

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНОГО dd - И dt -СИНТЕЗА В ПИЯФ

Г.Г. Семенчук,
д.ф.-м.н.,
заведующий группой (лабораторией)
мюонного катализа в 1980-х – 2000-х гг.

*Смешав дейтерий, водород и тритий,
Стоим на вахте трудовой.
Ждем от катализа открытий,
Когда мюон, увидев тритий
И прихватив с собой дейтрон,
Рождает гелий и нейтрон.
Заставим мы мюон трудиться,
Чтобы не думал он лениться.
Хотим омегой пренебречь ($w_{dt} \approx 0$),
Чтобы энергию извлечь.*

*(Написано в первую ночную смену на пучке
PSI (Швейцария) в апреле 1989 года)*

Введение

В настоящем обзоре представлены основные результаты исследований явления мюонного катализа ядерного dd - и dt -синтеза, начатых в ЛИЯФ в 1980 году по распоряжению Президиума АН. Интерес к этому явлению был связан с обнаружением в ОИЯИ (Дубна) резонансного механизма образования $dd\mu$ -молекул, обязанного наличию у них нового вращательно-колебательного уровня с квантовыми числами $J = v = 1$ и очень малой энергией связи ($\epsilon_{11} = -1,9$ эВ), приводящей к резкому увеличению скорости их образования в диапазоне температур 25–300 К.

Обнаружение подобного уровня у $dt\mu$ -молекул с еще меньшей энергией связи ($\epsilon_{11} = -0,66$ эВ) сделало бы возможным осуществление ~ 100 циклов dt -синтеза за время жизни мюона, что позволяло бы рассматривать мюонный катализ как потенциальный источник нейтронов и ядерной энергии. Интерес к указанным теоретическим предсказаниям резко возрос после экспериментального подтверждения высокой скорости образования $dt\mu$ -молекул группой В.П. Дзержева в 1979 году. С этого момента были начаты эксперименты во многих лабораториях мира, имеющих пучки мюонов. В нашей стране подобные исследования проводились в ОИЯИ (Дубна) и в ПИЯФ (Гатчина).

Мое знакомство с мюонным катализом произошло в июле 1979 года, когда я был вызван в кабинет к заведующему ОФВЭ профессору А.А. Воробьеву, где мне была передана копия статьи С.С. Герштейна и Л.И. Пономарева под названием «Мезонный катализ ядерного синтеза в смеси дейтерия и трития». Было сказано, что я назначен ответственным исполнителем этой темы и должен квалифицированно подтвердить или опровергнуть сделанные теоретические оценки. С этого момента ритм жизни резко изменился, будучи подчиненным выполнению этой важной темы. Буквально в течение месяца был написан и утвержден директором ЛИЯФ технический проект эксперимента «Мю-катализ» и получено разрешение в Медсанчасти № 24 на проведение работ с тритием. Этот момент можно считать стартовой отмашкой для начала работ по данной теме. Я благодарен заместителю директора Института Н.К. Абросимову, который оперативно оформил необходимые документы для обеспечения безопасных условий работы с тритием на синхроциклотроне.

В кратчайшие сроки были проведены обсуждения структуры новых установок и распределены заказы на их изготовление. Обсуждение показало, что к работе надо привлекать специалистов разных специальностей: по криогенике – для очистки водорода от примесей O_2 и N_2 (до уровня 10^{-6}) и для контроля этого уровня, радио-инженеров для разработки чувствительной спектрометрической и логической электроники, программистов для анализа получаемых данных. В результате интенсивного «мозгового штурма» была изготовлена и испытана на пучке в декабре 1980 года первая ионизационная камера, работающая при температуре 300 К и давлении 90 атм дейтерия. Уже в ноябре 1981 года был опубликован первый предварительный физический результат: «Измерение коэффициента прилипания мюонов в процессе мюонного катализа dd -синтеза $\omega_{dd} = 0,14 \pm 0,01$ » [1]. Ниже будет дано описание методик, примененных для анализа различных параметров мюонного катализа. На Рис. 1. представлены участники первых опытов по мюонному катализу, проводившихся в ПИЯФ под руководством А.А. Воробьева.

Следует отметить, что на снимке приведены не все участники проекта «Мю-катализ». Надо упомянуть о разработчиках электроники из ОРЭ, о сотрудниках КБ, превращавших наши эскизы в точные чертежи, сотрудниках ЦЭО, изготавливавших требуемое оборудование часто на пределе имевшейся точности, о сотрудниках группы радиохимии, обеспечивавших высокую чистоту используемых в экспериментах газов. Общим был энтузиазм у всех участников проекта, позволявший надеяться на успешное решение всех возникавших проблем.

