



Поиск мюонного катализа  
ядерного  $d^3\text{He}$  синтеза

MuSun addendum

П. Кравченко



# Мотивация

## Ядерная реакция синтеза



- зеркальная реакция  $d + t$
- источник термоядерной энергии
- астрофизика (Процесс первичного ядерного синтеза легких элементов в ранней вселенной)

Мюонный катализ позволяет изучать эти реакции при практически нулевой энергии

# Ядерный синтез в молекуле $d\mu^3He$

*Богданова, Герштейн, Пономарев [1997]  
Абрамов, Гусев, Коробов [1999]*

Скорость ядерного синтеза в  $d\mu^3He$  молекуле  $\lambda_f(J)$

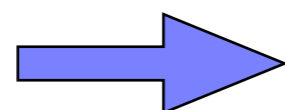
эффективная скорость ядерного синтеза

$$\lambda_f(eff) = w(0) \cdot \lambda_f(0) + w(1) \cdot \lambda_f(1) \sim w(0) \cdot \lambda_f(0)$$

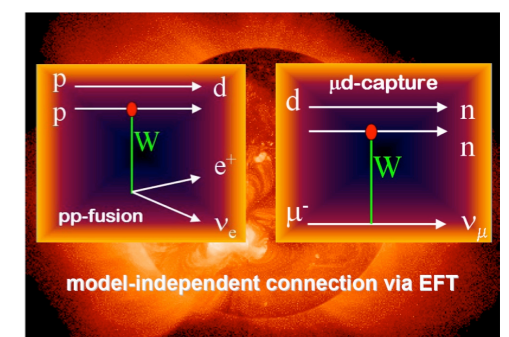
$w(J)$  - заселенность состояния с угловым моментом  $J$   
*Файфман [1999]*

**PNPI-PSI (1992, 1998, 1999)**  $\lambda_f(eff) < 6 \cdot 10^4 s^{-1}$

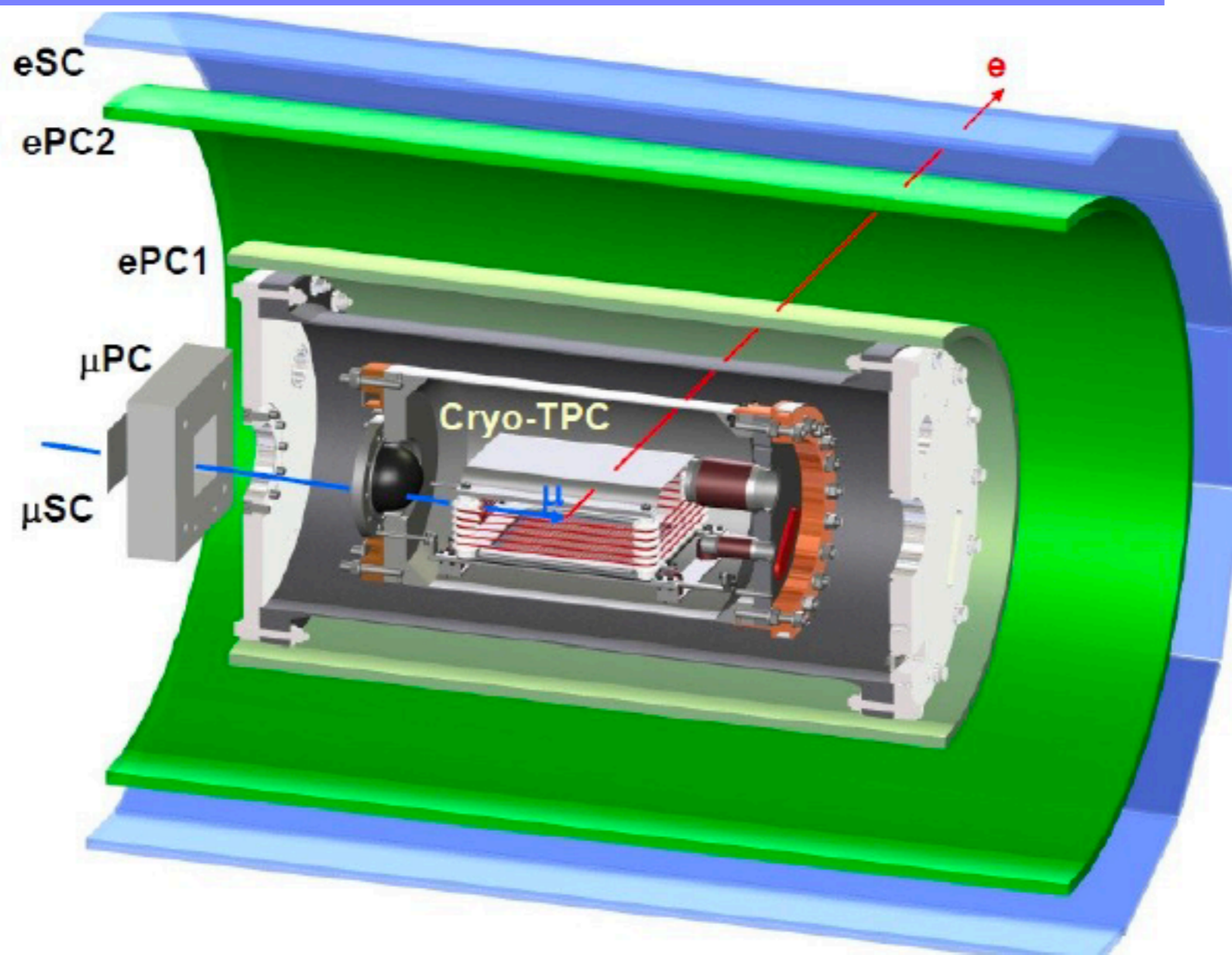
**JINR-PSI (1999, 2006)**  $\lambda_f(eff) \sim 5 \cdot 10^5 s^{-1}$  **!!!!!!!**



