

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13/83

3/1-83

P4-82-633

Д.Д.Бакалов, С.И.Виницкий, Л.И.Меньшиков*,
Л.И.Пономарев, М.П.Файфман*

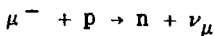
μ -ЗАХВАТ В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

Направлено в журнал "Physics Letters B"

*Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва.

1982

Реакция μ -захвата ядрами водорода



/1/

представляет значительный интерес для выяснения различных вопросов теории слабого взаимодействия ^{/1-3/}. Наблюдаемая скорость Λ_c реакции /1/ в водороде зависит не только от значений констант слабого взаимодействия, но также от скоростей различных мезоатомных и мезомолекулярных процессов, схема которых представлена на рис.1, где использованы следующие обозначения ^{/4/}: $\lambda_0 = 0,455 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ - скорость распада свободного мюона; $\lambda_a \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$ - скорость образования $p\mu$ -мезоатома в $1s$ -состоянии; $\lambda_p \approx 1,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ - скорость перехода из триплетного /полный спин $F=1$ / в синглетное $F=0$ / $1s$ -состояние $p\mu$ -атома при столкновении $p\mu (F=1) + p \rightarrow p\mu (F=0) + p$; $\lambda_{pp\mu} \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ - скорость образования мезомолекул $pp\mu$ /все скорости приведены для жидкого водорода/.

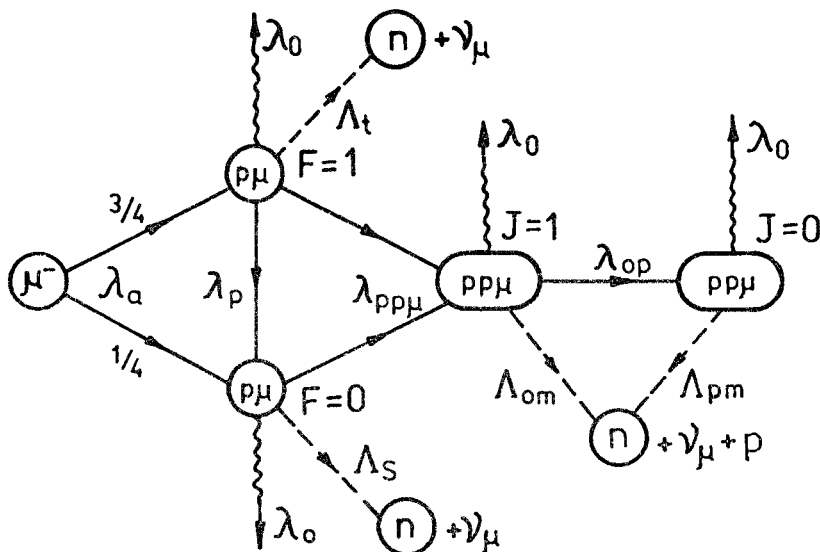


Рис.1. Схема мезоатомных и мезомолекулярных процессов, сопровождающих μ -захват.

Поскольку в жидком водороде выполняется условие $\lambda_{pp\mu} \gg \lambda_0$, то μ -захвату /1/ предшествует образование $pp\mu$ -молекул в реакции /5/



в результате которой $pp\mu$ -молекула становится ядром молекулярного иона, аналогичного HD^+ . Мезомолекулы $pp\mu$ существуют в ортосостоянии /орбитальный момент $J=1$, колебательное число $v=0$, суммарный спин ядер $I=1$, энергия связи $-\epsilon_{Jv} = -\epsilon_{10} = -107$ эВ/ и в парасостоянии / $J=0$, $v=0$, $I=0$, $-\epsilon_{00} = -253$ эВ/, причем уровень, соответствующий ортосостоянию, расщеплен на пять подуровней сверхтонкой и тонкой структуры /6, 7/ /см. рис.2/. В реакции /2/ $pp\mu$ -молекулы образуются преимущественно в ортосостоянии: согласно теоретическим расчетам /5/, $\lambda_{pp\mu}^{ortho} = 2,2 \cdot 10^6$ с⁻¹, $\lambda_{pp\mu}^{para} = 7,2 \cdot 10^8$ с⁻¹. Поскольку $\lambda_p \gg \lambda_{pp\mu}$, то $p\mu$ -атомы

