

Поиск $d\mu$ ^3He - синтеза (PSI)



Ядерная реакция синтеза

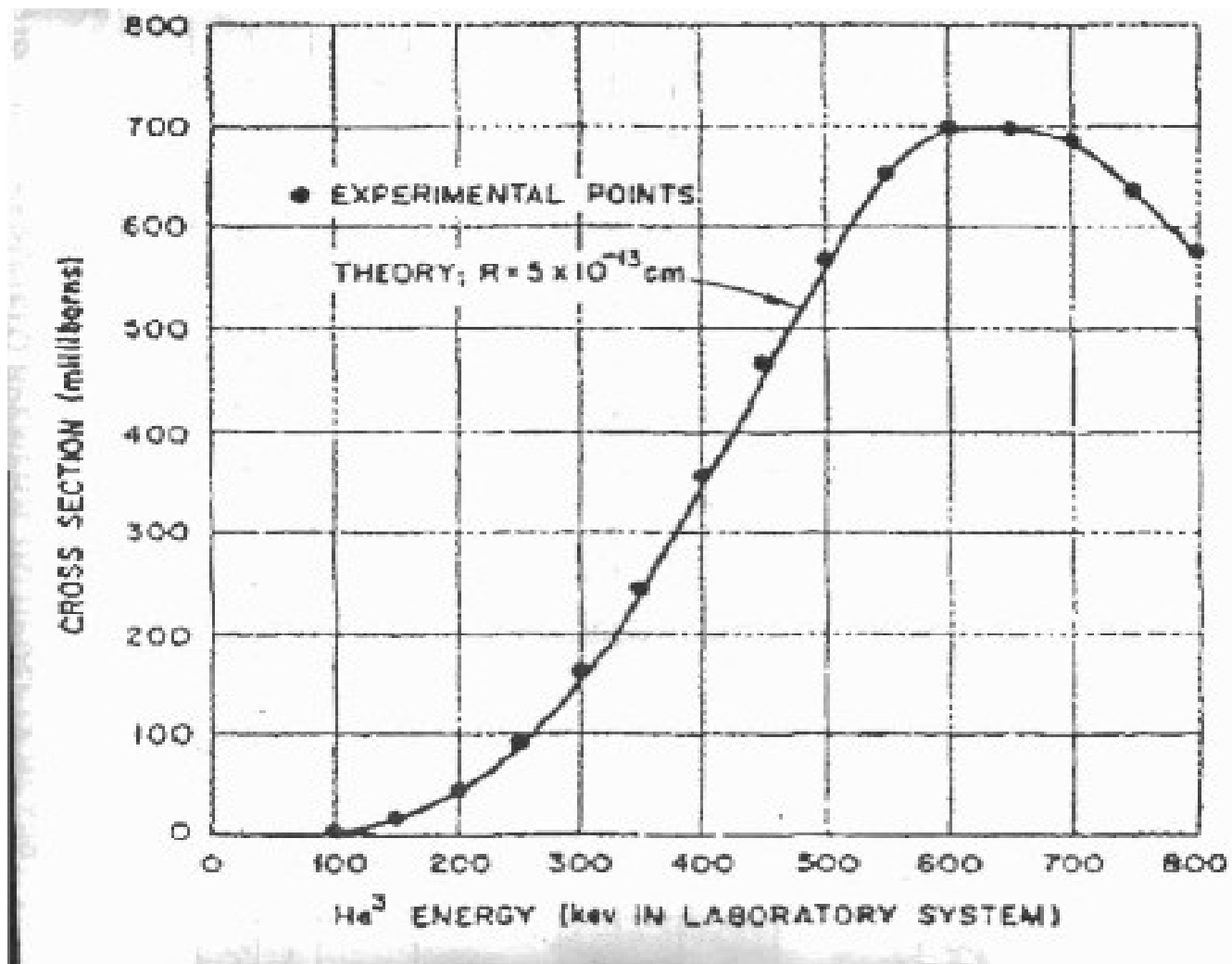


представляет интерес по следующим причинам :

- 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 ${}^3\text{He}$.

