

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПРИМЕНЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛ****М. М. Сущинский**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время комбинационное рассеяние света широко применяется для исследования строения молекул и определения характеризующих их параметров. Обычно изучаются колебательные спектры комбинационного рассеяния, которые позволяют определить частоты внутримолекулярных колебаний и силы, действующие между атомами в молекулах, а также некоторые электрооптические параметры молекул.

Дополнительные сведения о строении молекул могут быть получены путем исследования вращательных спектров комбинационного рассеяния. Вращательные спектры позволяют определить моменты инерции молекул и по этим величинам найти расстояния между атомами и валентные углы. В последние годы появился ряд работ по вращательным спектрам комбинационного рассеяния<sup>1-11</sup>, в которых получены интересные результаты. В настоящей статье дается краткий обзор этих работ.

После первых работ по вращательным спектрам комбинационного рассеяния, выполненных Разетти и его сотрудниками<sup>12, 13</sup> (см. также<sup>14</sup>), в течение длительного периода эти спектры почти не исследовались. Это было вызвано главным образом трудностями экспериментального исследования очень слабых по интенсивности спектров.

В противоположность колебательным спектрам, которые могут изучаться в жидкостях и со спектральными приборами умеренной дисперсии, вращательные спектры комбинационного рассеяния должны исследоваться в газах при сравнительно небольших давлениях, причем для разрешения вращательной структуры спектральные приборы должны обладать большой дисперсией и разрешающей способностью. При выполнении этих требований интенсивность спектров сильно снижается. В связи с этим успехи в исследовании вращательных спектров комбинационного рассеяния, достигнутые в последние годы, обусловлены в первую очередь тем, что удалось повысить интенсивность рассеянного света.

При решении задачи определения внутримолекулярных параметров метод вращательных спектров комбинационного рассеяния имеет некоторые преимущества по сравнению с существующими в настоящее время другими методами. Так, при исследовании вращательно-колебательных инфракрасных полос поглощения анализ наблюдаемой структуры часто оказывается затруднительным: эти полосы могут быть возмущены и перекрыты соседними полосами, поэтому для некоторых полос центры их не могут быть найдены достаточно точно. Метод исследо-

вания спектров в далекой инфракрасной и микроволновой области дает хорошую точность и в настоящее время успешно развивается, но применим только к полярным молекулам. Средствами же вращательных спектров комбинационного рассеяния можно изучать как полярные, так и неполярные молекулы. Дополнительным преимуществом является то, что возбуждающая линия точно определяет центр вращательного спектра и нумерация линий благодаря этому вполне однозначна и легко осуществима.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наблюдаемая ширина линий в спектрах комбинационного рассеяния определяется, в основном, тремя факторами: шириной аппаратной функции спектрального прибора, шириной возбуждающей линии и собственной шириной комбинационной линии, связанной с давлением изучаемого газа. Отсюда непосредственно следует, что для исследования вращательных спектров комбинационного рассеяния должны применяться а) спектральный прибор с достаточно высокой дисперсией и разрешающей способностью, б) источник света с узкой возбуждающей линией и в) исследуемый газ должен находиться при достаточно низком давлении. Выполнение каждого из этих требований ведет к понижению интенсивности комбинационных линий.

