

У 844

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3653



З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев,  
Ю.Д.Прокошкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
ВОДОРОДОМ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ  
ВЕЩЕСТВАХ

АБСТРАКТЫ РАБОТ НАУЧНОГО СЕМИНАРА

1967.

P13 - 3653

З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев,  
Ю.Д.Прокошкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА  $\mu^-$ -МЕЗОНОВ  
ВОДОРОДОМ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ  
ВЕЩЕСТВАХ

Направлено в ЖЭГФ



## 1. В в е д е н и е.

Ядерный захват остановившихся отрицательно заряженных мезонов в конденсированных веществах во многом определяется предшествующими ему мезоатомными (мезомолекулярными) процессами. Исследование этих процессов, помимо самостоятельного интереса, имеет и большое практическое значение, поскольку элементарные реакции распада и взаимодействия отрицательных частиц (мезонов, антипротонов, гиперонов) нередко приходится изучать при остановке этих частиц в веществе со сложной химической структурой. Интерпретация таких экспериментов требует знания вероятностей захвата частиц ядрами атомов, входящих в состав вещества.

Вероятность атомного захвата  $\mu^-$ -мезонов, остановившихся в веществе, в большинстве случаев оказывается примерно пропорциональной зарядам ядер  $Z$  в согласии с "Z-законом" Ферми-Теллера<sup>/1/</sup>. Все наблюдавшиеся отклонения<sup>/2-4/</sup> от этого закона происходят в сторону более слабой зависимости от  $Z$ .

Иная картина имеет место в случае остановки в веществе  $\pi^-$ -мезонов. Исследования поглощения  $\pi^-$ -мезонов в LiF показали, что вероятность захвата  $\pi^-$ -мезона литием в этом соединении существенно меньше, чем это следует по "Z-закону"<sup>/5/</sup>. При изучении поглощения  $\pi^-$ -мезонов в водородосодержащих веществах было обнаружено, что вероятность захвата  $\pi^-$ -мезонов водородом резко подавлена<sup>/6/</sup>. Для объяснения этого эффекта была предложена модель перехвата  $\pi^-$ -мезонов<sup>/6/</sup>, специфическая для водородосодержащих веществ. Однако, выполненные позже количественные исследования<sup>/8-10/</sup> показали, что резкое подавление захвата  $\pi^-$ -мезонов ядрами химически связанного водорода

обусловлено иным механизмом, который описывается моделью "больших мезомолекул"/12-14/. Согласно этой модели, замедлившийся  $\pi^-$ -мезон переходит из непрерывного спектра в дискретный на уровни, общие для всей молекулы. Вероятности захвата  $\pi^-$ -мезона протоном и ядром  $Z$  определяются мезомолекулярной стадией процесса, когда  $\pi^-$ -мезон переходит с общих мезомолекулярных уровней на разделенные уровни мезоатомов  $P\pi^-$  и  $Z\pi^-$ .

$Z$  - зависимость вероятности  $W$  захвата  $\pi^-$ -мезонов ядрами водорода, входящего в состав бинарных химических соединений типа  $Z_m H_n$  ( $LiH$ ,  $CH_2$  и др.) была изучена в области  $Z \leq 8$  /8,9/. При этом было найдено, что приведенная вероятность  $P$ , определенная как

$$P = \frac{W}{n}, \quad (1)$$

следует зависимости

$$P = Z^{-3}, \quad (2)$$

которая позже нашла объяснение в рамках модели "больших мезомолекул". Целью настоящего исследования/13/, выполненного на синхротроне ЛЯП ОИЯИ, являлось определение зависимости вероятности  $P$  от  $Z$  в области  $Z > 8$ .

## 2. Измерения

Схема эксперимента и процедура измерений была описана ранее/7-10/.  $\pi^-$ -мезоны останавливались в мишени из исследуемого водородосодержащего вещества, помещенной между двумя черенковскими спектрометрами полного поглощения. При помощи спектрометров регистрировались два  $\gamma$ -кванта, испускаемые при захвате  $\pi^-$ -мезонов ядрами водорода:



Основным источником фона являлся процесс перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на лету на сложных ядрах, входящих в состав вещества мишени (перезарядка  $\pi^-$ -мезонов на сложных ядрах подавлена более, чем в  $10^4$  раз /14,15/). Поправка,

связанная с вычитанием этого фона, составляла 2% для  $LiH$  и увеличивалась до 25% с ростом  $Z$ . Погрешность определения этой поправки ограничивала точность измерений в области больших  $Z$ .

