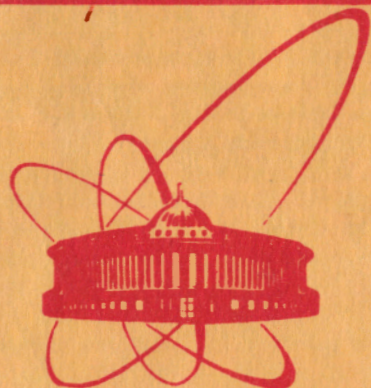


1605/82



**Объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
Дубна**

**P4-81-800**

**Л.И.Пономарев**

**МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
СИНТЕЗА В СМЕСИ ДЕЙТЕРИЯ И ТРИТИЯ**

Направлено на X Европейскую конференцию  
по управляемому термоядерному синтезу  
и физике плазмы /Москва, 14-19 сентября 1981 г./

**1981**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ранняя история изучения явления мюонного катализа подробно изложена в обзорах<sup>/1-2/</sup>. Она началась в 1947 году с гипотезы Франка<sup>/3/</sup>, высказанной им в связи с интерпретацией экспериментов Латтеса, Оккиалини и Пауэлла<sup>/4/</sup>, в которых был идентифицирован распад  $\pi^- \rightarrow \mu^-$ . В 1954 году Я.Б.Зельдович<sup>/5/</sup> рассмотрел различные стадии  $\mu^-$ -катализа и оценил их скорости. Этот начальный период завершился в 1957 году экспериментами Альвареса и др.<sup>/6/</sup>, в которых наблюдали процесс  $\mu^-$ -катализа и смеси  $H_2 + D_2$ .

В период с 1957 по 1963 год были выполнены основные экспериментальные /Л.Ледерман и др., В.П.Джелепов и др., А.Ашмор и др., Дж.Дод и др./ и теоретические /Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн, Дж.Джексон, С.Козн и др./ работы /см. обзоры<sup>/1-2/</sup> /, в которых подробно изучен процесс мюонного катализа, в основном в смеси  $H_2 + D_2$  и чистом дейтерии  $D_2$ . Из этих работ следовал пессимистичный вывод: для производства ядерной энергии мюонный катализ неэффективен<sup>/1,8/</sup>.

Интерес к идее мюонного катализа возродился в 1977 году, когда была предсказана его большая эффективность в смеси дейтерия и трития<sup>/9/</sup>, которая в 1979 году была подтверждена экспериментально В.П.Джелеповым, В.Г.Зиновым и др.<sup>/10/</sup>. Данный обзор посвящен этому последнему периоду изучения явления  $\mu^-$ -катализа, а также изложению сути работ Ю.В.Петрова<sup>/11/</sup>, в которых показано, что  $\mu^-$ -катализ в сочетании с урановым blanketом позволяет, в принципе, получить положительный выход энергии.

Во всем дальнейшем изложении мы не касаемся технических и инженерных аспектов этой проблемы, поскольку они могут стать актуальными лишь после выяснения физической осуществимости самой идеи мюонного катализа. Для этого, прежде всего, надо ответить на три основных вопроса:

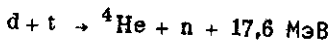
Сколько актов катализа способен осуществить один  $\mu^-$ -мезон?

Какую энергию нужно затратить на получение одного  $\mu^-$ -мезона?

Какую энергию он освобождает /с учетом дальнейшего размножения нейтронов синтеза в урановом blanketе/?

Основная идея  $\mu^-$ -катализа хорошо известна:  $\mu^-$ -мезон с массой  $m_\mu = 206,8m_e$ , образуя с ядрами  $d$  и  $t$  мезомолекулу  $dt\mu^*$ , сближает их до расстояний  $\sim 5 \cdot 10^{-11}$  см и тем самым настолько увеличивает вероятность проникновения ядер через барьер кулоновского отталкивания, что реакция синтеза

\* Согласно установившейся традиции мезомолекулярные ионы  $(dt\mu)^+$ ,  $(dd\mu)^+$  и т.д., то есть системы, состоящие из двух ядер изотопов водорода и  $\mu^-$ -мезона, мы будем в дальнейшем называть мезомолекулами  $dt\mu$ ,  $dd\mu$  и т.д.



/1/

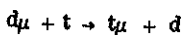
происходит в мезомолекуле за  $\sim 10^{-12}$  с, то есть практически мгновенно по сравнению с временем жизни  $\mu^-$ -мезона:  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с. С вероятностью 0,99  $\mu^-$ -мезон при этом освобождается и может осуществить следующий акт  $\mu$ -катализа. Общее число актов  $\mu$ -катализа, которое может осуществить один  $\mu^-$ -мезон, зависит от всей совокупности мезоатомных и мезомолекулярных процессов, происходящих в смеси дейтерия и трития.

