах энергетических уровней одной и той же электронной оболочки, судя по всему, правильно отражает реальность:

$$\delta\omega_0 = k \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^3 \frac{Z^4}{n^3} R \lg \left(\frac{mc^2}{\Delta E_{cp}} \right). \quad (13)$$

По мнению автора, частотный метод позволит найти более простые зависимости, описывающие рассматриваемые особенности оптических спектров атомов. Ориентировкой поисков в этом направлении может служить формула, описывающая частотные термы щелочных металлов [9, стр. 264]:

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha)^2 + \frac{\beta}{n^2}}. \quad (14)$$

Здесь n – целое число, α - поправка, представляющая правильную дробь, а β – вторая поправка, причем $\beta \ll \alpha$. В пределах серии α и β имеют постоянное значение. В работе [2] приводится близкая по написанию к (14), но несколько иная формула:

$$T(n) = \frac{R}{\left(n + \alpha + \frac{\beta}{n^2} \right)^2}. \quad (15)$$

В учебнике [10, стр.102] для термов щелочных металлов приводится более простая формула:

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha)^2}. \quad (16)$$

Приводимые значения α для натрия, применительно к формуле (16), таковы:

$$s = - 1,35; p = - 0,87; d = - 0,01; f = 0,00.$$

Проверка этих поправок для диаграммы натрия в частотном представлении показала хорошую сходимость расчетных результатов с экспериментальными данными. Однако физический смысл этих поправок остается не ясным. Можно предположить, что оболочки, в которых в диаграммах Гротриана имеются нижние энергетические уровни и которые характерны увеличенными межэнергетическими интервалами, соответствуют внешним возмущениям, затрагивающим глубинные электронные оболочки или ядро атома. Подтверждение верности данного предположения можно найти на диаграммах Гротриана для атомов других элементов, которые здесь не рассматриваются.

В подтверждение целесообразности использования частотных, а не энергетических или длин-волновых параметров, в которых описывается структура электронных оболочек атомов, можно привести и то, что современные методы частотного анализа оказываются намного точнее традиционных спектральных методов [11].

ВОЗМОЖНЫЕ НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ АТОМОВ

Трехуровневое частотное представление энергетических уровней и электронных переходов, изображаемых на диаграммах Гротриана, а также кластерное оболочечное представление энергетических уровней позволяют по-новому взглянуть на структуру оптических спектров и строение самих атомов. Закономерные частотные и амплитудные соотношения в оптических спектрах атомов, а также частотная упорядоченность колебаний на внутриатомном уровне формируют новое представление об атоме как целостном частотном «оркестре» или естественной «частотной гребёнке» [11], детальное изучение которых еще впереди. Из этих представлений вытекает оболочечная или пузыреподобная модель внешнего строения атома, давно используемая в химических представлениях о строении атомов и молекул. Внешние электроны модельно представимы вихревыми образованиями на пузыреподобной оболочке (рис.10). Направление вращения этих вихревых структур может характеризовать спин электрона, а частоты вращения – энергетические уровни.



Рис.10. Пузыри как наглядная модель строения атомов и молекул.

В такой наглядной модели получают естественное физическое объяснение ориентации и квантование механического и магнитного моментов электронной оболочки атома во внешнем магнитном поле, становится понятен принцип строения многоатомных систем (молекул).

Надо отметить, что любая физическая модель, в том числе и наша, не будет в точности соответствовать действительности. Любой природный объект, в том числе и атом, во всей своей полноте своей, вряд ли доступен познающему разуму. Однако каждая новая модель по-своему и по-особенному раскрывает действительность. В исторической перспективе неизбежно появление все новых и новых моделей атома в дополнение к существующим, показанным на рис.11. В исторической веренице множества моделей атома частотная пузырьреподобная модель, ввиду ее простоты и природной естественности, по мнению автора, должна занять достойное место. Если отталкиваться от моделей, представленных на рис.11, то рассматриваемая нами частотная модель в отдельных своих аспектах похожа на три модели: орбитальную, волногранную и полисфероподобную (Стюарта Бриглеба).

В частотной оболочечной модели атома внутриатомные электроны - это специфические (возможно, простейшие механические) колебания или местные вращательные движения (вихри) оболочки, а свободный электрон может быть представлен маленьким пузырьком или миниатюрной каплей, оторванной от электронной оболочки атома. Материал оболочки (конденсат «эфира») по величине не беспределен и, по идее, строго ограничен для каждого атома. В оболочечной модели атома с представлением внутриатомных электронов частотными

колебаниями оболочки сравнительно просто получают объяснение явления, связанные с электризацией тел при трении, пьезо- и термоэлектрические явления.

