

# Объяснение неожиданной температурной зависимости мюонного катализа в твердом дейтерии

С. С. Герштейн<sup>1)</sup>

Институт физики высоких энергий, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 4 мая 2001 г.

Указано, что при достаточно низких температурах упругое рассеяние мезоатомов  $d\mu$  в твердом дейтерии (так же, как и медленных нейтронов) происходит на всей кристаллической решетке в целом без потери энергии, а неупругое столкновение – с возбуждением фононов – мало. Благодаря этому резонансное образование мезомолекул  $dd\mu$  в твердом дейтерии происходит раньше термализации мезоатомов  $d\mu$ , что и объясняет наблюдаемую на опыте независимость скорости образования  $dd\mu$ -молекул и мюонного катализа от температуры.

PACS: 25.80-е, 28.20.Cz, 36.10.-k

Благодаря существованию в мезомолекуле  $dd\mu$  колебательно-вращательного уровня ( $\nu = 1$ ,  $K = 1$ ) с маленькой энергией связи [1–3] в газообразном и жидком дейтерии, становится возможным весьма эффективный резонансный механизм образования мезомолекул  $dd\mu$  [4] с последующей ядерной реакцией синтеза  $dd \rightarrow {}^3\text{He} + n$  или  $dd \rightarrow T + p$ . Дело в том, что энергии связи мезомолекулы  $dd\mu$  в этом состоянии ( $\epsilon \approx 2$  эВ) очень немного не хватает для возбуждения колебательного уровня  $n = 7$  молекулярного комплекса  $[d\mu d, d]2e$ , возникающего, когда одно из ядер молекулы  $D_2$  заменяется мезомолекулой  $dd\mu$ . Недостающая энергия восполняется энергией теплового движения термализованного в среде мезоатома  $d\mu$ , сталкивающегося с одним из дейтронов молекулы  $D_2$ , благодаря чему и осуществляется условие резонансного образования [4].

Существование в мезоатоме  $d\mu$  двух уровней сверхтонкой структуры с полным спином  $F = 3/2$  и  $F = 1/2$  (разность энергий между которыми составляет  $\Delta E = 0.0485$  эВ) требует более детального рассмотрения резонансного механизма.

Анализируя временную зависимость мюонного катализа при различных температурах, можно экспериментально определить скорость образования мезомолекул из различных состояний сверхтонкой структуры (СТС) мезоатома  $d\mu$ , а также скорость перехода из верхнего состояния спином  $F = 3/2$  в нижнее  $F = 1/2$ , происходящее в обменных столкновениях мезоатома  $d\mu$  с ядрами дейтерия [5]. В согласии с теоретическими расчетами [6, 7] скорость резонансного образования  $dd\mu$  молекул из нижнего состояния СТС мезоатома  $d\mu$  ( $F = 1/2$ ) при уменьшении

температуры газовой среды или жидкости падает, так как тепловые энергии термализованных мезоатомов  $d\mu$  оказываются недостаточными для выполнения условия резонанса. При  $T \approx 70$  К резонансный механизм образования мезомолекул  $dd\mu$  из состояния  $d\mu$  ( $F = 1/2$ ) практически полностью выключается, и образование мезомолекулы  $dd\mu$  из состояния  $F = 1/2$  происходит путем нерезонансного механизма с передачей энергии связи мезомолекулы атомному электрону [6–15] (рис.1). Вероятность послед-

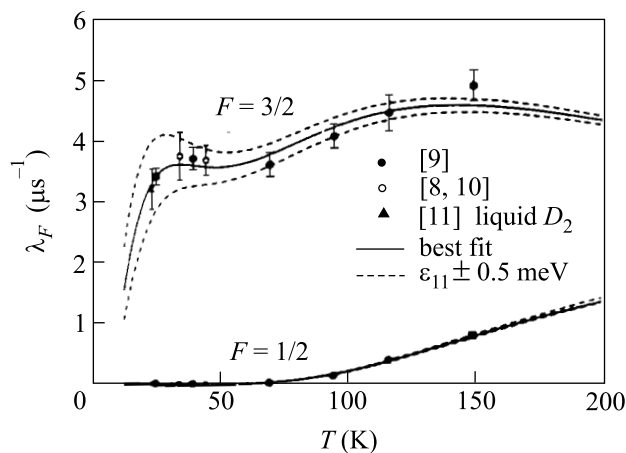


Рис.1. Скорости образования мезомолекул  $\bar{\lambda}_{1/2}$  и  $\bar{\lambda}_{3/2}$  из всех экспериментов, выполненных в PSI, и фиты, приведенные в [7]

