

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Г-427

12/11-77

P4 - 10936

4922/2-77

С.С.Герштейн, Л.И.Пономарев

КАТАЛИЗ μ^- -МЕЗОНАМИ

РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ И ТРИТИЯ

1977

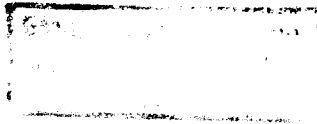
P4 - 10936

С.С.Герштейн, Л.И.Пономарев

КАТАЛИЗ μ^- -МЕЗОНАМИ

РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ И ТРИТИЯ

Направлено в "Physics Letters"



Катализ μ^- -мезонами реакции синтеза ядер дейтерия и трития

В работе обсуждаются физические следствия существования обнаруженных недавно слабосвязанных состояний мезомолекул $dd\mu$ и $dt\mu$ и, в частности, их значение для процессов резонансного образования μ -молекул водорода, а также для катализа реакции синтеза ядер мезомолекул.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

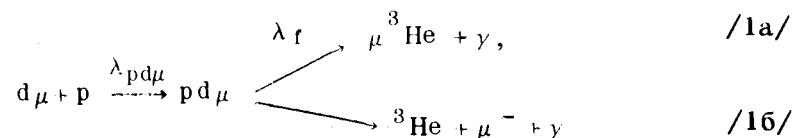
Catalysis of Nuclear Fusion of Deuterium and Tritium by μ^- -Mesons

We discuss the physical consequences of the existence of recently discovered loosely bound states of mesomolecules $dd\mu$ and $dt\mu$ and their role in the resonance formation of hydrogen μ -molecules and in the catalysis of nuclear fusion for mesomolecules.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

1. Реакция синтеза ядер водорода и дейтерия через промежуточную стадию образования μ -мезомолекул в цепочке процессов



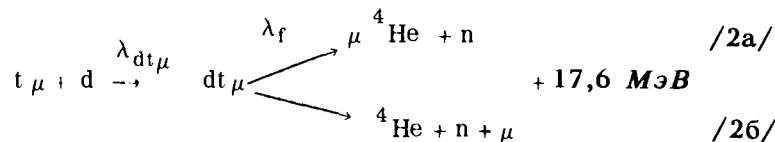
в настоящее время хорошо изучена как экспериментально, так и теоретически. /Полную библиографию по этим вопросам можно найти в обзорах^{1,2/} /.

Этот процесс известен как катализ ядерных реакций синтеза в "холодном" водороде μ^- -мезонами. Для того, чтобы он был эффективен, т.е. чтобы один μ^- -мезон смог многократно вызвать реакцию синтеза, необходимо выполнение по крайней мере трех условий:

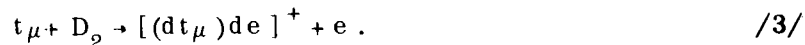
$$\lambda_{pd\mu} \gg \lambda_0, \lambda_f \gg \lambda_0, W_s \ll 1, \quad /2/$$

где $\lambda_0 = 0,455 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ - скорость распада свободного μ^- -мезона, $\lambda_{pd\mu}$ и λ_f - скорость образования $pd\mu$ -молекулы и скорость синтеза ядер в μ -молекуле соответственно, а W_s - вероятность "прилипания" μ^- -мезона к He, равная отношению вероятностей каналов /1a/ и /16/. Для цепочки реакций /1/ ни одно из этих условий не выполнено, поскольку $\lambda_{pd\mu} \approx 6 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_f \approx 0,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, $W_s \approx 1$. Недавние измерения^{3/} подтверждают приведенные значения.

2. Для аналогичной цепочки процессов



имеем $W_s \approx 10^{-2}$, $\lambda_f \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$, однако скорости образования dt_{μ} -молекул, вычисленные до недавнего времени, были аномально малы: $\lambda_{dt\mu} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1/4-6/}$. В этих вычислениях исходили из предположения, что основным механизмом образования dt_{μ} -молекул является электрический дипольный E1-переход /или монополярный E0-переход/ с конверсией на электроны молекулы D_2 :



Расчеты скоростей образования мезомолекул pp_{μ} и pd_{μ} , предпринятые недавно^{6/} в предположении справедливости этого механизма, привели к значениям $\lambda_{pp_{\mu}}$ и $\lambda_{pd_{\mu}}$, которые очень хорошо согласуются с экспериментально измеренными^{3/}.

