

# Мюонный катализ реакций ядерного dd- и dt- синтеза

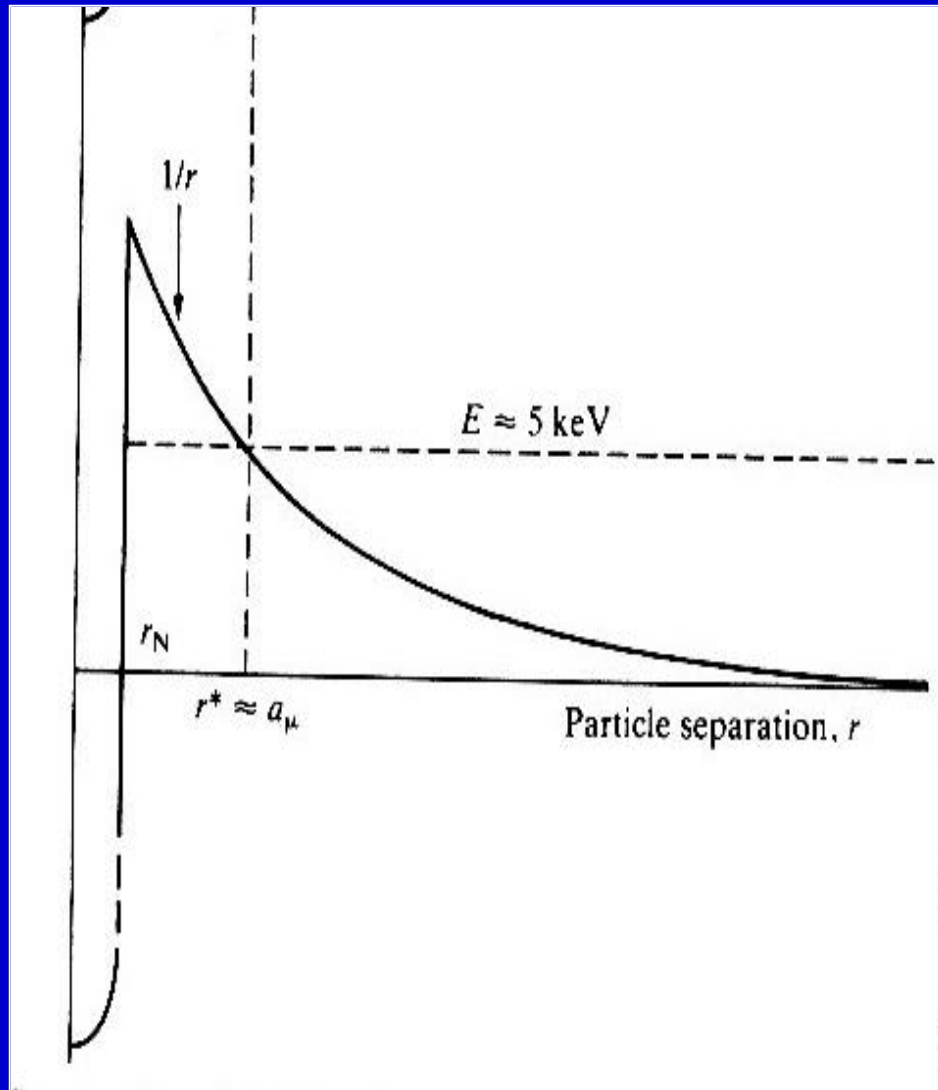
А.А. Воробьев, С.С.Герштейн. Л.И.Пономарев

Научное сообщение на Президиуме РАН  
23 марта 2004 года

## Реакции синтеза ядер - возможные источники энергии



# Преодоление кулоновского барьера



В термоядерной  
установке  
 $T \sim 5 \cdot 10^7 \text{ K}$   
 $E \sim 5 \text{ КэВ}$

## $\mu$ – мезон

$\mu$  -мезон - это “тяжелый электрон”

$$m_{\mu} = 207 m_e$$

$\mu$  атом

аналог H

$(\mu\mu)^+$  молекула

аналог  $(H_2)^+$

$$\sim 10^{10} \text{ см}$$

$$\sim 10^8$$

время жизни 2.2 мксек

$\mu \quad -e + 2 \nu$

## источники $\mu$ -мезонов



космические лучи

Синхроциклотрон ОИЯИ (600 МэВ)  
Синхроциклотрон ПИЯФ (1000 МэВ)  
Ускоритель КЕК (Япония)  
Ускоритель RAL (Англия)

Мезонные фабрики  
PSI (Швейцария)  
LAMPF (США)  
TRIUMF (Канада)

# Холодный синтез в мезомолекуле

C. Frank (1947)

Идея мезокатализа

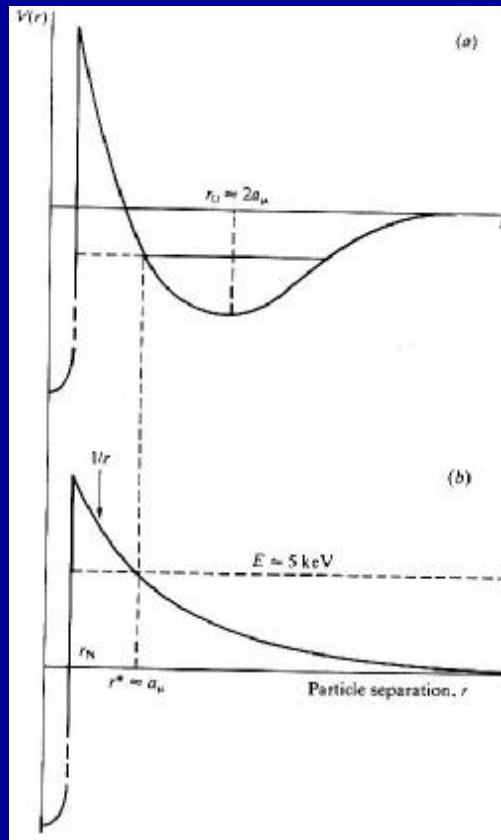
$\mu^-$



$d\mu + p$



${}^3\text{He} + \mu + 5.5 \text{ Мэв}$



А.Д.Сахаров (1948)

$\mu + d \rightarrow dd\mu$

Сужение барьера  
в мезо-молекуле

Проницаемость барьера

$V = 10^{-5} - 10^{-6}$

Частота колебаний

$\omega \sim 10^{17} \text{ сек}^{-1}$

Вероятность синтеза

100%

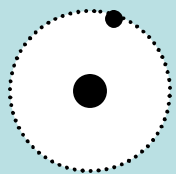
$3a \sim 10^{-9} \text{ сек}$

## *Механизм образования $dd\mu$ - молекулы*

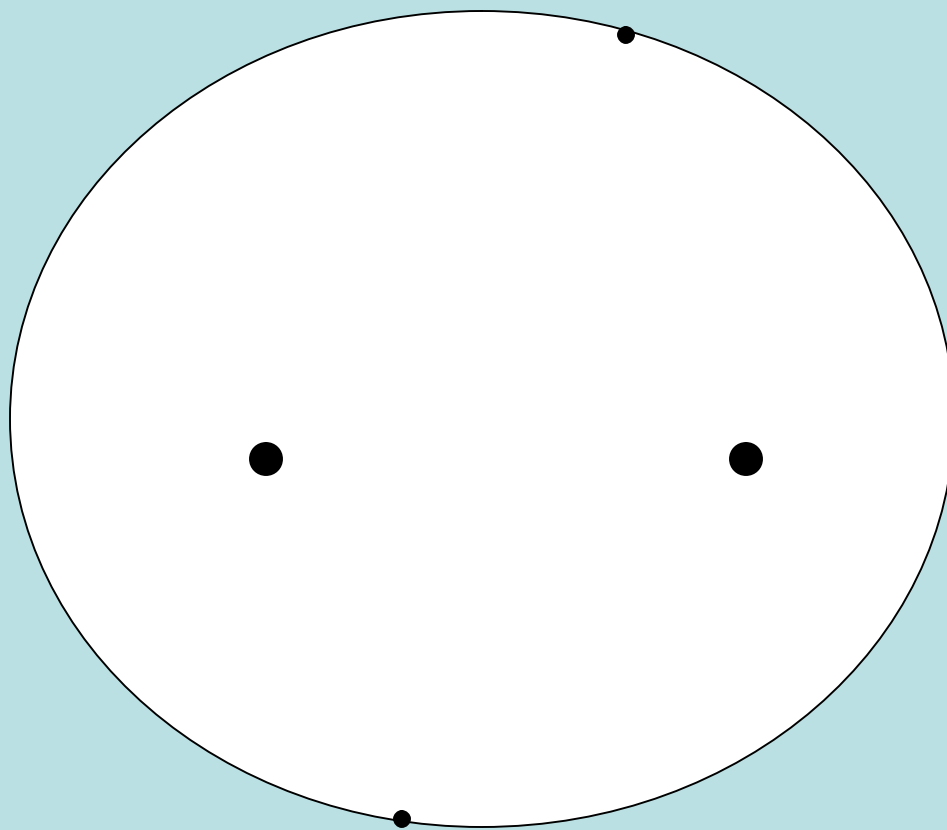
Я. Б. Зельдович (1954)



*Механизм образования мезомолекулы  
внутри  $D_2$  молекулы с испусканием  
Оже-электрона*