Измерения величин  $W$  были выполнены для ряда гидридов  $Z_m H_n$  (в том числе и для исследованных нами ранее<sup>/8,9/</sup>) и более сложных водородосодержащих веществ типа  $Z'_k Z''_l H_n$  (см. табл. 3). Мишени имели примерно одинаковую тормозную способность, эквивалентную 3 г/см<sup>2</sup> углерода. Химически активные гидриды  $B_{10}H_{14}$ ,  $N_2H_4$ ,  $NaN$ ,  $CaH_2$  были заключены в герметические алюминиевые контейнеры, толщина стенок которых по пучку составляла около 0,5 г/см<sup>2</sup>. Некоторые из исследованных веществ содержали посторонние примеси:  $B_{10}H_{14}$  (примесь других боргидридов - 2,5%),  $NaN$  (примесь  $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$  - 5%),  $CaH_2$  (примесь  $CaO$  и  $CaCO_3$  - 10%),  $N_2H_4$  (примесь - 0,7%, в том числе 0,36% воды),  $KBH_4$  (примесь  $KOH$  и  $NaOH$  - 7%) и  $NaNH_4$  (примесь  $NaBO_2$  и  $NaNH(COH)_3$ , 3%). Остальные вещества имели квалификацию "химически чистый" или "чистый для анализа".

Вероятности  $W$  были определены относительным методом путем сравнения скоростей счета пар  $\gamma$ -квантов, испускаемых из исследованных мишеней и мишени из  $LiH$ . В полученные отношения скоростей счета были внесены небольшие поправки, учитывающие различие тормозных способностей и формы мишеней. При определении абсолютных значений вероятностей  $W$  отношения вероятностей нормировались на величину  $W_{LiH}$ , которая принималась равной усредненному по данным<sup>/8,16,17/</sup> значению  $(3,5 \pm 4) 10^{-3}$ .

### 3. Результаты измерений

Гидриды. Вероятности  $W$  были определены для гидридов элементов  $Li$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $N$ ,  $O$ ,  $Na$  и  $Ca$ . Полученные результаты приведены в таблице 1. Как видно из рис.1 для  $Z \leq 8$ , полученные данные хорошо описываются зависимостью (2). Однако в области больших значений  $Z$  соотношение (2) нарушается. В гидридах  $NaN$  и  $CaH_2$   $\pi^-$ -мезоны захватываются водородом значительно эффективнее, чем это следует из формулы (2). Возможные причины этого нарушения обсуждаются ниже.

Таблица 1

Вещество	LiH	$B_{10}H_{14}$	CH	$N_2H_4$	$H_2O$	NaN	$CaH_2$
Z	3	5	6	7	8	II	20
n/m	I	I,4	I	2	2	I	2
$\eta, 10^{-3}$	$35 \pm 4$	$12,6 \pm 1,2$	$5,1 \pm 0,6$	$5,9 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,6$	$2,4 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,3$
$\lambda$	$1,26 \pm 0,14$	$1,44 \pm 0,15$	$1,28 \pm 0,15$	$1,30 \pm 0,13$	$1,12 \pm 0,20$	$3,6 \pm 0,6$	$11,0 \pm 1,3$
$\lambda$ расч. (формула (7))	I,4	I,3	I,2	I,1	0,9		
$b_1$	$1,26 \pm 0,14$	$1,03 \pm 0,10$	$1,28 \pm 0,15$	$0,65 \pm 0,07$	$0,56 \pm 0,10$		