мюонный катализ в MuSun



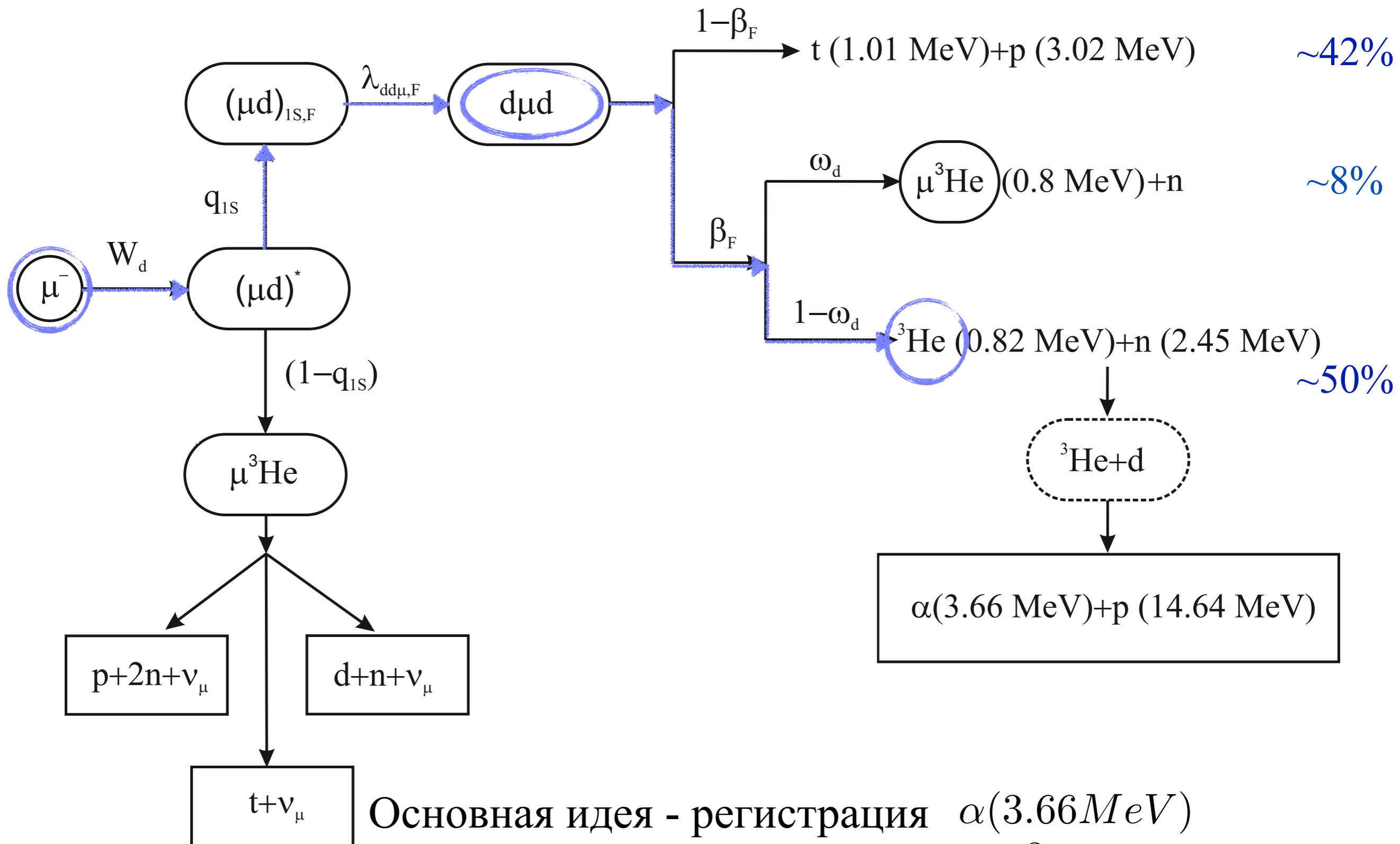
# Экспериментальная установка (MuSun)



