ИССЛЕДОВАНИЕ МЮОННОГО КАТАЛИЗА *dd*- И *dt*-СИНТЕЗА

А.А.Воробьев, Е.М.Маев, Г.Г.Семенчук

Введение

Впервые на возможность образования мезомолекул типа $dd\mu$ и $pd\mu$ с последующим слиянием находящихся в этих молекулах ядер указали А.Д.Сахаров (1946 г.) и Ф.Франк (1947 г.). Освободившийся после слияния ядер мюон может образовать новую молекулу, играя, таким образом, роль катализатора ядерного синтеза. Впоследствии Я.Б.Зельдович развил теорию этого процесса в естественном, как тогда казалось, варианте нерезонансного образования мезомолекул. Л.Альварец был первым, кому удалось в 1956 году экспериментально наблюдать реакцию мезокатализа ядерного синтеза по каналу

$$d\mu + p \longrightarrow dp\mu \longrightarrow \ {}^{3}\mathrm{He} + \mu + 5.4\ \text{МэВ}.$$

Это открытие вызвало огромный интерес в мире. Обсуждалась возможность получения нового источника энергии. Вскоре, однако, выяснилось, что скорости образования молекул $pd\mu$ и $dd\mu$ столь малы, что ни о каком практическом применении этого процесса не могло быть и речи. Столь же малой ожидалась и скорость образования $dt\mu$ молекул, наиболее перспективного процесса с точки зрения получения энергии. Более того, Д.Джексоном (1957 г.) и С.С.Герштейном (1960 г.) было указано на наличие принципиального предела в числе возможных циклов, катализированных одним мюоном. Этот предел связан с возможным прилипанием мюона к образующимся в процессе синтеза ядрам гелия. По оценкам авторов, вероятность такого процесса должна быть около 1%, что соответствовало предельному числу синтезов на уровне 100. Однако и этот предел представлялся недостижимым, поскольку наблюдаемая низкая скорость реакций соответствовала примерно одному циклу синтеза за время жизни мюона. В результате интерес к мезокатализу постепенно угасал.

Между тем, в Дубне группой В.П.Джелепова в 1964 г. было обнаружено интересное явление. Измеренная при $T = 300$ K скорость $\lambda_{dd\mu}$ оказалась на порядок выше известной ранее скорости $\lambda_{dd\mu}$ в жидком дейтерии, что находилось в противоречии с ожидаемой независимостью $\lambda_{dd\mu}$ от температуры. Возможное объяснение было дано Э.А.Весманом (1967 г.), предположившим, что существует слабосвязанный уровень в $dd\mu$-молекуле и за счет резонансной передачи освободившейся энергии мезомолекулярному комплексу $[(dd\mu, d)2e]$ увеличивается скорость образования этой молекулы. Теория резонансного образования мезомолекул была развита затем в работах группы Л.И.Пономарева. Точными расчетами было не только подтверждено наличие слабосвязанного уровня в $dd\mu$-молекуле ($\varepsilon_{11} = -1.9$ эВ), но и предсказан аналогичный уровень в $dt\mu$-молекуле ($\varepsilon_{11} = -0.6$ эВ), что должно было привести к исключительно высокой скорости образования $dt\mu$-молекулы. В 1979 году это предсказание было экспериментально подтверждено группой В.П.Джелепова в Дубне, показавшей, что $\lambda_{dt\mu} > 10^{8}$ с$^{-1}$. С этого момента интерес к мезокатализу резко возрос. Эксперименты были развернуты в США (LAMPF), Швейцарии (PSI), Гатчине (ПИЯФ), Канаде (TRIUMF), Японии (KEK). В то же время теоретики продолжали работать над уточнением теории мезокатализа. Были также начаты расчеты возможных схем использования мезокатализа в качестве интенсивного источника 14-МэВ нейтронов и даже в качестве источника энергии. В результате этих усилий сегодня достигнут высокий уровень понимания процесса мезокатализа ядерного синтеза.

Важным вкладом в общий прогресс явились эксперименты, выполненные группой ПИЯФ на синхроциклотроне ПИЯФ и позднее на швейцарской мезонной фабрике (PSI). Успех этих экспериментов связан с разработкой нового метода, позволившего регистрировать заряженные продукты синтеза. В данной статье дано краткое изложение полученных группой ПИЯФ результатов.

Экспериментальный метод

До наших экспериментов основным методом исследования мезокатализа ядерного синтеза был метод регистрации образующихся в реакциях синтеза нейтронов. Этот метод оказался весьма эффективным, но вместе с тем он имеет ряд ограничений: не регистрируются каналы реакций синтеза, в которых в конечном состоянии не образуются нейтроны; не выделяются каналы реакций с прилипанием мюона к гелию; имеются сложности в измерениях абсолютной скорости реакций.

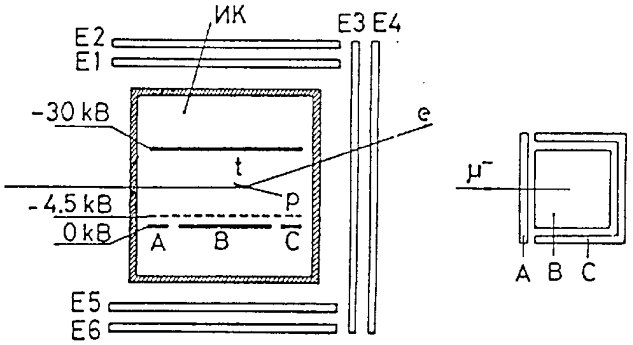

Рис.1. Схема первой ионизационной камеры для исследования d–μ–d-синтеза (Гатчина, 1980 г.). Расстояние катод-сетка – 10 мм, расстояние сетка-анод – 1 мм, размер анода B – 35×35 мм^2, давление (D_2) – 90 атм.

