

С 346.36

3-634

17/IV-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2039



В.Г. Зинов, А.Д. Конин, А.И. Мухин

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
K-МЕЗОРЕНТГЕНОВСКОЙ СЕРИИ ПРИ  
АТОМНОМ ЗАХВАТЕ  $\mu^-$ -МЕЗОНОВ  
В ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

P-2089

В.Г. Зянов, А.Д. Кошки, А.И. Мухин

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
K-МЕЗОРЕНТГЕНОВСКОЙ СЕРИИ ПРИ  
АТОМНОМ ЗАХВАТЕ  $\mu^-$ -МЕЗОНОВ  
В ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ

СОЕДИНЕННЫЙ И  
ЯДЕРНЫЙ ИССЛЕДОВАНИЙ  
1970

310013 no.

В 1961 году была опубликована работа Эвзенберга и Кесслера<sup>/1/</sup> с результатами тщательных расчетов мезоатомных каскадов. Расчеты выполнены ими при различных предположениях о начальном заселении уровней с главным квантовым числом  $n = 14$  (эти уровни  $\mu^-$ -мезона находятся уже внутри электронной оболочки).

Недавно вышла работа Квитмена и др.<sup>/2/</sup>, посвященная экспериментальному изучению рентгеновских переходов  $\mu^-$ -мезонов в атомах различных элементов. В ней отмечается, что линии К-серии от мезорентгеновских переходов с высоких уровней имеют большую интенсивность. Этот факт находится в противоречии с расчетами работы<sup>/1/</sup>.

Данная работа посвящена изучению относительного выхода различных линий К-мезорентгеновской серии в атомах металлов при атомном захвате  $\mu^-$ -мезонов в  $V$  и  $V_2O_5$ ,  $Cr$  и  $Cr_2O_3$ .

Работа выполнена на синхротроне ОИЯИ. Схема опыта представлена на рис. 1. Для регистрации  $\gamma$ -квантов использовался счетчик с кристаллом  $NaI$  диаметром 78 мм и высотой 78 мм. Средняя толщина мишеней была  $1,7 \text{ г/см}^2$ .

Полученные спектры приведены на рис. 2 - 5. В них вычтен фон случайных совпадений и фон за счет регистрации продуктов от ядерного захвата  $\mu^-$ -мезона.

В таблице 1 дана оценка интенсивностей  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$  и суммы всех остальных переходов -  $K_\gamma$ . Абсолютный выход К-серии на одну остановку мюона не определялся. На рис. 2, 3, 4, 5 компоненты К-серии обозначены тонкими штриховыми линиями. При анализе спектров в качестве калибровочной использовалась  $\gamma$ -линия от источника  $Zn^{65}$ . В последних двух строках таблицы 1 для сравнения приведены результаты интерполяции данных работы<sup>/2/</sup>.

Из таблицы 1 видно, что вероятность переходов мюона с высоких уровней сразу на основную существенно зависит от химического состава вещества. Разница же между атомами, например, ванадия в чистом  $V$  и в  $V_2O_5$  состоит только в том, что изменены состояния самых внешних валентных электронов. Оказывается, однако, что эти небольшие изменения в электронной оболочке играют существенную роль в последующих каскадных переходах мюона.

С этой точки зрения представляет интерес работа Л.И.Пономарева<sup>/3/</sup>, которая посвящена обсуждению возможных механизмов поглощения  $\mu^-$ -мезонов в водородо-содержащих веществах. В применении к нашему случаю выводы работы<sup>/3/</sup> заключаются в следующем. Определенная доля остановившихся мезонов первоначально захватывается на один из стационарных уровней, общий для всей молекулы ( $Z_1 - Z_2$ ).

Дальнейшая судьба мезона обусловлена многими возможными причинами. По мнению Л.И.Покомарева, наиболее заметную роль будут играть радиационные переходы. Поскольку вероятность радиационных переходов пропорциональна кубу энергии перехода, а запрет по орбитальному моменту снимается из-за нарушения центральной симметрии в системе молекулы, то это должно привести к интенсивному испусканию X-квантов большой энергии (переходы непосредственно в основное состояние мезоатома).

