

*МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ  $dd$ - СИНТЕЗА:  
основные результаты  
и нерешённые проблемы*

Г.Г.Семенчук

22 февраля 2011

выйдет статья в ЭЧАЯ:

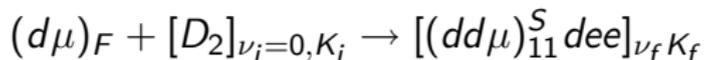
- прецизионно измерены параметры  $dd\mu$ -катализа в газовых смесях  $D_2$ ,  $HD$ ,  $H_2+D_2$  и  $H_2+2HD+D_2$ .
- исследованы характеристики резонансного и нерезонансного процессов образования мезомолекул на молекулах  $D_2$  и  $HD$ .
- измерены:
  - коэффициент прилипания мюонов  $\omega_{dd}$  к ядрам  $^3He$ .
  - температурная зависимость скорости образования молекулы  $dd\mu$ .
  - температурная зависимость скорости переворота спина атомов  $d\mu$ .
  - эпитепмальный канал образования молекулы  $dd\mu$  в смеси  $HD$ .

## Процессы, составляющие мюонный катализ

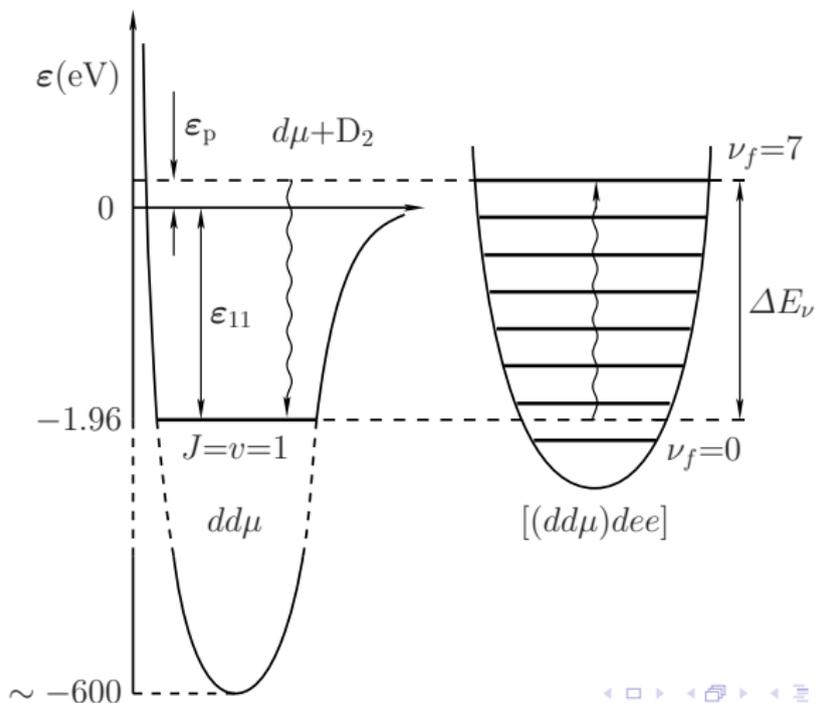
- Образование мезоатомов при торможении мюонов в водороде
- Девозбуждение в основное состояние
- Процессы рассеяния в среде, приводящие к замедлению
- Изотопный обмен, т.е. переход мюона к ядру более тяжелого изотопа водорода  $p\mu \rightarrow d\mu \rightarrow t\mu + E$  (переход необратим)
- Переход 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

- 1954 - Я.Б.Зельдович предложил возможный механизм образования  $pd\mu$ -мезомолекул  
 $d\mu + H_2 \rightarrow [(pd\mu)pe]^+ + e^-$
- 1964 – обнаружена высокая скорость реакции  $d\mu d$  в газообразном дейтерии (ОИЯИ, В.П.Джелепов),  
 1967 – В.Весман – предложил резонансный механизм,
- 1977 – в ОИЯИ измерена температурная зависимость скорости образования  $dd\mu$ , Л.И.Пономарёв и С.С.Герштейн предсказали высокую скорость  $d\mu t$ .
- 1979 – в ОИЯИ эксп. подтверждена высокая скорость  $d\mu t$ ,  $\lambda > 10^8 \text{c}^{-1}$  (первый в мире эксперимент по  $d\mu t$ ),

# Схема резонансного образования молекулы $dd\mu$ .



$$\varepsilon_0 + |\varepsilon_{11}| = \Delta E_{\nu, k}, \quad \varepsilon_0 = \frac{3}{2} kT$$



## Эксперимент 1978 г. ОИЯИ

$$E_i = \varepsilon_{d\mu} + E_{D_2} \quad E_f = \varepsilon_{11} + E_\nu$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{d\mu} + E_{D_2} - E_\nu$$

$$= 0,053 + (-4,556) - (-2,307_{\nu=8}) = -2,196 \text{ eV}. \quad \Delta = 0,24 \text{ eV}$$

$$\varepsilon_{11} = 0,053 - 4,556 + 2,554_{(\nu=7)} = -1,95 \text{ eV}.$$

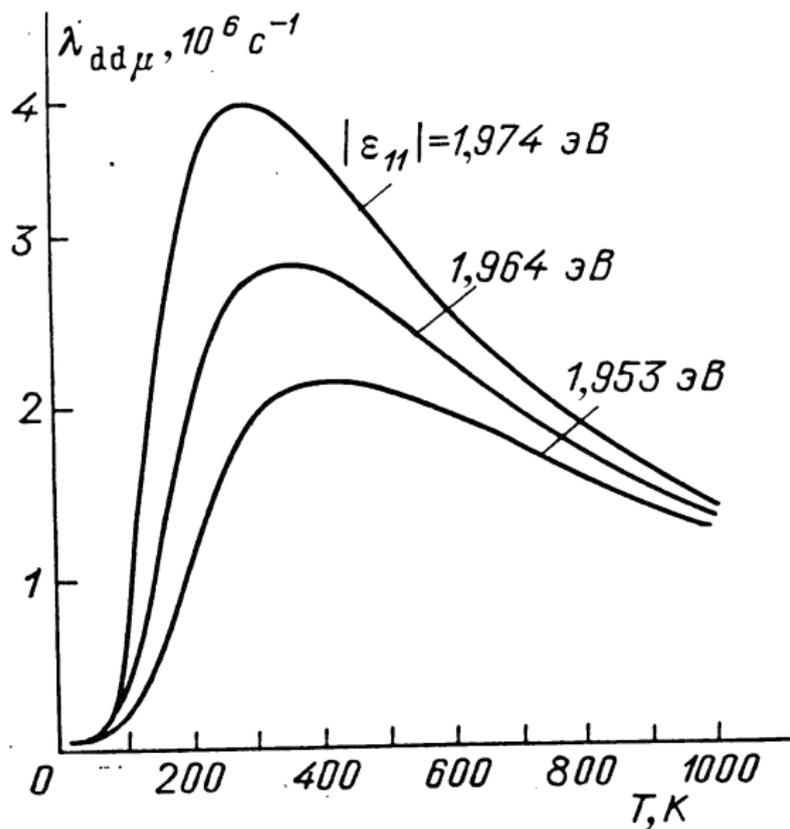
$$\frac{|0,0239|_{\nu=7}^2}{|0,0152|_{\nu=8}^2} \approx 2,5$$

$$\text{ОИЯИ(1978): } \lambda_{dd\mu} \sim 0,85 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}, \text{ ЛИЯФ(1984): } \lambda_{dd\mu} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$$