него почти на два порядка меньше резонансного и приводит к образованию мезомолекул, главным образом, в состояниях с четными вращательными числами и с четным суммарным спином ядер [2]. Дополнительным экспериментальным подтверждением этого служит наблюдаемое изменение отношения каналов

<sup>1)</sup>e-mail: gershtein@mx.ihep.su

$dd$ -реакции  $R = \Gamma(dd \rightarrow {}^3\text{He} + n)/\Gamma(dd \rightarrow T + p)$  [13], которое происходит после перехода к нерезонансному образованию  $dd\mu$ -молекул в силу различия этого отношения для реакций, идущих из вращательно-го состояния  $K = 1$  и из  $S$ -состояния с четными вращательными числами и спинами. Что же касается процесса образования мезомолекул  $dd\mu$  из состояния  $d_\mu(F = 3/2)$ , то скорость его слабо зависит от температуры и начинает уменьшаться лишь при  $T \simeq 26$  К. Температурная зависимость скорости образования мезомолекул, измеренная в плотном газе и жидком дейтерии [7–15], хорошо согласуется с теоретическими расчетами [6, 7] (см. рис.1). Однако измерения скорости образования мезомолекул  $dd\mu$  в твердом водороде при  $T = 3$  К [16] более чем на порядок превысили теоретические предсказания. Детальные исследования, проведенные на одной и той же установке в твердом дейтерии и жидкости [17] в диапазоне температур 5–50 К, подтвердили этот результат (см. рис.2). Оказалось, что начиная пример-

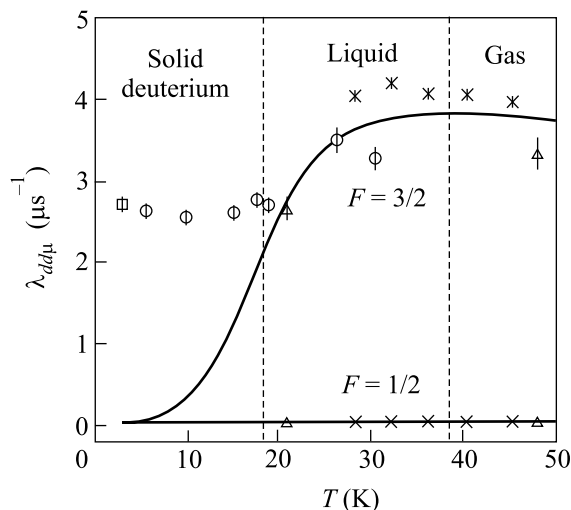


Рис.2. Экспериментальная зависимость скорости образования мезомолекул в дейтерии от температуры и спиновых состояний мезоатомов дейтерия. Кружки представляют экспериментальные данные [17], квадрат – данные [16], треугольник – данные [15], крестики – данные [13], сплошная линия – теоретические предсказания [6, 7]

но с  $T \simeq 20$  К и ниже скорость резонансного образования мезомолекул  $dd\mu$  из состояния  $d_\mu(F = 3/2)$  практически не меняется. Точно так же не меняется в согласии с теорией скорость нерезонансного образования из состояния  $d_\mu(F = 1/2)$ . Не изменяется и скорость перехода между уровнями сверхтонкой структуры мезоатомов  $d_\mu(F = 3/2) \rightarrow d_\mu(F = 1/2)$  ( $\lambda_d \approx 3.1 \cdot 10^7 \text{с}^{-1}$ ). Таким образом, возникает пара-

доксальная ситуация. Дело происходит так, как если бы мезоатомы  $d_\mu$  в состоянии сверхтонкой структуры  $F = 3/2$  сохраняли бы свою энергию и не термализовались при понижении температуры ниже 20 К. В настоящей статье я хочу указать, что такое явление естественным образом объясняется характером потери энергии медленными атомами  $d_\mu$  в кристаллической решетке и не зависит от структуры самой решетки.