Имея в виду рассмотренный механизм, можно качественно объяснить результаты нашего эксперимента с  $\mu^-$ -мезонами. В самом деле, в случае системы из двух ядер  $Z_1$  и  $Z_2$  без учета экранирования электронами все уровни ядра  $Z_1$ , начиная с

$$n \geq n_0 = \sqrt{\frac{Z_1 R}{2(2\sqrt{\frac{Z_2^2}{Z_1}} + 1)}}, \quad (1)$$

будут общими для всей системы (см. рис. 6). Здесь  $R$  — межядерное расстояние в мезоатомных единицах  $\mu = e = m\mu = 1$ . Обычно  $R \approx 400-800^{1/3}$ .

Из формулы следует, что по сравнению с  $V_2 O_5$  в чистом ванадии первый общемолекулярный уровень  $E(n_0)$  будет лежать ниже, а энергетическая область общемолекулярных уровней будет шире (см. рис. 6). Поэтому в чистом ванадии вероятность захвата мюона из области непрерывного спектра на эти уровни будет больше. Это приведет к большему выходу X-квантов больших энергий. Рис. 2-5 показывают на качественное согласие этих представлений с экспериментом.

Таким образом, экспериментальные данные дают основания полагать, что  $K_{\nu}$ -линия представляет собой переход непосредственно с общих молекулярных уровней ( $n \approx \infty$ ) на уровень  $n=1$ .

В связи с этим необходимо найти объяснение тому экспериментальному факту<sup>1/2/</sup>, что фотон  $K_{\nu}$ -линии по своей энергии соответствует радиационному переходу с  $n=7$  на основной уровень. К такому смещению линии могут привести два обстоятельства.

Во-первых, переход  $\mu^-$ -мезона с уровней в области валентных электронов на  $1S$  осуществляется в основном за счет так называемого "смешанного" Оже-радиационного перехода, рассмотренного Рудерманом. При таком переходе электрон уносит  $\approx 1\%$  энергии перехода, и около 99% энергии уносит X-квант<sup>1/4/</sup>. Этим можно объяснить некоторый сдвиг  $K_{\nu}$ -линии в сторону меньших энергий и, возможно, уширение линии.

Другой эффект, который приводит к уменьшению энергии фотона, заключается в том, что при переходе мезона с внешних уровней, лежащих в области электронной

оболочки, на внутренние происходит экранирование заряда ядра. При этом для электронной оболочки эффективный заряд ядра скачком изменяется с  $Z$  на  $Z - 1$ . Энергия связи электронной оболочки уменьшается и должна быть восполнена за счет энергии перехода мюона (7-8 кэв в  $V$  и  $Cr$ ).

Основной вывод настоящей работы состоит в том, что заметная доля остановившихся  $\mu^-$ -мезонов в конденсированных средах захватывается из области непрерывного спектра вначале на очень высокие "молекулярные" энергетические уровни в области внешних валентных электронов. Дальнейшие каскадные переходы мюона будут существенно зависеть как от его взаимодействия с валентными электронами, так и от взаимодействия с остальной электронной оболочкой (с "остовом"). Взаимодействие с валентными электронами должно приводить к тому, что некоторые свойства мезоатомов будут повторяться при изменении  $Z$  в соответствии с периодами электронных оболочек в таблице Менделеева. Кроме того, те же свойства будут зависеть от химического состава вещества, т.е. от изменения состояния валентных электронов. В качестве иллюстрации можно привести несколько примеров.

1. Вероятность атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах различных элементов периодически изменяется с  $Z$  в соответствии с периодами в таблице Менделеева /5/.

Вероятность атомного захвата мюона, действительно, сильно зависит от химического состава. Это проверено для случая  $MgO$  и  $MgO_2$ ,  $Sb_2O_3$  и  $Sb_2O_5$  и других окислов /5/.

2. Выход  $K_{\beta}$ - и  $K_{\gamma}$ -линий мезорентгеновского излучения в зависимости от  $Z$  обнаруживает минимум в области калия /2/ (рис. 7). Не исключено, что в области натрия будет следующий минимум. Зависимость выхода  $K$ -линий от химического состава продемонстрирована в настоящей работе.