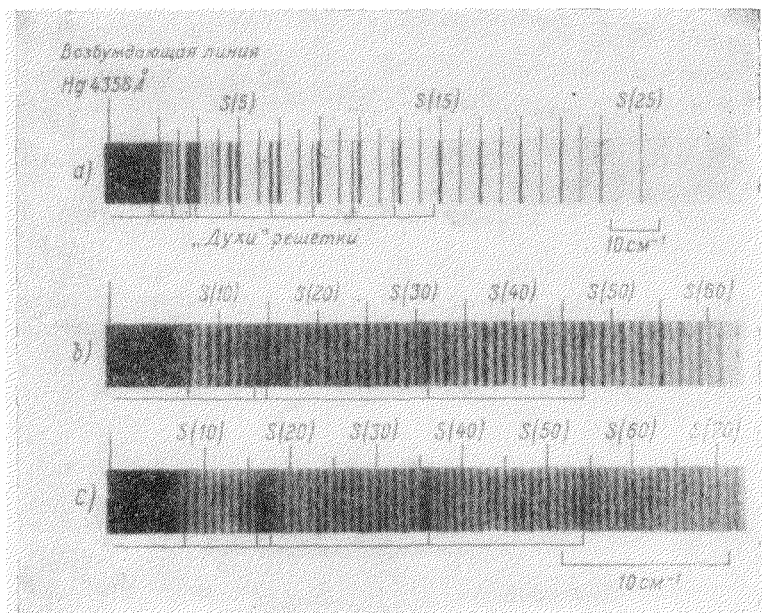
Таким образом, для получения спектров комбинационного рассеяния с интенсивностью, допускающей их фотографирование с практически приемлемыми экспозициями, например, не превышающими несколько десятков часов, требуется источник света с очень большой интенсивностью (и в то же время узкой возбуждающей линией). В последние годы ртутные лампы, обладающие требуемыми свойствами, разработаны (см., например,<sup>15</sup>) и получили уже широкое распространение при исследовании колебательных спектров комбинационного рассеяния. Эффективность ртутных ламп при исследовании газов оказалось возможным очень сильно увеличить, применяя специальные сосуды для рассеяния с системой собирающих зеркал. Эта аппаратура подробно описана в обзоре Я. С. Бобовича и В. М. Пивоварова<sup>16</sup>, поэтому мы не будем касаться здесь этой стороны методики.

В цитированных выше работах<sup>1-11</sup> при съемке вращательных спектров комбинационного рассеяния использовалась прямая ртутная лампа низкого давления при токе 25 а (в некоторых измерениях применялись две такие лампы). Длина используемой части лампы составляла 80 см. Лампа и сосуд с исследуемым газом помещались в рефлектор со стенками, покрытыми слоем окиси магния, что давало, по данным<sup>1</sup>, выигрыш в интенсивности в 6 раз. Ширина возбуждающей линии (использовалась линия 4358 Å) составляла 0,2 см<sup>-1</sup>.

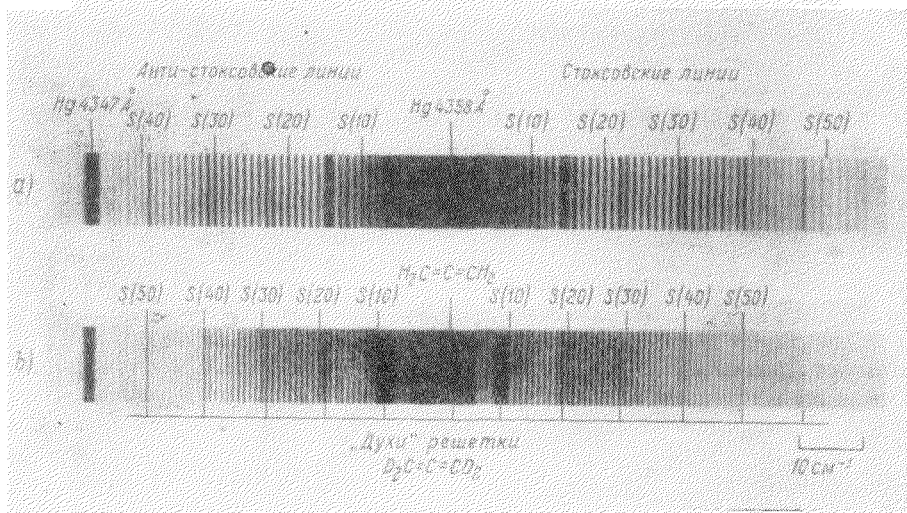
Для съемки спектров применялся спектрограф с вогнутой дифракционной решеткой в установке Игла. Фокусное расстояние спектрографа составляло 21 фут. Решетка имела размеры нарезанной части 7×3 дюйма с 15 000 штрихов на 1 дюйм. Максимум интенсивности находился во втором порядке в области 5000 Å. Линейная дисперсия спектрографа составляла во втором порядке 1,2 Å или 6,75 см<sup>-1</sup> на 1 мм.