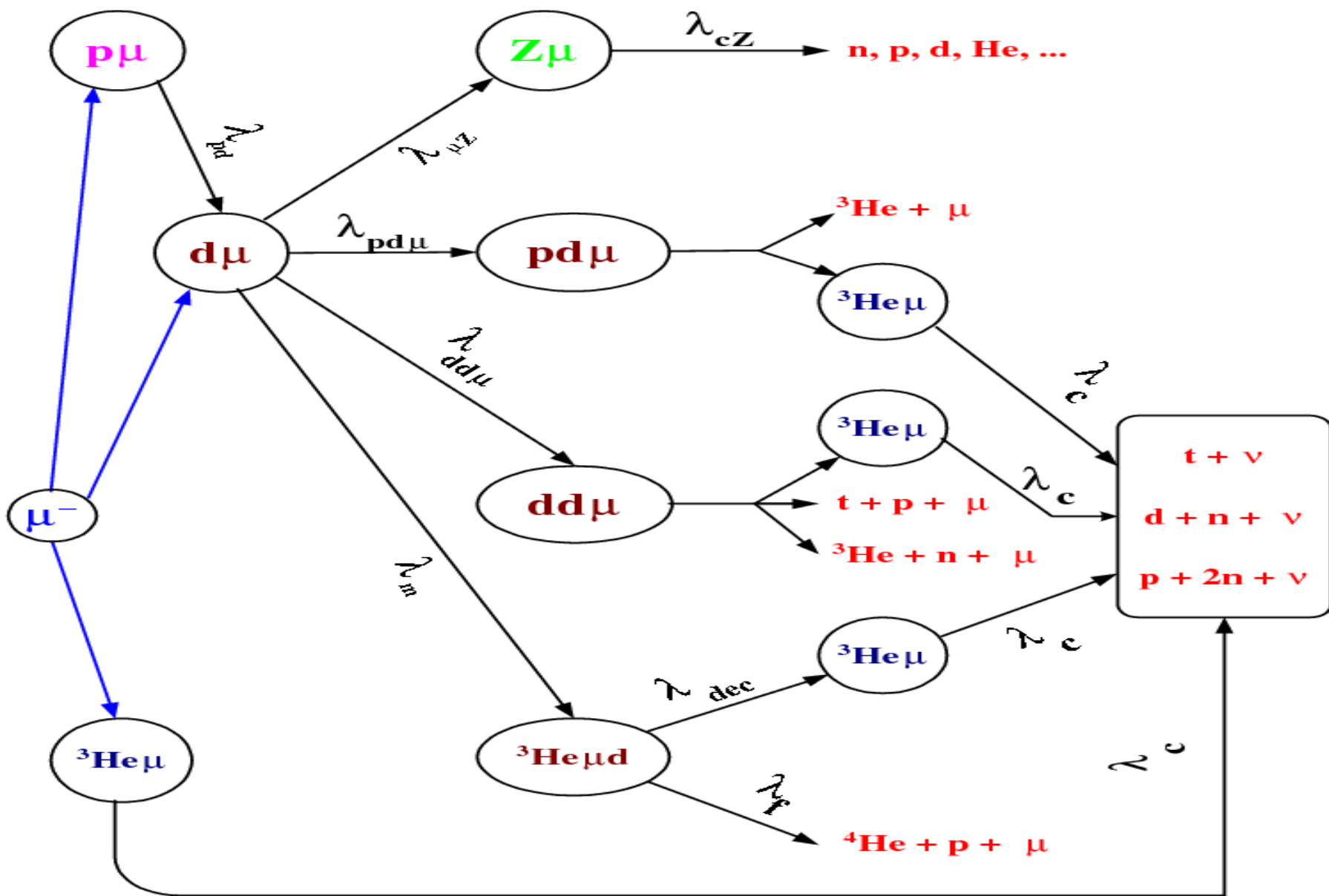


Ядерный синтез в $d\mu$ ^3He мюонной молекуле.

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



Упрощенная схема реакций мюонного катализа в HD+³He смеси



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

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

скорость (λ_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 γ -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 $(^3\text{He}d\mu\text{D}_2)^+$;

$(d\mu^3\text{He})(J=1) \rightarrow (d\mu^3\text{He})(J=0)$

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).



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

$\lambda_f(\text{eff})$ - 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)

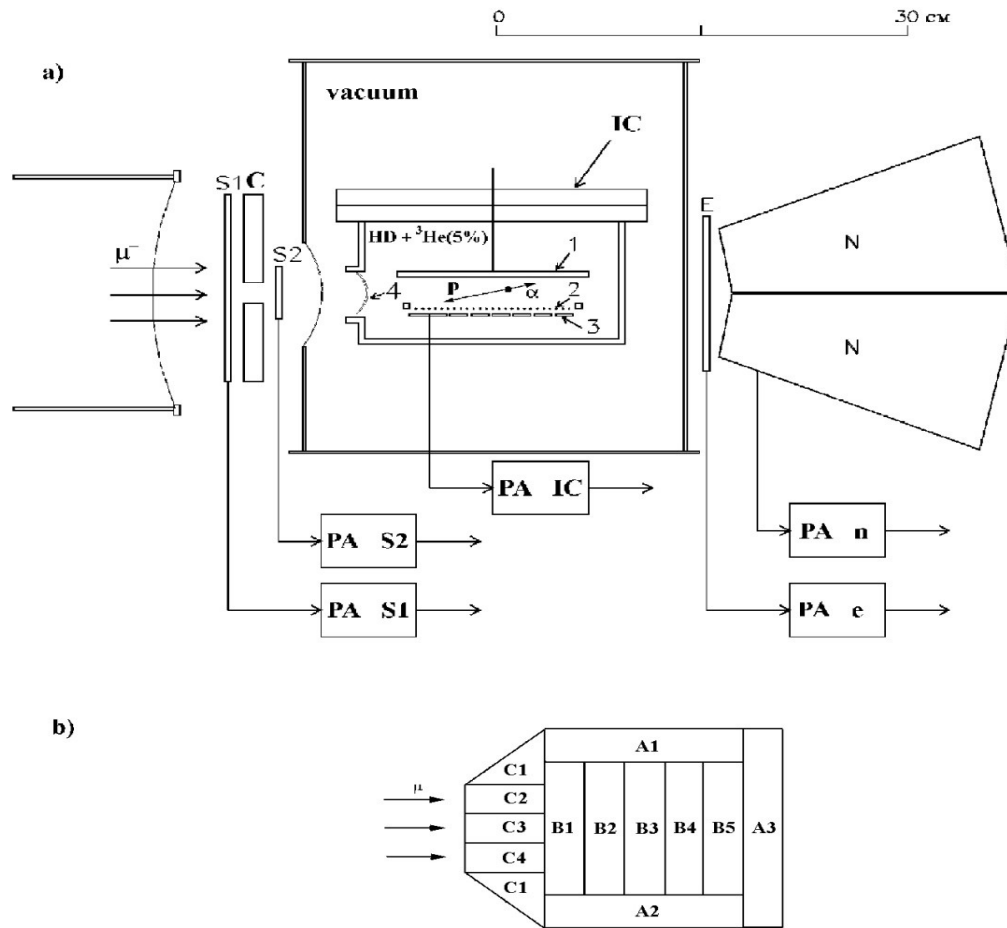
Экспериментальный метод:

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):

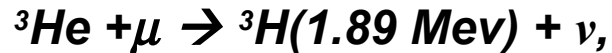
Размеры: катод-сетка 12 мм, сетка- анод 1мм.