Основой разработанного нами метода [1] является использование наполненной водородом (дейтерием) ионизационной камеры в качестве "чувствительной мишени" (рис.1). Камера позволяет регистрировать входящие мюоны и заряженные продукты ядерного синтеза, катализированного этими мюонами. Анализ сигналов от входящих мюонов позволяет отобрать мюоны, остановившиеся в центральной части чувствительного объема камеры, исключив таким образом влияние стенок на эффективность регистрации продуктов синтеза. В результате обеспечивается стопроцентная эффективность регистрации образующихся в реакциях синтеза заряженных частиц.

Особенностью данного метода является использование высокого (до 200 атм.) давления водорода в камере. Первоначально не было ясно, можно ли при таком давлении вообще наблюдать сигналы вследствие возможной потери электронов ионизации в результате рекомбинации с ионами в треке. К счастью, однако, оказалось, что, хотя рекомбинация и растет с увеличением давления, но этот рост достаточно медленный и, кроме того, рекомбинация оказалась мало зависящей от ориентации трека относительно электрического поля. В результате рекомбинация лишь смещает наблюдаемые пики в сторону меньших энергий без ухудшения энергетического разрешения. Так что можно вполне успешно проводить измерения в присутствии эффекта рекомбинации. Более того, этот эффект оказался даже полезным. Он дает возможность непосредственно измерить вероятность прилипания мюона к гелию, "раздвигая" пики, относящиеся к $(He)^{++}$ и $(He\,\mu)^+$ (без рекомбинации эти пики сливаются).

В качестве примера на рис.2 приведен амплитудный спектр продуктов dd-синтеза, измеренный в одном из наших первых экспериментов [2].

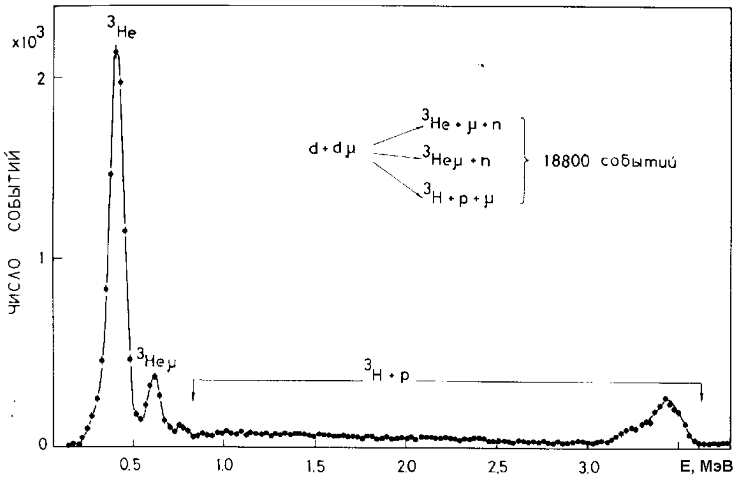

Рис.2. Амплитудное распределение событий dd-синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Параметры камеры приведены на рис.1. Видно разделение пиков $(^3\mathrm{He})^{++}$ и $(^3\mathrm{He}\mu)^{+}$ вследствие эффекта рекомбинации. Пик ^{3}H должен быть при амплитуде 0.9 МэВ. Суммарная амплитуда сигналов $^3\mathrm{H}+p$ распределена от 0.9 МэВ до 3.6 МэВ, поскольку пробег протонов не всегда укладывается в чувствительном объеме камеры. Уровень шума $\sigma = 30$ кэВ, порог регистрации – 130 кэВ, эффективность регистрации – 99%. Вклад фоновых событий – 0.1%.

Высокая эффективность регистрации позволяет регистрировать два и более событий синтеза, катализированных одним мюоном. С этим связан широко используемый нами метод "выжившего мюона", когда отбираются события, о которых известно, что мюон после синтеза не исчез. Этот метод оказался наиболее точным при абсолютном измерении скорости реакции (точность $1 - 3\%$), а также при измерении коэффициента прилипания мюона.

В последующих экспериментах было использовано несколько модификаций ионизационной камеры, отличающихся, в основном, геометрией и числом анодов. Особый интерес представляло прецизионное измерение температурной зависимости d–μ–d-синтеза. С этой целью был разработан вариант камеры с гелиевым охлаждением [3], позволяющий работать в диапазоне температур (30 – 300) K, при этом в любой точке температура могла быть застабилизирована и измерена с точностью ± 0.3 K. В экспериментах, выполненных в PSI, ионизационная камера была окружена годоскопом нейтронных счетчиков, что еще более расширило возможности метода, улучшив , в частности, условия регистрации событий синтеза, происходящих непосредственно (в пределах 200 нс) вслед за остановкой мюона в камере.

Метод ионизационной камеры оказался вне конкуренции при исследовании d-μ–d-синтеза. В случае же исследования d–μ–t-синтеза осложнения возникают из-за ионизации газа электронами от β-распада вводимого в камеру трития. Для ослабления тритиевого фона анод камеры был разбит на 19 отдельных анодов, каждый диаметром 3 мм. Пробег альфа-частицы из dt-синтеза при давлении 100 атм. составляет 1 мм, поэтому ионизационный заряд, образованный альфа-частицей, в большинстве случаев полностью собирается на одном из анодов. Такая конструкция камеры позволила исследовать d–μ–t-синтез в D/T смесях с содержанием трития до 3%.

