

*КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА МЮОННОГО КАТАЛИЗА  
dd- СИНТЕЗА  
В  $D_2$ ,  $H_2 + D_2$  И HD ГАЗАХ*

Г.Г.Семенчук, ПИЯФ  
semench@npi.spb.ru

ПИЯФ 12 ноября 2013

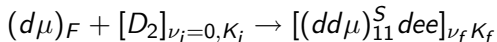
**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.** В диссертации представлены результаты выполнения в ОФВЭ ПИЯФ РАН программы прецизионных измерений параметров мюонного катализа ядерного  $dd$ -синтеза в  $D_2$ ,  $H_2 + D_2$  и  $HD$  газах. В рамках этой программы были измерены:

- (1) скорость резонансного образования  $dd\mu$  молекул из двух спиновых состояний  $d\mu$ -атомов ( $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$  и  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$ ) в диапазоне температур 28 - 350 К,
- (2) скорость переворота спина  $d\mu$ -атомов ( $\lambda_{3/2 \rightarrow 1/2}$ ) в  $D_2$  и  $HD$  газах,
- (3) скорость нерезонансного образования  $dd\mu$  молекул ( $\lambda_{dd\mu}^{nr}$ ),
- (4) отношение зарядово-симметричных каналов  $dd$ -синтеза  $R(T) = Y(^3He+n)/Y(^3H+p)$ ,
- (5) коэффициент прилипания мюонов  $\omega_{dd}$ .

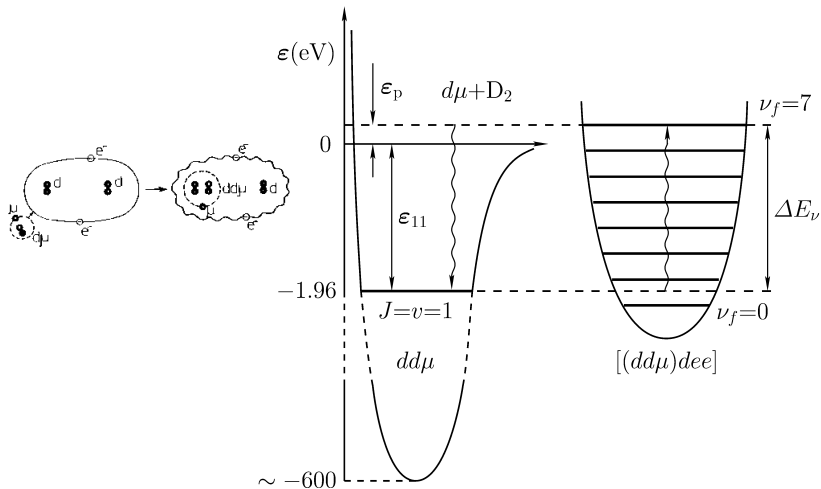
Основной задачей исследований было определение энергии слабосвязанного уровня  $\varepsilon_{11}$  у  $dd\mu$  молекул и сравнение полученного значения с теоретическими расчетами.

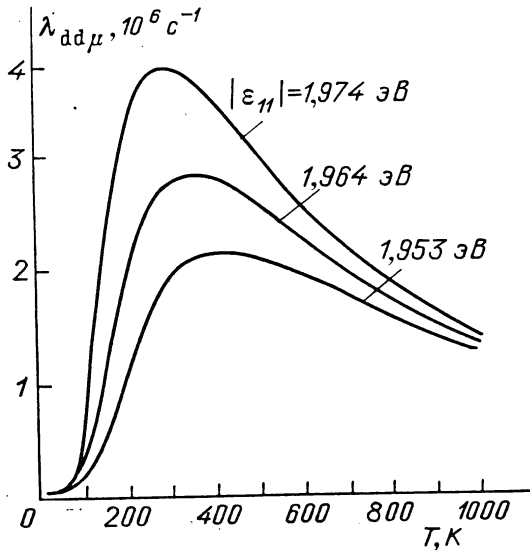
**Актуальность проблемы** связана с детальным исследованием резонансного механизма образования  $dd\mu$  и  $dt\mu$  молекул, благодаря наличию в них слабосвязанных уровней с энергией  $\varepsilon_{11} = -1,96$  эВ и  $-0,66$  эВ, соответственно. Результатом этого является высокая скорость образования указанных молекул, которая у  $dt\mu$  молекул в  $\sim 200$  раз выше скорости распада мюона, а малая величина коэффициента прилипания мюонов  $\omega_{dt} \sim 0,6\%$  делает обоснованными теоретические оценки возможного практического применения мюонного катализа для производства ядерного топлива и создания интенсивных источников нейтронов.

# Схема резонансного образования молекулы $dd\mu$ .



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





1 мэВ  $\sim$  6,5 К

$\sim$  7%

величины

$\lambda_{dd\mu}$

реализована

точность

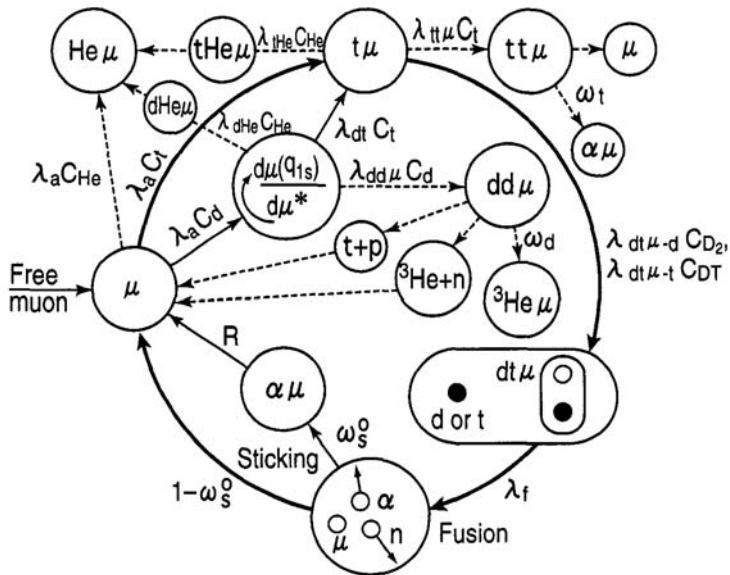
$\pm 0,2 \text{ К}$  и

1%  $\lambda_{dd\mu}$

## Процессы, составляющие мюонный катализ

- Образование мезоатомов при торможении мюонов в водороде
- Девозбуждение в основное состояние
- Процессы рассеяния в среде, приводящие к замедлению
- Изотопный обмен, т.е. переход мюона к ядру более тяжелого изотопа водорода  $p\mu \rightarrow d\mu \rightarrow t\mu + E$  (переход необратим)
- Переход мезоатомов в нижнее состояние сверхтонкой структуры  $d\mu(F=3/2) + d \Leftrightarrow d\mu(F=1/2) + d$  ( $E=0.0485$  eV).
- Необратимый перехват мюонов на ядра с  $Z>1$  (очистка от примесей)
- Образование мезомолекул -  $pd\mu$ ,  $pt\mu$ ,  $dt\mu$ ,  $tt\mu$ ,  $dd\mu$  и ядерный синтез в них,
- Страхивание мюонов в процессе торможения мезоатомов гелия в среде