Ядро атома в такой оболочечной модели трудно представимо как центрально расположенное. Скорее всего, ядро следует образно представлять как каплю «эфирной» жидкости, из которой как пузырь «выдувается» многолепестковая оболочка атома, имеющая способность пульсировать и колебаться как по форме, так и по толщине.

Надо отметить, что наши модельные представления о едином и неделимом атоме близки соответствующим представлениям Д.И. Менделеева, опубликованным им в работе [12]. В этой работе содержатся и другие важные мировоззренческие представления, которые в перспективе могут оказаться более верными, чем современные общепризнанные.

Трехуровневая схема образования излучаемых (и поглощаемых) атомами фотонных частот имеет логическое и математическое обоснования. Наиболее соответствующие этой схеме модельные представления атома - это оболочечная плазменная [13] или пузыреподобная [14] модель, возможно, многолепестковая (или многослойная) по образу давно используемых в химии атомных и молекулярных орбиталей, где различают разрыхляющие и связывающие области (σ -, π -, и δ -связи). Известна оригинальная идея о возможном формировании оптического спектра не отдельными атомами, а их пространственно упорядоченной совокупностью («сави») [15].

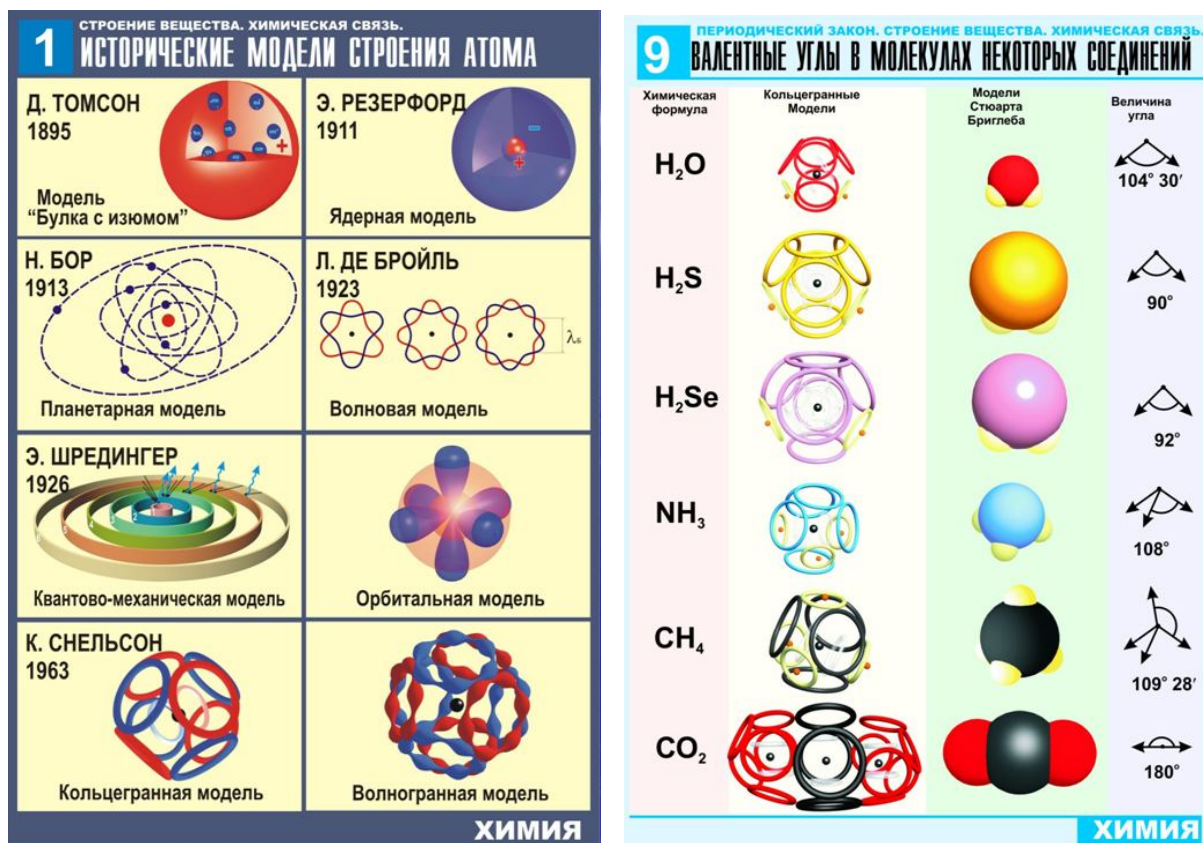


Рис.11. Исторические и химические модели строения атома.