Заметим сразу же, что в отличие от термоядерного синтеза, где реакция /1/ должна происходить при высокой температуре  $\sim 10^8 \text{ К}$  и малой плотности  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  смеси  $D_2 + T_2$ , наиболее благоприятные условия для осуществления  $\mu$ -катализа реализуются при температурах  $10^2 \div 10^3 \text{ К}$  и плотностях  $\sim 4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , то есть при давлениях в смеси  $\sim 10^3$  атм.

## 2. КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ МЮННОГО КАТАЛИЗА

$\mu^-$ -мезоны образуются при распаде  $\pi^-$ -мезонов, которые, в свою очередь, рождаются при столкновении ускоренных протонов /дейтронов, тритонов и т.д./ с ядрами мишени. При энергии исходного пучка  $T_0 \sim 1$  ГэВ/нуклон распадные  $\mu^-$ -мезоны образуются со средней энергией  $\sim 200$  МэВ. Попадая в плотную смесь  $D_2 + T_2$ , они за время  $\sim 10^{-8}$  с тормозятся там до энергий  $\sim 2$  кэВ /12,13/ и затем за  $10^{-11}$  с переходят на К-орбиты мезоатомов  $d\mu$  и  $t\mu$  /14,16,41/.

Общая схема происходящих после этого процессов представлена на рис.1. Мезоатомы  $d\mu$  и  $t\mu$  с начальной энергией  $\sim 0,1$  эВ, сталкиваясь с ядрами молекул  $D_2$  и  $T_2$ , образуют с ними мезомолекулы  $dt\mu$ ,  $dd\mu$  и  $tt\mu$  со скоростями  $\lambda_{dt}$ ,  $\lambda_{dd}$  и  $\lambda_{tt}$  соответственно. Кроме того, поскольку основной уровень  $t\mu$ -атома на 48 эВ глубже, чем уровень  $d\mu$ -атома, то при столкновении  $d\mu$ -атома с ядром трития происходит необратимый процесс изотопного обмена



/2/

со скоростью  $\lambda_{dt}$ .

В образовавшихся мезомолекулах  $dt\mu$ ,  $dd\mu$  и  $tt\mu$  происходят реакции синтеза ядер мезомолекул, представленные на рис.1, со скоростями  $\lambda_f$ ,  $\lambda_{fd}$  и  $\lambda_{ft}$  соответственно.

Общее число циклов  $\mu$ -катализа  $x_c$ , которое один  $\mu^-$ -мезон успевает осуществить за время жизни  $\tau_0 = \lambda_0^{-1} = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с, равно /15/:

$$x_c^{-1} = \omega_s + \frac{\lambda_0 C_d}{\lambda_{dt} C_t} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{d\mu} C_d} + \frac{\omega_d}{2} \frac{\lambda_{d\mu}}{\lambda_{d\mu}} + \omega_t \frac{\lambda_{t\mu} C_t}{\lambda_{d\mu} C_d}, \quad /3/$$

где  $C_d$  и  $C_t$  - относительные концентрации ядер дейтерия и трития ( $C_d + C_t = 1$ ); все скорости соответствуют заданной температуре и плотности смеси  $D_2 + T_2$ ;  $\omega_B$ ,  $\omega_d$  и  $\omega_t$  - вероятности "прилипания"  $\mu^-$ -мезона к ядрам гелия в реакциях синтеза:

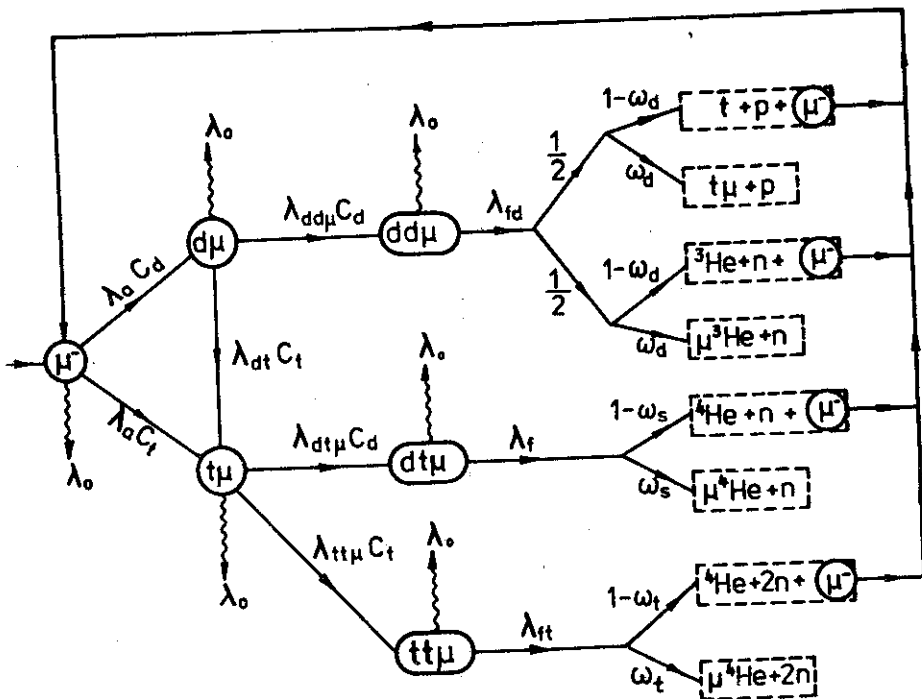
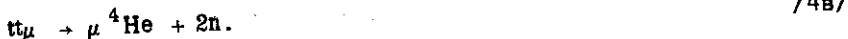
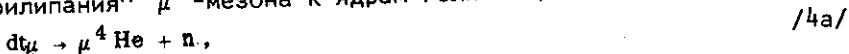