# Кинетика МК в D/T смеси



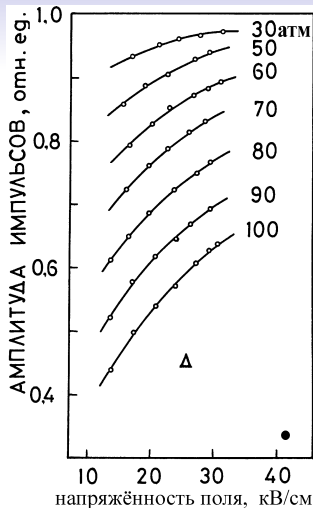
Явление мюонного катализа как физический процесс было предложено в 1947 г. (С. Frank,  $d\mu + p \rightarrow {}^3\text{He} + \mu + 5,3\text{MeV}$ ),

- 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 ГКАЭ 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.

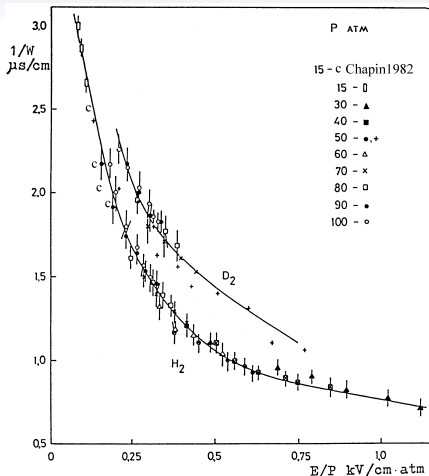


## Основные характеристики ИК высокого давления для изучения реакции $d\mu d$ .

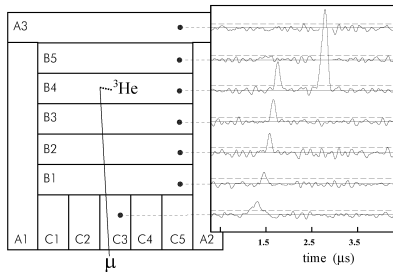
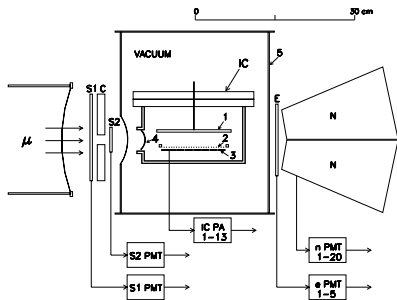
- 4- $\pi$  геометрия и 100% эффективность регистрации заряженных продуктов синтеза. Надёжное определение оставок мюонов (абсолютная нормировка) и измерение их z-координаты в объёме ИК,
- Малые пробеги продуктов синтеза  
 $\Rightarrow$  быстроедействие  $\sim 200$  нс и возможность наблюдать циклирование реакций синтеза в окне  $\sim 10$  мкс.
- Имелся большой опыт методики ионизационных камер:  
камера ИКАР,  $H_2$ ,  $D_2$  10 атм  
A.A.Vorobyov *et al.*, Phys.Lett. B41(1972)639,  
NIM 119(1974)509.

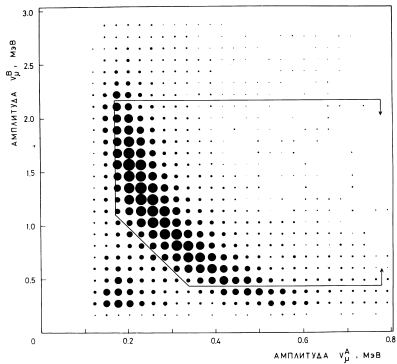


Рекомбинация иониз. зарядов от  $\alpha$ -частиц  $^{234}\text{U}$  в  $\text{D}_2$  при 90 атм.  $\sim 40\%$  (регистрируемая энергия: 4,78 МэВ  $\rightarrow$  2,8 МэВ)  
 $\Rightarrow$  РЕГИСТРАЦИЯ ПРИ 100 атм ВОЗМОЖНА. Этот результат стал основной метода.

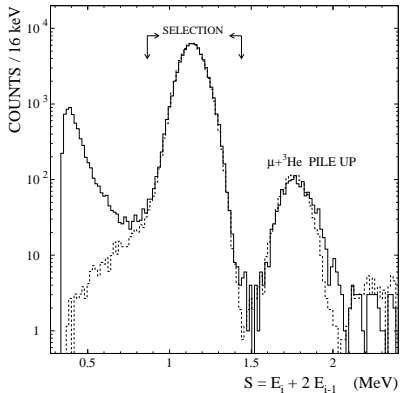


В 2-электродной ИК измерялось время нарастания импульсов от  $\alpha$ -частиц  $^{234}\text{U}$  источника на катоде ( $E=4,78$  МэВ).

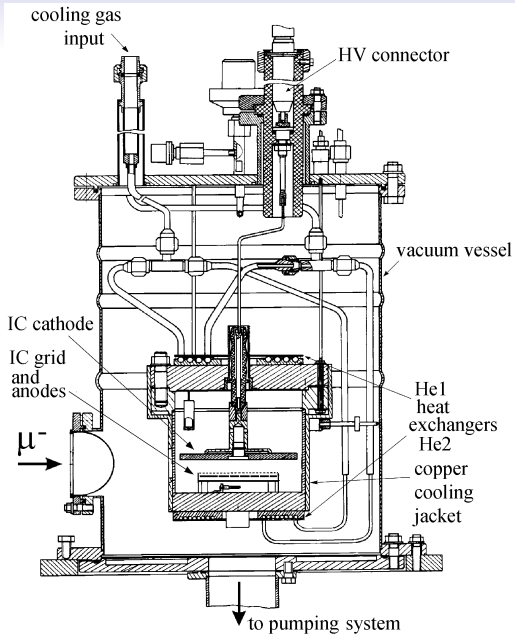




1982-84. Аноды А и В как  $\Delta E \times E$ -детектор мюонов.



1994-96.  
Распределение мюонных сигналов по переменной  $S = E_i + 2E_{i-1}$  с триггерами  $E_L$  и  $E_L \cdot E_L$ .