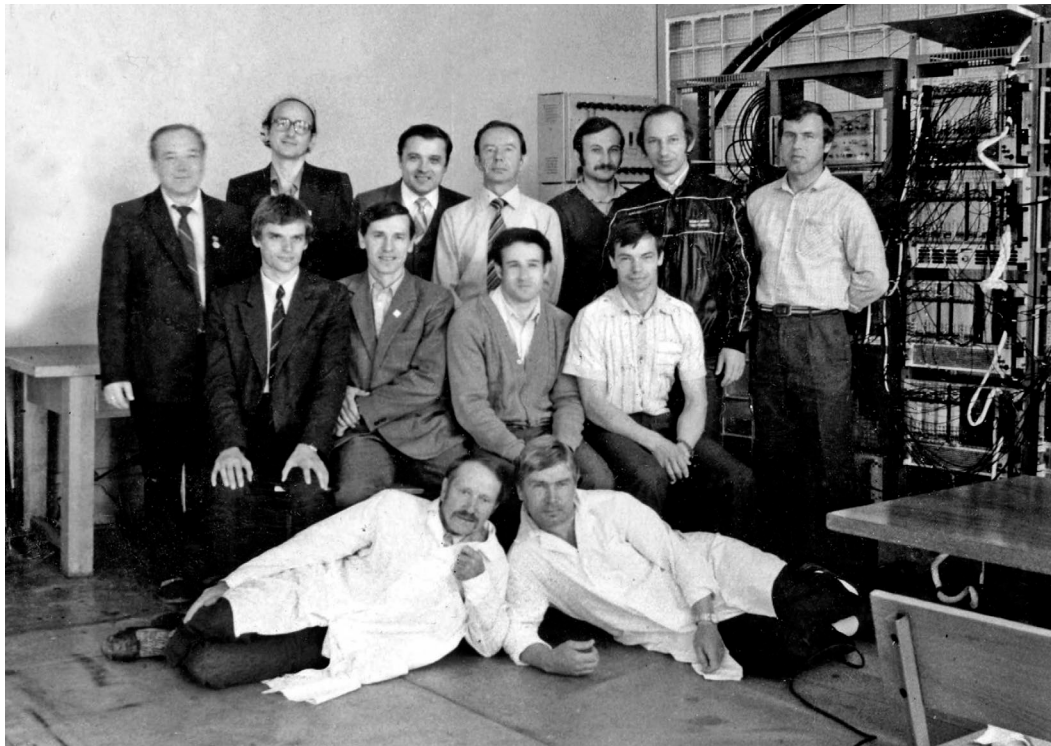


Рис. 1. Стоят, слева направо: Ю.С. Григорьев, Ю.В. Смиренин, С.М. Козлов, В.И. Поромов, А.Д. Еремеев, Г.Е. Петров, А.И. Ильин*. Сидят, слева направо: А.А. Васильев, Г.Г. Семенчук, Е.М. Маев, Л.Б. Петров. На переднем плане: А.А. Андреев и А.Н. Шапарев

Экспериментальный метод ПИЯФ

Как известно, наши коллеги, работавшие в Дубне, использовали методику регистрации нейтронов dd - и dt -синтеза при анализе характеристик мюонного катализа. В ОФВЭ ПИЯФ был развит принципиально новый метод исследований, использующий ионизационную камеру высокого давления, наполненную водородом (дейтерием) в качестве «активной» мишени и одновременно в качестве детектора заряженных продуктов синтеза. Выбор этого метода опирался на большой опыт применения в ОФВЭ ПИЯФ ионизационных детекторов с водородным наполнением, первым из которых была камера «ИКАР», работавшая при давлении водорода 10 атм. Анализ сигналов с камеры позволял выбирать остановки мюонов в центральной части чувствительного объема, обеспечивая стопроцентную эффективность регистрации продуктов синтеза. При создании новой камеры необходимо было удовлетворить нескольким взаимопротиворечивым требованиям. Прежде всего, надо было увеличить давление газа, чтобы обеспечить достаточное число остановок мюонов. Рост давления приводит к уменьшению пробегов продуктов синтеза (до долей мм) и тем самым повышает быстроедействие. Однако с ростом давления уменьшается скорость дрейфа электронов и растет рекомбинация зарядов, созданных продуктами синтеза.

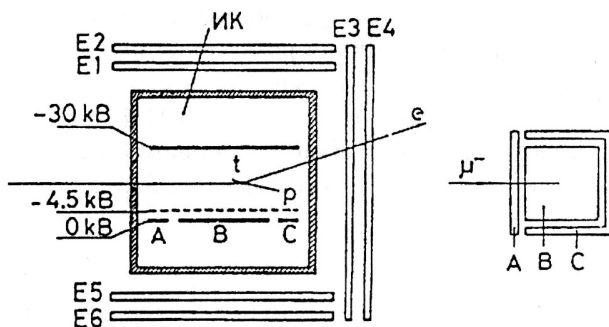


Рис. 2. Схема первой ионизационной камеры (ИК) для исследования $dd\mu$ -синтеза (Гатчина, 1980 г.). Расстояние катод-сетка – 10 мм; расстояние сетка-анод – 1 мм; размер анода В – $35 \times 35 \text{ мм}^2$; давление (D_2) – 90 атм

*) В последующем Андрей Иванович Ильин стал главой Гатчинского муниципального района, председателем Совета депутатов.

Впервые были получены данные о рекомбинации ионизационных зарядов, оставляемых продуктами синтеза в дейтерии при давлении 30–100 атм и напряженности поля 10–40 кВ/см. Оказалось, что для образующихся в $dd\mu$ -катализе частиц ${}^3\text{He}^{++}$ с начальной энергией 0,82 МэВ рекомбинация достигала ~55%, что, тем не менее, обеспечивало их надежную регистрацию при пороге электроники ~130 кэВ. Была измерена скорость дрейфа электронов в водороде и дейтерии в области давлений 15–100 атм. Она определялась по длительности нарастания фронта сигналов от α -источника, находившегося на катоде двухэлектродной ИК.