Рис.1. Схема процессов мюонного катализа в смеси дейтерия и трития.

Число циклов  $x_c$  зависит в основном от значений  $\omega_B$ ,  $\lambda_{dt}$  и  $\lambda_{d\mu}$ . Легко видеть, что даже при бесконечно больших скоростях  $\lambda_{dt}$  и  $\lambda_{d\mu}$  величина  $x_c = \omega_B^{-1}$ , то есть ограничена относительной вероятностью  $\omega_B$  процессов /4а/ и  $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$ . Долгое время теоретические оценки скорости образования  $dt\mu$ -молекул приводили к значению  $\lambda_{d\mu} \sim 10^4 \text{ с}^{-1/2}$ , откуда в соответствии с /3/ следовало, что  $x_c < 1$ , то есть вывод о неэффективности процесса  $\mu$ -катализа.

Скорости мезоатомных и мезомолекулярных процессов в смеси  $D_2 + T_2^*$

Таблица 1

Процесс	Теория	Эксперимент	Источник
Атомный захват: $\lambda_a^{\circ}, s^{-1}$ $\mu^- + D_2 \rightarrow d\mu + D + e$	$\sim 10^{11}$	$/3,06 \pm 0,07/ \cdot 10^{11*}$	Коренман /13/ Маркушин /14/ Cohen et al. /41/ Anderhub et al. /16/
Изотопный обмен: $\lambda_{dt}^{\circ}, s^{-1}$ $d\mu + t \rightarrow t\mu + d$	$2 \cdot 10^8$	$/2,9 \pm 0,4/ \cdot 10^8$	Пономарев /17/ Быстрицкий и др. /10/
Образование молекул $dd\mu: \lambda_{d\mu}^{\circ}, s^{-1} **$ $d\mu + D_2 \rightarrow [(dd\mu)^+ d2e]_{\nu}$	$0,8 \cdot 10^6$	$/0,85 \pm 0,11/ \cdot 10^6$	Виницкий и др. /19/ Быстрицкий и др. /18/
Образование молекул $dt\mu: \lambda_{dt\mu}^{\circ}, s^{-1} **$ $t\mu + D_2 \rightarrow [(dt\mu)^+ d2e]_{\nu}$	$\geq 10^8$	$> 10^8$	Виницкий и др. /9/ Быстрицкий и др. /10/
Образование молекул $tt\mu: \lambda_{tt\mu}^{\circ}, s^{-1}$ $t\mu + T_2 \rightarrow [(tt\mu)^+ te]^+ + e$	$3 \cdot 10^6$	-	Пономарев и Файфман /19/
Переворот спина $\lambda_d^{\circ}, s^{-1}$ $d\mu(^{\uparrow}) + d \rightarrow d\mu(^{\downarrow}) + d$	$4,6 \cdot 10^7$	$> 4 \cdot 10^7$ $/4,26 \pm 0,17/ \cdot 10^7$	Пономарев и др. /20/ Быстрицкий и др. /34/ Breunlich et al. /39/

\* Без учета времени каскада в мезоатоме, которое согласно работе /14/ составляет  $1,5 \cdot 10^{-11} c$ .

\*\* Значения  $\lambda_{d\mu}^{\circ}$  и  $\lambda_{dt\mu}^{\circ}$  приведены при резонансной энергии столкновения.