Исследование d–μ–d-синтеза

Изучение d–μ–d-синтеза в среде, состоящей из D_2-молекул, дает уникальную возможность количественного сравнения с теорией мезокатализа. Именно в этом процессе наиболее ярко проявляется резонансный механизм образования мезомолекулы, к тому же не усложненный побочными процессами, такими, например, как неполная термализация $d\mu$-атомов.

В d–μ–d-синтезе могут реализоваться следующие каналы реакции:

$$d\mu + d \to dd\mu \longrightarrow \ {}^3\text{He} \ + n + \ \mu; \ \ {}^3\text{He}\,\mu \ + n; \ \ {}^3\text{H} \ + p \ + \mu \qquad (1a,\ 1b,\ 1c)$$

Эта совокупность реакций описывается тремя основными параметрами: скоростью образования $dd\mu$-молекулы $\lambda_{dd\mu}$, вероятностью прилипания мюона к гелию $\omega_{dd} = Y(1b)/(Y(1a) + Y(1b))$, отношением выходов изотопически симметричных каналов $R = (Y(1a) + Y(1b))/Y(1c)$. Уже в наших первых экспериментах (Гатчина, 1980–1983 гг.) удалось измерить все три параметра [4]:

$$\lambda_{dd\mu} = (2.76\pm0.08)\cdot10^6 \text{ с}^{-1}, \quad R = Y({}^3\text{He} + n)/Y({}^3\text{H} + p) = 1.39\pm0.04, \quad \omega_{dd} = (0.122\pm0.003).$$

Здесь величина $\lambda_{dd\mu}$ приведена к плотности дейтронов в жидком водороде. Измерения были выполнены при давлении дейтерия $P = 90$ атм и температуре $T = 300$ K. До этого измерялась лишь одна величина – $\lambda_{dd\mu}$. В следующем цикле измерений (Гатчина, 1987 г.) наша группа исследовала температурную зависимость d–μ–d-синтеза в диапазоне (50 – 300) K. Наконец, недавно был завершен совместный эксперимент в PSI, в котором было выполнено наиболее детальное и прецизионное исследование процесса d–μ–d-синтеза в диапазоне температур (28 – 350) K. Данные этого эксперимента обработаны еще не полностью.

Скорость образования $dd\mu$-молекулы

На рис.3 показана ситуация в измерении величины $\lambda_{dd\mu}$ к моменту опубликования наших первых результатов в 1983 году. Полной неожиданностью было резкое, в 4 раза, отличие

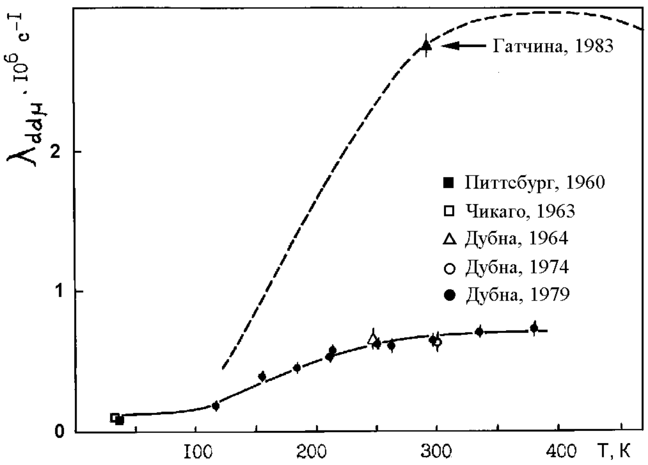

Рис.3. Результаты измерения скорости образования $dd\mu$-молекул в дейтерии, ситуация 1983 года. Все данные приведены к плотности дейтронов в жидком водороде. Измерения "Дубна-1979" – относительные, нормированы на данные "Дубна-1964" и "Дубна-1974". Пунктир – результат нормировки данных "Дубна-1979" на результат наших измерений.

полученного нами значения $\lambda_{dd\mu}$ от данных, полученных в Дубне. Такое отличие заставило нас повторить измерения в различных условиях. В частности, мы показали, что приведенная к плотности жидкого водорода величина $\lambda_{dd\mu}$ не зависит от давления в интервале от 51 до 93 атм. Таким образом, наблюдаемое различие нельзя было объяснить несколько меньшим давлением в экспериментах в Дубне. Видимо, там была неверно определена эффективность нейтронных детекторов. Позднее наш результат был подтвержден экспериментами в LAMPF, в PSI, а также новыми измерениями в Дубне.

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 $\lambda_{dd\mu}(T)$ с точной фиксацией температуры (± 0.3 K). Такие измерения были выполнены нами в 1987 году [5]. На рис.4 наши данные сравниваются с расчетной зависимостью $\lambda_{dd\mu}(T)$, полученной группой Л.И.Пономарева. В расчете использовано огромное 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 слияния дейтронов в $dd\mu$-молекуле λ_f. Из рис.4 видно, что расчетная зависимость $\lambda_{dd\mu}(T)$ согласуется с экспериментальной при $\varepsilon_{11} = (-1.965 \pm 0.001)$ эВ, что находится в прекрасном согласии с современным расчетным значением $(\varepsilon_{11})_{расч} = -1.9653$ эВ.