Для рассматриваемой частотной модели атома получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных (справочных) данных в описании структуры оптического спектра простейших атомов. Однако используемые соотношения не дают одинаковой точности совпадения данных по всем сериям оптического спектра. Поиск причин такого положения требует проведения дальнейших поисковых исследований. На успешность таких поисков позволяет надеяться наблюдаемая на диаграммах Гротриана симметрия в деформациях интервалов между энергетическими уровнями одной и той же оболочки («энергетической лестницы») и закономерности межоболочечных «электронных переходов» (частотных биений).

В заключение можно сформулировать следующие выводы:

1. Диаграммы Гротриана, используемые в спектроскопии, имеют инверсное изображение энергетических уровней, что затрудняет частотную идентификацию внутриатомных колебаний и понятие физического механизма, порождающего оптические спектры атомов.

2. Частотное и верное представление спектральных энергетических уровней на диаграммах Гротриана позволило обнаружить в атомах трехуровневую структуру частот, создающих оптические спектры. При этом целочисленные резонансные соотношения частот обнаруживаются на дебройлевском уровне, а оптические частоты представляются как частотные биения колебаний, присущих внешней электронной оболочке и связанных с дебройлевскими частотами квадратичной зависимостью.

3. Кластерное изображение спектральных уровней на диаграммах Гротриана дает основание видеть электронные оболочки атома как первичные и целостные образования, в которых электроны разных энергетических уровней представлены как резонансные (на дебройлевском уровне) колебания этих оболочек. Данное предположение подкреплено расчетными соотношениями, выполненными для простейших атомов.

3. Ряд высказанных в работе предположений о строении оптических спектров и самих атомов носят дискуссионный характер.

Список источников

1. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика: Учебное пособие. Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004. – 496 с.

2. Раутиан С.Г., Яценко А.С. Диаграммы Гротриана. // УФН. Том 169. №2. Электронный вариант, режим доступа:

http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsenio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1999/02/r992f.pdf,

(дата обращения – 29.08.2013 г.).

3. Крауфорд Ф. Волны: Учебное руководство: Пер. с англ. / Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. – 3-е изд. испр. - М.: Наука. 1984. – (Берклевский курс физики). – 512с.
4. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Михайлова. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Басина Г.И., Басин М.А. Синергетика. Вселенная резонансов. – СПб.: 140 с. Электронный вариант. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/textsts/rus/stat/st4595.pdf> (дата обращения - 29.07.2013 г.).
6. Информационная система НГУ «Электронная структура атомов». Режим доступа: <http://grotrian.nsu.ru/ru/diagramm/10425> , (дата обращения - 29.08.2013 г.).
7. Канарёв Ф.М. Начала физхимии микромира. Монография микромира. Изд. 16-е. 2012 г. – 390 с. Режим доступа: <http://www.micro-world.su/index.php/2010-12-22-11-45-21/663-2012-08-19-17-07-36>, (дата обращения - 14.07.2013 г.).
8. Куземский А.Л. Работы Д.И. Блохинцева и развитие квантовой физики. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2008. Том 39. Вып. 1. Электронная версия. Режим доступа: http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan/2008-v39/v-39-1/00_kuz.pdf, (дата обращения - 15.08.2013 г.).
9. Корсунский М.И. Оптика. Строение атома. Атомное ядро. Изд. 2-е испр. и дополн. М.: Наука. 1964. 527 с.
10. Савельев И.В. Курс общей физики. Учеб. Пособие. В 3-х т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра. – 3-е изд. испр. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
11. Хэнш Т.В. Страсть к точности. (Нобелевская лекция). УФН. Том 178. №12. Электронный вариант. Режим доступа: http://ufn.ru/ufn06/ufn06_12/Russian/nob0612.pdf, (дата обращения - 29.07.2013 г.).
12. Менделеев Д. И. Попытка химического понимания мирового эфира. СПб., 1905 г. – 40 с. Режим доступа: <http://pulse.webservis.ru/Science/Mend/mend.html>, (дата обращения - 14.07.2013 г.).
13. Киржниц Д.А., Лозовик Ю.Е.. Плазменные колебания электронной оболочки атома. УФН. Том 89, вып.1. 1966 г. Май. Стр. 39-47.
14. Чуев А.С. Модель атома с пузыреподобной электронной оболочкой. / Материалы 5-й Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». 26-28 января 2009 г. В 3-х частях. Часть III. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва. 2009. Стр. 138-141.
15. Керн Йохан. Причинно-следственное токование спектра изучения газов. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7383.html>, (дата обращения - 14.07.2013 г.).