Таблица 1 /продолжение/

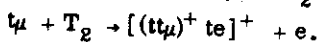
Переворот спина $\lambda_t^o, s^{-1}$ $t\mu(\uparrow\uparrow) + t \rightarrow t\mu(\uparrow\downarrow) + t$	$0,9 \cdot 10^9$	-	Матвеевко и др. /21/
Прилипание: $\omega_d$ $dd\mu \rightarrow \mu^3\text{He} + n$	0,15		Герштейн и др. /22/ Fiorentini and Bracci /23/
		$< 0,13$ $0,14 \pm 0,01$	Джелепов и др. /33/ Балин и др. /40/
Прилипание: $\omega_t$ $tt\mu \rightarrow \mu^4\text{He} + 2n$	-0,1	-	Герштейн и др. /22/
Прилипание: $\omega_s$ $dt\mu \rightarrow \mu^4\text{He} + n$	$0,86 \cdot 10^{-2}$ $0,91 \cdot 10^{-2}$	-	Герштейн и др. /22/ Fiorentini and Bracci /23/
Ядерная реакция: $\lambda_f, s^{-1}$ $dt\mu \rightarrow ^4\text{He} + n + \mu^-$	$1,1 \cdot 10^{12}$	-	Вогданова и др. /24/
Ядерная реакция: $\lambda_{fd}, s^{-1}$ $dd\mu \rightarrow ^3\text{He} + n + \mu^-$	$5 \cdot 10^{10}$	-	Весман /25/
Ядерная реакция: $\lambda_{ft}, s^{-1}$ $tt\mu \rightarrow ^4\text{He} + 2n + \mu^-$	-	-	-
Молекулярная перезарядка $\lambda_m, s^{-1}$ $t\mu + ^3\text{He} \rightarrow t\mu^3\text{He} \rightarrow \mu^3\text{He} + t$	$5,6 \cdot 10^8$	-	Аристов и др. /26/

Ситуация изменилась в 1977 году, когда в мезомолекуле  $dt_{\mu}$  было установлено существование слабосвязанного состояния <sup>/9/</sup> и вычислена обусловленная им большая скорость  $\lambda_{dt_{\mu}} \gg \lambda_0$  резонансного образования  $dt_{\mu}$ -молекул. Это позволило возвратиться к идее  $\mu$ -катализа на новом уровне и рассмотреть возможности его практического использования для производства ядерной энергии.

### 3. СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ $\mu$ -КАТАЛИЗА

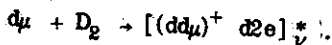
Как правило, скорости мезоатомных и мезомолекулярных процессов пропорциональны плотности смеси:  $\lambda_{dt} = \lambda_{dt}^0 \phi$ ,  $\lambda_{dt_{\mu}} = \lambda_{dt_{\mu}}^0 \cdot \phi$  и т.д., где  $\phi = \rho/\rho_0$ ;  $\rho$  - плотность смеси;  $\rho_0 = 4,25 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  - плотность жидкого водорода, а  $\lambda_{dt}^0$ ,  $\lambda_{dt_{\mu}}^0$  и т.д. - скорости процессов, приведенные к плотности  $\rho_0$ . Их теоретические и экспериментальные значения представлены в табл.1.

Мезомолекулы  $dd_{\mu}$  и  $dt_{\mu}$  могут образовываться в пяти, а мезомолекула  $tt_{\mu}$  - в шести состояниях вращательного (J) и колебательного (v) движений, энергии связи которых заключены в пределах от  $-360$  эВ до  $0,7$  эВ. Мезомолекула  $tt_{\mu}$  образуется преимущественно в состоянии (J=1, v=1) с энергией связи  $-\epsilon_{11} = 45,2$  эВ путем дипольного E1-перехода с конверсией на электроны молекулы  $T_2$  согласно схеме



Мезомолекулярный ион  $(tt_{\mu})^+$  становится при этом тяжелым "ядром" обычного молекулярного иона, а выделившуюся энергию связи  $-\epsilon_{11}$  уносит электрон конверсии. Скорость этого нерезонансного процесса сравнительно невелика:  $\lambda_{tt_{\mu}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}/19$ .

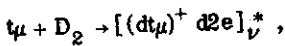
Образование мезомолекул  $dd_{\mu}$  и  $dt_{\mu}$  благодаря существованию у них слабосвязанных состояний (J=1, v=1) с энергиями связи  $-\epsilon_{11}(dd_{\mu}) = 1,91$  эВ и  $-\epsilon_{11}(dt_{\mu}) = 0,64$  эВ <sup>/27/</sup> происходит согласно резонансному механизму, впервые рассмотренному Весманом <sup>/28/</sup> применительно к реакции образования  $dd_{\mu}$ -молекул:



/5a/

В этом процессе отсутствует электрон конверсии, а энергия связи  $-\epsilon_{11}(dd_{\mu})$  передается на возбуждение колебательного состояния v образовавшегося молекулярного комплекса, одним из ядер которого является мезоион  $(dd_{\mu})^+$ . После экспериментов <sup>/18/</sup> и теоретических расчетов <sup>/9,27/</sup> существование такого резонансного механизма можно считать твердо установленным.

