

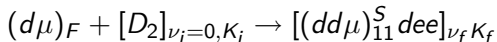
## План доклада.

1. Явление мюонного катализа и его характеристики.
2. Цель работы.
3. Физические основы прямого метода измерения коэффициента прилипания мюонов в МК – рекомбинация ионизационных зарядов.
4. Установка для измерения  $\omega_{dd}$ .
5. Результаты измерений коэффициента  $\omega_{dd}$ .
6. Установка для измерения  $\omega_{dt}$ .
7. Результаты измерений коэффициента  $\omega_{dt}$ .
8. Сравнение с теорией и другими результатами.

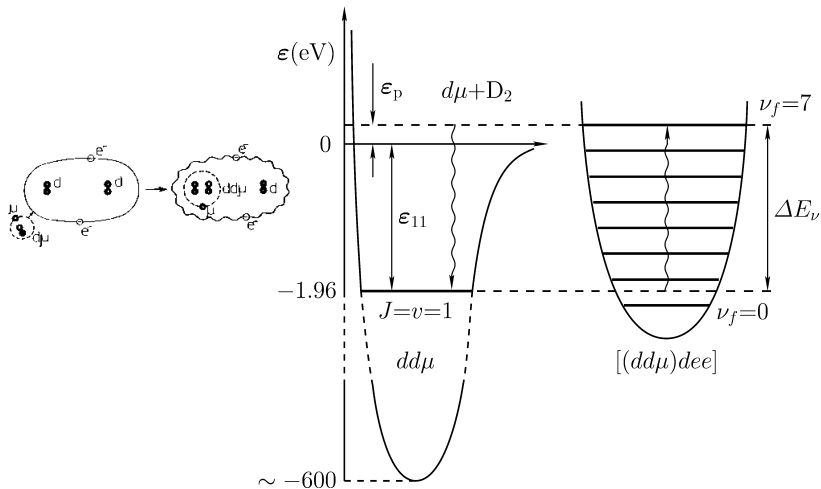
Явление мюонного катализа как физический процесс было предложено в 1947 г. (С. Frank,  $d\mu + p \rightarrow {}^3\text{He} + \mu + 5,3\text{MeV}$ ),

- 1950-е гг. – теоретически изучено (А.Д.Сахаров – рассчитал скорость синтеза в мюонных молекулах, Я.Б.Зельдович – скорость их образования, J.Jackson – оценил вер-сти прилипания), и обнаружил экспериментально А.Alvarez в 1957 г.
- 1964 – обнаружена высокая скорость и температурная зависимость реакции  $d\mu d$  (В.П.Джелепов), 1967 – В.Весман и С.С.Герштейн – объяснили резонансным механизмом,
- 1977 – Л.И.Пономарёв и С.С.Герштейн – предсказали высокую скорость  $d\mu t$ . ОИЯИ – эксп. подтвердили высокую скорость  $d\mu t$ ,
- 1979 – начало работ в ЛИЯФ по исследованию МК. Программа “Мюонный катализ” принята постановлением ГКНТ и президиума АН СССР для комплексного изучения явления МК. Эксперименты выполнялись в 1981-88 г. в ОФВЭ ПИЯФ и в 1989-96 гг. в коллаборации с PSI (Швейцария) и др.

# Схема резонансного образования молекулы $dd\mu$ .



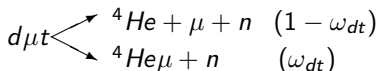
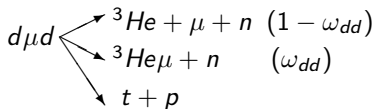
$$\varepsilon_0 + |\varepsilon_{11}| = \Delta E_{\nu, k}, \quad \varepsilon_0 = \frac{3}{2}kT, \quad \varepsilon_{11}^{\text{exp}}(dd\mu) = -(1,9626 \pm 0,0004) \text{ мЭВ}$$



Особенность явления МК – возможность многократного повторения реакции синтеза  $d\mu t$ , благодаря быстрому образованию мюонных молекул в смесях изотопов водорода после торможения мюона и образования мезоатома.

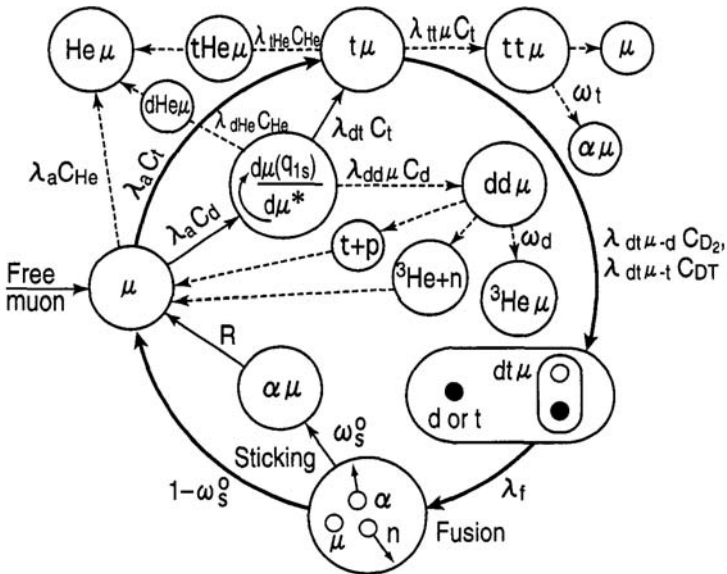
Скорости образования мезомолекул  $\lambda_{mol}$  (при LHD и  $T=300$  K), вероятности прилипания  $\omega_S$ , скорости изотопного обмена или перехода в нижнее состояние сверхтонкой структуры  $\lambda_{ab}$  и энергвыделение  $Q$

Мезомолекула	$\lambda_{mol} \text{ c}^{-1}$	$\omega_S$	$\lambda_{ab} \text{ c}^{-1}$	Q [МэВ]
$pd\mu$	$5,8 \cdot 10^6$	$\sim 0,86$	$1,7 \cdot 10^{10}$	5,4
$pt\mu$	$6,8 \cdot 10^6$	$\sim 0,99$	$0,7 \cdot 10^{10}$	20
$dd\mu$	$\sim 3 \cdot 10^6$	0,122	$3,7 \cdot 10^7$	3,3; 4,0
$dt\mu$	$\sim 3 \cdot 10^8$	$\sim 0,5 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^8$	17,6
$tt\mu$	$3 \cdot 10^6$	0,14	$1,2 \cdot 10^9$	11,3



$$\omega_S = \omega_S^0 \cdot (1 - R)$$

# Кинетика МК в D/T смеси



$X_c$  – число циклов, вызываемых одним мюоном за время жизни  $\tau_\mu = 2,2$  мкс  
 обратно пропорционально вероятности ухода мюона из цикла (вследствие  
 распада со скоростью  $\lambda_0 = 1/\tau_\mu$ , прилипания к гелию ( $\omega_{dt}$ ) и др. потерь

$$X_c = \frac{\Lambda_c}{\lambda_0 + w\Lambda_c}, \quad \Lambda_c = \lambda_c \cdot \varphi$$

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{q_{1s}c_d}{\lambda_{dt}c_t} + \frac{0,75}{\lambda_{1-0}c_t} + \frac{1}{\lambda_{dt\mu-d}C_{D_2} + \lambda_{dt\mu-t}C_{DT}}$$

$$W = \omega_{dt} + \frac{\lambda_{tt\mu}c_t \cdot \omega_{tt}}{\lambda_{dt\mu-d}C_{D_2} + \lambda_{dt\mu-t}C_{DT} + \lambda_{tt\mu}c_t} +$$

$$+ \frac{q_{1s}c_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \lambda_{dd\mu}^{3/2} C_{D_2} \cdot \omega_{dd} \cdot \beta}{\lambda_{dt}c_t + \lambda_{dd\mu}^{3/2} C_{D_2} + \lambda_{3/2 \rightarrow 1/2}c_d} + \frac{\lambda_{Z}c_Z}{\lambda_c}$$

$w$  – фактор потерь мюонов (эффективным коэффициентом прилипания мюона) учитывает различные каналы потерь мюонов в циклах МК, прилипание мюонов в  $d\mu d$  и  $t\mu t$  синтезах и перехват мюонов на примеси с  $Z > 1$ .

$C_{D_2}$  и  $C_{DT}$  – концентрации молекул,  $c_Z$  – концентрация атомов примесей.

**Оценка предельного значения числа циклов:**

$$X_c \longrightarrow 1/w (\sim 175) \quad \text{при} \quad w \cdot \Lambda_c \gg \lambda_0,$$

$$X_c \longrightarrow \Lambda_c/\lambda_0 (\sim 430) \quad \text{при} \quad w \longrightarrow 0$$

## Методы измерения $\omega_{dd}$ и $\omega_{dt}$

- регистрация нейтронов синтеза (2,5 МэВ, 14 МэВ)
- рентгеновские кванты,  $\sim 30\%$  прилипаний – в возбуждённые состояния  $He\mu^*$ ,  $E(K_\alpha)=8,2$  кэВ + регистр. нейтронов

$$Y_x/Y_n = \gamma^{theor} \cdot \omega_s^0$$

- ионизационные методы:
  - в диффузионной камере (ОИЯИ),
  - плёночные криогенные мишени из изотопов водорода + ППД + дет. нейтронов (TRIUMF, пока не реализован)
  - в газовой мишени низкого давления по разнице пробегов, ППД + дет. нейтронов (RAL).
  - ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ПИЯФ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – получение достоверной экспериментальной информации о важнейших параметрах процессов мюонного катализа реакций  $d\mu d$ - и  $d\mu t$ -синтеза – коэффициентах прилипания мюонов,

Для этого было необходимо:

- освоить и применить развитую в ОФВЭ методику ионизационной камеры в области давлений  $50 \div 160$  атм для исследования реакций мюонного катализа.
- Измерить коэффициент прилипания мюона  $\omega_{dd}$  в реакции  $d\mu d$  синтеза прямым методом, выделяя в ИК события с прилипанием мюона  ${}^3\text{He}\mu$  и события без прилипания  ${}^3\text{He}$ .
- Измерить коэффициент прилипания мюона  $\omega_{dt}$  в реакции  $d\mu t$  синтеза, применитв аналогичную методику регистрации частиц  ${}^4\text{He}$  и  ${}^4\text{He}\mu$  в ионизационной камере высокого давления, наполненной смесями изотопов водорода, содержащими тритий.