**TPC** - криогенная время-проекционная камера (**31К, 5bar**) как активная газовая мишень и детектор заряженных частиц

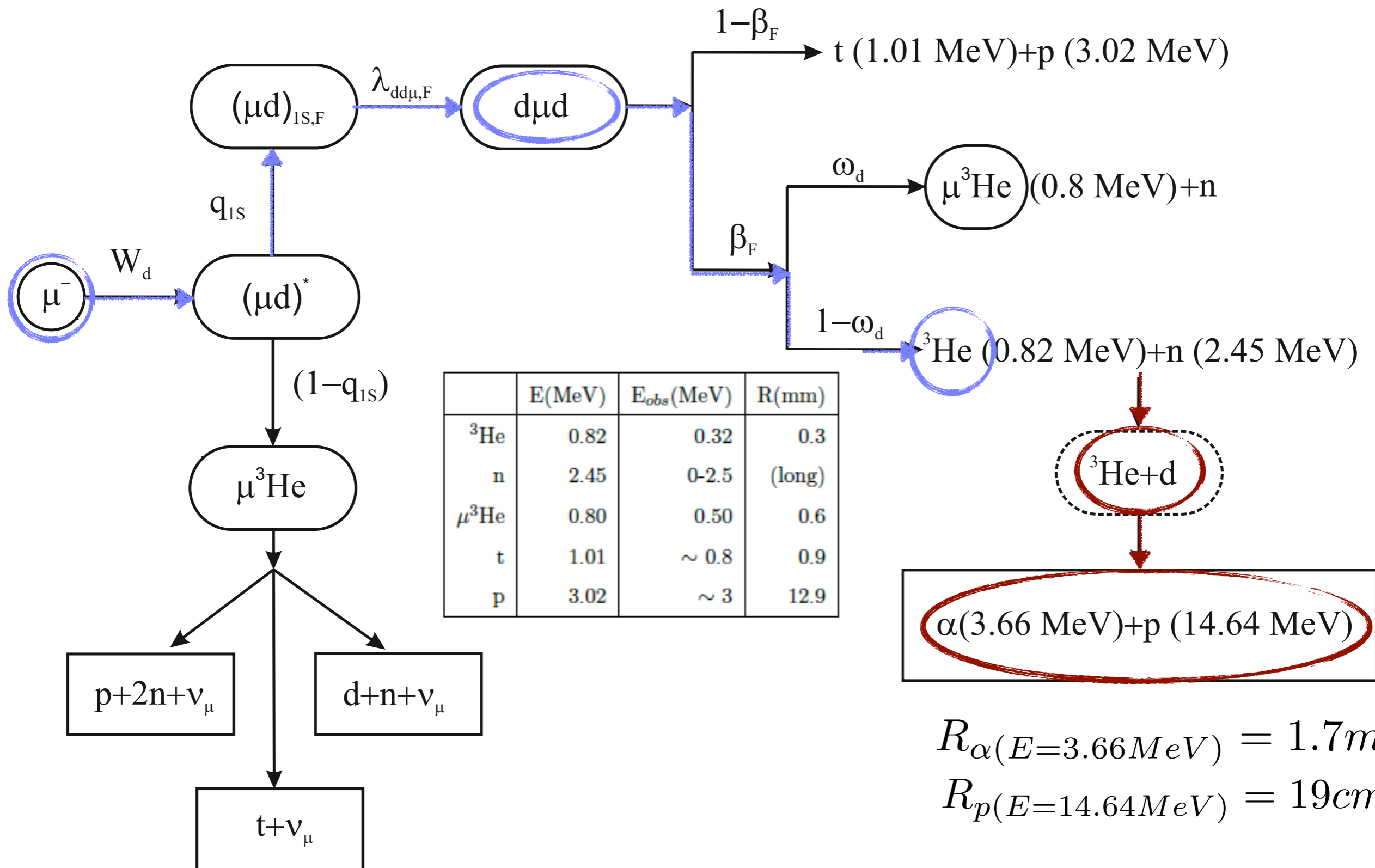
детектируются мюоны и все заряженные продукты реакции

# Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D<sub>2</sub>

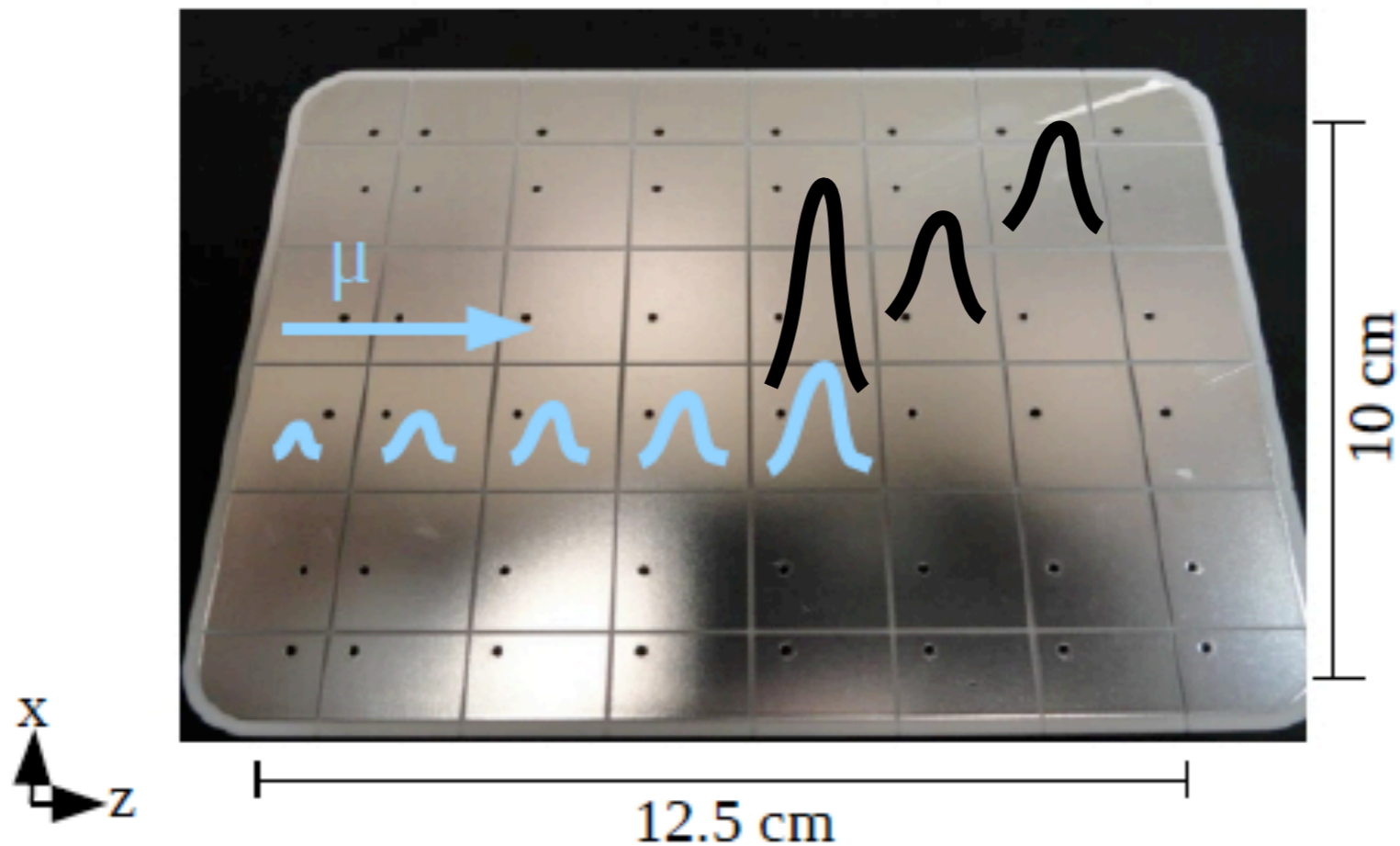


Основная идея - регистрация  $\alpha(3.66 \text{ MeV})$  и длиннопробежного протона ( $14.64 \text{ MeV}$ ) от  $d\mu^3\text{He}$ -синтеза

# Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D<sub>2</sub>

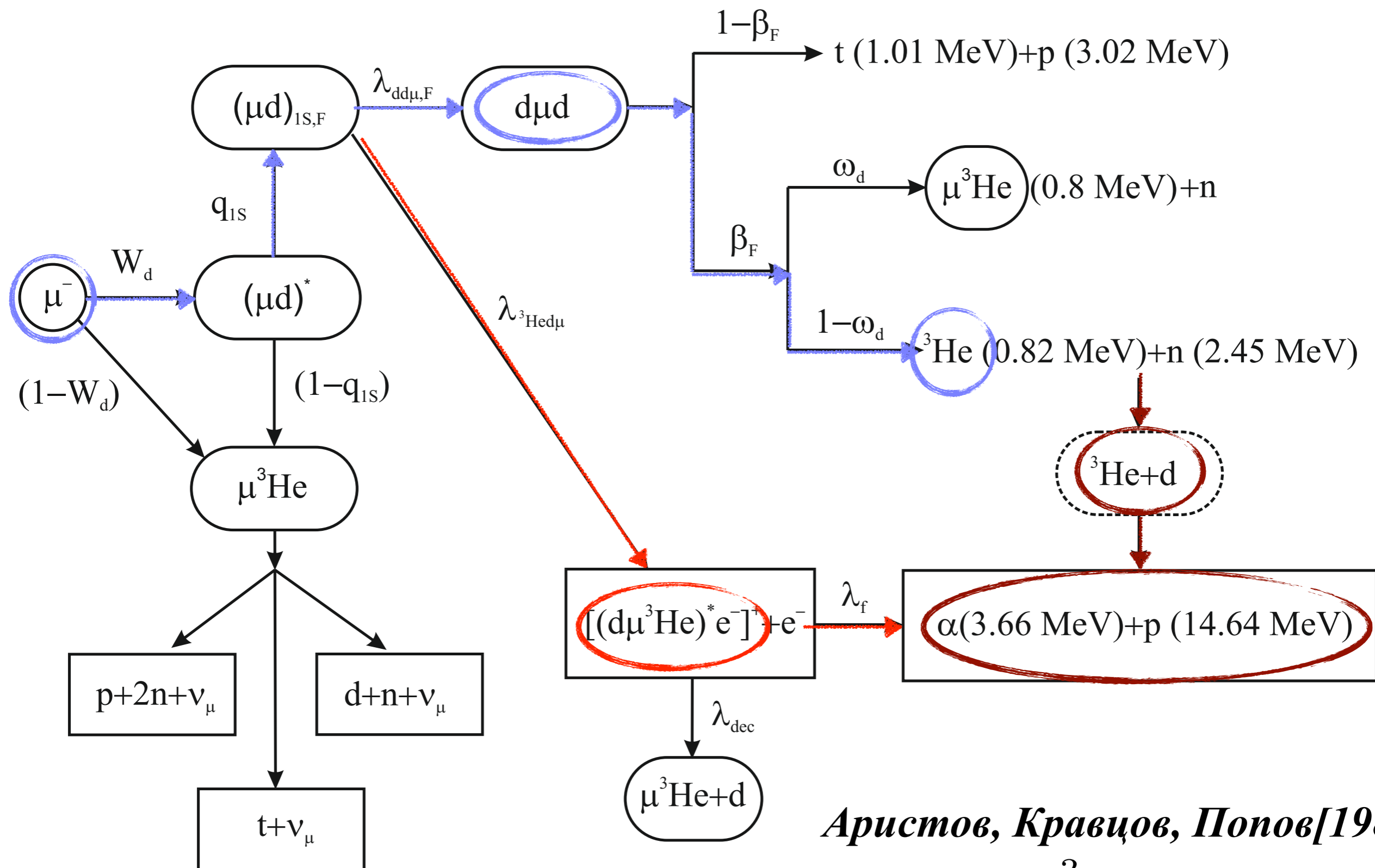


# Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D<sub>2</sub>



$d + {}^3\text{He}$  "синтез на лету"

# Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в $D_2 + 5\% {}^3\text{He}$



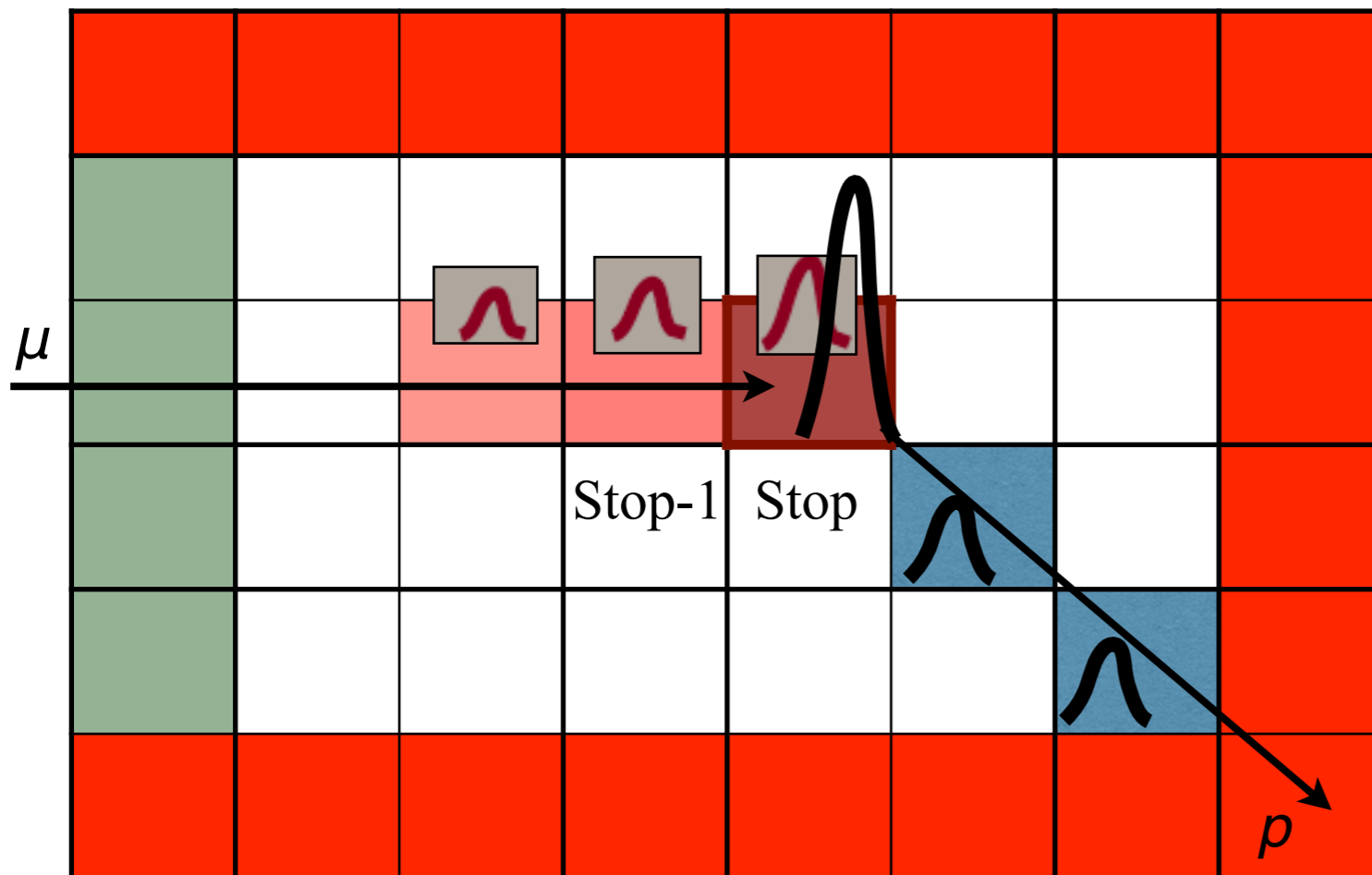
*Аристов, Кравцов, Попов [1981]*

Образование  $d\mu^3\text{He}$  молекулы 8



# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Текущее состояние. Этап I.