3. И последнее. Для ряда бесспиновых ядер измерялась остаточная поляризация  $\mu^-$ -мезонов. Из таблицы 2, где собраны результаты разных групп /6,7,8/, видно, что она уменьшается от углерода к магнию и снова возрастает от серы к кальцию. Правда, статистическая точность низка. Указанная разница может возникнуть за счет влияния электронной оболочки. Само прохождение мюонов через электронную оболочку, возможно, и не изменяет их поляризацию /9,10/. Зато характер каскадных переходов мюона, как отмечалось выше, и последующее заселение нижних уровней существенно меняется. Поэтому, кроме дальнейшего уточнения зависимости остаточной поляризации мюонов в ядрах с различными  $Z$ , интересно наблюдение ее в некоторых химических соединениях (например, измерение остаточной поляризации на углероде в  $C$  и  $CCl_4$ , на кислороде в  $H_2O$  и  $PbO$ , на сере в  $S$  и  $PbS$  и т.д.).

Дополнительную ясность в механизм деполяризации мюонов смогут внести измерения асимметрии электронов распада при отборе их на совпадения с различными линиями К-мезорентгеновской серии.

Авторы выражают большую благодарность Ю.Г.Будяшову, Б.Ю.Семенову, Н.С.Фролову, Цао Го-чжуну за помощь в изготовлении аппаратуры и при проведении измерений; С.С.Герштейну и Л.И.Пономареву за многочисленные обсуждения результатов работы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Y.Eisenberg and D.Kessel, *Nuovo Cim.*, 19, 1195 (1961).
2. D.Quitman, R.Engfer, U.Hegel, P.Brix, G.Backenstoss, K.Goebel and B.Stadler, *Nucl. Phys.*, 51, 609 (1964).
3. Л.И.Пономарев. Препринт ОИЯИ, Р-1816, Дубна, 1964.
4. M.A.Ruderman, *Phys. Rev.*, 118, 1632 (1960).
5. В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин. Труды XIII международной конференции по физике высоких энергий. Дубна, 1964.
6. A.Astbury, P.M.Hattersley, M.Hussain, M.A.Kenar, H.Muirhead and T.Woodhead. *Proc. Phys.Soc.*, 78, 1144 (1961).
7. А.Е.Игватенко, Л.Б.Егоров, Б.Холупа, Д.Чултэм. ЖЭТФ, 35, 1131 (1958).
8. В.С.Евсеев, В.С.Роганов, В.А.Черногорова, М.М.Шимчак, Ф.Кильбингер. Труды XIII международной конференции по физике высоких энергий. Дубна, 1964.
9. В.А. Джрбашян. ЖЭТФ, 38, 277 (1959).
10. И.М.Шмушкевич. ЖЭТФ, 36, 645 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 марта 1965 г.

Т а б л и ц а 1  
Интенсивности различных линий К-серии

Вещество	$I_{\alpha}$	$I_{\beta}$	$I_{\nu}$	$I_{\beta}/I_{\alpha}$	$I_{\nu}/I_{\alpha}$	Примечания
v	0,63	0,13	0,24	0,21	0,37	Эта работа
$\nu_2 O_2$	0,70	0,12	0,18	0,17	0,26	Эта работа
Cr	0,66	0,12	0,22	0,18	0,33	Эта работа
$Cr_2O_3$	0,70	0,12	0,18	0,17	0,26	Эта работа
v				0,11	0,27	Квинтмен и др. <sup>/2/</sup>
Cr				0,12	0,29	Квинтмен и др. <sup>/2/</sup>

Т а б л и ц а 2  
Остаточная поляризация мюонов в бесспиновых ядрах

Вещество	C	Mg	Si	S	C	O	Mg	S	S	Ca
Остаточная поляризация мюона в %	24 $\pm$ 4	18 $\pm$ 4	16 $\pm$ 4	14 $\pm$ 3	14 $\pm$ 4	15 $\pm$ 4	20 $\pm$ 4	15 $\pm$ 4	13 $\pm$ 1,8	20 $\pm$ 1,6
Работа	Астбари и др. <sup>/6/</sup>			Игнатенко и др. <sup>/7/</sup>			Евсеев и др. <sup>/8/</sup>			