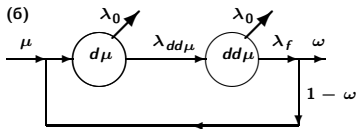
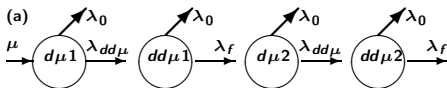
He<sup>++</sup> и He $\mu$ <sup>+</sup>

В предложенном методе используется не разница пробегов частиц, а **разница рекомбинационных потерь ионизации**, произведённой двух- и однозарядными частицами, которая проявляется только при высоких давлениях газа в ИК

$$dE/dx \sim Z^2$$

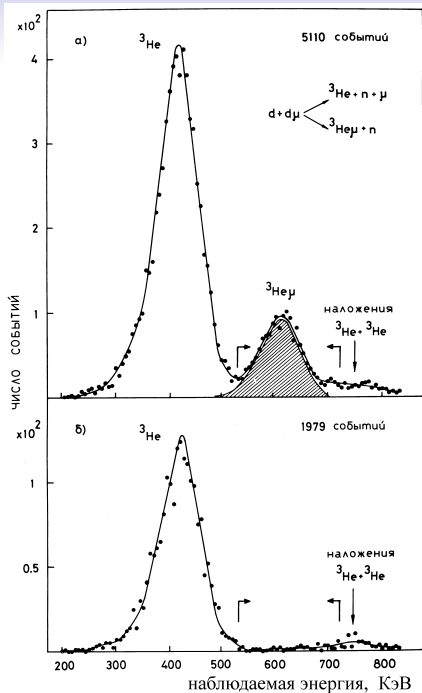
В результате частицы He и He $\mu$ , имеющие одинаковую начальную энергию, “раздвигаются” в энергетическом спектре, это позволяет с высокой точностью определить число событий с прилипанием – прямым подсчётом.

Возможность регистрации **последовательных циклов** катализа, вызванных остановившимся в камере мюоном.



$$\begin{aligned}
 dN_{F1}/dt &= N_{\mu} \cdot \lambda_{dd\mu} \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \\
 dN_{F2}/dt &= N_{\mu} \cdot \lambda_{dd\mu}^2 \cdot (1 - \tilde{\omega}) \cdot t \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \\
 &\dots \\
 dN_{Fj}/dt_j &= N_{\mu} \cdot (\lambda_{dd\mu})^j \cdot (1 - \tilde{\omega})^{j-1} \cdot t^{j-1} \cdot \exp(-\lambda \cdot t) / (j-1)!
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 dN_{\Sigma F}/dt &= dN_{(F1+F2+\dots+Fj)}/dt = N_{\mu} \cdot \lambda_{dd\mu} \cdot \exp(-\lambda_{\Sigma} \cdot t) \\
 \lambda_{\Sigma} &= \lambda_0 + \lambda_{dZ} + \tilde{\omega} \lambda_{dd\mu}.
 \end{aligned}$$



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

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

$W_{pu} = 5 \div 7\%$  – 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

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

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

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



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

Давление(атм)	Температура (К)	$\lambda_{dd\mu}^0$ ( $10^6\text{с}^{-1}$ )	$\omega_{dd}$	$R = \frac{({}^3\text{He}+n)}{(t+p)}$
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:

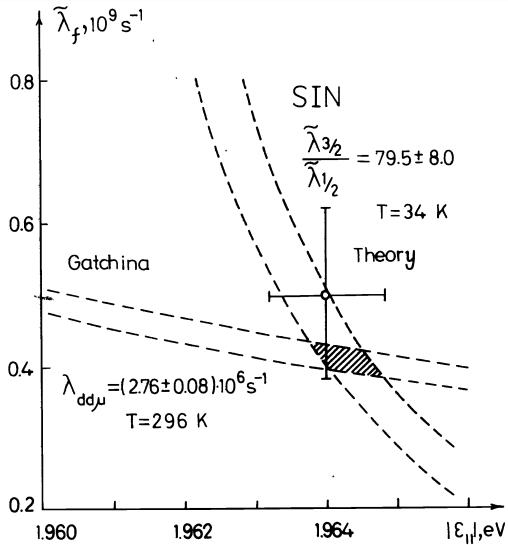
$$\omega_{dd} = 0.1224 \pm 0,0006 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0837$$

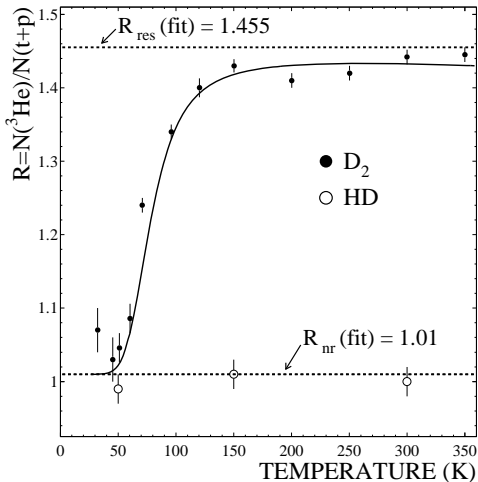
$$\omega_{dd} = 0.1234 \pm 0,0007 \quad \text{при} \quad \varphi = 0,0485$$

**Сравнение с теорией:** вычисленные значения коэффициента прилипания и вероятности реактивации мюона в  $d\mu d$  катализе.

Авторы	год	$\omega_{dd}^0$ , %	$R(\varphi=1,2)$	$R(\text{при низкой плотности})$
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 усреднённого по последним результатам значения  $\omega_{dd}^0 \text{ theor} = 0,1364$  с учётом реактивации  $R=0,1 \pm 0,01 \Rightarrow \omega_{dd}^0 \text{ theor} = 0,123$  с нашим результатом показывает, что они совпадают в пределах погрешности измерения.





1984 нами обнаружено:

$$R = \frac{Y_n}{Y_p} = 1.39 \pm 0,04$$

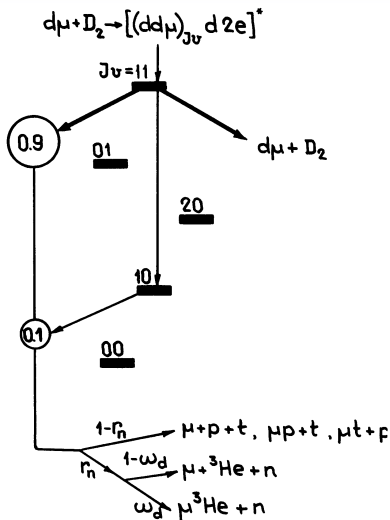
1981 Антоненко и др.:

$$\frac{\sigma_1(n)}{\sigma_1(p)} \approx 1,46 \text{ при } E \rightarrow 0.$$

1990 R.Hale: анализ ядра  $^4\text{He}$  для P- и S-волнового dd-взаимодействия  $\Rightarrow R_{L=1} \approx 1,43$  и  $R_{L=0} \approx 0.886$

2001 подтверждено существование нового возбуждённого уровня  $[1^-, T=0]$  ядра  $^4\text{He}$  с энергией 24,25 МэВ.

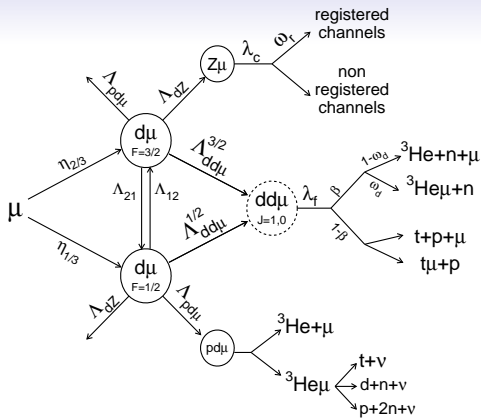
Смешивание с уровнем  $[1^-, T=1]$  с энергией 23,64 МэВ усиливает вклад P-волны.



