

ХРОНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МЮОННОГО КАТАЛИЗА DD- и DT- СИНТЕЗА в ПИЯФ

В начале 1979 года у Президента АН академика А.П. Александрова состоялось совещание, на котором были рассмотрены результаты последних теоретических и экспериментальных работ, изучающих процессы в смесях изотопов водорода под действием отрицательных мюонов. Из этих работ следовало, что при определенных условиях мюон (μ^-), остановившийся в молекулярной смеси дейтерия и трития, может осуществить катализ ~ 100 реакций синтеза ядер дейтерия и трития - «Мю-катализ».

Тем самым открывалась возможность использования мюонного катализа как потенциального источника ядерной энергии и нейтронов.

Учитывая важность практических следствий этого явления, Президиум АН подготовил Постановление о развёртывании работ по этой тематике, назначив исполнителями ОИЯИ (Дубна) и ПИЯФ (Гатчина).

1980-1984 -

С самого начала работ по теме “Мю-катализ“ в ОФВЭ был предложен и развит принципиально новый метод исследований, использующий ионизационную камеру высокого давления, наполненную дейтерием (водородом) в качестве “активной“ мишени для регистрации остановок мюонов и одновременно в качестве детектора заряженных продуктов синтеза. Выбор этого метода опирался на большой опыт применения в ОФВЭ ионизационных детекторов с водородным наполнением, первым из которых была камера «ИКАР», работавшая при давлении водорода 10 атм. Последующие модификации камер работали при существенно большем давлении (~ 100 – 150 атм.) обеспечивая 100% эффективность регистрации всех образующихся в реакциях синтеза заряженных частиц.

Ионизационная камера позволила впервые выделить оба канала dd-синтеза, отношение выходов которых при температуре $T=300$ К оказалось не равным единице, а составило $R=Y(^3\text{He}+n)/Y(^3\text{H}+p) \sim 1.4$. Этот результат связывался с Р-волновым характером низкоэнергетического dd-взаимодействия в мезомолекуле. Использование высокого давления газа в камере приводило к малым пробегам продуктов синтеза и обеспечивало тем самым требуемое быстродействие прибора. Правда, при этом наблюдалась существенная рекомбинация зарядов в треках частиц, сдвигающая их спектры в сторону меньших энергий. **Однако, именно благодаря рекомбинации**, был реализован метод прямого измерения коэффициента прилипания мюонов ω_{dd} к ядрам гелия. В этом методе использовалось различие в рекомбинации ионизационных зарядов от одно и двух-зарядных частиц, какими являются $(^3\text{He}\mu)^+$ и $(^3\text{He})^{++}$. Уже в первых экспериментах,

проведенных в **1981-1984** гг. в Гатчине, удалось измерить основные параметры мюонного катализа в дейтерии при температуре $T = 300$ К: скорость образования $dd\mu$ -молекул: $\lambda_{dd\mu} = (2.76 \pm 0.08) \cdot 10^6$ с⁻¹, отношение выходов двух каналов dd -синтеза: $R = Y(^3\text{He}+n)/Y(^3\text{H}+p) = 1.39 \pm 0.04$, коэффициент прилипания мюонов к ядрам гелия-3: $\omega_{dd} = 0.122 \pm 0.003$.

Как видно, метод ионизационной камеры оказался чрезвычайно эффективным при исследовании $dd\mu$ -катализа по сравнению с методикой регистрации нейтронов синтеза.

1985 - Одним из процессов, приводящих к уменьшению числа актов катализа, является необратимая перезарядка мезоатомов водорода на ядрах гелия – ³He и ⁴He, которые всегда будут накапливаться в dt -смеси в результате реакций $dt\mu$ - и $dd\mu$ -катализа, а также в результате β -распада трития. Скорость перезарядки была определена по изменению наклона временных распределений продуктов dd -синтеза при добавлении в камеру контролируемого количества гелия (~ 2%):

$$\lambda_d^3\text{He} = (1.27 \pm 0.10) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_d^4\text{He} = (3.68 \pm 0.18) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

Оказалось, что проведенный нами эксперимент в 100 раз превосходит старое теоретическое значение и для работы будущего мезокаталитического реактора потребуется регулярная переочистка D/T смеси от гелия. На способ определения скорости образования мезоиона гелия было получено авторское свидетельство.