N – нейтронные счетчики; E – электронные счетчики.

(b) Вид сверху на блок анодов: Vi-аноде размером 8x25 мм²

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: $R_{res} = 1.455(11)$.

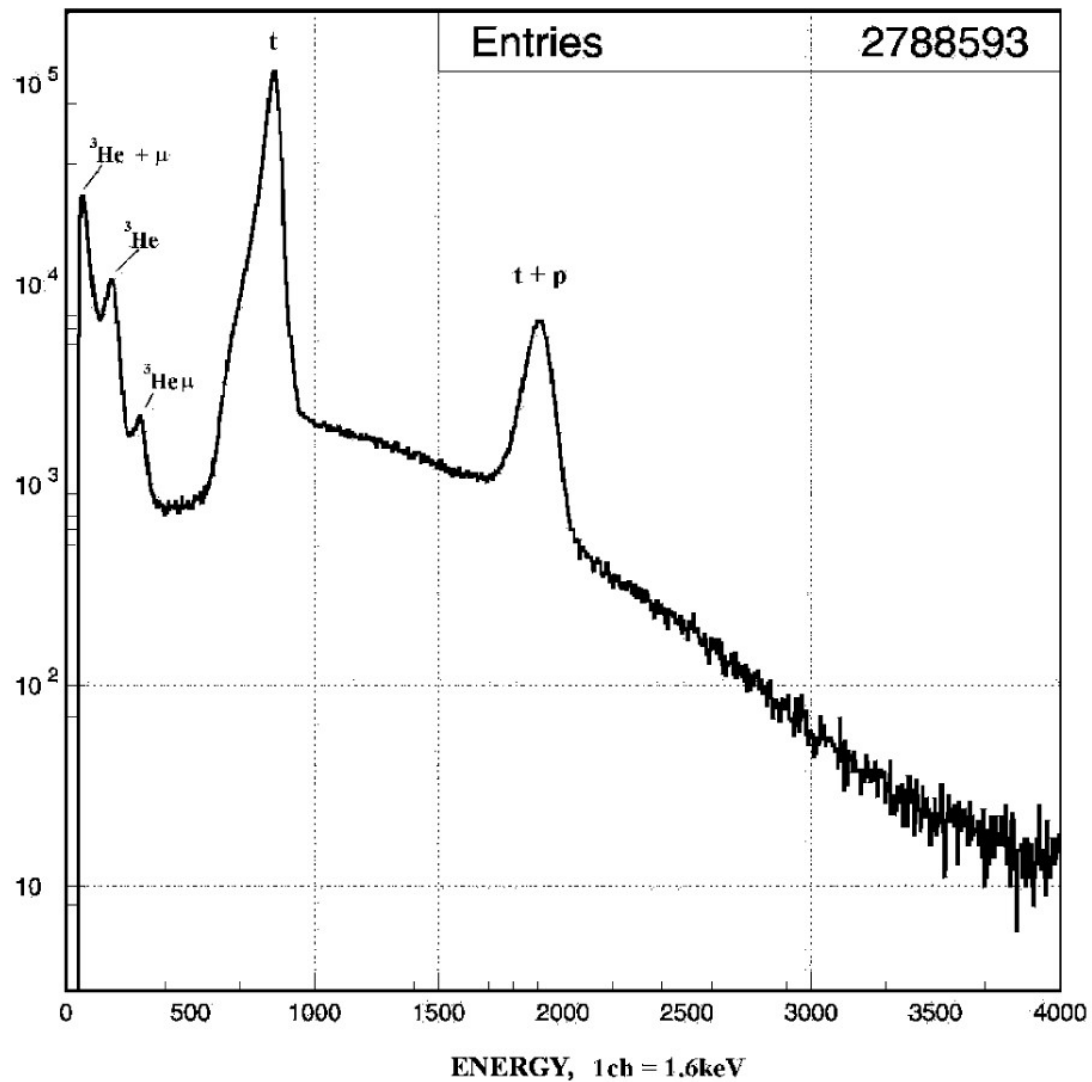
c) Скорость переворота спина (λ_d) в $d\mu$ -атомах:

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

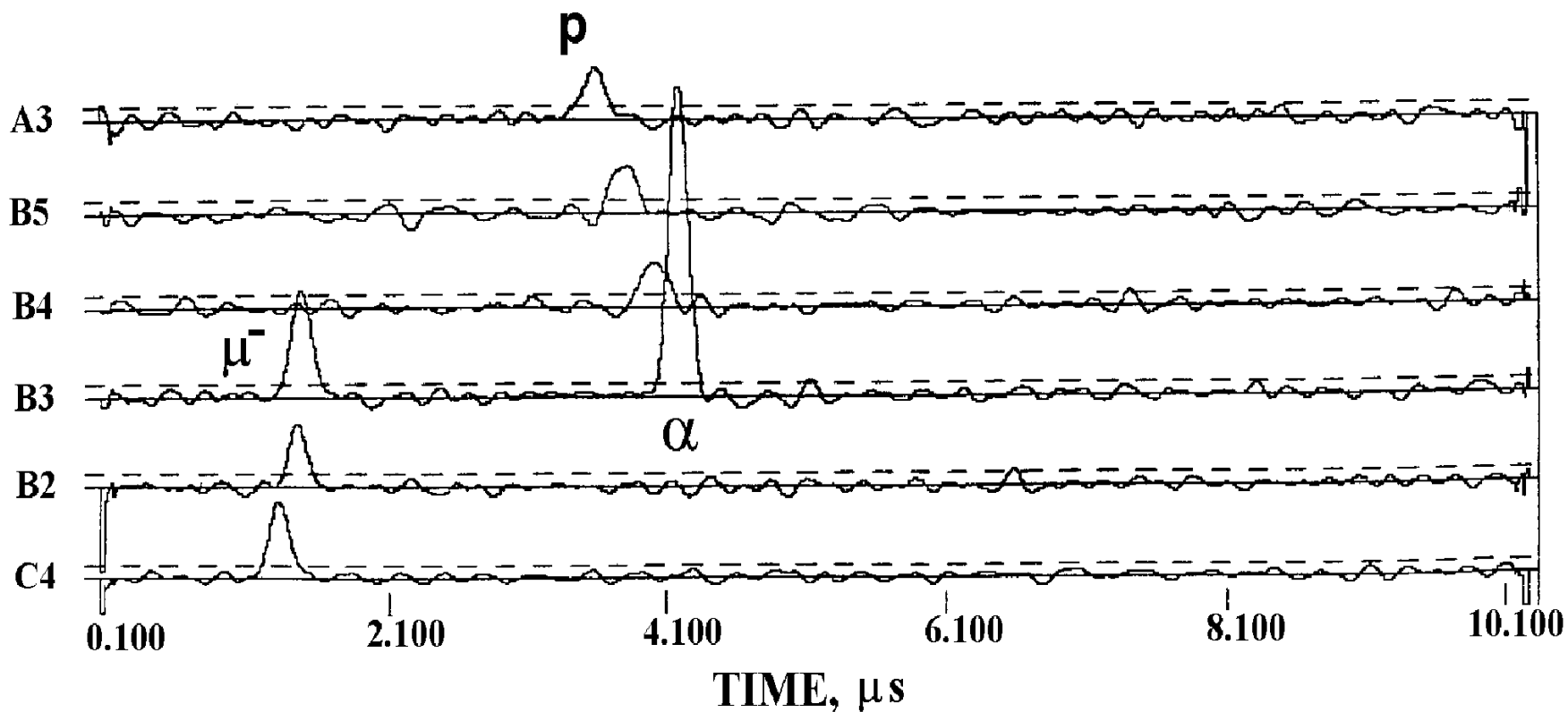
d) Скорость образования $dd\mu$ -молекул в D_2 и HD .

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

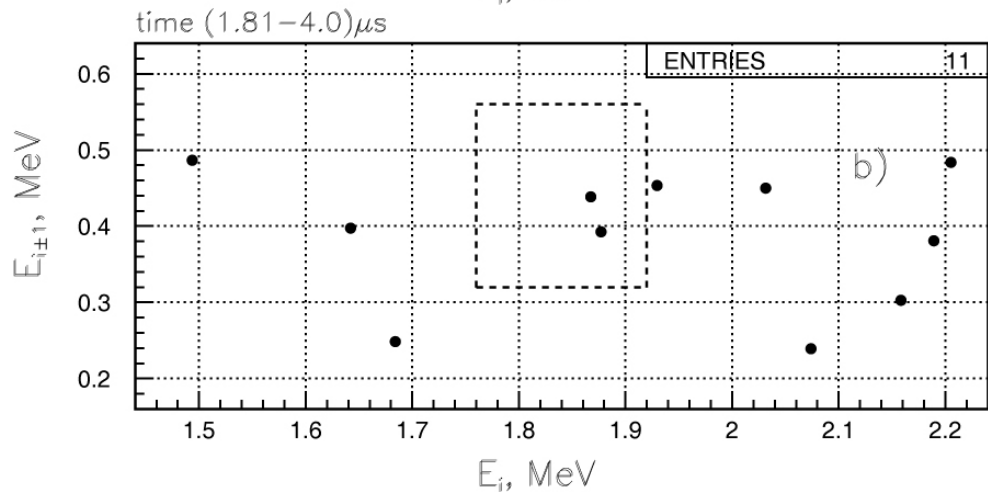
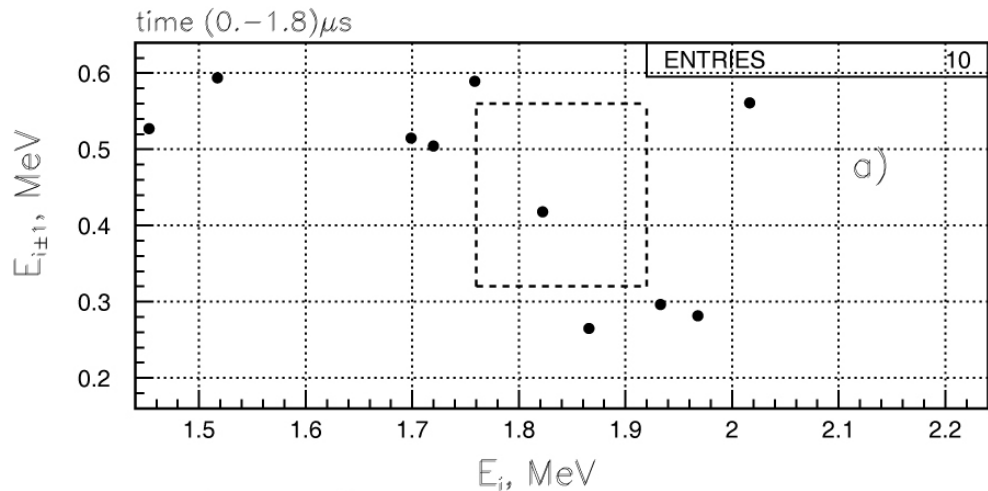
Анализ : $E_{11} = 1.9626(4) \text{ eV}$ – энергия связи ; Теория: $E_{11} = 1.9648 \text{ eV}$



Энергетический спектр событий мюонного катализа (HD+³He(5.6%))



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



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 $T > 1.8 \mu\text{s}$

Эксперименты по поиску мюонного катализа реакции ядерного ^3He -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: $\text{HD} + ^3\text{He}(5.6\%)$; $\varphi=9.9\%$, $\lambda_f(\text{eff}) < 1.6 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ (1998)

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

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

Теория : $\lambda_f(0) \sim 2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ (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 ^3He 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.