Измеряя время дрейфа электронов ионизации к аноду, мы можем, зная их скорость, определить координату остановки мюона и затем выделить “чистую” область для анализа событий синтеза. По результатам тестовых измерений была спроектирована первая ионизационная камера для исследования $dd\mu$ -катализа (Рис. 2) [2]. Сборка и испытания камеры на высокое давление проводились Ю.С. Григорьевым, Е.М. Маевым, Г.Г. Семенчуком, Д.В. Балиным и В.С. Дубограем.

Газ для наполнения камеры очищался с помощью цеолитов, работающих при температуре жидкого азота. Подготовку системы очистки на первом этапе экспериментов проводил А.А. Марков. Им же проводился анализ примесей (N_2 и O_2) с помощью хроматографа ЛХМ-8МД. Уровень влажности газа контролировался блоком “Байкал-3”, изотопный состав газа контролировался хроматографом “Цвет-100”.

Из технологических проблем, решение которых потребовало особых усилий, следует отметить изготовление высоковольтных керамических вводов для камер, работающих при высоком давлении. Совместно со специалистами завода «Светлана» была выбрана керамика на основе окиси алюминия и проведены все необходимые операции: формование, отжиг, глазурирование, металлизация и пайка. Пайка проводилась припоем ПСР-70 на слой никель-марганцевой металлизации. Контроль качества изготавливаемых на «Светлане» вводов осуществляли Д.В. Балин, В.С. Дубограй и Ю.В. Смиренин.

Анализ полученной информации показал, что камера эффективно разделяет события с прилипанием мюонов и без прилипания благодаря различию ионизационных потерь у одно- и двухзарядных частиц, какими являются ионы ${}^3\text{He}\mu^+$ и ядра ${}^3\text{He}^{++}$. Поскольку потери энергии частиц при торможении квадратично зависят от заряда ($dE/dx \sim Z^2$), то плотность ионизации у двухзарядных частиц будет существенно выше, чем у однозарядных. Как следствие этого величина электрон-ионной рекомбинации у них будет также выше, а регистрируемая энергия ниже. У однозарядных частиц, наоборот, меньшая плотность ионизации приводит к меньшей рекомбинации, а значит к большей регистрируемой энергии. В результате частицы ${}^3\text{He}\mu^+$ и ${}^3\text{He}^{++}$, имеющие одинаковую начальную энергию, в процессе их регистрации в камере «раздвигаются» в энергетическом спектре, что позволяет с высокой точностью определять число событий с прилипанием. Данный метод является уникальным и не имеет аналогов. В качестве примера на Рис. 3 приведен амплитудный спектр продуктов dd -синтеза, измеренный в одном из наших первых экспериментов [2].

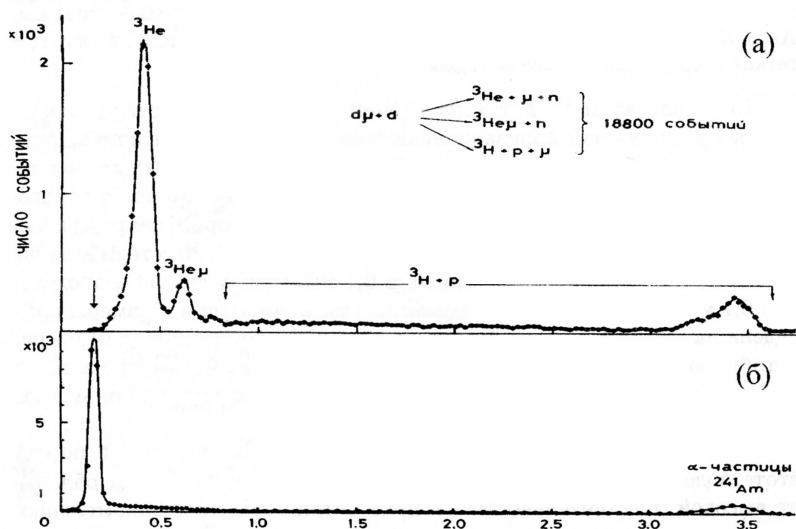


Рис. 3. Энергетическое распределение событий dd -синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Параметры камеры приведены на Рис. 2. Видно разделение пиков $({}^3\text{He})^{++}$ и $({}^3\text{He}\mu)^+$ вследствие эффекта рекомбинации

Высокая эффективность камеры и малое время анализа сигналов, равное ~300 нс, позволяли регистрировать остановившийся мюон и до 3-х последовательных сигналов синтеза на каждом из трех анодов камеры. При этом для каждого сигнала измерялись три величины: заряд (энергия) импульса, время начала импульса и время окончания импульса. Временные интервалы между сигналами

синтезов несли информацию о скорости мезокаталитических реакций, амплитуды и длительности импульсов в камере содержали информацию об энергиях и пробегах продуктов синтеза.

В последующих экспериментах было использовано несколько модификаций ионизационной камеры, отличающихся, в основном, геометрией и числом анодов. Особый интерес представляло прецизионное измерение температурной зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул ($\lambda_{dd\mu}$). С этой целью был разработан вариант камеры с гелиевым охлаждением [3] (Рис. 4), позволяющий работать в диапазоне температур 30–300 К. При этом в любой точке температура могла быть стабилизирована и измерена с точностью $\pm 0,3$ К. В экспериментах, выполненных в PSI (в Швейцарии), ионизационная камера была окружена 19 пластиковыми нейтронными счетчиками, что еще больше расширило возможности метода, улучшив условия регистрации событий синтеза, происходящих непосредственно (в пределах 200 нс) вслед за остановкой мюона в камере.

