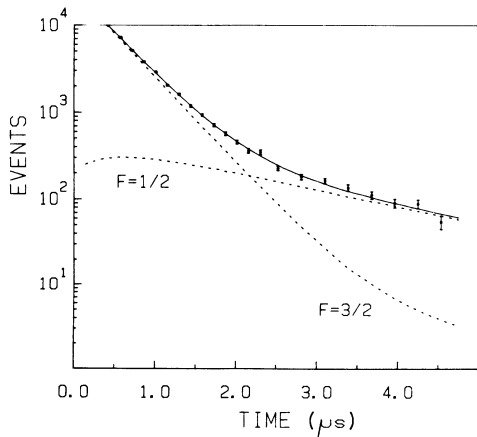


*МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ  $dd$ - СИНТЕЗА:  
измерение скорости  
переворота спина  $d\mu$  атомов  
в газах  $D_2$  и  $HD$*

Г.Г.Семенчук

14 февраля 2017



$$\lambda_{dd}^{3/2} / \lambda_{dd}^{1/2} = 79.5 \pm 8.0,$$

$$\lambda_d^{\mu d} = (37.0 \pm 1.5) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$$

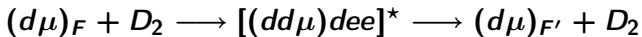
Структура скорости переворота спина:

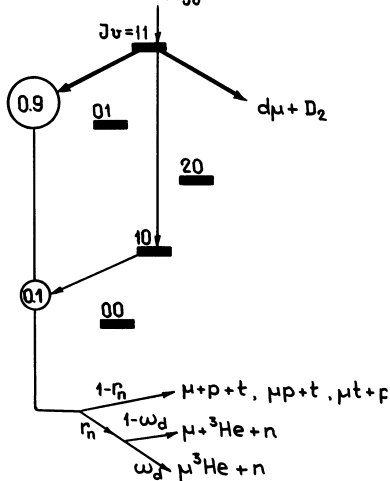
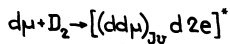
неупругое рассеяние  $d\mu$ -атомов на молекулах  $D_2$

- скорость  $\lambda_{21}^{sc}(D_2)$ ;