## Процессы в мезомолекулярных комплексах

- dd-синтез в P-волне  
 $\lambda_f \approx 0,44 \cdot 10^9 \text{c}^{-1}$
- E0-переходы между (1,1) и (1,0)  $\Gamma_{dex} \approx 0,02 \cdot 10^9 \text{c}^{-1}$
- **обратный распад на  $d\mu + D_2$**   
 $\Gamma^{SF} \approx 0,6 \cdot 10^9 \text{c}^{-1}$  подавляет скорость синтеза на фактор

$$\frac{\tilde{\lambda}_f}{\tilde{\lambda}_f + \sum_F \Gamma^{SF}}$$



$$\lambda_{dd\mu}^{1/2}, \lambda_{dd\mu}^{3/2}, \lambda_{21}, R = \frac{\beta}{1 - \beta}$$

$$\widetilde{\lambda}_{dd\mu}^F = \lambda_{dd\mu}^{nr} + (\widetilde{\lambda}_{dd\mu}^F)^{res}$$

$$(\widetilde{\lambda}^F)^{res} = \sum_S \frac{\lambda^{FS} \cdot \lambda_f}{\lambda_f + \Gamma_S}$$

$$\widetilde{\lambda}_{21} = \lambda_{21}^{SC} + \lambda_{21}^{BD}$$

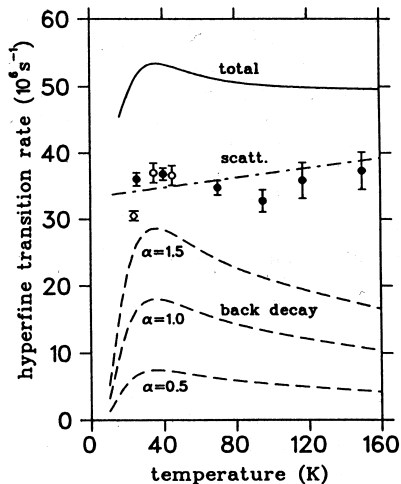
$$\lambda_{21}^{BD} = \sum_S \frac{\lambda^{FS} \cdot \Gamma^{SF}}{\lambda_f + \Gamma_S}$$

$$\frac{dN_{3/2}}{dt} = -(\lambda_0 + \Lambda_{21} + \Lambda_{dd\mu}^{3/2} + \Lambda_{dZ} + \Lambda_{pd\mu})N_{3/2} + \Lambda_{12}N_{1/2}$$

$$\frac{dN_{1/2}}{dt} = -(\lambda_0 + \Lambda_{12} + \Lambda_{dd\mu}^{1/2} + \Lambda_{dZ} + \Lambda_{pd\mu})N_{1/2} + \Lambda_{21}N_{3/2}$$

$$\lambda_{K_i K_f}^{FS} = 2\pi N_0 \frac{(2S + 1) W_{SF} f(\epsilon_{res}, T)}{(2F + 1)(2S_d + 1)} |V_{if}(\epsilon_{res})|^2 \quad (2a)$$

$$\Gamma_{K_f K_i}^{SF} = \frac{(\mu^3 \epsilon_{res})^{1/2}}{\pi} \frac{(2K_i + 1) W_{SF}}{(2K_f + 1)(2J + 1)} |V_{if}(\epsilon_{res})|^2. \quad (2b)$$



1983 первое наблюдение  
переворота спина  $d\mu$  атома

PSI-Vienna Phys.Rev.A28(1983)2611

$\widetilde{\lambda}_{21} = (37,0 \pm 1,5) \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 34 \text{ K}$

1990 измерение темп. зависимости

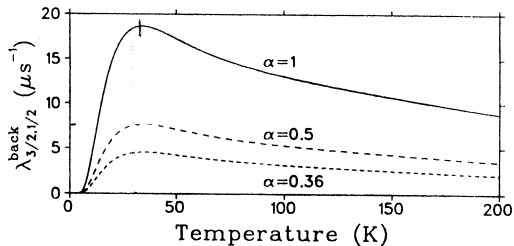
$\widetilde{\lambda}_{21}(T)$  ( $25 \div 150 \text{ K}$ )

Phys.Rev.A42(1990)1165

данные ПИЯФ МСФ5/6(1990/91)163

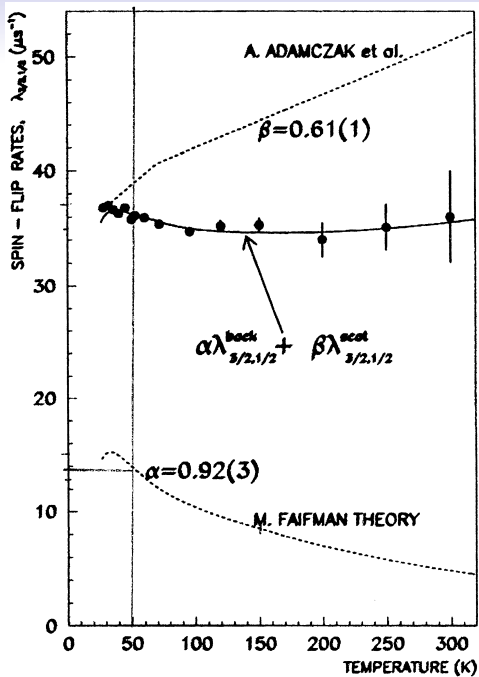
$\widetilde{\lambda}_{21} = (37,5 \pm 1,5) \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 50 \div 160 \text{ K}$





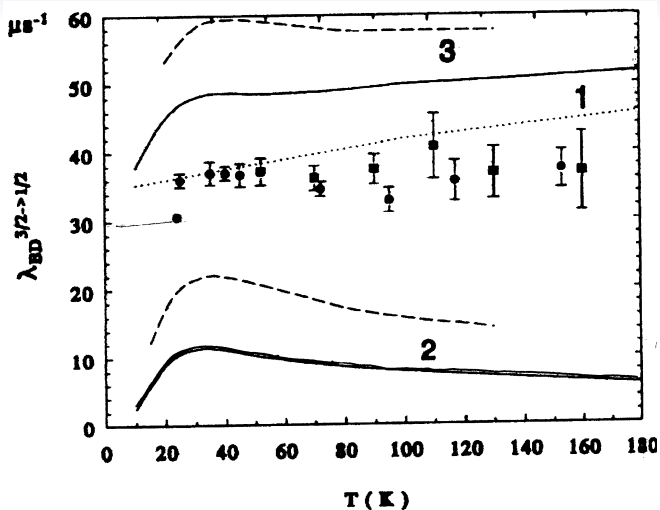
нормировочный  
параметр  $\alpha$   
 $|V_{if}|^2 \rightarrow \alpha |V_{if}|^2$