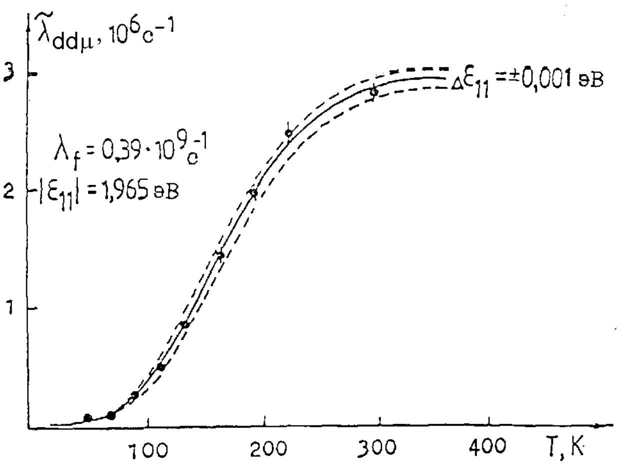

Рис.4. Резонансная зависимость скорости $dd\mu$-катализа от температуры. Точки – результат нашего эксперимента (Гатчина, 1987–1990 гг.). Кривая соответствует значению уровня $|\epsilon_{11}| = 1.965$ эВ и скорости dd-синтеза $\lambda_f = 0.39 \cdot 10^9$ с$^{-1}$. Указан коридор ошибок $\Delta\epsilon_{11} = \pm 0.001$ эВ.

В момент образования $d\mu$-атома он может находиться в двух спиновых состояниях, $F = 3/2$ и $F = 1/2$. Скорости образования $dd\mu$-молекул из этих состояний, $\lambda_{3/2}$ и $\lambda_{1/2}$, различны. 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 нейтронным детектором, что дало возможность регистрировать события dd-синтеза, начиная непосредственно с момента остановки мюона. Отличие от предыдущих экспериментов с нейтронными детекторами состояло в меньшем уровне фона и возможности калибровки эффективности нейтронного детектора с точностью $\pm 1\%$ (по сравнению с $\pm 10\%$ в предыдущих экспериментах). В результате получены прецизионные данные о $\lambda_{3/2}(T)$, $\lambda_{1/2}(T)$ и $\lambda_{3/2,1/2}(T)$, представленные на рис.5а и 5б.

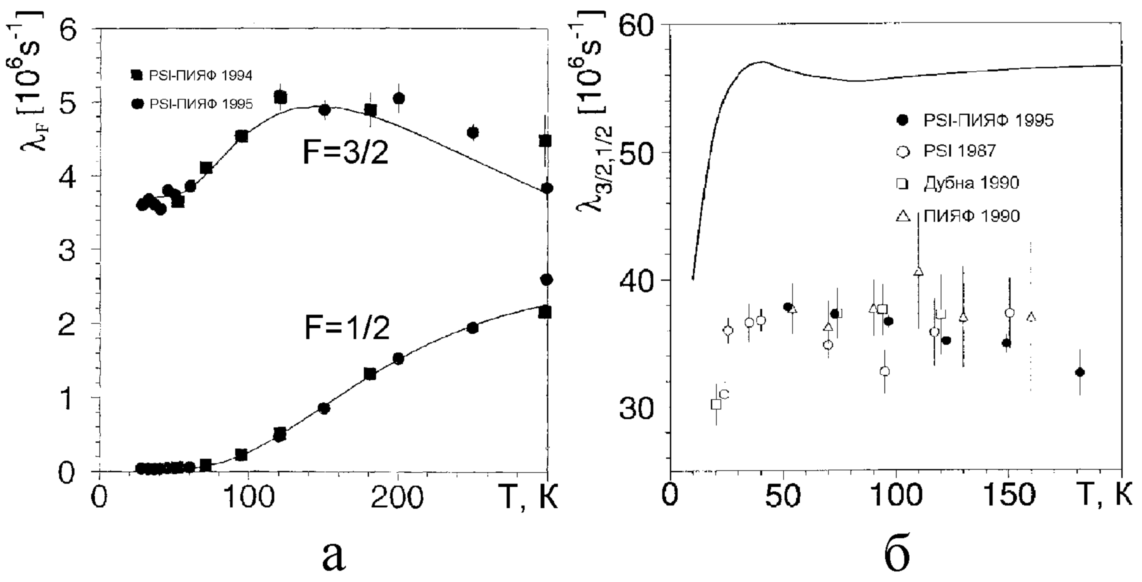

Рис.5. Температурные зависимости: а) скорости образования $dd\mu$-молекулы в дейтерии из двух спиновых состояний $d\mu$-атома; б) скорости переворота спина в $d\mu$-атоме. Сплошные линии – результаты теоретических расчетов.

Детальный теоретический анализ еще предстоит сделать после завершения обработки наших данных. Здесь мы только отметим серьезное расхождение между расчетными и экспериментальными данными по вероятности перехода $\lambda_{3/2,1/2}$.

Вероятность прилипания мюона к гелию

Рис.6 иллюстрирует процедуру измерения вероятности прилипания ω_{dd}. Полученное нами значение $\omega_{dd} = 0.122 \pm 0.003$ до сих пор остается единственным результатом прямого измерения этой величины и используется для контроля точности теоретических расчетов.