обратный распад мюонных молекулярных комплексов

- скорость  $\widetilde{\lambda}_{21}^{BD}$

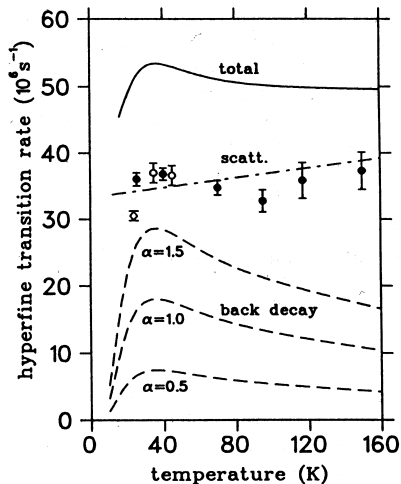




## Процессы в мезомолекулярных комплексах

- 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

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



1983 первое наблюдение  
переворота спина  $d\mu$  атома

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

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

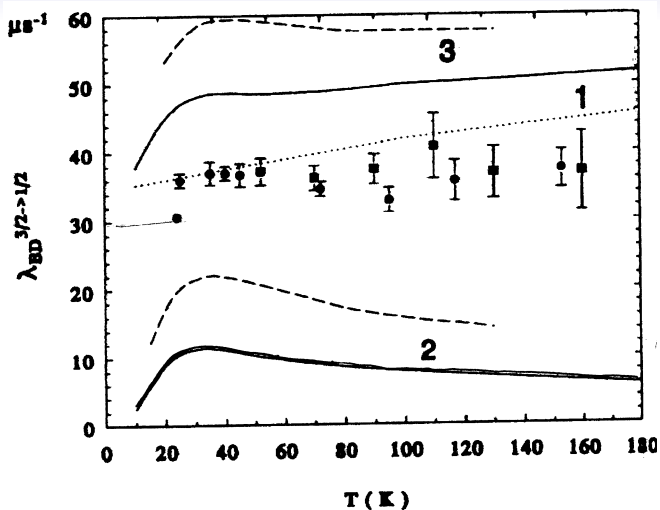
1990 измерение темп. зависимости

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

Phys.Rev.A42(1990)1165

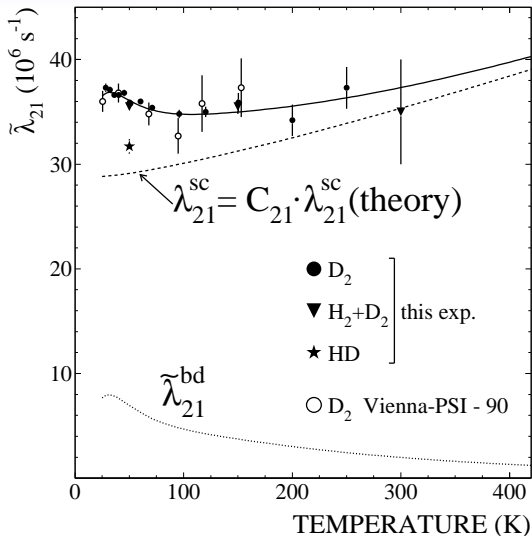
данные ПИЯФ МСФ5/6(1990/91)163

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



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

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



Разделение двух скоростей:

$$\lambda_{21}^{bd} \sim C_{D_2} \quad \text{и} \quad \lambda_{21}^{sc} \sim c_d$$

смесь  $H_2 + D_2$ ,  
 $c_d = C_{D_2} = 0,5$

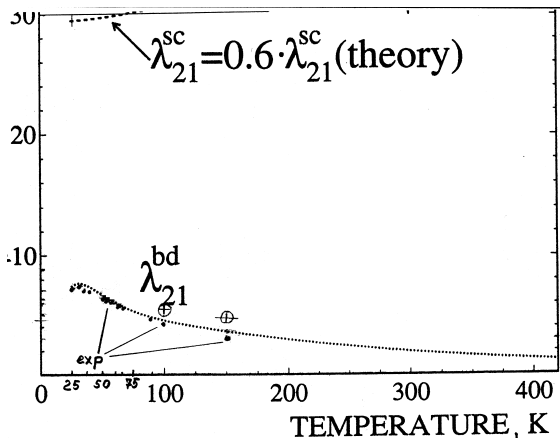
смесь  $H_2 + D_2 + 2HD$ ,  
 $C_{D_2} = 0,25$

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

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

получаем

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



Получено:

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

используем

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

$$\text{или} \quad 1,056$$

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

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

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

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



Скорость обратного распада молекулярных комплексов ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ ), вычисленная при двух значениях коэффициента пересчета

T (K)	$\lambda_{21}^{bd}(D_2)$ k=1.072	$\lambda_{21}^{bd}(D_2)$ k=1.056
28.3	7.43	7.0
32.2	7.53	7.1
36.2	7.03	6.6
40.3	7.03	6.6
50.2	6.33	5.9
51.0	6.23	5.8
60.3	6.47	6.0
71.0	5.81	5.4
96.0	5.23	4.8

## Теоретические оценки скорости переворота спина

- формула Герштейна ЖЭТФ 40(1961)698 ( $\varepsilon < 0,01$  эВ)