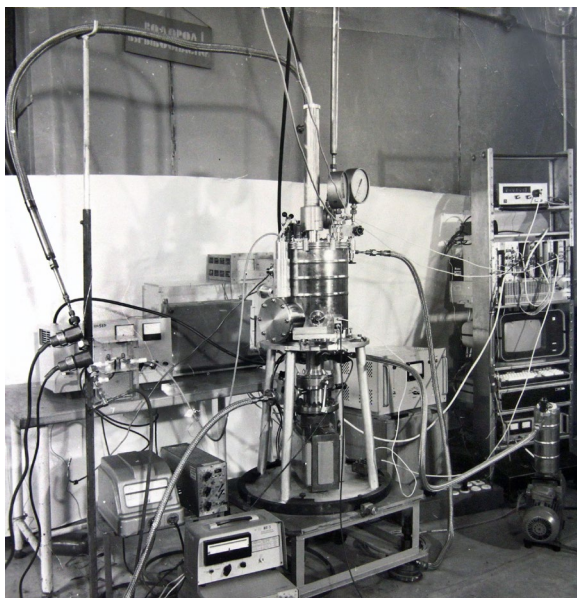


Рис. 4. Первая криогенная установка, созданная в Гатчине для исследования $dd\mu$ -катализа; (1987 г.)

Точное измерение $\lambda_{dd\mu}$ явилось существенным этапом в исследовании мезокатализа: с этого момента стало возможным количественное сравнение теории и эксперимента. В этом отношении особо информативными являются измерения температурной зависимости $\lambda_{dd\mu}(T)$. Такие измерения были выполнены нами в 1987 году [4]. На Рис. 5 наши данные сравниваются с расчетной зависимостью $\lambda_{dd\mu}(T)$, полученной группой Л.И. Пономарева. В расчете использовано большое число матричных элементов, описывающих переходы в мезомолекулярном комплексе. Но в конечном итоге результат расчета чувствительным образом зависит от двух параметров: от энергии наименее связанного уровня ε_{11} и от вероятности λ_f слияния дейтронов в $dd\mu$ -молекуле. На Рис. 5 видно, что расчетная зависимость $\lambda_{dd\mu}(T)$ (сплошная линия) согласуется с экспериментальной кривой при $\varepsilon_{11} = -1,965 \pm 0,001$ эВ, что находится в прекрасном согласии с современным расчетным значением $(\varepsilon_{11})_{расч} = -1,9653$ эВ.

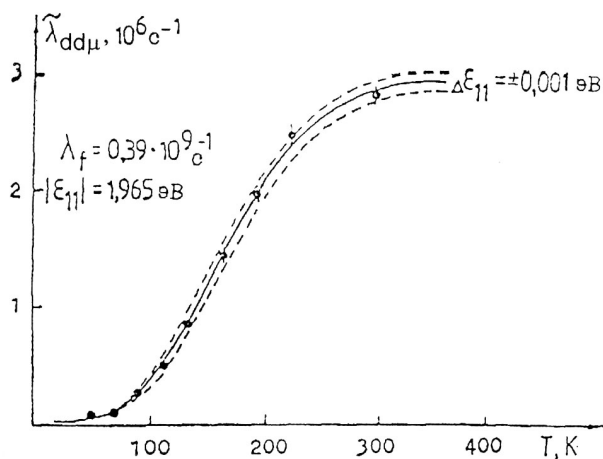


Рис. 5. Резонансная зависимость скорости $dd\mu$ -катализа от температуры. Точки – результат нашего эксперимента (Гатчина, 1987–1990 гг.). Теоретическая кривая соответствует значению энергии уровня $|\varepsilon_{11}| = 1,965$ эВ и скорости dd -синтеза $\lambda_f = 0,39 \times 10^9$ с⁻¹. Указан коридор ошибок $\Delta\varepsilon_{11} = \pm 0,001$ эВ

В момент образования $d\mu$ -атома он может находиться в двух спиновых состояниях, $F = 3/2$ и

$F = 1/2$. С вероятностью $\lambda_{3/2, 1/2}$ состояние $F = 3/2$ переходит в состояние $F = 1/2$, и наступает термодинамическое равновесие. До сих пор мы обсуждали скорость образования $dd\mu$ -молекул в равновесном состоянии. В эксперименте в PSI ионизационная камера работала в совпадении с нейтронными детекторами, что позволяло регистрировать события dd -синтеза, начиная непосредственно с момента остановки мюона, и получать информацию о характере быстрых процессов. Отличие от предыдущих экспериментов с нейтронными детекторами состояло в меньшем уровне фона и в возможности калибровки эффективности нейтронного детектора с точностью $\pm 1\%$ (по сравнению с $\pm 10\%$ в предыдущих экспериментах).

Экспериментальные результаты

$dd\mu$ -катализ (Этап 1980–1987 гг.)