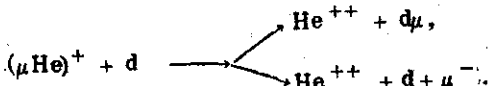
Скорость аналогичной реакции резонансного образования  $dt_{\mu}$ -молекул /см. рис.2/:



/56/

вычисленная в работе /9/  $\lambda_{dt\mu}^0 \geq 10^8 \text{ с}^{-1}$ , оказалась много больше скорости  $\lambda_{dt\mu}^0$  и прежних оценок  $\lambda_{dt\mu}^0 \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$  /1/. Экспериментальная оценка снизу  $\lambda_{dt\mu}^0 > 10^8 \text{ с}^{-1}$ , полученная недавно в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ /10/, находится в согласии с результатами вычислений.

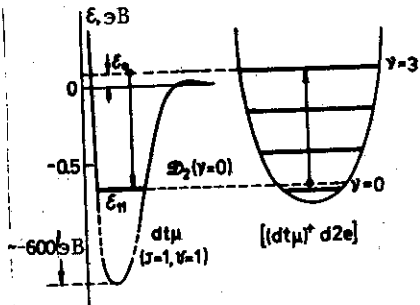
Коэффициенты прилипания мюона  $\omega_s$ ,  $\omega_d$  и  $\omega_t$  /см. рис.1/ вычислены в работах /7,8,22,23/. В табл.1 приведены их значения с учетом "страхивания" мюонов с ядер гелия при столкновениях:



/6/

Согласно вычислениям /22,23/ эти процессы уменьшают исходное значение  $\omega_s$  на 20-25%.

Рис.2. Схема резонансного образования мезомолекул  $dt\mu$ . Условие резонанса:  $\epsilon_0 + |\epsilon_{11}| = |E_{\nu} - E_0|$ , где  $\epsilon_0$  - кинетическая энергия  $\mu$ -атомов;  $|\epsilon_{11}|$  - энергия связи состояния  $(J=1, v=1)$   $dt\mu$ -молекулы;  $E_0$  - энергия основного состояния молекулы  $D_2$ ;  $E_{\nu}$  - энергия колебательного состояния  $\nu$  молекулярного комплекса  $[(d\mu)^+ d2e]_{\nu}$ .



#### 4. ЧИСЛО ЦИКЛОВ $\mu$ -КАТАЛИЗА

Как видно из табл.1, большая часть процессов мюонного катализа до сих пор не изучена экспериментально. Поэтому для числа циклов  $x_c$  сейчас можно дать лишь нижнюю оценку.

Из выражения /3/ следует, что наибольшее число циклов достигается при концентрации трития  $C_t$  в смеси  $D_2 + T_2$ , равной

$$C_t \approx (1 + \gamma)^{-1}, \quad \gamma = (\lambda_{dt} / \lambda_{dt\mu})^{1/2}, \quad /7a/$$

причем

$$x_c^{-1} \approx \omega_s + \frac{\lambda_0}{\lambda_{dt}^0 \phi} \gamma(2 + \gamma + 0,7\phi). \quad /7b/$$

При плотности жидкого водорода ( $\phi = 1$ ) с учетом /7/ и данных табл.1 отсюда следует нижняя оценка:



$$x_c > 50.$$

/8/

Оценка /8/ получена для скорости  $\lambda_{dt\mu}^0 = 10^8 \text{ с}^{-1}$ , которая соответствует энергии связи  $-\epsilon_{11}(dt\mu) = 1,09 \text{ эВ}$ . Последующие вычисления /27/ привели к значению  $-\epsilon_{11}(dt\mu) = 0,64 \text{ эВ}$ , которому соответствуют значительно большие скорости  $\lambda_{dt\mu}$  и соответствующие им величины  $x_c$ : при  $\lambda_{dt\mu}^0 = 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$   $x_c \approx 70$ , при  $\lambda_{dt\mu}^0 = 10^9 \text{ с}^{-1}$   $x_c \approx 100$ .

Значение  $\omega_c = 0,9 \cdot 10^{-2}$ , принятое в настоящее время, вычислено в предположении, что реакция /4/ происходит из основного состояния  $dt\mu$ -мезомолекулы ( $J=v=0$ ). Однако резонансное образование  $dt\mu$ -молекул происходит не в основном, а в пятом возбужденном состоянии ( $J=1, v=1$ ) /см. табл.2/. В процессе каскадных переходов из состояния ( $J=1, v=1$ ) в состояние ( $J=0, v=0$ ) в каждом из промежуточных состояний ( $Jv$ )  $dt\mu$ -молекулы возможна реакция синтеза /4а/, причем во вращательных состояниях  $J=1$  вероятность "прилипания" мюона может оказаться существенно меньше. Эффективно это приведет к некоторому дополнительному уменьшению величины  $\omega_s$ .

Для детального описания процесса  $\mu$ -катализа надо учесть ряд дополнительных эффектов, таких, как релятивистские поправки к уровням энергии мезомолекул /29-32/, молекулярная перезарядка /28/, кинетика замедления мезоатомов и т.д.

