

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ46.36

E-25

4180/2-77

17/2-77

P1 - 10832

В.С.Евсеев, В.С.Роганов, М.В.Фронтасьева,  
Н.И.Холодов

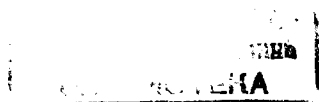
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ  
НА ПРОЦЕСС АТОМНОГО ЗАХВАТА  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ

**1977**

P1 - 10832

В.С.Евсеев, В.С.Роганов, М.В.Фронтасьева,  
Н.И.Холодов

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ  
НА ПРОЦЕСС АТОМНОГО ЗАХВАТА  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ



Евсеев В.С. и др.

P1 - 10832

Влияние химической связи на процесс атомного захвата отрицательных мюонов в веществе

Сообщается о результатах экспериментальной проверки основных положений модели атомной локализации отрицательных мезонов в кристаллах, развитой Ау-Янгом и Коуэном.

Установлено одновременное и противоположно направленное влияние ковалентного и ионного зарядов связей на относительные вероятности захвата  $\mu^-$ -мезонов в кристаллах.

Измерения проводились путем наблюдения временных спектров электронов распада мюонов в мезоатомах.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Evseev V.S. et al.

P1 - 10832

Effect of Chemical Bonds on the Process of  $\mu^-$ -Meson Capture in Crystals

The results are given on experimental checking of the main states of the model of atomic localization of negative mesons in crystals developed by Au-Yang and Cohen.

The simultaneous and contrary directioned influence of covalent and ionic charges of bonds on the relative probabilities of  $\mu^-$ -meson capture in crystals is stated.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Ранее<sup>/1/</sup> нами сообщалось о наблюдении зависимости атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов от молекулярной и кристаллической структуры водородсодержащих соединений. Выяснению роли кристаллического строения вещества в процессе атомного захвата и распределения  $\mu^-$ -мезонов между атомами посвящена модель Ау-Янга и Коуэна<sup>/2/</sup>. Согласно модели атомная локализация отрицательных мезонов проходит в две стадии. При переходе из непрерывного спектра в дискретный на фоне действия "Z-закона" Ферми-Теллера часть  $\mu^-$ -мезонов, замещающая валентные электроны, попадает в высоколежащие состояния. На второй стадии посредством оже-каскада мезоны опускаются на отдельные мезоатомные орбиты ионных остовов. Этот процесс модулируется потенциалом Моделунга и параметром передачи электронного заряда  $Z_f$ . Относительная вероятность атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W_{\text{теор.}} = \frac{w(\text{Me})}{w(\text{O.S.}, \text{Hal})}$  в окислах MeO, халькогенидах MeS и галогенидах MeHal<sup>l</sup> полагается монотонно возрастающей функцией  $Z_f$ .

Цель данной работы заключалась в анализе основных положений модели Ау-Янга и Коуэна, в установлении характера воздействия ионного и ковалентного зарядов связи, относительного размера ионов на процесс атомной локализации  $\mu^-$ -мезонов в химическом соединении.

Одним из главных результатов работы<sup>/2/</sup> по мнению ее авторов, было качественное объяснение осциллирующего поведения отношения вероятностей<sup>/3/</sup>  $W = w(m\text{Э})/w(n\text{O})$  атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах  $\text{Э}_m\text{O}_n$  в зависимости от порядкового номера Z во II-IV<sup>m</sup><sub>n</sub>-периодах.

В каждом из этих периодов вероятность  $W_{\text{теор}}(\text{Э}/\text{O})$  проходила через максимум<sup>/2/</sup>. Положения экстремумов качественно согласовались с экспериментальными значениями вероятностей<sup>/3/</sup>. Отметим, что именно выбранный авторами модели<sup>/2/</sup> расчётный параметр передачи заряда  $Z_f$ , возрастающий к середине каждого малого периода и спадающий к его концу, обеспечивал периодическую осцилляцию  $W_{\text{теор}}$ .