Первым объектом наших исследований стал процесс $dd\mu$ -катализа, идущий согласно теории резонансным образом. Результаты измерений скорости образования $dd\mu$ -молекул оказались неожиданными для нас, поскольку превышали опубликованные ранее данные Дубны более чем в 3 раза. Тщательная проверка при нескольких давлениях (от 50 до 90 атм.) подтвердила полученное нами значение $\lambda_{dd\mu} = (2,76 \pm 0,08) 10^6 \text{ с}^{-1}$. Что касается источника столь больших различий, то причиной этого могло быть неверное определение группой Дубны эффективности нейтронных счетчиков. Позднее наш результат был подтвержден экспериментами в LAMPF и в PSI, а также новыми измерениями ОИЯИ. Поскольку камера позволяла измерять несколько циклов $dd\mu$ -катализа, то это дало нам возможность определить скорость процесса несколькими способами:

- по наклону экспонент последовательных синтезов,
- по отношению выходов первых и вторых синтезов,
- методом «выжившего» мюона, когда регистрируется факт наличия мюона во временном интервале $t > T_0$, что означает его сохранность в течение времени $t \leq T_0$, т.е. реализуется тот факт, что мюон не распался, не перехватился на примеси и не прилип к ядрам ${}^3\text{He}$ в процессе синтеза.

Полученный результат подтвердил резонансный характер процесса $dd\mu$ -катализа из нижнего $F=1/2$ состояния $d\mu$ -атома и имел важные физические последствия. Прежде всего был изменен номер колебательного уровня у молекулярного комплекса $[(dd\mu)d2e]^*$ с $\nu=8$ на $\nu=7$, при котором выполнялось условие резонансного образования молекул. Это в свою очередь указывало на то, что энергия слабосвязанного уровня в $dd\mu$ -молекуле меньше, чем следовало из данных Дубны ($\varepsilon_{11} \approx 2,14$ эВ). Последующие расчеты показали, что ее величина близка к $\varepsilon_{11} = 1,96$ эВ. Отметим, что дальнейшие исследования системы трех тел, какой является $dd\mu$ -молекула, позволили определить значение энергии уровня ε_{11} с точностью $\pm 0,001$ эВ, и проверка этих расчетов была сделана при измерении температурной зависимости скорости $dd\mu$ -катализа как наиболее чувствительного теста резонансного механизма.

Как уже говорилось, измерения в Гатчине зависимости $\lambda_{dd\mu}$ от температуры дали возможность определить величину энергии уровня $\varepsilon_{11} = 1,965$ эВ. При этом достигнутая точность $\sim 10^{-6}$ от энергии связи позволяет исследовать вклад релятивистских поправок в значение ε_{11} , таких, например, как поляризация вакуума (0,0098 эВ). Отметим, что аналогичное измерение энергии уровня ε_{11} , проведенное в PSI (Швейцария) в области температур 28–150 К для верхнего спинового состояния $d\mu$ -атома ($F=3/2$), дало значение $\varepsilon_{11} = 1,966$ эВ. Полученное согласие двух экспериментов действительно впечатляет!

Рассмотрим другие параметры $dd\mu$ -катализа, которые исследовались методикой ионизационной камеры.

Нарушение изотопической симметрии

Анализ энергетического спектра продуктов dd -синтеза показал, что отношение выходов каналов (${}^3\text{He} + n$) и (${}^3\text{H} + p$) не равно единице, а составляет $R = Y({}^3\text{He} + n) / Y({}^3\text{H} + p) = 1,39 \pm 0,04$. Найденное нарушение изотопической симметрии является следствием того, что при резонансном образовании $dd\mu$ -молекул синтез идет из чистого P -волнового состояния ядер дейтерия ($J=1$). С уменьшением температуры вклад резонансного механизма падает и увеличивается доля нерезонансного канала $dd\mu$ -катализа ($J=0$), что приводит к S -волновому взаимодействию ядер. Следствием этого является уменьшение отношения R до значения $R \approx 1,0$ (см. Рис. 6), что и было обнаружено в последующих

экспериментах.

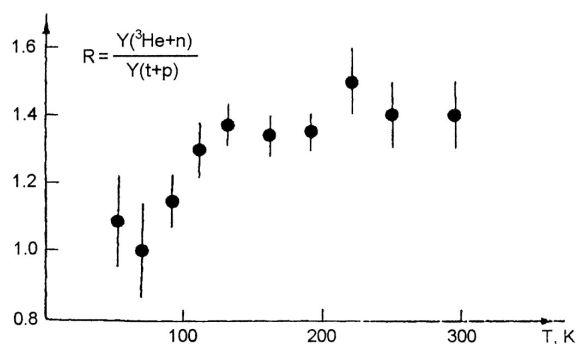


Рис. 6. Температурная зависимость отношения интенсивностей изотопически симметричных каналов dd -синтеза (${}^3\text{He} + n$) и (${}^3\text{H} + p$); (Гатчина. 1987–1990 гг.)

Параметры $dd\mu$ - и $rd\mu$ -катализа в HD-смесях

Особенностью процесса катализа в HD-смесях является нерезонансный механизм образования $dd\mu$ -молекул. Его проявлением является низкая скорость образования $dd\mu$ -молекул и независимость параметра R от температуры: $\lambda_{dd\mu\text{-HD}} = (0,115 \pm 0,004) \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ ($T = 300 \text{ K}$), $R(T) \approx 1,0$ [5]. Эти характеристики позволяют использовать HD-наполнение в тех случаях, когда необходимо подавить фон от продуктов $dd\mu$ синтеза. Например, при поиске событий от d - ${}^3\text{He}$ - μ -синтеза, идущего через образование d - ${}^3\text{He}$ -молекулы по схеме: ${}^3\text{He} + d\mu \rightarrow {}^3\text{He}d\mu \rightarrow {}^4\text{He} + p + \mu + 21 \text{ МэВ}$. До сих пор скорость этой реакции экспериментально не определена, а дан лишь ее верхний предел $\lambda_f(d\text{-}{}^3\text{He}) < 4 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$.