1983-1986 – Завершено проектирование и начат монтаж установки по исследованию процесса $dt\mu$ -катализа также используя методику ионизационной камеры. Однако в этом случае условия работы камеры были существенно осложнены фоном от распада трития. Чтобы минимизировать его влияние использовалась многоканальная (19 каналов) ионизационная камера, работающая при давлении 90 атм. дейтерий-тритиевой смеси с концентрацией трития ~1%. *Была разработана специальная быстрая электроника для выделения сигналов синтеза из шума.* На мюонном канале ПИЯФ была измерена скорость перехода мюона из основного состояния $d\mu$ -атома на $t\mu$ -атом:

$$\lambda_{dt} = (2.8 \pm 0.2) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1},$$

совпадающая с предсказаниями теории и с результатом, полученным в ОИЯИ методикой счета нейтронов dt -синтеза.

Для того, чтобы измерить скорость образования $dt\mu$ -молекул, понадобилось приготовить тройную газовую смесь, в которой дейтерий был «разбавлен» водородом- H_2 (78%) + D_2 (20%) + T_2 (2%).

В результате анализа данных были впервые определены скорости образования $dt\mu$ -молекул на молекулах D_2 и HD:

$$\lambda_{dt\mu\text{-D}_2} = (2.1 \pm 0.6) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{dt\mu\text{-HD}} = (1.3 \pm 0.3) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \text{ в полном}$$

соответствии с теорией резонансного механизма.

1989-1992-Следующей задачей было **определение коэффициента прилипания мюонов ω_{dt} в $dt\mu$ -катализе**, который согласно теоретическим оценкам не превышал $\sim 0.6\%$. Была организована международная коллаборация в составе: ПИЯФ (Гатчина), PSI (Швейцария), TUM (Мюнхен), Беркли (США), IMEP (Австрия). Вклад со стороны ПИЯФ включал модернизированную камеру с рабочим давлением ~ 160 атм., систему приготовления газовых смесей (использовалась смесь с $C_t = 0.05\%$, $C_d = 9\%$, $C_p = 91\%$) и необходимое количество спектрометрических каналов.

Для уменьшения фона от канала $t + p$ в $dd\mu$ -молекулах использовалось совпадение сигналов с камеры и 19 нейтронных счетчиков, которые были установлены вокруг нее. Относительно низкий выход событий dt -синтеза на мюон ($\sim 2\%$) был скомпенсирован высоким числом остановок мюонов (~ 1000 s^{-1}) в чувствительном объеме (~ 3 см³) камеры. Благодаря этому было накоплено $\sim 10^6$ событий dt -синтеза, из которых были отобраны события с прилипанием мюонов (${}^4\text{He}\mu$) и определен их выход: $\omega_{dt} = (0.56 \pm 0.04)\%$. Полученное значение остается на сегодня единственным прямым измерением величины ω_{dt} , которому соответствует верхний предел выхода нейтронов на мюон $Y_n = 178$.

Еще одним достижением данного эксперимента стало **обнаружение эпитеpmального канала образования $dt\mu$ -молекул.**

Этот канал проявлялся в остром пике в начале временного распределения нейтронов, что связывалось с мощным резонансом в сечении образования $dt\mu$ -молекул от энергии $t\mu$ -атома в области ~ 1 эВ. Другой причиной, влияющей на проявление эпитеpmального механизма, является эффект Рамзауэра, приводящий к уменьшению скорости термализации $t\mu$ -атомов в тройной H/D/T смеси.

1993- Еще одним достижением методики ИК стал эксперимент по измерению скорости захвата мюонов ядрами ${}^3\text{He}$. Его основной целью было однозначное восстановление формфактора псевдоскалярного взаимодействия мюона с ядром. Тем более, что волновая функция систем с $A=3$ исследована достаточно детально: $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_\mu$.