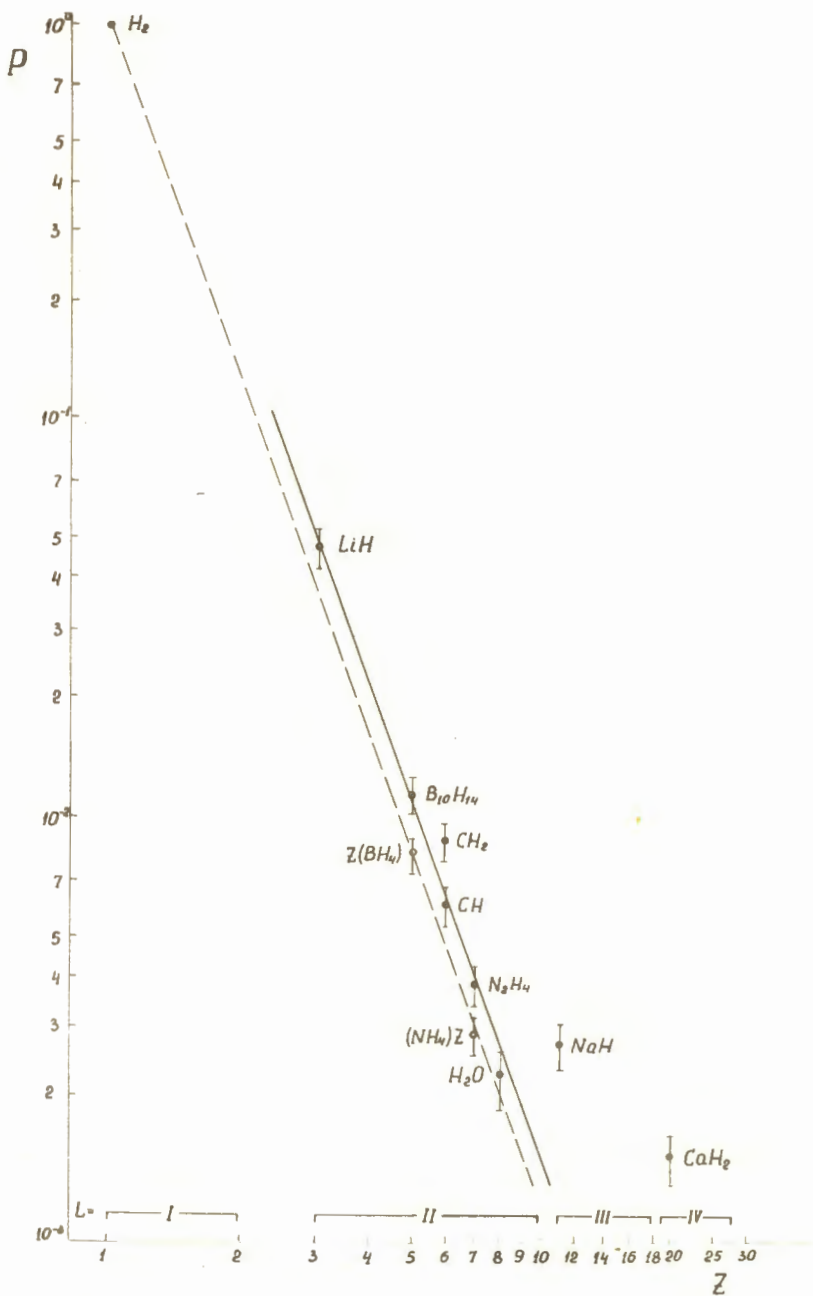


Рис.1. Зависимость приведенной вероятности  $P$  (формула (3)) от  $Z$ .

$L$  - номер периода таблицы Менделеева. Сплошная и пунктирная прямые соответствуют зависимостям (4) с  $a_L = 1,28$  и  $a_L = 1$ .

Углеводороды. Результаты измерений вероятности  $W$  для ряда углеводородов приведены в таблице 2. Эти результаты подтверждают сделанный нами ранее<sup>/8/</sup> вывод о том, что вероятность захвата  $\pi^-$ -мезонов связанным водородом не аддитивна. Отношение величин  $P$  для  $CH$  и  $CH_2$  было найдено равным  $0,77 \pm 0,08$ <sup>/8/</sup>. Этот результат был подтвержден в последующих работах, где для указанного отношения были получены  $0,78 \pm 0,09$ <sup>/16/</sup> и  $0,61 \pm 0,08$ <sup>/17/</sup>.

Сложные водородосодержащие соединения. Исследованные нами вещества типа  $Z' Z'' H_n$  можно разделить по характеру связей атомов водорода с атомами  $Z'$  и  $Z''$  на две группы: вещества, в молекулах которых связи атомов водорода с атомами  $Z'$  и  $Z''$  одинаковы (табл. 3) и различны (табл. 4) В соединениях первой группы (табл.3) водород связан с углеродом и кислородом ковалентной связью. В соединениях второй группы (табл. 4) водород связан только с легкими атомами молекулы (бромом и азотом), причем эта связь ковалентна, а подструктуры  $(BH_4)^-$  и  $(NH_4)^-$  связаны с более тяжелыми атомами связью ионного типа, т.е. без общих электронов<sup>/20/</sup>.