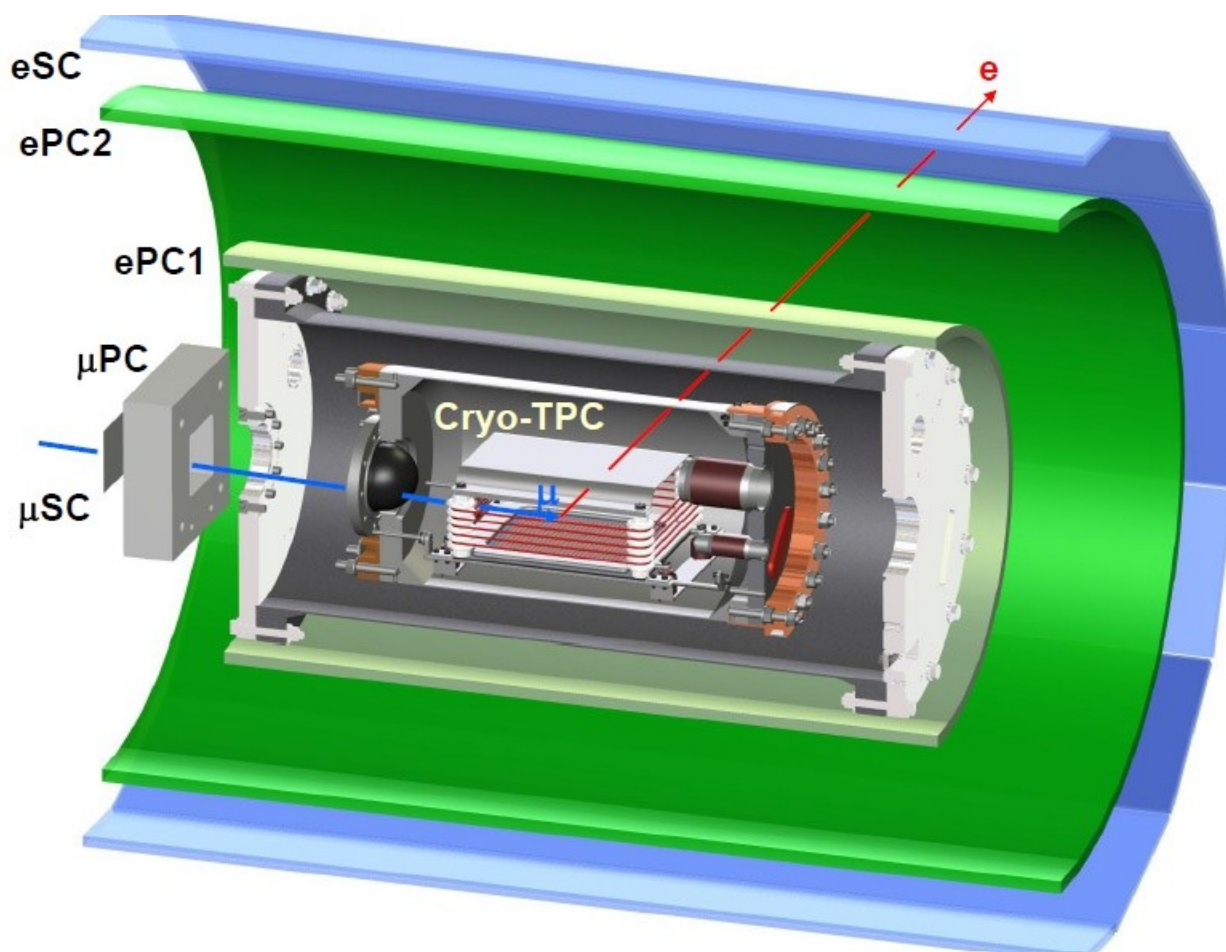
Метод измерений:

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

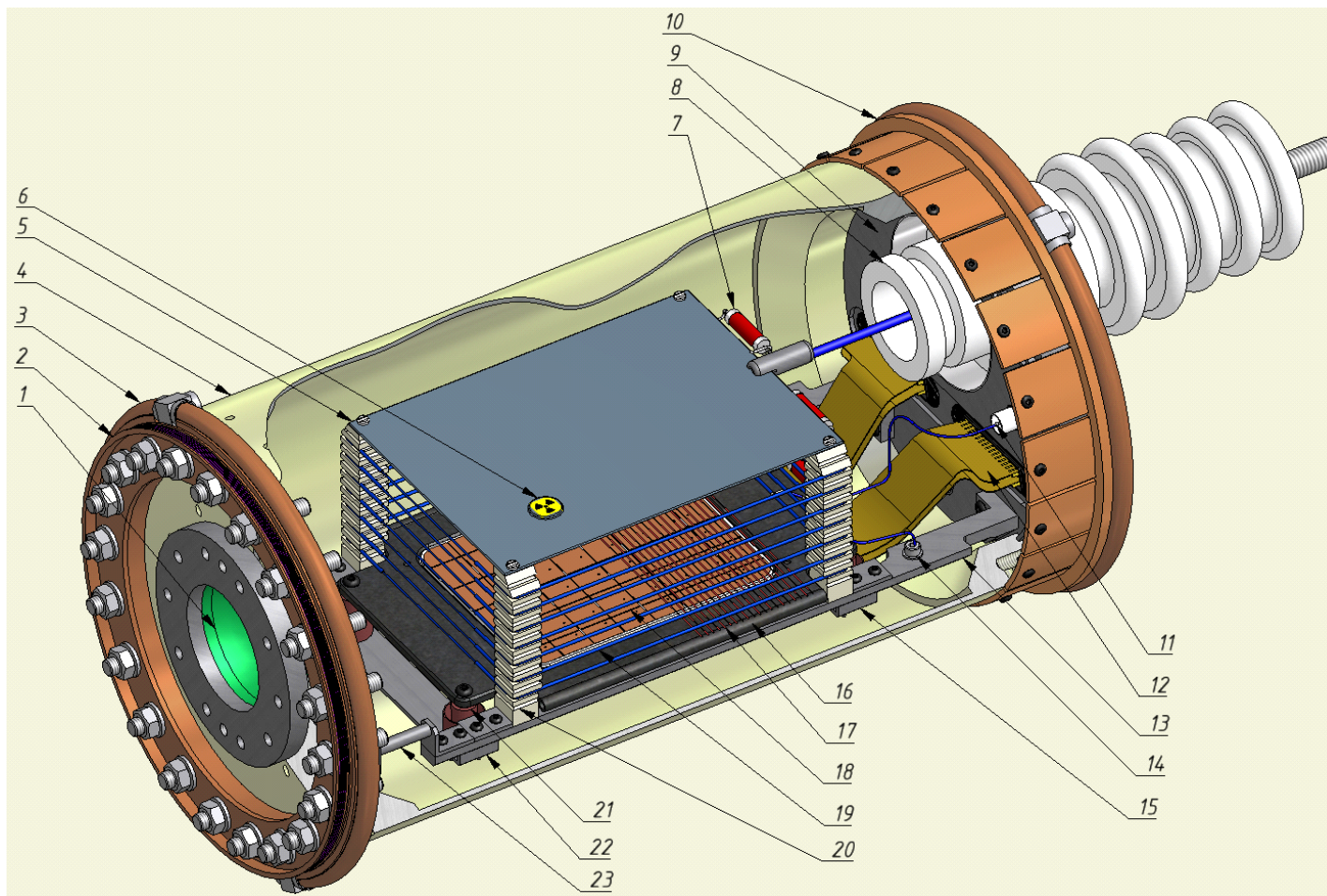
Чувствительность метода:

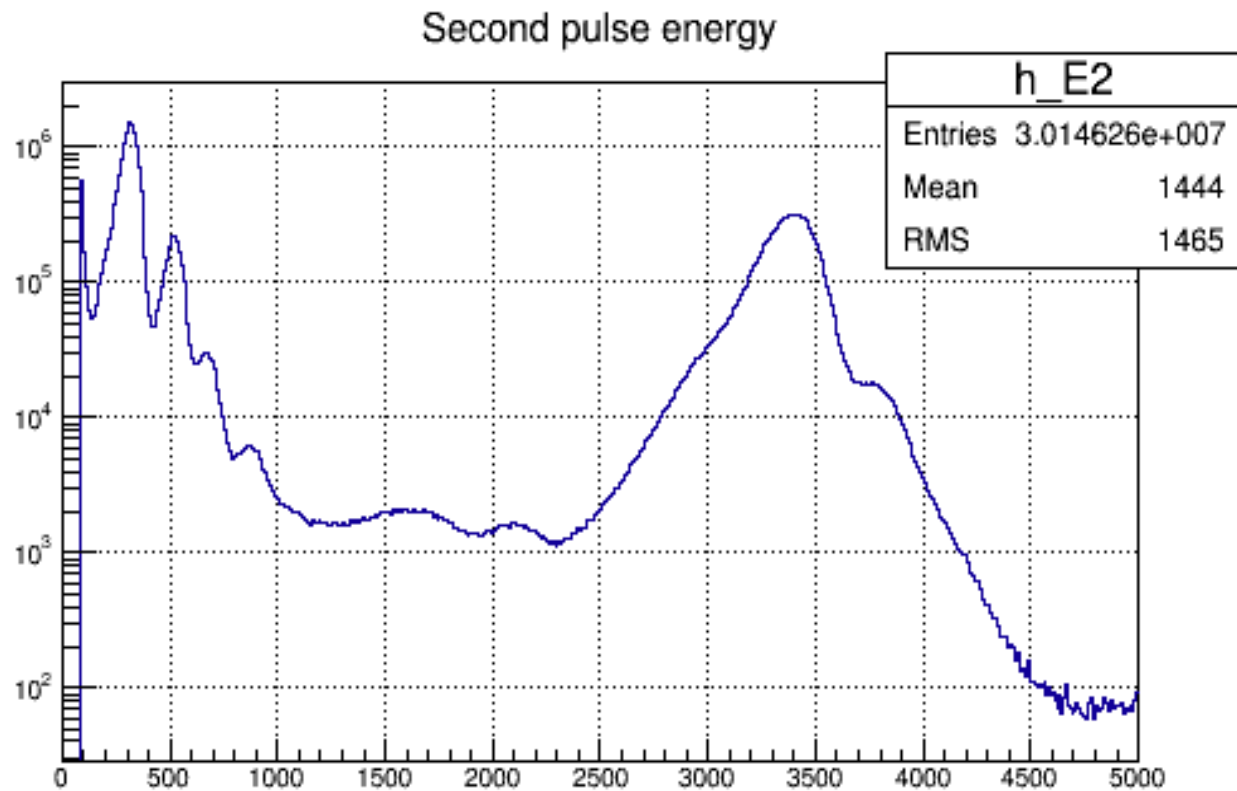
10^{10} - остановок мюонов в рабочем объеме активной мишени.
Время набора статистики – 6 недель. Обнаружение процесса мюонного катализа ядерного ${}^3\text{He}$ -синтеза и измерение его скорости с точностью $\sim 10\%$ (для **$\lambda_f(0)=2\cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$** (теория)).