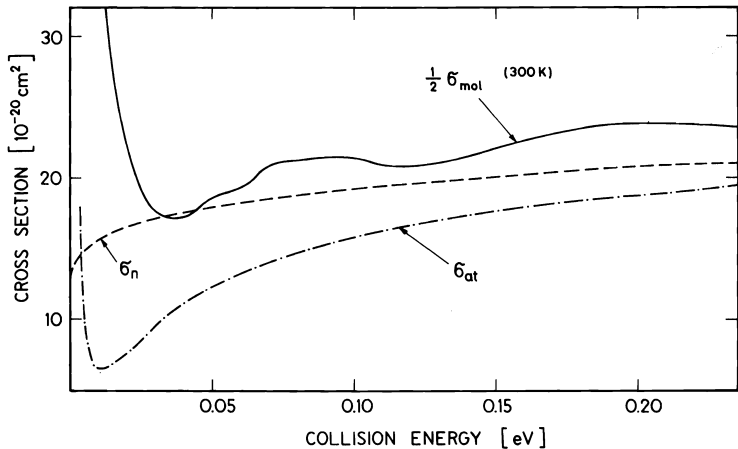
$$\lambda_{21}^{sc} = N_0 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot v \cdot (a_g - a_u)^2 \cdot a_0^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2(\varepsilon + \Delta\varepsilon)}{M}}, \quad \Delta E = 0,0485 \text{ эВ}, \quad a_0 = 2,56 \cdot 10^{-11} \text{ см}$$

- без эл. экранирования:  $a_g = 4,9$ ,  $a_u = 3,0$
- с эл. экранированием:  $\widetilde{a}_g = -6,2$ ,  $\widetilde{a}_u = -8,3$
- результаты расчетов ( $10^6 \text{с}^{-1}$ )

Михайлов Phys.Lett.A116(1986)180	Adamczak MCF 4(1989)303
без э.э. $d\mu+d$ 33,6 (1,16)	без э.э. $d\mu+d$ 34,4
без э.э. $d\mu+D_2$ 28,9	без э.э. $d\mu+D_2$ (29,6)
с э.э. $d\mu+D_2$ 33,0	с э.э. $d\mu+D_2$ 36,8

- S.Cohen MCF5/6(1990/91)3  
Adamczak  $C = 2k_\mu + 8,4\sqrt{m_e} \approx 2,3$   
Михайлов  $C' \approx 2k_\mu \approx 1,6$