Существовавшее до опубликования нашего результата расчетное значение вероятности прилипания было несколько выше: $\omega_{dd}^{расч} = 0.147$. Это расхождение мотивировало группу Л.И.Пономарева выполнить новые расчеты. Попытка учесть возбужденные состояния атома $^3\mathrm{He}\mu$ только усилила расхождение: $\omega_{dd}^{расч} = 0.165$. После этого расчет был повторен с использованием более точных волновых функций $dd\mu$-молекулы. Полученный результат $\omega_{dd}^{расч} = 0.122$ оказался в точном согласии с экспериментом. Аналогичная ревизия метода расчета коэффициента прилипания мюона в d–μ–t-синтезе дала $\omega_{dt}^{расч} = 0.0059$ (вместо существовавшего до этого значения $\omega_{dt}^{расч} = 0.009$). Новое значение $\omega_{dt}^{расч}$ соответствует предельному числу синтезов на один мюон, равному 170.

Нарушение изотопической симметрии в d–μ–d-синтезе

Обнаруженное нами различие в выходах изотопически симметричных каналов:

$$R = Y(^3\mathrm{He}\ + n)/Y(^3\mathrm{H}\ + p) = 1.39 \pm 0.03$$

пока не имеет общепринятого теоретического объяснения. Интересно, что этот результат коррелирует с выводами фазового анализа dd-рассеяния в области энергий от 30 до

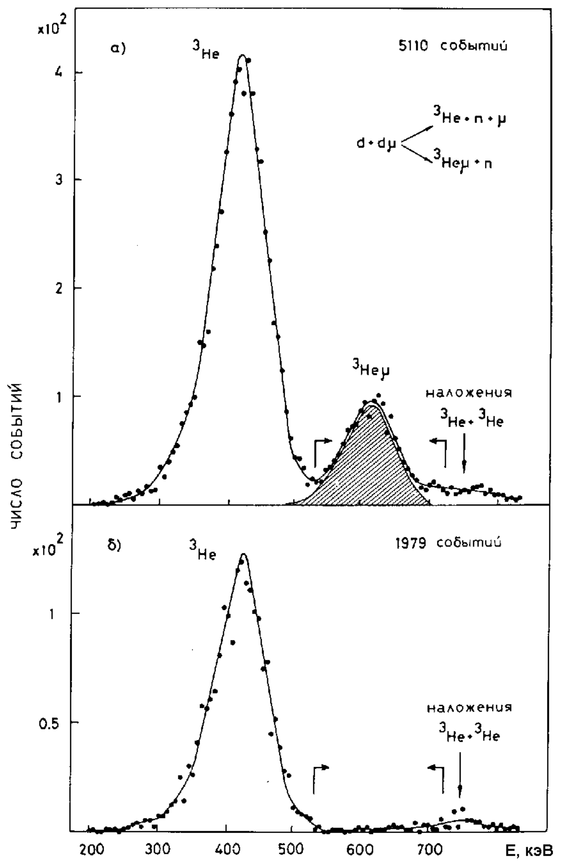

Рис.6. Прямой способ определения коэффициента прилипания мюонов ω_{dd}.
а) Спектр всех первых событий dd-синтеза.
б) Спектр первых событий при условии, что за ними следуют еще события синтеза. События с прилипанием (^{3}Heμ) при этом отсутствуют (Гатчина, 1981 г.).

400 кэВ. Там аналогичная асимметрия наблюдалась в P-волне, в то время как в S-волне величина $R \sim 1$. В случае наблюдаемого нами при $T = 300$ K резонансного образования $dd\mu$-молекулы, dd-синтез идет как раз в чистом P-состоянии. Напротив, при нерезонансном образовании $dd\mu$-молекулы dd-синтез должен идти из S-состояния. Поэтому можно было ожидать, что с уменьшением температуры, по мере перехода от резонансного к нерезонансному механизму образования $dd\mu$-молекулы, отношение R будет стремиться к единице. Именно такую картину мы увидели в нашем эксперименте (рис.7). Данное наблюдение

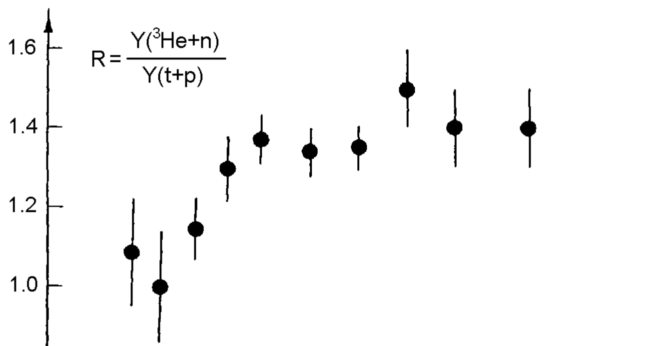

Рис.7. Температурная зависимость отношения интенсивностей изотопически симметричных каналов dd-синтеза (Гатчина, 1987–1990 гг.).

нашло практическое применение: по величине R можно определить относительные вклады резонансного и нерезонансного каналов.

Измерение параметров d–μ–d- и p–μ–d-синтеза в HD-смесях

Это направление исследований предполагает детальное изучение процесса $d-\mu-d$-синтеза в среде из HD-молекул [6]. В данном случае доминирующим является нерезонансный механизм образования $dd\mu$-молекулы, что открывает возможность исследования этого механизма. Особый интерес представляет измерение скорости переворота спина $\lambda_{3/2,1/2}$ в отсутствие процесса резонансного образования $dd\mu$-молекул и выявление роли "обратного распада" $dd\mu$-молекулы. Постановка эксперимента потребовала решения двух технических проблем. Во-первых, нужно было приготовить смесь с минимальным содержанием D_2. Во-вторых, нужно было создать условия в ионизационной камере, замедляющие переход смеси в равновесное состояние. Первая задача была успешно решена нашими химиками, разработавшими метод получения HD с содержанием $\mathrm{D_2}$ на уровне менее 2%. Решение второй задачи было достигнуто исключением из конструктивных материалов никеля, катализирующего процесс установления равновесия в смеси H/D. Первые измерения со смесью HD + $\mathrm{D_2}$(2%) были выполнены в PSI в начале 1996 года при $T = 300$ K, 150 K и 50 K. Предварительный результат при 300 K:

$$\lambda_{dd\mu-HD} \;=\; (0.115 \pm 0.004)\cdot 10^6 \text{ c}^{-1}\,(T = 300 \text{ K}),\ \lambda_{3/2,1/2} \;=\; (28 \pm 5)\cdot 10^6 \text{ c}^{-1}\,(T = 50 \text{ K}).$$

