

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3173/82

12/7-82

P4-82-215

Л.Н.Богданова\*, В.Е.Маркушин\*\*, В.С.Мележик,  
Л.И.Пономарев

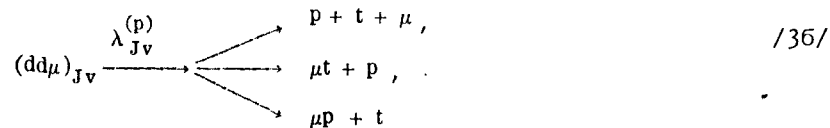
РЕАКЦИЯ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА  
В МЕЗОМОЛЕКУЛЕ  $dd\mu$   
И НАРУШЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ СИММЕТРИИ  
В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ  
 $dd$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Направлено в журнал "Physics Letters B"

\* Институт теоретической и экспериментальной  
Физики, Москва.

\*\* Физический институт имени П.Н.Лебедева  
АН СССР, Москва.

1982



1. Экспериментально установлено, что полные сечения  $\sigma_{tot}^{(n)}$  и  $\sigma_{tot}^{(p)}$  зеркальных реакций



при энергии дейтронов в СЦМ  $7 \text{ кэВ} \leq E \leq 50 \text{ кэВ}$  отличаются менее чем на 7%<sup>/1,2/</sup>. В дифференциальных сечениях обнаружена заметная анизотропия, свидетельствующая о существенном вкладе р-волны в полное сечение. Коэффициенты анизотропии  $A_n$  и  $A_p$  для реакций /1a/ и /16/, а также их векторные анализирующие способности<sup>/3/</sup> сильно различаются /  $A_n/A_p = 1,7 \div 2$  при  $E = 10 \div 50 \text{ кэВ}$  /<sup>/1,2/</sup>, что указывает на значительное нарушение зарядовой симметрии в р-волне реакций /1/. Известно несколько попыток<sup>/1,4,5,8/</sup> объяснить указанное нарушение зарядовой симметрии. Выделение вклада р-волны по имеющимся экспериментальным данным невозможно осуществить без специальных предположений о поведении парциальных амплитуд<sup>/7,8/</sup> при низких энергиях: согласно<sup>/4/</sup>  $\beta = \sigma_1^{(n)}/\sigma_1^{(p)}|_{E=0} = 2,9$ ; в работе<sup>/8/</sup>  $\beta = 1,46$ .

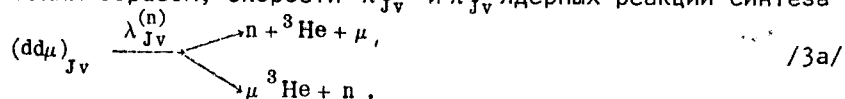
Покажем, что величину  $\beta$  можно определить непосредственно, измеряя отношение выходов реакций /1/, происходящих в мезомолекуле  $dd\mu$ .

2. Мезомолекула  $dd\mu$  образуется в резонансной реакции



во вращательно-колебательном состоянии  $J = v = 1^{/9-11/}$ . Волновые функции  $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$  системы с одинаковыми ядрами /  $\vec{r}$  - координата мюона,  $\vec{R}$  - координата относительного движения ядер / обладают определенной четностью по переменной  $\vec{r}$ , причем четность волновых функций  $\Psi_{Jv}(\vec{r}, \vec{R})$  связанных состояний  $dd\mu$ -молекулы положительна<sup>/12/</sup>. Поэтому в состоянии с полным моментом  $J=1$  момент  $L$  относительного движения ядер нечетен, при этом вклад р-волны /  $L=1$  / доминирует<sup>/13,14/</sup>.

Таким образом, скорости  $\lambda_{Jv}^{(n)}$  и  $\lambda_{Jv}^{(p)}$  ядерных реакций синтеза



из молекулярных состояний с  $J=1$  определяются р-волновыми сечениями реакций /1a/ и /16/ /вклад высших волн /  $L \geq 3$  / пренебрежимо мал/<sup>/15/</sup>:

$$\lambda_{Jv}^{(n,p)} = K_1^{(n,p)} \cdot \int d^3r |\nabla_{\vec{R}} \Psi_{Jv}(\vec{r}, \vec{R})|_{R=0}^2 = K_1^{(n,p)} \cdot \rho_{Jv} \quad /4/$$

$$\text{Здесь } K_1^{(n,p)} = \gamma \cdot \lim_{v \rightarrow 0} \sigma_1^{(n,p)} \cdot v / 9(vM)^2 C_1^2 -$$

$\rho$  - волновая константа реакции,  $v$  - относительная скорость ядер  $d$  в реакциях /1/,  $C_1^2 = \frac{2\pi\eta(1+\eta^2)}{9(e^{2\pi\eta} - 1)}$  - множитель