Полученное в модели Ау-Янга и Коуэна качественное воспроизведение зависимости от  $Z$  экспериментальных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах является кажущимся. Действительно, использованные в их модели значения  $Z_f$  вычислялись по формуле Полинга, связывающей степень ионности  $i$  связи Э-О с разностью электроотрицательностей  $\Delta\kappa = \kappa_{\text{O}} - \kappa_{\text{Э}}$  атомов окисла<sup>/4/</sup>

$$Z_f \equiv N \cdot i = N \cdot [1 - \exp(-0,25 \cdot \Delta\kappa^2)]$$

(где  $N$  - есть положительная валентность элемента Э), без учёта кристаллохимической структуры и с её учётом по уравнению

$$Z' \equiv N \cdot i' = N \left[ 1 - \frac{1}{K} \exp(-0,25 \cdot \Delta\kappa^2) \right]$$

(где  $K$  - координационное число катионов, равное 6 для  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  и 4 для остальных катионов в рассматриваемых на рис.1 окислах).

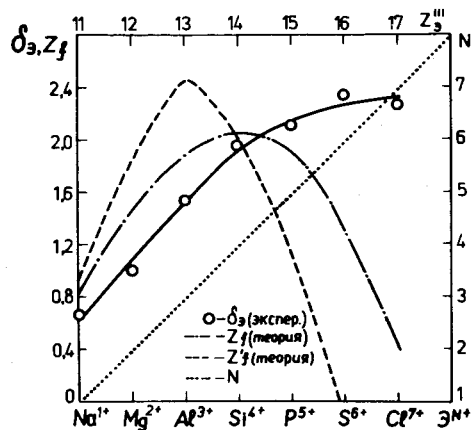


Рис.1. Зависимость измеренного<sup>/5,9/</sup> эффективного заряда  $\delta_3$  и теоретических параметров передачи заряда  $Z_f$  и  $Z'_f$  от положительной валентности  $N$  элемента Э для предельных окислов III периода. Для  $\text{S}^{6+}$  и  $\text{Cl}^{7+}$  использованы значения  $\delta_3$  для анионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{ClO}_5^-$ <sup>/5/</sup>.

$Z_f$  и  $Z'_f$  имеют экстремумы примерно в середине периода. На рис.1 нанесены значения  $Z_f$  и  $Z'_f$  для нормальных окислов периода и экспериментальные значения эффективных зарядов катионов  $\delta_3$ , определенные рентгено-спектральным методом<sup>/5/</sup>. Из рисунка видно резкое расхождение величин экспериментальных эффективных зарядов  $\delta_3$  с расчётными параметрами  $Z_f$  и  $Z'_f$ . Экспериментальные значения зарядов катионов непрерывно возрастают при увеличении положительной валентности от  $\text{Na}^{1+}$  до  $\text{Cl}^{7+}$ .

Ссылка<sup>/2/</sup> на согласованный ход  $Z_f$  и эффективных зарядов, полученных из экспериментальных значений дипольных моментов  $M_{\text{Э-О}}$ , не совсем удачна, так как для окислов практически отсутствуют систематические экспериментальные данные по дипольным моментам<sup>/6/</sup>. Кроме того, известно, что в выражение для дипольного момента, помимо члена с эффективным зарядом, входят слагаемые, отражающие влияние поляризации и перекрытия орбиталей.

Возрастание эффективного заряда катиона с увеличением валентности не только для окислов, но и для других соединений элементов III периода с общей формулой  $\text{Э}_m\text{X}_n$ , где  $\text{X} = \text{F}, \text{O}, \text{N}, \text{C}$ , подтверждается эмпирическим правилом Джонсона для сдвигов энергий рентгеновских переходов в соединениях элементов с максимальной степенью окисления<sup>/5/</sup>. Аналогичным является поведение эффективных зарядов катионов и для окислов IV-VI периодов<sup>/7,8/</sup>.