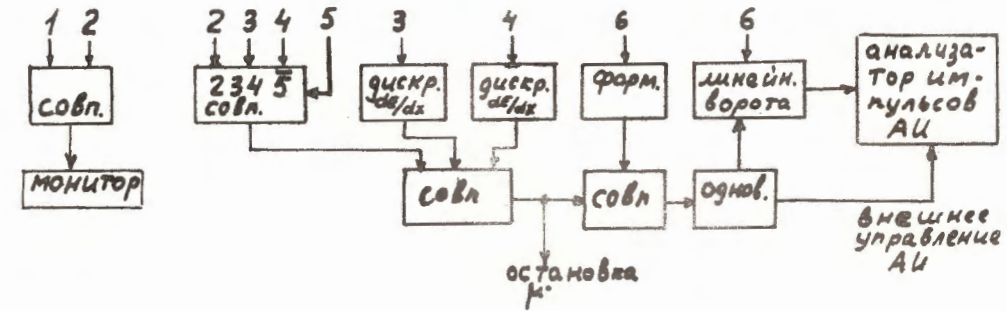
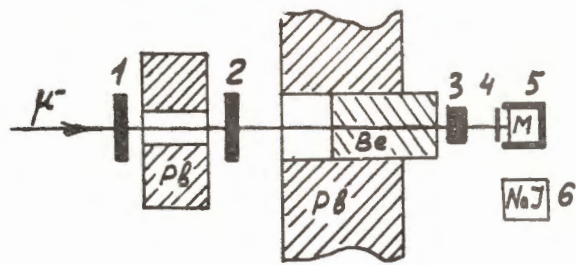


Рис. 1. Схема опыта.



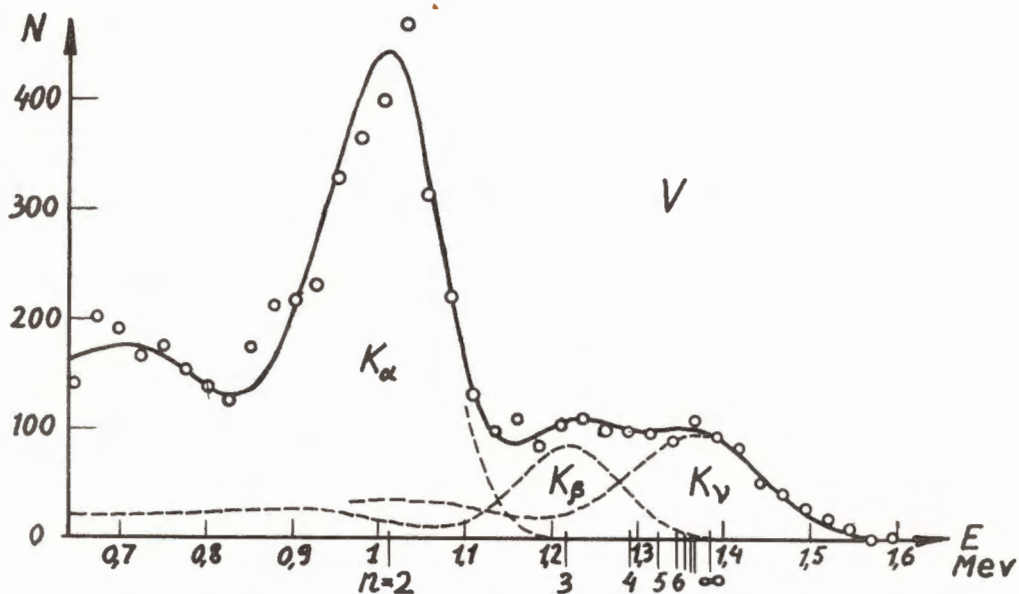


Рис. 2. Спектр К -серии от ванадия в чистом ванадии.