При давлении исследуемого газа от 0,5 до 2 атм для съемки вращательных спектров комбинационного рассеяния требовались экспозиции от 6 до 24 часов. Ширина щели составляла 0,03 мм. В некоторых случаях перед фотопластинкой устанавливалась цилиндрическая линза, которая уменьшала высоту спектра с 15 до 3 мм. Применение цилиндрической линзы давало значительный выигрыш в экспозиции, не ухудшая практически качество спектра.

Фактический предел разрешения с описанной установкой составлял  $0,3-0,4 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует для линейных молекул значению враща-



А



В

Рис. 1. Вращательные спектры комбинационного рассеяния некоторых молекул. А. Линейные молекулы: а) ацетилен,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; б) диацетилен,  $\text{C}_4\text{H}_2$ ; в) диацетилен- $d_2$ ,  $\text{C}_4\text{D}_2$ .

В. Молекулы типа симметричного волчка. а) аллен,  $\text{C}_3\text{H}_4$ ; б) аллен- $d_4$ ,  $\text{C}_3\text{D}_4$ .

тельной константы  $B=0,1 \text{ см}^{-1}$  или моменту инерции  $I=280 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2$ . В качестве примера на рис. 1 приведены вращательные спектры некоторых исследованных молекул.

## 3. АНАЛИЗ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Изучение вращения молекулы, как твердого тела, приводит к рассмотрению четырех различных случаев (см., например, монографию Герцберга<sup>17</sup>):

- 1) линейные молекулы (один из главных моментов инерции равен нулю);
- 2) молекулы типа симметричного волчка (два главных момента инерции равны между собой);
- 3) молекулы типа асимметричного волчка (все три главных момента инерции разные);
- 4) молекулы типа сферического волчка (все три главных момента инерции одинаковы).

Молекулы типа сферического волчка не дают вращательных спектров комбинационного рассеяния. С другой стороны, молекулы типа асимметричного волчка фактически еще не исследовались, так как изучение молекул этого типа сводилось всегда к более простому случаю молекул типа симметричного волчка. Поэтому мы кратко рассмотрим только молекулы первых двух типов.

## 1. Л и н е й н ы е м о л е к у л ы

Вращательная энергия линейных молекул может принимать значения

$$\frac{E}{hc} = F(J) = BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $J$  — вращательное квантовое число,  $B$  — вращательная постоянная, равная

$$B = \frac{h}{8\pi^2cI}, \quad (2)$$

$I$  — момент инерции относительно оси, перпендикулярной оси молекулы и проходящей через центр тяжести. Член  $DJ^2(J+1)^2$  в формуле (1) обусловлен нежесткостью молекулы (по сравнению с первым членом он всегда мал) и характеризует влияние центробежной силы, приводящей при вращении молекулы к небольшому увеличению расстояния между ядрами.

Правила отбора для вращательных спектров комбинационного рассеяния линейных молекул суть

$$\Delta J = 0; \pm 2. \quad (3)$$

Формула для изменения частот  $|\Delta\nu|$  во вращательном спектре получается из выражения

$$|\Delta\nu| = F(J') - F(J), \quad (4)$$

если подставить  $J' = J + 2$ . Получаем

$$|\Delta\nu| = (4B - 6D) \left( J + \frac{3}{2} \right) - 8D \left( J + \frac{3}{2} \right)^3. \quad (5)$$

Так как  $D \ll B$ , то с довольно хорошим приближением

$$|\Delta\nu| \approx 4B \left( J + \frac{3}{2} \right). \quad (5')$$

Таким образом, вращательный спектр комбинационного рассеяния линейных молекул представляет собой последовательность почти равноотстоящих линий, расположенных с каждой стороны от возбуж-

дающей линии (см. рис. 1). Так как для всех линий этого спектра  $\Delta J = 2$ , то мы имеем здесь только одну ветвь —  $S$ -ветвь (см. 17).

Благодаря тому, что расстояния между вращательными линиями почти одинаковы, можно по формуле (5') легко определить значение квантового числа  $J$  для каждой вращательной линии, измерив ее расстояние от возбуждающей линии. Простота и надежность нумерации линий представляют важное преимущество вращательных спектров комбинационного рассеяния по сравнению с другими спектрами.