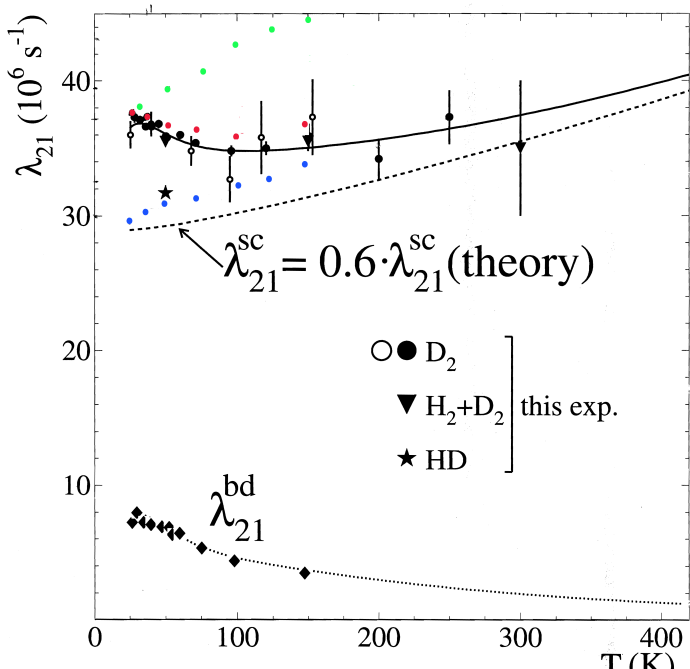


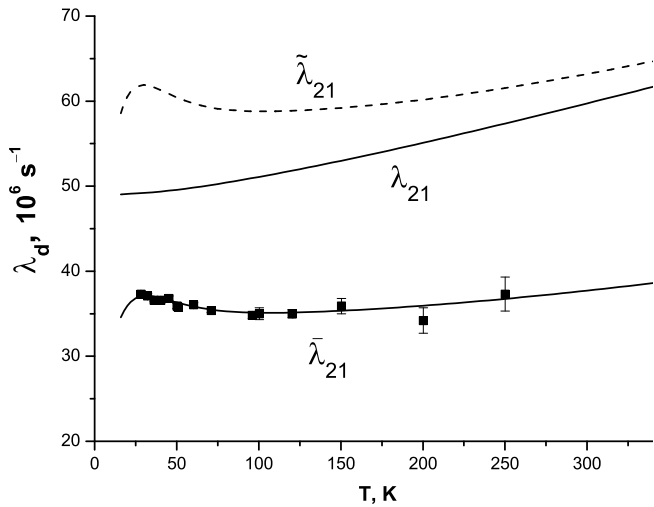
Cross sections for the processes  $d\mu(\uparrow\downarrow)+d$ ,  $d\mu(\uparrow\downarrow)+D$  and  $d\mu(\uparrow\downarrow)+D_2$  averaged over  $j = 1/2$  and  $j = 3/2$  vs collision energy

Скорость переворота спина  $d\mu$  атомов ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ ) с учётом и без учёта электронного экранирования

T (K)	$\lambda_{21}^{sc}(d)$ (без эл.экр.)	$\lambda_{21}^{sc}(D_2)$ (без эл.экр.)	$\lambda_{21}^{sc}(D_2)$ (с эл.экр.)	$\Delta\lambda_{21}^{sc}(D_2)$ (вклад эл.экр.)	$\widetilde{\lambda}_{21}$ (теория)
1	2	3	4	5	6
30	34,4	29,6	36,8	7,2	37,1
40	34,8	29,9	37,9	8,0	36,9
50	35,1	30,2	38,9	8,7	36,5
70	35,9	30,8	40,4	9,6	36,5
100	37,0	31,8	42,0	10,2	36,0
120	37,8	32,5	42,9	10,4	
150	39,0	33,5	44,2	10,7	36,6
200	41,2	35,4	46,4	11,0	
250	43,6	37,5	48,8	11,3	
300	46,1	39,6	51,5	11,9	

$$\lambda_{21}^{sc} + \lambda_{21}^{bd(exp)} = \Sigma \widetilde{\lambda}_{21} = 36,6$$





## Результаты анализа

- Определено экспериментальное значение скорости обратного распада мезомолекулы, оказавшееся в 2 раза меньше расчетного, полученного в дипольном приближении при вычислении матричных элементов. Необходим учёт квадрупольных членов в разложении оператора взаимодействия.
- Расчетное значение скорости переворота спина при рассеянии на молекулах  $D_2$  оказалось завышенным за счет поправок на электронное экранирование. Их исключение приводит к полному совпадению с экспериментом.
- Надо различать упругое рассеяние мезоатомов и процессы обмена мюоном, идущие на малых расстояниях.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

## Основные результаты диссертации

1. **Разработан новый метод** исследования явления мюонного катализа dd и dt-синтеза, основанный на использовании ионизационной камеры высокого давления в качестве активной мишени и детектора заряженных продуктов синтеза.
2. В результате фитирования зависимости скорости образования  $dd\mu$  молекул от температуры **определена энергия слабосвязанного вращательно-колебательного уровня**  
 $\epsilon_{11}(\text{fit}) = -1,9651(7)$  эВ, совпадающая с расчетом с точностью  $2,5 \cdot 10^{-4}$ .

