

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



28/x-74

3-634

P14 - 8050

4256/2-74

В.Г.Зинов, А.Д.Конин, В.Н.Покровский,
Л.И.Пономарев, Х.Шневли, И.А.Ютландов

СТРУКТУРА

МЕЗОРЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ Li И LiH

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P14 - 8050

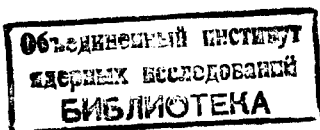
В.Г.Зинов, А.Д.Конин, В.Н.Покровский,
Л.И.Пономарев, Х.Шневли*, И.А.Ютландов

СТРУКТУРА

МЕЗОРЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ Li И LiH

Направлено в Physics Letters

* Институт физики Фрибургского университета,
Швейцария.



S U M M A R Y

This work has been aimed at the investigation of muonic K_X -ray intensities of Li in the form of metal and lithium hydride. Such a choice of targets makes it possible to follow the features of the population of np-states in the simplest atomic and molecular compounds.

The experiments were run on the mesic channel of the Dubna synchrocyclotron with 90 MeV/c negative muon beam. The experimental lay-out is shown in Fig. 1. The muonic X-rays were detected by a Ge(Li) detector of 2.4 cm³ volume and about 600 eV resolution in the 15-25 keV region.

The relative intensities of np → 1s transitions in Li and LiH targets are given in the Table. It should be noted that the errors listed are in all the cases the statistical ones (resulting from the computer processing of spectra).

For LiH several theoretical estimates are also given which have been obtained by some simplifying assumptions. The comparison with experimental results shows the very important role of the muon initial distribution $\rho(l)$ as well as the predominant population of levels with low l . This appears to be associated with the possibility of adiabatic capture of muons in hydrides. This conclusion seems to be confirmed by the ratio of ratios $R = I(np \rightarrow 1s) / I(2p \rightarrow 1s)$ for LiH and Li targets.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты последних лет убедительно показали влияние молекулярной структуры вещества на процессы атомного захвата мезонов, в частности, на структуру мезорентгеновских серий элементов /см., например, работу ¹/ /. Так, изучение K-серий /переходов np → 1s / элементов и их окислов показало ²⁻⁴/, что относительная заселенность уровней с $n \geq 3$ в металлах больше, чем в окислах, и тем больше, чем выше n . Аналогичная зависимость была отмечена также для галогенидов, тогда как сравнение K-серий углерода в форме графита и в составе полиэтилена (CH₂)_n обнаружило обратную картину ⁴/.

Целью настоящей работы явилось сравнение структуры μ -мезорентгеновской K-серии Li в форме металла и в гидриде лития. Такой выбор мишеней позволяет проследить упомянутые особенности структуры K-серий элементов в простейших атомных и молекулярных соединениях. Кроме того, для таких простых соединений, как LiH, можно рассчитать каскад в атоме Li при довольно разумных упрощающих предположениях. В свою очередь, сравнение расчетов с результатами экспериментов поможет уточнить существующую картину процессов захвата μ^- -мезонов в химических соединениях.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Опыты проводились на мезонном канале синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, на пучке отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с.

Расположение аппаратуры схематически показано на рис. 1. Счет совпадений 12 сигналов от C_1 и C_2 являлся

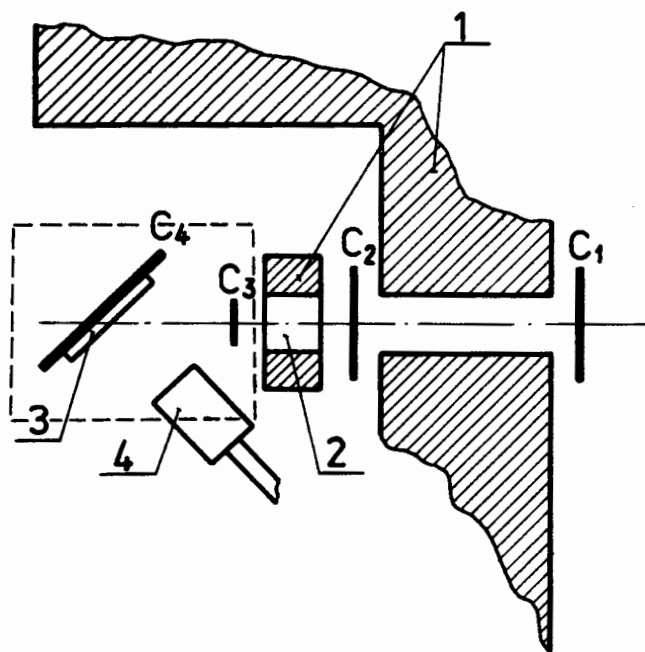


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 - свинцовая защита, 2 - фильтр /полиэтилен/, 3 - мишень, 4 - детектор Ge(Li); $C_1, 2, 3, 4$ - сцинтилляционные счетчики.