всегда вступают в реакцию /2/ из состояния $F=0$ и вследствие этого $pp\mu$ -молекулы образуются в состоянии с полным спином $S=1/2$, т.е. заселяются только два нижних подуровня ортосостояния мезомолекулы $pp\mu$ /рис.2/.

Скорости μ -захвата Λ_{om} и Λ_{pm} соответственно из орто- и парасостояний $pp\mu$ -молекулы, вычисленные с учетом релятивистских эффектов в молекуле $pp\mu$, равны /7/

$$\Lambda_{om} = 0,756 \Lambda_s + 0,253 \Lambda_t = /505 \pm 15/ \text{ с}^{-1}, \quad /3/$$

$$\Lambda_{pm} = 0,286 \Lambda_s + 0,857 \Lambda_t = /200 \pm 6/ \text{ с}^{-1}$$

и с точностью $\sim 10^{-2}$ совпадают с результатами /8/ /здесь Λ_s и Λ_t - скорости μ -захвата в состояниях $F=0$ и $F=1$ мезоатома $p\mu$ /. При вычислении величин Λ_{om} и Λ_{pm} использованы значения γ_0 и γ_p - факторов для орто- и парасостояний, найденные нами /7/ в адиабатическом представлении задачи трех тел /9/

$$2\gamma_0 = 1,009 \pm 0,001; \quad 2\gamma_p = 1,143 \pm 0,001 \quad /4/$$

γ - фактор равен отношению плотностей вероятности нахождения μ -мезона в точке расположения протона в $pp\mu$ -молекуле и в $p\mu$ -атоме/, а также теоретические значения /10/

$$\Lambda_s = /664 \pm 20/ \text{ с}^{-1}, \quad \Lambda_t = /11,9 \pm 0,7/ \text{ с}^{-1}. \quad /5/$$

Наблюдаемая скорость μ -захвата Λ_c в жидком водороде равна /см. рис.1/:

$$\Lambda_c = \Lambda_s \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_{pp\mu}} + \frac{\lambda_{pp\mu}}{\lambda_0 + \lambda_{pp\mu}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_{op}} (\Lambda_{om} + \Lambda_{pm} \cdot \frac{\lambda_{op}}{\lambda_0}). \quad /6/$$