В результате анализа характеристик ИК в данной области давлений был реализован новый метод измерения коэффициентов прилипания, основанный на зависимости рекомбинации ионизации от заряда продуктов синтеза.



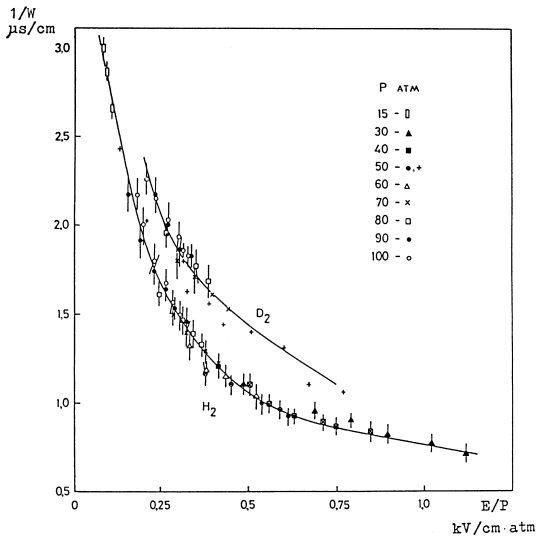
Детектор для изучения реакции  $d\mu d$  - ИК высокого давления.

- 4- $\pi$  геометрия,
- 100% эффективность регистрации заряженных продуктов синтеза, надёжное определение оставок мюонов и измерение их координат в объёме ИК,
- достигнуто быстродействие  $\sim 200$  нс, необходимое для наблюдения реакций катализа (в диапазоне неск. мкс.), малые пробеги, возможность наблюдать циклирование.
- Имелся большой опыт ионизационной методики: камера ИКАР,  $H_2$ ,  $D_2$  10 атм А.А.Vorobyov et al.  
Phys.Lett.B41(1972)639, NIM 119(1974)509  
Для работы ИК необходима чистота водорода  $\sim 10^{-6}$  по электроотрицательным примесям  $O_2$ ,  $H_2O$ .

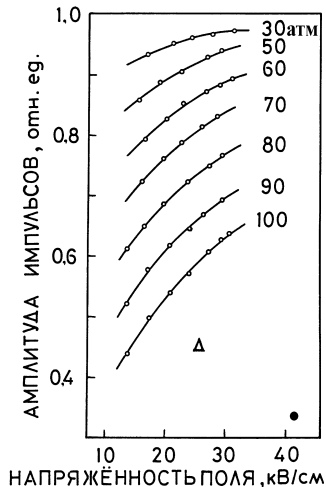
При переходе 10 атм  $\rightarrow$  100 атм были уменьшены все размеры ИК в 10 раз.

Измерялось время нарастания фронтов импульсов от  $\alpha$ -частиц источника  $^{234}\text{U}$  ( $E=4,78$  МэВ) на катоде 2-электродной ИК.

Уменьшение скорости дрейфа оказалось  $\sim 5\%$  при  $p \rightarrow 100$  атм



# Рекомбинация ионизационных зарядов в дейтерии при давлении 91 атм



рекомбинация от  $\alpha$ -частиц  $^{234}\text{U}$  при 90 атм  $\sim 40\%$   
(регистрируемая энергия: 4,78 МэВ  $\rightarrow$  2,8 МэВ)

**ВЫВОД:** регистрация частиц возможна.



В методе, развитом в ПИЯФ, используется разница рекомбинационных потерь ионизации, произведённой двух- и однозарядными частицами, которая проявляется только при высоких давлениях газа в ИК.

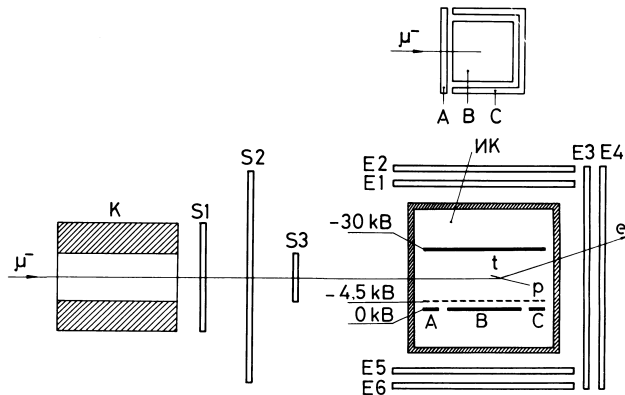
В результате частицы  $\text{He}$  и  $\text{He}\mu$ , имеющие одинаковую начальную энергию, в процессе их регистрации в ИК, “раздвигаются” в энергетическом спектре, это позволяет с высокой точностью определить число событий с прилипанием – прямым подсчётом.

Энергии частиц – продуктов  $dd$ -синтеза и их пробеги в водороде при давлении 90 атм.

Частица	${}^3\text{He}$	${}^3\text{He}\mu$	$t$	$p$
Энергия, МэВ	0,82	0,80	1,01	3,02
Пробег, мм	0,09	0,3	0,5	7,6

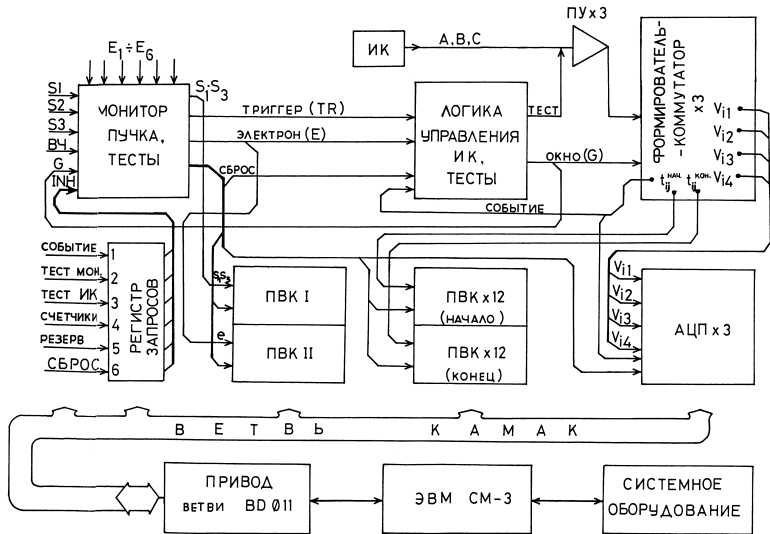
Энергии и пробеги в ИК заряженных частиц, образующихся в  $d\mu d$  и  $d\mu t$  синтезах при давлении  $P=161$  бар и  $E=41$  кВ/см, (а также в скобках – при  $p=47$  бар и  $E=15$  кВ/см).

Реакция	Частица	Энергия, МэВ	Длина трека, мм	Рекомбинация	Остаточная энергия
$dt\mu \rightarrow \alpha + n + \mu$	$\alpha^{++}$	3,53	0,61 (2,2)	0,67 (0,11)	1,17 (3,2)
$dt\mu \rightarrow \alpha\mu + n$	$\alpha\mu^+$	3,46	2,2	0,45	1,9
$dd\mu \rightarrow p + t + \mu$	$p^+ + t^+$	3,02+1,01	51+0,36	0,44	2,25
$dd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu$	${}^3\text{He}^{++}$	0,82	0,7 (0,42)	0,8 (0,11)	0,16 (0,73)
$dd\mu \rightarrow {}^3\text{He}\mu + n$	${}^3\text{He}\mu^+$	0,80	0,25	0,59	0,33



Анод В –  $35 \times 35 \text{ мм}^2$ , ширина анодов А и С – 3 мм,  
расстояние катод-сетка 10 мм, сетка-аноды – 1 мм.

При давлении дейтерия 91,6 атм время дрейфа электронов в промежутке  
катод – сетка 2 мкс, в промежутке сетка – анод - 180 нс.