3. Другой, резонансный механизм образования μ -молекул работает в том случае, если среди уровней μ -молекулы существует хотя бы один с энергией связи $\epsilon_{Jv} < 3 \text{ эВ}$.

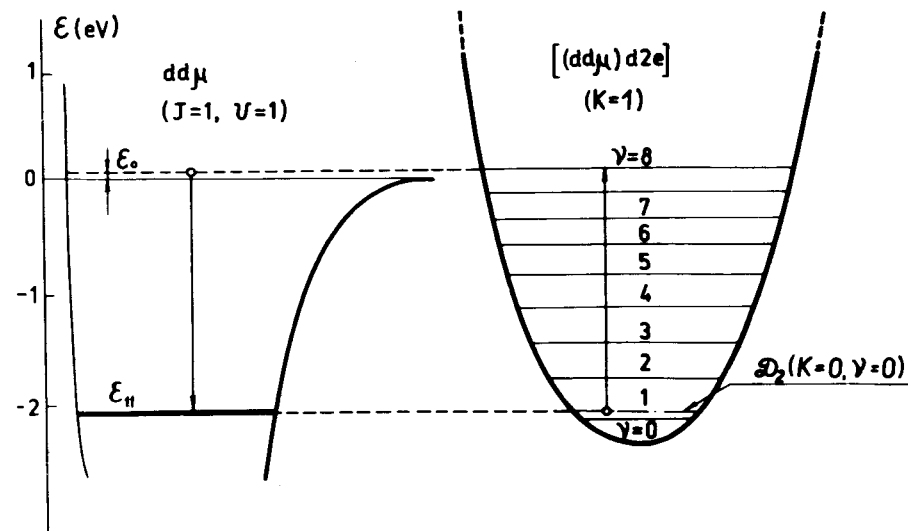
Существование слабосвязанного состояния в мезомолекуле dd_{μ} предполагалось уже давно^{1,5/}, и Весман^{7/} на основе этого предположения показал, что наличие такого уровня должно приводить к резонансной зависимости скорости образования мезомолекул dd_{μ} от температуры среды в реакции



Суть резонансного механизма состоит в том, что в реакции /4/ не происходит излучения электронов, а

энергия, освобождающаяся при образовании dd_{μ} -молекулы, передается на возбуждение колебаний своеобразной молекулы, в которой одним из ядер является образовавшаяся dd_{μ} -молекула $(dd_{\mu})^+$.

Такой резонансный механизм возможен лишь в том случае, если разность энергий ν -го колебательного уровня системы $[(dd_{\mu})d2e]_v^*$ и основного состояния молекулы D_2 в точности равна сумме энергии связи ϵ_{11} мезомолекулы dd_{μ} и кинетической энергии ϵ_0 налетающего мезоатома d_{μ} /см. рисунок/.



4. В последнее время в адиабатическом представлении задачи трех тел разработана эффективная схема вычисления уровней энергии мезомолекул и скоростей различных мезоатомных и мезомолекулярных процессов^{8/}. В этой схеме волновая функция системы трех тел разлагается по полному набору решений задачи двух центров квантовой механики. Проверка этой схемы^{10/} на многих примерах доказала ее надежность и эффективность.

Разработанный метод, в частности, позволил надежно установить существование уровня мезомолекулы dd_{μ} с квантовыми числами $J=1$ /вращательное/ и $\nu=1$

/колебательное/ и найти его энергию связи: $\epsilon_{Jv} = -2,2 \text{ эВ}$. Вычисленная зависимость $\lambda_{dd\mu}(T)$ выражается формулой /7,9/

$$\lambda_{dd\mu} = \beta \frac{8\pi^2}{3} \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^5 \left(\frac{m_\mu}{m_a}\right)^3 |d_{fi}|^2 I_\nu^2(\epsilon_0, \epsilon_T) \frac{m_e^4}{h^3} c^{-1} \quad /5/$$

Здесь: β - статистический множитель, равный $1/3$ для мезомолекулы $dd\mu$; m_e и m_μ - массы электрона и μ^- -мезона соответственно; $m_a^{-1} = m_\mu^{-1}$; M_d^{-1}, d_{fi} - дипольный матричный элемент, вычисленный по волновым функциям начального (i) состояния системы мезоатом $d\mu$ + ядро d и конечного (f) состояния ($J=1, v=1$) мезомолекулы $dd\mu$; I_ν - матричный элемент дипольного взаимодействия, соответствующий переходу из основного состояния молекулы D_2 в ν -е колебательное состояние