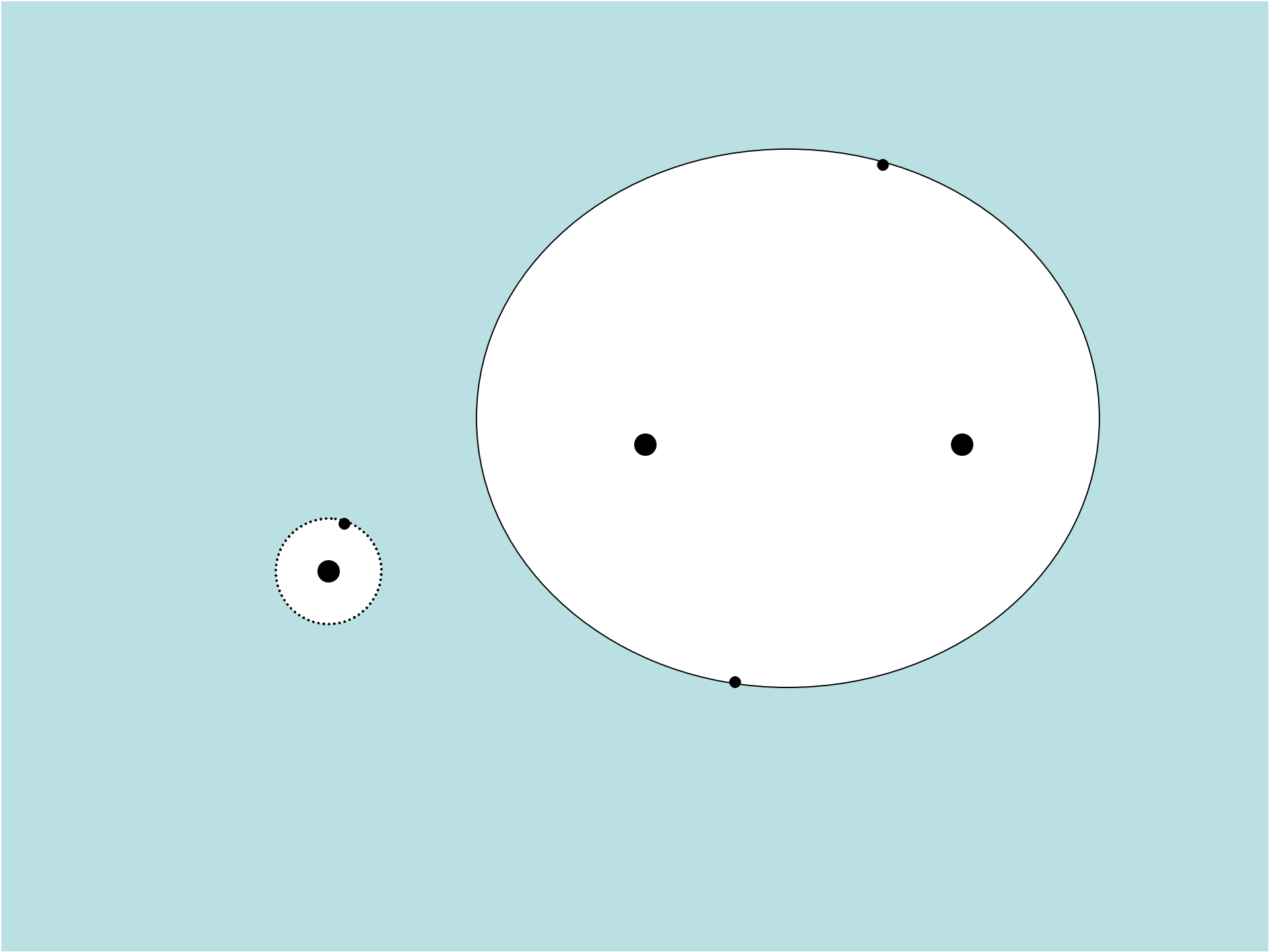


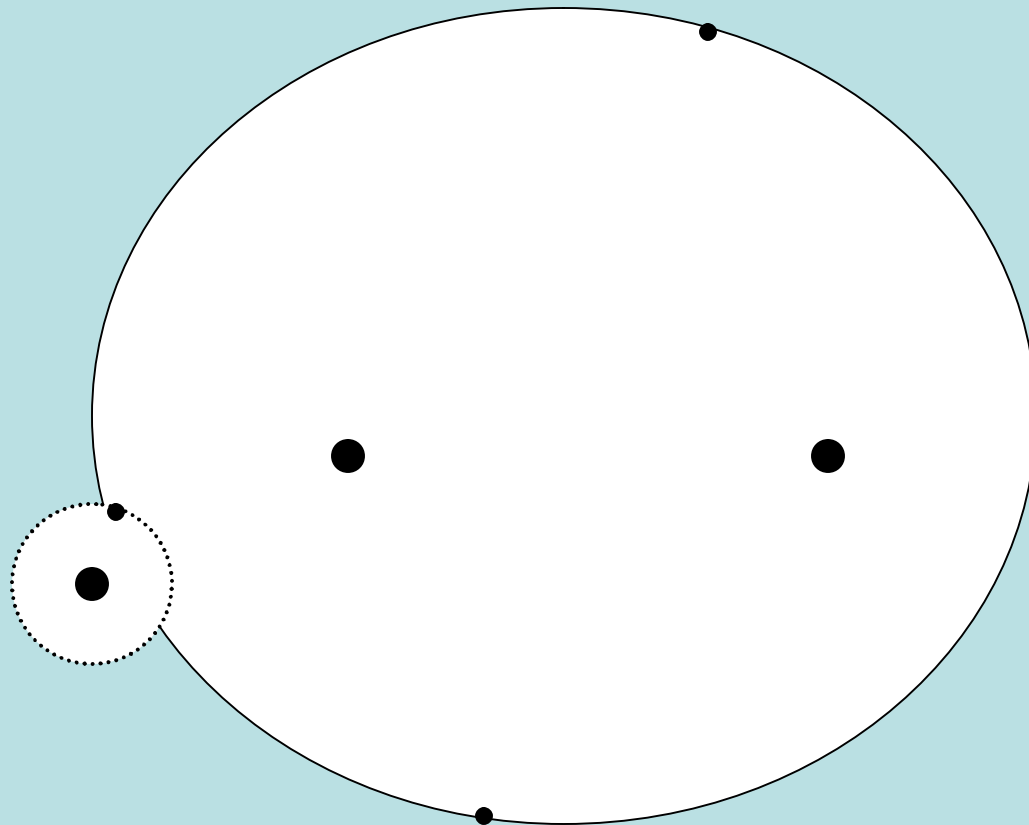
*$d\mu$ -атом*

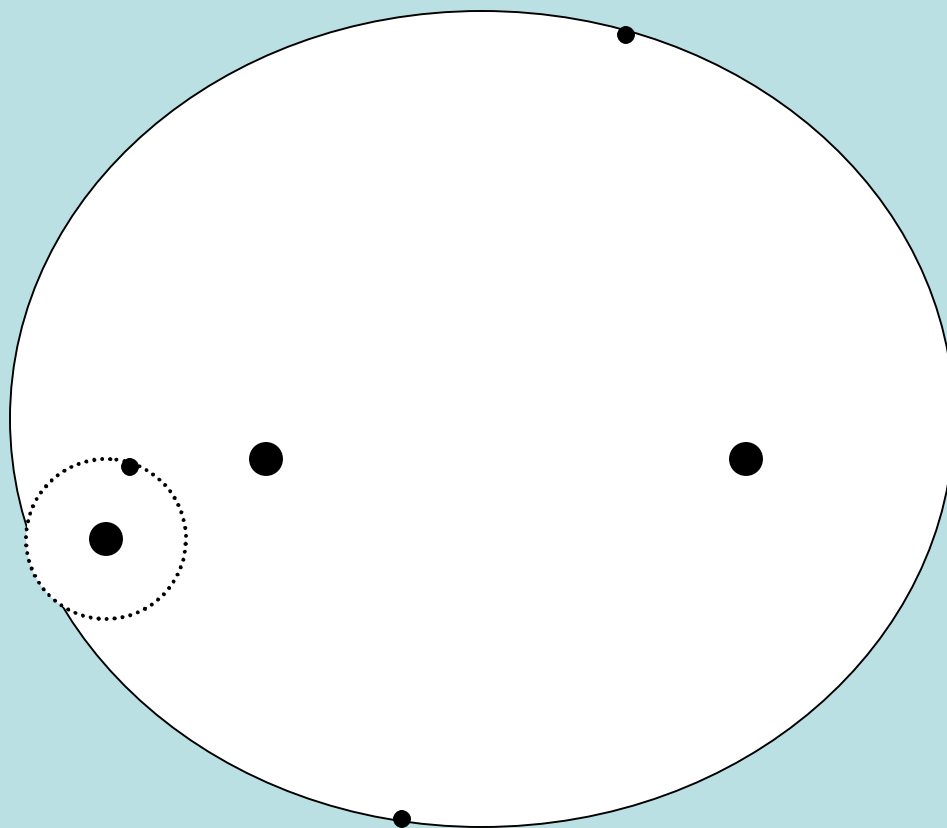


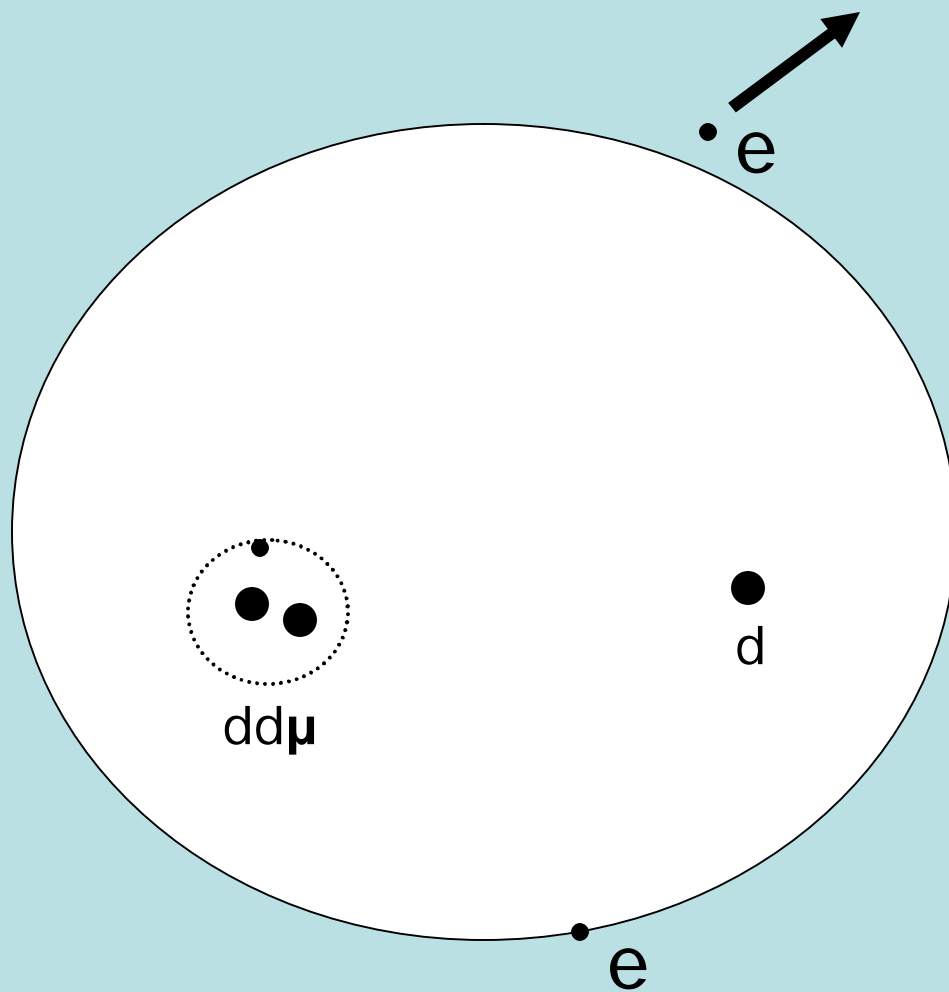
$D_2$ - молекула



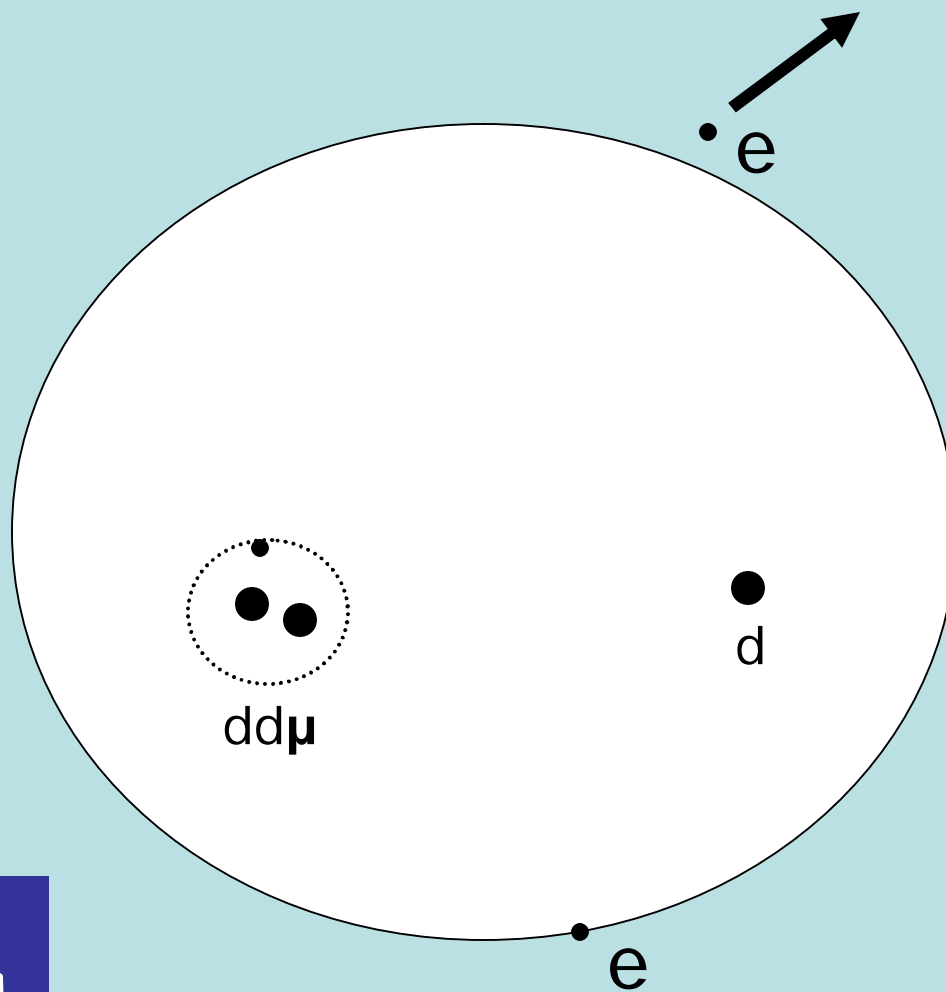






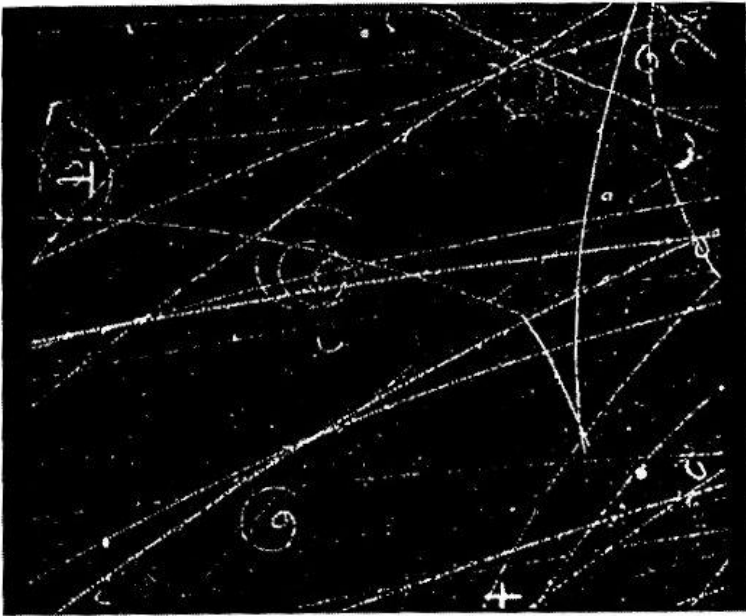
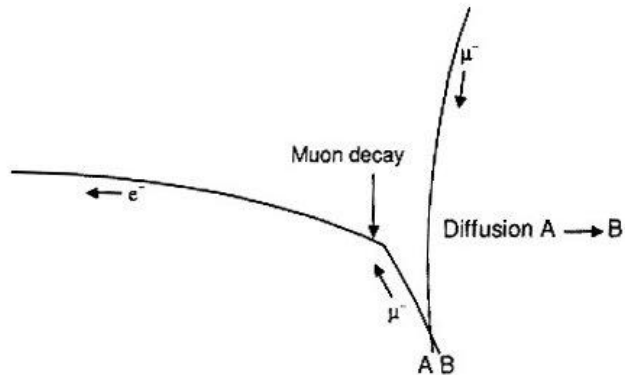


$[(dd\mu)de]^{+-}$  - комплекс



В модели Зельдовича  
вероятность образования  
мезомолекулы мала:  
~ 40%  
за время жизни мезона

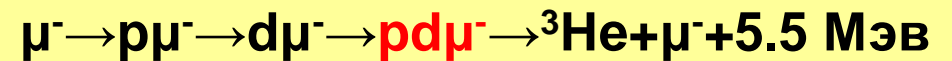
# Первое наблюдение мезокатализа реакции $pd$ - синтеза



1956

L. Alvarez

Berkeley, USA



Снимок  
с жидководородной пузырьковой камеры

## New York Times

Dec 28, 1954

*Atomic Energy Produced  
By New, Simpler Method*

Special to The  
MONTEREY, Calif., Dec. 28—  
A third and revolutionary way  
to produce a nuclear reaction  
was described here today. It does  
not involve uranium, as in the  
fission reaction, or million-degree  
heat, as in the fusion reaction.

**Но:**

**Скорость процесса оказалась малой -  
около одной мезомолекулы  
за время жизни мезона.**

# Первые наблюдения d-μ-d синтеза



*J.Fetkovich (1960)*

*J.Doede (1963)*

$$\lambda_{dd\mu}/\lambda_0 = 0.2$$

Жидкий  
водород/дейтерий  
**T = 20 K**

*В.П.Джелепов  
Дубна (1966)*

$$\lambda_{dd\mu}/\lambda_0 = 1.6$$

Газ D<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 16 атм  
**T = 240 K**

*Расчет  
в модели  
Я.Б.Зельдовича*

$$\lambda_{dd\mu}/\lambda_0 = 0.4$$

$\lambda_{dd\mu}$   
не должно зависеть  
от температуры



# Резонансное образование мезомолекул

## Гипотеза Э.А.Весмана (1967, Дубна)

Если в мезомолекуле есть уровень с малой энергией связи ( $< 4.5$  эв), то возможен резонансный переход с возбуждением  $D_2$  молекулы