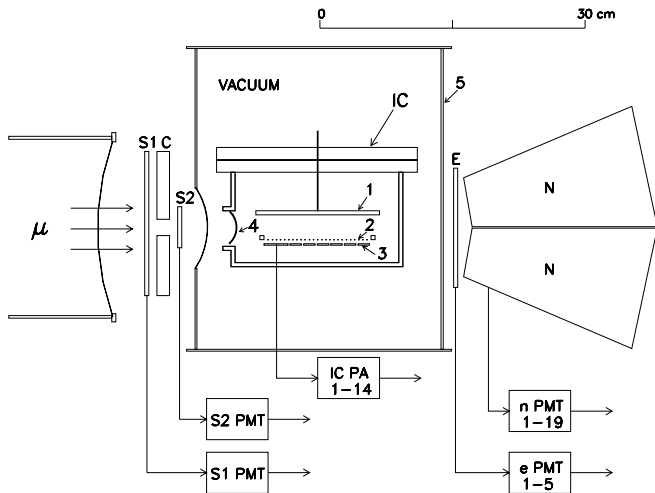


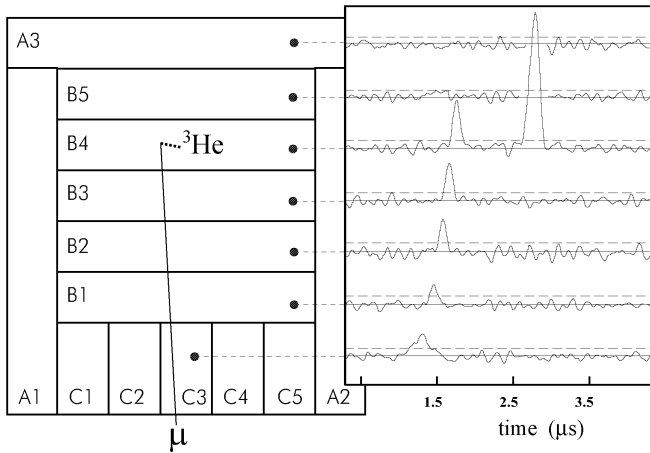
## Энергетическое разрешение и пороги регистрации

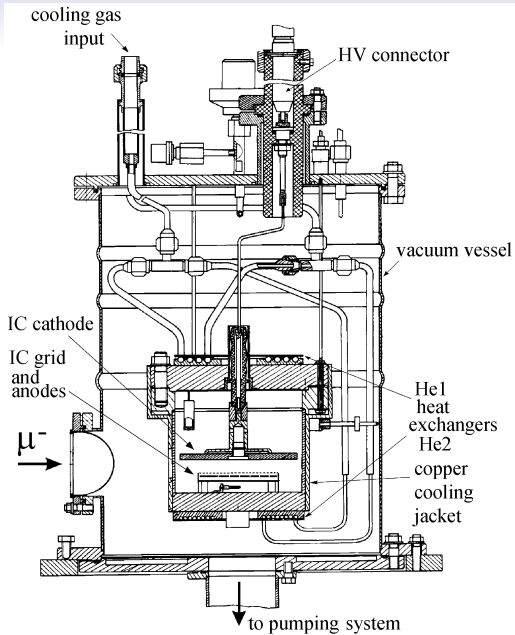
- на электроде В:  $\Delta V (FWHM) = 70$  КэВ, порог 130 КэВ,
- на электродах А и С:  $\Delta V (FWHM) = 50$  КэВ, порог 90 КэВ,
- временное разрешение при измерении времени появления сигналов  $\Delta t (FWHM) = 50$  нс.

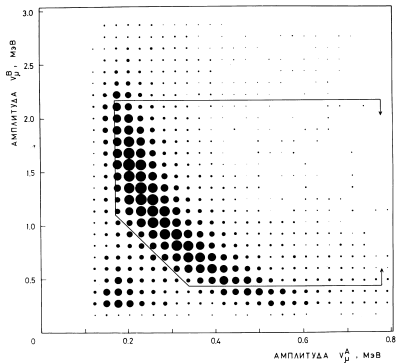
Минимальное мёртвое время регистрации (включая полное время анализа сигнала) – 350 нс для самых коротких импульсов, принятых с анодов ИК.



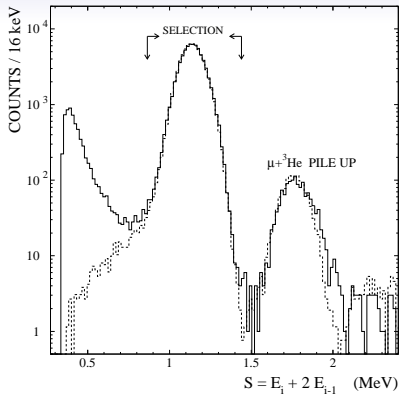






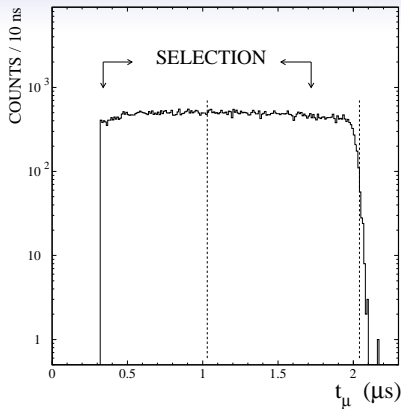
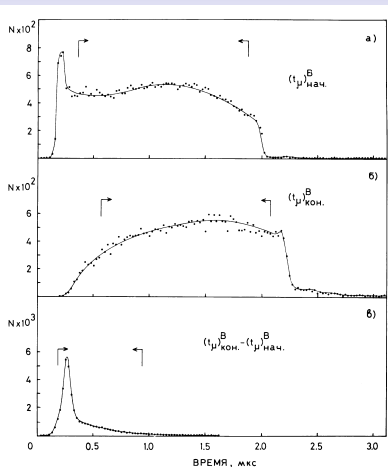


1982-84. Аноды А и В как  $\Delta E \cdot E$ -детектор мюонов.



1994-96.

Распределение мюонных сигналов по переменной  $S = E_i + 2E_{i-1}$ . Сплошная и пунктирная кривая – мюонные сигналы, зарегистрированные с триггерами  $E_L$  и  $E_L \cdot E_L$ , соответственно. Отбор устраняет наложения.



1982-84.

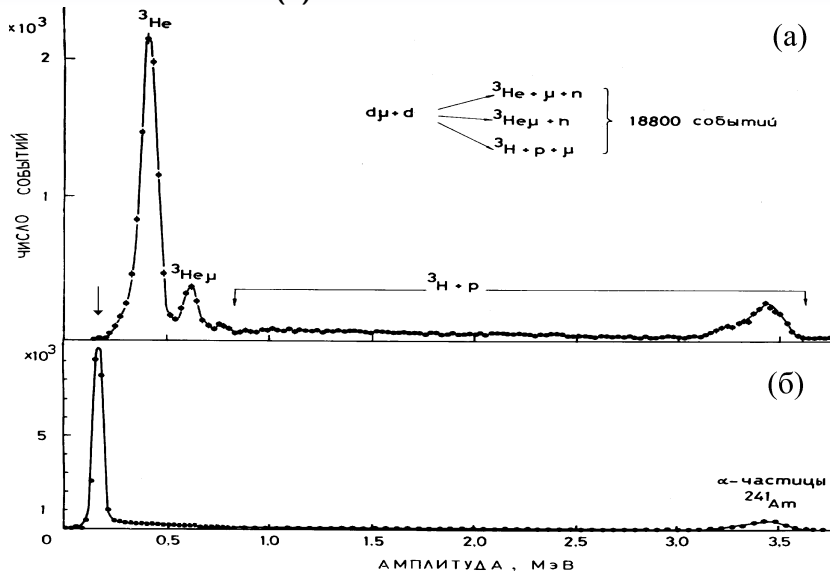
Временное распределение мюонных сигналов  $T_\mu$  на анодах А и В

Время дрейфа даёт координату сигналов остановки  $\mu$  между катодом и сеткой.

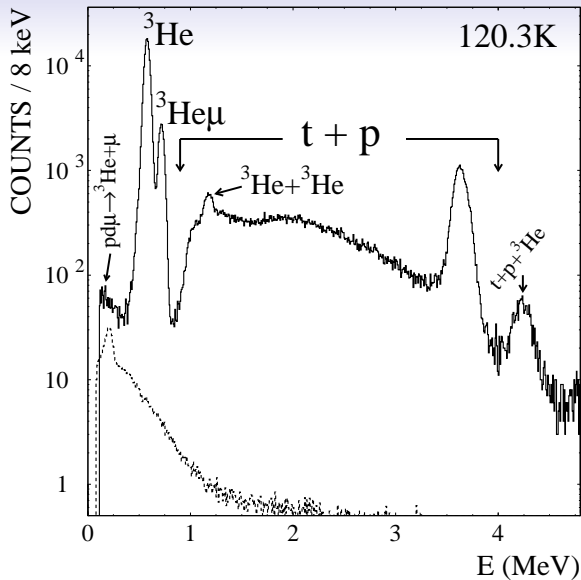
1994-96.

Временное распределение мюонных сигналов  $T_\mu$  на В-анодах остановки.

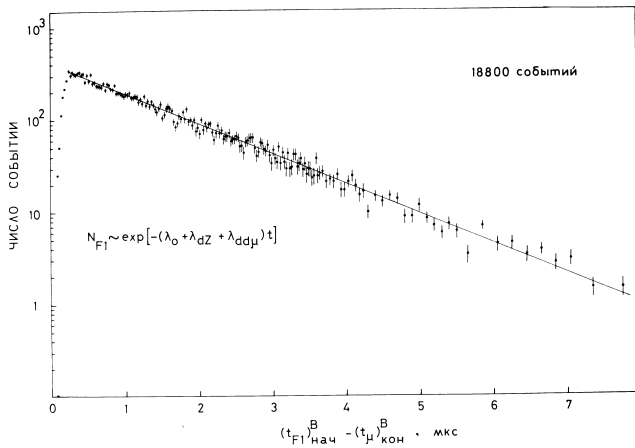
1982-84. (а) Спектр первых синтезов на центральном аноде.  
 (б) Фоновые события.