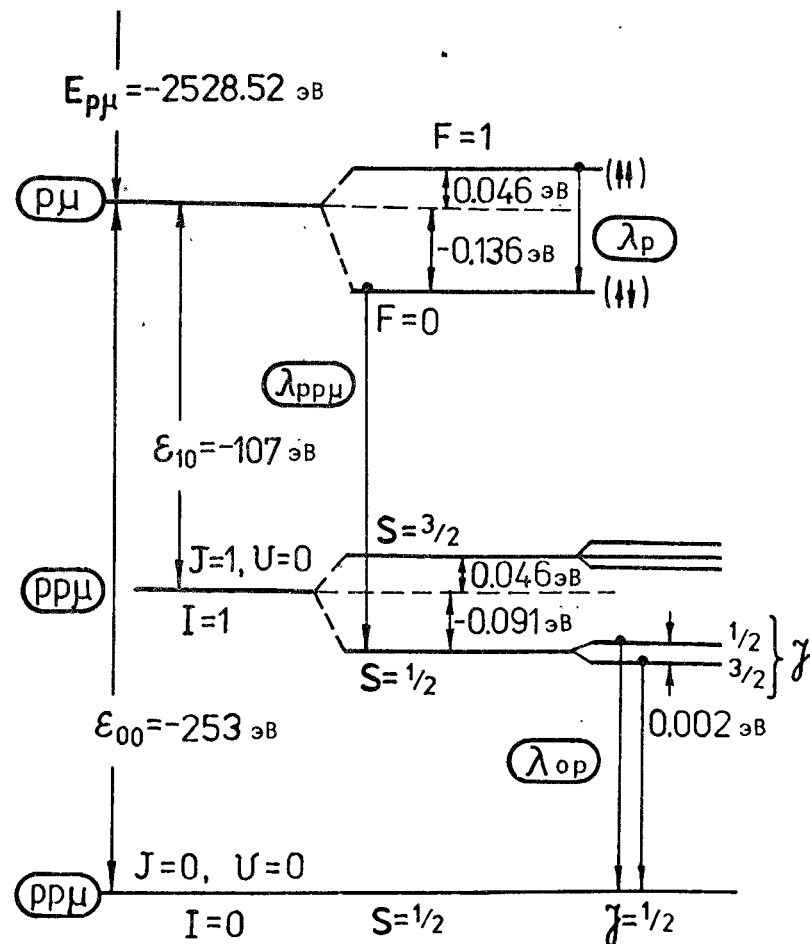


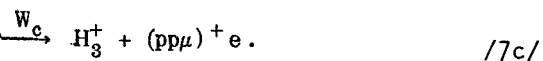
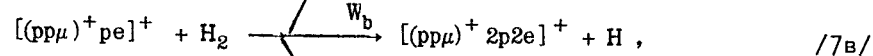
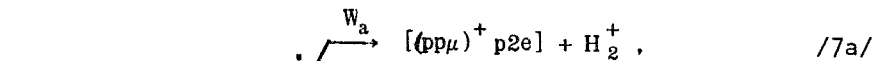
Рис.2. Схема расщепления уровней энергии мезоатома $p\mu$ и мезомолекулы $pp\mu$ и переходов между ними / F - спин $p\mu$ -атома; J, S и $J = \vec{S} + \vec{J}$ - орбитальный момент, спин и полный момент $pp\mu$ -молекулы, I - суммарный спин ядер/.

где λ_{op} - скорость орто-параперехода из возбужденного ортосостояния $pp\mu$ -молекулы в основное парасостояние. В нерелятивистском приближении электромагнитные $E1$ -переходы между этими состояниями строго запрещены правилами отбора $\Delta I = 0$. Взаимодействие спинов частиц в $pp\mu$ -молекуле приводит к тому, что волновая функция ортосостояния, кроме "большой" компоненты с квантовыми числами / $J=1, I=1/$ /, содержит примеси $\sim \alpha$ "малых" компонент с / $J=1, I=0/$ /. Аналогично волновая функция пара-

состояния, кроме "большой" компоненты / $J=0$, $I=0$ /, содержит примеси "малых" компонент / $J=0$, $I=1$ /. Вследствие этого матричные элементы оператора орто-пара- E1-перехода отличны от нуля за счет тех "перекрестных" членов $\sim a^2$ между "малыми" и "большими" компонентами волновых функций, для которых выполнены правила отбора $\Delta J=1$, $\Delta I=0$ /7/ /соответствующие им орто-парапереходы изображены на рис.2/.

Выделившуюся энергию перехода $\Delta \epsilon = \epsilon_{10} - \epsilon_{00} = 146$ эВ уносит электрон конверсии молекулярного комплекса, одним из "ядер" которого является $pp\mu$ -молекула. Благодаря большому коэффициенту конверсии / $\sim 10^5$ / скорость орто-параперехода, пропорциональная $\sim a^4$, оказывается, тем не менее, значительной.