Гамова для  $L=1$  ( $\eta = ac/v$ ). Коэффициент  $\gamma = \frac{(2S_d+1)^2}{(2I+1)^2} = 3$  учитывает

тот факт, что сечения  $\sigma_1^{(n,p)}$  определены для неполяризованных дейтронов, а в молекуле  $dd\mu$  суммарный спин ядер  $I=1$ . /Последнее утверждение следует из требования симметрии волновой функции  $\Psi_{Jv}(\vec{r}, \vec{R})$  относительно перестановки тождественных ядер в состоянии  $J=1$ . Интеграл, входящий в формулу /4/, вычислен в адиабатическом представлении задачи трех тел<sup>/14/</sup>. Его значения для состояний /  $J=1, v=1$  / и /  $J=1, v=0$  / соответственно равны

$$\rho_{11} = 1,53 \cdot 10^{-17} \text{ фм}^{-5},$$

$$\rho_{10} = 5,40 \cdot 10^{-17} \text{ фм}^{-5}.$$

При вычислении констант реакций  $K_1^{(n,p)}$  мы использовали параметризацию р-волновых сечений  $\sigma_1^{(n,p)}$ , предложенную в работе<sup>/8/</sup>:

$$K_1^{(n)} = 3,4 \cdot 10^{25} \text{ фм}^5 \cdot \text{с}^{-1},$$

$$K_1^{(p)} = 2,3 \cdot 10^{25} \text{ фм}^5 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Соответствующие скорости  $\lambda_{Jv}^{(n,p)}$  и полные скорости ядерной реакции синтеза  $\lambda_{Jv} = \lambda_{Jv}^{(n)} + \lambda_{Jv}^{(p)}$  равны:

$$\lambda_{11}^{(n)} = 5,2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{10}^{(n)} = 1,8 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_{11}^{(p)} = 3,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{10}^{(p)} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_{11} = 8,7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{10} = 3,0 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

3. Наряду с реакциями ядерного синтеза в мезомолекуле происходят оже-переходы на более низкие уровни. Доминирует монополярный E0-переход /J=1, v=1/ → /J=1, v=0/ со скоростью  $\lambda_{tr} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ . E1-переходами с изменением вращательного квантового числа J можно пренебречь, так как в молекуле с одинаковыми ядрами они связаны с изменением суммарного ядерного спина, т.е. обусловлены релятивистскими эффектами /согласно оценке работы<sup>/18/</sup> для перехода /J=1, v=1/ → /J=0, v=1/  $\lambda_{tr} \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ ; из результатов работы<sup>/17/</sup> следует, что  $\lambda_{tr} \leq 10^5 \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, реакция ядерного синтеза в ddμ-молекуле происходит с вероятностью  $W_{11} = \lambda_{11} / (\lambda_{11} + \lambda_{tr}) = 0,82$  из состояния J=v=1 и вероятностью  $W_{10} = 1 - W_{11} = 0,18$  из состояния J=1, v=0, т.е. всегда из состояния L=1 относительного движения дейтронов, и поэтому отношение выходов нейтронов и протонов в реакциях /3/  $\Upsilon^{(n)}$  и  $\Upsilon^{(p)}$  совпадает с отношением p-волновых сечений в пределе низких энергий:

$$\frac{\Upsilon^{(n)}}{\Upsilon^{(p)}} = \frac{\lambda_{1v}^{(n)}}{\lambda_{1v}^{(p)}} = \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\sigma_1^{(n)}}{\sigma_1^{(p)}} = \beta. \quad /5/$$

Время жизни молекулы ddμ равно

$$T = W_{11} / \lambda_{11} + W_{10} / \lambda_{10} = 1,0 \text{ нс}, \quad /6/$$

а эффективная скорость ядерных реакций /3/  $\lambda_f = 1/T = 1,0 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ . Отметим, что вычисленное значение  $\lambda_f$  на два порядка меньше оценки, полученной ранее в работе<sup>/18/</sup>.

4. От величины отношения  $\Upsilon^{(n)}/\Upsilon^{(p)}$  зависит важная характеристика реакций /3/, а именно, так называемый "коэффициент прилипания" ω мюона к заряженным продуктам. Вероятность канала  $\mu^3\text{He} + n$  в реакции /3а/ равна  $\omega^{(n)} = 0,14 \pm 0,01$ <sup>/19-21/</sup>, в то время как в реакции /3б/ вероятности каналов  $\mu t + p$  и  $\mu p + t$  пренебрежимо малы, поэтому

$$\omega = \omega^{(n)} \cdot \frac{\Upsilon^{(n)}}{\Upsilon^{(p)} + \Upsilon^{(n)}} = \omega^{(n)} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1}. \quad /7/$$

\* Приведенное значение вычислено М.П.Файфманом с помощью алгоритма, развитого в работе<sup>/18/</sup>.