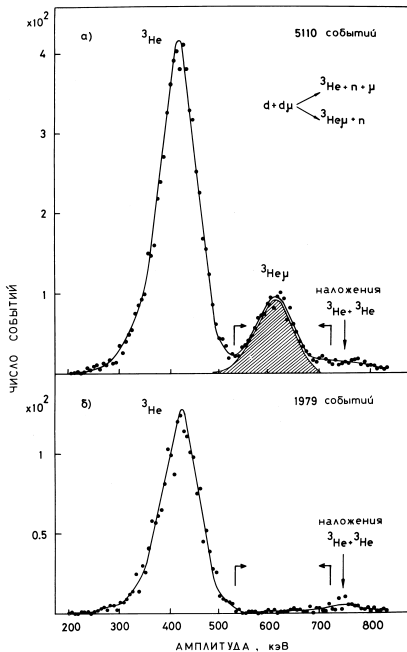
100% эффективность регистрации



1994-96. Энергетический спектр синтезов в газе  $D_2$ .  
 Пунктир внизу – фон от захвата мюонов на примесях.







$$\omega_{dd} = N_{3\text{He}\mu} / N_{3\text{He}}^{\text{tot}}$$

$$N_{3\text{He}}^{\text{tot}} = N_{3\text{He}\mu} + \frac{N_{3\text{He}}}{(1 - W_{\mu})}$$

$W_{\mu} = 5 \div 7\%$  — поправка на наложения вторых синтезов на  ${}^3\text{He}$ , определяемая кинетикой. Усреднённый результат для коэффициента прилипания в канале  $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$

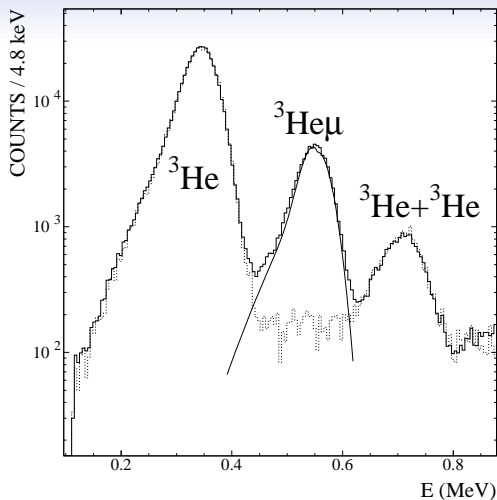
$$\omega_{dd} = 0,122 \pm 0,003.$$

Усреднённый коэффициент прилипания в  $d\mu d$ -реакции

$$\tilde{\omega} = \omega_{dd} \frac{R}{1 + R} + \omega_{dd,t} \frac{1}{1 + R}$$

$$\omega_{dd,t} = 0$$

$$\tilde{\omega} = 0,071 \pm 0,003$$



1994-96.

Левая часть энергетического спектра синтезов в дейтерии при  $T=300$  К и  $\varphi=0,0837$ . Пунктир – спектр первых синтезов, за которыми имелись последующие. Этот спектр нормирован на исходный спектр всех первых синтезов в области пика  ${}^3\text{He}$ . Их разность даёт число событий с прилипанием мюона.

При большой статистике синтезов следует учесть также поправку на события, в которых вторым сигналом была зарегистрирована частица от захвата мюона ядрами  ${}^3\text{He}$  – тритон с энергией 1,9 Мэв, протон или дейтрон Эти сигналы имитируют вторые синтезы, и если их не учесть, то коэффициент прилипания будет заниженным.

$${}^3\text{He} + \mu^- \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} t(1,9 \text{ МэВ}) + \nu_\mu, \\ d + n + \nu_\mu \\ p + n + n + \nu_\mu \end{array} \right\}, \quad \begin{array}{l} \lambda_t = 1496 \pm 4\text{с}^{-1} \\ \text{суммарно } \lambda_{br} = 632 \pm 15\text{с}^{-1} \end{array}$$

$\lambda_t$  и  $\lambda_{br}$  – скорости захвата  $\mu$  с испусканием тритона и с образованием продуктов его развала), соответственно.

Экспериментальные условия, статистика и поправки в измерениях  $\omega_{dd}$   
1994-96 гг.

Т, К	$\varphi$ , % LHD	$N_\mu$ , $\cdot 10^6$	$N_{\text{He}}$	$N_{\text{He}\mu}$	$A_n$	$W_{p\mu}$	$\omega$	$\Delta\omega$	$\omega_{dd}$
250,1	0,0489	2,54	161948	23209	7,0	0,050(1)	0,1199(9)	+0,0147	0,1218(9)
300,0	0,0485	1,95	166283	24004	7,0	0,0495(9)	0,1211(9)	+0,00147	0,1224(9)
300,0	0,0837	3,703	448421	66277	4,2	0,075(1)	0,1206(6)	+0,00242	0,1234(6)

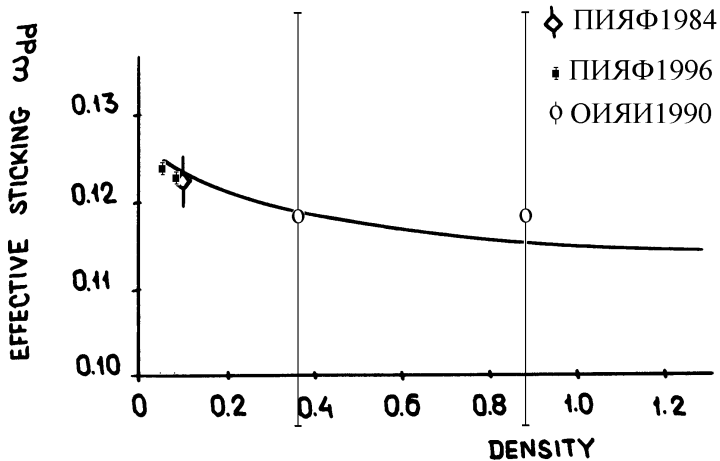
Результаты измерений параметров  $d\mu d$  катализа в дейтерии в эксперименте 1982-84 г.

Давление (атм)	Температура (К)	$\lambda_{dd\mu}^0$ ( $10^6 c^{-1}$ )	$\omega_{dd}$	$R$
51,6	293	$2,4 \pm 0,6$	—	—
70,9	293	$2,86 \pm 0,11$	$0,125 \pm 0,005$	$1,32 \pm 0,05$
79,6	293	$2,74 \pm 0,14$	$0,116 \pm 0,008$	$1,52 \pm 0,11$
91,6	293	$2,76 \pm 0,08$	$0,126 \pm 0,004$	$1,39 \pm 0,04$
93,0	295	$2,84 \pm 0,10$	$0,111 \pm 0,006$	$1,47 \pm 0,06$
Среднее	—	—	$0,122 \pm 0,003$	$1,39 \pm 0,03$

Результаты измерений коэффициента прилипания в дейтерии 1994-96 гг:

$$\omega_{dd} = 0.1224 \pm 0,0006 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0837$$

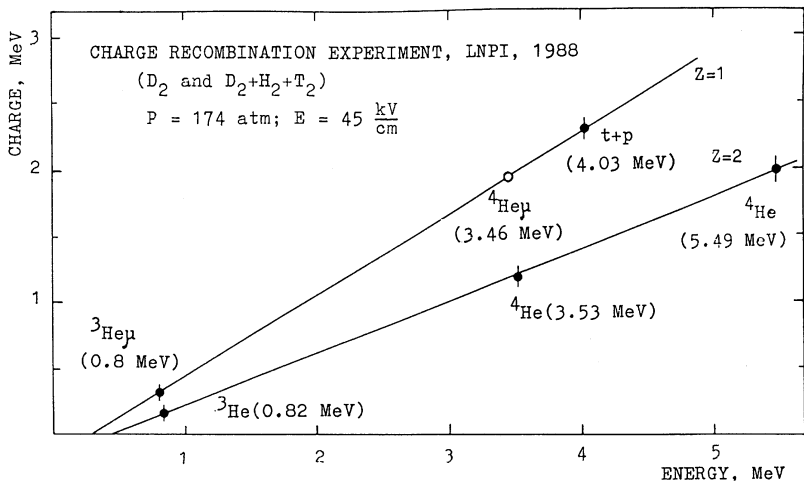
$$\omega_{dd} = 0.1234 \pm 0,0007 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0485$$



Расчётная зависимость коэффициента прилипания  $\omega_{dd}$  в реакции  $d\mu d$  в зависимости от плотности среды (Markushin, 1988) и экспериментальные данные.

## Создание ИК для изучения реакции $d\mu t$ . Проблемы:

- $\omega_{dt} \sim 0,5\%$  – в 20 раз меньше, чем в  $d\mu d$ .
- Тритиевый шум. Выбрана концентрация  $c_t \sim 0,05\% \rightarrow 0,036\%$ . Достигнуто энергетическое разрешение 125 кэВ (электроники – 80 кэВ). Анод разделён на 19 частей, диаметр каждого сегмента 4 мм.
- Высокая энергия частиц,  $E_{4He} = 3,53$  МэВ, больше пробеги. Увеличена плотность газа до  $\varphi \sim 0,17$  LHD  $\sim 160$  атм, Пробеги стали 0,6 мм для  ${}^4He^{++}$  и 2,2 мм для  ${}^4He\mu^+$ .
- Требуется сохранить быстроедействие. Увеличено напряжение на катоде до 50 кВ.
- Энергетические пороги выше  $\Rightarrow$  эффективность  $< 100\%$ .  $\Rightarrow$  Монте-Карло.
- Ожидается 1-х синтезов  $\sim 1\%$  от числа остановок мюонов. Желательно иметь события со 2-ми синтезами для применения метода выжившего мюона. Требуется набрать статистику  $\sim 10^6 \Rightarrow$  пучок PSI.
- Фон от  $d\mu d \Rightarrow$  тройная смесь.



Калибровка ионизационного заряда, собираемого в ИК.

● – известные результаты измерений,

○ – предсказание для  $^4\text{He}\mu$ .

Рекомбинация 68% для  $^4\text{He}^{++}$  и 45% для  $^4\text{He}\mu^+$ .

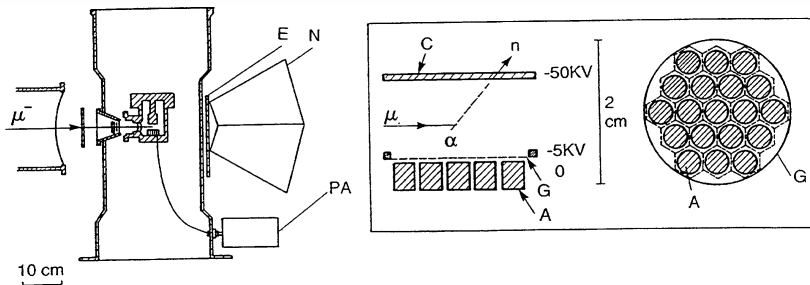


Схема экспериментальной установки для изучения реакции  $d\mu t$ .