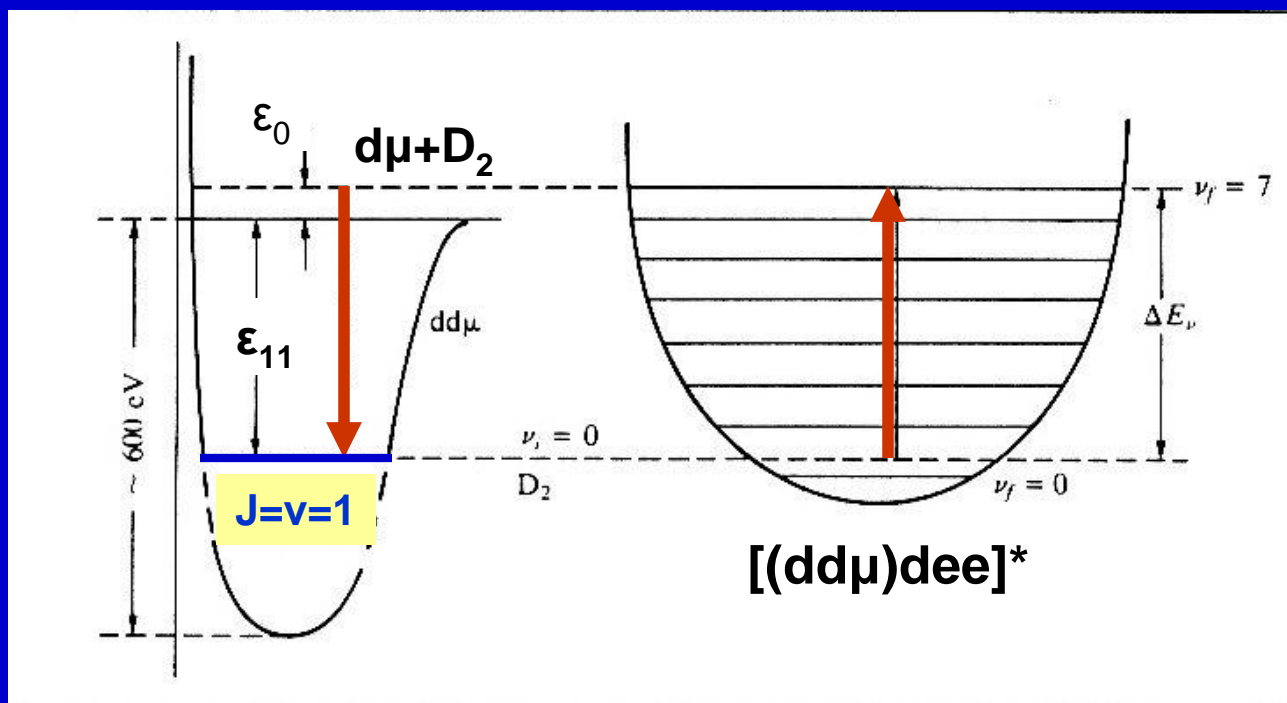


Модель Зельдовича



Модель Весмана

# Резонансное образование мезомолекул



- ▶ Резкое увеличение скорости образования мезомолекулы
- ▶ Возможна зависимость от температуры

# Прецизионные вычисления энергий слабосвязанных уровней мезомолекул

С.С.Гершейн и Л.И.Пономарев (1977)

Задача 3-х тел

Точность расчета  $10^{-5}$

Доказано существование слабосвязанных уровней в мезомолекулах

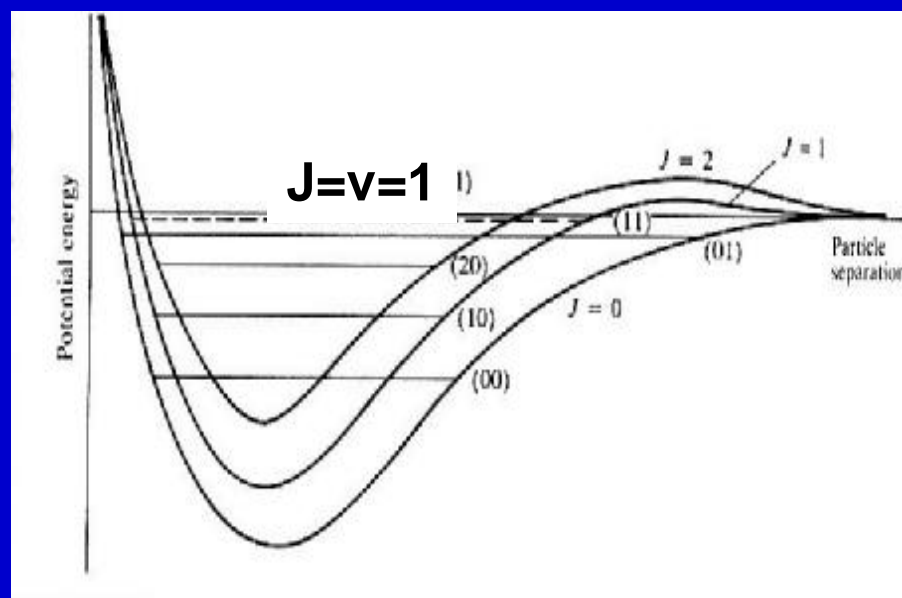
$dd\mu$   $\epsilon_{11} = -2.2$  эВ

$dt\mu$   $\epsilon_{11} = -1.1$  эВ

Вычислена вероятность образования  $dd\mu$  и  $dt\mu$  молекул

Предсказана высокая скорость d- $\mu$ -t синтеза

J, v- квантовые числа вращательных и колебательных состояний мезомолекулы



## Энергетические уровни мезомолекул (энергии связи в эв.)

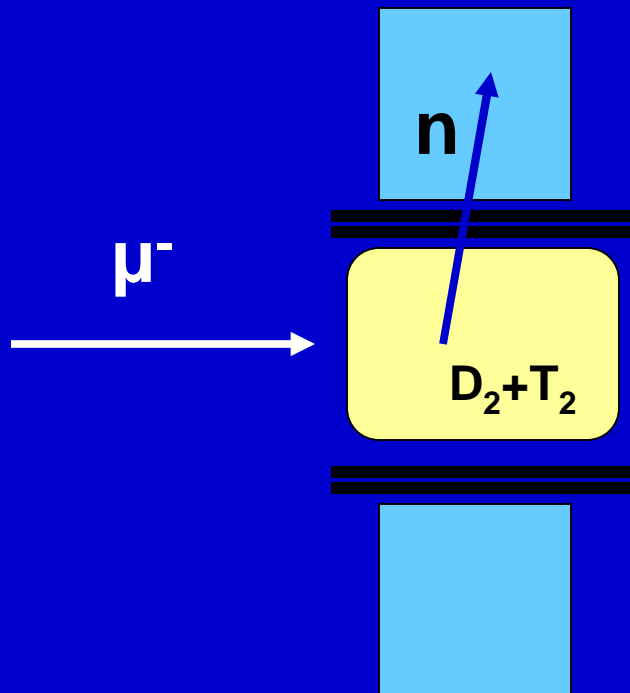
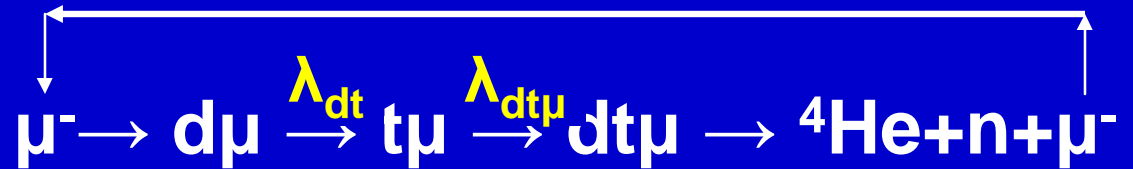
$(J, \nu) \rightarrow$	(00)	(01)	(10)	(11)	(20)	(30)
$p_{pp}$	253.152	-	107.256	-	-	-
$p_{pd}$	221.549	-	97.498	-	-	-
$p_{pt}$	213.840	-	99.127	-	-	-
$d_{pd}$	325.074	35.844	266.682	<b>1.975</b>	86.434	-
$d_{pt}$	319.140	34.834	232.472	<b>0.660</b>	102.643	-
$t_{pt}$	362.910	83.771	289.142	45.206	172.526	48.70

*$(J, \nu)$ - квантовые числа  
вращательных и колебательных уровней мезомолекул*

# Экспериментальное обнаружение мезокатализа dt-синтеза

1981

В.П.Джелепов и др.  
Дубна



Мишень  
P= 66 атм  
T= 90- 600 К  
5000 Кюри

$$\lambda_{dt} = 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$$

$$\lambda_{dt\mu} > 10^8 \text{ с}^{-1}$$

$$\lambda_0 = 0.45 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$$

Один мезон может катализировать более 100 dt-синтезов !!!