системы $[(dd\mu)d_2e]$; $\gamma_0(\epsilon_0, \epsilon_T) = \left(\frac{27}{2\pi}\epsilon_0\right)^{1/2} \epsilon_T^{-3/2} \exp\left(-\frac{3\epsilon_0}{2\epsilon_T}\right)$ -

распределение Максвелла; $\epsilon_T = 3/2 kT$ - средняя кинетическая энергия мезоатомов $d\mu$ при температуре T . Функция /5/ во всех деталях передает характер и особенности температурной зависимости $\lambda_{dd\mu}(T)$, которая недавно была тщательно измерена /11/

Вычисленное по формуле /5/ резонансное значение λ_{res} скорости образования мезомолекул $dd\mu$ при $\epsilon_0 = \epsilon_T$ составляет величину $\lambda_{dd\mu}^{res} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, в то время как обычный механизм /4/ приводит к значению $\lambda_{dd\mu} = 0,15 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

5. До недавнего времени в молекуле $dt\mu$ не был известен уровень с малой энергией связи. Расчеты по схеме /8/ позволили обнаружить такой уровень с квантовыми числами ($J=1, v=1$) и вычислить его энергию связи /9/:

$$\epsilon_{Jv}(dt\mu) = -1,1 \text{ эВ}$$

Наличие этого уровня, так же как и в случае мезомолекулы $dd\mu$, приводит к резонансному образованию мезомолекул $dt\mu$. Подробные расчеты, предпринятые недавно /9/, показывают, что в реакции

$$t\mu + D_2 \rightarrow [(dt\mu)d_2e]_{\nu}^* \quad /6/$$

молекула $[(dt\mu)d_2e]_{\nu}^*$ образуется в колебательном, $\nu=4$, и вращательном, $K=1$, состояниях. Значение λ_{res} , соответствующее этому переходу, в пересчете к плотности жидкого водорода, равно /9/:

$$\lambda_{dt\mu}^{res} = 0,9 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$$

Это значение превышает все известные до сих пор скорости образования мезомолекул по крайней мере на порядок величины. Такая скорость достаточна, чтобы за время жизни один μ^- -мезон успел осуществить $\sim 10^2$ реакций синтеза и освободить $\sim 2 \text{ ГэВ}$ энергии, что в 15 раз превышает его массу покоя и примерно равно энергии, затраченной на его рождение.

6. Реакция /6/ до сих пор не изучена экспериментально. Мы надеемся, что такие эксперименты будут вскоре выполнены, несмотря на очевидные технические трудности, присущие такого рода измерениям.

Совершенно очевидно также, что для уверенного определения основных параметров, определяющих резонансный процесс: энергии связи молекулы $dt\mu$, положения и ширины резонанса в сечении образования $dt\mu$, кинетики процесса катализа с учетом всех остальных μ^- -молекулярных процессов и т.д., - необходимы более тщательные расчеты.

В заключение мы выражаем глубокую благодарность С.И.Виницкому, И.В.Пузынину, Т.П.Пузыниной, Л.Н.Сомову, М.П.Файфману за многолетнее сотрудничество, Д.И.Блохинцеву и В.П.Джелепову за всемерную поддержку.

Литература

1. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. УФН, 1960, 71, с.581.
2. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Mesomolecular Processes Induced by μ^- and π^- -Mesons. In: Muon Physics. Ed. V.Hughes and C.S.Wu. Academic Press, New York, 1975.

3. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1976, 70, с.1167.
4. Зельдович Я.Б. ДАН, 1954, 95, с.493.
5. Беляев В.Б. и др. ЖЭТФ, 1959, 37, с.1652.
6. Пономарев Л.И., Файфман М.П. ЖЭТФ, 1976, 71, с.1689.
7. Весман Э.А. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, с.113.
8. Виноцкий С.И., Пономарев Л.И. ЖЭТФ, 1977, 72, с.1670.
9. Виноцкий С.И. и др. ОИЯИ, Р4-10929, Дубна, 1977.
10. Виноцкий С.И. и др. ОИЯИ, Р4-10336, Дубна, 1976.
11. Быстрицкий В.М. и др. В кн.: Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. Дубна, 7-10 июня, 1977. ОИЯИ, Д1,2-14-10908, Дубна, 1977.

*Рукопись поступила в издательский отдел
25 августа 1977 года.*