Экспериментальная установка "MuSun"



Криогенная активная мишень (ТРС)

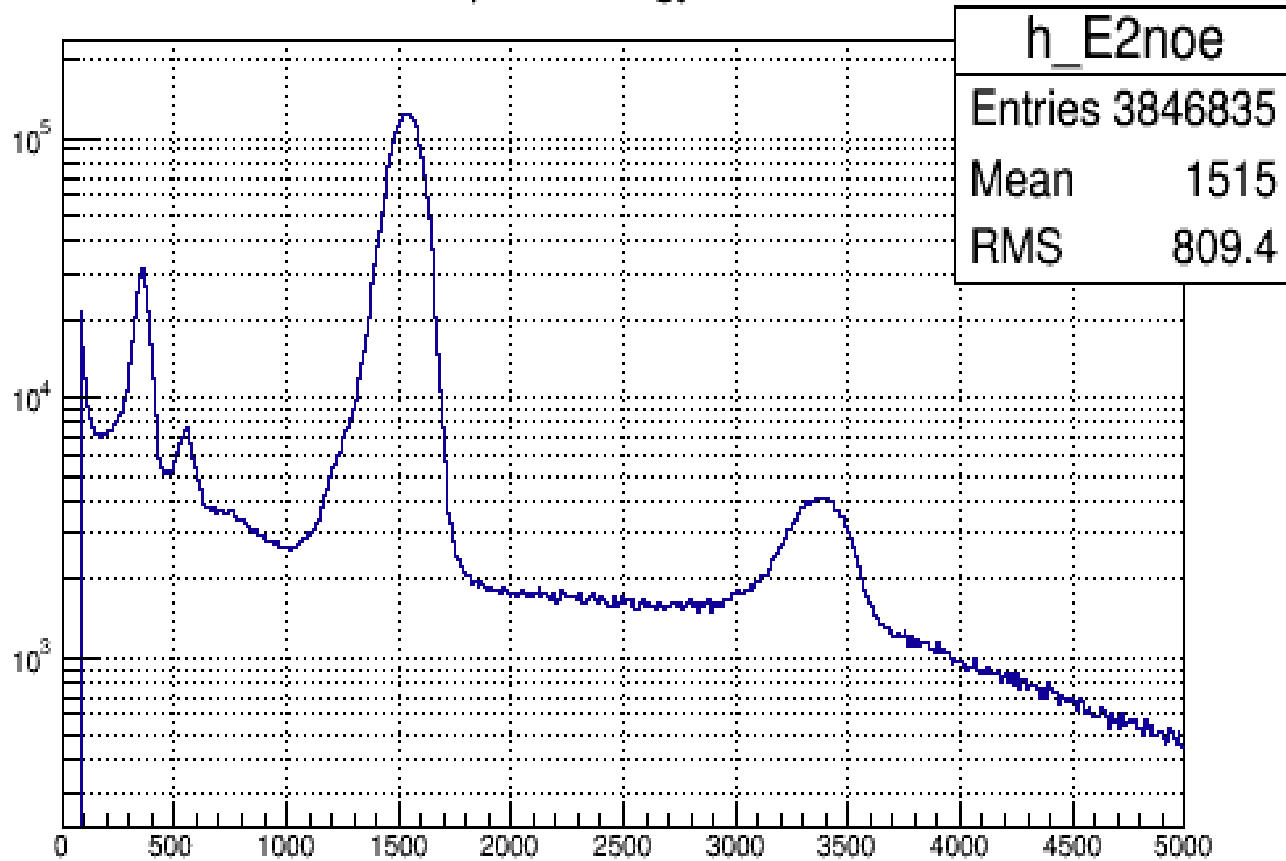




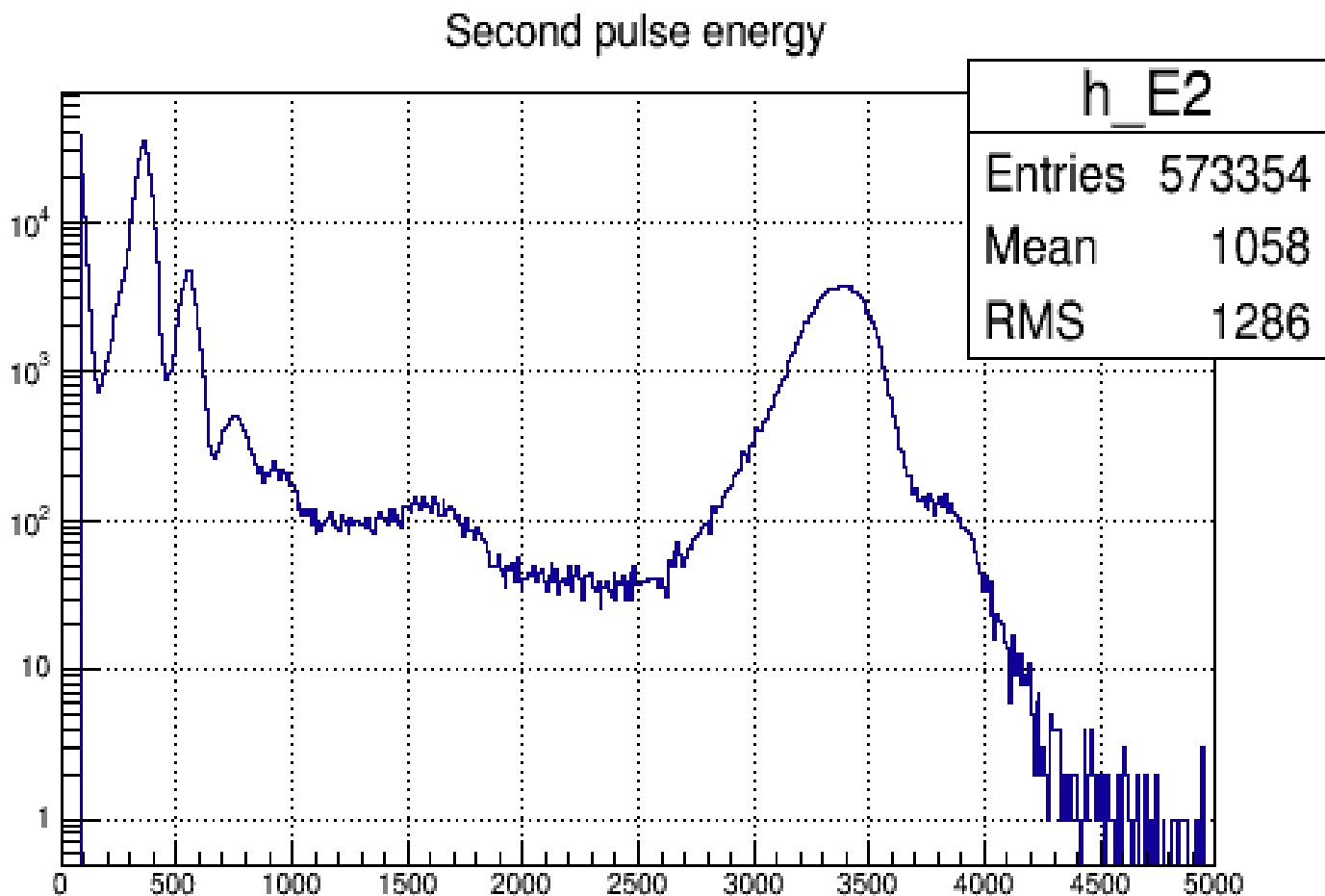
Энергетический спектр событий мюонного катализа в чистом D_2 (эксперимент “MuSun”).