$\alpha = 1 \rightarrow$   
 $\lambda_f = 314(33) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$   
 $\alpha = 0,5 \rightarrow$   
 $\lambda_f = 386(51) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$   
 $\alpha = 0,36 \rightarrow$   
 $\lambda_f = 461(87) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$



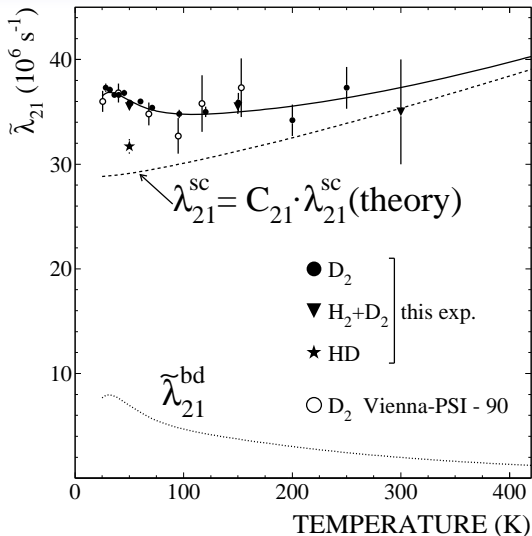
$$\lambda_{D_2}^{SC} = (23,6 \pm 0,4) \text{ MKC}^{-1}$$

$$\lambda_{D_2}^{BD} = (12,9 \pm 0,4) \text{ MKC}^{-1}$$



V.V.Kuzminov, Yu.V.Petrov, V.Yu.Petrov

Hyperfine Int. 101/102(1996)197, Phys.Rev.A57(1998)1636.



Разделение двух скоростей:

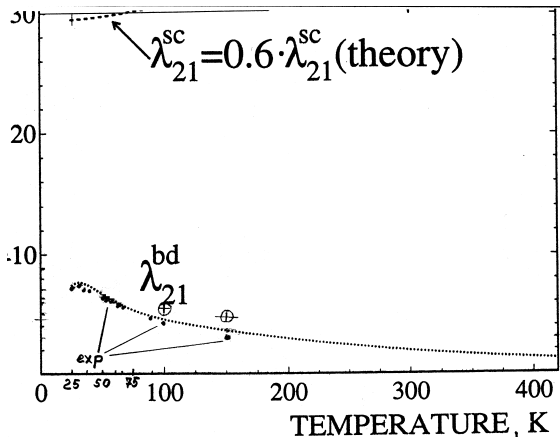
$\lambda_{21}^{bd} \sim C_{D_2}$  и  $\lambda_{21}^{sc} \sim c_d$   
 смесь H<sub>2</sub>+D<sub>2</sub>,  
 $c_d = C_{D_2} = 0,5$   
 смесь H<sub>2</sub>+D<sub>2</sub>+2HD,  
 $C_{D_2} = 0,25$

$$\lambda_{21}^{n-eq} = \lambda_{21}^{bd}(D_2) + \lambda_{21}^{sc}(D_2)$$

$$\lambda_{21}^{eq} = \frac{1}{2}(\lambda_{21}^{bd}(D_2) + \lambda_{21}^{sc}(D_2)) + \lambda_{21}^{sc}(HD)$$

получаем

$$\lambda_{21}^{sc}(HD) = (31,7 \pm 0,7) \cdot 10^6 c^{-1}$$



Получено:

$$\lambda_{21}^{sc}(HD) = (31,7 \pm 0,7) \cdot 10^6 \text{ c}^{-1} \quad (50 \text{ K})$$

используем

$$\lambda_{HD}^{sc} / \lambda_{D_2}^{sc} = 1,072$$

или 1,056

( $\Delta \approx 1,5\%$ )

$$\sqrt{\frac{M_{D_2}}{M_{HD}}} = \sqrt{\frac{2537 m_e}{2275 m_e}} = 1,056$$

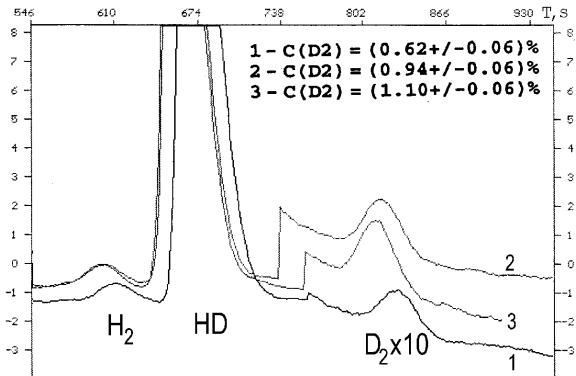
$$\Rightarrow \lambda_{D_2}^{sc} = 29,6 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$$

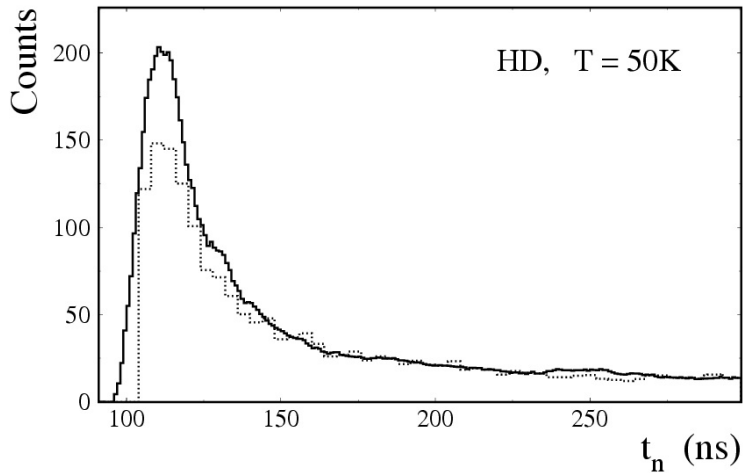
$$\lambda_{21}^{bd}(T) = \widetilde{\lambda}_{21}(D_2) - \lambda_{21}^{sc}(D_2)$$

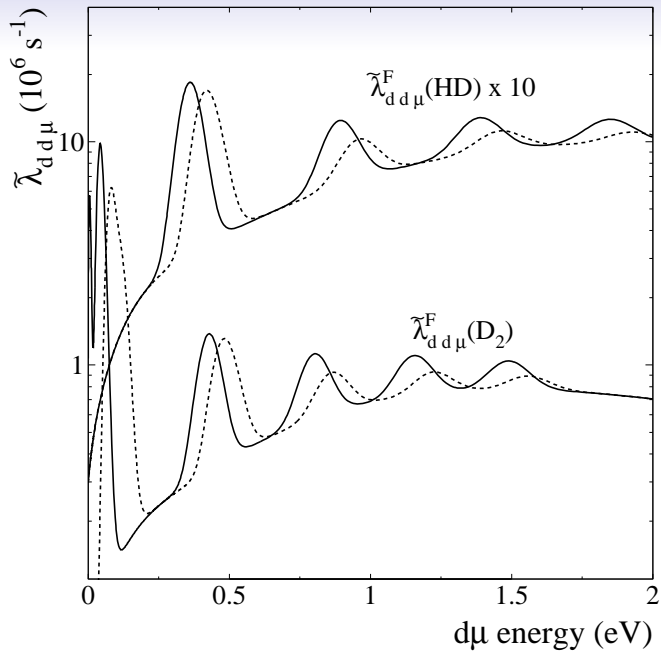
*Таблица:* Впервые измеренные скорости образования молекул  $dd\mu$ , переворота спина ( $10^6\text{s}^{-1}$ ) и соотношение каналов в газе HD.