Полученное значение $\lambda_{3/2,1/2}$ значительно ниже измеренного в среде $\mathrm{D_2}$-молекул, что указывает на существенный вклад "обратного распада" $dd\mu$-молекул в этой среде.

Исключительно низкое значение $\lambda_{dd\mu-HD}$ позволяет использовать HD-наполнение в тех случаях, когда необходимо подавить фон от d–μ–d-синтеза. В частности, это открывает возможность исследования p–μ–d-синтеза на качественно новом уровне, путем измерения абсолютных выходов двух каналов реакции:

$$d\mu \;+\; p \longrightarrow pd\mu \longrightarrow {}^3\,\mathrm{He} \;+\; \mu \tag{2a}$$

$$\longrightarrow {}^3\,\mathrm{He}\,\mu \;+\; \gamma \longrightarrow {}^3\,\mathrm{H} \;+\; \tilde{\nu_\mu} \;+\; \gamma \tag{2b}$$

Измеренный амплитудный спектр показан на рис.8. Анализ данных позволит определить

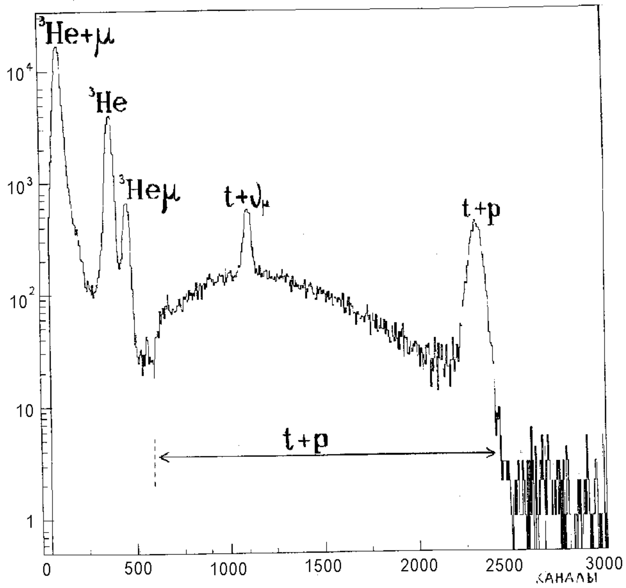

Рис.8. Амплитудное распределение продуктов p–μ–d- и d–μ–d-синтеза в ионизационной камере с HD-наполнением (PSI–ПИЯФ, 1996 г.). Канал с конверсией мюонов ^{3}He + μ впервые зарегистрирован в ионизационной камере. События $t+\nu_\mu$ – продукты μ-захвата по каналу ^{3}He$\mu+\gamma$. События ^{3}He (^{3}He μ) и $t+p$ – продукты dd-синтеза.

зависимость $\lambda_{pd\mu}$ от температуры, от состава H/D смеси, а также измерить скорость ядерного синтеза в $pd\mu$-молекулах для различных спиновых состояний $\lambda_f^{3/2}$ и $\lambda_f^{1/2}$.

Другим примером использования HD-наполнения является поиск d–μ–^{3}He-синтеза, идущего через образование d^3He-молекулы:

$$^3\mathrm{He} \ + \ d\mu \longrightarrow ^3\mathrm{He}\, d\mu \longrightarrow ^4\mathrm{He} \ + \ p \ + \ \mu \ + \ 21 \text{ МэВ}. \tag{3}$$

В наших первых измерениях в Гатчине был установлен верхний предел [7]:

$$\lambda_f(d^3\mathrm{He}) \leq 4 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}.$$

В сеансе 1996 года в PSI получены данные, позволяющие понизить этот предел на два порядка. Данные обрабатываются.

Перехват мюонов на гелий

Нами впервые была измерена скорость перехвата мюона из основного состояния $d\mu$-атомов на ядра ^{3}He и ^{4}He. Метод измерения состоял в наблюдении изменения выхода d–μ–d-синтеза при добавлении к D_2 контролируемого количества (2 – 5%) гелия. Были получены следующие результаты [8]:

$$\lambda_{d^3He} = (1.27 \pm 0.10) \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}, \qquad\qquad \lambda_{d^4He} = (3.68 \pm 0.18) \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}.$$

Эти результаты подтвердили сформулированную в 1981 г. Н.П.Поповым гипотезу о существовании нового механизма перехвата мюонов на ядра гелия через образование $d\mathrm{He}\mu$-молекулы. В этом случае скорость перехвата возрастает приблизительно в 100 раз по сравнению с прямым перехватом. Практическим следствием данного наблюдения является необходимость регулярной переочистки D/T-смеси от накапливаемого в процессе dt-синтеза гелия в будущем мезокаталитическом реакторе.