Соответствующие вычисления уточненных значений  $\omega_s$  и  $\lambda_{dt\mu}$  в настоящее время проводятся, однако для окончательного определения числа циклов  $x_c$  настоятельно необходимы эксперименты по измерению величин  $\omega_s$  и  $\lambda_{dt\mu}$ , а также "интегральный опыт", то есть непосредственные измерения величин  $x_c$  в широком интервале значений  $\phi$  и  $C_t$ .

Таблица 2

Энергии связи  $-\epsilon_{Jv}$  /эВ/ состояний ( $Jv$ ) мезомолекул \*

(Jv)	/00/	/01/	/10/	/11/	/20/	/30/
$dd\mu$	325,0	35,8	226,6	1,91	86,3	-
$dt\mu$	319,2	34,9	232,4	0,64	102,5	-
$tt\mu$	363,0	83,9	289,2	45,2	172,7	48,7

\* Данные работы /27/. Для мезомолекулы  $dt\mu$  энергия связи отсчитывается от основного состояния мезоатома  $t\mu$ .

## 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС $\mu$ -КАТАЛИЗА

На рис.3 представлена одна из мыслимых схем мюонно-каталистического гибридера /МКГ/ /35/ для производства ядерной энергии.

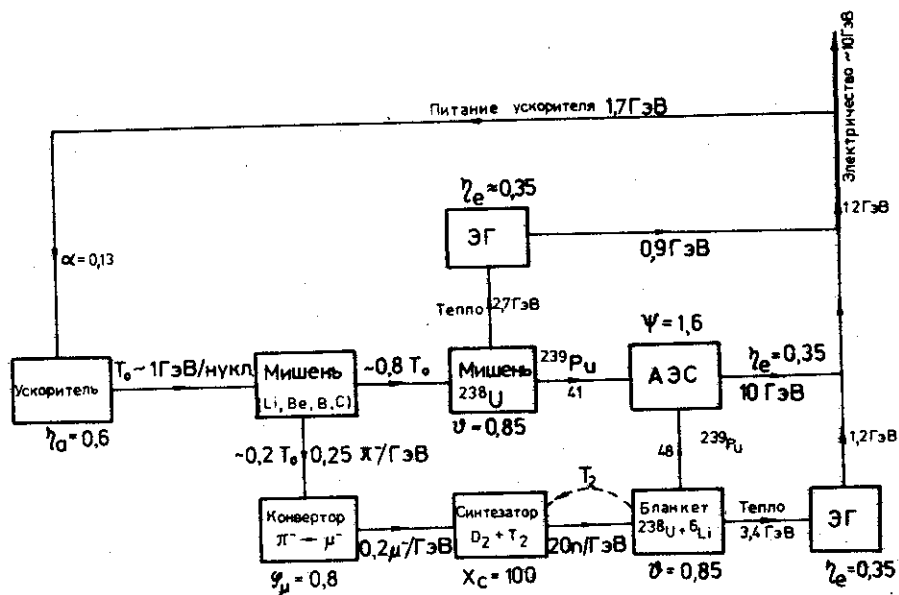


Рис. 3. Схема муонно-каталитического гибридера.

Пучок дейтронов с энергией  $\sim 1$  ГэВ/нуклон направляется на мишень из легких элементов (Be, B, C), в которой рождаются  $\pi^-$ -мезоны в количестве  $0,25 \pi^-/\text{ГэВ}\cdot\text{нуклон}$  и теряется  $\approx 20\%$  энергии исходного пучка  $^{386}/^*$ .

Известно  $^{387}/$ , что при попадании быстрых нуклонов с энергией 1 ГэВ в мишень из  $^{238}\text{U}$  в ней происходит 20 делений ядер  $^{238}\text{U}$  и образуется 60 ядер  $^{239}\text{Pu}$ , причем их выход растет линейно с энергией нуклонов в интервале энергий  $0,5 \div 2$  ГэВ. Поэтому при попадании в мишень из  $^{238}\text{U}$  пучка дейтронов, имеющих на выходе из легкой мишени энергию  $\sim 0,8$  ГэВ/нуклон, в ней происходит  $0,8 \cdot 20 = 16$  делений ядер  $^{238}\text{U}$  и образуется  $0,8 \cdot 60 \cdot 0,85 = 41$  ядро плутония  $^{111}/\theta = 0,85$  - коэффициент использования медленных нейтронов/, которые при последующем сжигании на АЭС обеспечат еще  $41 \cdot 1,6 = 65$  делений  $^{111}/\psi = 1,6$  - коэффициент размножения Pu в АЭС  $^{111}/$ . Таким образом, в рассматриваемой схеме

\*Поскольку  $\pi^-$  рождаются в основном при столкновении нейтронов с нейтронами, то наибольший выход  $\sim 0,5 \pi^-/\text{ГэВ}\cdot\text{нуклон}$  следует ожидать для пучка ускоренных ядер трития при пропускании его через тритиевую мишень  $^{386}/$ . В качестве мишени легкие элементы предпочтительнее, поскольку при этом минимальны ядерное поглощение и радиационные потери  $\pi^-$ -мезонов.