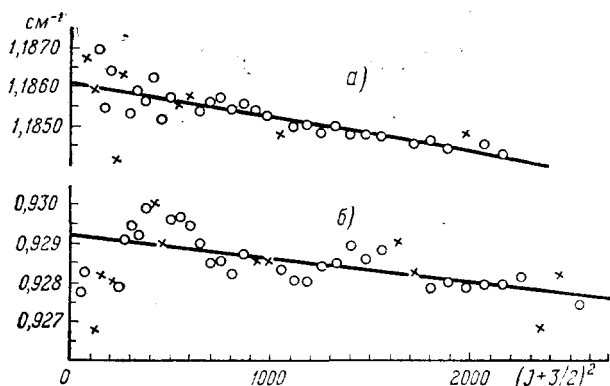


Рис. 2. а) Аллен; б) аллен= $d_4$ .

После того, как квантовые числа вращательных линий установлены, можно определить более точно константы  $B$  и  $D$  в формуле (5). Для этого обычно строят график зависимости  $|\Delta\nu| / \left(J + \frac{3}{2}\right)$  от  $\left(J + \frac{3}{2}\right)^2$  (рис. 2). Отрезок по оси ординат на этом графике дает величину  $4B - 6D$ , а наклон прямой — величину  $8D$ . По найденным значениям вращательной постоянной  $B$  можно легко найти, пользуясь формулой (2), момент инерции молекулы

$$I = \sum m_i r_i^2, \quad (6)$$

где  $r_i$  — расстояние  $i$ -го атома с массой  $m_i$  от центра тяжести.

Для простейших молекул, когда все  $r_i$  одинаковы, величина момента инерции однозначно определяет расстояния между атомами  $r_i$ . В случае разных  $r_i$  одно значение  $I$  уже недостаточно для определения всех значений  $r_i$ . Эту трудность в случае исследования углеводородов можно частично обойти, делая снимки дейтерозамещенных соединений. Тогда в предположении, что расстояния между атомами при замене атомов Н на атомы D не изменяются, можно получить дополнительные значения моментов инерции и, следовательно, дополнительные уравнения для определения  $r_i$ . Предположение о равенстве расстояний C—H и C—D (при использовании величин  $r_0$ ; см. ниже) выполняется, однако, лишь с точностью порядка  $0,002 \text{ \AA}$  (см. 8). Кроме того, в большинстве случаев и данных для дейтеропроизводных недостаточно для определения всех  $r_i$ . Поэтому обычно приходится заимствовать некоторые значения  $r_i$  из данных, полученных для других молекул, имеющих связи того же типа, как и в рассматриваемой молекуле. При этом большей частью используются данные, полученные методами радиоспектроскопии.

Заметим, что значения вращательной постоянной  $B$  и момента инерции  $I$ , полученные из вращательных спектров комбинационного рассеяния, относятся не к равновесному положению ядер  $r_e$ , а к самому низкому колебательному состоянию, соответствующему нулевым колебаниям. Разница получаемых из вращательных спектров значений  $r_0$  и равновесных значений  $r_e$  обычно лежит в пределах ошибок измерения (около  $0,001 \text{ \AA}$ ). Однако в случае двухатомных молекул, например, для  $N_2$ , имеем:

$$\begin{aligned} r_0 &= 1,1000_8 \pm 0,0001 \text{ \AA}; \\ r_e &= 1,0975_8 \pm 0,0001 \text{ \AA}, \end{aligned}$$

т. е. разница  $r_0 - r_e$  реально измерима.