#### 4. Обсуждение результатов.

В модели "больших мезомолекул" вероятность  $W$  захвата  $\pi^-$ -мезона водородом в гидридах равна

$$W = \frac{n}{mZ+n} Z^{-2} \quad (4)$$

Приведенная вероятность  $P$  при этом определяется как

$$P = \left( \frac{m}{n} + \frac{1}{Z} \right) W. \quad (5)$$

Вывод формулы (4) основан на двух предположениях<sup>/18/</sup>:

1. Вероятность посадки мезонов на различные уровни системы  $Z_n \pi^- H_n$  пропорциональна плотности электронного облака, которая существовала в окрестности этих уровней до захвата мезона. Это утверждение эквивалентно предположению о справедливости "  $Z$  -закона" на стадии захвата в дискретный спектр, что отражено в структуре множителя  $n/(mZ+n)$  в формуле (4). (Отметим, что на общие уровни захватывается сравнительно небольшая доля остановившихся мезонов  $(=n/mZ)$ . Основная же часть мезонов захватывается сразу на уровни тяжелого атома  $Z$  ).



Таблица 2

Вещество	CH	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
a/m	1,00	1,00	1,14	2,00	2,29
w, 10 <sup>-3</sup>	5,1 <sup>±</sup> 0,6	3,5 <sup>±</sup> 0,4	5,1 <sup>±</sup> 0,5	13,2 <sup>±</sup> 1,3	14,6 <sup>±</sup> 1,3
$\frac{m}{n} \cdot W / \frac{1}{2} W_{CH_2}$	0,77 <sup>±</sup> 0,08	0,53 <sup>±</sup> 0,08	0,68 <sup>±</sup> 0,07	1	0,98 <sup>±</sup> 0,08
a <sub>L</sub>	1,28 <sup>±</sup> 0,15	1,00 <sup>±</sup> 0,11	1,17 <sup>±</sup> 0,12	1,90 <sup>±</sup> 0,19	1,90 <sup>±</sup> 0,19
b <sub>L</sub>	1,28 <sup>±</sup> 0,15	1,00 <sup>±</sup> 0,11	1,03 <sup>±</sup> 0,10	0,95 <sup>±</sup> 0,10	0,83 <sup>±</sup> 0,008

Таблица 3

Вещество	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OOH
w, 10 <sup>-3</sup>	7,5 ± 0,8	8,1 ± 0,9	6,6 ± 0,7	4,2 ± 0,5
w <sub>расч.</sub> , 10 <sup>-3</sup> (формула (9))	7,0 ± 1,0	7,7 ± 1,0	6,7 ± 1,0	4,9 ± 0,7

Таблица 4

Вещество	Na(BH <sub>4</sub> )	K(BH <sub>4</sub> )	(NH <sub>4</sub> )F	(NH <sub>4</sub> )Cl	(NH <sub>4</sub> )Br	(NH <sub>4</sub> )I
$W, 10^{-3}$	8,4 ± 0,9	5,9 ± 1,0	4,6 ± 0,7	3,2 ± 0,6	1,6 ± 0,2	1,2 ± 0,2
$\frac{W_{Z''(Z'H_4)}}{W_{Na(BH_4) \text{ эксл.}}}$	I	0,70 ± 0,09	0,55 ± 0,07	0,38 ± 0,06	0,19 ± 0,02	0,14 ± 0,02
$\frac{W_{Z''(Z'H_4)} - \text{расч.}}{W_{Na(BH_4)}}$	I	0,72 ± 0,07	0,51 ± 0,05	0,36 ± 0,04	0,22 ± 0,02	0,16 ± 0,02
$a_L$ (формула (10))	1,05 ± 0,11	1,03 ± 0,11	1,10 ± 0,16	1,10 ± 0,20	0,90 ± 0,13	0,94 ± 0,16

2. Ядро водорода может захватить только те мезоны, которые вначале попали на общий мезомолекулярный уровень молекулы. Вероятность этого процесса пропорциональна  $Z^{-2}$  и определяется радиационными переходами с общих уровней системы  $Z_m \pi^- H_n$  на разделенные уровни мезоатомов  $p\pi^-$  и  $Z\pi^-$ .

Коэффициент  $a_L$  отражает возможные отклонения от " $Z$ -закона", изменение условий посадки  $\pi^-$ -мезона по мере застройки электронных оболочек атомов, а также особенности химического строения молекулы. Индекс  $L$  указывает на период таблицы Менделеева, к которому принадлежит атом  $Z$ .

