

## *Поиск $d\mu$ $^3\text{He}$ - синтеза (PSI)*



# Ядерная реакция синтеза

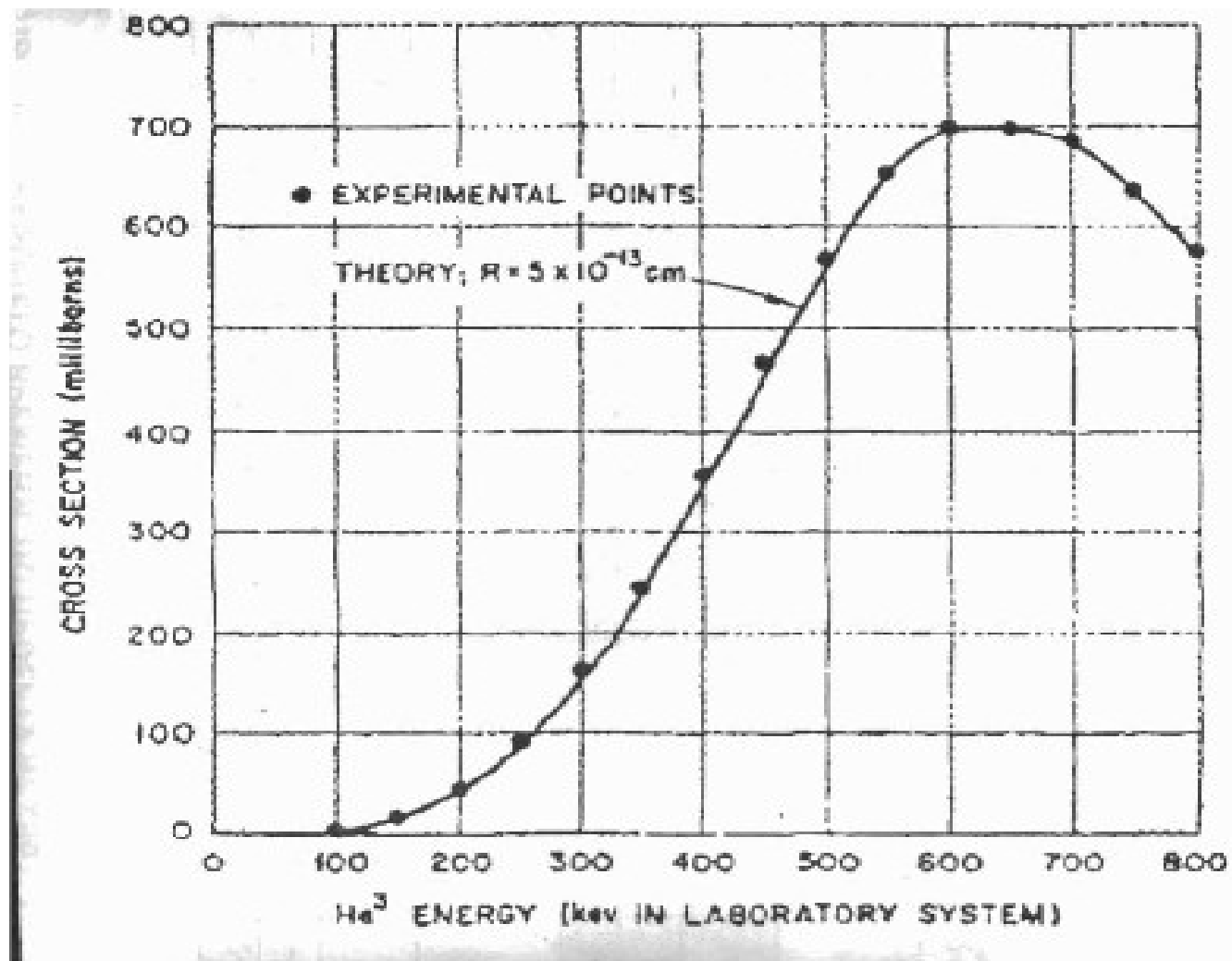


*представляет интерес по следующим причинам :*

- 1. Зеркальная реакция по отношению к реакции ядерного  $d+t \rightarrow {}^4\text{He}+n$  синтеза ( $Q=17.6 \text{ MeV}$ ).*
- 2. Перспективный источник термоядерной энергии.*
- 3. Процесс первичного ядерного синтеза легких элементов в ранней вселенной ( астрофизика).*

*Для всех этих процессов важно знать сечение этой реакции при очень низких энергиях столкновения ( $E < 10\text{keV}$ ).*

**Сечение реакции  ${}^3\text{He}d$  -синтеза . Зависимость сечения реакции от энергии ядра  ${}^3\text{He}$ .**

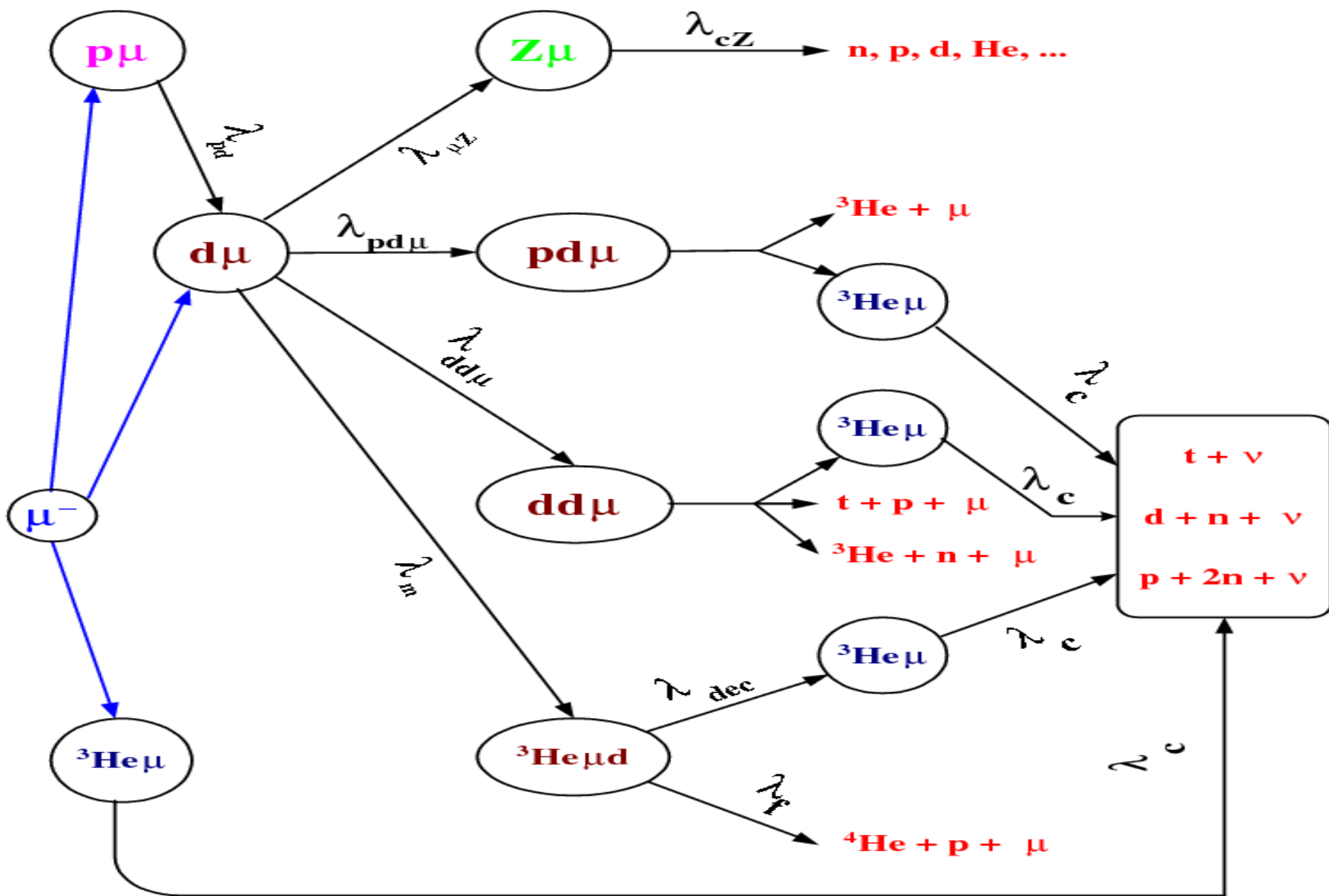


## Ядерный синтез в $d\mu\ ^3\text{He}$ мюонной молекуле.

Феномен **Мюонного Катализа** ядерных реакций синтеза дает возможность изучать эти реакции практически при нулевых энергиях столкновений благодаря образованию мюонной молекулы  $d\mu\ ^3\text{He}$ :



# Упрощенная схема реакций мюонного катализа в HD+<sup>3</sup>He смеси



# Образование и распад $d\mu^3\text{He}$ - молекулы

1. Образование  $d\mu^3\text{He}$ -мюонной молекулы (Аристов, Кравцов, Попов-1981)

скорость ( $\lambda_m$ ):  $d\mu+^3\text{He} \rightarrow (d\mu^3\text{He})(J)$ ,  $J=1$ ,  $J$  – угловой момент

$$\lambda_m = 124(5) \mu\text{s}^{-1}, T = 300 \text{ K (PNPI-1984, 1992)}$$

$$\lambda_m = 232(9) \mu\text{s}^{-1}, T = 50 \text{ K (PNPI-PSI-1999)}$$

2. распад  $d\mu^3\text{He}$ - молекулы со скоростью  $\lambda_{\text{dec}} \sim 7 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ,

$d\mu^3\text{He} \rightarrow ^3\text{He}\mu + d + \gamma$  (испускание  $\gamma$ -кванта)

$^3\text{He}\mu + d + e^-$  (Оже переход)

$^3\text{He}\mu + d$  (распад  $d\mu^3\text{He}$ - молекулы)

3. переход  $d\mu^3\text{He}$ -молекулы ( $J=1$ )  $\rightarrow$  ( $J=0$ ) с  $\lambda_{10} \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$

цепь молекулярно – ионных реакций (Файфман, Меньшиков-1999)

с образованием мюон -молекулярных комплексов  $(^3\text{He}d\mu\text{D}_2)^+$  ;



## Ядерный синтез в $d\mu^3\text{He}$ – молекуле

Скорость ядерного синтеза в  $d\mu^3\text{He}$ - молекуле  $\lambda_f(J)$   
(Богданова, Герштейн, Пономарев-1997,  
Абрамов, Гусев, Коробов- 1999).



$$\lambda_f(0) \sim (1.9-2.8) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}, \quad \lambda_f(1) \sim 6.5 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$$

$\lambda_f(\text{eff})$  - эффективная скорость синтеза в  $d\mu^3\text{He}$ - молекуле

$$\lambda_f(\text{eff}) = w(0) \cdot \lambda_f(0) + w(1) \cdot \lambda_f(1) \sim w(0) \cdot \lambda_f(0), \quad \text{где}$$

$w(J)$  – заселенность состояния  $d\mu^3\text{He}$  с угловым моментом  $J$ .