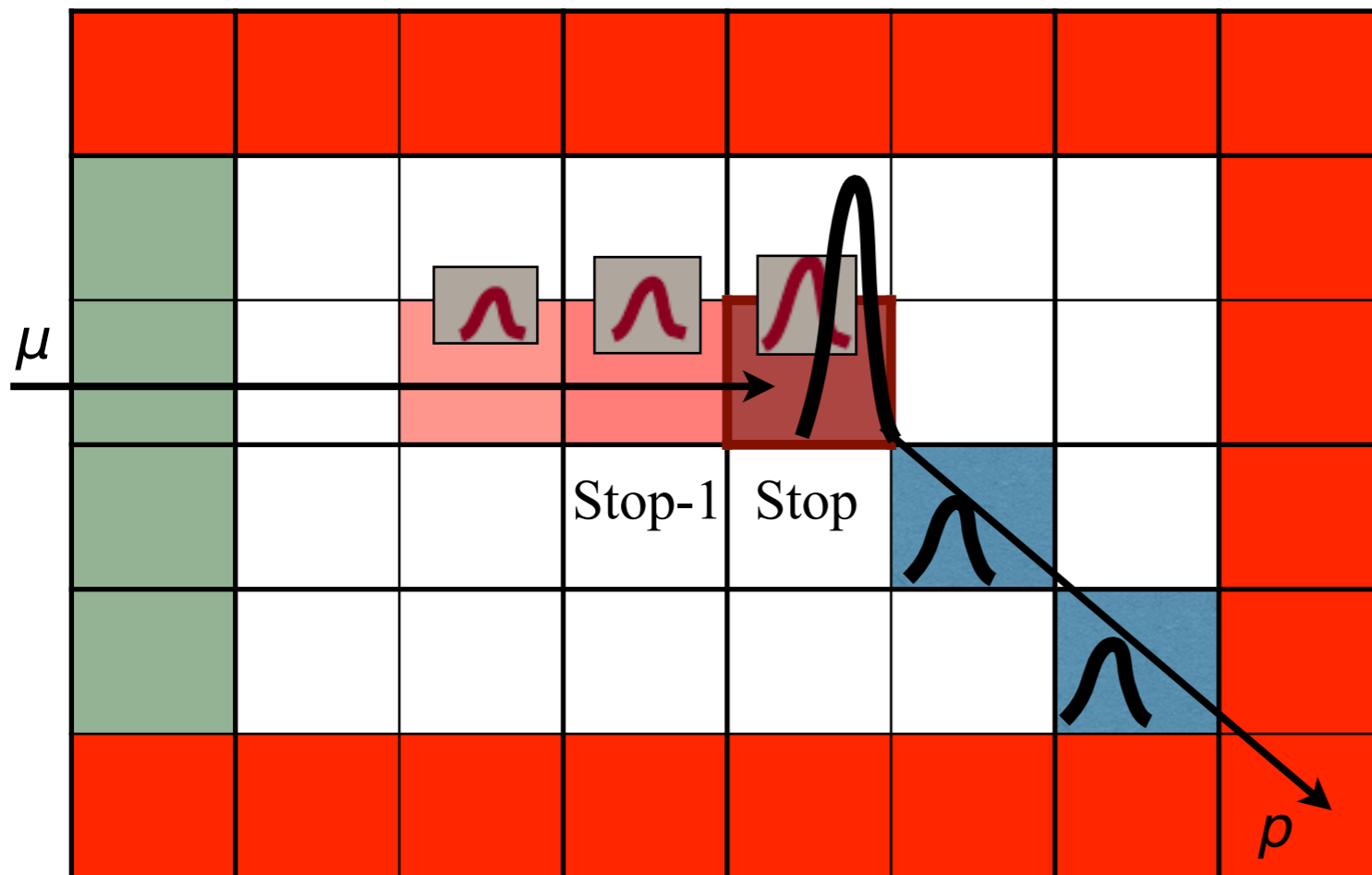
**Run 8 (2015)**

ЧИСТЫЙ  $D_2$

набрано  $10^{10}$  остановок  $\mu$

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Текущее состояние. Этап II.



### Run 8 (2015)

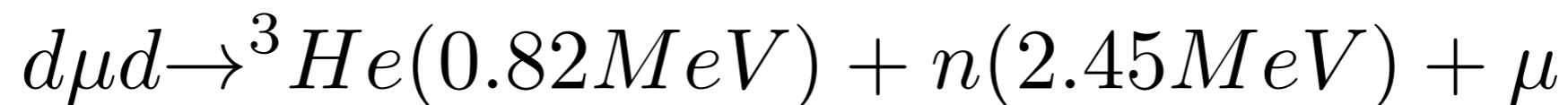
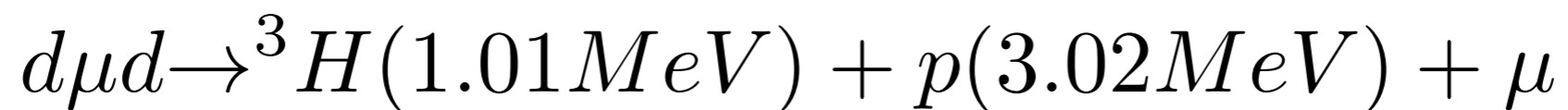
ЧИСТЫЙ  $D_2$   
набрано  $10^{10}$  остановок  $\mu$