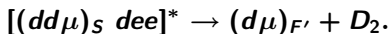


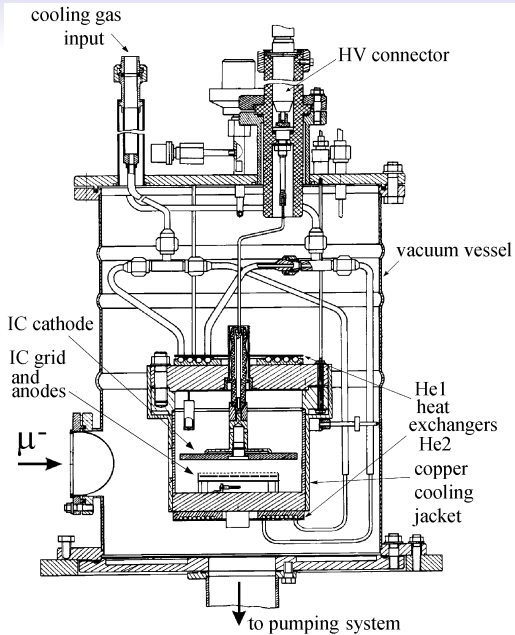
3. **Реализован новый метод измерения коэффициента прилипания мюонов**, использующий различную степень рекомбинации ионизационных зарядов от однозарядных  $(^3\text{He}\mu)^+$ ,  $(^4\text{He}\mu)^+$  и двухзарядных  $(^3\text{He})^{++}$  и  $(^4\text{He})^{++}$  продуктов синтеза.

4. **Впервые обнаружена асимметрия в выходах двух зарядово-симметричных каналов dd-синтеза** 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 Р-волновом состоянии.

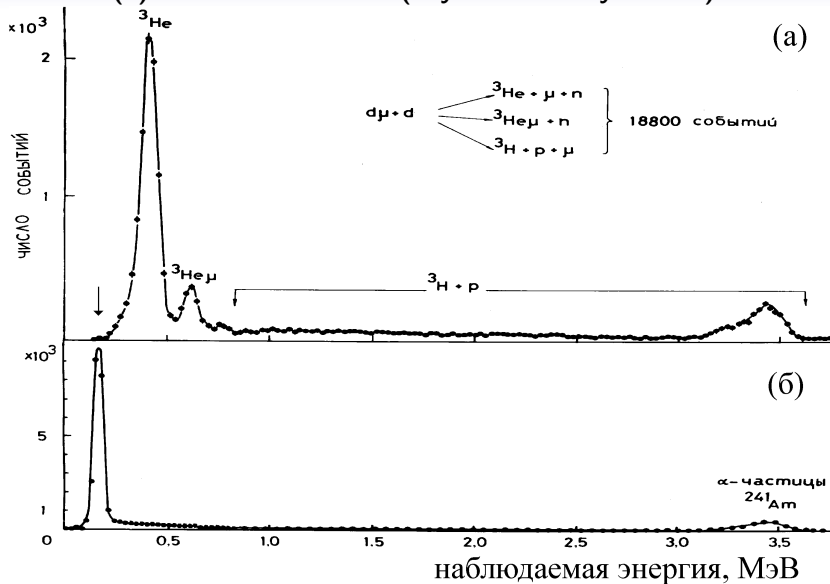
5. **Впервые измерены** все основные характеристики процесса нерезонансного механизма мюонного катализа на молекулах HD.

6. Измерена температурная зависимость скорости переворота спина  $d\mu$  атомов в  $D_2$  и HD газах и **впервые определена скорость обратного распада молекулярного комплекса  $\lambda_{21}^{bd}$**

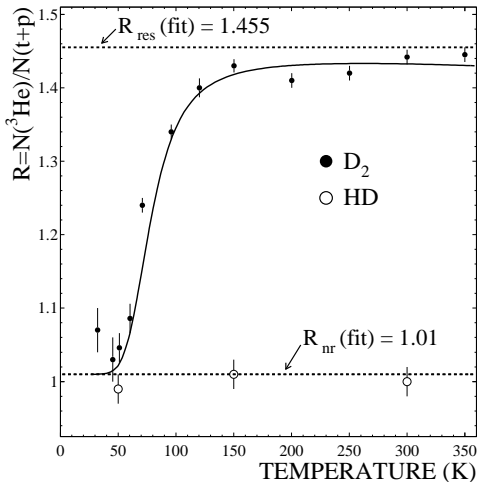




1982-84. (а) Спектр первых синтезов на центральном аноде.  
 (б) Фоновые события (случайные запуски ИК).