Первое измерение скорости нерезонансного образования  $dd\mu$  молекул:  
ЛИЯФ1986 г. на молекулах HD,  $\lambda_{dd\mu-HD} = (0,3 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ .

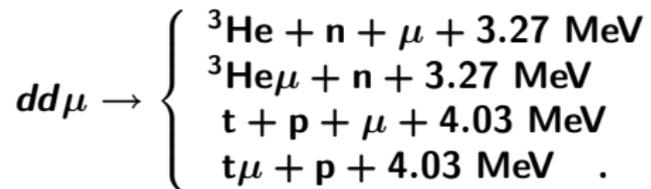
Для комплекса  $[(dd\mu) p2e]$  условие резонанса требует дополнительно  
 $0,180 \text{ эВ} \sim 1400 \text{ К}$ .

$$\Delta\nu = 0,25 \text{ эВ}. \quad \Delta J = 0,009 \text{ эВ}.$$

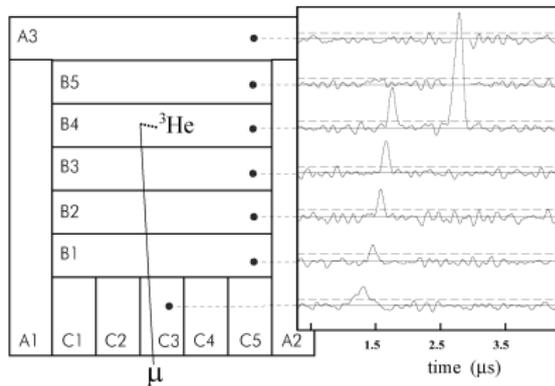
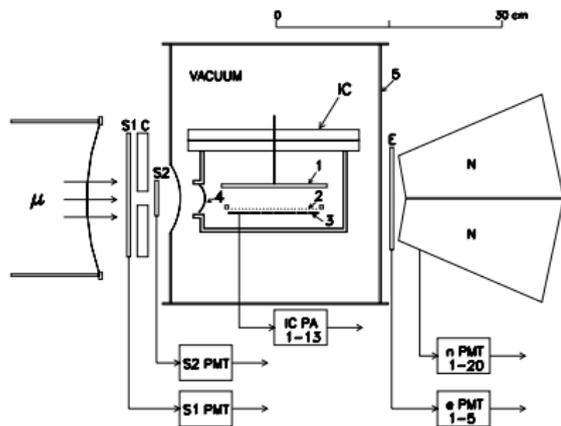


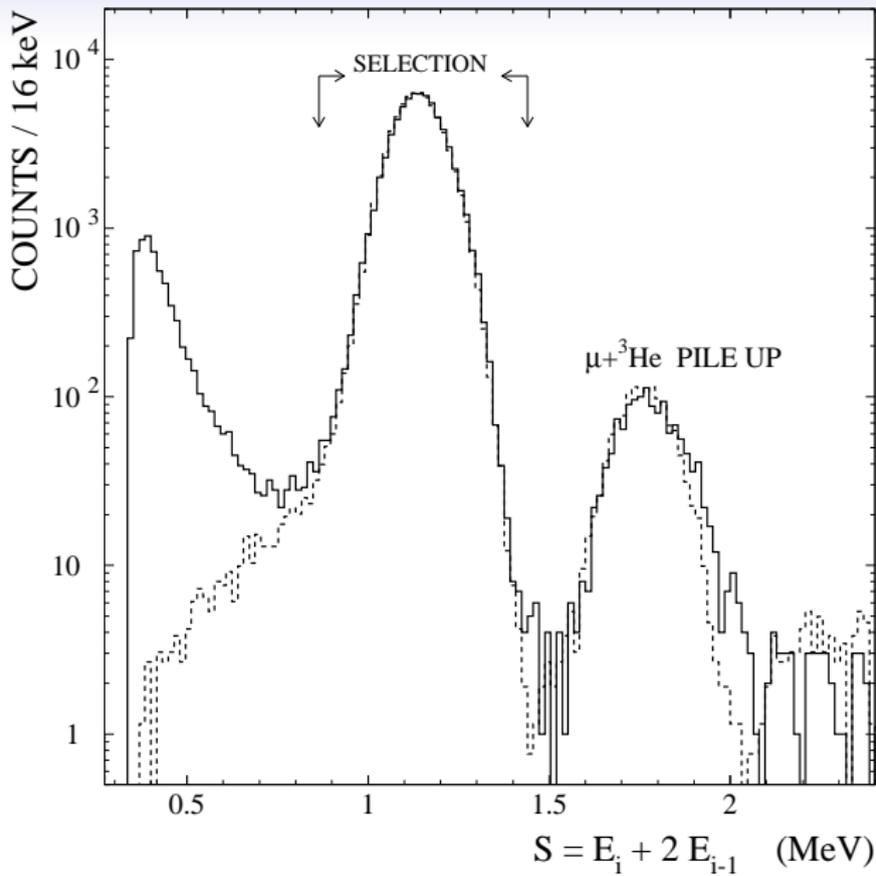
## Каналы dd-синтеза.