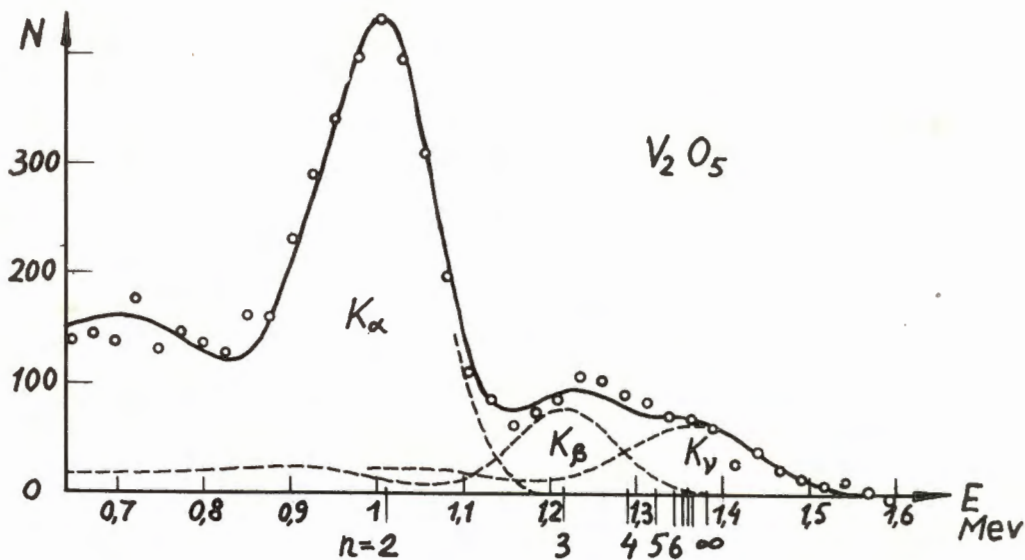


Рис. 3. Спектр К -серии от ванадия в пентаокси ванадия.

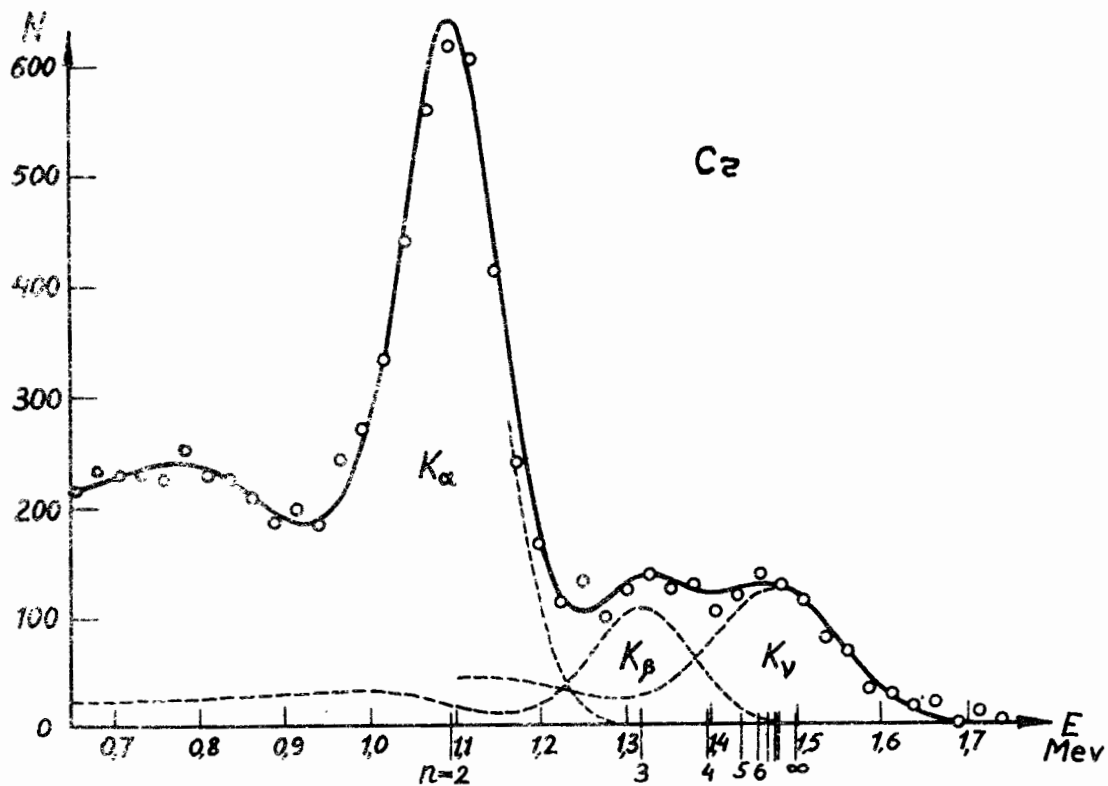


Рис. 4. Спектр К-серии от хрома в чистом хrome.