# Поддержка АН Минатм Миннауки

*Андрей Михайлович!*  
 Это направление интересно, и его  
 подробно смотрел. Считаю целесообраз-  
 ным поддержать работу и вынести  
 наше совместное решение.  
 По АН распоряжение будет готовлено  
 Филиппов В.А. (научно-орг. отдел)  
 Заверев В.С. (научно-орг. отдел)

ПРЕЗИДЕНТУ АН СССР  
 АЛЕКСАНДРОВУ Анатолию Петровичу  
 ПРЕДСЕДАТЕЛЮ КОМИТЕТА ПО МИРНОМУ  
 ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
 ПЕТРОСЬЯНЦУ Андрею Михайловичу

В последние годы достигнут значительный прогресс в экспериментальном и теоретическом изучении  $\mu$ -мезонных и  $\mu$ -мезонных процессов в смеси изотопов водорода. Из этих результатов следует, что при определенных условиях в молекулярной смеси дейтерия и трития один  $\mu^-$ -мезон может осуществить катализ  $\sim 100$  реакций синтеза ядер дейтерия и трития и освободить при этом  $\sim 100$  нейтронов с энергией  $14,1$  Мэв, которые могут быть использованы для получения ядерной энергии деления и производстве  $^{239}\text{Pu}$  в урановой blankets из  $^{238}\text{U}$ .

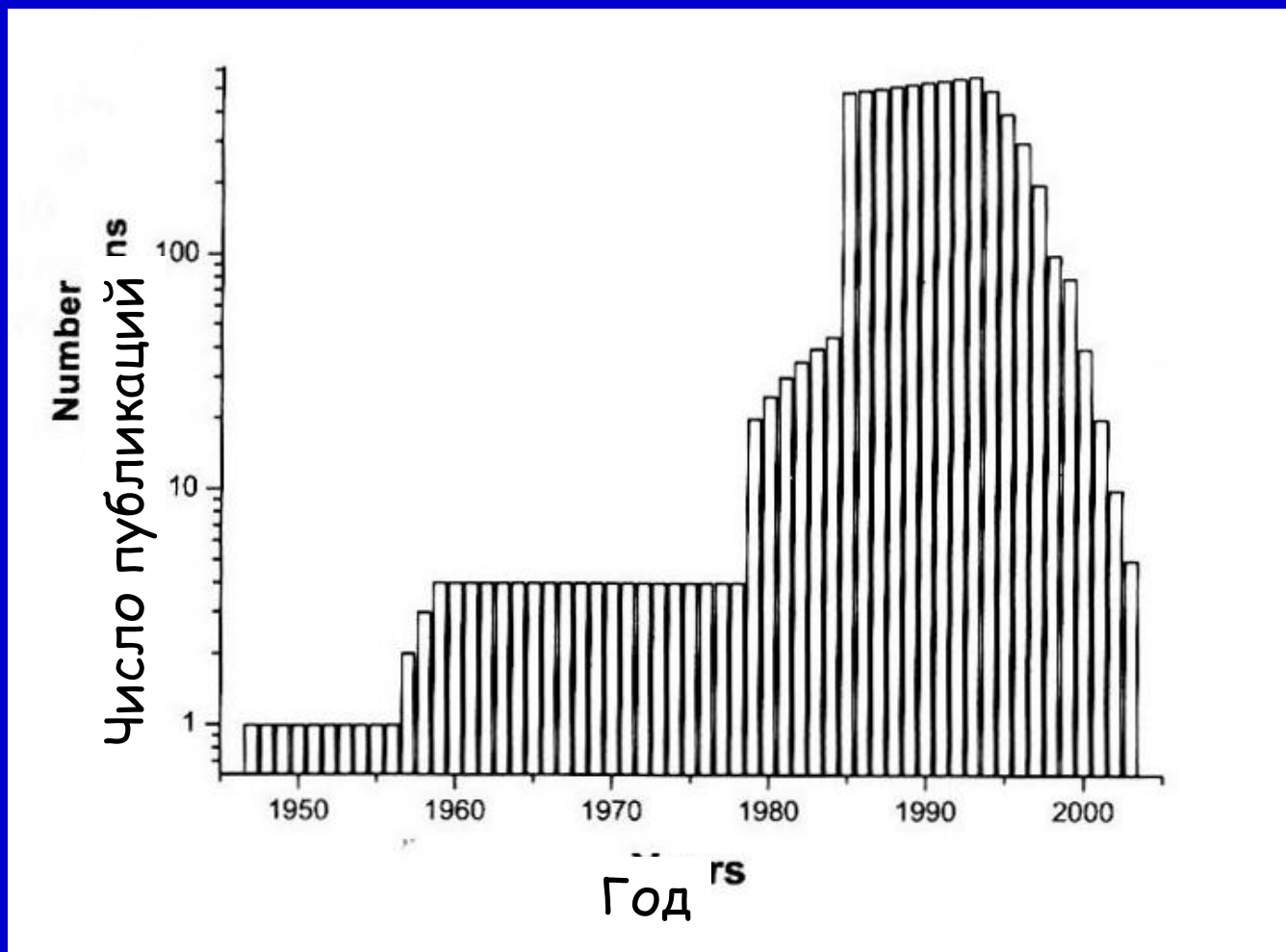
В прилагаемой записке излагается суть полученных результатов, предлагается программа исследований по дальнейшему выяснению механизма явления мюонного катализа и обсуждаются возможные практические последствия этого явления.

*И.И. Заверев В.С.  
 Филиппов В.А.  
 Минусинский  
 11.01.*

*Тер* С.С. ГЕРШТЕЙН  
*Гуревич* И.И. ГУРЕВИЧ  
*Джелепов* В.П. ДЖЕЛЕПОВ  
*Петров* Ю.В. ПЕТРОВ  
*Пономарев* Л.И. ПОНОМАРЕВ  
*Шабельский* Ю.М. ШАБЕЛЬСКИЙ

16 ноября 1978 г.

## Число публикаций, связанных с мезокатализом



ОИЯИ  
ПНЯФ  
КЦ  
ИТЭФ

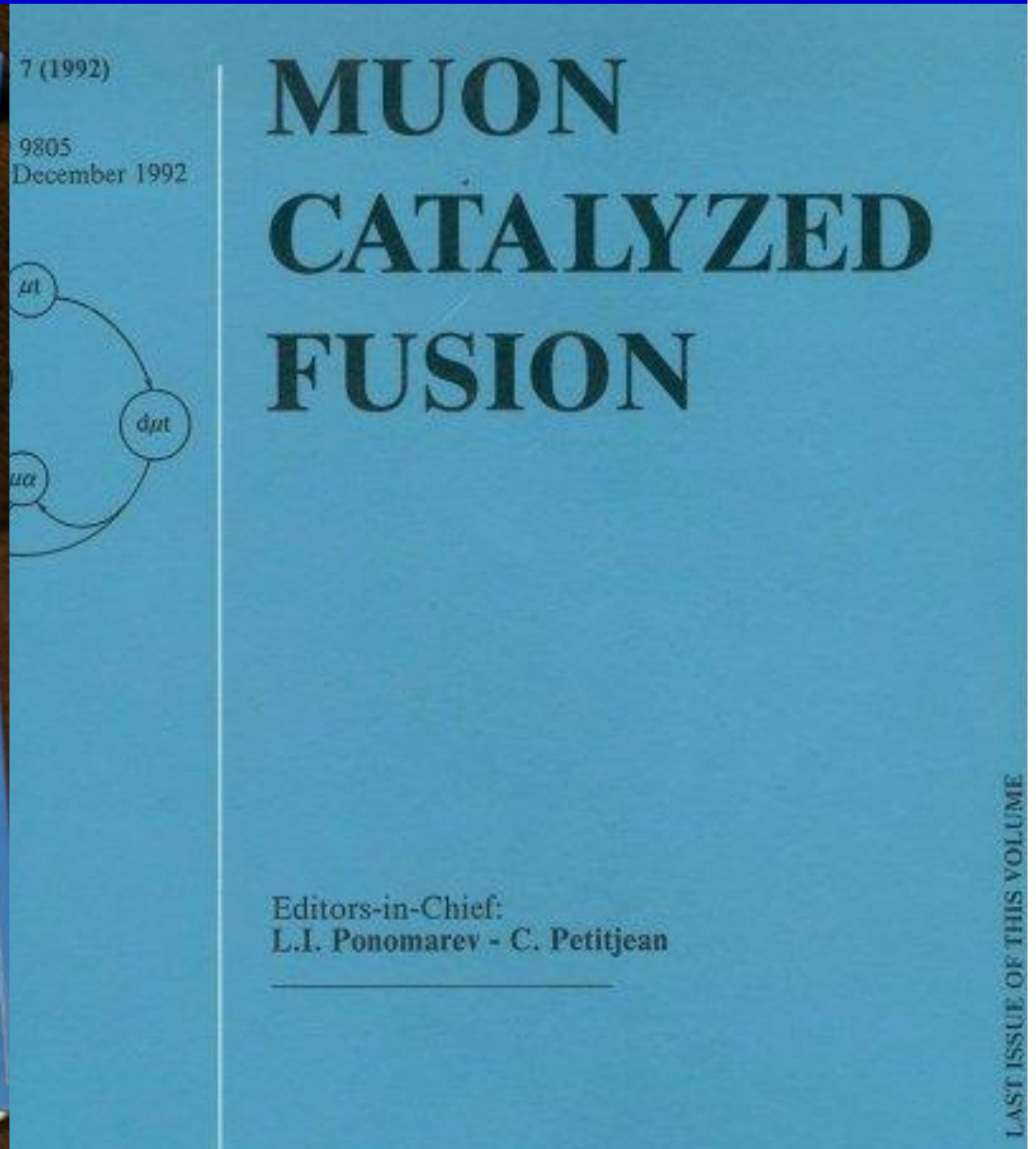
Швейцария  
США  
Канада  
Япония  
Англия  
Бельгия  
Австрия  
Германия  
Италия  
Польша  
Швеция

## Основные конференции по мезокатализу

1986	Токуо	Япония
1987	Гатчина	Россия
1988	Sanibel	США
1989	Oxford	Англия
1990	Vienna	Австрия
1992	Uppsala	Швеция
1995	Дубна	Россия
1998	Ascona	Швейцария
2001	Shimoda	Япония
2002	Vienna	Австрия