Статистика - 10^{10} остановок мюонов.

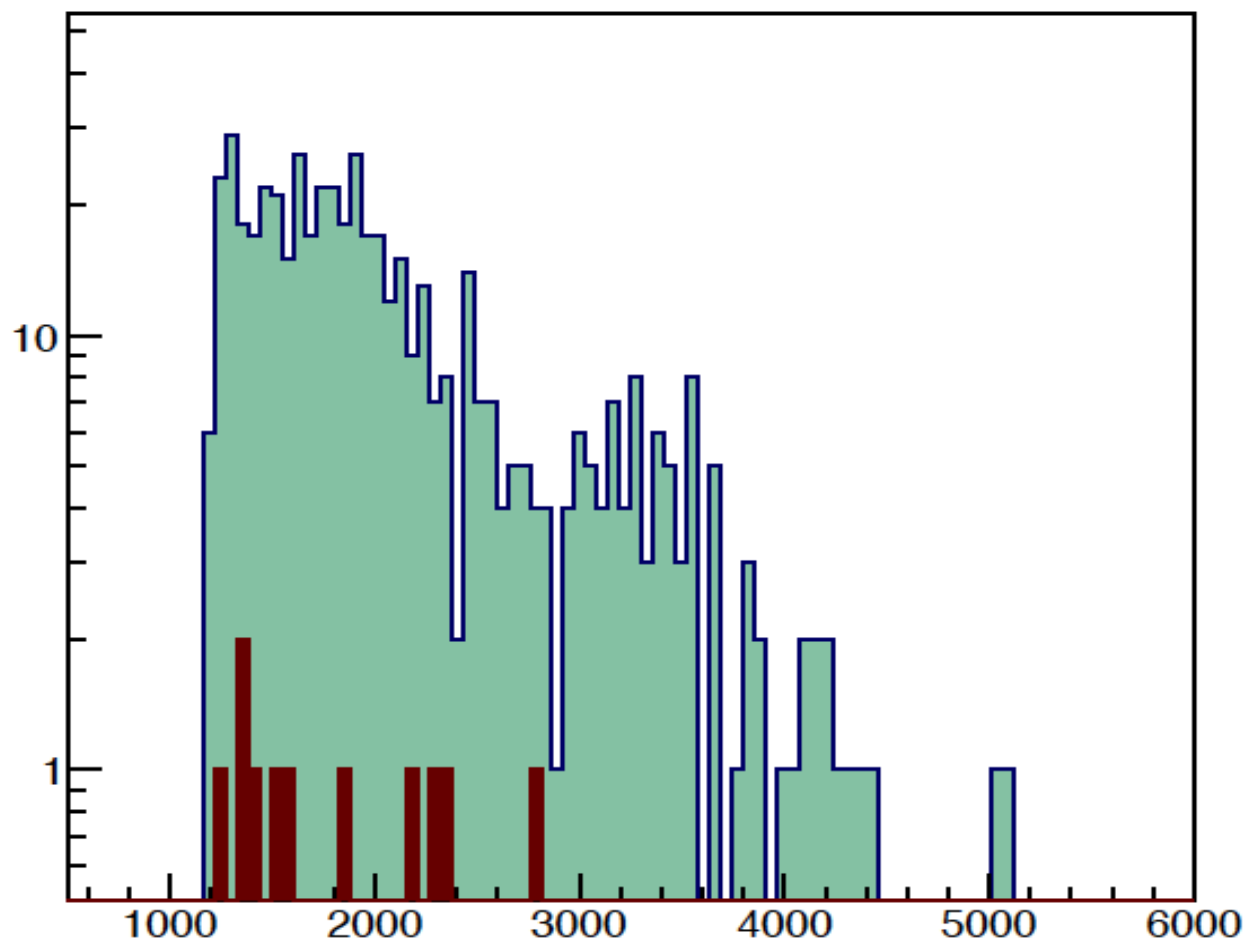
Second pulse energy, No electron



**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 событий мюонного катализа в $D_2+^3He(5\%)$ (совпадения с электроном от распада 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 – в $D_2 + ^3He(5\%)$).

Выводы

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

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