Вероятность  $W_{Z_m H_n}$  была определена нами так, что для реакции (3) в чистом водороде  $W_{H_2} = 1$ . В этом случае ( $m=0$ ) коэффициент  $a_I$  равен единице. Если влияние указанных выше эффектов на величину  $a_L$  для второго периода невелико, то  $a_I \approx a_{II} \approx 1$ . Действительно, как видно из таблицы 1, для элементов второго периода таблицы Менделеева ( $Z \leq 8$ ), коэффициент  $a_{II}$  отличается от единицы незначительно.

Однако, при переходе к третьему и четвертому периодам (Na и Ca) коэффициент  $a_L$  меняется скачком:  $a_{III} = 3,6 \pm 0,6$ ,  $a_{IV} = 11,0 \pm 1,3$ , т.е. примерно в три раза <sup>\*)</sup>.

Оценим величины  $a_L$  для соединений водорода с элементами второго периода, учитывая характер химической связи в этих соединениях. Они зависят от плотности  $\rho$  распределения валентного электрона между атомами H и Z:

$$\rho = (1 - \sigma) \rho_k + \sigma \rho_n \quad (6)$$

Здесь  $\rho_k$  и  $\rho_n$  — электронная плотность, обусловленная ковалентной и ионной связями, соответственно;  $\sigma$  — степень ионности связи <sup>/20/</sup>, которая равна вероятности найти оба электрона у того из атомов Z или H, электроотрицательность которого больше.

Доля электронной плотности для двух электронов связи, которая сосредоточена вблизи атома H и между ядрами H и Z, равна коэффициенту  $a_L$  в формуле (4):

\*) Одна из возможных причин такого поведения  $a_L$  может быть связана с изменением условий захвата  $\pi^-$ -мезона молекулой в области валентных электронов, которые могут зависеть, например, от числа уровней мезомолекулы  $N_L = 2I^2 (N_{II} : N_{III} : N_{IV} = 1 : 2,2 : 4)$ .

$$a_L = 2\sigma + (1-\sigma) \left(1 + \frac{s^2}{1+s^2}\right) \quad (7)$$

где  $s$  - коэффициент перекрывания атомных волновых функций, который для всех соединений равен примерно  $0,3^{/20/}$ . Степень ионности  $\sigma$  можно вычислить, используя ряд электроотрицательности элементов  $^{/20/}$ . При этом, если электроотрицательность водорода меньше, чем атома  $Z$  (как в молекуле воды  $H_2O$ ), то первый член в формуле (7) следует опустить. Результаты вычислений  $a_L$  по формуле (7) приведены в таблицах 1 и 2. В целом они согласуются с экспериментальными значениями.

Исключение составляют предельные углеводороды  $CH_2$  и  $C_7H_{16}$ . Одной из причин этих отличий в ряду углерода может быть рост (в 1,5 раза) вклада  $p$ -состояния в гибридную орбиталь при переходе от ненасыщенных соединений к насыщенным  $^{/20/}$ . Другая возможность состоит в следующем: при выводе формулы (4) предполагалось, что мезомолекулярная орбиталь, с которой возможен переход на уровни мезоатома  $p\pi^-$ , связывает атомы  $H$  и  $Z$  только попарно. Если, однако, предположить, что мезомолекулярная орбиталь принадлежит всем атомам молекулы, то множитель  $Z^{-2}$  в формуле (4) нужно заменить на  $n/(mZ^2 + n) \approx n/mZ^2$ . Тогда соотношение (4) примет вид:

$$W_{Z_m H_n} = b_L \frac{n}{mZ+n} \cdot \frac{n}{mZ^2+n} \quad (8)$$

Как видно из таблиц 1 и 2, коэффициент  $b_L (= a_L m/n)$  в случае углеводородов примерно равен единице и несколько слабее, чем  $a_L$ , зависит от вида органического соединения, но заметно изменяется внутри второго периода (кроме декаборана, свойства которого близки к органическим). В случае органических соединений зависимость (8) удовлетворительно описывает экспериментальные результаты (таблица 2). Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что первая гипотеза, приводящая к формуле (4), предпочтительнее, и в дальнейшем мы будем использовать только ее.