Таким образом, экспериментально наблюдаемое распределение электронной плотности в кристаллах, характеризующее эффективными зарядами  $\delta_3$  атомов, не может обеспечить периодические осцилляции относительных вероятностей захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах с максимумом внутри периода.

Другим допущением модели Ау-Янга и Коуэна<sup>/2/</sup> является предположение о монотонном возрастании с последующим приблизительным насыщением относительной вероятности захвата  $\mu^-$ -мезонов катионами в  $\text{MgO}$   $w(\text{Mg})/w(\text{O})$  в зависимости от  $Z_f$ , полученное при вариации эффективного заряда, а также распространение этой параметрической зависимости, воспроизведенной на

Рис. 2. Сравнение экспериментальных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W_{\text{эксп.}} \left( \frac{Z}{\text{Ne, F}^{1-}, \text{O}^{2-}} \right)$  и рассчитанных  $W_{\text{теор.}} \left( \frac{Mg}{\text{O}} \right)$  в зависимости от переданного заряда изоэлектронных катионов и анионов в изоэлектронных молекулах и в нормировочной "смеси" изоэлектронных атомов инертного элемента неона.

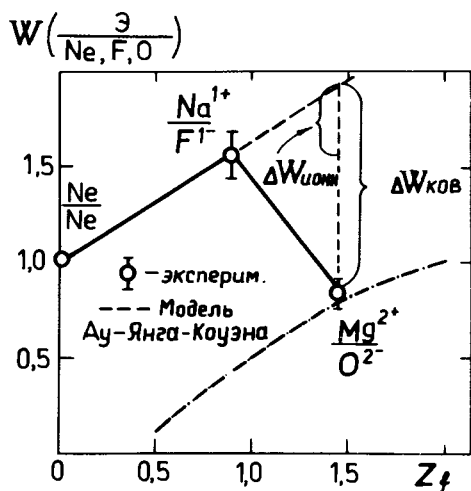


рис. 2, в качестве нормировочного графика на другие окислы.

Для его проверки нами использовались данные по вероятностям атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в ряде соединений, изоэлектронных с  $MgO$ . Выбранные мишени (см. таблицу) удовлетворяли ограничительным условиям модели (бинарность соединения, структура типа простых решеток  $NaCl$ ,  $ZnS$ ,  $CsCl$  и приблизительная одинаковость размеров ионов). Последнее условие фактически не соблюдалось для рассчитанных в модели <sup>2/</sup> соединений  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $CdO$ ,  $ZnS$  и  $AgJ$ , где размеры анионов и катионов различались в 1,3÷2,2 раза. Выбранные в наших экспериментах контрольные мишени  $NH_4F$  ( $r_{NH_4^{1+}} = 1,43 \text{ \AA}$ ,  $r_{F^{1-}} = 1,33 \text{ \AA}$ ),  $NaOH$  ( $r_{Na^{1+}} = 0,95 \text{ \AA}$ ,  $r_{OH^{1-}} = 1,36 \text{ \AA}$ ), а также  $NaF$  ( $r_{Na^{1+}} = 0,95 \text{ \AA}$ ,  $r_{F^{1-}} = 1,33 \text{ \AA}$ ) удовлетворяли требованию модели лучше, чем расчёт, сделанный в <sup>2/</sup> для окиси магния. Для мишени  $NaOH$  приведены вероятности, измеренные повторно, поскольку анализ мишени  $NaOH$ , использовавшейся в <sup>1/</sup>, обнаружил

Таблица

№№ пп	Соединение	Отношение	$W_{\text{эксп.}}$	$\delta_{\text{эфф.}}^*$
1	$NH_4F$	$NH_4^+/F^-$	$2,04 \pm 0,11$	0,94
2	$NaOH$	$Na^+/OH^-$	$1,04 \pm 0,09$	0,67
3	$NaF$	$Na^+/F^-$	$1,56 \pm 0,13$ <sup>/3/</sup>	0,94
4	$MgO$	$Mg^{2+}/O^{2+}$	$0,83 \pm 0,07$ <sup>/3/</sup>	1,20

\* Взяты из <sup>5,9/</sup>.