Численное значение λ_{op} зависит от структуры молекулярного комплекса, тип которого определяется скоростями ионно-молекулярных процессов, происходящих вслед за реакцией /2/. При столкновении /комплекса/ $[(pp\mu)^+ p e]^+$ с молекулами H_2 с вероятностями $W_a \approx 0$, $W_b \approx 0,75$ и $W_c \approx 0,25$ образуются комплексы /11/:



Коэффициенты конверсии E1-перехода в этих комплексах находятся между собой в отношении $K_a : K_b : K_c = 1:0,78:0,66$ /относительная ошибка $\approx 10\%$ /11/. Скорость орто-параперехода равна

$$\lambda_{op} = (W_a + W_b K_b + W_c K_c) \lambda_{op}^{(a)} = (7,1 \pm 1,2) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}, \quad /8/$$

где $\lambda_{op}^{(a)} = 9,5 \pm 0,9 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ - скорость орто-параперехода в комплексе $[(pp\mu)^+ p 2e]$, вычисленная нами ранее /13/.

Скорость образования $pp\mu$ -молекул, усредненная по данным трех экспериментов: $\lambda_{pp\mu} = 2,55 \pm 0,18 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ /14/.

$$\lambda_{pp\mu} = 2,74 \pm 0,25 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} /15/ \text{ и } \lambda_{pp\mu} = 2,34 \pm 0,17 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} /16/, \text{ равна}$$

$$\lambda_{pp\mu} = 2,50 \pm 0,11 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}. \quad /9/$$

* Эти реакции являются аналогами хорошо известных ионно-молекулярных реакций $HD^+ + H_2 \rightarrow HD + H_2^+$ и $HD^+ + H_2 \rightarrow H_2 D^+ + H$, скорости которых $\sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$ /12/.

Используя значения скоростей /3/, /8/ и /9/ по формуле /6/, найдем скорость μ -захвата в жидком водороде:

$$\Lambda_c = 494 \pm 16 \text{ с}^{-1}. \quad /10/$$

Вычисленные значения /8/ и /10/ λ_{op} и Λ_c следует сравнить с результатами последних экспериментов группы Сакле-ЦЕРН-Болонья /17/

$$\lambda_{op} = 4,1 \pm 1,4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}, \quad \Lambda_c = 460 \pm 20 \text{ с}^{-1}. \quad /11/$$

При этих значениях Λ_c и λ_{op} и значении /9/ $\lambda_{pp\mu}$ из соотношения /6/ следует величина $\Lambda_s = 600 \pm 28 \text{ с}^{-1}$.

На рис.3 представлена зависимость /6/ Λ_c от λ_{op} при заданных значениях /5/ и /9/ величин Λ_s , Λ_t и $\lambda_{pp\mu}$ /сплошная линия/ и коридор ошибок, обусловленный погрешностями этих значений, а также значения λ_{op} /штриховые линии/. Теоретические значения Λ_c и λ_{op} заключены в пределах заштрихованного параллелограмма, область определения экспериментальных значений Λ_c и λ_{op} находится в пределах прямоугольника, задаваемого величинами /11/. Легко видеть, что при заданных Λ_s и $\lambda_{pp\mu}$ указанные две области определения Λ_c и λ_{op} не перекрываются, причем пара величин /11/ находится вне полосы, задаваемой формулой /6/.

Одной из причин указанных расхождений экспериментальных и теоретических значений Λ_c и λ_{op} , с одной стороны, и несовместности экспериментальных значений Λ_c и λ_{op} между собой, с другой стороны, могут служить погрешности в используемых значениях Λ_s и $\lambda_{pp\mu}$. Для окончательного выяснения причин отмеченных расхождений необходимы независимые измерения скоростей Λ_s и $\lambda_{pp\mu}$.

Авторы выражают благодарность А.Бертину, А.Витале, С.С.Герштейну, Е.Заваттини, Ж.Дюкло, Р.А.Эрамжану за стимулирующие дискуссии, а также В.С.Мележику за помощь в работе.