## 2. Молекулы типа симметричного волчка

Обозначим два равных момента инерции молекулы через  $I_B$ , третий момент инерции через  $I_A$ . Тогда для вращательной энергии имеем (для жесткого волчка)

$$\frac{E}{hc} = BJ(J+1) + (A-B)K^2, \quad (7)$$

где

$$B = \frac{h}{8\pi^2 c I_B}; \quad A = \frac{h}{8\pi^2 c I_A}. \quad (8)$$

Появление второго квантового числа  $K$  связано с тем, что, кроме самого момента количества движения  $\mathbf{P}$ , которому соответствует квантовое число  $J$ , имеется также составляющая  $P_z$  в направлении оси волчка, которой и соответствует квантовое число  $K$ . Это число есть мера (в единицах  $h/2\pi$ ) указанной составляющей момента количества движения, как  $J$  есть мера самого момента количества движения  $\mathbf{P}$ . Согласно определению,  $K \leq J$ , т. е.

$$J = K, K+1, K+2 \dots$$

При рассмотрении нежесткого волчка в выражении для вращательной энергии появляются небольшие по величине добавочные члены и оно принимает вид:

$$\frac{E}{hc} = BJ(J+1) + (A-B)K^2 - D_J J^2 (J+1)^2 - D_{JK} J(J+1)K^2 - D_K K^4, \quad (9)$$

где  $D_J, D_K, D_{JK}$  — постоянные, малые по сравнению с  $A$  и  $B$ .

Правила отбора для вращательного спектра комбинационного рассеяния суть

$$\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2; \quad \Delta K = 0. \quad (10)$$

Каждому значению квантового числа  $K$  соответствуют две серии равноотстоящих линий, соответствующих  $\Delta J = 1$  (ветвь  $R$ ) и  $\Delta J = 2$  (ветвь  $S$ ), по каждую сторону возбуждающей линии. Поскольку для жесткого симметричного волчка вращательные уровни, отвечающие различным значениям  $K$ , расположены совершенно одинаково, то соответствующие линии ветвей с разными  $K$  совпадают. Таким образом, в спектре реально наблюдаются только две ветви:  $S$  и  $R$ . Для смешения частот имеем:

$$|\Delta\nu| = (4B - 6D_J - 4D_{JK}K^2) \left( J + \frac{3}{2} \right) - 8D_J \left( J + \frac{3}{2} \right)^3 \quad (11)$$

для ветви *S*, и

$$|\Delta\nu| = (2B - 2D_{JK}K^2)(J + 1) - 4D_J(J + 1)^3 \quad (12)$$

для ветви *R*. В первом приближении постоянными  $D_J$ ,  $D_{JK}$  можно пренебречь. При этом оказывается, что линии ветви *R* с четными  $J$  совпадают с линиями ветви *S*.

Анализ экспериментально наблюдаемого спектра производится так же, как и в случае линейных молекул. Практически в работах <sup>1-11</sup> использовались только *S*-ветви спектров, так как интенсивности линий, принадлежащих ветвям *R*, обладали слишком малой интенсивностью для уверенных измерений.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

К настоящему времени методом вращательных спектров комбинационного рассеяния измерены длины связей еще сравнительно небольшого числа соединений. Однако полученные данные, частично дополненные данными, найденными другими методами, представляют несомненный интерес, позволяя проследить влияние на длину связей особенностей строения молекулы.

В таблице I приведены данные для нескольких углеводородов с двойными связями, причем для этилена приводятся данные, полученные из спектров комбинационного рассеяния <sup>18</sup> и инфракрасных спектров <sup>19</sup>. Эти данные с несомненностью показывают, что длина двойной связи C=C уменьшается, если рассматриваемая двойная связь смежна с другой двойной связью. Дальнейшее уменьшение длины двойной связи происходит, когда она находится между двумя другими двойными связями, как это имеет место в случае бутатриена.

Следует специально отметить, что Паулинг и Броквей <sup>20</sup>, пользуясь методом дифракции электронов, нашли для длины двойной связи в аллене то же значение, как и в этилене. Результаты, полученные методом вращательных спектров комбинационного рассеяния и подтверждаемые данными, полученными другими методами <sup>21, 22</sup>, показывают, что в работе <sup>20</sup> была, по-видимому, допущена ошибка.