*С 1987 года издается журнал  $\mu$ CF*



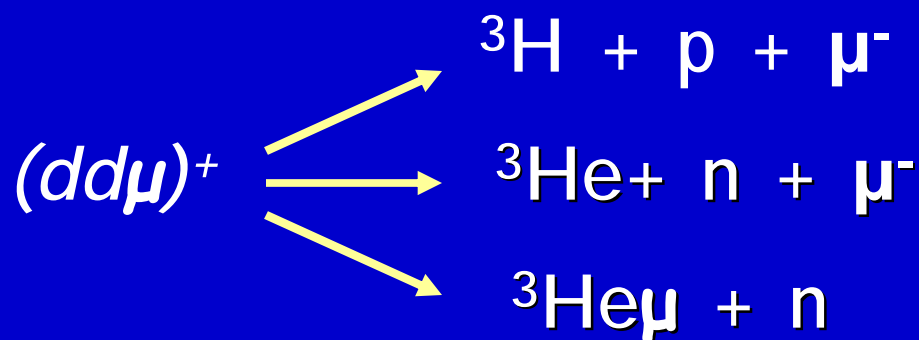
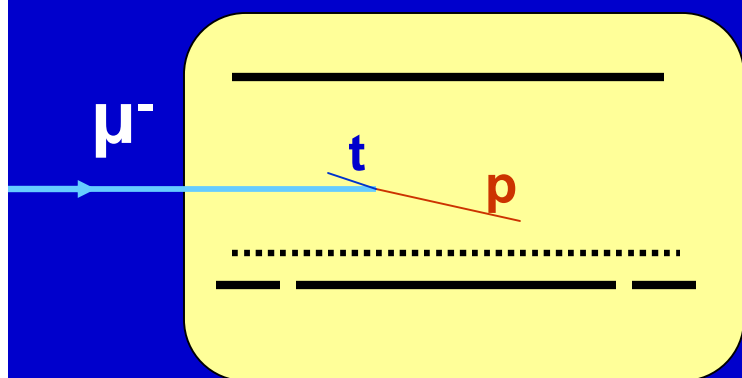
**Исследование  
мезокатализа dd-синтеза**

# НОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ МЕЗОКАТАЛИЗА ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

1981

А.А.Воробьев и др.  
ПИЯФ, Гатчина

Время-проекционная  
водородная  
ионизационная камера



$\text{H}_2, \text{D}_2, \text{HD}, \text{D}_2 + \text{T}_2$   
 $P = 30-160 \text{ атм}$   
 $T = 28-350 \text{ К}$

*Регистрируются все каналы dd-синтеза  
100% эффективность  
Высокая абсолютная точность*

## Сотрудничество с Швейцарской Мезонной Фабрикой

После первых экспериментов в Гатчине исследования были перенесены в Швейцарскую Мезонную Фабрику

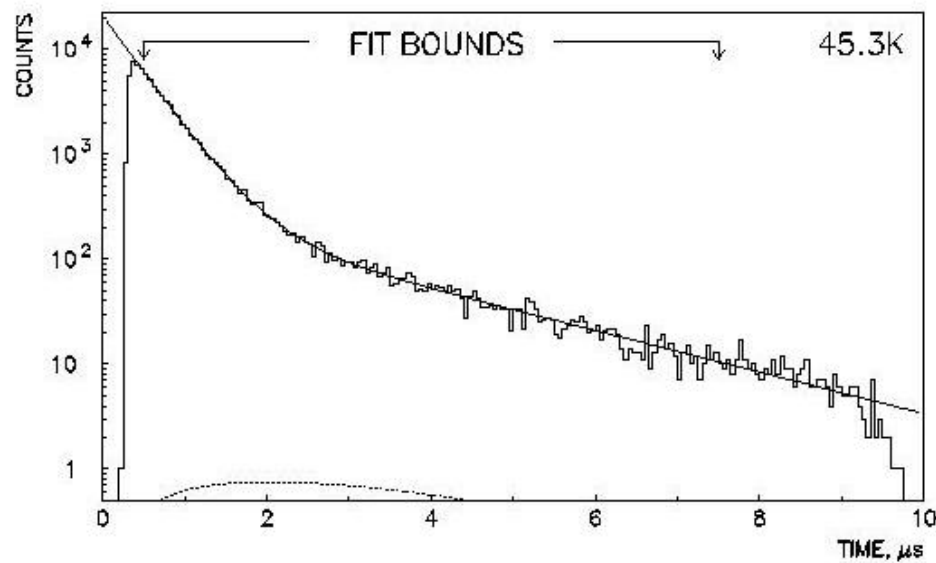
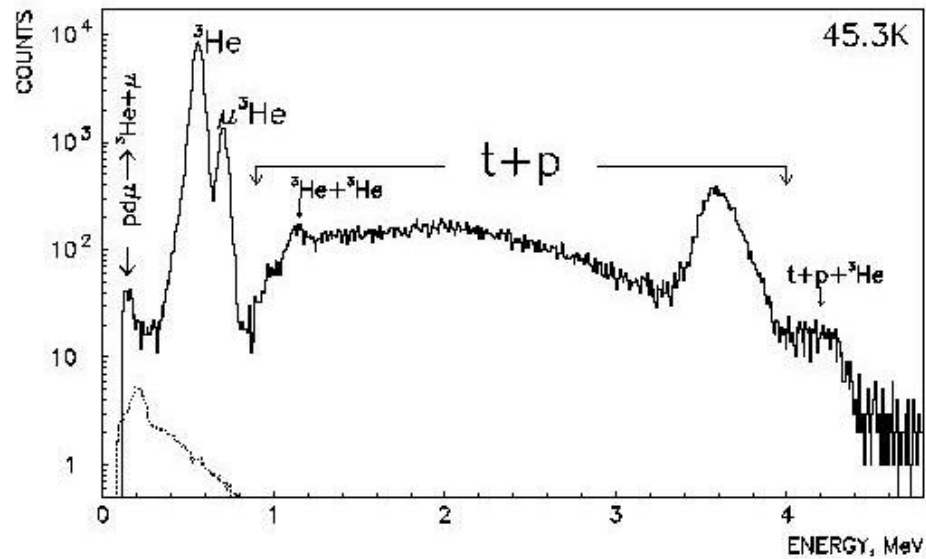
Энергия протонов 600 МэВ  
Ток в пучке 2 мА  
100% Duty Factor  
Эффективный мезонный канал

В экспериментах приняли участие группы из Швейцарии, Германии, Австрии, США.

Были измерены все основные параметры  $d$ - $\mu$ - $d$  синтеза



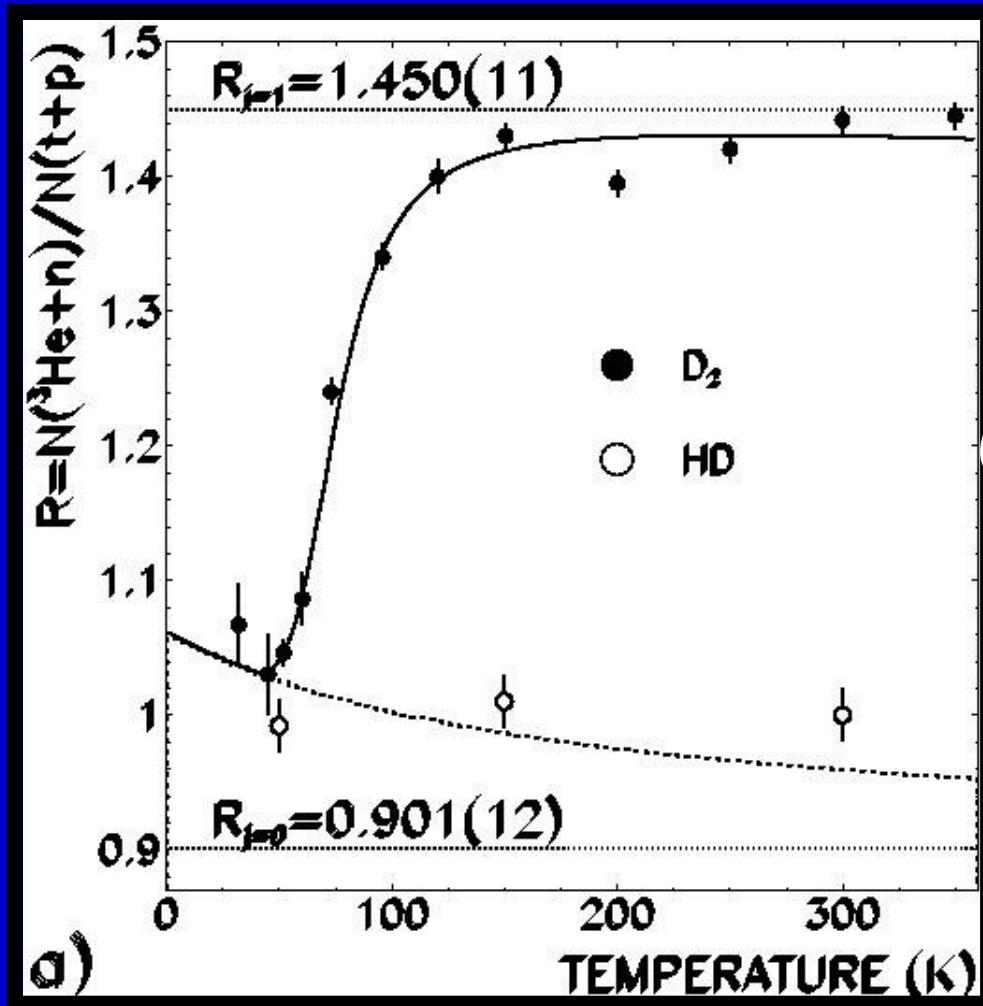
Гатчинский детектор на мезонном канале ШМФ



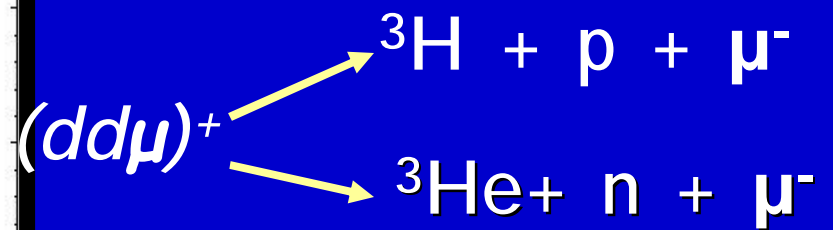
Пример амплитудного  
спектра продуктов  
d-μ-d синтеза

Пример временного  
распределения продуктов  
d-μ-d синтеза

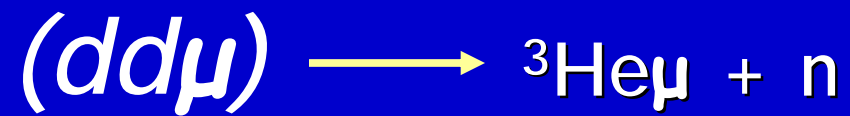
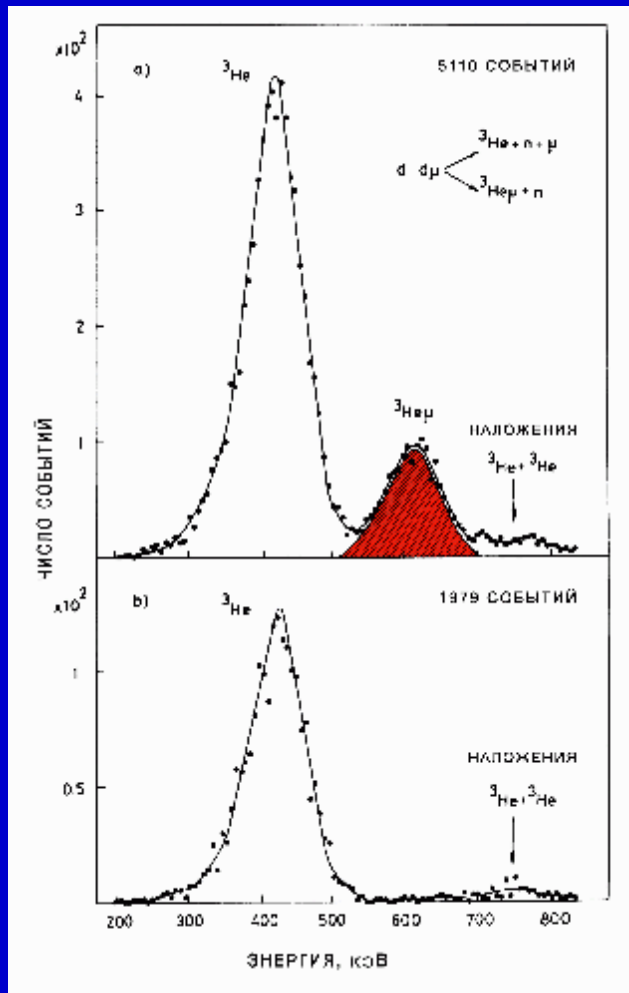
**Отношение выходов  
изотопически симметричных каналов**