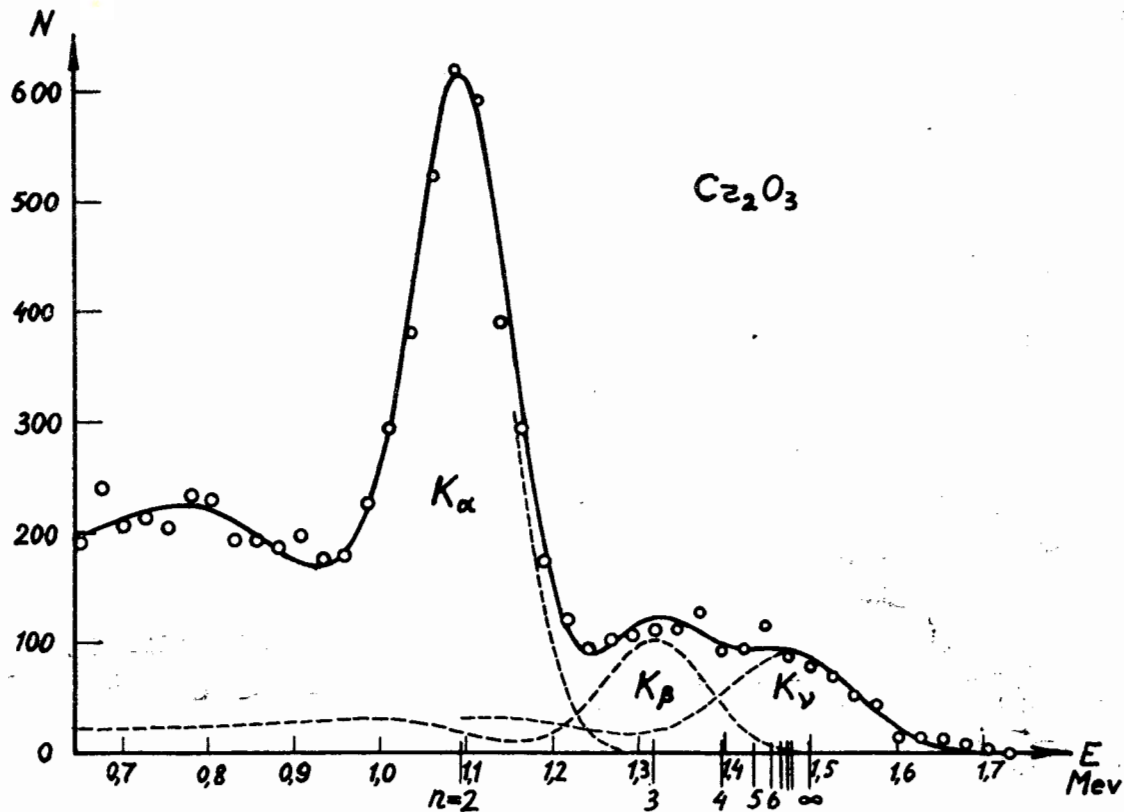


Рис. 5. Спектр К-серии от хрома в окиси хрома.

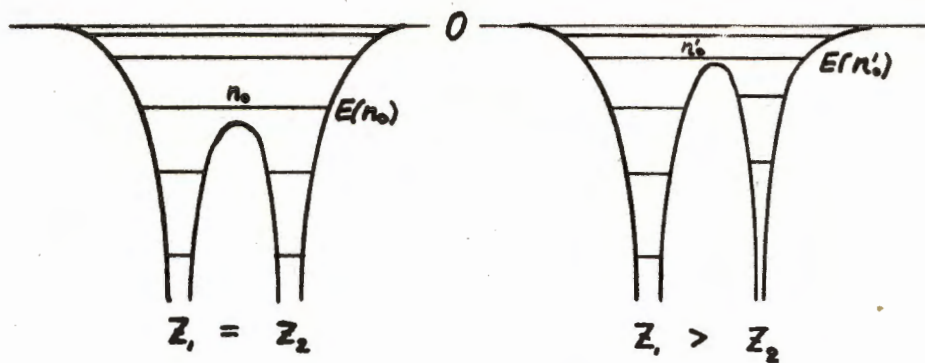


Рис. 6. Система энергетических уровней молекулы.

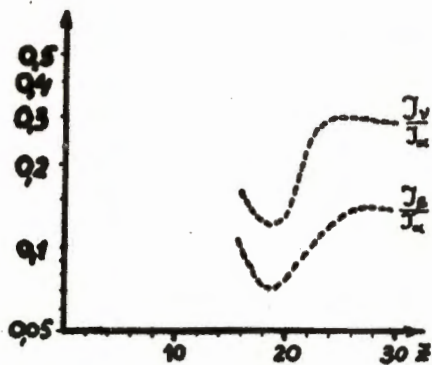


Рис. 7. Интенсивность  $K\beta$  - и  $K\gamma$  - линий в зависимости от заряда ядра.