A – аноды, G – сетка, C – катод, E и N – сцинтилляторы для регистрации электронов и нейтронов, PA – предусилители.

Расстояние сетка – аноды 0,6 мм, площадь системы анодов  $2,4 \text{ см}^2$ , диаметр каждого 4 мм. Чувствительный объём ИК  $2,6 \text{ см}^3$ . Наряжение на катоде 50 кВ.



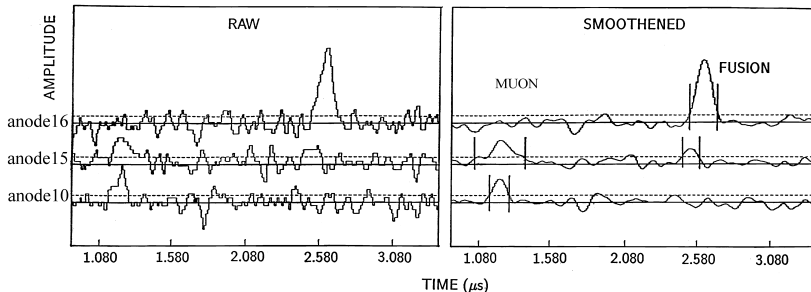
## Методы анализа данных.

- Выделение в энергетического спектре событий  $dt$ -синтеза компонент, соответствующих реакции синтеза без прилипания мюона ( $\alpha$ ), с прилипанием ( $\alpha\mu$ ), а также компонент, соответствующих фоновым сигналам –  $\alpha\alpha$ -наложениям и событиям  $t + p$  от  $d\mu d$ -синтеза.
- Метод “выжившего мюона”: сравнение двух спектров – спектра всех первых синтезов и спектра первых синтезов при наличии за ними вторых синтезов (использует ту часть статистики, в которой присутствует второй синтез). В данном эксперименте метод “выжившего мюона” действует не столь эффективно, как в случае  $d\mu d$ , по 2-м причинам:
  - мала величина коэффициента прилипания и соответственно в  $\sim 20$  раз меньше статистика событий с прилипанием по сравнению с реакцией  $d\mu d$ .
  - применённая для уменьшения фона тройная смесь изотопов водорода с низким содержанием трития ещё более усугубила малость выхода синтезов, не более 0,015 на один остановившийся мюон.

## Проблемы регистрации импульсов в ИК с тритием:

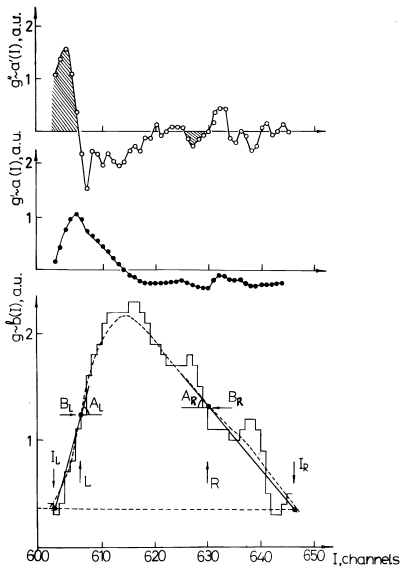
- Выделить с приемлемой эффективностью относительно слабые и короткие сигналы от остановок мюонов,  $E \sim 300$  кэВ. Их амплитуды и длительности сравнимы с наибольшими из шумовых импульсов от флуктуаций тока в ИК. (методика ИК основывается на надёжной идентификации и подсчёте остановок мюонов в чувствительном объёме).
- Правильно распознать длинные импульсы  $\sim 400$  нс и более, от частиц  $\alpha\mu$  и  $t + p$ . Они часто могут быть “разрезаны” на части отрицательными выбросами тритиевого шума.
- Правильно определить энергию (собранный заряд) импульса. Тритиевый шум приводит к дисперсии измеряемой энергии наблюдаемого сигнала, пропорциональной  $\sigma \approx \sqrt{\Delta t}$ . Для импульсов  $\Delta t = 100$  нс  $\sigma \sim 80$  кэВ, для 400 нс  $\sigma \sim 250$  кэВ. Достичь этого предела можно только решив проблему идентификацию импульсов.
- Отличить сигналы наложения двух импульсов от одиночных с той же энергией  $\Rightarrow$  нужна процедура анализа формы импульсов.

## Регистрация сигналов ИК с помощью Flash-ADC.



Пример сглаживания для события с мюоном и одним *dt*-синтезом, зарегистрированным на двух анодах.

6-битные Flash-ADC оцифровывали аналоговый сигнал с амплитудой в диапазоне  $(0 \div 800)$  мВ, и выдавали численные значения его амплитуды с  $2^6=64$  градациями по  $12,5 \text{ мВ}=800 \text{ мВ}/64$  с частотой 100 МГц.



Оцифрованный и сглаженный импульсный сигнал  $g$ , его производные  $g'$  и  $g''$ .

Горизонт. пунктир – уровень пьедестала, пунктирная кривая – сглаженные оценки  $b_i$ .

Заряд (энергия) интегрируется между точками пересечения пунктирных линий  $I_L$  и  $I_R$ .

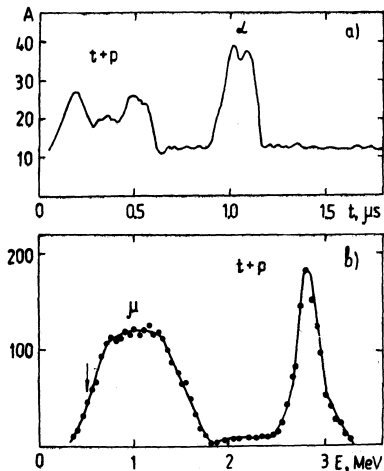
$L$  – начало импульса

$R$  – конец импульса

$A_L$  – параметр наклона в левом максимуме производной  $g'$ ,

$A_R$  – то же в самом правом минимуме  $g'$ .

Описываемый алгоритм был использован для анализа физических данных, полученных в тестовом эксперименте на  $\mu$  пучке СЦ ПИЯФ с тритиевой ионизационной камерой, наполненной чистым дейтерием, в которой регистрировались события  $dd\mu$ -катализа.



Наблюдение  $d\mu d$ -синтезов в ИК с помощью FADC.

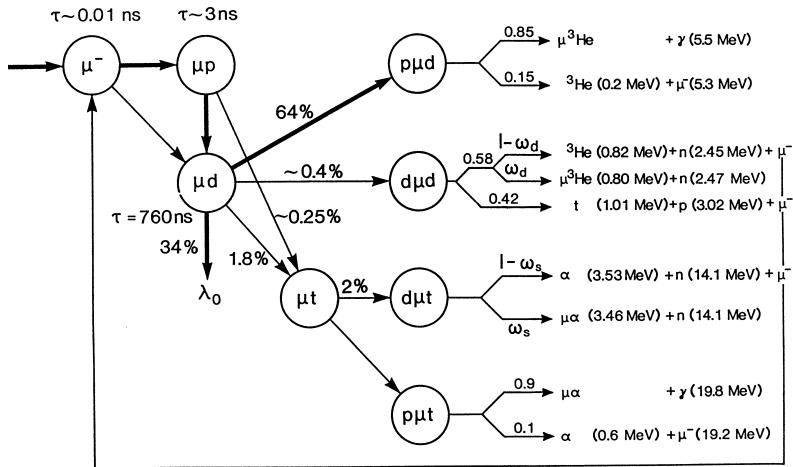
ИК наполнена чистым дейтерием, порог регистрации соответствует регистрации синтезов при наполнении смесью с тритием (указан стрелкой).

(а) – Временная диаграмма сигнала с ИК, оцифрованная FADC. 1-й импульс – событие  $dd$ -синтеза с испусканием  $t+p$ , второй –  $\alpha$ -частица источника  $^{241}\text{Am}$ .

(б) – Энергетические спектры сигналов, восстановленных при помощи алгоритма ПИЯФ. Пик слева – спектр остановок мюонов, пик справа – события  $dd$ -синтеза по каналу  $t+p$ .

# Применение тройной смеси Н/Д/Т

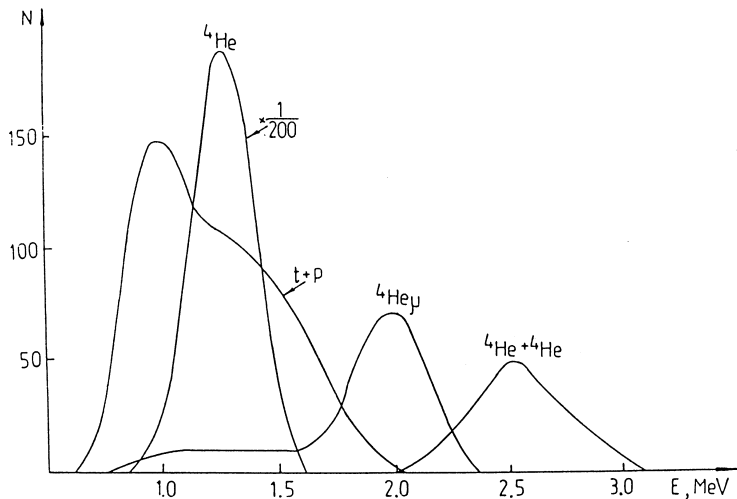
$c_p = 90\%$      $c_d = 10\%$      $c_t = 0.05\%$      $\Phi = 0.17$



Кинетика мезомолекулярных процессов и синтезов в тройной смеси Н/Д/Т, применявшейся в измерении 1989 г.

Состав тройных смесей Н/D/T, применявшихся для наполнения ИК, и статистика событий катализа при измерениях в PSI 1989-92 гг; T=300 К,  $\varphi=0,17$ .