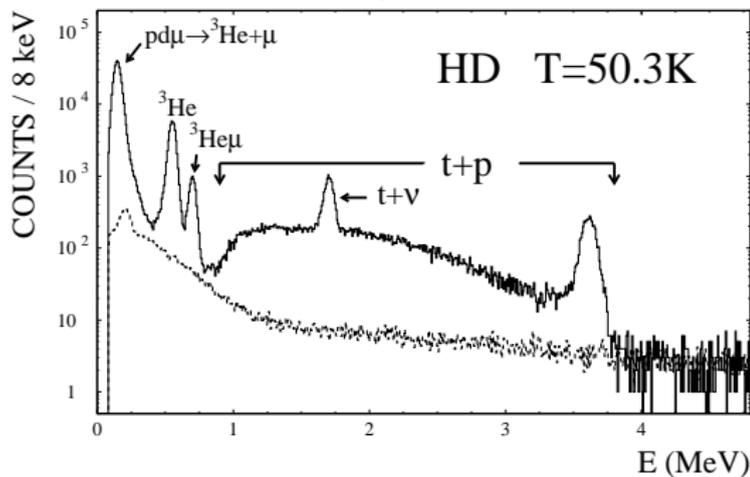
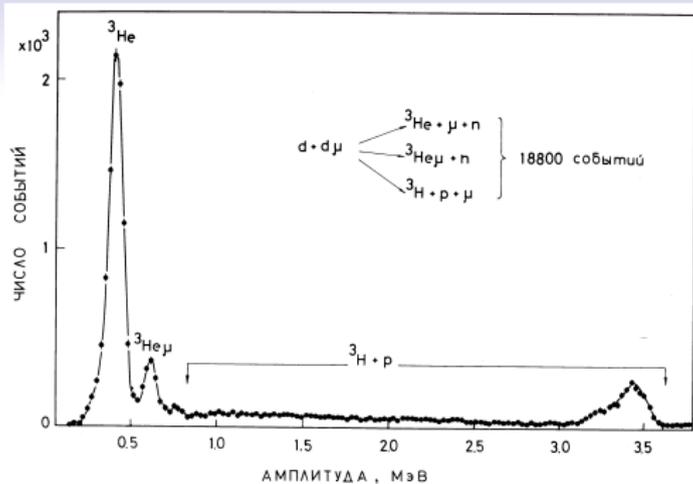
### Регистрация продуктов в ионизационной камере.



- 4- $\pi$  геометрия и 100% эффективность регистрации заряженных продуктов синтеза.
- Надёжное определение остановок мюонов (абсолютная нормировка) и измерение их z-координаты в объёме ИК,
- Высокая плотность газа  $\sim 100$  атм
  - для уменьшения пробегов продуктов синтеза. Достигнутое быстродействие 200 нс. дало возможность наблюдать циклирование реакций синтеза в окне  $\sim 10$  мкс.

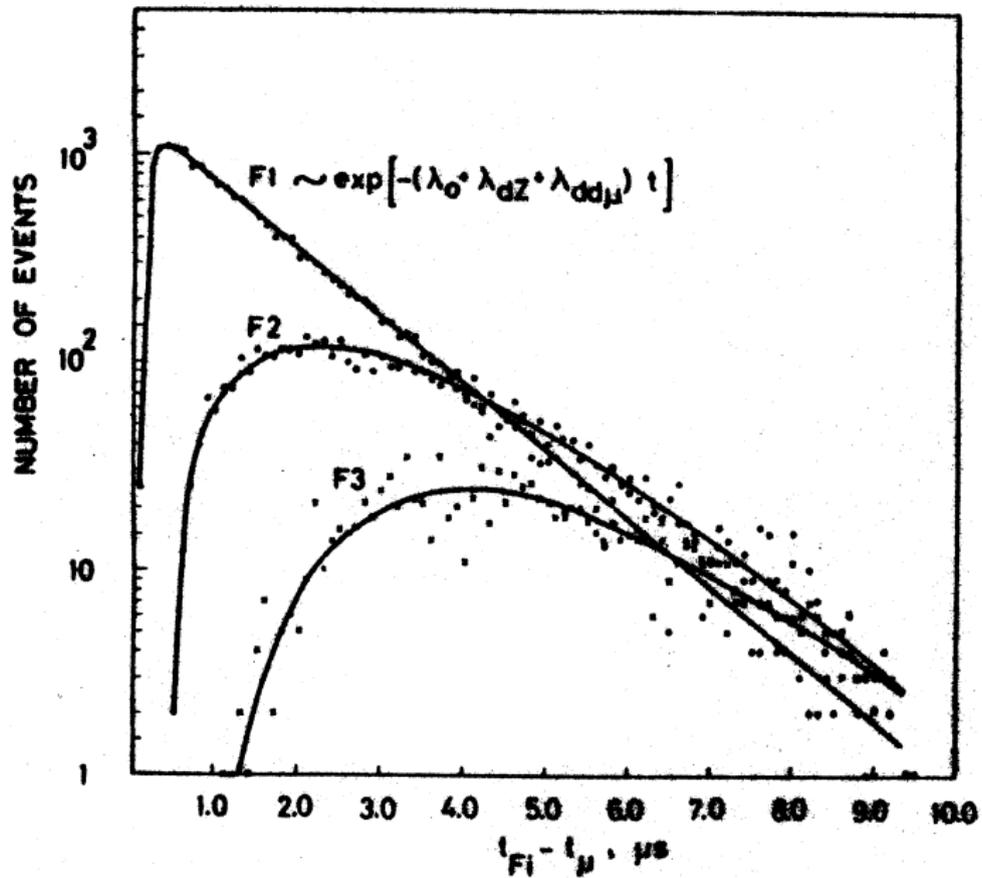




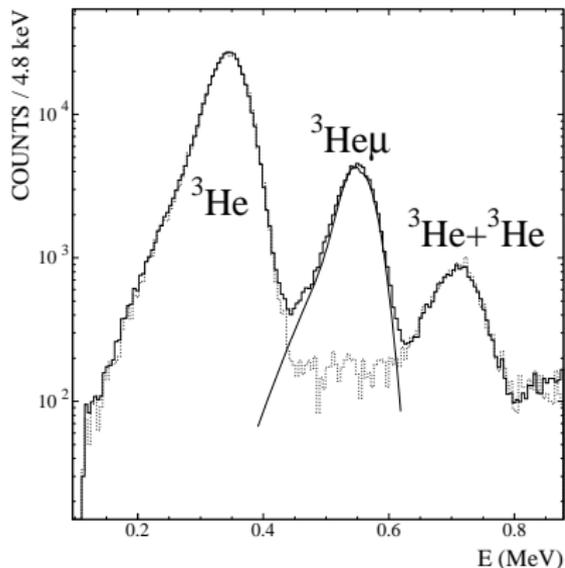


S





$\text{He}^3 \sim 2 \cdot 10^5$  событий



1981  $\omega_{dd} = 0,14 \pm 0,01$

1984  $\omega_{dd} = 0,122 \pm 0,003$

2001  $\left\{ \begin{array}{l} \omega_{dd} = 0,1205 \pm 0,0007, \varphi = 0,0485 \\ \omega_{dd} = 0,1206 \pm 0,0006, \varphi = 0,0837 \end{array} \right.$