## MCF- collaboration (PNPI-PSI-TUM-UCLB)

### Экспериментальный метод:

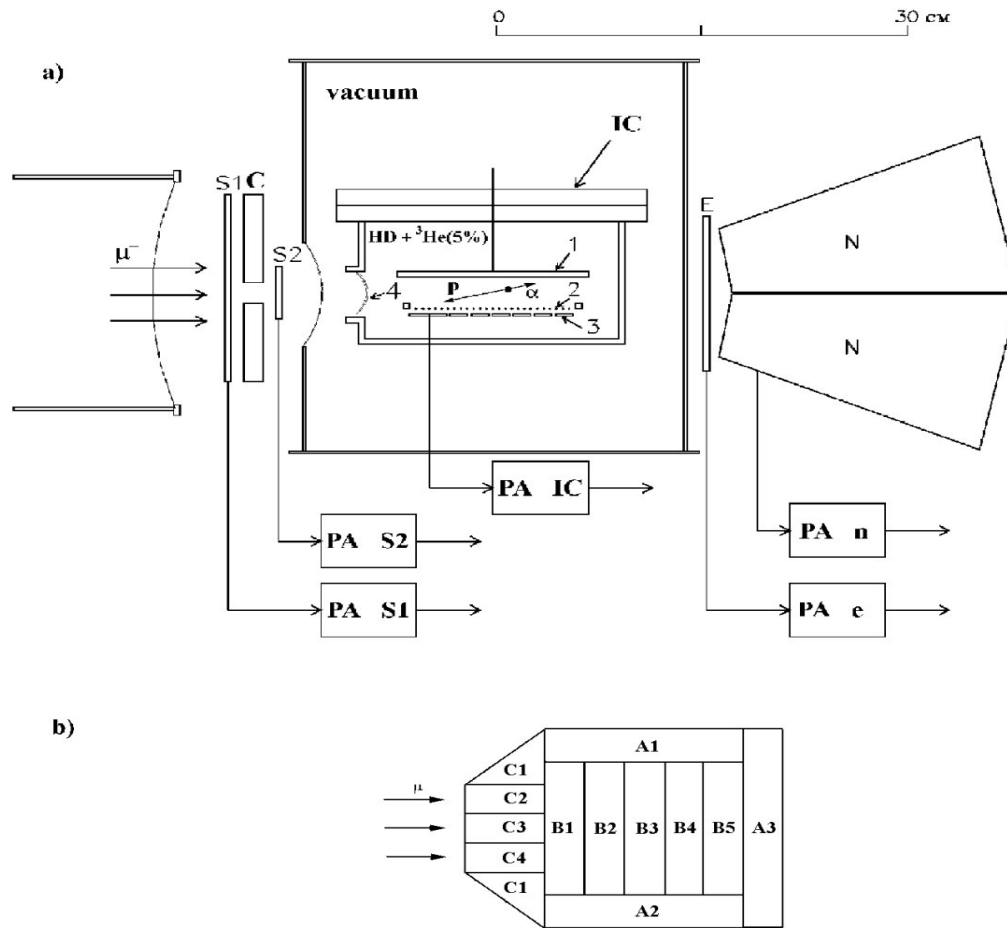
**Активная мишень** -ионизационная камера высокого давления ( $p \sim 100 \text{ bar}$ ), являющаяся одновременно и газовой мишенью и детектором заряженных частиц. Детектируются мюоны и все заряженные продукты реакций  $dd$ - ,  $pd$ - and  ${}^3\text{He}d$ - синтеза (эффективность регистрации - **100%**).

Основной идеей эксперимента является регистрация ядра  ${}^4\text{He}$  (3.66 MeV) и трека от длиннопробежного протона (14.64 MeV) от  $d\mu{}^3\text{He}$ - синтеза.

### Стратегия эксперимента:

- a) надежный отбор остановок мюонов в газовой мишени (исключены остановки мюонов в стенках камеры на уровне  $< 0.01\%$ );
- b) HD газовая смесь (уменьшение ( $\sim$  в 50 раз) скорости  $dd$ -синтеза и фоновых процессов  ${}^3\text{He}d$ -синтеза на лету:  
 $d\mu + d \rightarrow dd\mu \rightarrow {}^3\text{He}(0.8 \text{ MeV}) + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$ ;
- c) энергетическая корреляция между ядром  ${}^4\text{He}$  and протоном от  ${}^3\text{He}d\mu$ -синтеза (эффективный способ подавления фоновых реакций).





**Экспериментальная установка:**

**(а) Ионизационная камера (IC):**

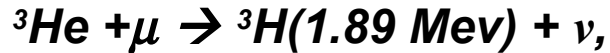
**Размеры: катод-сетка 12 мм, сетка- анод 1мм.**

**N – нейтронные счетчики; E – электронные счетчики.**

**(b) Вид сверху на блок анодов: Vi-аноде размером 8x25 мм<sup>2</sup>**

# Предыдущие эксперименты в PSI

## 1. Прецизионное измерение скорости захвата мюона ядром ${}^3\text{He}$ (1993):



Эксперимент:  $\lambda_c = 1496(4) \text{ s}^{-1}$ ,

Теория:  $\lambda_c = 1506(12) \text{ s}^{-1}$

Псевдоскалярный формфактор протона ( $G_p$ ):

Эксперимент:  $G_p = 8.7(6)$  Теория:  $G_p = 8.2(2)$  ;

## 2. Прецизионное исследование мюонного катализа в $D_2$ , THD и HD (1989-1996).

a) Коэффициент прилипания :

$$W_{dd} = 0.1224(6), \quad W_{dt} = 0.058(4).$$

b) Отношение каналов  $R_{res} = Y({}^3\text{He}+n)/Y(t+p)$  в dd-синтезе из J=1 состояния dd $\mu$ -молекулы:  $R_{res} = 1.455(11)$ .

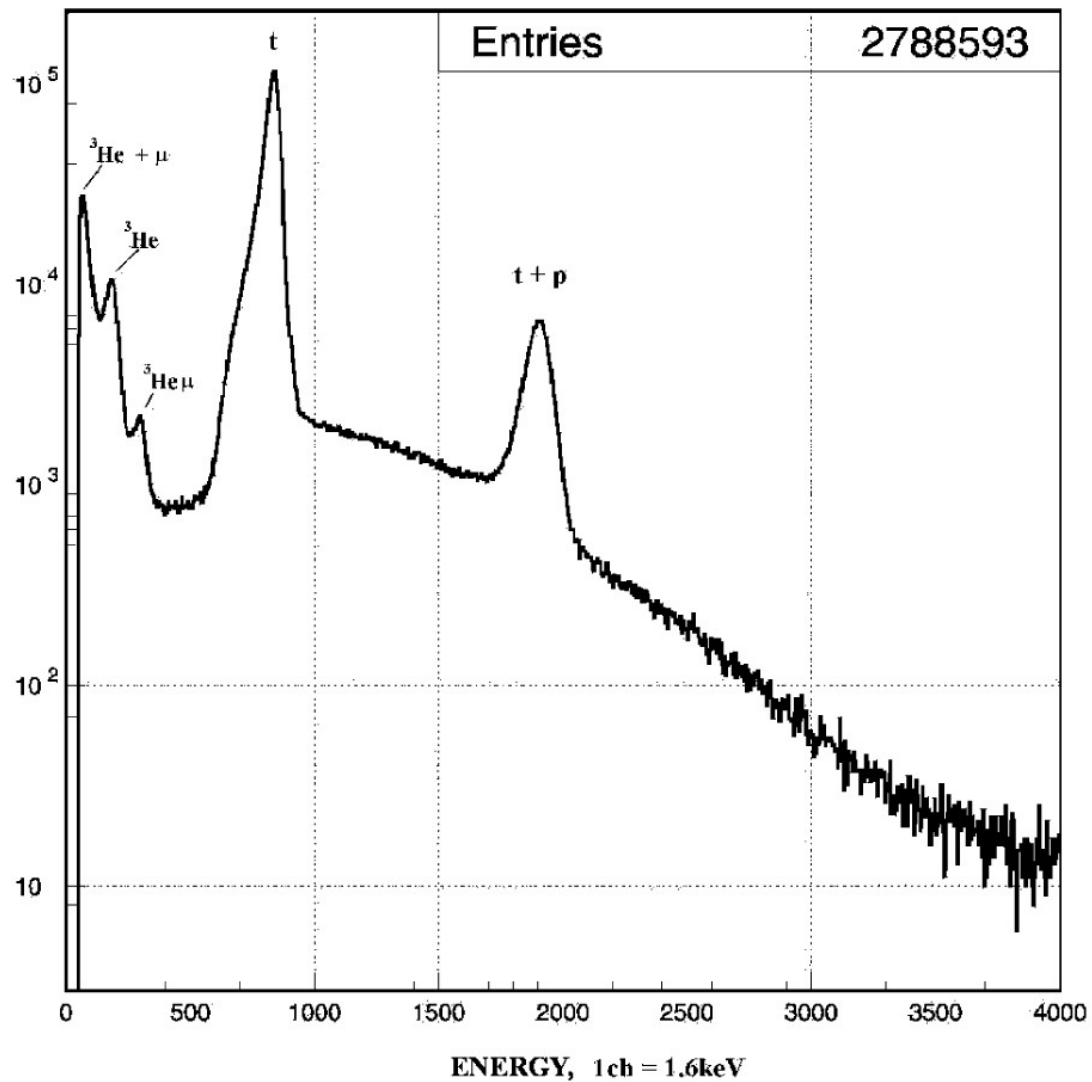
c) Скорость переворота спина ( $L_d$ ) в d $\mu$ -атомах:

$$\lambda_d = 37.0(4) \mu\text{s}^{-1}, \quad T = 28.3 \text{ K}.$$

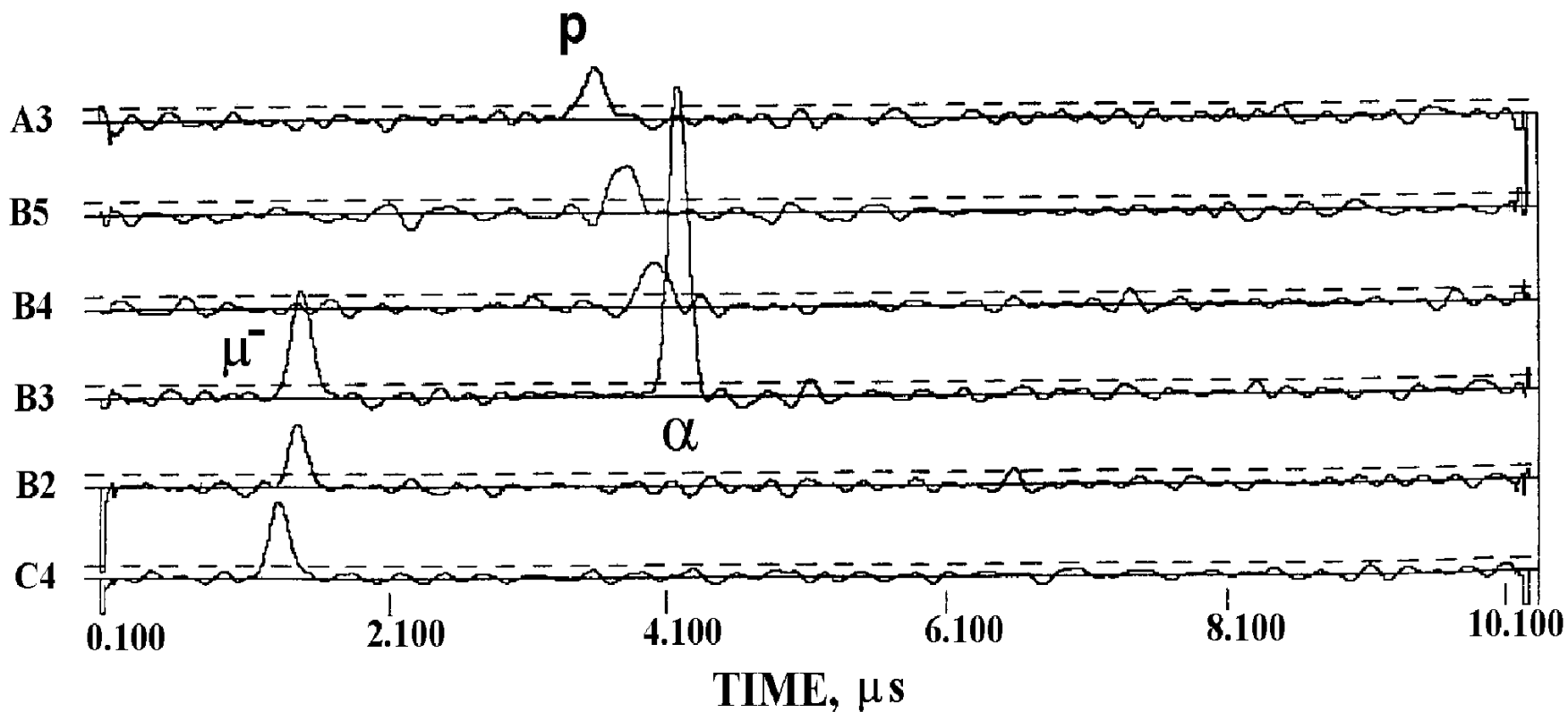
d) Скорость образования dd $\mu$ -молекул в  $D_2$  и HD.

$\lambda_{dd\mu}$  - температурная зависимость (  $T=28-350 \text{ K}$  )

Анализ :  $E_{11} = 1.9626(4) \text{ eV}$  – энергия связи ; Теория:  $E_{11} = 1.9648 \text{ eV}$



**Энергетический спектр событий мюонного катализа (HD+<sup>3</sup>He(5.6%))**



**Временная диаграмма сигналов с FADCs, иллюстрирующая событие мюонного катализа реакции  ${}^3\text{He}d$ -синтеза**

# Эксперименты по поиску мюонного катализа реакции ядерного ${}^3\text{He}$ - синтеза

## 1. MCF- коллаборация (PNPI-PSI-TUM-UCLB):

$$\lambda_f(\text{eff}) = N_f \lambda_{\text{dec}} / \varepsilon N_{d\mu\text{He}3}$$

PNPI :  $D_2 + {}^3\text{He}(11\%)$ ;  $\varphi=8.7\%$  ,  $\lambda_f(\text{eff}) < 4 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$  (1992)

PNPI-PSI:  $HD + {}^3\text{He}(5.6\%)$ ;  $\varphi=9.9\%$  ,  $\lambda_f(\text{eff}) < 1.6 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  (1998)

PNPI-PSI:  $HD + {}^3\text{He}(5.6\%)$ ;  $\varphi=9.2\%$  ,  $\lambda_f(\text{eff}) < 6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  (1999)

$\lambda_f(0) < 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  ( используя теоретическое значение  
заселенности  $w(0)$ - Файфман(1999))

Теория :  $\lambda_f(0) \sim 2.5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  (Богданова, Коробов, Пономарев(1999))

JINR-PSI-UIUC-INPT-UF collaboration:

a)  $D_2+^3\text{He}(9.8\%); T=34\text{K}$ ,  $\varphi=7.9\%$ ,  $\lambda_f(\text{eff}) < 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  (1999)

b)  $D_2+^3\text{He}(5\%); T=34\text{K}$ .

$\varphi = 5.85\%$                        $\lambda_f(\text{eff}) = 4.5(+2.6,-2.0) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  (2006)

$\varphi = 16.8\%$                        $\lambda_f(\text{eff}) = 6.9(+3.6,-3.0) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  (2006)

**Экспериментальный метод:** Si(dE-E) телескоп для регистрации протонов (14.64 MeV) от  $^3\text{He}$ d-синтеза и сцинтилляторы для детектирования электронов.

Экспериментальная ситуация:

a) **PNPI-PSI-TUM-UCLB collaboration** ( $\text{HD}+^3\text{He}(5.6\%)$ ):

$$\lambda_f(\text{eff}) < 6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$$

b) **JINR-PSI-UIUC-INPT-UF collaboration** ( $D_2+^3\text{He}(5\%)$ ):

$$\lambda_f(\text{eff}) \sim 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

**Различие между двумя экспериментами ~ в 10 раз !!!**

# Предложение нового эксперимента в PSI по поиску реакции мюонного катализа ядерного $^3\text{He}$ -синтеза

Экспериментальная установка: - детектор "**MuSun**" в PSI.

Основным элементом установки является **активная мишень-криогенная ионизационная камера**, работающая в сверхчистом газе ( **$\text{HD}(95\%)+^3\text{He}(5\%)$** ) при давлении 5 bar и температуре 31K.

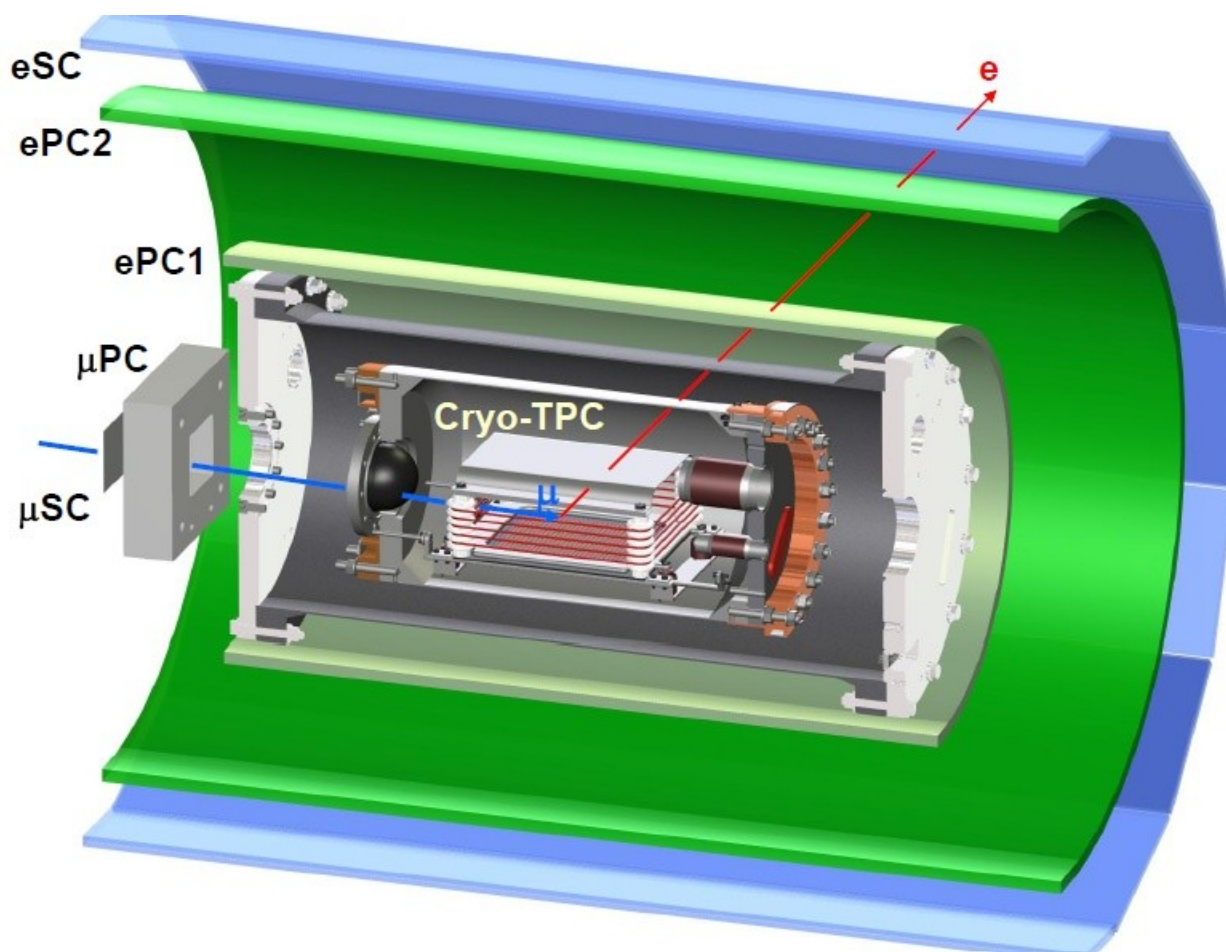
Метод измерений:

Одновременная регистрация ядра  $^4\text{He}$  и трека протона от реакции  $^3\text{He}$ -синтеза.