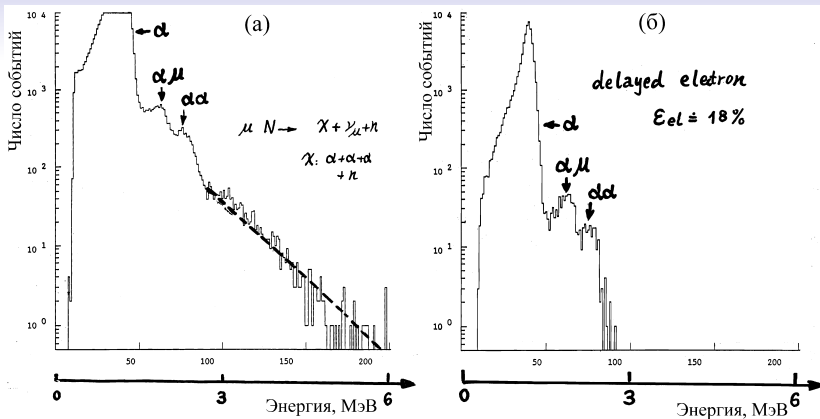
год измерения	1989	1991	1992
Давление, атм	164	158	158
$c_p$ , %	90,5	96,0	97,0
$c_d$ , %	9,5	4,0	3,0
$c_t$ , %	0,047	0,036	0,036
молекул $D_2$ , %	1,6	0,2	0,1
молекул HD, %	18,8	7,9	5,9
молекул $H_2$ , %	79,6	91,9	94
$N_\alpha^{sf}$	$3,9 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$
$N_\alpha^{sf}$ , на совп. с нейтроном	$7,7 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^5$



**Энергетический спектр событий синтезов на одном аноде ИК, полученный численным моделированием при планировании эксперимента 1989 г.**

**Результатом моделирования были значения эффективностей регистрации всех каналов реакций.**





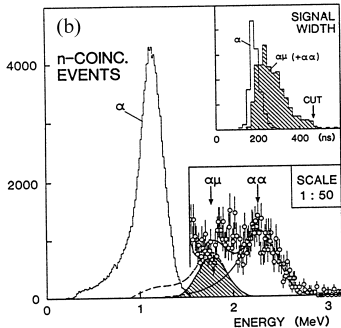
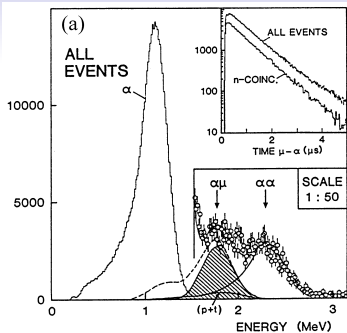
(а) – энергетический спектр событий синтезов в ИК,  
 (б) – то же при требовании наличия сигнала от электрона распада.

Требование задержанных совпадений с сигналом от электронных счётчиков существенно уменьшало фон от реакций захвата мюонов ядрами  ${}^3\text{He}$ , азота и других возможных примесей.

## Статистика остановок мюонов и синтезов в измерении 1989 г.

События  $\mu - \alpha$  и  $\mu - \alpha - \alpha$  – с одним и с двумя синтезами соответственно.

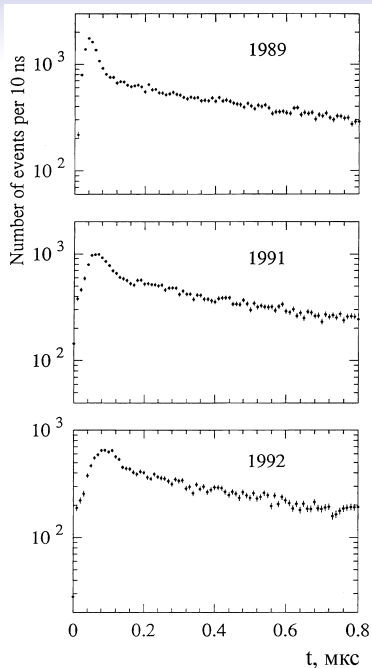
Интенс. пучка $\mu$ на вх. телескопе после разравн.	5 кГц
Остановок $\mu$ в чувствительном объёме	150 Гц
Частота главного триггера запуска ИК	8 Гц
Частота событий $\mu - \alpha$	3 Гц
Общая статистика событий $\mu - \alpha$	$3 \cdot 10^6$
Событий $\mu - \alpha$ на 7 внутренних анодах	$1 \cdot 10^6$
Событий $\mu - \alpha$ на 7 внутр. анодах на совп. с нейтроном	$2,5 \cdot 10^5$
Отношение $(\mu - \alpha - \alpha)/(\mu - \alpha)$ по всей статистике	0,02
Событий $\mu - \alpha - \alpha$ на внутр. 7 анодах	$6,7 \cdot 10^3$



1989: Энергетические спектры отобранных событий синтеза на семи внутренних анодах. Сплошные кривые – результаты фитирования. Пунктирные линии – энергетические распределения событий с прилипанием  $\alpha\mu$ , включая события со стряхиванием.

(a) – все события. Вставка – распределения интервалов между мюоном и первым синтезом, для всех событий и для событий с зарег. нейтроном, соответственно.

(b) – события с совпадением нейтрона в интервале  $\pm 400$  нс от синтеза. Вставка – распределение по длительности сигналов, зарегистрированных в энергетическом интервале  $1,6 < E < 1,9$  МэВ (события ( $\alpha\mu$  + частично  $\alpha\alpha$ ) и синтезам  $\alpha$ , соответственно).



**Временные спектры нейтронов  $dt$ -синтеза, зарегистрированных в измерениях 1989, 1991 и 1992 гг с последовательно убывающей концентрацией дейтерия в наполняющих смесях.**

Величина коэффициента прилипания  
была получена в виде

$$\omega_{dt} = \frac{N_{\alpha\mu}/\epsilon_{\alpha\mu}}{N_{\alpha}/\epsilon_{\alpha} + N_{\alpha\mu}/\epsilon_{\alpha\mu} + N_{\alpha\mu'}/\epsilon_{\alpha\mu'} + N_{\alpha\alpha}/\epsilon_{\alpha\alpha}}$$

Каждый из коэффициентов  $\epsilon_i$  – эффективности регистрации – это отношение числа зарегистрированных событий к их реальному числу при определённых условиях регистрации. Они включает в себя “эффективность” способа отбора событий (пороги по энергии, длительности, по временному интервалу и пр.)

## Коэффициент прилипания из данных 1989 г.

- из анализа спектров первых событий

$$\omega_{dt} = (0,59 \pm 0,07)\%$$

Погрешность включает статистическую ошибку и систематические погрешности.

- Методом выжившего мюона (6636 вторых синтезов, из них 27 в интервале  $1,6 < E < 2,2$  МэВ).

Погрешность в основном определялась точностью оценки числа событий с прилипанием  $\alpha\mu$  с энергией менее 1,6 МэВ ( $\sim 13\%$ )

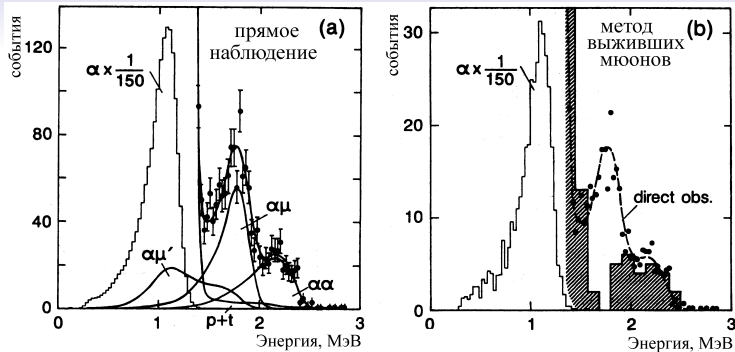
$$\omega_{dt} = (0,58 \pm 0,15)\%$$

качество выделения пика  $\alpha\mu$  в спектрах неудовлетворительное из-за большого вклада  $\alpha\alpha$ -наложений, большого вклада событий  $t + p$  ( $\sim 20\%$  под пиком  $\alpha\mu$ ) и недостаточным энергетическим разрешением, ограниченным шумом от распада трития.

## Измерения 1991-92 гг. Усовершенствования:

- Увеличена в 3 раза скорость остановок мюонов (до  $\sim 10^3 \text{с}^{-1}$ ) в чувствительном объёме ИК ( $2,6 \text{ см}^3$ ) при интенсивности пучка ускорителя 300 мка. Набрано  $5 \cdot 10^6$  событий для анализа (АI и Ве входные окна охранного объёма и ИК, и более тонкие сцинтилляторы)
- Пересчётный коэффициент  $P_s$  для триггерного сигнала  $T_L \cdot T_L$  в логике запуска ИК
- Уменьшена концентрации трития в газовой смеси (с 0,047% до 0,036%), улучшилось энергетическое разрешение ( $\sigma$ ) в пике  $\alpha\mu$  с 11,8% до 9,7% и уменьшилось количество  $\alpha\alpha$ -наложений, пропорциональных  $c_t$ .
- Концентрация дейтерия также была уменьшена за счёт ещё большего разбавления протием с 9,5% до 4% (в 1991 г.) и до 3% в 1992 г. (чтобы продлить время жизни горячих  $t\mu$ -атомов).

Уменьшение  $c_t$  улучшило условия для применения прямого метода определения коэффициента прилипания, основанного на анализе энергетического спектра первых синтезов, но для метода выжившего мюона было неблагоприятным – снизило относительную статистику вторых синтезов.



Спектры, полученные в 1992 г.

(а) – Энергетический спектр первых синтезов при условии совпадения с электроном от распада мюона. Виден пик  $\alpha\mu$ . Сплошные кривые – моделированные спектры  $\alpha$ ,  $\alpha\mu$ , событий со стряхиванием  $\alpha\mu'$  (при фиксированной реактивации  $R = 0,31$ ),  $\alpha\alpha$ -наложений и  $t + p$ .