Перехват мюонов на гелий

Исследуя влияние примеси ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ на выход продуктов $dd\mu$ - и $dt\mu$ -катализа, сотрудник теоретического отдела ПИЯФ Н.П. Попов выдвинул гипотезу (в 1981 г.) о новом механизме перехвата мюонов на ядра гелия, реализуемого через образование $d\text{He}\mu$ -молекулы. Согласно его расчетам, скорость перехвата при этом возрастает приблизительно в 100 раз по сравнению с моделью прямого перехвата. Мы провели эксперимент [6], добавив в камеру контролируемое количество изотопов гелия, и первыми подтвердили новый механизм. Следствием изменившейся ситуации является необходимость регулярной переочистки D/T смеси от гелия, накапливаемого в процессе dt -синтеза в будущем мезокаталитическом реакторе.

Вероятность прилипания мюона к гелию

Рисунок 7 иллюстрирует процедуру измерения вероятности прилипания ω_{dd} . Полученное нами значение $\omega_{dd} = 0,122 \pm 0,003$ до сих пор является единственным результатом прямого измерения этой величины и используется для контроля точности теоретических расчетов.

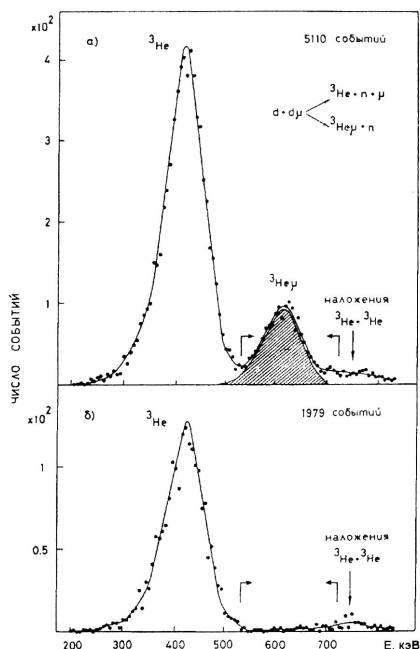


Рис. 7. Прямой способ определения коэффициента прилипания мюонов ω_{dd} : а) спектр всех первых событий dd -синтеза; б) спектр первых событий при условии, что за ними следуют еще события синтеза. События с прилипанием (${}^3\text{He}\mu$) при этом отсутствуют (Гатчина, 1981 г.)

dt-катализ (Этап 1983–1992 гг.)

Исследования параметров *dt*-катализа являются ключевыми для решения вопроса о возможном практическом использовании мюонного катализа в качестве источника ядерной энергии и нейтронов (с энергией 14 МэВ). Необходимым условием этого являются высокие скорости у всех процессов, входящих в кинетику *dt*-катализа, и малая величина коэффициента прилипания мюонов ω_{dt} . В Гатчине для исследования *dt*-катализа была создана специальная многоанодная тритиевая ионизационная камера [7], которая составила основу экспериментального комплекса, включавшего в себя бокс для работы с тритием, систему напуска газов при высоком давлении, системы очистки водорода и дейтерия от примесей до уровня $\sim 10^{-6}$, систему радиационного контроля и аварийной защиты. С тем, чтобы ослабить влияние фона от β -распада трития в D/T смеси, анод камеры был разбит на 19 отдельных анодов диаметром ~ 3 мм, что позволяло собирать полный заряд от α -частиц синтеза за время ~ 200 нс. Благодаря достаточно низкому энергетическому порогу $\sim 0,8$ МэВ и малой доле делящихся на анодах событий, удалось обеспечить высокую эффективность регистрации камеры $\sim 85\%$ и накапливать события, используя первый синтез как триггер наличия мюонов в объеме ИК. В результате была создана установка с уникальными возможностями.



Рис. 8. Е.М. Маев с Г.Г. Семенчуком, В.И. Паничевым и Ю.В. Смирениным рассматривают многоштырьковый анодный ввод для тритиевой камеры

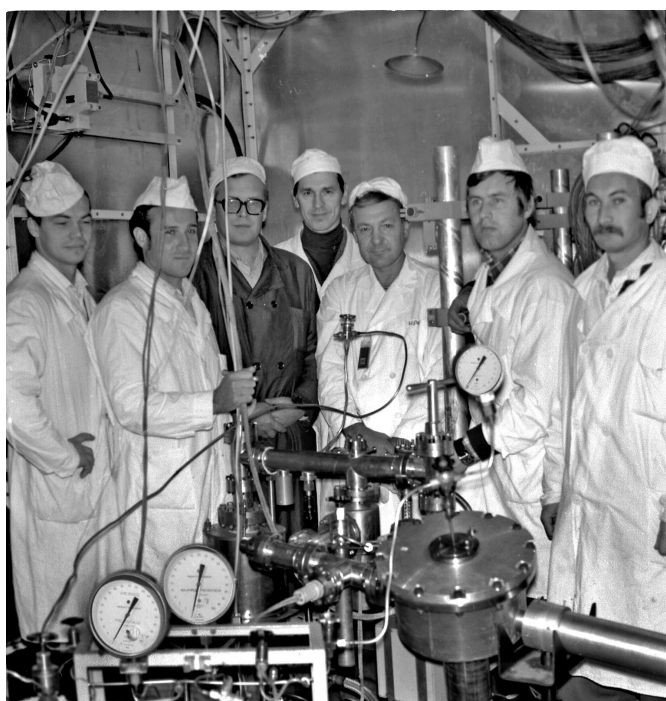


Рис. 9. После удачного эксперимента с наполнением тритиевой камеры. Слева направо: Л.Б. Петров, Е.М. Маев, А.А. Марков, Г.Г. Семенчук, Ю.С. Григорьев, А.И. Ильин, А.Д. Еремеев