T(K)	$\varphi(\%)$	$\lambda_{dd\mu}^{HD}$	$\lambda_{21}$	R	$C_{D_2}(\%)$	$C_{D_2}^{chr}(\%)$
300.3	4.87	0.119(6)	32.2 (fix)	1.00(2)	0.82(8)	0.78
150.3	4.78	0.080(3)	32.2 (fix)	1.01(2)	1.06(5)	1.02
50.2	4.74	0.056(8)	32.2 (1.7)	0.99(2)	1.16(3)	1.10

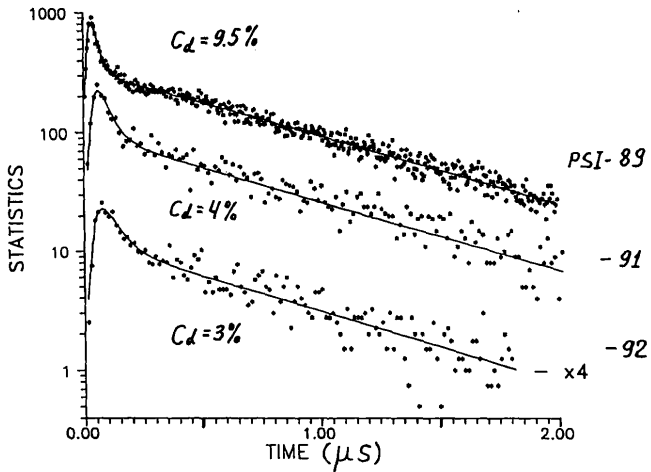
$$\lambda_{dd\mu}(HD) = (2,57 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,039) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$$











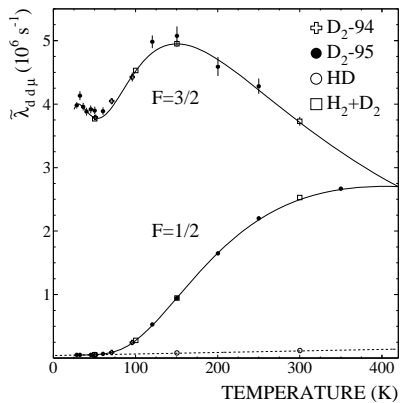
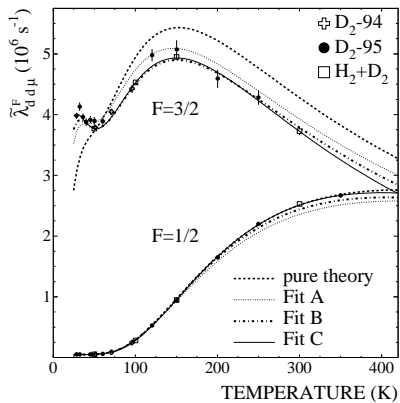
*Таблица:*

Нерелятивистские  
уровни энергии  $|\epsilon_{J\nu}|$   
молекулы  $dd\mu$

$(J, \nu)$	Энергия связи (эВ)
(0,0)	325,074
(0,1)	35,844
(1,0)	226,682
<b>(1,1)</b>	<b>1,974985</b>
(2,0)	86,494

*Таблица:* Поправки к нерелятивистской  
энергии связи  $\epsilon_{11}$  (мэВ)

Поляризация вакуума	8.62
Электромагн. структура ядер	-1,67
Рел. поправки	+1,65
Конечный размер	+1,85
Поляризация ядер	-0,1
Суммарный сдвиг уровня	+10.35
Уровень с учётом поправок	<b>-1964,64</b>



*Таблица:* Theoretical parameters extracted from the fit to the measured rates  $\tilde{\lambda}_{dd\mu}^{3/2}(T)$ ,  $\tilde{\lambda}_{dd\mu}^{1/2}(T)$ ,  $\tilde{\lambda}_{21}(T)$ ; Ortho/Para=2.4/1; 28<T<350 K

Parameter	Theory	Fit A	Fit B	Fit C
$\epsilon_{11}(\text{eV})$	-1.9646	-1.96558(4)	-1.96511(4)	-1.96460(23)
$\tilde{\lambda}_f(10^6\text{s}^{-1})$	460	381(5)	375(7)	388(12)
$C_m$	1.	1.06(2)	0.90(2)	0.83(2)
$C_{21}$	1.	0.50(1)	0.56(1)	0.59(1)
$C_F$	1.	-	-	1.018(3)
$C_S$	1.	-	-	0.990(11)
$C_{MD}$	1.	-	0.834(5)	0.73(2)
$\chi^2$	-	310/(45-4)	112/(45-5)	47.5/(45-7)
$\chi^2/d.o.f.$	-	7.6	2.8	1.25

*Таблица:* Результаты анализа  $\epsilon_{11}$  (эВ) и  $\lambda_f (\cdot 10^6 \text{с}^{-1})$

Год	Теория		Fit	
	$\epsilon_{11}$	$\lambda_f$	$\epsilon_{11}$	$\lambda_f$
1978(ОИЯИ)	-1,96		-2,196	
1990(ПИЯФ)	-1,965	390	-1,965(1)	
1993(Вена)	-1,9662	460	-1,9661(2)	314(40)
2001(ПИЯФ)	-1,9648	460	-1,9626(3)	407
2011(ПИЯФ)	-1,9646	460	-1,9651(7)	381(15)

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = 3,5 \cdot 10^{-4}$$

## Основные результаты диссертации

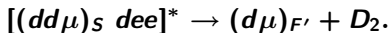
1. **Разработан и успешно применен новый метод** исследования явления мюонного катализа ядерного dd и dt-синтеза, основанный на использовании ионизационной камеры высокого давления в качестве активной мишени и детектора заряженных продуктов синтеза.

2. **Реализован новый метод измерения коэффициента прилипания мюонов**, использующий различную степень рекомбинации ионизационных зарядов от однозарядных  $({}^3\text{He}\mu)^+$ ,  $({}^4\text{He}\mu)^+$  и двухзарядных  $({}^3\text{He})^{++}$  и  $({}^4\text{He})^{++}$  продуктов синтеза. Развитый метод является уникальным и не имеет аналогов в мире. Полученные с его помощью значения конечных коэффициентов прилипания позволяют определить физический предел числа актов синтеза, вызванных одним мюоном, и оценить тем самым возможность практической применимости мюонного катализа.