Зависимость приведенной вероятности  $P$  (формула (5)) от  $Z$  представлена на рис. 1. Сплошная прямая соответствует значению  $a_{II} = 1,29$ , которое получено усреднением коэффициента  $a_L$  по второму периоду (см. табл. 1). Пунктирная линия соответствует значению  $a_L = 1$  и проходит через точку  $P = 1$  для водорода.

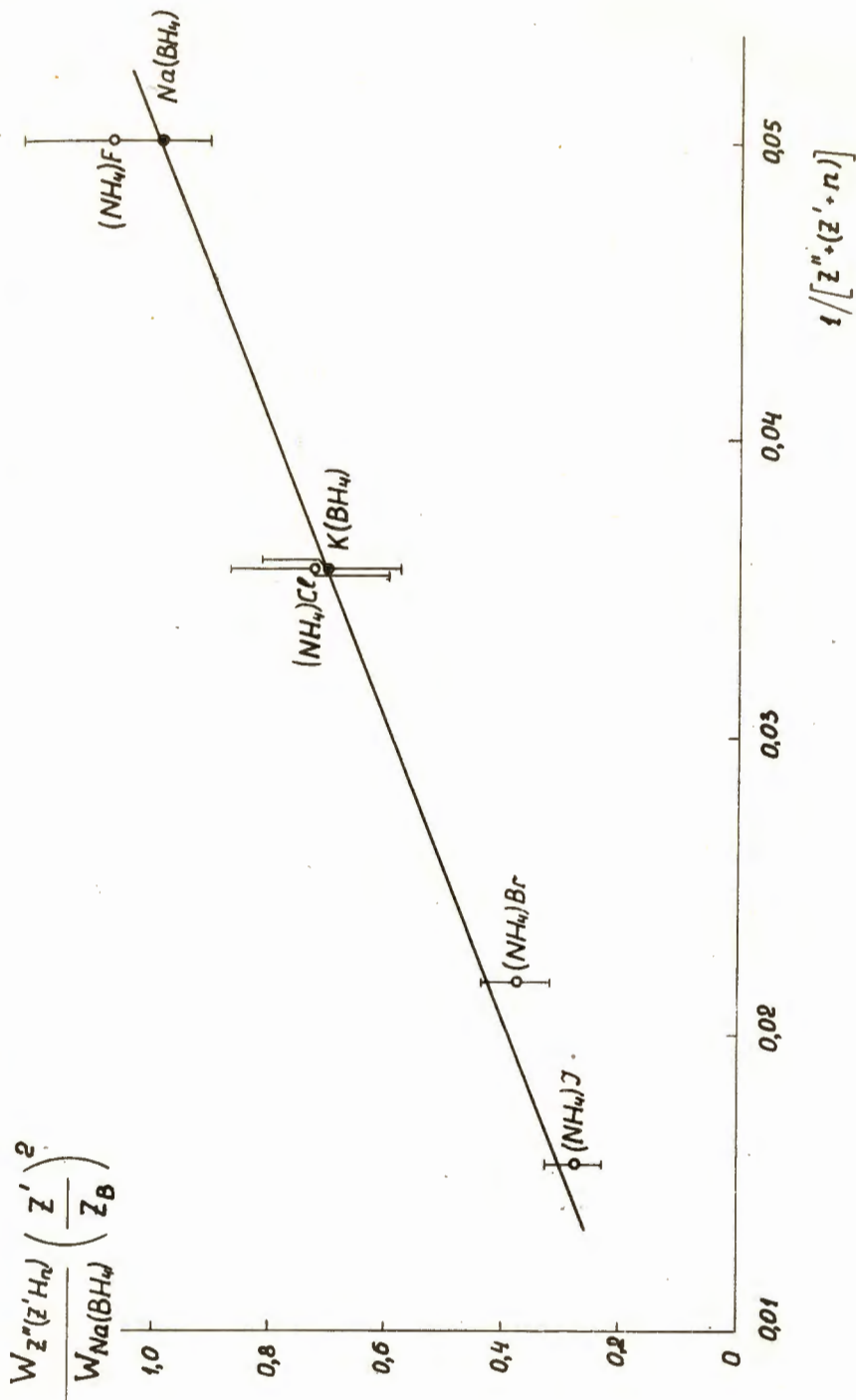


Рис.2. Сравнение измеренных вероятностей  $W$  для соединения  $Z$  ( $NH_4$ ) $Z''$  и  $Z''(BH_4)$  с зависимостью (10). Прямая - функция  $20/[Z''+(Z'+4)]$ , соответствующая зависящая (10), нормированной на  $W_{Na(BH_4)''}$ .