2007  $\left\{ \begin{array}{l} \omega_{dd} = 0,1234 \pm 0,0007, \varphi = 0,0485 \\ \omega_{dd} = 0,1224 \pm 0,0006, \varphi = 0,0837 \end{array} \right.$

теория:  $\omega_{dd} = \omega_{dd}^0 (1-R)$   
 $\omega_{dd}^0 = 0,133, R = 0,11 \pm 0,01$

1983 Vardin et al.,  $\omega_{dd} = 0,14 \pm 0,05$

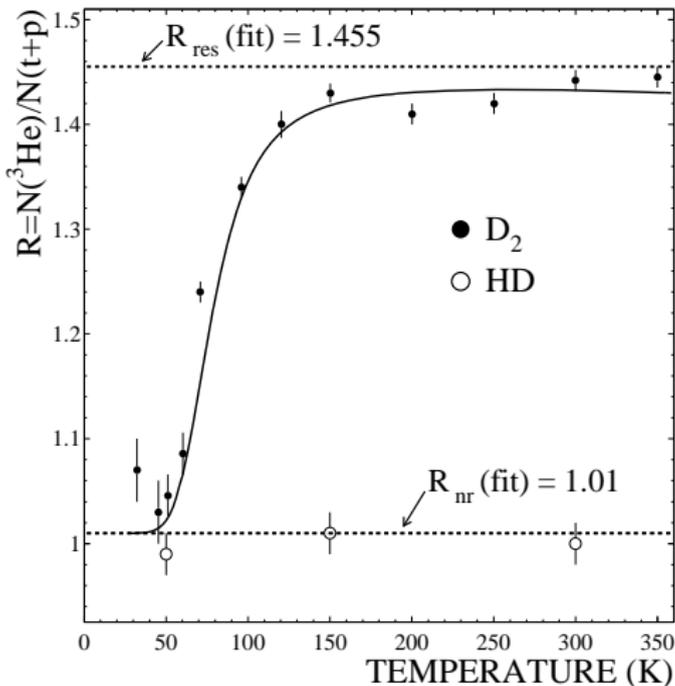
1990 ОИЯИ  $\omega_{dd} = 0,118 \pm 0,025$

The sticking coefficients  $\omega_s^{\mathcal{J}v}(nl)$  for the states  $(\mathcal{J}v) = (11)$  and  $(10)$  of the  $dd\mu$  mesic molecule and the sticking coefficients in the Born–Oppenheimer approximation  $\omega_s^{\text{BO}}(nl)$

$nl$	$\omega_s^{11}(nl)$	$\omega_s^{10}(nl)$	$\omega_s^{\text{BO}}(nl)$
1s	0.0947	0.0936	0.1240
2s	0.0126	0.0125	0.0155
2p	0.0101	0.0100	0.0126
3s	0.0037	0.0037	0.0046
3p	0.0036	0.0035	0.0044
3d	0.0003	0.0003	0.0003
4s	0.0016	0.0015	0.0019
4p	0.0015	0.0015	0.0019
4d + 4f	0.0002	0.0002	0.0002
$\sum_{n=5}^{\infty} \sum_{l=0}^{n-1}$	0.0052	0.0051	0.0063
total	0.133	0.132	0.172

$$\omega_s^0 = 0.133$$

$$\omega_s = 0.122$$



1984 нами обнаружено:

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

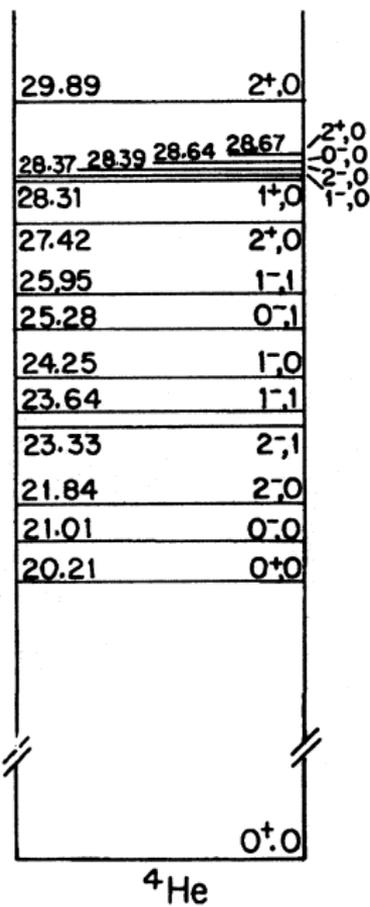
1981 Антоненко и др.:

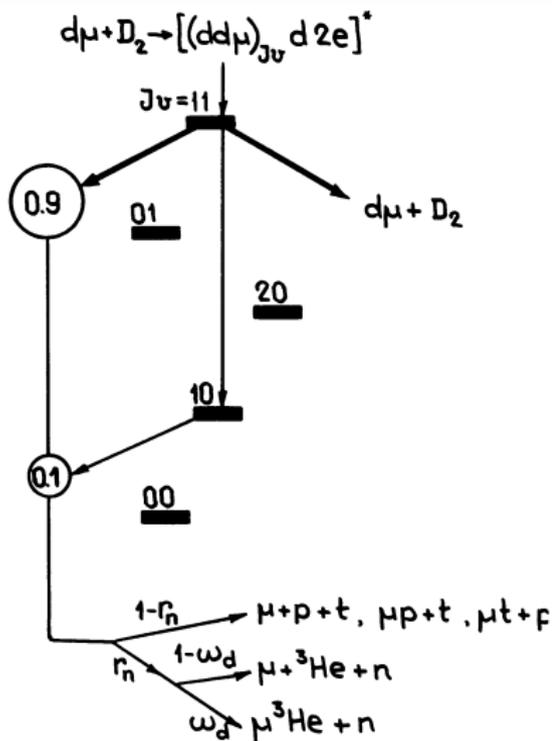
$$\frac{\sigma_1(n)}{\sigma_1(p)} \approx 1,46 \text{ при } E \rightarrow 0.$$

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.