Исследование d–μ–t-синтеза

Исследование d–μ–t-синтеза представляет особый интерес, поскольку эта реакция рассматривается как потенциальный источник нейтронов и энергии. Основной задачей наших первых экспериментов со смесью D/T (Гатчина, 1987 г.) было освоение методики работы с ионизационной камерой в условиях тритиевого фона. Была разработана специальная многоанодная камера и создано технологическое оборудование для работы с тритием. Камера была наполнена смесью D_2 и T_2($\sim$ 1%) при давлении 90 атм. В этой смеси реакция dt-синтеза идет в следующей последовательности:

$$d\mu \longrightarrow t\mu \longrightarrow dt\mu \longrightarrow ^4\mathrm{He} \ + n \ + \mu, \qquad \longrightarrow ^4\mathrm{He}\,\mu \ + \ n. \tag{4a, 4b}$$

Эксперимент проводился при комнатной температуре. Была измерена скорость перехода мюона из основного состояния $d\mu$-атома на $t\mu$-атом [9]: $\lambda_{dt} = (2.8 \pm 0.2) \cdot 10^8$ c^{-1}. Измеренная величина оказалась в согласии с теорией и с результатами предыдущих измерений.

После образования $t\mu$-атома процесс образования $dt\mu$-молекулы в данной D/T смеси происходит настолько быстро, что величину $\lambda_{dt\mu}$ было трудно измерить. Поэтому в следующих экспериментах дейтерий был "разбавлен" водородом: H_2(78%)+D_2(20%)+T_2(2%).

Эта смесь была переведена в равновесное состояние с тем, чтобы дейтрон находился, в основном, в составе HD-молекул (D_2 – 5.8%, HD – 32.8%). Тройная H/D/T смесь оказалась очень удобной для наших целей. Не уменьшая числа мюонных остановок и выхода d–μ–t-синтеза, она позволила изменить временное распределение событий таким образом, что стало возможным измерение скоростей образования $dt\mu$-молекул в D_2 и HD комплексах. В результате было получено [9]:

$$\lambda_{dt\mu-D_2} = (2.1 \pm 0.6) \cdot 10^8 \ \text{с}^{-1}, \qquad \lambda_{dt\mu-HD} = (1.3 \pm 0.3) \cdot 10^8 \ \text{с}^{-1}.$$

Кроме того, в тройной смеси, особенно в равновесной фазе, резко снижается уровень фона от $d - \mu - d$-синтеза, что было важно при решении нашей основной задачи – прямого измерения вероятности ω_{dt} прилипания мюона к ^{4}He.

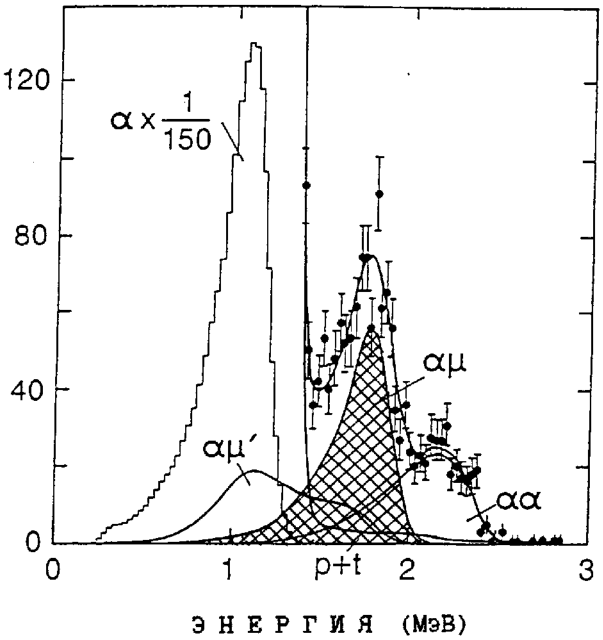

Рис.9. Амплитудный спектр событий dt-синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Заштрихована область событий с прилипанием $\alpha\mu$. События $(\alpha\mu)'$ происходят от стряхивания мюонов при торможении в газе, события $(\alpha\alpha)$ – результат наложения последующих синтезов (PSI–ПИЯФ, 1988–1992 гг.).

Эксперимент по измерению ω_{dt} был выполнен в PSI в период с 1988 г. по 1992 г.[10]. В принципе, метод измерения был тот же, что и для измерения ω_{dd} – использование эффекта рекомбинации для разделения пиков $(^4\text{He})^{++}$ и $(^4\text{He}\mu)^+$. 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 d–μ–d-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 позволила добиться хорошего энергетического разрешения, $\sigma = 80$ кэВ. Относительно низкий выход событий dt-синтеза на мюон ($\sim 2\%$) был компенсирован высокой интенсивностью остановок мюонов (~ 1000 с$^{-1}$) в чувствительном объеме камеры (3 см^3) благодаря уникальным возможностям мюонного канала PSI. В результате было зарегистрировано более $5 \cdot 10^6$ событий dt-синтеза. При этом удалось выделить события $^4\text{He}\mu$ с прилипанием мюонов (рис.9) и определить вероятность прилипания [11]: $\omega_{dt} = (0.56 \pm 0.04)\%$. Это значение учитывает стряхивание мюонов при торможении $(^4\text{He}\mu)^+$ в газе. Полученное значение является результатом первого и пока единственного прямого измерения величины ω_{dt}. Это значение неплохо согласуется с результатом последних вычислений. Ему соответствует верхний предел выхода нейтронов на один мюон $Y_n = 180$.