наличие примеси воды. Помимо молекулярной изоэлектронности  $NH_4F$ ,  $NaF$ ,  $NaOH$  и  $MgO$  в предельном случае передачи заряда, соответствующего валентности электроположительных атомов и групп, мы можем отметить, что образующиеся катионы и анионы  $NH_4^{1+}$ ,  $Na^{1+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $F^{1-}$ ,  $OH^{1-}$ ,  $O^{2-}$  представляют собой изоэлектронные аналоги инертного элемента неона.

Из сопоставления относительных вероятностей захвата  $\mu^-$ -мезонов катионами и анионами для изоэлектронной смеси атомов инертного газа  $Ne+Ne$  с нулевым эффективным зарядом (рис. 2 и таблица) видно, что увеличение параметра передачи и эффективного заряда катиона при переходе от  $NH_4^{1+}$  и  $Na^{1+}$  к  $Mg^{2+}$  ведет, в противоположность оценкам модели <sup>2/</sup>, к уменьшению относительной вероятности захвата.

Аналогичное противоречие с моделью обнаруживается и при вариации состояния окисления элементов главных подгрупп на примере пар соединений  $Sb_2O_3 - Sb_2O_5$  и  $PbO - PbO_2$ , для которых нормированные на электронные концентрации атомов отношения вероятностей  $\mu^-$ -мезонного захвата  $W(Sb^{3+}/Sb^{5+}) = 1,69 \pm 0,16$  и  $W(Pb^{2+}/Pb^{4+}) = 1,25 \pm 0,10$ , рассчитанные по данным <sup>3,10/</sup>, изменяются обратно пропорционально изменению эффективного заряда катиона.

Одним из возможных путей объяснения основных особенностей захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах является

введение представления о противоположно направленном влиянии на процесс захвата ионного ( $\delta_{\text{эфф}}$ ) и ковалентного ( $N - \delta_{\text{эфф}}$ ) зарядов связей атомов. Если  $w_{\delta+}^{\delta+}$  - нормированная вероятность захвата  $\mu^-$ -мезонов катионами в соединении  $\text{Э}_m\text{X}_n$ , то с учётом сделанного предположения можно записать:

$$w_{\delta+}^{\delta+} = a \cdot \delta_{\text{эфф}} + \beta (N - \delta_{\text{эфф}}) \quad (1)$$

Здесь  $a$  и  $\beta$  - параметры ионного и ковалентного зарядов атома по всем связям, отражающие знак и величину их вкладов в вероятность захвата мезонов данным элементом.

Поскольку нас в первую очередь интересует периодичность изменения вероятности атомного захвата мюонов, то захват мюонов основными электронами здесь рассматривается лишь как постоянно присутствующий фон и член, соответствующий этому процессу, в выражение (1) не включается.

Наиболее подходящими для определения знаков параметрических коэффициентов являются данные по распределению  $\mu^-$ -мезонов между катионами и анионами в соединениях типа  $A^I B^{VII}$  главных подгрупп и в соответствующих смесях нейтральных атомов инертных  $A^0 + B^0$ , поскольку в смесях ковалентные заряды на партнерах практически равны нулю. Дополнительное условие изоэлектронности катионов, анионов и инертных атомов обусловлено необходимостью устранения возможных эффектов различия в скоростях замещения  $\mu^-$ -мезонами электронов различных оболочек.