100% эффективность регистрации



1984 нами обнаружено:

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

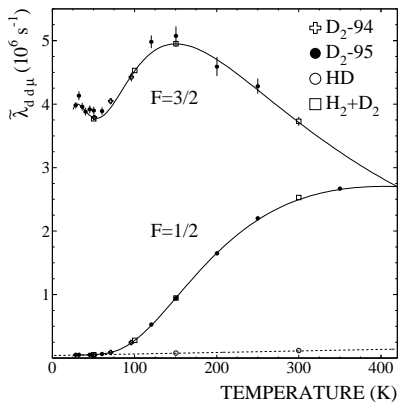
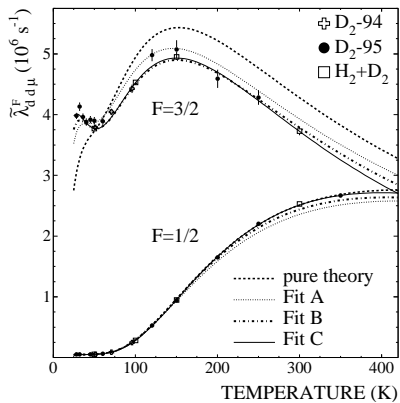
1981 Антоненко и др.:

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

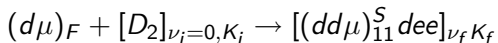
1990 R.Hale: анализ ядра  $^4\text{He}$  для P- и S-волнового dd-взаимодействия  $\Rightarrow R_{L=1} \approx 1,43$  и  $R_{L=0} \approx 0.886$

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

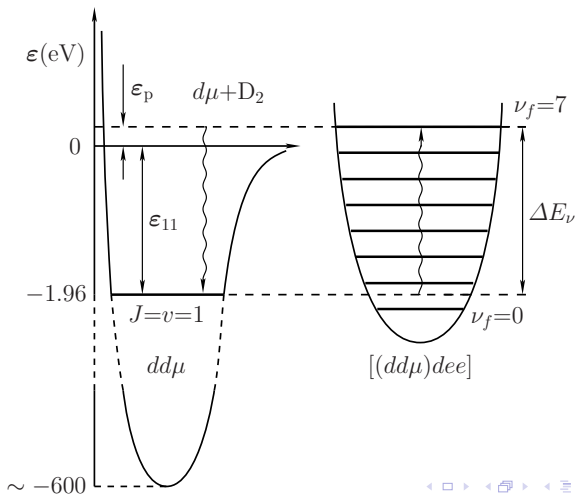
Смешивание с уровнем  $[1^-, T=1]$  с энергией 23,64 МэВ усиливает вклад P-волны.