Для сложных соединений вида  $Z'_k Z''_l H_n$  с ковалентной связью формула (4) принимает вид <sup>/14/</sup>:

$$W = \frac{a'_L k (Z')^{-2} + a''_L l (Z'')^{-2}}{k Z' + l Z'' + n} \quad (9)$$

Как следует из таблицы 3, результаты вычислений по этой формуле удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В соединениях вида  $(Z H_4) Z''$  (таблица 4) атом  $Z''$  связан с радикалом  $(Z H_4)^{\cdot}$  ионной связью <sup>/20/</sup> и не участвует в процессе перехвата, т.е.  $a''_L = 0$ . Он влияет только на вероятность первоначальной посадки. В этом случае формула (9) примет вид  $k=l=1, n=4$ ):

$$W = \frac{4 a_L (Z')^{-2}}{Z'' + (Z' + 4)} \quad (10)$$

Из последней формулы следует, что величина  $1/W$  должна линейно зависеть от  $Z''$ . Результаты экспериментов (рис. 1, 2) подтверждают это заключение. Это означает, что при первоначальной посадке "Z - закон" действительно выполняется, и еще раз свидетельствует о правомерности принятого нами общего подхода.

### 5. В ы в о д ы.

Проведенный выше анализ полученных в настоящей работе экспериментальных данных на основе модели "больших мезомолекул" позволяет сделать следующие выводы:

1. Модель "больших мезомолекул" хорошо описывает полученные экспериментальные данные.
2. Вероятность захвата  $\mu^-$ -мезонов водородом в гидридах  $ZH$  сильно изменяется при переходе от периода к периоду таблицы Менделеева.
3. Вероятность захвата  $\mu^-$ -мезонов водородом в водородосодержащих веществах существенно зависит от типа химической связи. Это открывает возможность использования реакции (1) не только для различения свободного и связанного

водорода /19/, но и для изучения характера химических связей в водородосодержащих веществах.

4. Первоначальная посадка  $\pi^-$ -мезонов следует "Z-закону".

В заключение пользуемся случаем поблагодарить С.С. Герштейна за полезные обсуждения.

### Л и т е р а т у р а

1. E. Fermi, E. Teller. Phys.Rev., 72, 399 (1947).
2. J.S. Bajjal, J.A. Diaz, S.N. Kaplan, A.V. Pyle. Nuovo Cim. 30, 711 (1963).
3. В.Д. Бобров, В.Г. Варламов, Ю.М. Грашин, Б.А. Долгошеин, В.Г. Кириллов-Угрюмов, В.С. Розанов, А.В. Самойлов, С.В. Сомов. ЖЭТФ, 48, 1197 (1965).
4. В.Г. Зинов, А.Д. Ковин, А.И. Мухин. Ядерная физика, 2, 859 (1965).
5. M.E. Stearns, M. Stearns, L. Leipuner. Phys.Rev., 108, 445 (1957).
6. W.K.H. Panofsky, A.L. Aamodt, J. Hadley. Phys.Rev., 81, 565 (1951).
7. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ЖЭТФ, 42, 1680 (1962).
8. V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nuovo Cim., 28, 99 (1962).
9. A.F. Dunaitsev, V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nuovo Cim., 34, 521 (1964).
10. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. ДАН, 160, 71 (1965).
11. Л.И. Пономарев. Ядерная физика, 2, 723 (1965).
12. Л.И. Пономарев. ОИЯИ, препринт Р4-3072 (1966).
13. З.В. Крумштейн. ОИЯИ, дипломная работа (1965).
14. V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nucl.Phys., 54, 414 (1964).
15. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, А.И. Филиппов. Ядерная физика, 5, 327 (1967).
16. M. Chabre, P. Depommier, J. Heitze. Phys.Lett., 5, 67 (1963).
17. D. Bartlett, S. Devons, S.L. Meyer, J.L. Bossen. Phys.Rev., 136, 1452 (1964).
18. Л.И. Пономарев. Ядерная физика, 6, вып.2, 389 (1967).
19. В.И. Петрухин, Л.И. Пономарев, Ю.Д. Прокошкин. Химия высоких энергий, 1, 3, 283 (1967).
20. Ч. Коулсон. Валентность. Мир, М., 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 декабря 1967г.