В кристалле NaF ионный заряд  $\delta_{\text{эфф}} \approx 1,0$  и ковалентный заряд ( $N - \delta_{\text{эфф}}$ )  $\approx 0$ . Из рис. 2 следует, что в отсутствие ковалентной составляющей связи относительная вероятность захвата  $\mu^-$ -мезонов больше на катионе  $\text{Na}^{1+}$ , чем на анионе  $\text{F}^-$  (и, следовательно, больше, чем на смеси нейтральных инертных  $\text{Ne} + \text{Ne}$ ) в  $1,56 \pm 0,13$  раза, т.е. зарядовый коэффициент  $a$  имеет положительный знак. При переходе к соединениям класса  $A^{II} B^{VI}$  эффективный ионный заряд абсолютно увеличивается, но одновременно появляется ковалентный заряд. Спадающий характер правой ветви графика на рис. 2 при переходе

от NaF к MgO свидетельствует о том, что  $\mu^-$ -мезоны, взаимодействующие с ковалентным зарядом химической связи, перераспределяются в пользу аниона, т.е. параметрический коэффициент  $\beta$  ковалентного заряда имеет отрицательный знак. Экстраполируя левую ветвь графика, как показано на рис. 2, можно оценить величину перераспределения  $\mu^-$ -мезонов за счёт ковалентного заряда. Этот вклад превосходит составляющую, обусловленную ионным зарядом, примерно в 3 раза.

В оксидах элементов III периода при переходе от  $\text{Na}_2\text{O}$  к  $\text{Cl}_2\text{O}_7$  ионный заряд катиона увеличивается от  $\approx 0,7$  у  $\text{Na}^{1+}$  до  $\approx 2,4$  у  $\text{Cl}^{7+}$ . Ковалентный заряд на катионе также растёт от 0,3 до 3,6. И экстремум отношения вероятностей захвата  $\mu^-$ -мезонов катионами и анионами в главных подгруппах в принципе мог бы достигаться благодаря разным знакам параметров  $a$  и  $\beta$ .

На рис. 3 систематизированы данные по относительным вероятностям захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W$  (катион/анион) почти во всех изученных к настоящему времени соединениях  $A^I B^{VII}$  и  $A^{II} B^{VI}$  разных периодов. Для изоэлектронных анионов  $\text{P}^{1-}$  и  $\text{O}^{2-}$  II периода постоянство знаков ионного и ковалентного параметров, по-видимому, прослеживается до IV периода. Для V и VI периодов данные отсутствуют. Обращает на себя внимание факт перемены знаков зарядовых параметров  $a$  (в VI периоде) и  $\beta$  (в IV периоде) в соединениях указанного класса с анионами  $\text{Cl}^{1-}$  и  $\text{S}^{2-}$  из третьего периода.

Из постоянства знаков  $a$  и  $\beta$  во II-IV периодах следует возможность объяснения с точки зрения развитого подхода осциллирующего характера изменения относительных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W(m\text{Э}/n\text{O})$  в зависимости от порядкового номера элементов главных подгрупп, как это было проиллюстрировано на примере оксидов в III периоде.

Судя по резкому отличию зависимости вероятностей от степени окисления элемента в переходных подгруппах, где, например, нормированное отношение вероятностей захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W(\text{Cu}^{1+}/\text{Cu}^{2+})$  разновалентными атомами в закиси и окиси меди, рассчитанное нами по данным [3] и равное  $0,50 \pm 0,15$ , в  $2,5 + 3,0$  раза меньше