Ввиду электронейтральности и малости размеров мезоатомов  $d_\mu$  рассеяние их в кристалле во многом аналогично рассеянию медленных нейтронов. Как было показано еще в 1937 г. Померанчуком [18], упругое рассеяние нейтронов при достаточно низких температурах происходит в основном на всей кристаллической решетке в целом и не сопровождается потерей энергии. (Можно только сожалеть, что, получив этот результат, Померанчук не предсказал в 1937 г. эффект Мессбауэра.) Неупругие же соударения связаны в основном с однофононным возбуждением решетки и длина свободного пробега относительно них  $l_{in}$  велика по сравнению с длиной упругого  $l_{el}$ . Согласно [18], для одинаковых ядер (когда длина волны нейтрона становится меньше постоянной решетки)

$$l_{in} = \frac{7}{8} l_{el} \left( \frac{k_B \Theta}{E} \right)^3, \quad (1)$$

где  $E = k_B T$  – энергия нейтрона, а  $\Theta$  – температура Дебая. При  $E < k_B \Theta$  очевидно  $l_{in} > l_{el}$ . Если при этом длина, соответствующая захвату нейтрона  $l_c = 1/N\sigma_c$  (где  $\sigma_c$  – сечения захвата, а  $N$  – концентрация ядер) будет существенно меньше  $l_{in}$ , то замедление нейтрона прекращается и захват их ядрами будет происходить раньше, чем произойдет их термализация. Аналогичные соображения можно привести к поведению мезоатомов  $d_\mu$  в кристаллической решетке.

Сечение упругого рассеяния медленных атомов  $d_\mu$  в верхнем состоянии сверхтонкой структуры  $F = 3/2$  на дейтронах при энергиях, меньших 0.1 эВ, согласно расчетам [19], практически постоянно и составляет

$$\sigma_{el} \simeq 2 \cdot 10^{-19} \text{см}^2, \quad (2)$$

а длина пробега, связанная с резонансным образованием мезомолекул  $dd\mu$ , составляет

$$l_{dd\mu} = \frac{1}{N\sigma_{dd\mu}} = \frac{v}{\lambda_{dd\mu}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{dd\mu}$  – скорость образования мезомолекул, а  $v$  – скорость мезоатомов  $d_\mu$ , которая в условиях термализации составляет  $v = (3k_B T/M_d)^{1/2}$ . Величина

$\lambda_{dd\mu} = 2.27 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ . Исходя из условия  $l_{dd\mu} < l_{in}$  и соотношений (1)–(3), можно оценить температуру, при которой длина неупругого рассеяния сравнивается с длиной образования мезомолекул  $dd\mu$ :

$$T \leq 0.82 \left( \frac{M_d}{k_B} \right)^{1/7} \left( \frac{\lambda_{dd\mu}}{N \cdot \sigma_{el}} \right)^{2/7} \Theta^{6/7}. \quad (4)$$

При температуре Дебая для дейтерия  $\Theta = 74 \text{ К}$  и плотности ядер  $N = 4.25 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  имеем

$$T \leq 13 \text{ К}. \quad (5)$$

Учитывая, что для термализации атомов  $d_\mu$ , образующихся в основном состоянии со средней энергией (1–2) эВ, необходимо несколько длин неупругого рассеяния, можно заключить, что в твердом дейтерии резонансное образование мезомолекул происходит раньше, чем термализация мезоатомов  $d_\mu$ .

Это и объясняет наблюдаемую на опыте независимость мюонного катализа в твердом дейтерии от температуры.

Следует отметить, что эпитермальное образование мезомолекул  $dd\mu$  наблюдалось ранее в веществе, состоящем из HD молекул [20]. Это объяснялось тем, что эффективное сечение рассеяния мезоатомов  $d\mu$  на протонах вследствие эффекта Рамзауэра [21] мало и поэтому в процессе замедления мезоатомов  $d\mu$  их энергии с определенной вероятностью попадали в область резонансного образования на более высоких колебательных состояниях комплекса  $[dd\mu, d]2e$ . Согласно оценкам [22], кристаллическая решетка в твердом дейтерии оказывает слабое влияние на скорость резонансного образования мезомолекул  $dt\mu$  ввиду различия в положении и ширине резонансного уровня для образования мезомолекул  $dt\mu$  и  $dd\mu$  [22]. Однако это утверждение требует еще экспериментальной проверки.