Чувствительность метода:

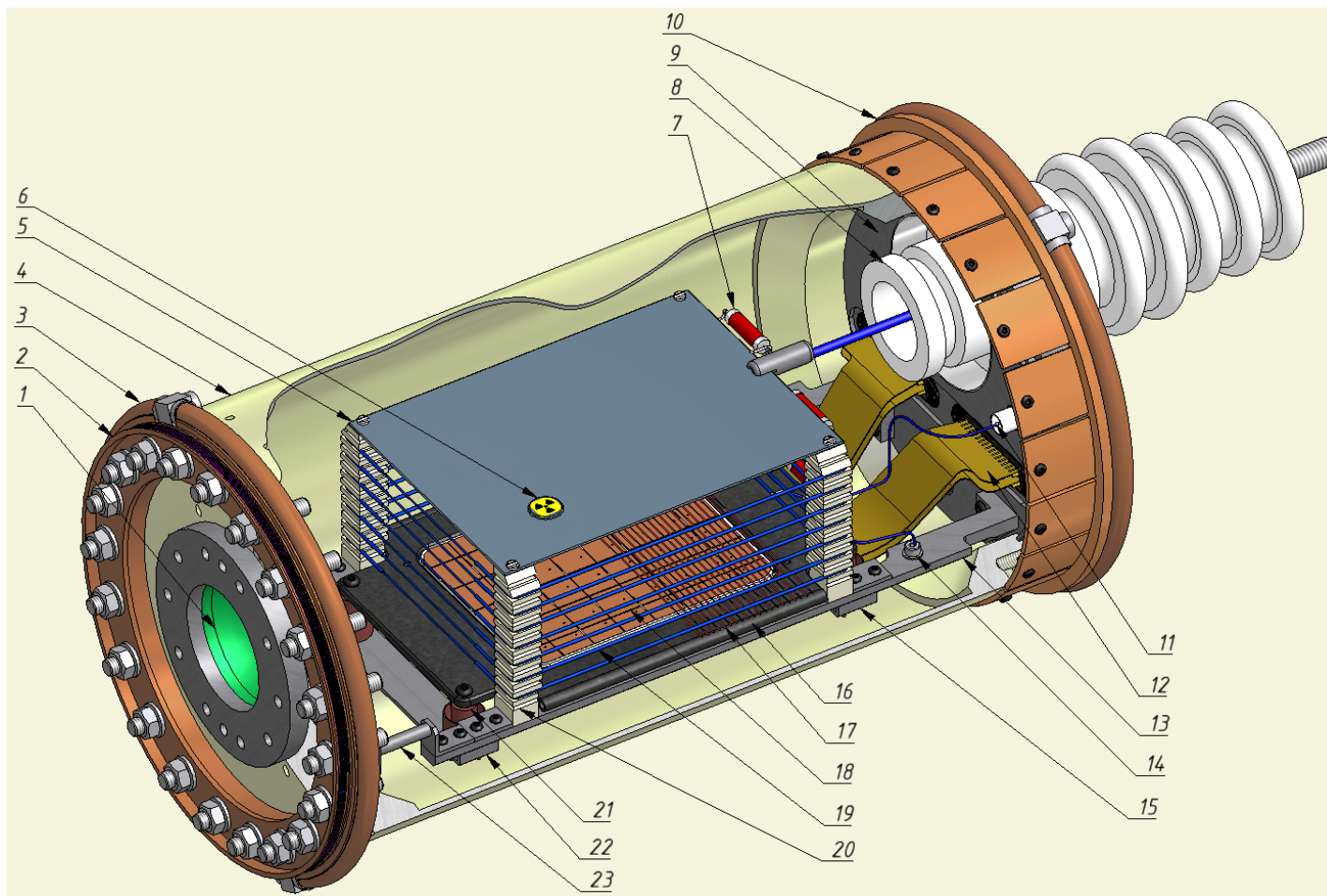
**$10^{10}$**  - остановок мюонов в рабочем объеме активной мишени.  
Время набора статистики – 6 недель. Обнаружение процесса мюонного катализа ядерного  $^3\text{He}$ -синтеза и измерение его скорости с точностью  $\sim 10\%$  ( для  **$\lambda_f(0)=2\cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$**  (теория)).

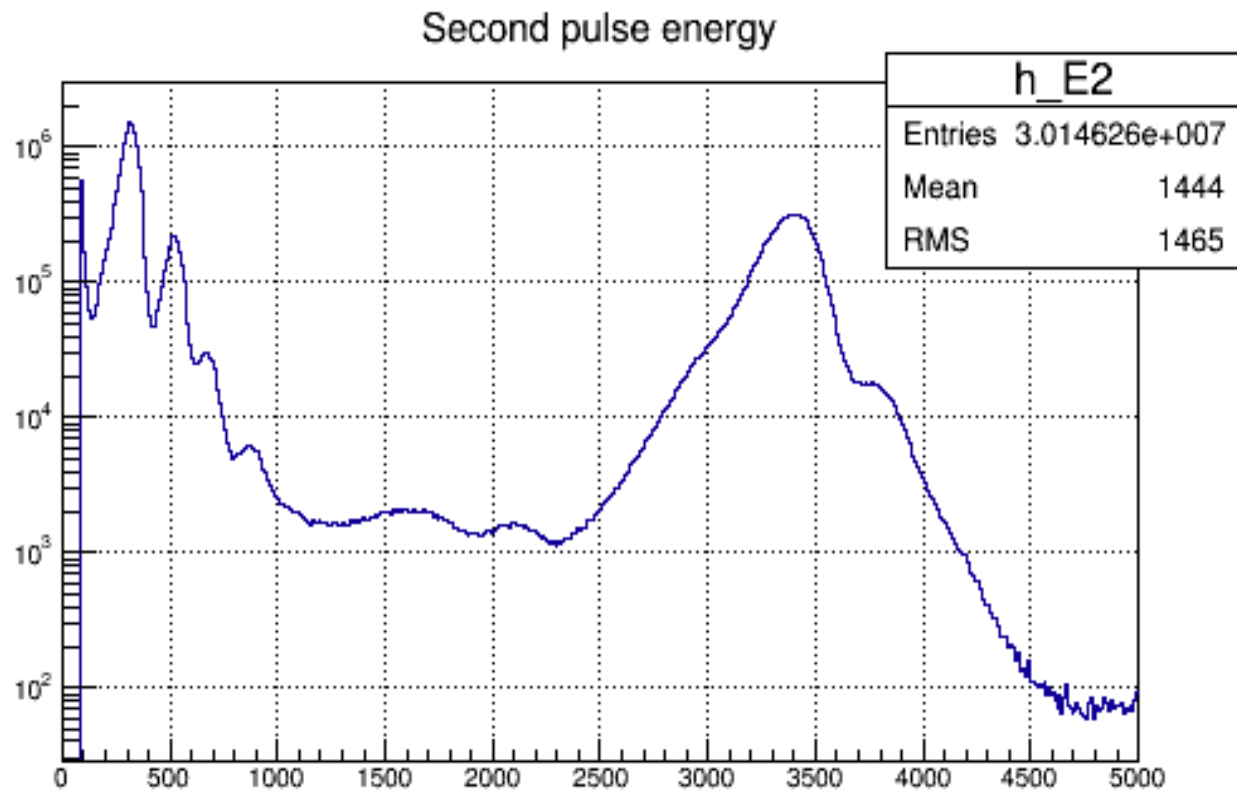
## Экспериментальная установка "MuSun"