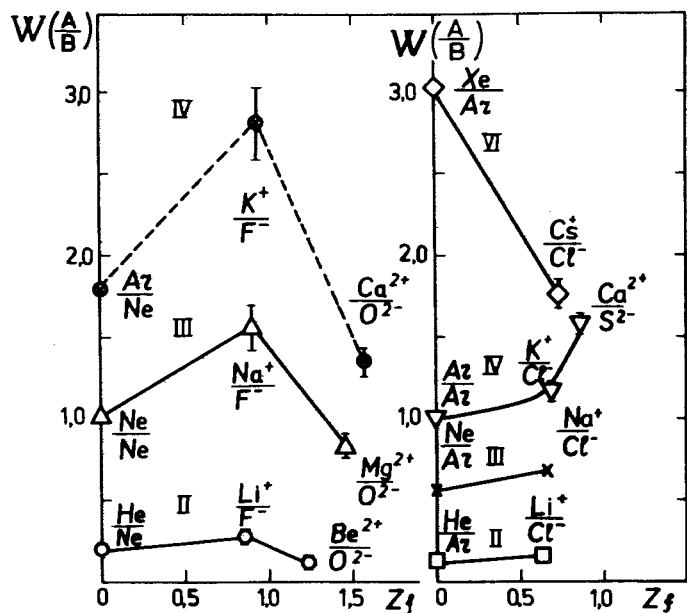


Рис. 3. Зависимость экспериментальных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W(A/B)$  изоэлектронными катионами, анионами и атомами (в изоэлектронных молекулах и модельных смесях инертных элементов) от  $Z_f$ .  $W(A/B)$  для  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{CaS}$  взяты из данных <sup>11/</sup>; для  $\text{CsCl}$  и  $\text{LiCl}$  — из <sup>12,13/</sup>, а для  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{LiF}$  и  $\text{NaF}$  — из <sup>3/</sup>. Значение для  $\text{KF}$  принято равным отношению электронных концентраций катиона и аниона ( $\approx 1,8$ ), умноженному на нормированное к электронным долям значение  $W_{\text{хим}}(\text{Na}^+/\text{F}^-) = 1,56 \pm 0,13$  для  $\text{NaF}$ . Вероятности в смесях инертных газов брались равными их электронным концентрациям <sup>14/</sup>.

аналогичного значения для элементов главных подгрупп  $\text{Sb}$  и  $\text{Pb}$ , ионный и ковалентный параметры в уравнении (3) зависят от вида достраивающихся оболочек и типа гибридизации связи.

Положительный знак зарядового параметра  $a$  для соединений с анионами II периода оправдывается очевидным

предположением о притягивающем электростатическом воздействии поля катиона на делокализованную мезонную волновую функцию. На этом основании можно было бы также воспроизвести осциллирующее поведение относительных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в окислах главных подгрупп и иным способом, введя дополнительное предположение о пропорциональности вероятности атомной локализации  $\mu^-$ -мезона объему катиона  $\int \psi^2 V = \frac{4}{3} \pi r^3$  и, например, силе притяжения катионами мезона  $f \approx \delta_{\text{эфф}}/r^2$ :

$$w_{\mu^-} \approx \delta_{\text{эфф}} \cdot r.$$

Записанная аналогичным образом вероятность захвата  $\mu^-$ -мезонов катионами, например в окислах, также будет иметь экстремум внутри периода, поскольку в уравнение входит произведение двух противоположно изменяющихся параметров. Однако предположение о влиянии размера иона на процесс атомной локализации  $\mu^-$ -мезонов нуждается в дополнительном рассмотрении. Действительно, анализ отношений табличных значений вероятностей захвата  $W(\text{Na}^+/\text{F}^-)/W(\text{Na}^+/\text{OH}^-) = 1,50 \pm 0,16$  дает их различие при практически неизменных размерах (катион один и тот же) анионов в обоих соединениях:  $r_{\text{F}^-} - r_{\text{OH}^-} = 1,33 \text{ \AA}$ . Этот факт позволяет сделать вывод о том, что по крайней мере размеры анионов не играют заметной роли в процессе распределения  $\mu^-$ -мезонов между атомами.