### Run 9 (2016)

газовая смесь  $D_2 + 5\% ^3He$   
набрано  $10^9$  остановок  $\mu$

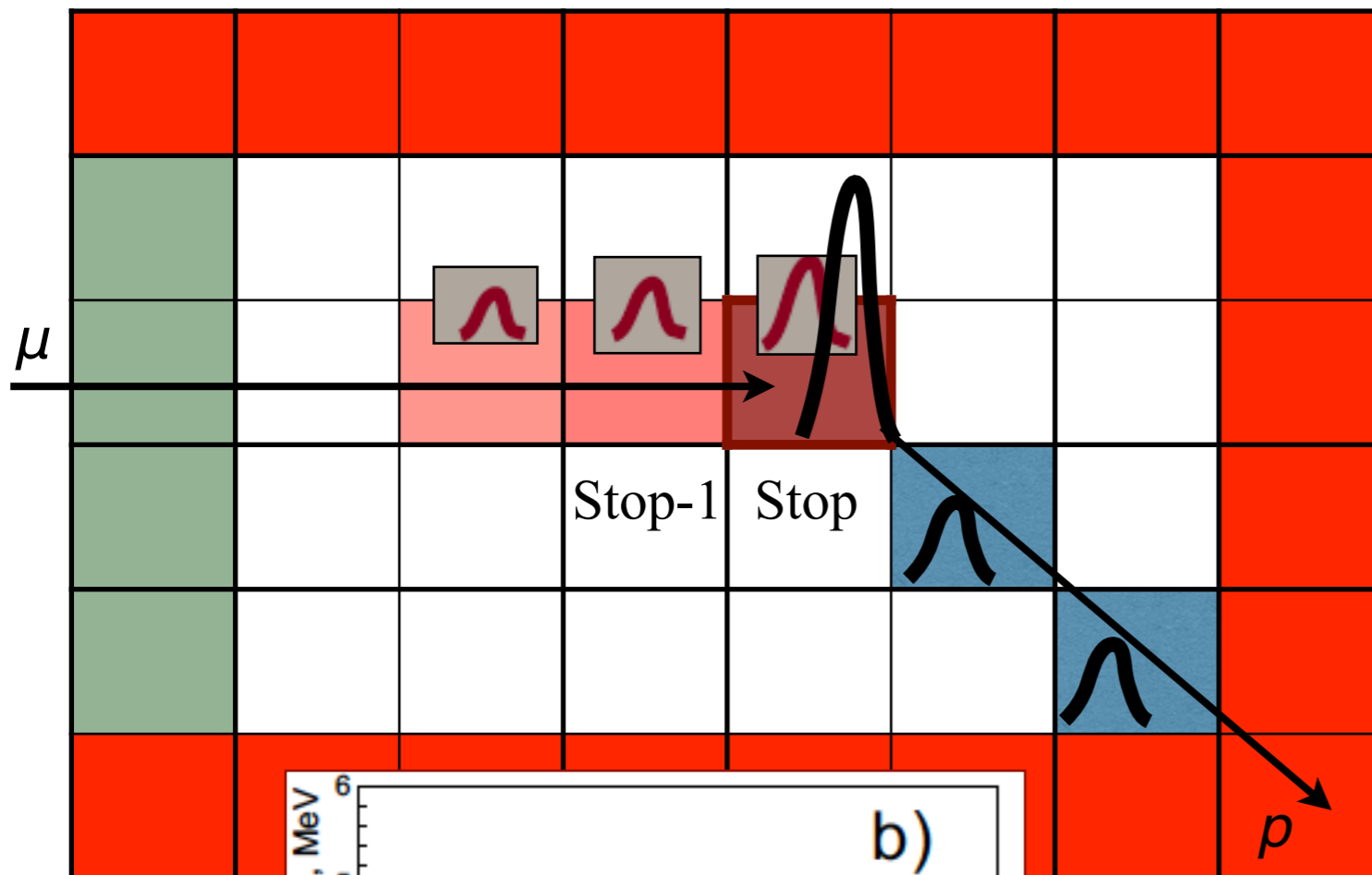
**6 дней работы пучка**

источники фона:



# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Текущее состояние. Этап III.