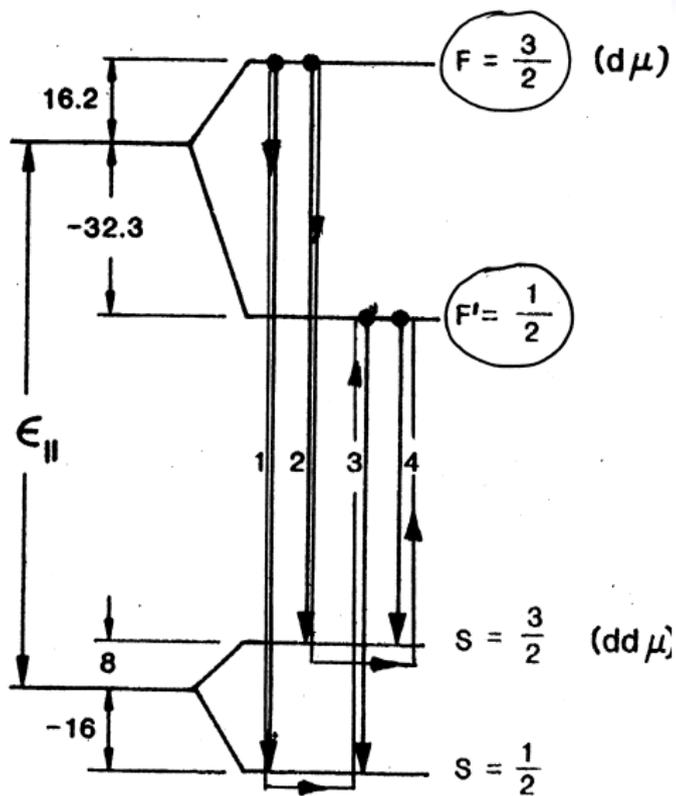


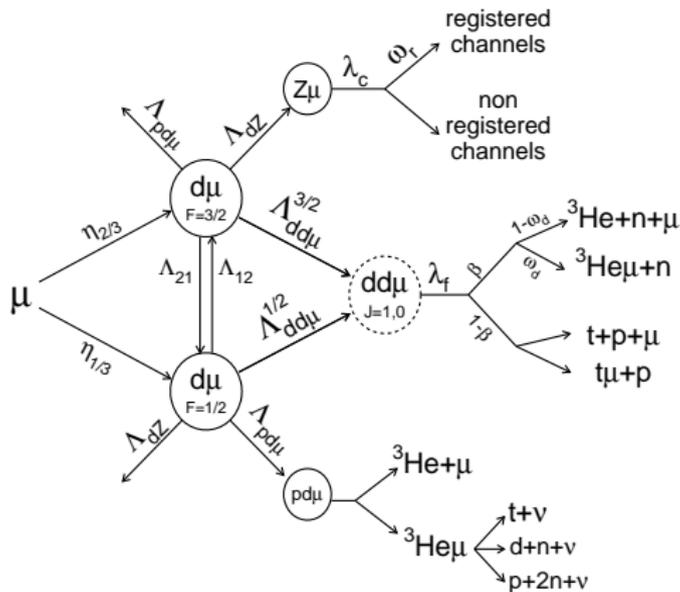


## Процессы в мезомолекулярных комплексах

- 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

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





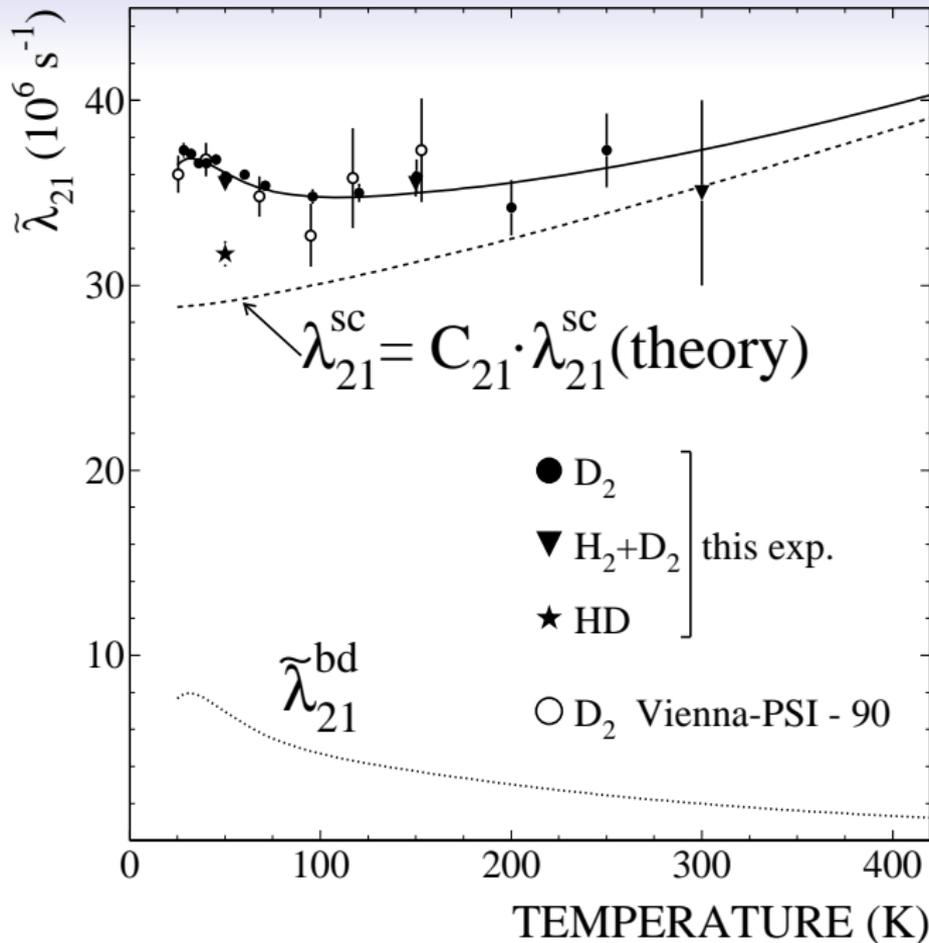
$$\lambda_{dd\mu}^{1/2}, \lambda_{dd\mu}^{3/2}, \lambda_{21}, R = \frac{\beta}{1-\beta}$$