монитором мюонного пучка. Подторможенные в фильтре мюоны попадали на мишень. Мишени Li и LiH имели размер 10 x 10 см и толщину 0,64 и 0,75 г/см², соответственно; для предохранения от окисления мишени во время опыта располагались в полиэтиленовых "конвертах". Мезорентгеновское излучение регистрировалось детектором Ge(Li) объемом 2,4 см³ с разрешением около 600 эВ в области энергий 15-25 кэВ; тонкое входное окно позволяло регистрировать γ -лучи, начиная с ≈ 5 кэВ. Для предохранения от радиационных повреждений нейтронами детектор окружался защитой из полиэтилена и кадмия, не показанной на рис. 1. Заметим, наконец, что во избежание поглощения мезорентгеновского излучения в стенках счетчика антисовпадений C_4 мы отказались от стаканоподобной его формы.

Для уменьшения числа ложных запусков /остановок не в мишени/ счетчик C_3 был сделан очень тонким /около 0,3 мм/ и была использована общая светозащита объема, указанного приблизительно на рис. 1 пунктиром, вместо отдельной защиты счетчиков C_3 и C_4 . Это позволило также более компактно расположить аппаратуру и тем самым заметно выиграть в интенсивности остановок.

Логическая схема эксперимента была обычной. При наличии совпадений /ширина кривой $2\tau \approx 100$ нсек/ между остановкой мюона в мишени 1234 и регистрацией γ -кванта в ППД сигнал со спектрометрического тракта проходил на вход многоканального анализатора. Логика предусматривала также блокировку близких по времени сигналов и блокировку на время анализа.

Спектр каждой мишени /Li и LiH/ снимался в 2-3 сеансах работы на ускорителе; участок спектра, полученного в одном из таких сеансов, показан на рис. 2. Помимо K-серии Li в спектрах обнаруживаются посторонние линии. Это L- и K-серии углерода, обусловленные главным образом остановками в полиэтиленовой упаковке мишени и счетчике C_3 . На рис. 2 видна линия L_{α} /14,1 кэВ/; остальные линии этой серии углерода перекрываются с линиями Li. Далее на рис. 2 видны небольшие "плато" /слева от K_{α} - и K_{β} -линий Li/, обусловленные рассеянием в мишени соответствующих квантов на большие, близкие к 180°, углы. Наконец, в спектрах отмечаются серии кислорода, что можно объяснить наличием небольшого количества окислов Li в мишенях. Положение L_{α} /25,0 кэВ/ кислорода, видной на рис. 2, почти точно совпадает с краем K-серии Li.

Обработка спектров велась на ЭВМ "Минск-2" по программе "КАТОК-Б"^{/5/}, позволяющей осуществлять разложение достаточно сложных участков спектра. Поскольку стабильность аппаратуры была хорошей, обработке подвергались главным образом итоговые спектры Li и LiH, полученные суммированием - при необходимости, со сдвигом /на 2-3 канала/ - спектров из отдельных сеансов. Процедура обработки повторялась неоднократно, с вариацией задаваемых параметров - границ обрабатыва-

емых участков, числа пиков и т.п. Полученные результаты оказались достаточно устойчивы к такого рода вариациям.