$$R = Y(^3\text{He}+n) / Y(^3\text{H}+p)$$



# Вероятность прилипания мюона к ядру ${}^3\text{He}$

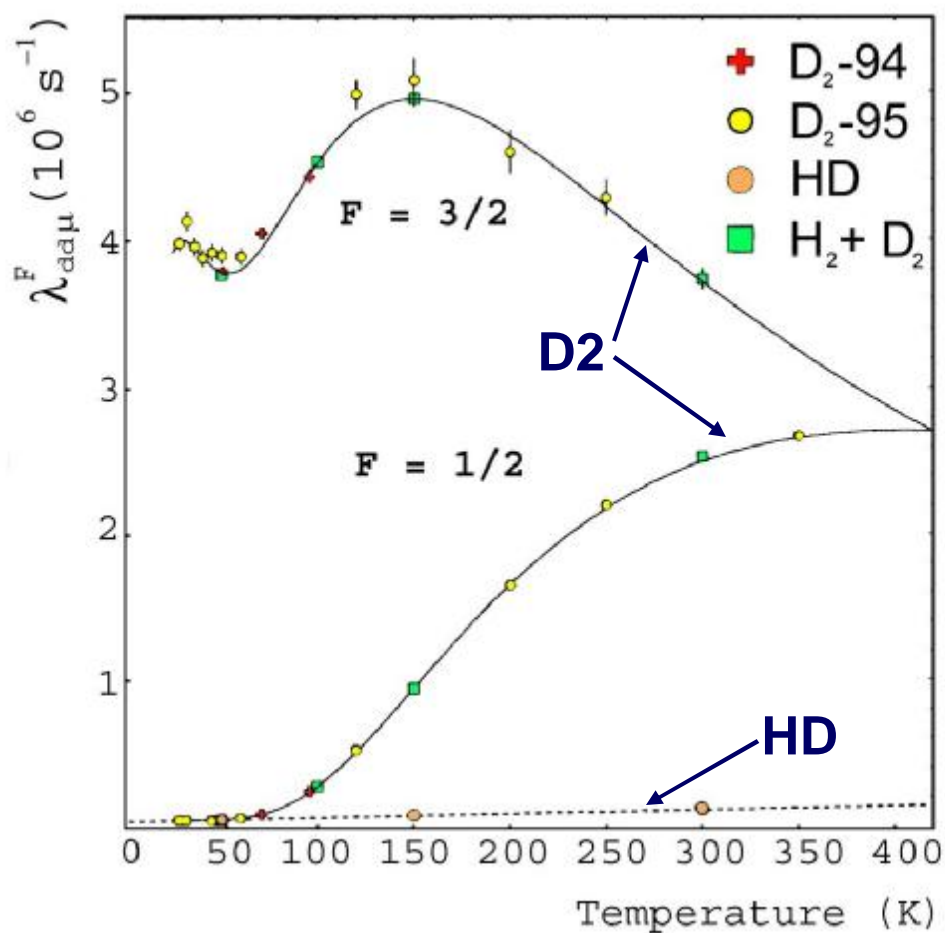


Эксперимент  $\omega_{dd} = 0.1206(6)$

Теория  $\omega_{dd} = 0.122$

(Л.И. Пономарев и др)

# Вероятность образования $dd\mu$ -молекул



$d\mu(F=3/2) \rightarrow dd\mu$

$d\mu(F=1/2) \rightarrow dd\mu$

Линии - теория  
М.П.Файфман



# Прогресс в теории мезокатализа

- ▶ Физика мезоатомов
- ▶ Уровни мезомолекул
- ▶ Волновые функции мезомолекул
- ▶ Матричные элементы перехода в комплекс  $[(dd\mu)de]^*$
- ▶ Вероятность слияния ядер
- ▶ Вероятность прилипания мюонов к ядрам He

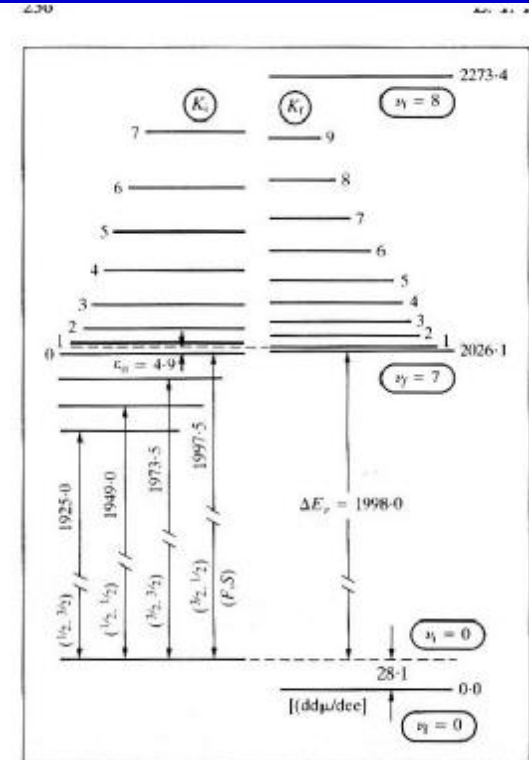
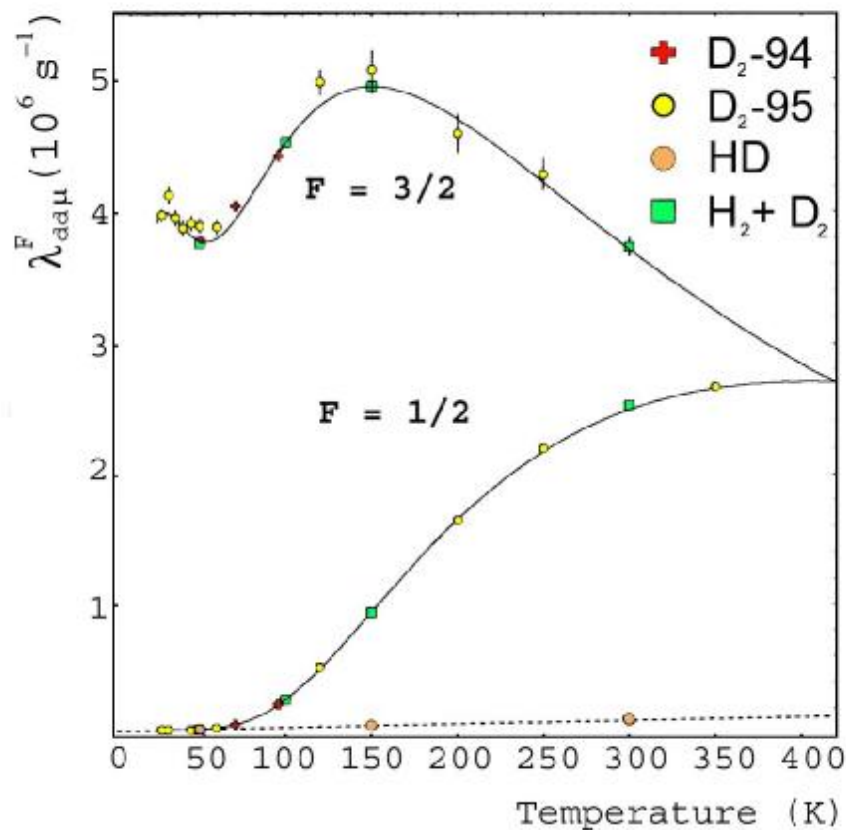


Figure 16. The energy level scheme of the dominant transition ( $F = 3/2, v_i = 0, K_i = 0$ )  $\rightarrow$  ( $S = 1/2, v_f = 7, K_f = 1$ ) in reaction (26 c). The resonant collision energy is  $\epsilon_0 = 4.9$  mcV.

# Сравнение теории и эксперимента



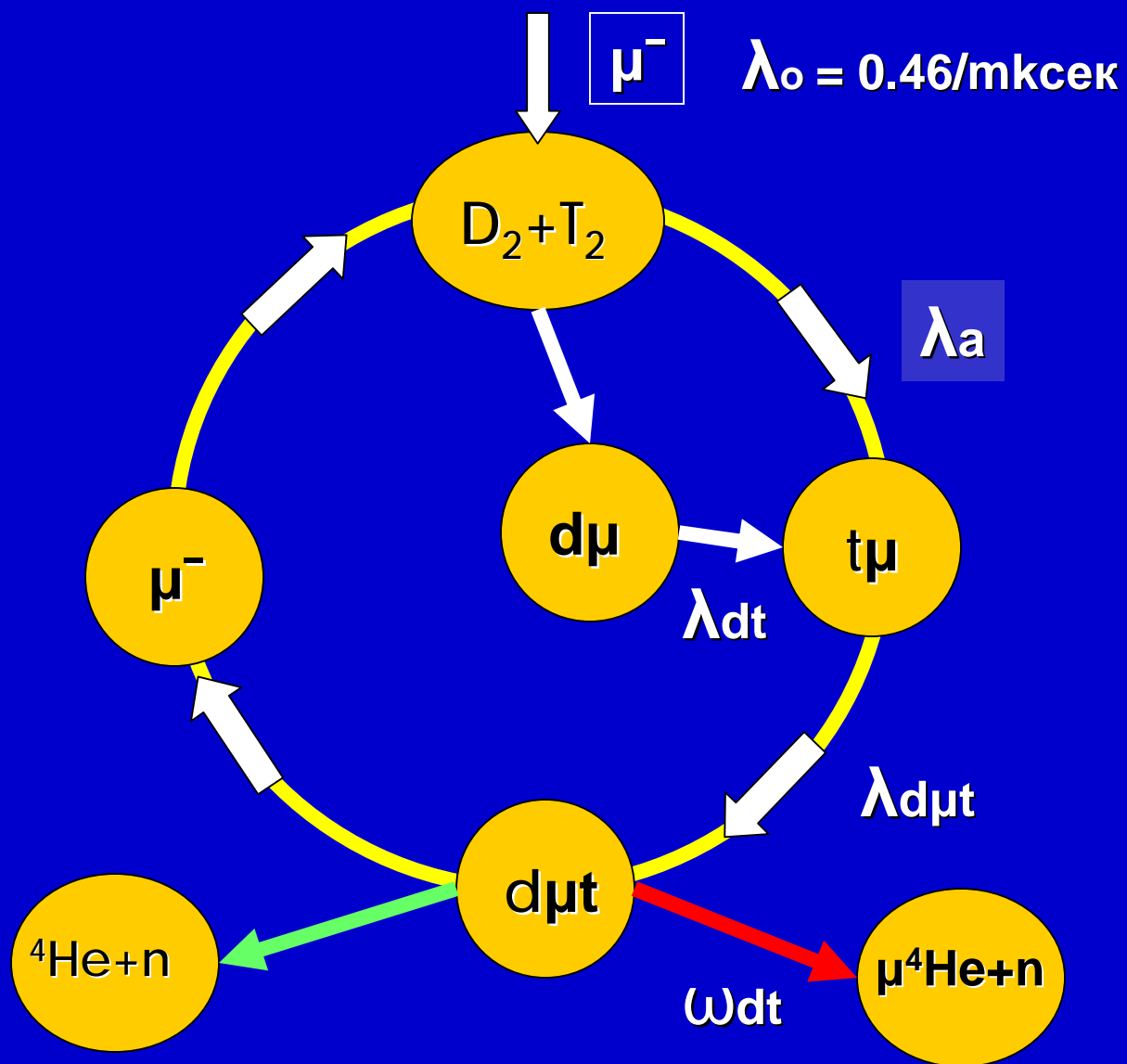
$E_{11} = -1.9626(3)$  эв    эксп

$E_{11} = -1.9648$  эв    теория

Вклад поляризации вакуума  
 $\delta E_{11} = -0.0098$  эв

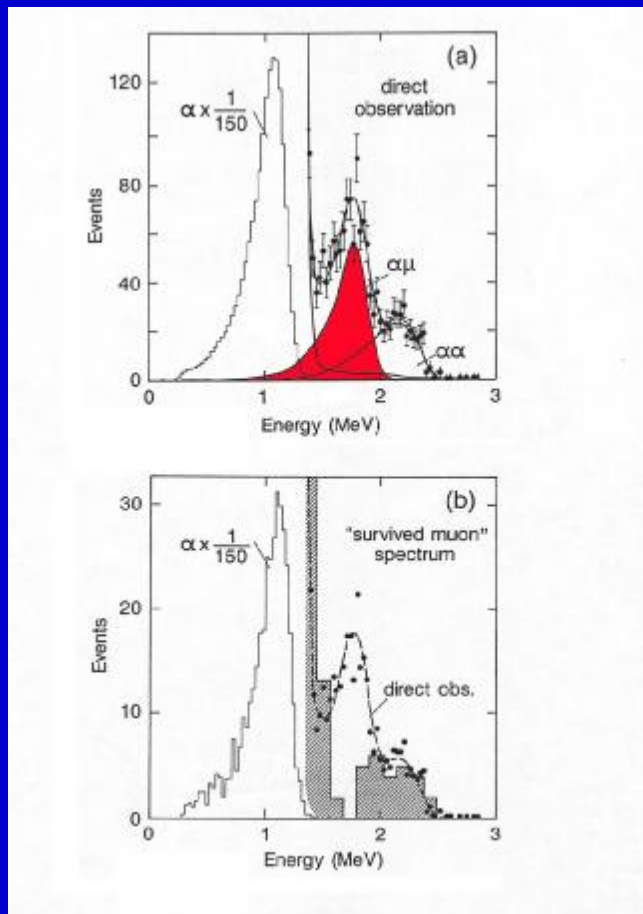
Ограничение на существование  
дальнодействующих ядерных сил