(б) – Спектр первых синтезов при требовании, что в событии был и второй синтез (метод выжившего мюона). Пик  $\alpha\mu$  отсутствует.



## Анализ LBL. Результаты фитирования

$$\omega_{dt}^{R=0,31} = (0,57 \pm 0,03(stat) \pm 0,03(syst))\%$$

при фиксированном  $R^{theor} = 0,31, \Rightarrow \omega_0(exp) = (0,83 \pm 0,06)\%$ ,

или

$$\omega_{dt}^{\omega_0=0,92} = (0,54 \pm 0,04(stat) \pm 0,03(syst))\%$$

при фиксированном  $\omega^0 = 0,92, \Rightarrow R(exp) = 0,41 \pm 0,05$

### 3 варианта отбора событий –

- на совпадение с электроном распада – рез-ты приведены выше;
- на совпадение с нейтроном и без совпадения с электроном распада – с бдльшей статистикой и меньшей статистической погрешностью ( $\varepsilon_n \sim 0,33$ ,  $\varepsilon_e \sim 0,2$ ), и эти две выборки имела мало общих событий. Но потребовалось аппроксимировать и события с захватом мюонов.

При аналогичных предположениях,  $R = 0,31$  и  $\omega_0 = 0,92$ , были получены значения

$$\omega_{dt}^{R=0,31} = (0,57 \pm 0,03(stat) \pm 0,03(syst))\% \Rightarrow \omega_0(exp) = 0,83 \pm 0,03$$

$$\omega_{dt}^{\omega_0=0,92} = (0,54 \pm 0,03(stat) \pm 0,03(syst))\%, \Rightarrow R(exp) = 0,41 \pm 0,03$$

Эти результаты совпадают с предыдущими

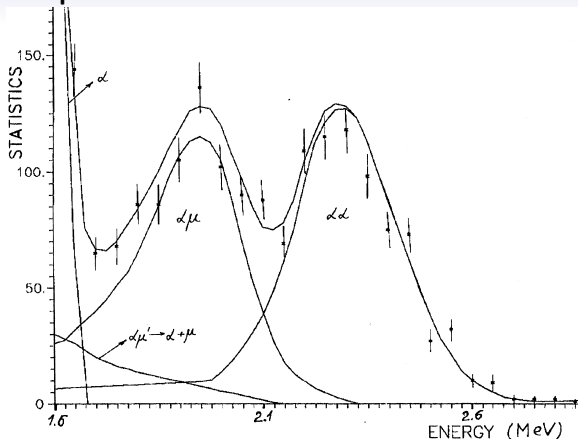
- с обоими совпадениями, с нейтроном и с электроном, дал результат, не зависящий от предположений о величине стряхивания,

$$\omega_{dt} = (0,56 \pm 0,06(stat) \pm 0,03(syst))\%.$$

Усреднением всех эти результатов в предположении, что их систематические погрешности не сильно коррелированы (складывались квадратично), был получен результат обработки методом аппроксимации спектров синтезов:

$$\omega_{dt} = (0,56 \pm 0,04)\%.$$

## Второй анализ был выполнен в ПИЯФ



Спектр энергий продуктов синтеза измерений 1992 г. – анализ ПИЯФ. Кривые – результат фитирования со свободными параметрами. Вклад событий  $t + p$  устранён отборами по параметрам формы сигнала, с использованием моделирования процесса регистрации методом Монте-Карло (Volchenkov-1988).

В этом анализе, в отличие от анализа LBL, учитывались сигналы, ионизационный заряд которых поделится между анодами.

Лучше идентифицировались длиннопробежные события  $t + p$ , для отбора по форме импульса частицы использовались параметры наклона переднего и заднего фронта  $A_L$  и  $A_R$ .

Вероятность стряхивания мюона R была свободным параметром.

$$\omega_{dt}^{free-R} = (0,58 \pm 0,03(stat) \pm 0,04(syst))\%.$$

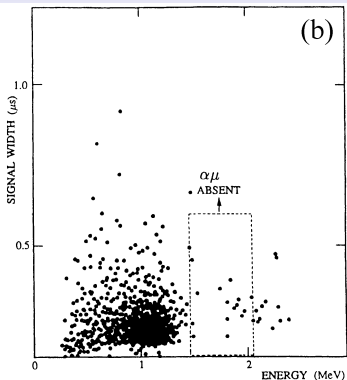
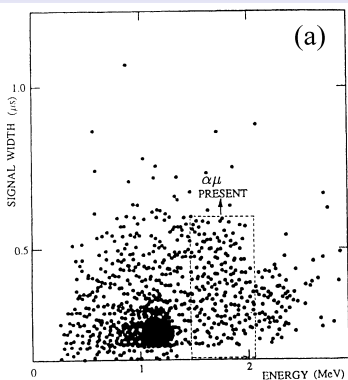
Третий анализ – PSI – методом “выжившего мюона”.  
Два варианта анализа:

- Только события с синтезами на 7-ми внутренних анодах (1/3 всей статистики)

$$\omega_{dt}^{surv.\mu} = (0,57 \pm 0,07(stat) \pm 0,02(syst))\%.$$

- События с синтезами на всех анодах, вся статистика.

Сравнение энергетических спектров частиц, полученных в этих двух вариантах обработки, показало, что энергетические разрешения в полученных спектрах совпадают.



**Корреляции энергии (заряда) и длительности сигналов первых синтезов в ИК, данные 1992 г. Отобраны только события с энерговывделением на одном аноде.**

**(а) – события с одним синтезом и зарегистрированным электроном распада,**

**(b) – события с двумя синтезами.**

**В обозначенной прямоугольной области должны находиться события с прилипанием мюона.**

Результаты по  $\omega_{dt}$ , полученные из данных 1992 г. разными методами, % по 7 внутренним анодам и по всем 19 анодам.

область остановок мюонов	метод выжившего мюона	прямой метод	
		$R = 0,31(3)$ фикс.	$R$ -своб. параметр
7 внутр.	$0,574 \pm 0,065 \pm 0,020$	$0,555 \pm 0,021 \pm 0,030$	$0,539 \pm 0,020 \pm 0,056$
все 19 ан.	$0,565 \pm 0,046 \pm 0,025$	$0,562 \pm 0,015 \pm 0,039$	–

Объединяя (складывая квадратично) статистическую и систематическую погрешности, получаем для наилучших значений

$\omega_{dt} = (0,57 \pm 0,05)\%$  - методом выжившего мюона, и

$\omega_{dt} = (0,56 \pm 0,04)\%$  - методом анализа спектров первых синтезов.



**Коэффициент прилипания  $\omega_{dt}$  – окончательный результат.**

**В 1999 г. в результате более точного учёта рекомбинации ионизационных зарядов в конце треков заряженных частиц  $\alpha\mu$  и изменения поправки, учитывающей события с реактивацией мюона, было получено окончательное значение коэффициента прилипания**

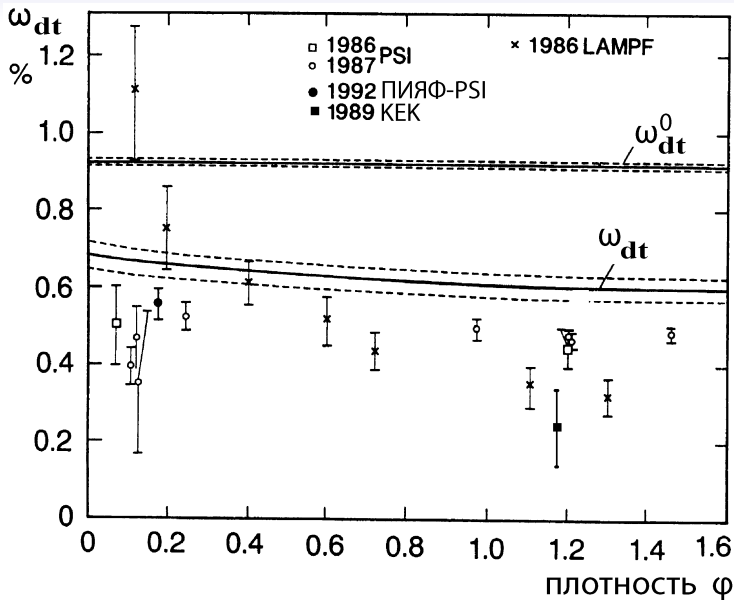
$$\omega_{dt}(exp) = (0,58 \pm 0,04)\%$$

Результаты теории: вычисленные значения коэффициента прилипания и вероятности реактивации мюона в  $d\mu d$  катализе.