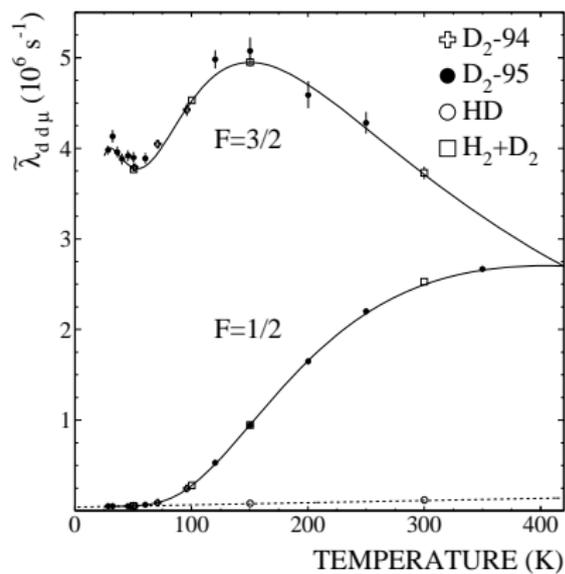
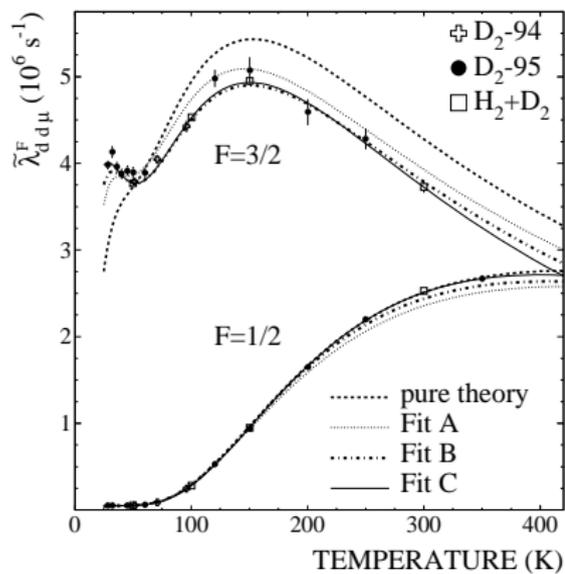
$$\widetilde{\lambda}_{dd\mu}^F = \lambda_{dd\mu}^{nr} + (\widetilde{\lambda}_{dd\mu}^F)^{res}$$

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

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

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





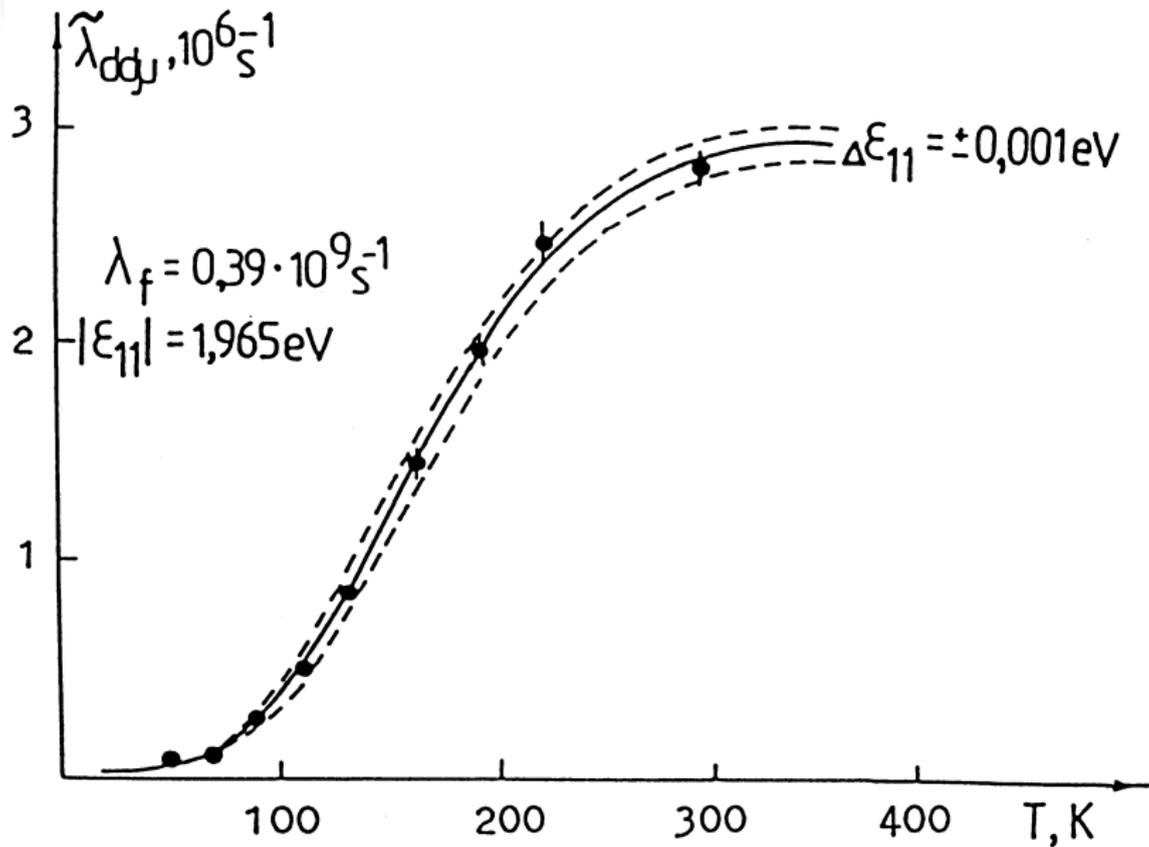
*Таблица:* Theoretical parameters extracted from the fit to the measured rates  $\tilde{\lambda}_{dd\mu}^{3/2}(T)$ ,  $\tilde{\lambda}_{dd\mu}^{1/2}(T)$ ,  $\tilde{\lambda}_{21}(T)$ ; Ortho/Para=2.4/1; 28<T<350 K

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
2010(ПИЯФ)	-1,9646	460	-1,9651(7)	381(15)