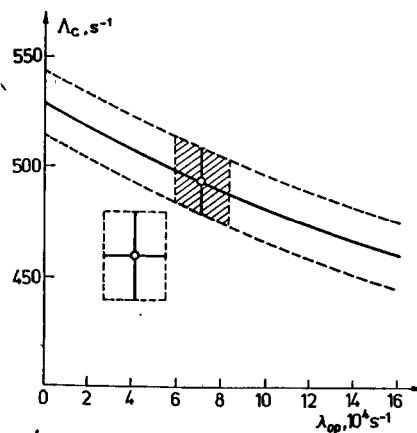


Рис.3. Зависимость /6/ скорости μ -захвата Λ_c от величины λ_{op} при значениях /5/ и /9/ скоростей Λ_s и $\lambda_{pp\mu}$. Область теоретически совместных значений Λ_c и λ_{op} заштрихована, область определения экспериментальных значений показана слева внизу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. ЖЭТФ, 1958, 35, с. 821.
Weinberg S. Phys.Rev.Lett., 1960, 4, p. 575.
2. Zavattini E. "Muon Capture", in Muon Physics, v.11, p. 219.
eds. V.W.Hughes and C.S.Wu. Academic Press, New York and London, 1975.
3. Балашов В.В., Коренман Г.Я., Эрамжян Р.А. Поглощение мезонов атомными ядрами, "Наука", М., 1978.
4. Ponomarev L.I. Mesic Atomic and Mesic Molecular Processes in the Hydrogen Isotope Mixtures. VI Int.Conf. on Atom. Phys. Riga 17-22- August, Proc. p. 182, Zinatne Riga and Plenum Press New-York-London, 1978.
5. Пономарев Л.И., Файфман М.П. ЖЭТФ, 1976, 71, с. 1689.
6. Бакалов Д.Д., Веницкий С.И. ЯФ, 1980, 32, с. 720.
7. Bakalov D.D. et al. JINR, E-80-720, Dubna, 1980 (to be published in Nucl.Phys. A384).
8. Halpern A. Phys.Rev., 1964, A135, p.34; Phys.Rev., 1968, 62, p.174.
9. Веницкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, с. 698.
10. Primakoff H. In: Nuclear and Particle Physics at Intermediate Energy, Plenum, New York, 1975, p.1.
11. Меньшиков Л.И. Препринт ИАЭ, 642-1982, М., 1982.
12. Chupka W.A., Russel M.E., Refaev. K. J.Chem.Phys., 1968, 48, p. 1518.
13. Bakalov D.D. et al. Contribution 117 Presented at the IX International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure, Versailles, France, 6-10 July, 1981.
14. Conforto G., Rubbia C., Zavattini E. Nuovo Cim., 1964, 33, p.1001.
15. Будяшов Ю.Г. и др. ОИЯИ, P15-3964, Дубна, 1968.
16. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1976, 70, с. 1167.
17. Bardin G. et al. Nucl.Phys., 1981, A352, p. 365; Phys.Lett., 1981, 104B, p. 320.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 августа 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Бакалов Д.Д. и др.
 μ -захват в жидком водороде

P4-82-633

Рассмотрен процесс μ -захвата $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ в жидком водороде с учетом кинетики ионно-молекулярных и мезомолекулярных реакций. Показано, что в мезомолекуле $pp\mu$ со скоростью $\lambda_{op} = 7,1 \pm 1,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ происходит конверсионный орто-пара - E1-переход, обусловленный взаимодействием спинов частиц в $pp\mu$ -молекуле. Вычислена скорость $\Lambda_c = 494 \pm 16 / \text{с}^{-1}$ μ -захвата в жидком водороде.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Bakalov D.D. et al.
 μ -Capture in Liquid Hydrogen

P4-82-633

The capture of μ^- -meson $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ in liquid hydrogen is considered allowing for the kinetics of ionic-molecular and mesic molecular reactions. The conversion ortho-para E1-transition due to the particle spin interaction is shown to occur in the mesic molecule $pp\mu$ with the rate $\lambda_{op} = (7.1 \pm 1.2) \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. The calculated μ -capture rate in liquid hydrogen equals $\Lambda_c = (494 \pm 16) \text{ s}^{-1}$.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.