Основной задачей наших первых экспериментов со смесью D/T (Гатчина, 1983 г.) было освоение методики работы с ионизационной камерой в условиях тритиевого фона. Следует отметить, что изготовление тритиевой установки было существенно осложнено требованиями радиационной безопасности. Надо выразить глубокую благодарность сотрудникам КБ (Г.А. Ганже и др.) и ЦЭО, потратившим много сил и энергии на ее проектирование и изготовление.

Первоначально камера была наполнена смесью D₂ и T₂ (~1 %) при давлении 90 атм. В этой смеси реакция dt-синтеза шла в следующей последовательности:



Эксперимент проводился при комнатной температуре. Была измерена скорость перехода мюона из основного состояния dμ-атома на tμ-атом [8]: $\lambda_{dt} = (2,8 \pm 0,2) \times 10^8 \text{ с}^{-1}$. Измеренная величина оказалась в согласии с теорией и со значениями, измеренными в Дубне, LAMPF и PSI методикой счета нейтронов.

В следующих экспериментах дейтерий был «разбавлен» водородом: H₂(78 %) + D₂(20 %) + T₂(2 %). Эта смесь с помощью катализатора была переведена в равновесное состояние с тем, чтобы дейтрон находился в основном в составе HD-молекул (D₂ – 5,8 %, HD – 32,8 %). Тройная H/D/T смесь оказалась очень удобной для наших целей. Благодаря присутствию балластного водорода она позволила «растянуть» временное распределение событий таким образом, что стало возможным измерение скоростей образования dtμ-молекул в D₂- и HD-комплексах. Полученные данные [9] подтвердили высокую скорость образования dtμ-молекул:

$$\lambda_{d\mu-D_2} = (2,1 \pm 0,6) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{d\mu-HD} = (1,3 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

В этих условиях на повестку дня встала задача измерения коэффициента прилипания мюонов. Эксперимент был выполнен в PSI (Швейцария) в период с 1988 по 1992 гг. в рамках международной коллаборации: ПИЯФ (Россия), IMEP (Австрия), TUM (Германия), LBL (Беркли, США). Метод измерения был тот же, что и для измерения ω_{dd} – использовался эффект рекомбинации для разделения пиков (⁴He)⁺⁺ и (⁴Heμ)⁺. Однако в данном случае предстояло измерить очень малую величину ω_{dt} , к тому же в присутствии тритиевого фона и фона от канала t + p в ddμ-синтезе. С целью уменьшения последнего была выбрана тройная смесь H/D/T в равновесной фазе: C_t = 0,05 %, C_d = 9 % и C_p = 91 %. Кроме того, для подавления t + p-канала использовалось совпадение сигналов с камеры и с нейтронных счетчиков. Малая концентрация трития (в 20 раз меньше, чем при анализе скоростей образования молекул) позволила добиться хорошего энергетического разрешения, σ = 80 кэВ. Относительно низкий выход событий dt-синтеза на мюон (~2 %) был компенсирован высокой интенсивностью остановок мюонов (~1000 с⁻¹) в чувствительном объеме камеры (3 см³) благодаря уникальным возможностям мюонного канала PSI.

В результате было зарегистрировано более 5 × 10⁶ событий dt-синтеза. При этом удалось выделить события ⁴Heμ с прилипанием мюонов (Рис. 10) и определить вероятность прилипания [10] на уровне $\omega_{dt} = (0,56 \pm 0,04) \%$. Это значение учитывает стряхивание мюонов при торможении ионов (⁴Heμ)⁺ в газе. Полученное значение является результатом первого и пока единственного прямого измерения величины ω_{dt} . Это значение согласуется с результатом последних вычислений. Ему соответствует верхний предел выхода нейтронов на один мюон Y_n = 180.

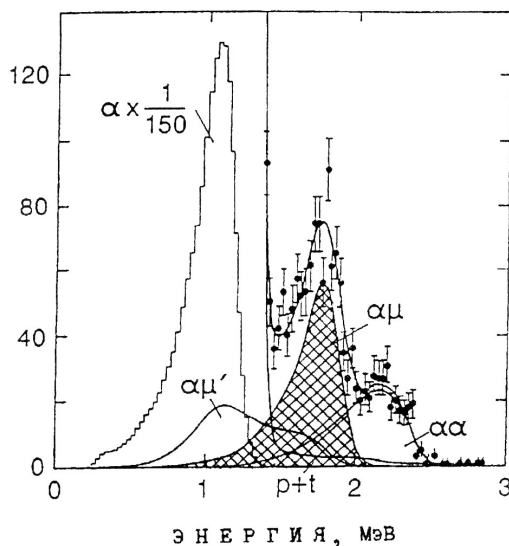


Рис. 10. Энергетический спектр событий dt-синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Заштрихована область событий с прилипанием (αμ). События (αμ)' происходят от стряхивания мюонов при торможении в газе, события (αα) – результат наложения последующих синтезов; (PSI–ПИЯФ, 1988–1992 гг.)