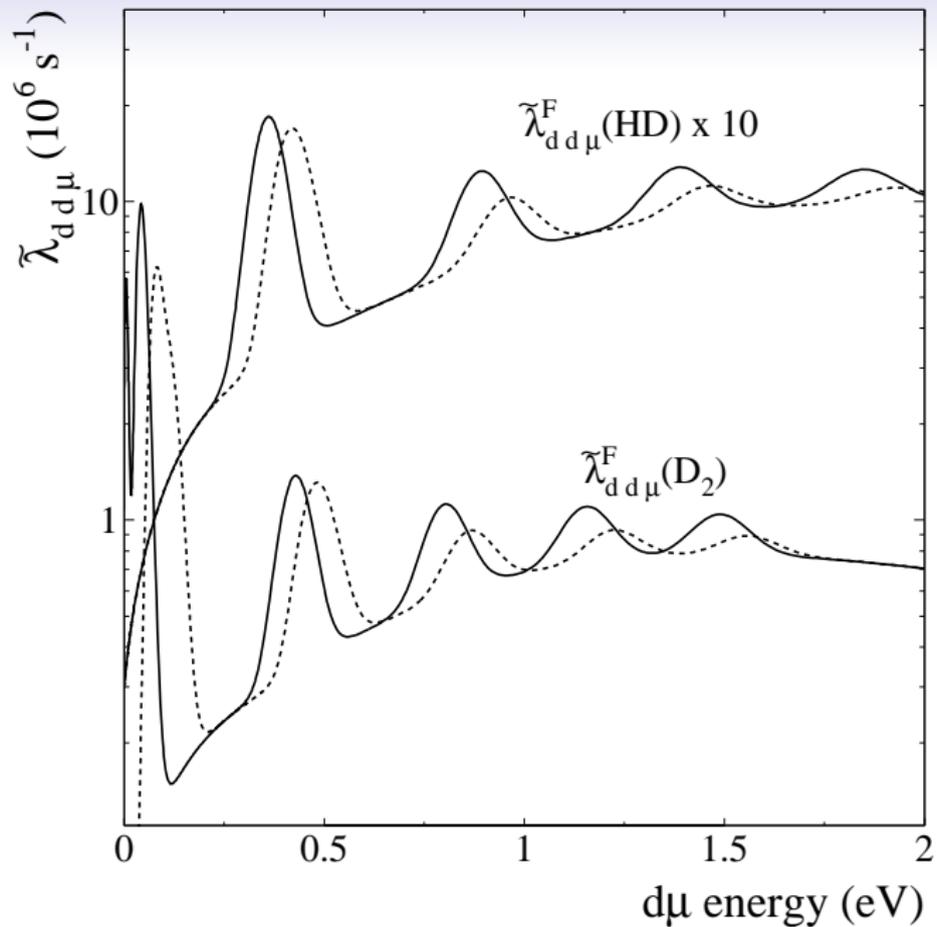
$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

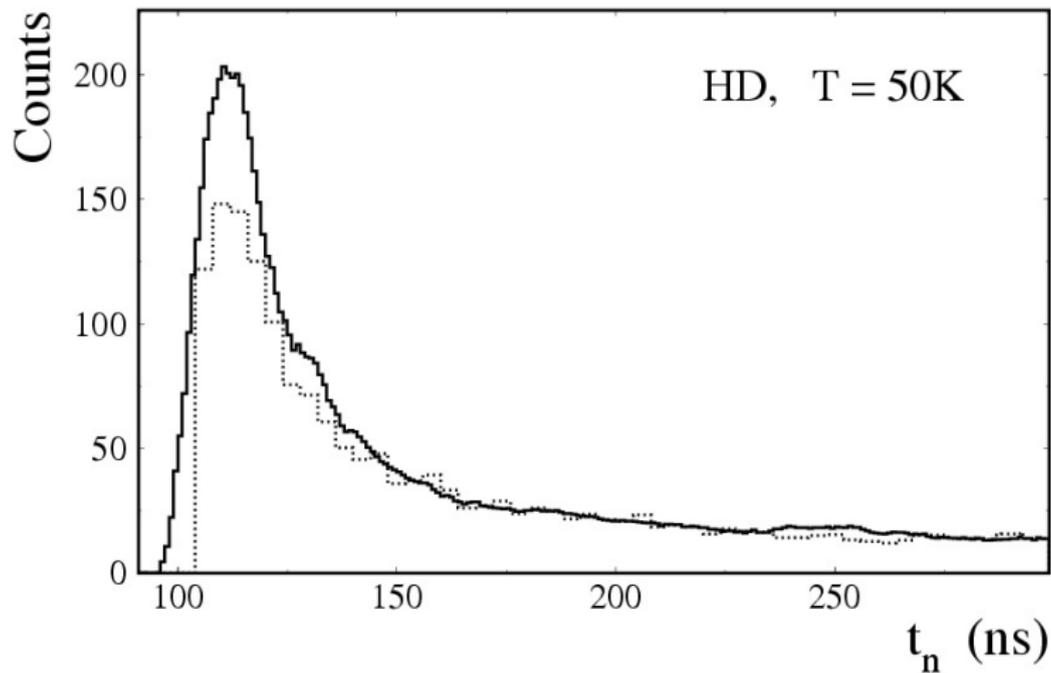


*Таблица:*  $dd\mu$  formation and spin-flip rates ( $10^6\text{s}^{-1}$ ) and branching ratios in HD gas.

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

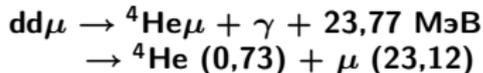
$$\lambda_{dd\mu}(HD) = (2,57 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,039) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$$