Как я узнал после написания статьи, гипотеза об эпитермальном образовании мезомолекул  $dd\mu$  в твердом дейтерии высказывалась Л. И. Пономаревым на основе анализа экспериментальных данных. Идея об уменьшении потерь энергии мезоатомов  $d_\mu$  в твердом дейтерии качественно высказывалась также в работах [16, 23]. Настоящая работа обсуждалась на Международной конференции по мюонному катализу MuCF01 в Японии (22–26 апреля 2001 г.), где была также представлена работа А. Адамчака и М. Файфмана, содержащая сходные идеи.

Я искренне благодарен Л. И. Пономареву и Г. Г. Семечуку за обсуждение и ценные замечания.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 99-02-16558 и # 00-15-96645.

1. С. С. Герштейн, *Кандидатская диссертация*, Институт физических проблем, 1958.
2. Я. Б. Зельдович, С. С. Герштейн, УФН **71**, 581 (1960). (Soviet Physics Usp. **3**, 593 (1961).)
3. С. И. Веницкий и др., ЖЭТФ **74**, 849 (1978). (Soviet Physics JETP **47**, 444 (1978).)
4. Э. А. Весман, Письма в ЖЭТФ **5**, 113 (1967). (Soviet Physics JETP Lett. **5**, 91 (1967).)
5. С. С. Герштейн, ЖЭТФ **40**, 695 (1961). (Soviet Physics JETP **13**, 488 (1961).)
6. Л. И. Меньшиков, Л. И. Пономарев, Т. А. Стринс, М. П. Файфман, ЖЭТФ **92**, 11773 (1987); М. П. Файфман, Л. И. Меньшиков, Т. А. Стринс, Muon Cat. Fusion **4**, 1 (1980).
7. A. Scrinzi, P. Kammel, J. Zmeskal et al., Phys. Rev. **A47**, 4691 (1993).
8. P. Kammel, W. H. Breunlich, M. Cargnelli et al., Phys. Lett. **112B** 319 (1982); Phys. Rev. **A28**, 2611 (1983).
9. J. Zmeskal, P. Kammel, A. Scrinzi et al., Phys. Rev. **A42**, 1165 (1990).
10. M. Cargnelli et al., in *Proc. of the Twenty-Third Yamada Conf. on Nuclear Weak Processes and Nuclear Structure*, Osaka, 1989, Eds. Morita M. et al., World Scientific, Singapore, 1989, p. 115.
11. N. Nagel et al., Nucl. Phys. **439A**, 397 (1989).
12. W. H. Breunlich, P. Kammel, J. S. Cohen et al., Ann. Rev. Nucl. Sci. **39**, 311 (1989).
13. C. Petitjean, D. V. Balin, W. H. Breunlich et al., Hyperfine Interactions **118**, 127 (1999).
14. C. Petitjean, P. Ackerbauer, D. V. Balin et al., Hyperfine Interactions **101/102**, 1 (1996); C. Petitjean, D. V. Balin, W. H. Breunlich et al., *ibid* **118**, 127 (1999).
15. В. П. Дзелепов, В. Г. Зинов, С. А. Ивановский и др., ЖЭТФ **101**, 1105 (1992). (Soviet Physics JETP **74**, 589 (1992).)
16. P. E. Knowles, G. A. Beer, G. R. Masson et al. Phys. Rev. **A56**, 1970 (1997); Hyperfine Interactions **101/102**, 21 (1996).
17. Д. Л. Демин, В. П. Дзелепов, В. В. Фильченков и др., ЖЭТФ **111**, 1163 (1997).
18. И. Я. Померанчук, ЖЭТФ **8**, 394 (1937) (Phys. Zs. Sowjet **13**, 65 (1938)).
19. L. Bracci, C. Chiccoli, G. Fiorentini et al., *The atlas of the cross sections of mesic atomic processes*, Universita degli studi di Pisa, IFUP-TH 21/90, Pisa, 1990.
20. G. G. Semenchuk, D. V. Balin, T. Case et al., Hyperfine Interactions **118**, 141 (1999).
21. S. Cohen, D. L. Judd, and R. J. Riddell et al., Phys. Rev. **110**, 1471 (1958); **119**, 384 (1960).
22. К. Fukushima, Hyperfine Interactions **82**, 161 (1993).
23. А. Адамчак, Hyperfine Interactions **101/102**, 113 (1996); C. L. Gurin and L. I. Menshikov, Hyperfine Interactions **118**, 147 (1999).