# Криогенная активная мишень (ТРС)

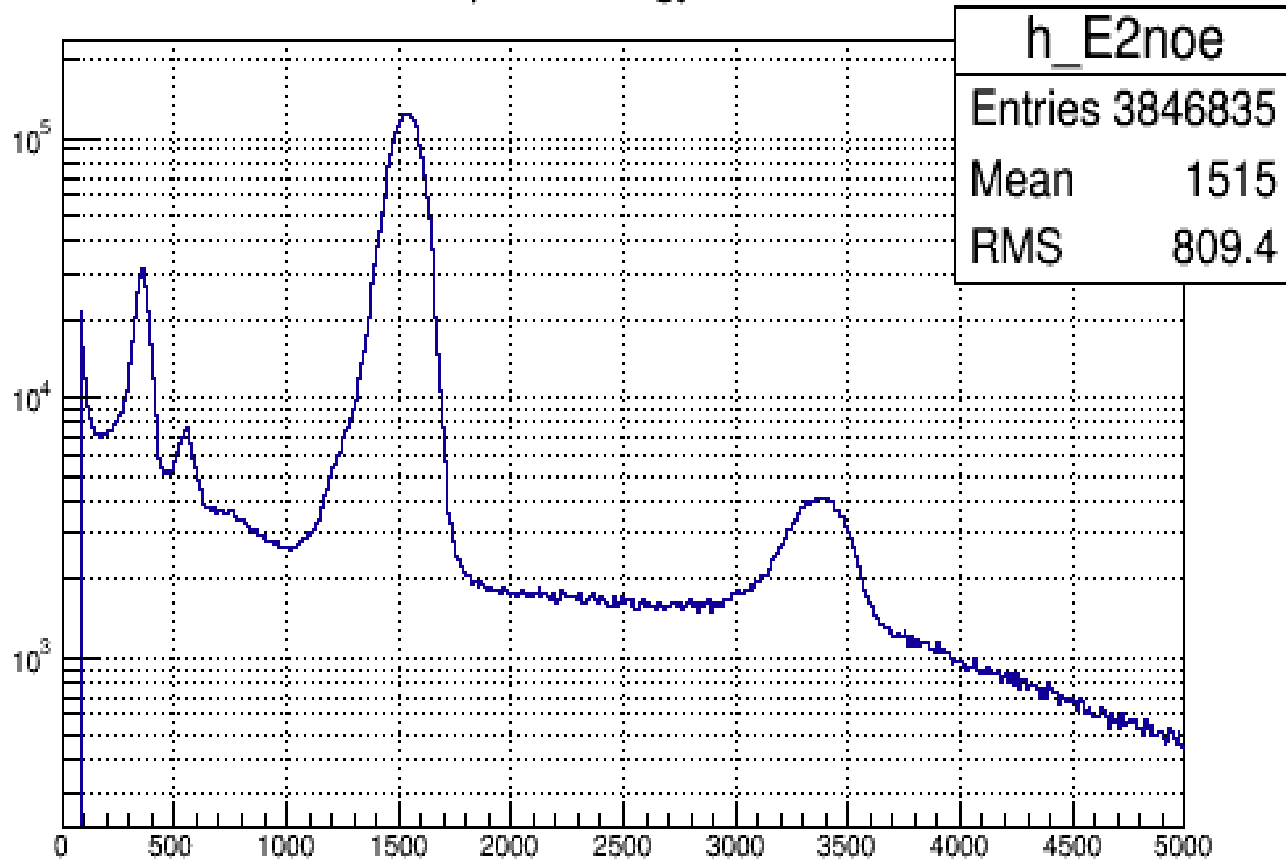




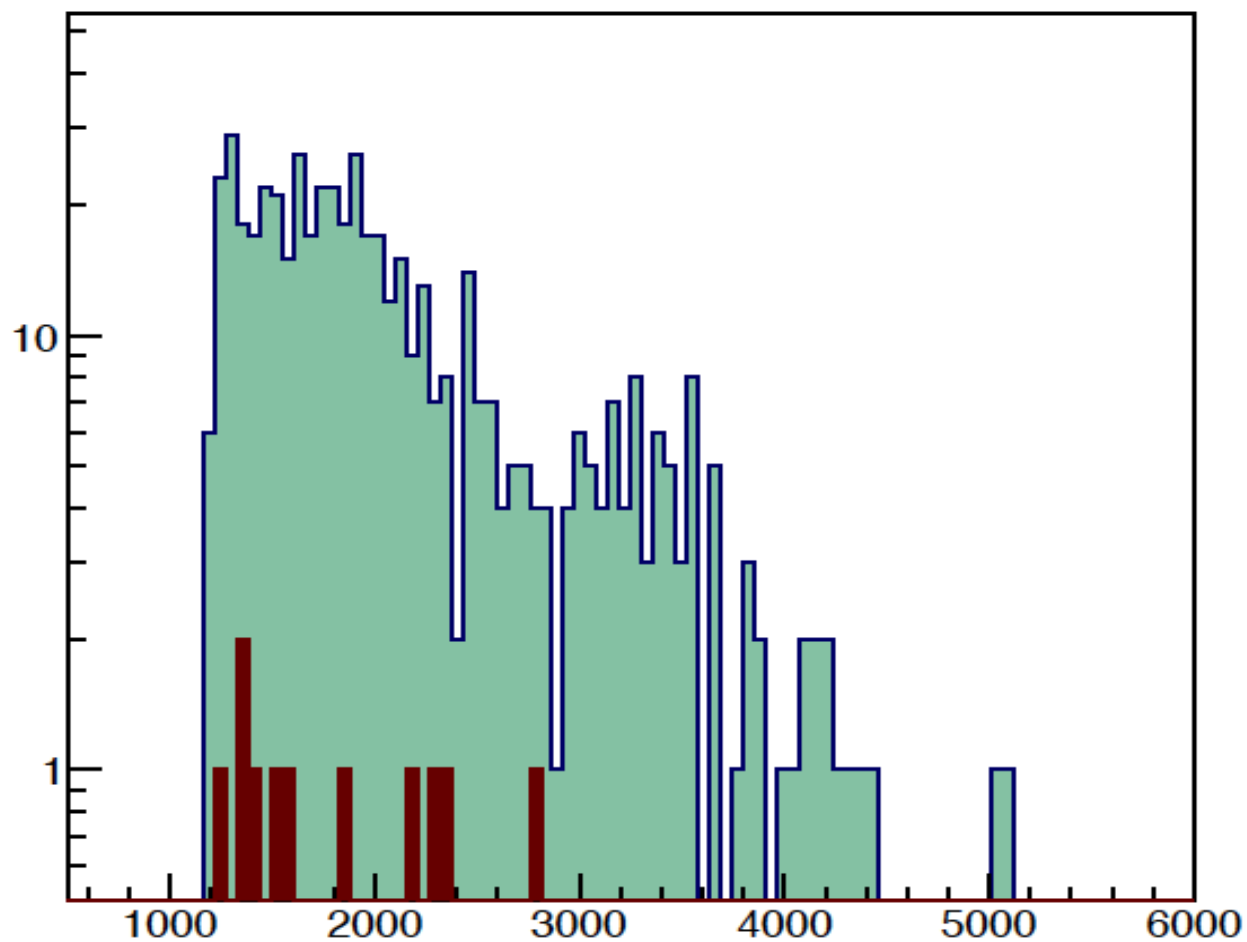
**Энергетический спектр событий мюонного катализа в чистом  $D_2$  (эксперимент “MuSun”).**

**Статистика -  $10^{10}$  остановок мюонов.**

Second pulse energy, No electron



**Энергетический спектр событий мюонного катализа в  $D_2+^3He(5\%)$   
(без совпадений с электронами от распадов мюонов).  
Статистика-  $10^9$  остановок мюонов. Время набора-5дней ( 2016г.)**



**Энергетический спектр кандидатов на события  $d + ^3He \rightarrow ^4He + p$  синтеза (зеленый- в чистом  $D_2$ , коричневый -  $D_2 + ^3He(5\%)$ ).**

## Выводы

Предлагаемый экспериментальный метод основанный на применении **активной мишени** ( криогенной ионизационной камеры) открывает возможность исследования процесса мюонного катализа ядерной реакции  ${}^3\text{He}$ - синтеза на новом уровне.

Использование существующей в PCI установки “MuSun” позволит более чем в **50 раз** увеличить чувствительность к реакции  **$d\mu + {}^3\text{He} \rightarrow d\mu + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + \mu$**  по сравнению с предыдущими экспериментами.

Целью предлагаемого эксперимента является обнаружение процесса мюонного катализа ядерного  **${}^3\text{He}$ -синтеза** и измерение его скорости с точностью  $\sim 10\%$ .

***Спасибо за внимание !***



# Схема образования и распада $d\mu^3\text{He}$ - молекулы

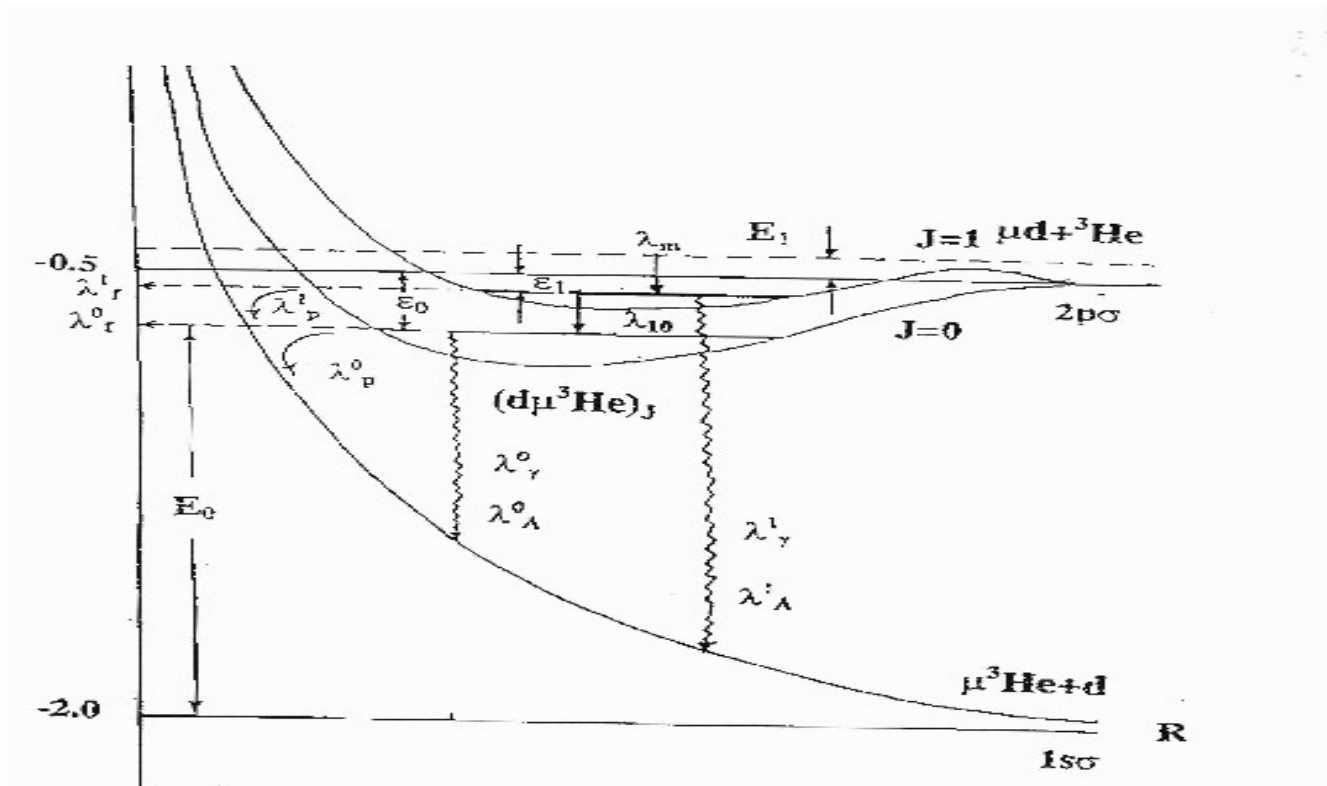
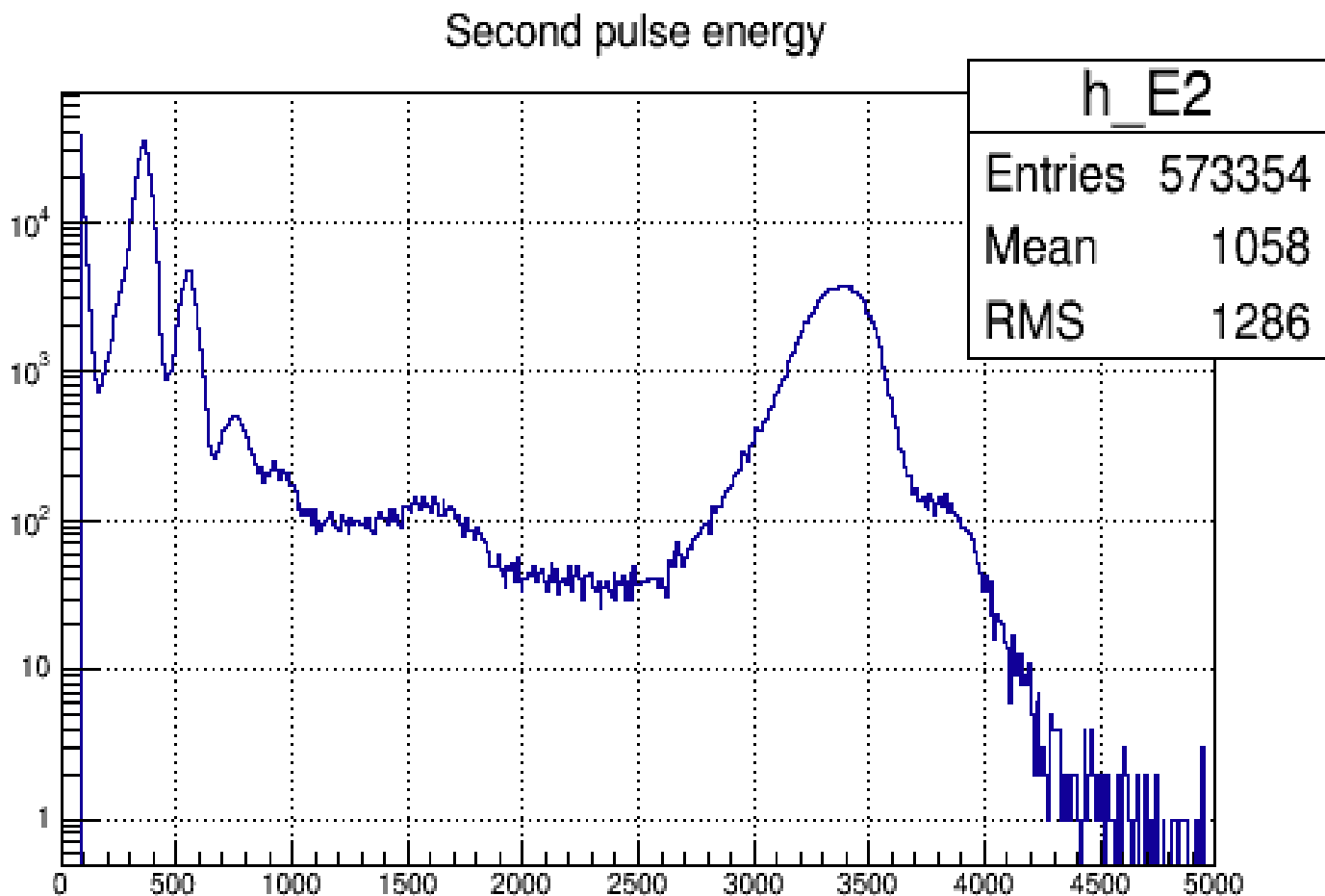
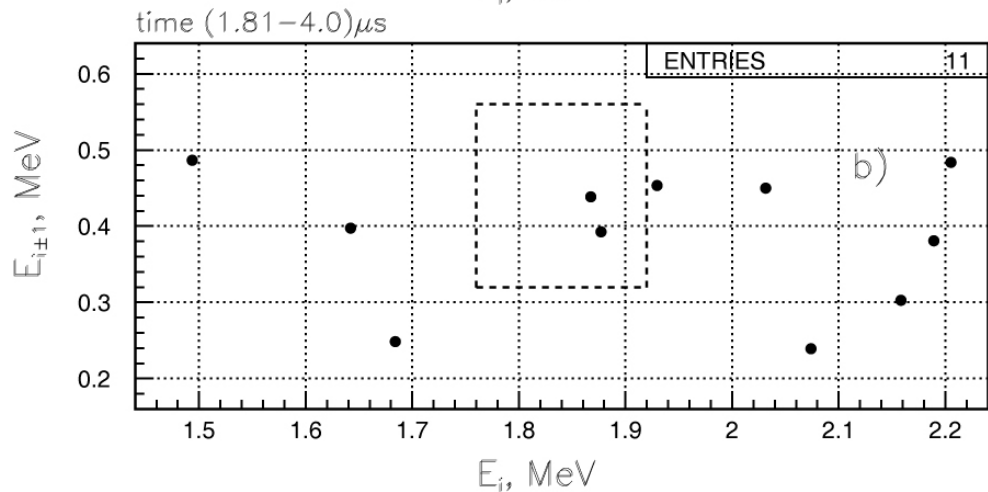
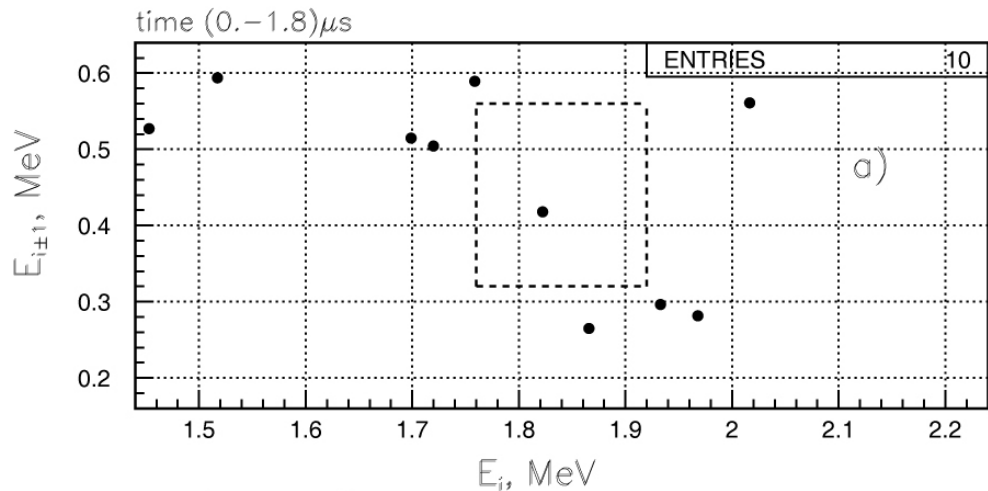