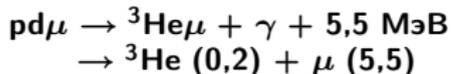


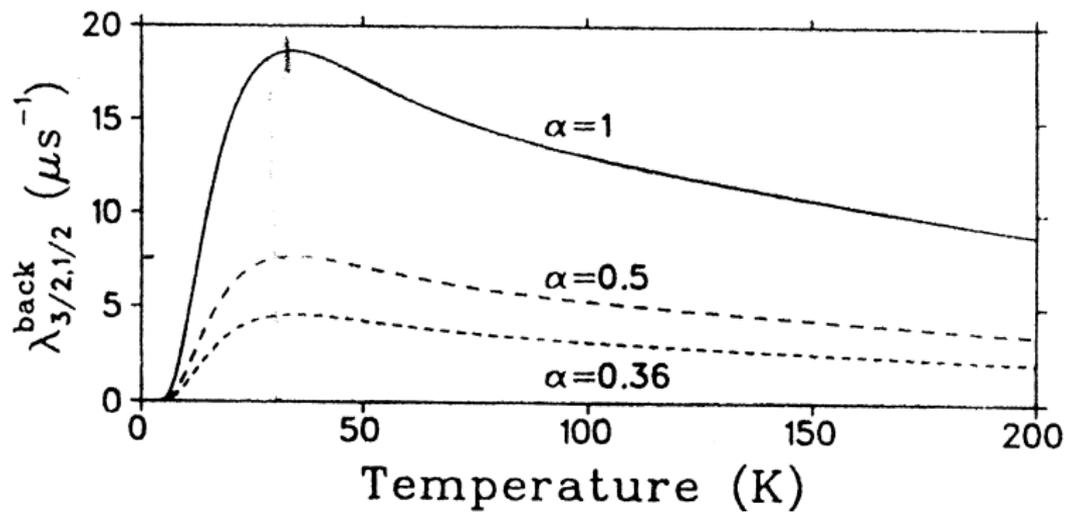
## Нерешённые проблемы

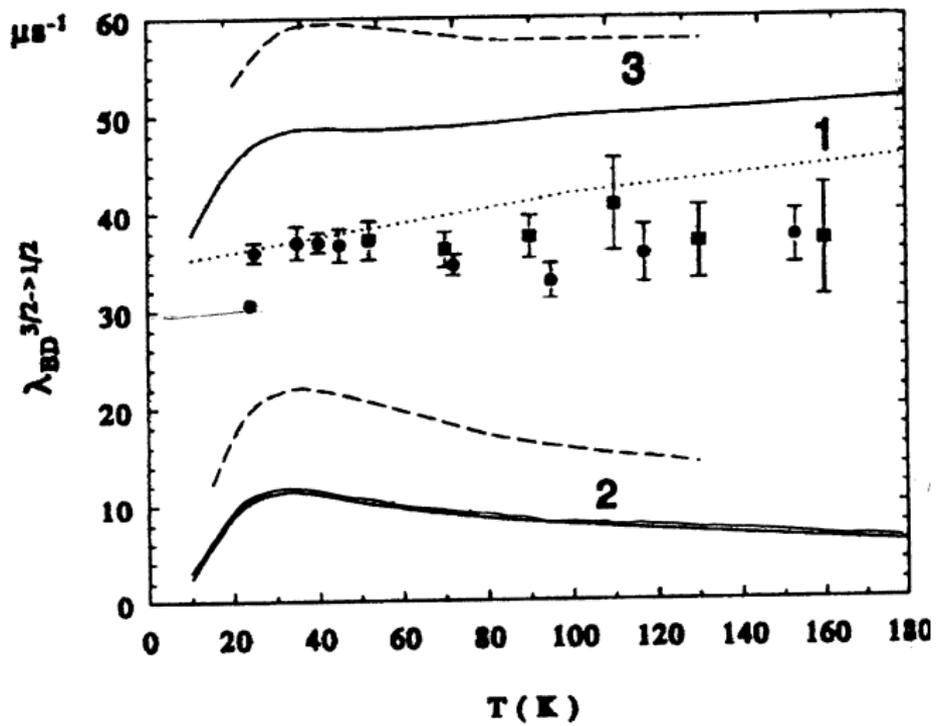
- Скорость переворота спина  $d\mu$ -атомов в среде.
- Повышение точности измерения скорости  $dd$ -синтеза ( $\lambda_f$ ).
- Исследование реакции (выход  $\sim 10^{-7}$  к основным каналам)

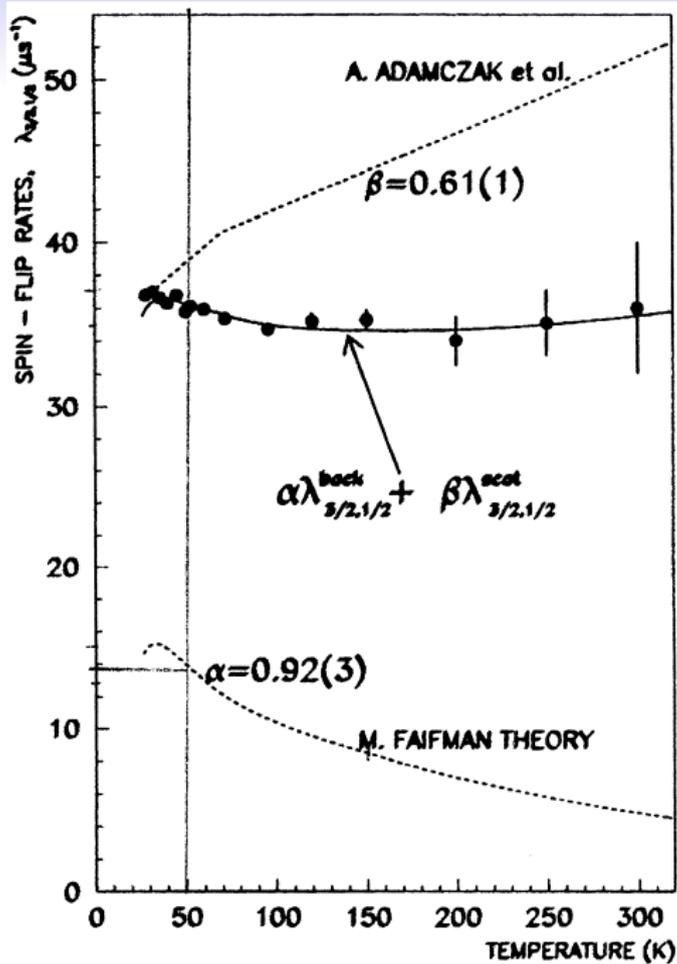


- Анализ двух каналов  $pd\mu$ -синтеза



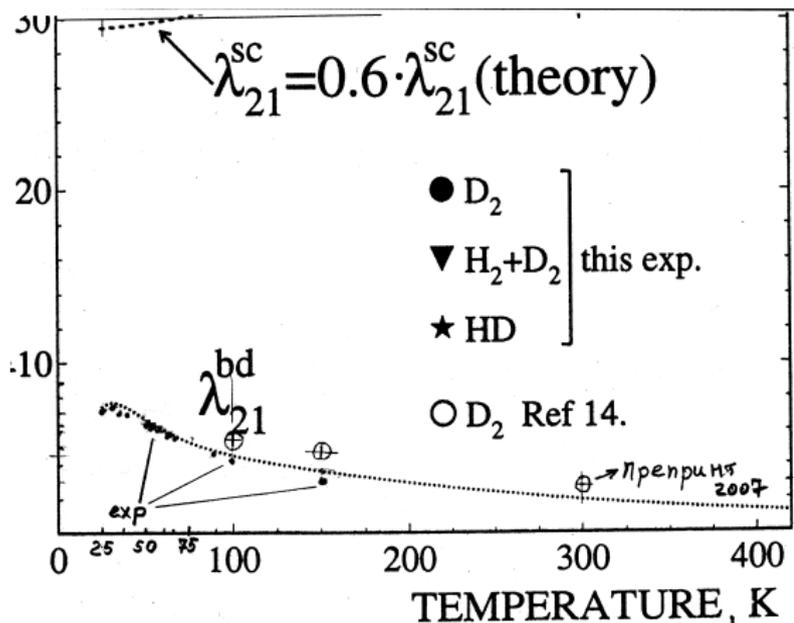






$$\lambda_{D_2}^{SC} = (23,6 \pm 0,4) \text{ MKC}^{-1}$$

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



- Измерена скорость переворота спина на HD-молекуле  $\lambda_{HD}^{SC}$  при T=50,100,150 K,
- Используем теор. отношение  $\frac{\lambda_{HD}^{SC}}{\lambda_{D_2}^{SC}} = 1,072$  (1,056)
- Находим значение  $\lambda_{D_2}^{SC}$  и определяем  $\lambda_{21}^{BD}$
- совместно фитируем три функции:  $\lambda_{21}^{BD}$ ,  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$  и  $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$ .

*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>