При  $\beta = 1,46$ <sup>/8/</sup>  $\omega = 0,083$  вместо  $\omega = \omega^{(n)}/2 = 0,076$ , полученного ранее<sup>/19/</sup> в предположении  $\beta = 1$ .

Значения скорости ядерной реакции  $\lambda_f$  и "коэффициента прилипания" ω важны для описания кинетики процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза в смеси дейтерия и трития<sup>/22/</sup>, которые в последние годы вызывают интерес в связи с обсуждением возможностей их практического использования для производства ядерной энергии и нейтронов<sup>/23,24/</sup>. Точность наших

численных результатов для  $\lambda_{1v}^{(n,p)}$  и  $\lambda_f$  ограничена точностью извлечения p-волновых констант реакций из экспериментальных данных по реакциям /1/. Измерение отношения выходов нейтронов и протонов  $\Upsilon^{(n)}/\Upsilon^{(p)}$  в реакциях /3/ и "коэффициента прилипания" ω позволяет непосредственно установить степень нарушения зарядовой симметрии в p-волновом dd-взаимодействии вблизи порога.

В заключение выражаем благодарность В.Г.Антоненко и Б.П.Адьясевичу за ознакомление с результатами экспериментов, а также С.С.Герштейну и И.С.Шапиро за интерес к работе и полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Theus R.B., McGarry W.I., Beach L.A. Nucl.Phys., 1966, 80, p. 273.
2. Eliot E.A., Roaf D., Shaw P.F.D. Proc.Royal.Soc., 1953, A216, p. 57.
3. Адьясевич Б.П., Антоненко В.Г., Фоменко Д.Е. ЯФ, 1981, 33, с. 601.
4. Voersma H.J. Nucl.Phys., 1969, A135, p. 609.
5. Yu D.U.L. Prog.Theor.Phys., 1966, 36, p. 734.
6. Sergeev V.A. Phys.Lett., 1978, 38B, p. 286.
7. Rook J.R., Goldfarb L.B.J. Nucl.Phys., 1969, 27, p. 79.
8. Адьясевич Б.П., Антоненко В.Г., Брагин В.Н. ЯФ, 1981, 33, с. 1167.
9. Весман Э.А. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, с. 113.
10. Виноцкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1978, 74, с. 849.
11. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, с. 460.
12. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. УФН, 1960, 71, с. 581.
13. Виноцкий С.И., Мележик В.С., Пономарев Л.И. ОИЯИ, Р4-80-775, Дубна, 1980.
14. Виноцкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, с. 698.
15. Deser S. et al. Phys.Rev., 1954, 96, p. 774.
16. Пономарев Л.И., Файфман М.П. ЖЭТФ, 1976, 71, с. 1689.
17. Бакалов Д.Д. и др. ОИЯИ, Е4-80-720, Дубна, 1980.

18. Vesman B.A. Eesti NSV Teaduste Acad.Fuusika Astron. Inst. Urimused (ESSR), 1969, 18, p. 429.
19. Герштейн С.С. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, с. 1690.
20. Bracci L., Fiorentini G. Nucl.Phys., 1981, A364, p. 383.
21. Балин Д.В. и др. Препринт ЛИЯФ-715, 1981.
22. Герштейн С.С. и др. ЖЭТФ, 1980, 78, с. 2099.
23. Petrov Yu.V. Nature, 1980, 285, p. 466.
24. Пономарев Л.И. Доклад на X Европейской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 14-19 сентября, 1981 г., Москва; ОИЯИ, P4-81-800, Дубна, 1981.

Богданова Л.Н. и др. Реакция ядерного синтеза P4-82-215 в мезомолекуле  $dd\mu$  и нарушение зарядовой симметрии в низкоэнергетическом  $dd$ -взаимодействии

Вычислена скорость  $\lambda_f = 1,0 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$  реакции ядерного синтеза в мезомолекуле  $dd\mu$  и показано, что измерение отношения выхода нейтронов к выходу протонов позволяет найти отношение  $p$ -волновых сечений реакций  $d(d, n)^3\text{He}$  и  $d(d, p)t$  вблизи порога  $dd$ .

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Bogdanova L.N. et al. Reaction of Nuclear P4-82-215 Fusion in  $dd\mu$  Molecule and Charge Symmetry Violation in the Low Energy  $dd$  Interaction

The rate  $\lambda_f = 1.0 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$  of the nuclear fusion in the  $dd\mu$  molecule is calculated. It is shown that the ratio of the neutron to the proton yield equals the ratio of  $p$ -wave cross sections of  $d(d, n)^3\text{He}$  and  $d(d, p)t$  reactions near the threshold.

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.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1982 года.