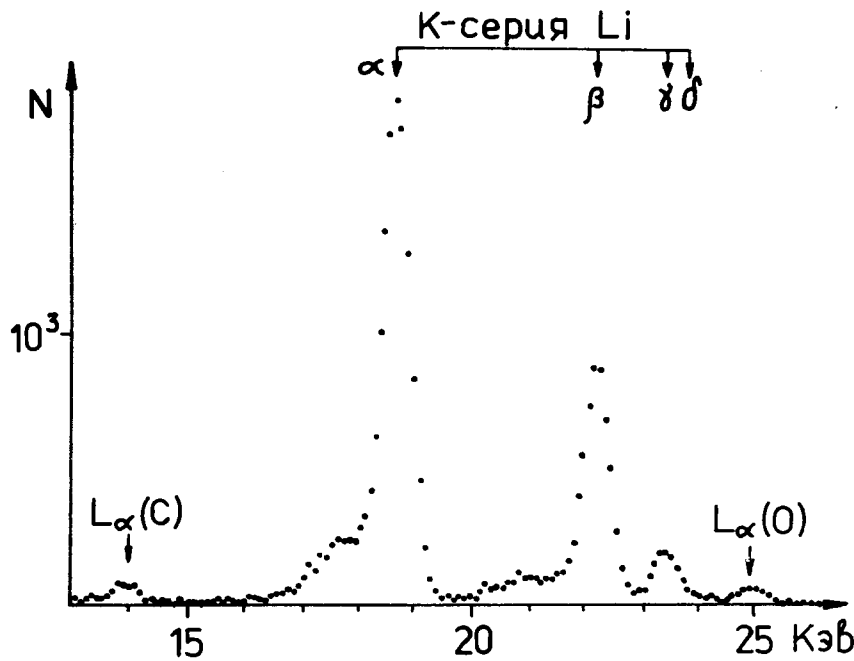


Рис. 2. Участок спектра LiH.

В найденные таким образом интенсивности линий К-серии Li необходимо внести ряд поправок. Поправка на линии L-серии углерода, не разрешающиеся от некоторых линий Li, не превосходит 1% от зарегистрированной интенсивности соответствующих линий. Поправка на линии кислорода, определенная по измеренному нами спектру H_2O , объясняет около 80% интенсивности линии 25,0 кэВ / K_{ν} для Li и L_{α} для O / . Но структура К-серии кислорода в окислах и воде различна /4/, и логично предположить, что L-серия кислорода ведет себя аналогичным образом /это поддерживается измерениями /3/ серий Ti /; тогда вся интенсивность линии 25,0 кэВ объясняется присутствием кислорода. Далее, вводилась

поправка на поглощение в мишени; ее величина для разных переходов в одной мишени различалась не более чем на 0,6-0,7%. Наконец, вводилась поправка на эффективность регистрации; различие в ее величине для разных переходов достигало 10%.

Для проверки корректности принятой процедуры были рассчитаны суммарные интенсивности мезорентгеновской серии /на 1 остановку мюона/. Оказалось, что для мишеней Li и LiH эти числа расходятся не более чем на 1,5%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в наших экспериментах относительные интенсивности /нормированные на единицу/ переходов К-серии Li в мишенях Li и LiH приведены в табл. 1. Заметим, что во всех случаях указаны только статистические ошибки, связанные с разложением и обработкой спектра.

Наши данные для относительной интенсивности перехода $2p \rightarrow 1s$ в Li хорошо согласуются со значением $0,72 \pm 0,05$, полученным с помощью ксенонового пропорционального счетчика /9/. Методом сцинтилляционной спектроскопии /10/ для этой величины было получено значение $0,86 \pm 0,03$.

Для случая LiH в табл. 1 приведены также теоретические оценки, полученные при следующих упрощающих предположениях. Потенциал, в котором движется μ^- -мезон на высоких возбужденных уровнях N, заменялся кулоновским потенциалом изолированного атома Li /см. рис. 3/. При этом энергия связи 2s-электрона Li полагалась равной 8,3 эВ, т.е. равной энергии связи валентного электрона в молекуле LiH /6/. Это, в свою очередь, означает, что μ^- -мезон на орбитах $15 \leq N \leq 30$ движется в кулоновском поле ядра с эффективным зарядом $Z^* = 1,6$. На уровнях $N < 15$ μ^- -мезон движется в поле ядра с зарядом $Z = 3$.

При вычислениях использовались программы /7,8/ для расчетов мюонного каскада.

Таблица 1

Относительные интенсивности переходов К-серии в Li и LiH

Переход	Li эксп.	LiH		$\frac{R_n(\text{LiH})}{R_n(\text{Li})}$	
		эксп.	теор. $Z^* = 1,6$ $\frac{N=25}{\rho(l)=2l+1}$ $l=0$		
2p → 1s	0,708±0,013	0,644±0,010	0,845	0,533	-
3p → 1s	0,252±0,005	0,290±0,005	0,139	0,363	1,27±0,04
4p → 1s	0,036±0,002	0,059±0,002	0,015	0,084	1,80±0,12
5p → 1s	0,004±0,002	0,007±0,002	0,001	0,016	1,9±0,9
νp → 1s	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	< 2·10 ⁻⁴	0,004	-

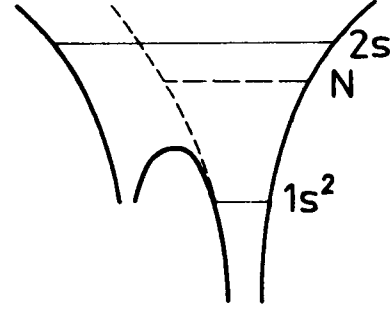


Рис. 3. Потенциал молекулы LiH.