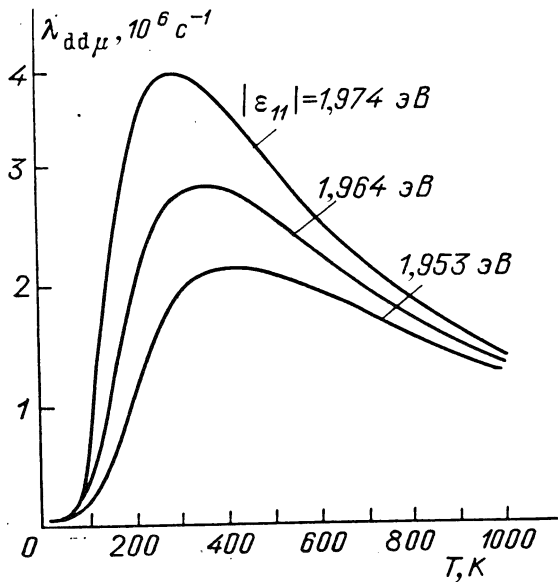


# Схема резонансного образования молекулы $dd\mu$ .

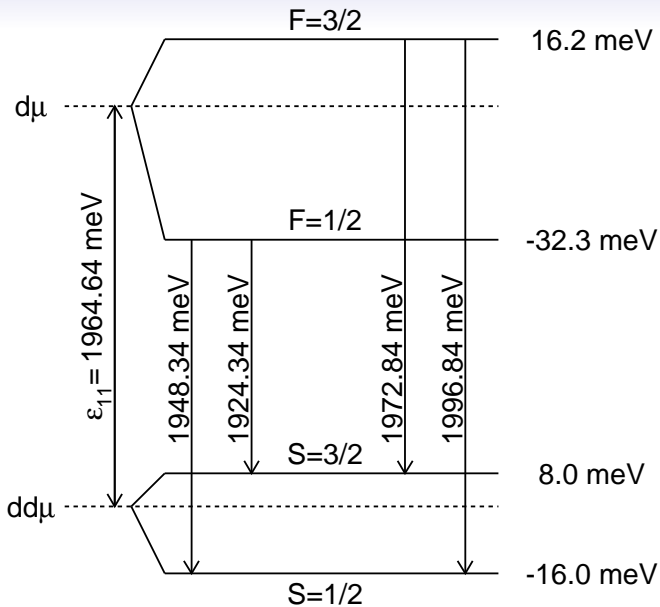


$$\varepsilon_0 + |\varepsilon_{11}| = \Delta E_{\nu, k}, \quad \varepsilon_0 = \frac{3}{2} kT$$





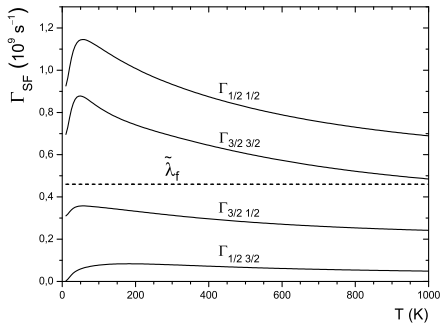
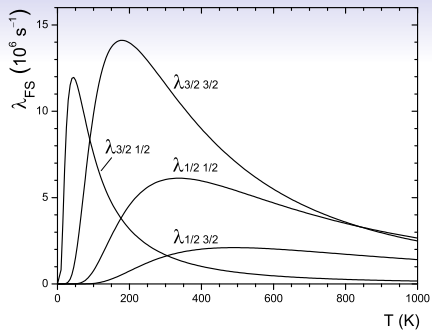


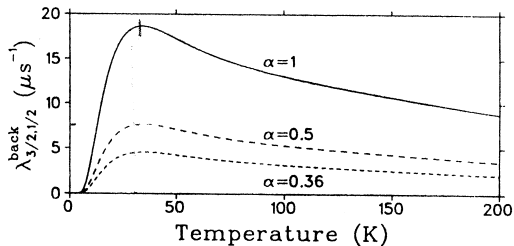




$$\lambda_{K_i K_f}^{FS} = 2\pi N_0 \frac{(2S + 1) W_{SF} f(\epsilon_{res}, T)}{(2F + 1)(2S_d + 1)} |V_{if}(\epsilon_{res})|^2 \quad (1a)$$