Figure 1: Scheme of formation and decay of the  $d\mu^3\text{He}$  molecule. The muonic molecule  $d\mu^3\text{He}$  is formed in  $d\mu + ^3\text{He}$  collisions in the bound state  $(d\mu^3\text{He})_{J=1}$  which decays into system  $\mu^3\text{He} + d$  with the rates  $\lambda_{\gamma}^1$ ,  $\lambda_{\beta}^1$  and  $\lambda_{\alpha}^1$ ; the transition  $(d\mu^3\text{He})_{J=1} \rightarrow (d\mu^3\text{He})_{J=0}$  with the rate  $\lambda_{10}$  competes with these decays: the binding energies of the states  $(d\mu^3\text{He})_J$  are equal  $\varepsilon_J$ ; the collision energies in the states  $d\mu + ^3\text{He}$  and  $\mu^3\text{He} + d$  are equal  $E_1$  and  $E_0$  correspondingly; the fusion rates from the states  $J = 0$  and  $J = 1$  are  $\lambda_{\beta}^0$  and  $\lambda_{\beta}^1$ .

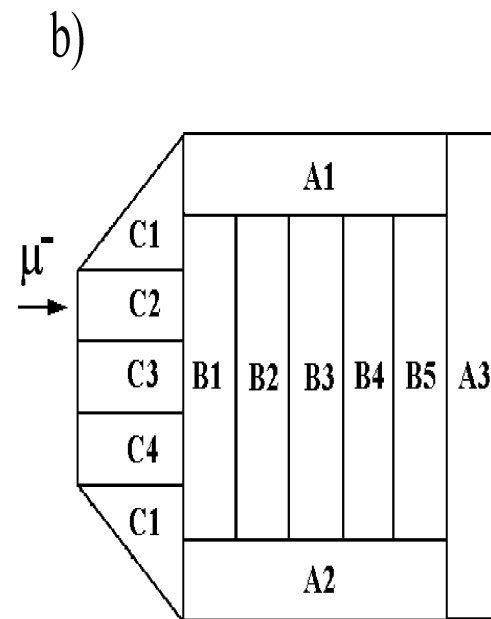
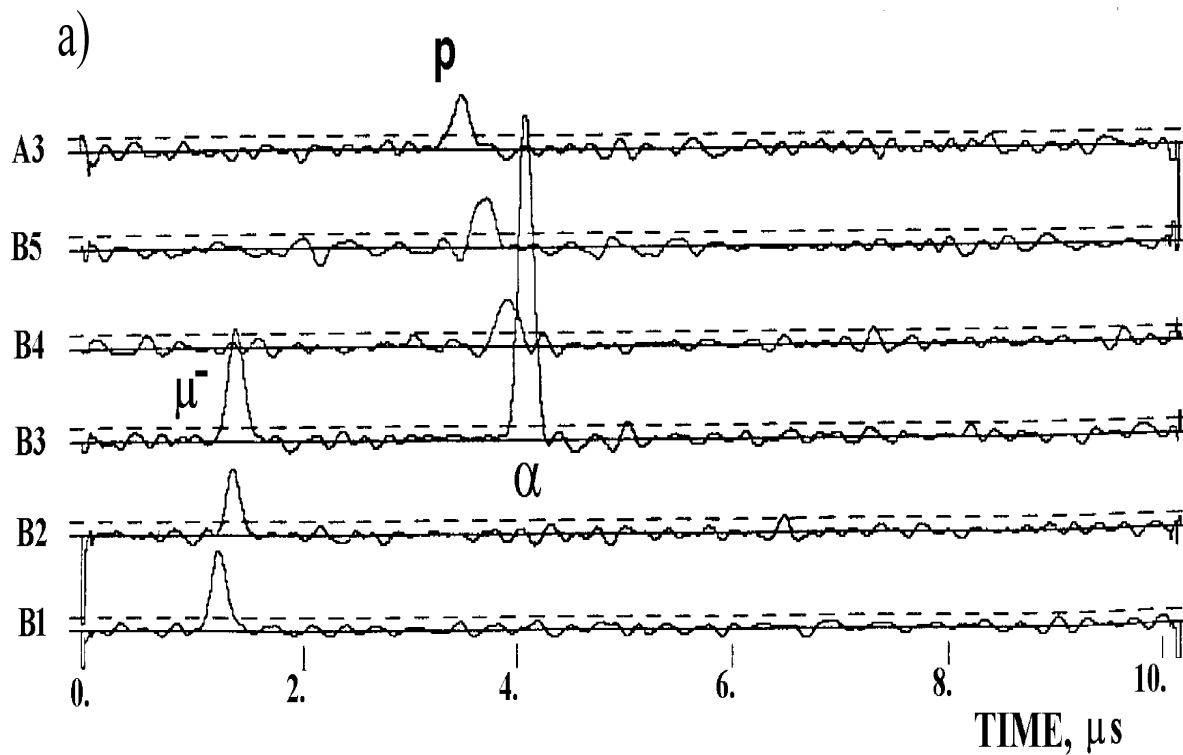




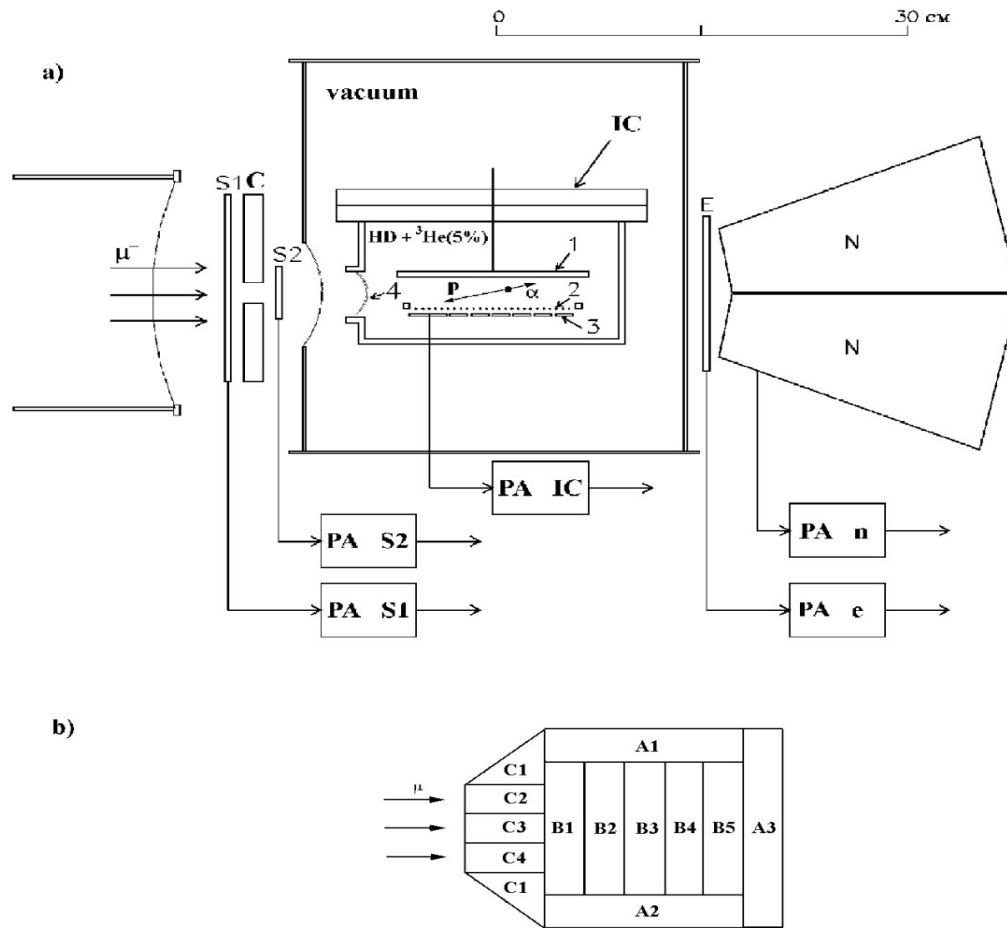
**Энергетический спектр событий мюонного катализа в  $D_2+^3He(5\%)$  (совпадения с электроном от распада мюонов). Статистика  $10^9$  - остановок мюонов. Время набора- 5дней ( 2016г.)**