Заметим, что во всех прежних расчетах за начальный уровень мюона принимался уровень с $N=14$, т.е. начальная орбита мюона считалась расположенной внутри К-орбиты электрона. Однако при таком выборе N мы заранее отказываемся от объяснения влияния химической связи на структуру мезорентгеновской серии. Мезонные уровни с $20 \leq N \leq 30$, расположенные между 1s- и 2s-орбитами электронов в атоме Li, находятся в зоне валентных орбиталей соединений Li.

Вариация исходных параметров наших расчетов показала, что изменение N в пределах $20 \leq N \leq 30$ слабо сказывается на окончательных результатах; значительно большее влияние на них оказывает изменение эффективного заряда Z^* и начального распределения $\rho(l)$ мюонов по уровням с различными значениями орбитального момента l . Поскольку для вариаций Z^* нет очевидных оснований, остановимся на влиянии $\rho(l)$.

Из сравнения экспериментальных результатов и теоретических оценок следует, что предположение о статистическом распределении $\rho(l) = 2l+1$ неудовлетворительно. Не вполне удовлетворительно /но все же заметно предпочтительнее/ и другое крайнее предположение $l=0$, т.е. заполнение только состояний с нулевым орбитальным моментом. Действительное распределение $\rho(l)$ до-видимому, имеет максимум при некото-

рых достаточно малых значениях ℓ . /В этой связи см. недавние работы /11,12//.

В последней графе табл. 1 проведено сравнение величин $R_n = J(n p \rightarrow 1 s) / J(2 p \rightarrow 1 s)$ для мишеней LiH и Li. Видно, что отношение $R_n(\text{LiH}) / R_n(\text{Li})$ всегда больше 1 и тем больше, чем больше n , тогда как отношение R_n /окисел/ / R_n /металл/ обнаруживает обратное поведение /4/. Отметим, что в обоих случаях /окислы и LiH/ мы имеем дело с ионными соединениями. Этот факт также свидетельствует о важности начального распределения $\rho(\ell)$, которое в случае окислов и гидридов должно сильно различаться: в гидридах возможен адиабатический захват мюонов, приводящий к преимущественному заполнению уровней с малыми значениями ℓ /1/.

Следует отметить, что отношения $R_n(\text{CH}_2) / R_n(\text{C})$, измеренные в работе /4/, с хорошей точностью совпадают со значениями, приведенными в табл. 1, что вполне естественно, если для $(\text{CH}_2)_n$ и LiH механизмы атомного захвата мюонов, а, следовательно, и распределения $\rho(\ell)$, аналогичны.

Для более однозначной интерпретации результатов измерений желательно провести более строгие расчеты каскадных переходов μ^- -мезонов в Li и LiH, а также вычислить распределения $\rho(\ell)$ при различных предположениях о механизме первоначального захвата мюонов.

С точки зрения приложений, наиболее интересным было бы, с одной стороны, установление зависимости между распределением интенсивностей линий K-серии и формой функции $\rho(\ell)$, а, с другой стороны, - поиски корреляции между формой $\rho(\ell)$ и особенностями структуры химической связи в различных соединениях.

В заключение мы хотели бы поблагодарить Р.Энгфера за стимулирующие дискуссии и предоставление Ge(Li)-детектора, Ц.Вылова и В.Александрова за калибровку детектора, Л.Н.Никитюк и Л.М.Смирнову за помощь в работе. Один из авторов /Х.Шневли/ благодарит ЦЕРН за предоставление командировки и ОИЯИ за теплый прием.

Литература

1. L.I.Ponomarev. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 23, 395 (1973).
2. В.Г.Зинов и др. *ЯФ*, 5, 591 /1967/.
3. D.Kessler et al. *Phys.Rev.Lett.*, 18, 1179 (1967).
4. H.Daniel et al. *Phys.Lett.*, 26B, 281 (1968).
5. В.Гаджоков. Сообщение ОИЯИ, Р10-6655, Дубна, 1972.
6. Д.Слэжер. *Электронная структура молекул*, М., 1965.
7. Y.Eisenberg, D.Kessler, *Nuovo Cim.*, 19, 1195 (1961).
8. J.Hüfner. *Z.Phys.*, 195, 365 (1965).
9. S.Berezin et al. *Nucl.Phys.*, B16, 389 (1970).
10. M.B.Stearns et al. *Phys.Rev.*, 184, 22 (1969).
11. M.Leon, R.Seki. *Preprint LA-UR-73-943 Los-Alamos* (1973).
12. P.K.Haff, T.A.Tombrello. *Preprint BAP-1 Cal.Inst. of Technology* (1974).

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1974 года.