**Исследование  
мезокатализа dt-синтеза**



# Вероятность прилипания мюона к ядру ${}^4\text{He}$

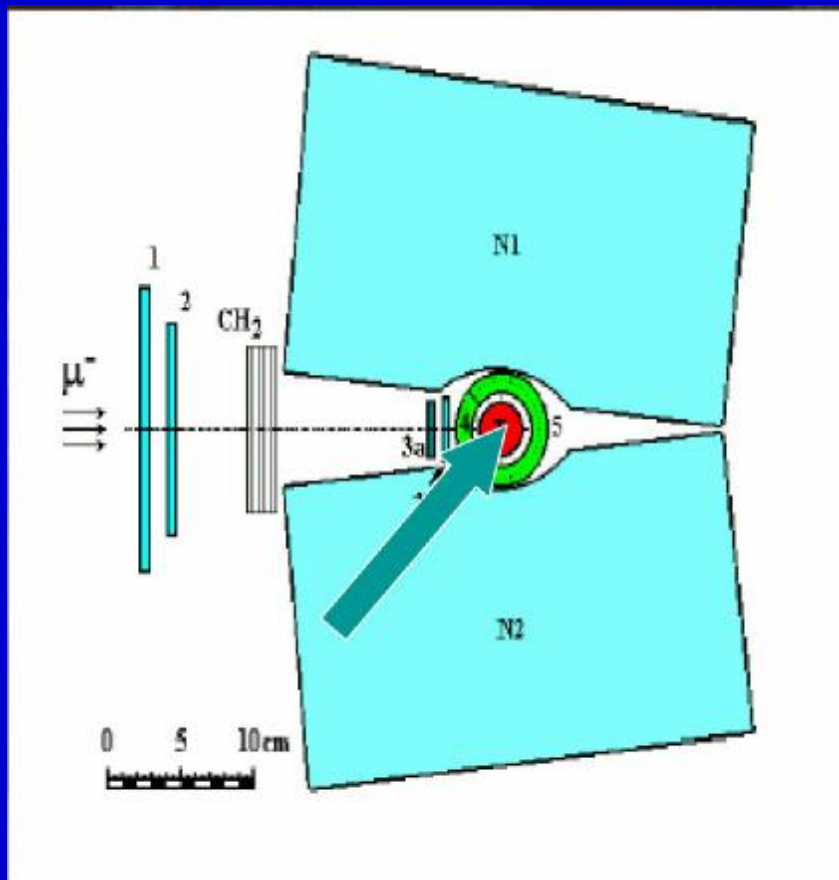
## Эксперимент Гатчина-PSI



$$\omega_{dt} = (0.56 \pm 0.04)\%$$

Среднее предельное число  
dt-синтезов, катализируемых  
одним мюоном =  $175 \pm 15$

# Прямое измерение числа $dt$ -синтезов в D/T смеси



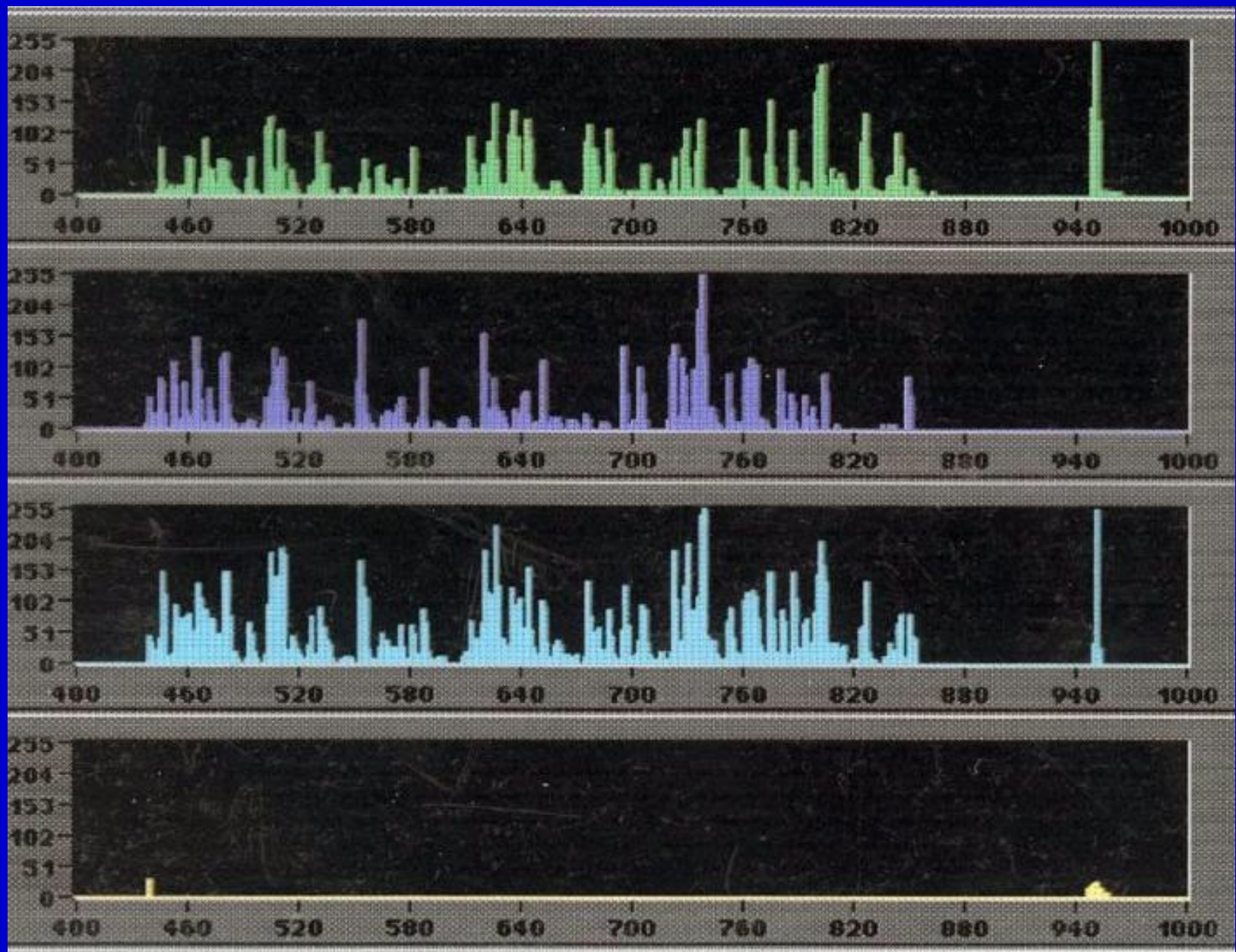
Эксперимент Дубна-Саров



11/25/2003

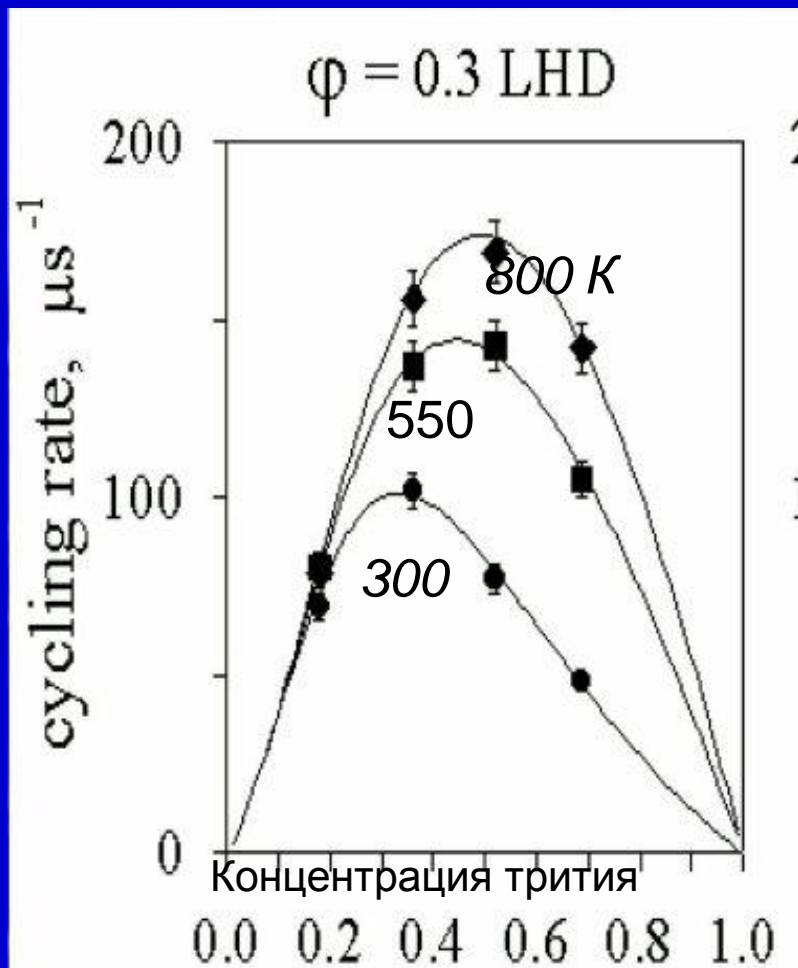
PAC 19, Dubna

4





## Зависимость скорости катализа от температуры и процентного содержания трития



## Эксперимент Дубна-Саров

Среднее число dt-синтезов, полученное в оптимальных условиях, равно 120.