электрорядерный канал в итоге может обеспечить  $16+65=81$  деление, то есть  $81 \cdot 0,2 \approx 16$  ГэВ тепловой или  $16 \cdot 0,35=5,6$  ГэВ электрической энергии / $\eta_e = 0,35$  - к.п.д. тепловых АЭС/.

В мюонно-каталитическом канале  $\pi^-$ -мезоны, родившиеся в легкой мишени, распадаются в конверторе на  $\mu^-$ -мезоны и антинейтрино с вероятностью  $\phi_\mu$ . Принимая достаточно оптимистичное значение  $\phi_\mu=0,8$ , найдем, что в смесь  $D_2 + T_2$  попадает  $0,25 \cdot 0,8 = 0,2 \mu^-/\text{ГэВ} \cdot \text{нуклон}$ , которые после 100 циклов  $\mu$ -катализа ожидают в реакции /1/  $0,2 \cdot 100 \cdot 17,6 \text{ МэВ} = 0,35 \text{ ГэВ}$  энергии и 20 нейтронов на каждый затраченный ГэВ энергии ускорителя.

В толстом blankете из  $^{238}\text{U}$  каждый нейтрон синтеза из реакции /1/ с энергией 14,1 МэВ вызывает 1 деление и генерирует дополнительно 4 тепловых нейтрона /1/, один из которых надо затратить на воспроизводство трития. С учетом коэффициента использования нейтронов найдем, что из 4 образовавшихся нейтронов остается  $4 \cdot 0,85 - 1 = 2,4$  товарных нейтрона, которые образуют 2,4 ядра  $^{239}\text{Pu}$ . Таким образом, на каждый затраченный ГэВ энергии ускорителя в МК-канале происходит 20 делений, к которым следует добавить /с учетом коэффициента размножения  $\psi=1,8$  в АЭС/  $20 \cdot 2,4 \cdot 1,6 = 77$  делений  $^{239}\text{Pu}$ , всего 97 делений, то есть  $97 \cdot 0,2 = 19$  ГэВ тепловой или 6,8 ГэВ электрической энергии.

Суммарное энерговыделение в электрорядерном /ЭЯ/ и МК-каналах составляет 35 ГэВ тепловой или 12 ГэВ электрической энергии на 1 ГэВ энергии пучка, из которых 45% выделяется в ЭЯ-канале и 55% - в МК-канале. Аналог так называемого коэффициента усиления в плазме для МК-канала равен  $Q = 0,35$ , а с учетом ЭЯ-канала для МКГ в целом эффективное значение  $Q = 0,6$ .

Полагая к.п.д. ускорителя равным  $\eta_a = 0,6$ , что представляется достаточно реалистичным /38/, найдем, что, затратив  $1/0,6 = 1,7$  ГэВ на входе МКГ, получим на выходе 12 ГэВ, то есть доля энергии, затраченная на собственные нужды системы, составляют  $\alpha = 0,13$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серьезное изучение явления  $\mu$ -катализа в смеси дейтерия и трития сейчас, по существу, только начинается. До сих пор не измерены даже основные его характеристики: общее число циклов  $\mu$ -катализа  $x_c$  и коэффициент прилипания  $\omega_s$ , а для скорости образования  $\lambda_{d\mu}$ -молекул известна лишь нижняя оценка:  $\lambda_{d\mu}^0 > 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Кроме того, не измерен выход  $\pi^-$ -мезонов из легкой мишени, облучаемой дейтронами /или тритонами/, и неизвестен коэффициент конверсии пионов в мюоны  $\phi_\mu$ , достижимый в реальных устройствах.

Необходимо измерить также ряд других характеристик процесса: скорость  $\lambda_{td}$ ; величины  $\omega_d$  и  $\omega_t$ ; скорости  $\lambda_{td}$  и  $\lambda_{tt}$ ; скорости  $\lambda_m$  молекулярной перезарядки  $t\mu$ -атомов на ядрах  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}/26/$  и т.д.

Тем не менее уже сегодня можно достаточно определенно утверждать, что  $\mu$ -катализ ядерной реакции  $d+t \rightarrow {}^4\text{He}+n$  в сочетании с банкетом из  ${}^{238}\text{U}$  может обеспечить положительный выход энергии. Экономическая эффективность такого способа производства ядерной энергии и его техническая реализация зависят, конечно, от успешного решения многочисленных инженерных проблем.

В любом случае несомненно то, что само явление мюонного катализа заслуживает дальнейшего всестороннего изучения.