3. В результате фитирования экспериментальных зависимостей  $\tilde{\lambda}_{dd\mu}^F(T)$  и  $\tilde{\lambda}_{21}(T)$  **определена энергия слабосвязанного уровня  $dd\mu$  молекулы  $\varepsilon_{11}(fit) = -1,9651(7)$  эВ**, оказавшаяся в удивительной близости к теоретической величине  $\varepsilon_{11}(theory) = -1,9646(4)$  эВ. Достигнутое совпадение демонстрирует правомерность теоретических расчетов как нерелятивистской части  $\varepsilon_{11}$ , так и релятивистских поправок к этой величине и подтверждает теорию резонансного образования  $dd\mu$  молекул.

4. **Впервые обнаружена асимметрия в выходах** двух зарядово-симметричных каналов в процессе  $dd\mu$  катализа при температуре  $T=300$  К.  $R = ({}^3\text{He} + n) / ({}^3\text{H} + p) = 1,455(11)$ , что связывается с резонансным характером процесса катализа, при котором  $dd$ -синтез реализуется в чистом P-волновом состоянии. Проведенные измерения зависимости  $R(T)$  от температуры показали, что с её уменьшением величина  $R(T)$  стремится к значению  $R \sim 1,0$ , отражая переход к S-волновому  $dd$ -взаимодействию.

5. **Впервые измерены все основные характеристики процесса МК на молекулах HD** Анализ данных показал, что скорость процесса на молекулах HD очень мала ( $< 0,1 \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ ) и слабо растет с температурой в диапазоне  $50 < T < 300 \text{ K}$  в соответствии с нерезонансной теорией мюонного катализа. При этом отношение каналов dd-синтеза во всем температурном диапазоне не меняется и остается равным  $R(T)=1,0$ , что является дополнительным указанием на нерезонансный характер процесса, идущего в S-волне. Во временных распределениях нейтронов обнаружен быстрый пик, вызванный наличием в HD смеси "горячих" (эпитермальных)  $d\mu$  атомов ( $E_{d\mu} > 0,3 \text{ эВ}$ ).
6. Измерена температурная зависимость скорости переворота спина  $d\mu$  атомов в  $D_2$  и HD газах и **впервые определена скорость обратного распада молекулярного комплекса**  $\lambda_{21}^{bd}$



Значение этой скорости при температуре  $T=40 \text{ K}$  составляет  $\lambda_{21}^{bd} \sim 7 \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ , что в 2,2 раза меньше теоретической величины.



***7. Благодаря прецизионности и абсолютному характеру измерений, полученные в диссертации, результаты составили основу мировых данных о параметрах процесса мюонного катализа dd-синтеза.***

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МК

- регистрация нейтронов синтеза (2,5 МэВ или 14 МэВ – ОИЯИ, LAMPF, PSI)

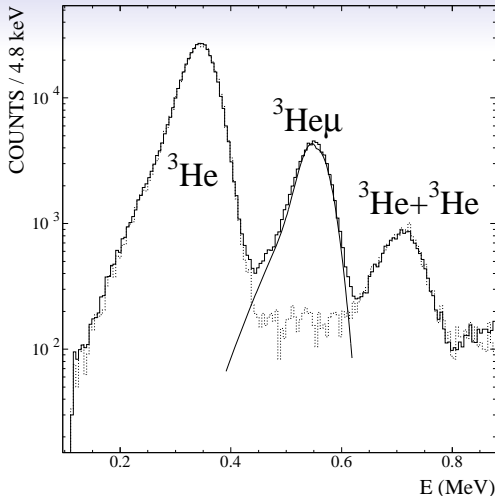
$$dN/dt \sim N_{\mu} \cdot \epsilon_n \cdot \Lambda_c \cdot \exp(-\lambda_n t), \quad \lambda_n = \lambda_0 + (\omega + \epsilon_n) \cdot \Lambda_c$$

$\epsilon_n$  – требуется моделирование.

- рентгеновские кванты,  $\sim 30\%$  прилипания  $\longrightarrow$  в возбуждённые состояния  $He\mu^*$ ,  $E(K_{\alpha})=8,2$  кэВ  
+ регистрация нейтронов

$$Y_x/Y_n = \gamma^{theor} \cdot \omega_s^0 \quad (КЕК)$$

- ионизационные методы:
  - в диффузионной камере (ОИЯИ 1964 г.),
  - плёночные криогенные мишени из изотопов водорода + ППД + дет. нейтронов (TRIUMF, пока не реализован)
  - в газовой мишени низкого давления по разнице пробега, ППД + дет. нейтронов (RAL).
  - ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ПИЯФ – **прямой метод** – ИКАР,  $H_2$  10 атм.

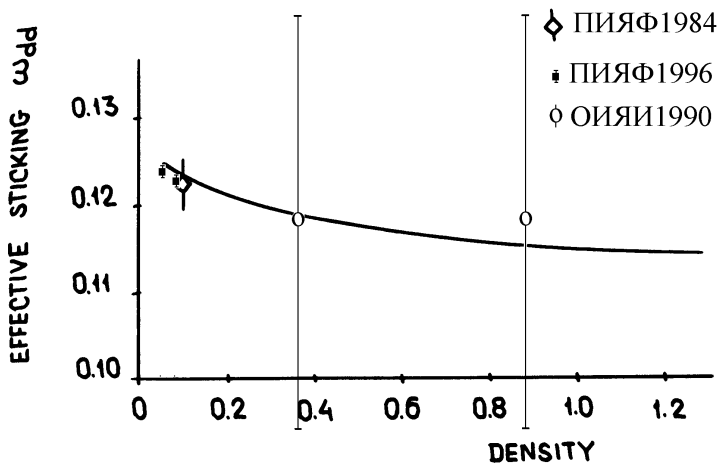


1994-96.

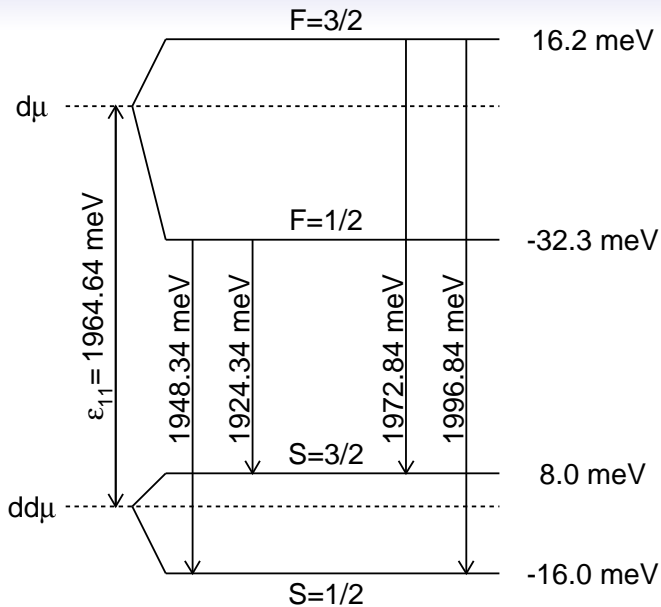
Левая часть энергетического спектра синтезов в дейтерии при  $T=300$  К и  $\varphi=0,0837$ .