Результат PSI: 120 циклов  
Результат LAMPF: 150 циклов

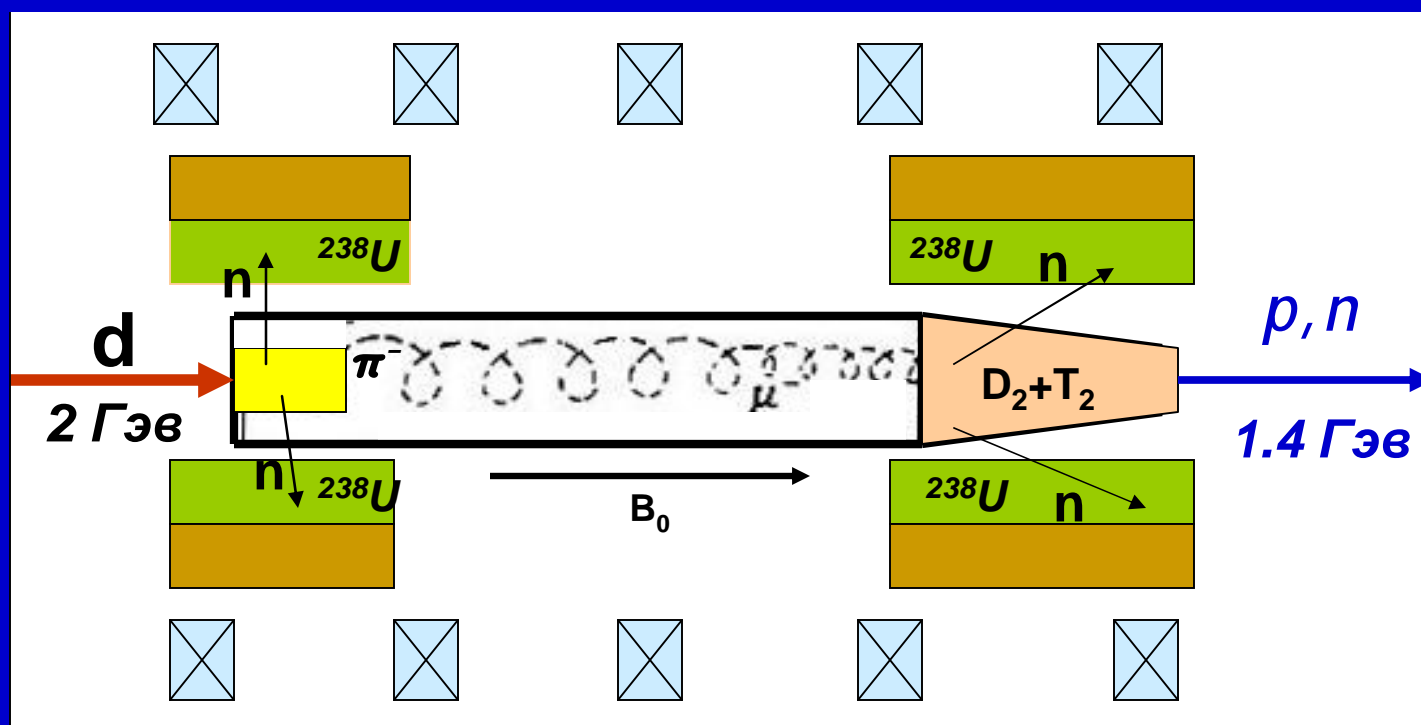
## **Возможные практические применения мезокатализа dt-синтеза**

- ▶ Получение энергии**
- ▶ Интенсивный источник нейтронов  
с энергией 14 МэВ**

# Схема мезокаталитического реактора

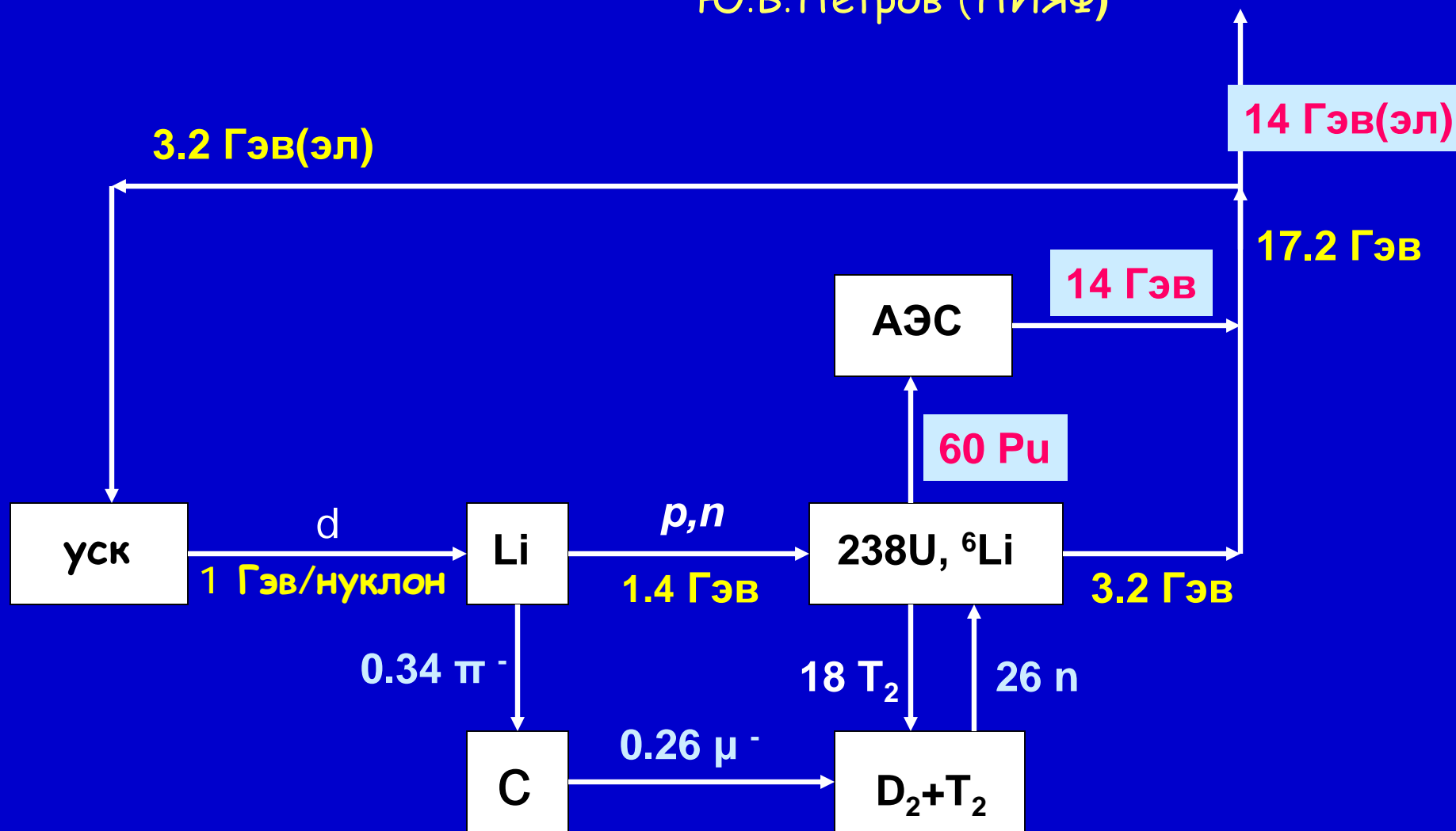
Ю.В Петров (Тияф)

Ускоритель → 1d → 0.26μ → 26n → 21 делений + 24 ядра Pu  
3.2 ГэВ      2 ГэВ      0.45 ГэВ      8.8 ГэВ  
(электрич)      (электрич)



# Схема гибридного реактора

Ю.В.Петров (ТИЯФ)



Добавление мезокатализа к электроядерному каналу увеличивает эффективность системы вдвое.

Произведенная гибридным реактором энергия достаточна для покрытия собственных расходов, а наработанный плутоний может обеспечить работу четырех АЭС такой же мощности, работающих на тепловых нейтронах

**Основная техническая проблема – создание сильноточного ускорителя: для обеспечения плутонием АЭС мощностью ~1 ГВт необходим ускоритель дейтронов (протонов) с энергией в пучке ~ 100 МэВ.**

## Изучение возможности создания источника нейтронов на основе мезокатализа

Интенсивный источник нейтронов для исследования материалов, используемых в термоядерных установках

Требуемые параметры:

Энергия нейтронов	$E_n = 14 \text{ МэВ,}$
Полная интенсивность	$I_n = 10^{17} \text{ н/сек,}$
Поток	$\Phi_n = 10^{14} \text{ н/см}^2$

**РНЦ** Курчатовский центр

**ИАТЭ** Обнинск

**ВНИИЭФ** Саров

**ИЯИ** Троицк

**ПИЯФ** Гатчина

**ЕНЕА** Bologna Italy

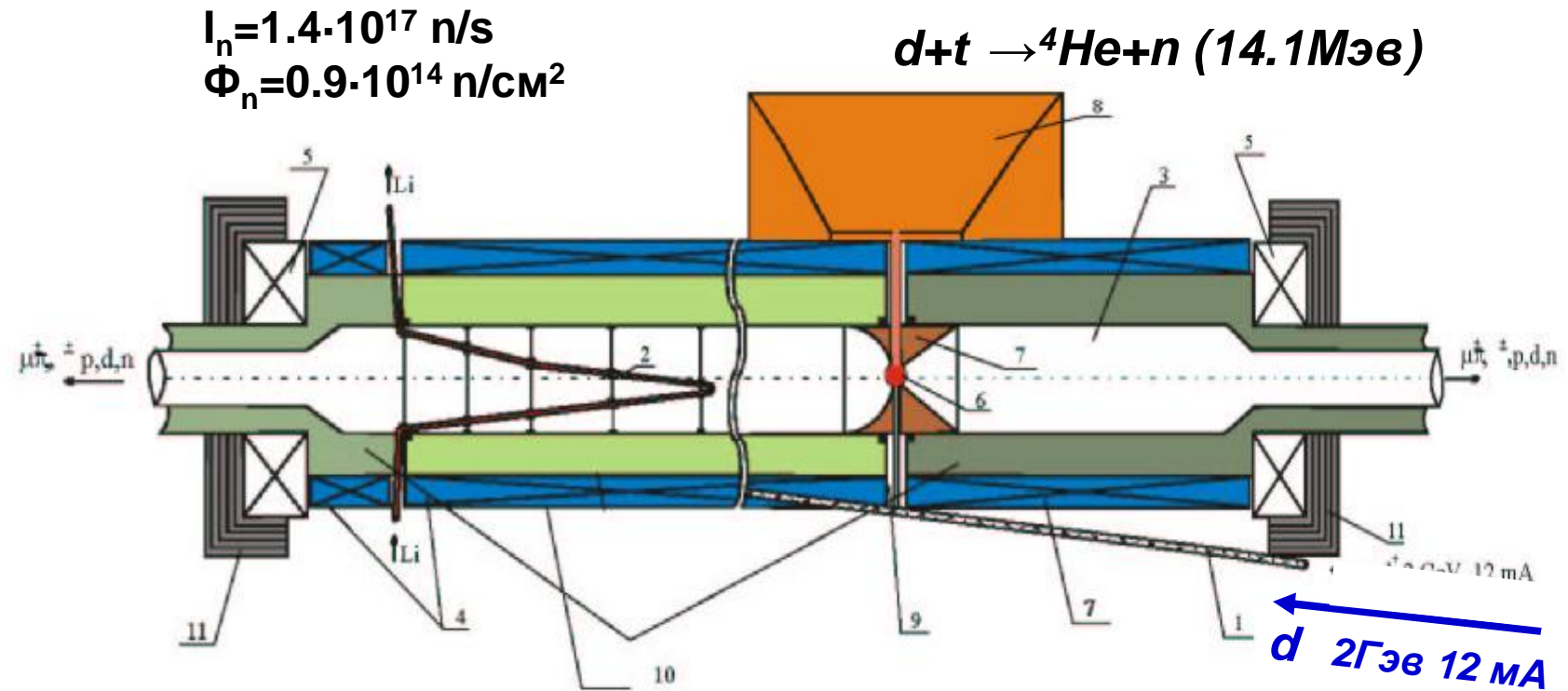
Координатор Л.И.Пономарев

*Fusion Technology*

v. 39 (2001)

Стр 198-227

# Интенсивный источник нейтронов на основе мюонного катализа



## Магнитное поле 17/7 Тесла

- 1 - канал ввода дейтронов; 2 - пинообразующая мишень; 3 - конвертор;  
4 - сверхпроводящие магниты; 5 - магнитные пробки; 6 - синтезатор;  
7 - сборка для испытания образцов; 8 - системы тритиевого топливного цикла ИИН;  
9 - вставка синтезатора; 10 - защита от продуктов ядерных реакций;  
11 - магнитные экраны.

## **Заключение**

- **Усилиями международного сотрудничества за последние 20 лет достигнут огромный прогресс в исследовании мезоатомной и мезомолекулярной физики. В частности, всесторонне изучено уникальное явление мюонного катализа реакций ядерного синтеза**
- **В этих исследованиях роль российских ученых была и остается исключительно весомой.**
- **Для дальнейшего развития мезонной физики в нашей стране (фундаментальной и прикладной) важно как можно скорее завершить создание Московской Мезонной Фабрики.**