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 наличии пика в начале временно́го распределения нейтронов из dt-синтеза (рис.10). Анализ этих распределений

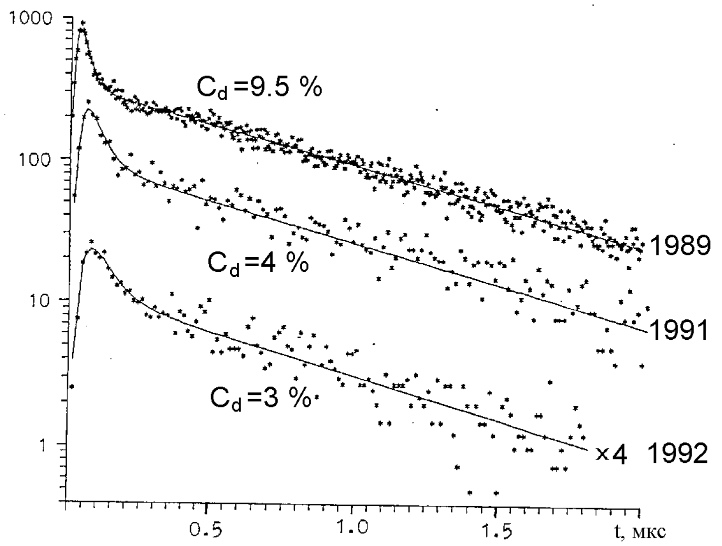

Рис.10. Временно́е распределение нейтронов dt-синтеза в тройной смеси H/D/T. Виден быстрый пик за счет образования $dt\mu$-молекул (PSI–ПИЯФ, 1989–1992 гг.).

показал, что скорость эпитермального образования dt-молекул исключительно высока [12]:

$$\lambda_{dt\mu-HD}^{эпитерм} = (2.5 \pm 0.6) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Этот результат соответствует теоретическим расчетам, предсказывающим наличие мощного резонанса в зависимости λ_{dtm-HD} от энергии $t\mu$-атомов в области энергий $\sim$ 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.

Данное наблюдение открывает новые возможности для практического применения d–μ–t-синтеза, например, в проекте создания интенсивного нейтронного источника.

Заключение

Приведенные в данной статье результаты исследований мезокатализа реакций ядерного синтеза составляют сегодня основную базу данных, используемых для сравнения с теорией. Они иллюстрируют эффективность разработанного в ПИЯФ экспериментального метода, а также важность объединения усилий и возможностей различных лабораторий мира.

Следующий коллектив авторов – сотрудников ПИЯФ – участвовал на различных этапах создания экспериментальных установок и проведения исследований:

Д.В.Балин, В.Н.Батурин, А.А.Васильев, А.А.Воробьев, Ан.А.Воробьев, Н.И.Воропаев, Б.Л.Горшков, Ю.С.Григорьев, В.С.Дубограй, А.И.Ильин, С.М.Козлов, Л.Н.Кудин, Е.М.Маев, А.А.Марков, В.И.Медведев, В.В.Нелюбин, Е.М.Орищин, Г.Е.Петров, Л.Б.Петров, В.И.Поромов, Г.Г.Семенчук, Ю.В.Смиренин, Г.Л.Соколов, В.В.Сулимов, Н.А.Тимофеев, В.А.Трофимов, Ю.А.Честнов.

Состав участников совместных экспериментов в PSI (MCF-collaboration):

C.Petitjean, Th.Petitjean, K.Lou, P.Ackerbauer, W.H.Breunlich, M.Fuchs, S.Fussy, M.Jeitler, P.Kammel, B.Lauss, J.Marton, W.Prymas, J.Werner, J.Zmeskal, H.Bossy, T.Case, K.M.Crowe, D.V.Balin, V.N.Baturin, Yu.S.Grigoriev, A.I.Ilyin, E.M.Maev, G.E.Petrov, G.G.Semenchuk, Yu.V.Smirenin, A.A.Vorobyov, N.I.Voropaev, P.Baumann, H.Daniel, T.von Egidy, F.J.Hartmann, P.Hofmann, R.Huber, W.Schott, R.Lipowsky, P.Wojciechowski, V.E.Markushin, J.Deutsch, J.Govaerts, R.Prieels, G.A.Beer.

Список литературы

[1] *Коллектив авторов ПИЯФ.* Препринт ЛИЯФ–715, Л., 1981. 17с.

[2] *Коллектив авторов ПИЯФ.* Препринт ЛИЯФ–964, Л., 1984. 54с.

[3] *Коллектив авторов ПИЯФ.* Препринт ЛИЯФ–1630, Гатчина, 1990. 24с.

[4] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Muon Cat. Fusion, 1990. V.5/6. P.173.

[5] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Muon Cat. Fusion, 1990. V.5/6. P.163.

[6] *MCF Collaboration.* // "New project for investigation of unsolved problems of $dd\mu$ and $pd\mu$ ctalysis in D_2 amd H/D mixtures", to be published in Proc. Symp. "Muon Catalyzed Fusion–95", Dubna, 1995.

[7] *Коллектив авторов ПИЯФ и W.Czaplinski, M.Filipowicz, A.Gula, E.Gula.* // Muon Cat. Fusion, 1992. V.7. P.301.

[8] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Письма в ЖЭТФ, 1985. Т.42. С.236.

[9] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Muon Cat. Fusion, 1988. V.2. P.163.

[10] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Muon Cat. Fusion, 1990. V.5/6. P.481.

[11] *MCF Collaboration.* // Muon Cat. Fusion, 1990. V.5/6. P.26.

[12] *Коллектив авторов ПИЯФ.* // Proc. Int. Workshop LEMS-93, Santa-Fe, USA, 1993.