Еще одним важным результатом эксперимента явилось обнаружение эпитермального канала образования $dt\mu$ -молекул, обусловленного взаимодействием «горячих» $t\mu$ -атомов с HD-молекулами. В эксперименте этот факт проявляется в остром пике в начале временного распределения нейтронов из dt -синтеза (Рис. 11). Анализ этих распределений показал, что скорость эпитермального образования $dt\mu$ -молекул исключительно высока [11]:

$$\lambda_{dt\mu-HD}^{\text{эпитерм}} = (2,5 \pm 0,6) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Этот результат соответствует теоретическим расчетам, предсказывающим наличие мощного резонанса в зависимости $\lambda_{dt\mu-HD}$ от энергии $t\mu$ -атомов в области энергий ~ 1 эВ. Другим фактором, способствующим проявлению эпитермального образования $dt\mu$ -молекул, является эффект Рамзауэра в $t\mu$ -H-столкновениях, приводящий к замедлению процесса термализации $t\mu$ -атомов в тройной H/D/T-смеси. Заметим, что в D/T-смеси этот эффект отсутствует.

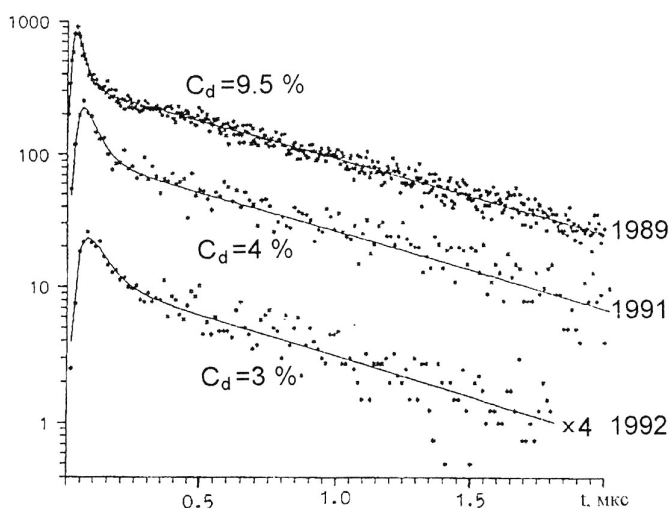


Рис. 11. Временное распределение нейтронов dt -синтеза в тройной смеси H/D/T. Виден «быстрый» пик за счет образования $dt\mu$ -молекул; (PSI-ПИЯФ, 1989–1992 гг.)

Данное наблюдение открывает новые возможности для практического применения $dt\mu$ -синтеза, например, в проекте создания интенсивного нейтронного источника.

Заключение

Приведенные в данной статье результаты исследований мезокатализа реакций ядерного синтеза составляют в настоящее время основную базу мировых данных по физике мезокатализа и используются для проверки теории. Они иллюстрируют эффективность разработанного в ПИЯФ экспериментального метода, а также важность объединения усилий и возможностей различных лабораторий мира.

Смотри также "[Хронология исследования процесса мюонного катализа \$dd\$ - и \$dt\$ - синтеза в ПИЯФ](#)".

Следующий коллектив авторов – сотрудников ПИЯФ – участвовал на различных этапах создания экспериментальных установок и проведения исследования процесса мюонного катализа ядерного dd - и dt -синтеза:

Д.В. Балин, В.Н. Батулин, А.А. Васильев, А.А. Воробьев, Ан.А. Воробьев, Н.И. Воропаев, В.А. Ганжа, Б.Л. Горшков, Ю.С. Григорьев, В.С. Дубоград, Ю.К. Залите, А.И. Ильин, С.М. Козлов, Л.Г. Кудин, Е.М. Маев, А.А. Марков, В.И. Медведев, В.В. Нелюбин, Е.М. Орицин, Г.Е. Петров, Л.Б. Петров, В.И. Поромов, Г.Г. Семенчук, Ю.В. Смиренин, Г.Л. Соколов, М.А. Сорока, В.В. Сулимов, Н.А. Тимофеев, В.А. Трофимов, Ю.А. Честнов, Г.Н. Шапкин.

Список цитированной литературы

- [1] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 715. Л., 1981. 17 с.
- [2] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 964. Л., 1984. 54 с.
- [3] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 1630. Гатчина, 1990. 24 с.

- [4] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **5/6**, 163 (1990).
- [5] *MCF Collaboration*. // “New project for investigation of unsolved problems of $dd\mu$ and $pd\mu$ catalysis in D_2 and H/D mixtures”, Proc. Symp. “Muon Catalyzed Fusion-95”. Dubna, 1995.
- [6] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Письма в ЖЭТФ **42**, 236 (1985).
- [7] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **5/6**, 481 (1990).
- [8] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **2**, 163 (1988).
- [9] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **1**, 127 (1987).
- [10] *MCF Collaboration*. Hyperfine Interactions **82**, 273 (1993).
- [11] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Proc. Int. Workshop LEMS-93. Santa-Fe, USA, 1993.