Я глубоко признателен Д.И.Блохинцеву, а также И.И.Гуревичу и В.П.Джелепову за внимание и поддержку; я благодарен всем непосредственным участникам работ по проблеме  $\mu$ -катализа, вместе с которыми получена большая часть представляемых теоретических результатов: Л.Н.Богдановой, С.И.Виницкому, С.С.Герштейну, В.Е.Маркушину, В.С.Мележику, Ю.В.Петрову, Н.П.Попову, Л.П.Преснякову, И.В.Пузынину, Т.П.Пузыниной, Л.Н.Сомову, Н.Ф.Трусковой, М.П.Файфману.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. УФН, 1960, 71, с.581.
2. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. In: Muon Physics (eds. V.Hughes and C.S.Wu), Academic Press, N.Y., 1975, vol.III, p.141.
3. Frank F.C. Nature, 1947, 160, p.525.
4. Lattes C.M.G., Occhialini G.P.S., Powell C.F. Nature, 1947, 160, p.453; 1947, 160, p.486.
5. Зельдович Я.Б. ДАН СССР, 1954, 95, с.493.
6. Alvarez L.W. et al. Phys.Rev., 1957, 105, p.1127.
7. Зельдович Я.Б. ЖЭТФ, 1957, 33, с.310.
8. Jackson J.D. Phys.Rev., 1957, 106, p.330.
9. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Phys.Lett., 1977, 72B, p.80; Виницкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1978, 74, с.839; Ponomarev L.I. In: VII Int.Conf. on High Energy Phys. and Nucl.Struct., Burkhäuser Verlag, Basel and Stuttgart, 1977, Zürich, 28 August - 3 Sept., 1977.
10. Быстрицкий В.М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, с.249; ЖЭТФ, 1981, 80, с.1700.
11. Petrov Yu.V. Nature, 1980, 285, p.466; Петров Ю.В. Труды XIV Зимней школы ЛИЯФ, 1979, с.139.
12. Leon M., Bethe H. Phys.Rev., 1962, 127, p.636.
13. Коренман Г.Я. ЯФ, 1980, 32, с.916.

14. Маркушин В.Е. ЖЭТФ, 1981, 80, с.35.
15. Герштейн С.С. и др. ЖЭТФ, 1980, 78, с.2099.
16. Anderhub P.G. et al. SIN Newsletters, 1980, No.8, p.136; Phys.Lett., 1981, 101B, p.151.
17. Ponomarev L.I. In: Proc. VI Int. Conf. on Atomic Phys., 17-22 Aug., 1978, p.182, "Zinante", Riga; Plenum Press, New York.
18. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, с.460.
19. Пономарев Л.И., Файфман М.П. ЖЭТФ, 1976, 71, с.1689.
20. Пономарев Л.И. и др. ЯФ, 1979, 29, с.133.
21. Матвеевко А.В. и др. ЖЭТФ, 1975, 68, с.438.
22. Герштейн С.С. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, с.1690.
23. Bracci L., Fiorentini G. Nucl.Phys., 1981, A364, p.383.
24. Богданова Л.Н. и др. ЖЭТФ, 1981, 81, с.829; JINR, E4-80-819, Dubna, 1980; ЯФ, 1981, 34, с.1191.
25. Vesman E.A. Eesti NSV Teaduste Acd. Fuusika Astron., Inst. Uurimused (ESSR), 1969, 18, p.429.
26. Аристов Ю.А. и др. ОИЯИ, Р4-80-378, Дубна, 1980; Kravtsov A.V. et al. Phys.Lett., 1981, 83A, p.379.
27. Виницкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, с.698.
28. Весман Э.А. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, с.113.
29. Bakalov D. Phys.Lett., 1980, 93B, p.265.
30. Бакалов Д. ЖЭТФ, 1980, 79, с.1149.
31. Melezhik V.S., Ponomarev L.I. Phys.Lett., 1978, 77B, p.217.
32. Бакалов Д. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, с.1629.
33. Джелепов В.П. и др. ЖЭТФ, 1964, 46, с.2042.
34. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1981, 81, с.839.
35. Герштейн С.С. и др. Авт.свид. №713373, м.кл. G21G1/00. Бюлл. ОИПОТЗ, 1981, 10, с.297.
36. Петров Ю.В., Шабельский Ю.М. ЯФ, 1979, 30, с.129; Препринт ЛИЯФ, №699, 1981.
37. Васильков Р.Г. и др. АЭ, 1978, 44, с.329.
38. Sriber S.O. et al. В кн.: X Межд. конф. по ускор. заряж. част. выс.эн. ИФВЭ, Серпухов, 1977.
39. Breunlich W.H. et al. IX Int.Conf. High Energy Physics and Nucl.Struct., Versailles, 6-10 July, 1981.
40. Балин Д.В. и др. Препринт ЛИЯФ, №715, 1981.
41. Cohen J.S., Martin R.L., Wadt W.R. Phys.Rev., 1981, 24A, p.33.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 декабря 1981 года.