Выводы относительно влияния на длину связи характера смежных связей подтверждаются при исследовании соединений с тройными связями (табл. II). Как можно видеть из приводимых данных, длина единичной связи C—C значительно уменьшается, если рядом с ней находится тройная связь. Если единичная связь находится между двумя тройными связями, то длина ее сокращается еще больше. Как видно из таблицы II, длина связи C—C мало зависит от того, какой атом привешен к тройной связи — углерод или азот. С другой стороны, длина тройной связи C≡C почти не меняется при замене смежной с ней связи C—H на C—C. Некоторое влияние типа атома, привешенного к связи, смежной с рассматриваемой связью, проявляется в случае галоидозамещенных углеводородов <sup>11</sup>.

Таблица I

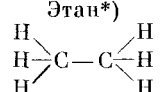
Углеводороды с двойными связями

Вещество	Связь	Длина связи, А
Этилен $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	C=C	1,344
Аллен $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \quad \diagdown \\ \text{C} = \text{C} = \text{C} \\ / \quad \diagdown \quad / \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	>C=C=	1,309
Бутатриен $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \quad \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} = \text{C} = \text{C} \\ / \quad \diagdown \quad / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	C—H	1,07
	=C=C=	1,284
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \quad \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} = \text{C} = \text{C} \\ / \quad \diagdown \quad / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	>C=C=	1,309
	C—H	1,07

В таблице III приведены данные для двух кольцевых систем. Следует заметить, что для бензола вращательные спектры комбинационного рас-

Таблица II

Соединения с тройными связями

Вещество	Длина связи, Å		
	C≡C	C—C	C—H
Этан*) 	—	1,543	1,095
Ацетилен H—C≡C—H	1,2067	—	1,061
Диметилацетилен**) H <sub>3</sub> C—C≡C—CH <sub>3</sub>	1,207	1,460	1,097
Диацетилен H—C≡C—C≡C—H	1,205	1,376	1,046
Цианоген N≡C—C≡N	1,157***)	1,380	—

\*) По данным <sup>23</sup>.  
 \*\*) В значительной степени использованы данные <sup>24</sup> для микроволнового спектра метилацетилена.  
 \*\*\*) Из микроволнового спектра цианоацетилена <sup>25</sup>.

сеяния не дают возможности получить независимое подтверждение той или иной возможной модели с симметрией  $D_{6h}$ ,  $D_{3h}$ ,  $C_{6h}$ ,  $D_{3d}$  соответственно, так как все эти модели относятся к типу симметричного волчка и вращательные спектры у них одинаковы. Авторы работ <sup>2, 6</sup>, в которых


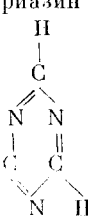
были исследованы вращательные спектры  $C_6H_6$ ,  $C_6D_6$  и симметричного  $C_6H_3D_3$ , исходили из общепринятой модели, с симметрией  $D_{6h}$ . Найденная длина связи оказывается промежуточной между длинами связей C—C и C=C.

В случае триазина анализ вращательной структуры проводился в предположении, что эта молекула плоская и имеет симметрию  $D_{3h}$  в соответствии с данными, полученными методом дифракции рентгеновых лучей. Были исследованы молекулы *s*-триазина и *s*-триазина-*d*<sub>3</sub>. Для расстояния C—H было принято значение 1,084 Å. При этом было найдено, что кольцо в молекуле триазина не имеет правильной гексагональной структуры, причем

$$\angle CNC = 113,2^\circ; \quad \angle NCN = 126,8^\circ.$$

Таблица III

Кольцевые системы

Вещество	Связь	Длина связи, Å
Бензол 	$\left. \begin{array}{l} \text{C}=\text{C} \\ \text{C}=\text{C} \end{array} \right\}$ C—H	1,397 1,084
Триазин 	C—N C—H	1,338 1,084

В таблице IV приведены данные для связи C—H. Длина этой связи также зависит от окружения, т. е. от характера смежной связи, но эта зависимость выражена не так сильно, как для связей углерод—углерод.



Приводимые величины представляют значения  $r_0$ , т. е. включают нулевые колебания, так как равновесные значения  $r_e$  известны не для всех случаев и их еще затруднительно сравнивать.

Приводимый в таблицах I—IV экспериментальный материал указывает, таким образом, на несомненное влияние характера смежной связи на длину рассматриваемой связи\*).