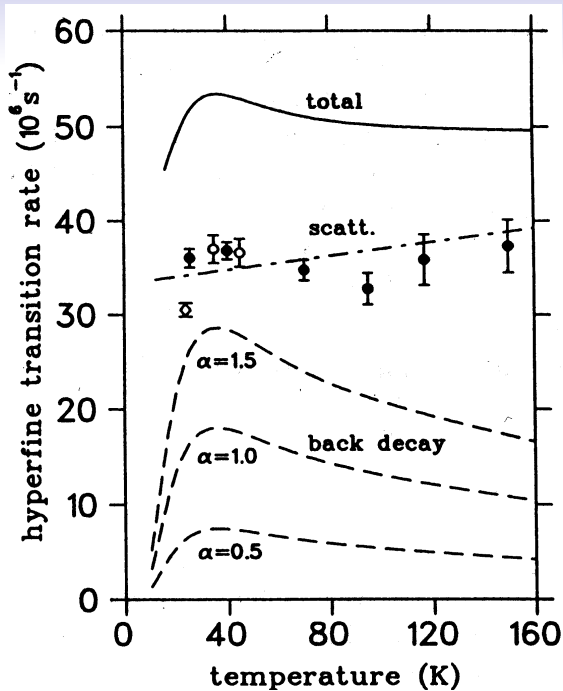
$$\Gamma_{K_f K_i}^{SF} = \frac{(\mu^3 \epsilon_{res})^{1/2}}{\pi} \frac{(2K_i + 1) W_{SF}}{(2K_f + 1)(2J + 1)} |V_{if}(\epsilon_{res})|^2. \quad (1b)$$





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

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

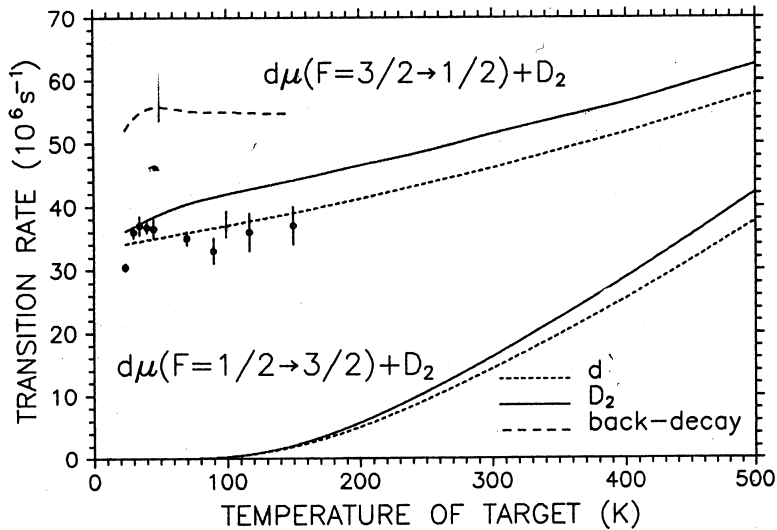


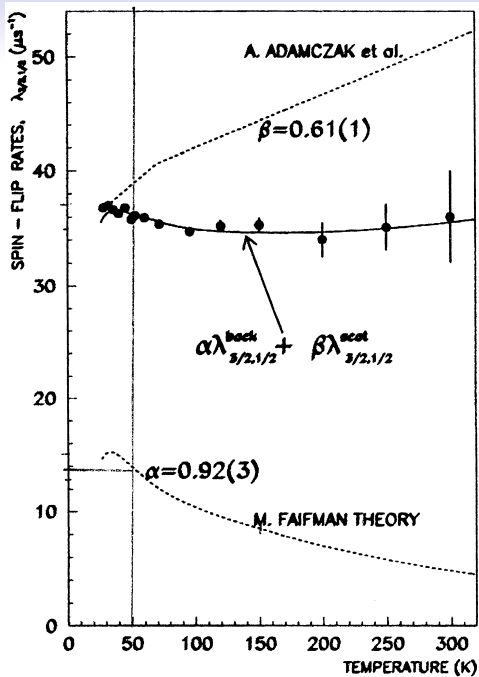
$\lambda_{21}^{sc} \rightarrow d\mu + d$   
 Bracci et al  
 Phys.Lett.A134(1989)435

Анализ 1993г.  
 Phys.Rev.A47(1993)4691

$$\lambda_{21} = \lambda_{21}^{bd} + \beta \lambda_{21}^{sc},$$

$$\beta \approx 0,6$$





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

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