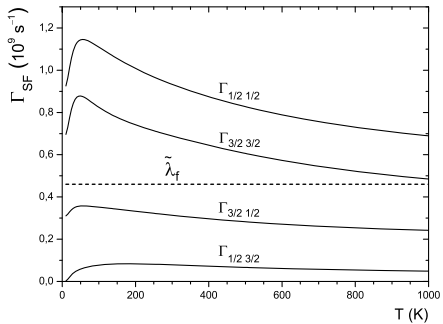
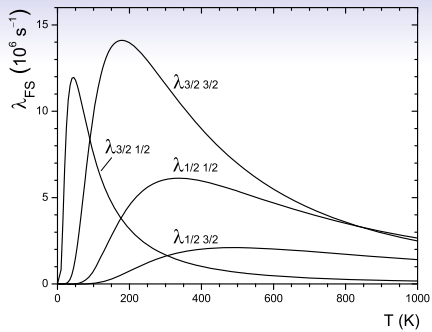
Пунктир – спектр первых синтезов, за которыми имелись последующие. Этот спектр нормирован на исходный спектр всех первых синтезов в области пика  ${}^3\text{He}$ .

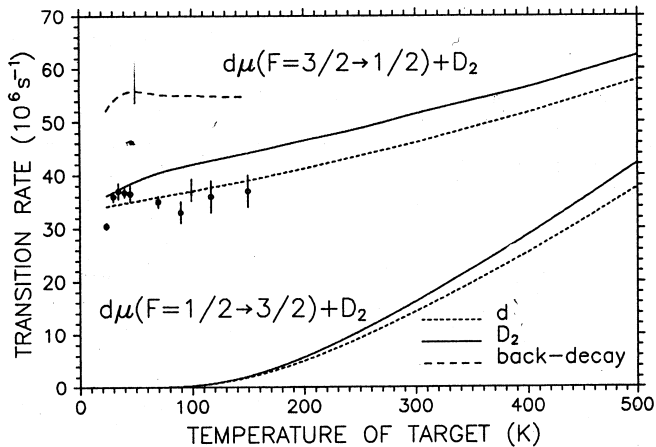
Их разность – события с прилипанием мюона.

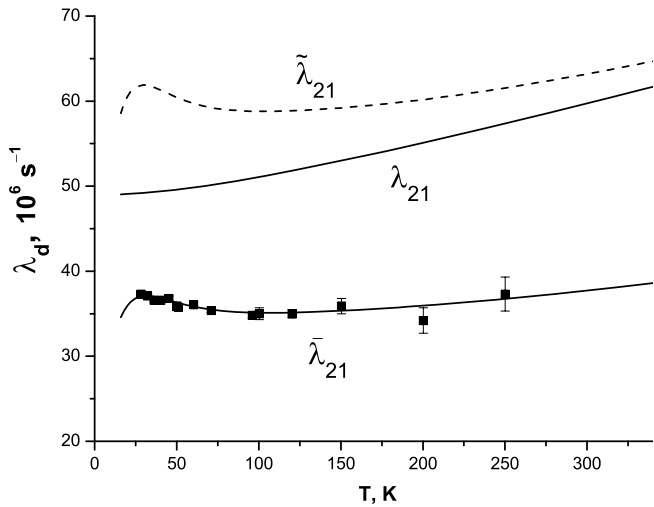


Расчётная зависимость коэффициента прилипания  $\omega_{dd}$  от плотности среды (Markushin, 1988) и экспериментальные точки.  
 (ОИЯИ:  $\omega_{dd} = 0,118 \pm 0,025$ ).











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

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

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

$$W = \omega_{dt} + \text{потери в цикле dd} + \\ + \text{потери в цикле tt} + \frac{\lambda_Z c_Z}{\lambda_c}$$

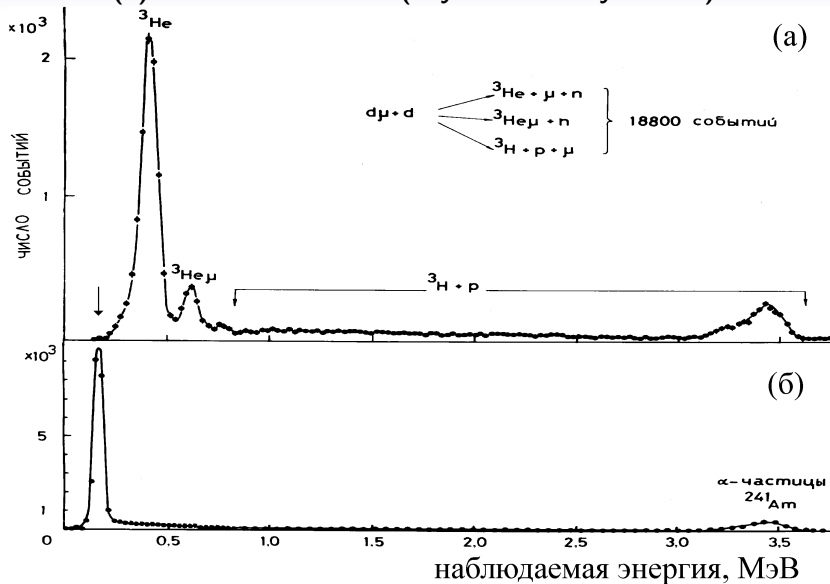
**W** – фактор потерь (“эффективный коэффициент прилипания мюона”) учитывает все каналы потерь мюонов (прилипание в  $d\mu d$  и  $t\mu t$  синтезах) и перехват мюонов на примеси с  $Z>1$ .  $c_Z$  -концентрация примесей.

Оценка предельного значения числа циклов:

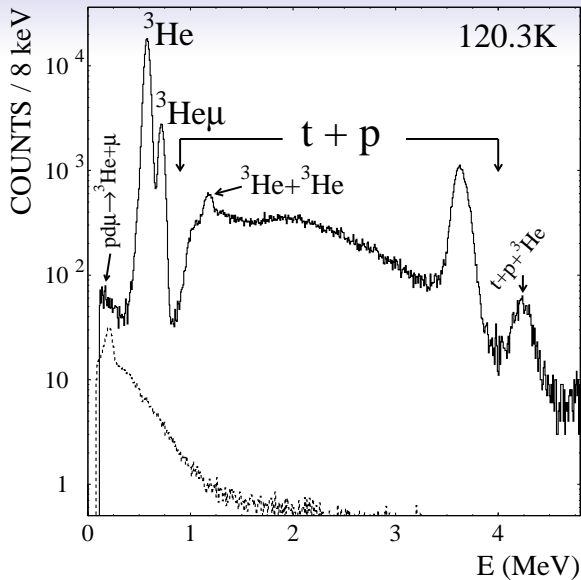
$$X_c \longrightarrow 1/w (\sim 175) \quad \text{при} \quad w \cdot \Lambda_c \gg \lambda_0,$$

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

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



100% эффективность регистрации



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