**Отобранные кандидаты на события  $^3\text{He-d}$ -синтеза :**  
**Двумерная корреляция между энергиями  $^4\text{He}$  и  $p$**   
**a) Время синтеза  $T < 1.8 \mu\text{s}$ ;**  
**b) Время синтеза  $T > 1.8 \mu\text{s}$**



**Временная диаграмма сигналов с FADCs, иллюстрирующая событие мюонного катализа реакции  ${}^3\text{He}d$ -синтеза**



### Экспериментальная установка:

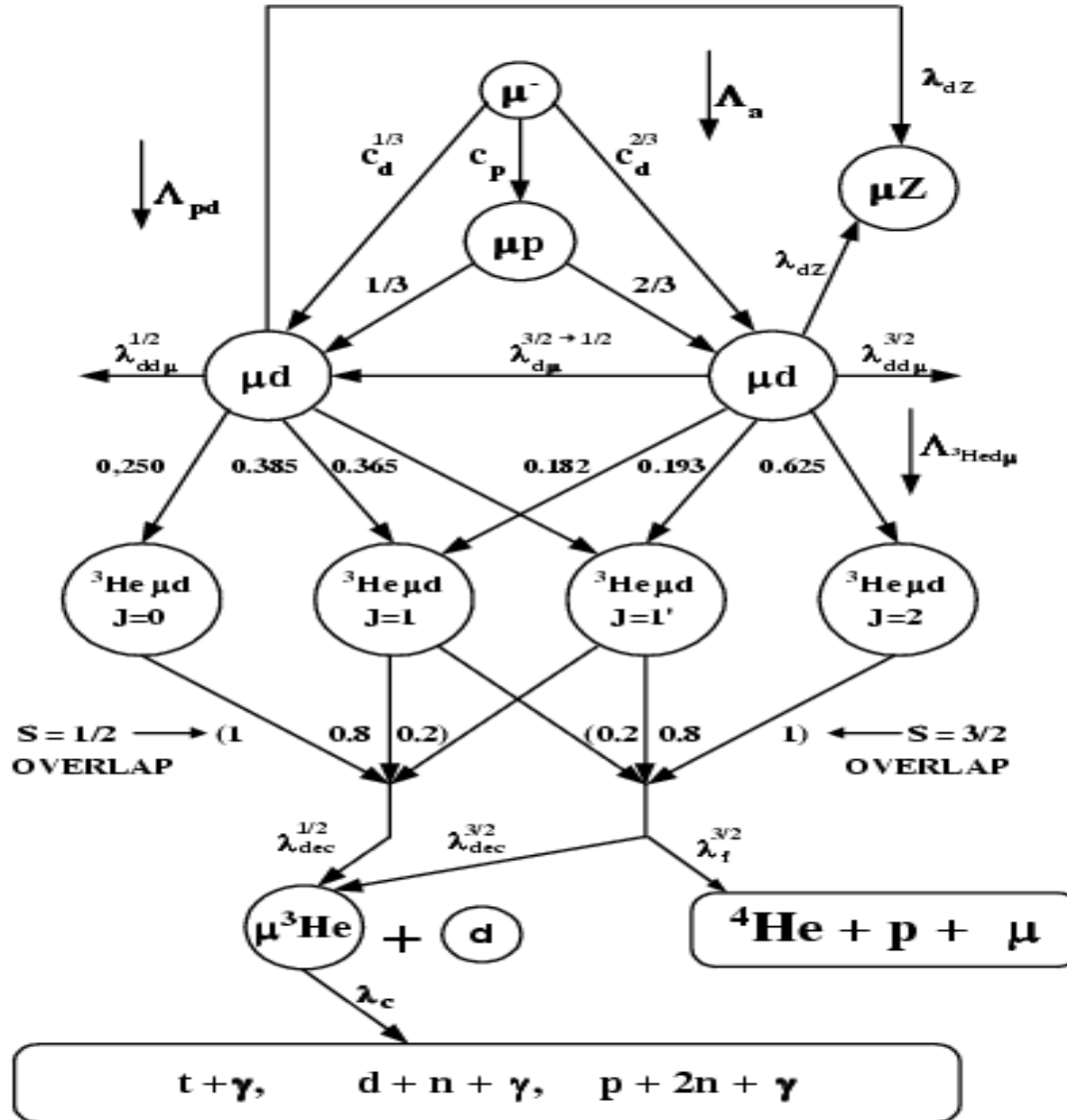
(а) Ионизационная камера (IC):

Размеры: катод-сетка 12 мм, сетка- анод 1мм.

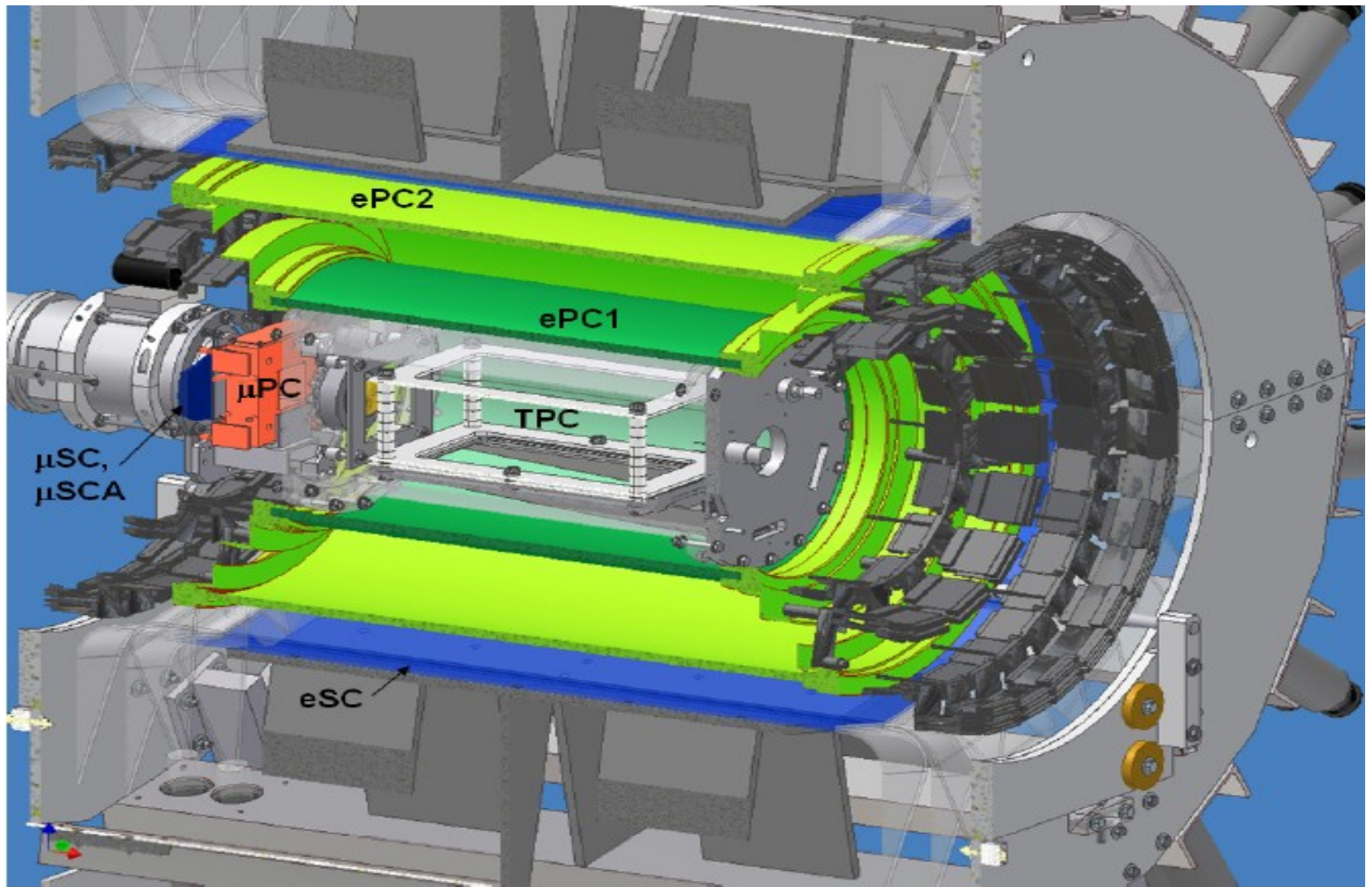
N – нейтронные счетчики; E – электронные счетчики.