Эксперимент проводился на Швейцарской мезонной фабрике с помощью созданной в ПИЯФ ионизационной камеры, заполненной изотопически сверхчистым гелием-3 при давлении 120 атм. Стратегия эксперимента заключалась в отборе «чистых» остановок, надежно отделенных от поверхности катода и сетки. Эта процедура должна была гарантировать 100% эффективность регистрации тритонов. За 4 недели измерений было накоплено более $\sim 10^6$ остановок мюонов, сопровождавшихся последующими сигналами от тритонов μ -захвата, что дало следующее значение скорости μ -захвата

$$\lambda_c = (1496 \pm 3(\text{стат}) \pm 3(\text{сист})) \cdot s^{-1}.$$

Обращает на себя внимание беспрецедентная точность проведенного анализа, позволившего затем учесть вклад мезонных токов в этом процессе, что дает

$$\lambda_{c(\text{теор})} = (1502 \pm 32) \cdot \text{с}^{-1}.$$

В **1994-1996** гг. был сформулирован проект большой программы прецизионных измерений основных параметров $dd\mu$ -катализа с абсолютной точностью не хуже $\sim 1\%$. Он включал в себя измерение температурной зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул из верхнего $F = 3/2$ и нижнего $F = 1/2$ спиновых состояний $d\mu$ -атомов, что давало возможность определения энергии слабосвязанного уровня ϵ_{11} . Кроме этого планировалось измерение температурной зависимости скорости переворота спина $d\mu$ -атомов, измерение температурной зависимости отношения двух каналов dd -синтеза и измерение коэффициента прилипания мюонов. При этом измерения должны были проводиться как в D_2 , так и в HD газе, а также в неравновесных $H_2 + D_2$ и равновесных $H_2 + 2HD + D_2$ смесях.

Для выполнения намеченной программы в ПИЯФ была создана новая установка, включающая в себя криогенную ионизационную камеру, работающую при давлении до 120 атм. в диапазоне температур 28-350 К, систему стабилизации температуры с абсолютной точностью ± 0.15 К, систему очистки и контроля чистоты газов с чувствительностью $\sim 10^{-8}$ по примесям N_2 и O_2 , специальную установку по приготовлению HD-газа с примесью D_2 не более 1%.

Со стороны PSI было установлено 20 пластиковых нейтронных счетчиков для регистрации нейтронов dd -синтеза и анализа быстрых процессов в первые 200 нс после остановки мюонов (200 нс - это мертвое время камеры). Эксперименты были проведены в **1994-1996** гг. на мюонном пучке PSI (Швейцария). Основные физические результаты по данному проекту состоят в следующем:

1. При совместном фите температурной зависимости резонансной и нерезонансной скоростей образования $dd\mu$ -молекул определена энергия слабосвязанного уровня в $dd\mu$ -молекуле, составляющая $\epsilon_{11(\text{fit})} = -1.9651(7)$ эВ, что впечатляюще совпадает с теоретическим значением $\epsilon_{11(\text{th})} = -1.9646$ эВ на уровне $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$. Такое совпадение с экспериментом указывает на правильность расчета волновых функций и структуры энергетических уровней в системе трех частиц, взаимодействующих по закону Кулона. Кроме того, такое совпадение указывает и на правильность расчета релятивистских поправок в исследуемых системах.
2. Впервые детально исследован процесс $dd\mu$ -катализа на HD молекулах в диапазоне температур 50, 150 и 300 К. Оказалось, что мюонный катализ на HD молекулах имеет нерезонансный характер, о чем можно судить по величине отношения выходов двух каналов dd -синтеза, равной $R \sim 1.0$ (вклад S волны) в отличие от $R = 1.4$ ранее обнаруженное для D_2 молекулы (здесь доминирует P волновой вклад).
3. При анализе временных распределений нейтронов в HD газе был обнаружен быстрый пик, связанный с образованием $dd\mu$ -молекул

эпитермальными $d\mu$ - атомами. Подобная ситуация наблюдалась ранее в тройной H/D/T смеси, где вклад в эпитермальный канал $dt\mu$ - катализа вносили горячие $t\mu$ - атомы.

4. Более чем в 5 раз повышена точность измерения коэффициента прилипания мюонов ω_{dd} на новой установке: $\omega_{dd} = 0.1224(6)$. Эти измерения до сих пор остаются единственными в мире измерениями этого важного параметра.

Характеризуя представленный цикл работ, можно сказать, что в ПИЯФ выполнено фундаментальное исследование основных характеристик мюонного катализа dd - синтеза, результаты которого составляют основу современного описания этого физического явления.