Авторы	год	$\omega_{dd}^0$ , %	R( $\varphi=1,2$ )	R(при низкой плотности)
Jackson	1957	16	0,04	
Герштейн и др.	1981	15,5	0,05	
Bogdanova et al.	1985	13,7(*)		
Hu and Kaufmann	1987	13,08		
Heywood et al.	1991	13,40		
Абрамов и др.	1996	13,96		
Frolov	2001	14,0423		
Меньшиков и Пономарёв	1985		0,17	0,07( $\varphi=0,07$ )
Struensee, Cohen	1988		0,18	0,104( $\varphi=0,07$ )
Markushin	1988		0,17	0,10( $\varphi=0,1$ )
Takahashi	1988		0,14	0,11( $\varphi=0,1$ )

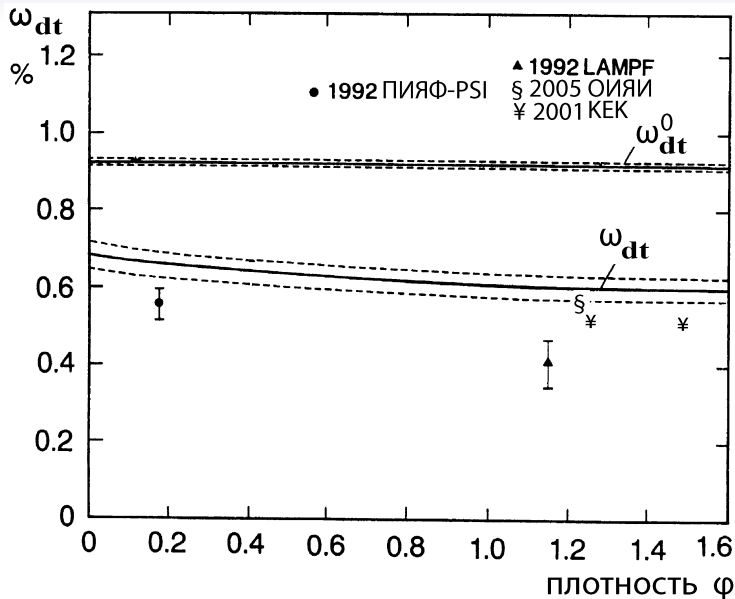
Сравнение последних из приведённых в таблице значений  $\omega_{dd}^0=0,14$  с учётом реактивации  $R=0,1\pm 0,01$  с нашим результатом показывает, что теоретические предсказания с ним совпадают.

# Результаты измерений $\omega_{dt}$ до 1989 г.

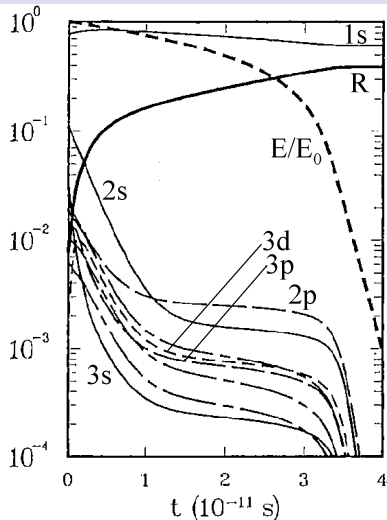
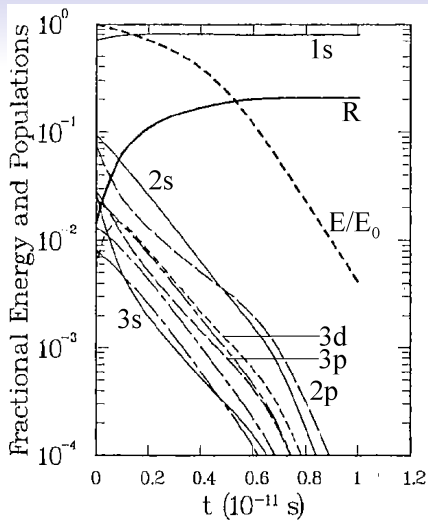


Противоречивая картина.

# Результаты измерений $\omega_{dt}$ после 1989 г.



Согласие удовлетворительное.



Кинетика стряхивания мюона с ионов  ${}^3\text{He}\mu$  в реакции  $d\mu d$  (слева) и  ${}^4\text{He}\mu$  в реакции  $d\mu t$  (справа) при плотности среды  $\varphi = 1,2\text{LHD}$ . Указаны: вероятность стряхивания  $R$ , доля оставшейся кинетической энергии  $E/E_0$ , заселённости состояний.

**ЗАЩИЩАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. (1).** Новый метод измерения коэффициента прилипания мюона к образующемуся в реакции синтеза ядру гелия, основанный на различии рекомбинации ионизационных зарядов в треках одно и двухзарядных ионов  ${}^3\text{He}\mu^+$  ( ${}^4\text{He}\mu^+$ ) и  ${}^3\text{He}^{++}$  ( ${}^4\text{He}^{++}$ ) при их торможении в плотных газообразных смесях изотопов водорода.

**(2).** Впервые прямым методом измеренное значение

$$\omega_{dd} = 0,122 \pm 0,003 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,1(LHD)$$

и её уточнённые значения, полученные при других значениях плотности дейтерия с целью сравнения с теорией:

$$\omega_{dd} = 0,1224 \pm 0,0006 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0837 \quad \text{и}$$

$$\omega_{dd} = 0,1234 \pm 0,0007 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0485.$$

**(3).** Впервые измеренное прямым методом значение вероятности прилипания мюона к продуктам  $dt\mu$  синтеза:

$$\omega_{dt} = 0,0058 \pm 0,0004.$$

# Experimental survey of the sticking problem in muon catalyzed dt fusion

C. Petitjean <sup>a</sup>, D.V. Balin <sup>b</sup>, V.N. Baturin <sup>b</sup>, P. Baumann <sup>c</sup>, W.H. Breunlich <sup>d</sup>,  
T. Case <sup>e</sup>, K.M. Crowe <sup>e</sup>, H. Daniel <sup>c</sup>, Yu.S. Grigoriev <sup>b</sup>, F.J. Hartmann <sup>c</sup>,  
A.I. Ilyin <sup>b</sup>, M. Jeitler <sup>d</sup>, P. Kammel <sup>d</sup>, B. Lauss <sup>d</sup>, K. Lou <sup>a</sup>, E.M. Maev <sup>b</sup>,  
J. Marton <sup>d</sup>, M. Mühlbauer <sup>c</sup>, G.E. Petrov <sup>b</sup>, W. Prymas <sup>d</sup>, W. Schott <sup>c</sup>,  
G.G. Semenchuk <sup>b</sup>, Yu.V. Smirenin <sup>b</sup>, A.A. Vorobyov <sup>b</sup>,  
N.I. Voropaev <sup>b</sup>, P. Wojciechowski <sup>c</sup> and J. Zmeskal <sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Paul Scherrer Institute (PSI), CH-5232 Villigen PSI, Switzerland*

<sup>b</sup> *Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina 188350, Russia*

<sup>c</sup> *Physics Department, Technical University Munich (TUM),  
D-8046 Garching, Germany*

<sup>d</sup> *Austrian Academy of Sciences, Institute for Medium Energy Physics (IMEP),  
A-1090 Vienna, Austria*

<sup>e</sup> *Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) and UCB, Berkeley, CA 94720, USA*

## Выводы

- впервые проведены прямые измерения важнейших параметров мюонного катализа dd и dt-синтеза – коэффициентов прилипания мюонов  $\omega_{dd}$  и  $\omega_{dt}$ .
- Высокая точность результатов позволила проверить теоретические модели, описывающие процессы  $dd\mu$  и  $dt\mu$  синтеза и “стряхивания” мюонов при торможении ионов  $(^3\text{He}\mu)^+$  и  $(^4\text{He}\mu)^+$  в среде.
- Согласие полученных в наших экспериментах значений коэффициентов прилипания с результатами теоретических расчётов можно считать хорошим; это согласие для коэффициента  $\omega_{dt}$  было достигнуто постепенно в ходе усовершенствований теоретических методов, проверяемых сравнением результатов расчётов с нашим экспериментальным значением  $\omega_{dd}$ .
- измеренные в диссертации конечные значения коэффициентов прилипания  $\omega_{dd}$  и  $\omega_{dt}$  позволяют определить физический предел числа актов синтеза, генерируемых одним мюоном, и оценить возможность использования МК в практических целях.
- Цели диссертации были достигнуты благодаря использованию нового детектора, построенного на основе ионизационной камеры высокого давления, соединяющего в себе функции активной мишени и детектора заряженных продуктов синтеза.



- Отличительной особенностью методики ионизационной камеры от методики регистрации нейтронов для изучения  $dd$  и  $dt$ -синтеза является её  $4\pi$  геометрия и 100% эффективность. Это позволило регистрировать последовательные акты синтеза, вызванные одним мюоном, что было затем использовано при анализе данных. Исследование условий работы нового детектора позволило реализовать и новый метод измерения коэффициентов прилипания, использующий различную степень рекомбинации ионизационных зарядов – от торможения в среде однозарядных частиц ( ${}^3\text{He}\mu$ )<sup>+</sup>, ( ${}^4\text{He}\mu$ )<sup>+</sup> и двухзарядных ( ${}^3\text{He}$ )<sup>++</sup> и ( ${}^4\text{He}$ )<sup>++</sup> продуктов синтеза в условиях высокого давления в ИК.
- Благодаря разной степени рекомбинации, регистрируемые энергии частиц также различаются, что дало возможность прямого подсчёта событий с прилипанием.
- Метод измерения и построенная на основе ионизационной камеры экспериментальная установка являются уникальными и остаются до сих пор единственными в мире. Использование в камере тройной  $N/D/T$  смеси при давлении  $\sim 170$  атм., высокого напряжения до 50 кВ и высокого вакуума  $10^{-6} \div 10^{-7}$  мбар в охранном объёме, где размещалась камера, делает обеспечение её работоспособности весьма трудной технической задачей. Камера измеряла до 20 параметров сигналов по каждому из 19 анодов. Для анализа поступающей информации в ПИЯФ была создана программа обработки сигналов в условиях наложенного тритиевого шума.

- Использование в эксперименте также и нейтронных детекторов позволило обнаружить новый (эпитермальный) канал образования  $dt\mu$  молекул на молекулах  $HD$ , идущий со скоростью на порядок большей, чем скорость образования  $dt\mu$  - молекул термализованными  $t\mu$ -атомами.
- Обнаружение нового механизма указало на важность изучения начальной стадии образования мезоатомов и необходимость учета высоколежащих резонансов в сечении образования  $dt\mu$  молекул.
- Важной и до конца не решённой проблемой остается измерение начальных коэффициентов прилипания  $\omega_{dd}^0$  и  $\omega_{dt}^0$ . Измерение этих коэффициентов позволит определить детали процесса торможения ионов  $({}^3\text{He}\mu)^+$  и  $({}^4\text{He}\mu)^+$  и стряхивания мюонов, особенно при высоких плотностях среды.