Данные по межатомному распределению  $\mu^-$ -мезонов в водородсодержащих изоэлектронных молекулах  $\text{NH}_4\text{F}$  и  $\text{NaOH}$  (см. таблицу) также свидетельствуют о большом влиянии ковалентного заряда связей атома (группы) на процесс мезонной локализации и позволяют оценить его вклад в разноименно заряженных группах. Появление дополнительных валентных электронов как в катионе  $\text{NH}_4^+$  (по сравнению с  $\text{Na}^+$ ), так и в анионе  $\text{OH}^-$  (по сравнению с  $\text{F}^-$ ) приводит к относительному увеличению локализации на них  $\mu^-$ -мезонов, о чём свидетельствует сравнение отношений относительных вероятностей

$$W\left(\frac{\text{NH}^{1+}}{\text{F}^{1-}}\right) / W\left(\frac{\text{Na}^{1+}}{\text{F}^{1-}}\right) = 1,31 \pm 0,13, \quad (2)$$

$$W\left(\frac{\text{OH}^{1-}}{\text{Na}^{1+}}\right) / W\left(\frac{\text{F}^{1-}}{\text{Na}^{1+}}\right) = 1,50 \pm 0,16. \quad (3)$$

Характер изменения относительных вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов в рассмотренных изоэлектронных атомах и группах с варьируемым (посредством введения атомов водорода) числом валентных электронов позволяет сделать вывод о большей эффективности валентного электрона в процессе  $\mu^- \rightarrow e^-$  замещения по сравнению с остовным.

С точки зрения развитых в настоящей работе представлений о процессе локализации  $\mu^-$ -мезонов с учётом ряда факторов кристаллохимической структуры представляет интерес экспериментальное исследование распределения  $\mu^-$ -мезонов в соединениях классов  $A^{III}B^V$  и  $A^{IV}B^{IV}$  в разных периодах, необходимое для зондирования поведения параметра  $\beta$  при наибольших возможных значениях ковалентного заряда.

В заключение сформулируем основные результаты, полученные в данной работе.

1. Обнаружены противоречия двух предположений модели <sup>2/</sup> Ау-Янга и Коуэна с экспериментальными данными по эффективным электронным зарядам и атомному захвату  $\mu^-$ -мезонов в окислах III периода и соединениях классов  $A^I B^{VII}$  и  $A^{II} B^{VI}$ . Показана невозможность получения в рамках этой модели <sup>2/</sup> осцилляций вероятностей атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов  $W(m\mathcal{E}/nO)$  в окислах с экстремумом в середине периода.

2. Из данных по атомному захвату мезонов в изоэлектронных соединениях, ионах и смесях атомов наряду с влиянием ионного эффективного заряда обнаружено более значительное и противоположно направленное воздействие ковалентного заряда связей элемента на распределение  $\mu^-$ -мезонов между катионами и анионами.

## Литература

1. Гольданский В.И. и др. ДАН СССР, 1973, 211, 316.
2. Au-Yang M.Y., Cohen M.L. Phys.Rev., 1968, 174, 468.
3. Зинов В.Г., Конин А.Д., Мухин А.И. ЯФ, 1965, 2, 859.
4. Pauling L.C. The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals. Cornell Univ.Press, Ithaca, N.-Y., 2-nd ed., 1960.
5. Баринский Р.Л., Нефедов В.И. Рентгеноспектральное определение зарядов атомов в молекулах. Изд. "Наука", М., 1966.
6. Осипов О.А., Минкин В.И., Гарновский А.Д. Справочник по дипольным моментам. 3-е изд., М., "Высшая школа", 1971.
7. Бартенев Г.М. и др. Успехи химии, 1972, 41, 586.
8. Сумбаев О.И. ЖЭТФ, 1969, 57, 1716.
9. Справочник химика, т. 1, стр. 335, Изд. "Химия", Л., 1971.
10. Baijal e.a. Nuovo Cimento, 1963, 30, 711.
11. Mausner L.F. Phys.Lett., 1975, 56B, 145.
12. Бобров В.Д. и др. ЖЭТФ, 1965, 48, 1197.
13. Grin G.A., Kunselmen.R. Phys.Lett., 1970, 31B, 116.
14. Зинов В.Г., Конин А.Д., Мухин А.И. ЖЭТФ, 1964, 46, 1919.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 июля 1977 года.