(b) Вид сверху на блок анодов: Vi-аноде размером 8x25 мм<sup>2</sup>

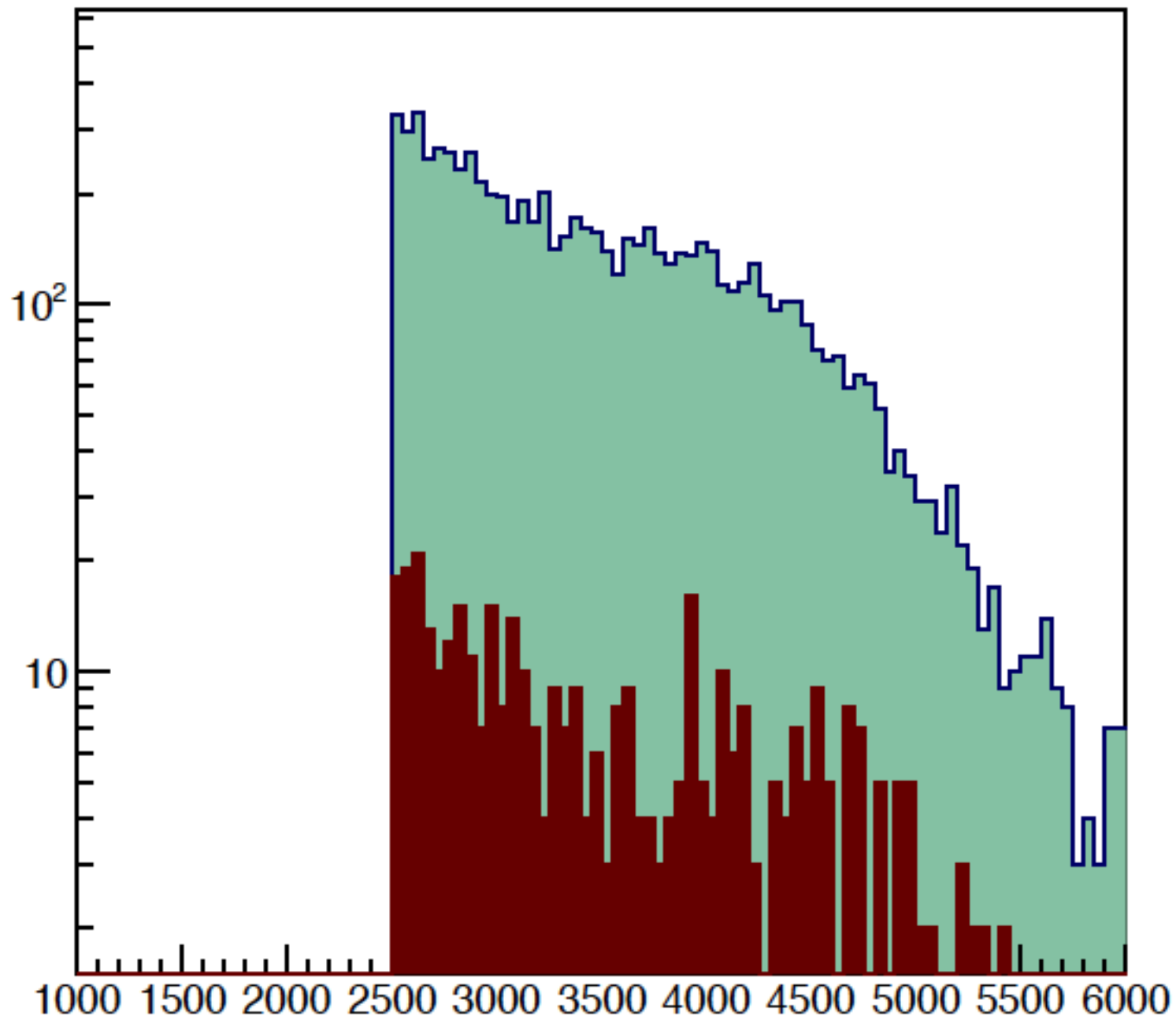
Учёт кинетики процессов в  $^3\text{He}\mu\text{d}$ -молекуле.

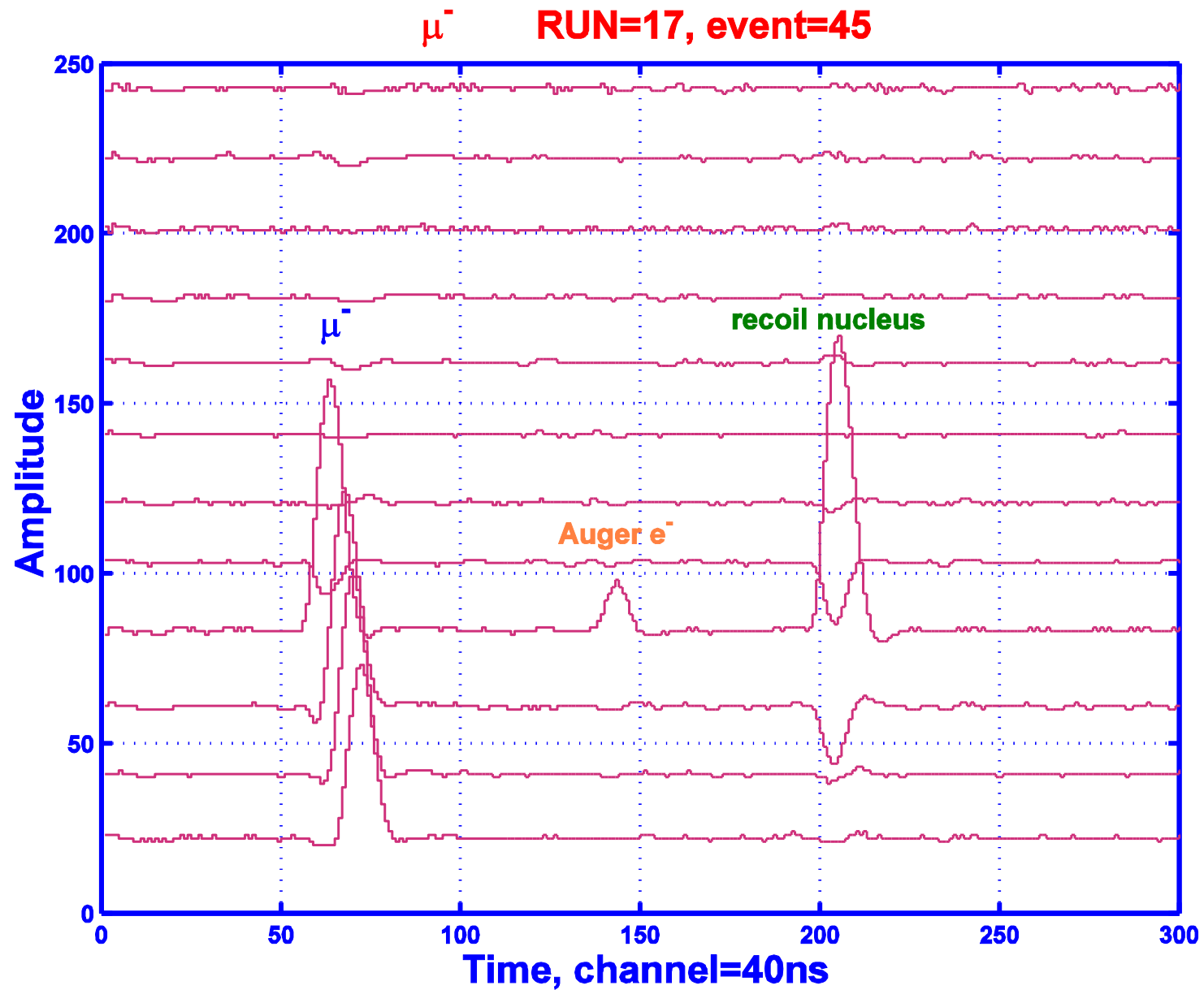


$J$  --- спин мезомолекулы  
 $S$  --- полный ядерный спин



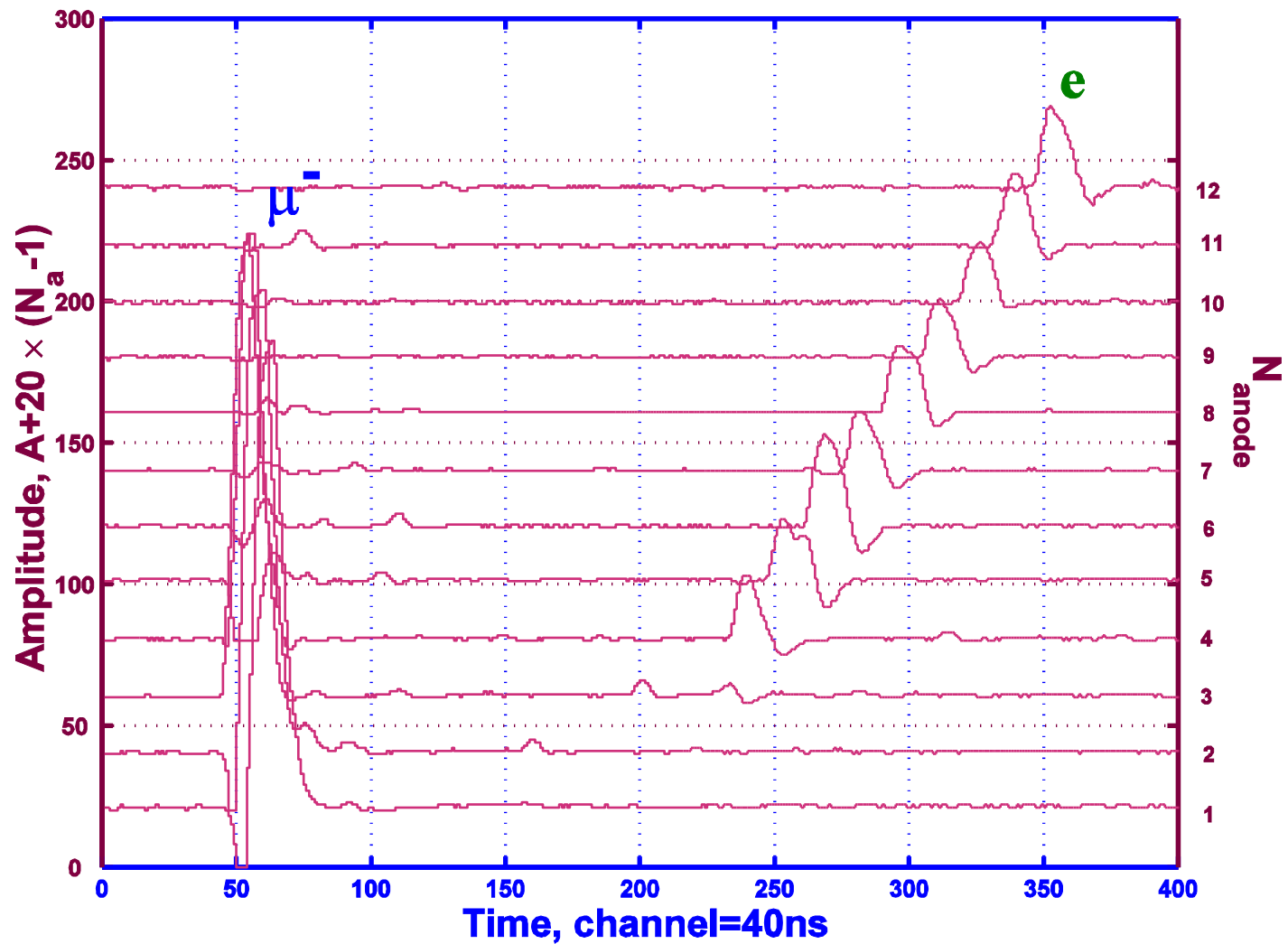
***Cross-sectional diagram of the MuCap detector***





*Display of a typical event with  $\mu$ -capture reaction on impurity*





*The signal on TPC anode wires from  $\mu$ -e decay event*