Влияние рода атома, приведенного к смежной связи, проявляется незначительно, но крайней мере в случае углеводородов. В том, что касается влияния на длину связей сопряжения кратных связей, которое в течение длительного времени считалось весьма существенным, то, по-видимому, оно если и имеется, то весьма незначительно. Напомним, что обычно считалось, что в системах с сопряженными кратными связями, т. е. имеющих чередующиеся простые и кратные связи, происходит «выравнивание» длин связей: одиночные связи укорочены, а кратные связи удлинены по сравнению с аналогичными связями в несопряженных системах. С этой точки зрения в аллене длина связи C=C должна была бы оставаться такой же, как в этилене, так как в аллене сопряжения связей нет. В действительности связь C=C в аллене укорочена, как уже отмечалось выше. В диацетилене—молекуле с сопряженными связями—можно было бы ожидать увеличения длин связей C≡C по сравнению с ацетиленом. В действительности наблюдается даже некоторое уменьшение этой длины (табл. II). Правда, в диацетилене одиночная связь C—C короче, чем в других молекулах, но она короче, чем, например, в этане, и в диметилацетилене, где сопряжения кратных связей не имеется. Во всех исследованных случаях наблюдаемое укорочение одиночной связи C—C можно отнести за счет влияния смежной связи, не прибегая для этого к влиянию эффекта сопряжения.

В заключение заметим, что приводимый экспериментальный материал, несмотря на его ограниченность, указывает на очевидную целесообразность применения метода вращательных спектров комбинационного рассеяния, в комбинации с другими методами, для определения структурных параметров молекул.




#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **32**, 330 (1954).
2. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **32**, 339 (1954).
3. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **32**, 630 (1954).
4. C. K. Møller, B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **32**, 635 (1954).
5. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **33**, 811 (1955).
6. A. Langseth, B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **34**, 350 (1956).
7. J. E. Lancaster, B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **34**, 1016 (1956).
8. J. H. Callomon, B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **35**, 373 (1957).
9. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **35**, 730 (1957).
10. B. P. Stoicheff, *Canad. J. Phys.* **35**, 837 (1957).
11. G. Hertberg, B. P. Stoicheff, *Nature* **175**, 79 (1955).
12. F. Rasetti, *Phys. Rev.* **34**, 367 (1929), *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.* **15**, 234, 515 (1929), *Zeits. f. Physik* **61**, 598 (1930).
13. R. G. Dickinson, R. T. Dillon, F. Rasetti, *Phys. Rev.* **34**, 582 (1929).

\* ) Обсуждение данных, полученных другими методами, проводится, например, в<sup>26</sup>.

Таблица IV

Длина связи C—H

Тип связи	Длина, Å
 C—H	1,095
 C—H (ароматич.)	1,084
 C—H (цепочка)	1,071
≡C—H	1,061

14. W. V. Houston, C. M. Lewis, Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. **17**, 229 (1931), Phys. Rev. **44**, 903 (1933).
  15. М. Л. Сосинский, Изв. АН СССР, серия физич. **17**, 621 (1953).
  16. Я. С. Бобович, В. М. Пивоваров, УФН **60**, 689 (1956).
  17. Г. Герцберг, Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул, ИЛ, 1949.
  18. J. Romanko, T. Feldman, E. J. Stansbury, A. McKellar, Canad. J. Phys. **32**, 735 (1954).
  19. W. S. Galla way, E. F. Barker, J. Chem. Phys. **10**, 88 (1942).
  20. L. Pauling, L. O. Brockway, J. Am. Chem. Soc. **59**, 1223 (1937).
  21. J. Overend, H. W. Thompson, J. Opt. Soc. Am. **43**, 1065 (1953).
  22. R. Wierl, Ann. Physik. **13**, 453 (1932).
  23. G. E. Hansen, D. M. Dennison, J. Chem. Phys. **20**, 313 (1952).
  24. R. Trambarulo, W. Gordy, J. Chem. Phys. **18**, 1613 (1950).
  25. A. A. Westenberg, E. B. Wilson, J. Am. Chem. Soc. **72**, 109 (1950).
  26. В. М. Татевский. Химическое строение углеводородов и закономерности в их физикохимических свойствах. Изд. МГУ, 1953.
-