**Run 8 (2015)**

ЧИСТЫЙ  $D_2$

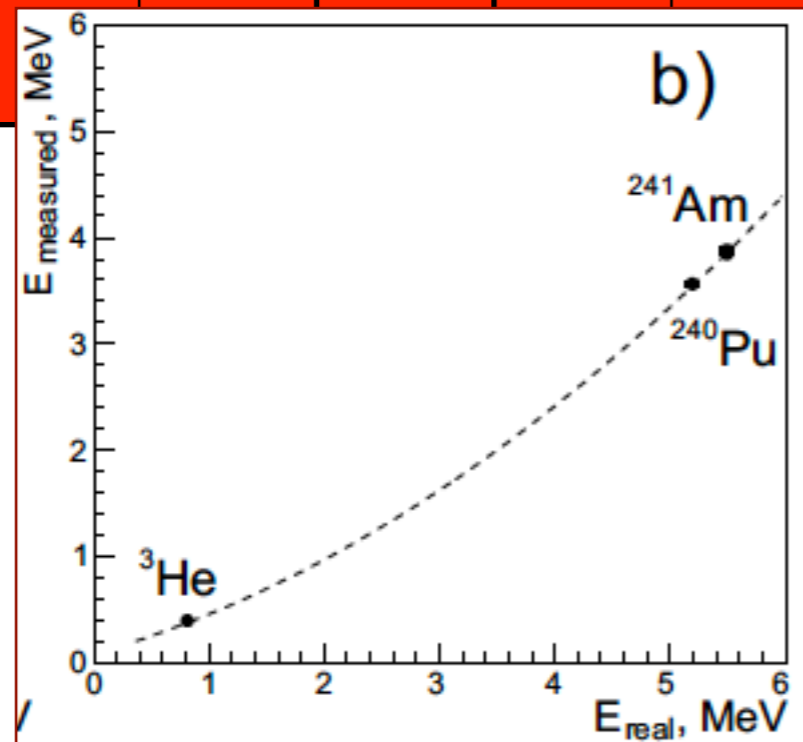
набрано  $10^{10}$  остановок  $\mu$

**Run 9 (2016)**

газовая смесь  $D_2 + 5\% ^3He$

набрано  $10^9$  остановок  $\mu$

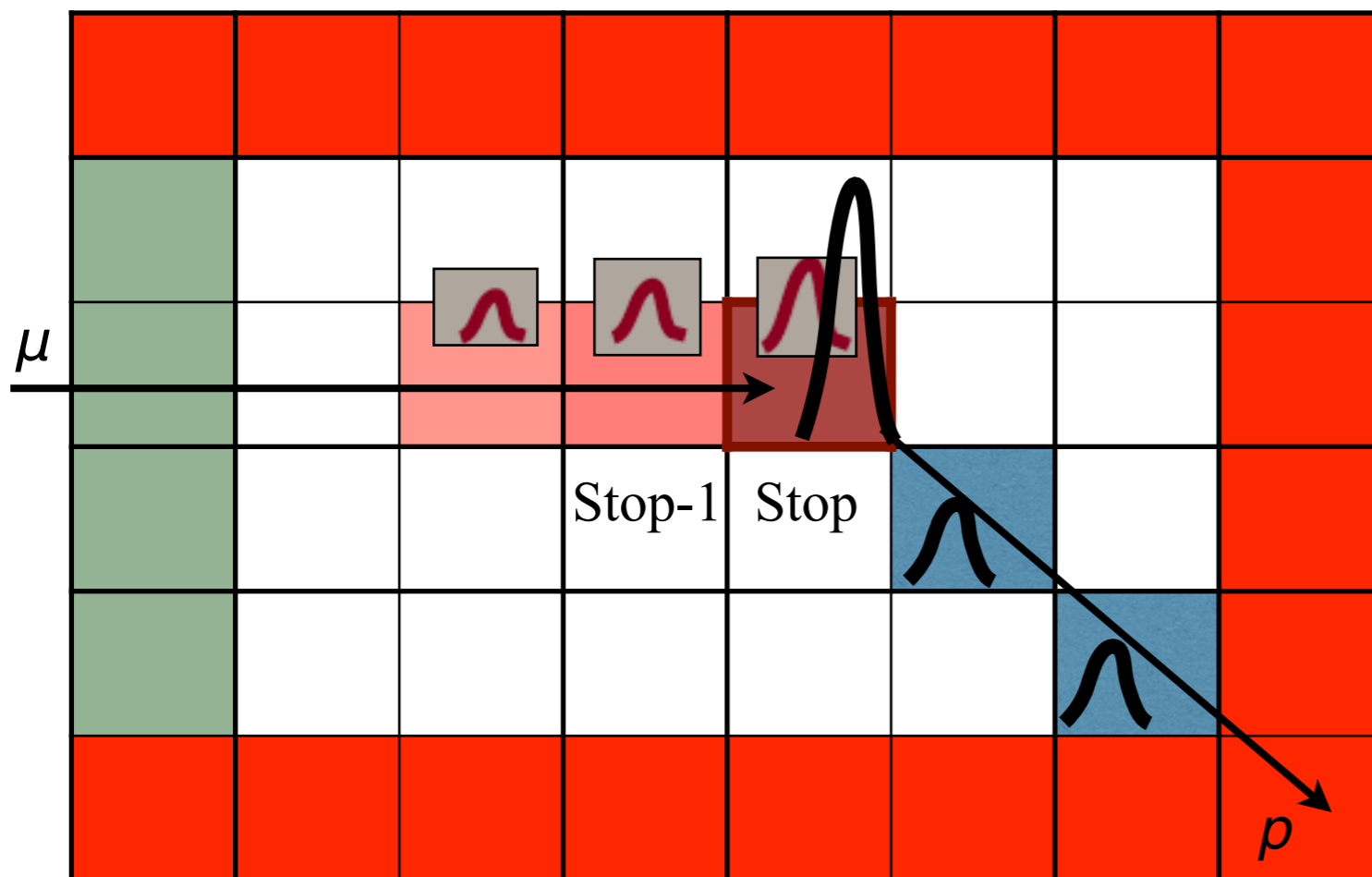
**6 дней работы пучка**



**Систематические исследования (2017)**  
эффект рекомбинации  
катод с 6  $\alpha$ -источниками

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Текущее состояние.



**Run 8 (2015)**

ЧИСТЫЙ  $D_2$

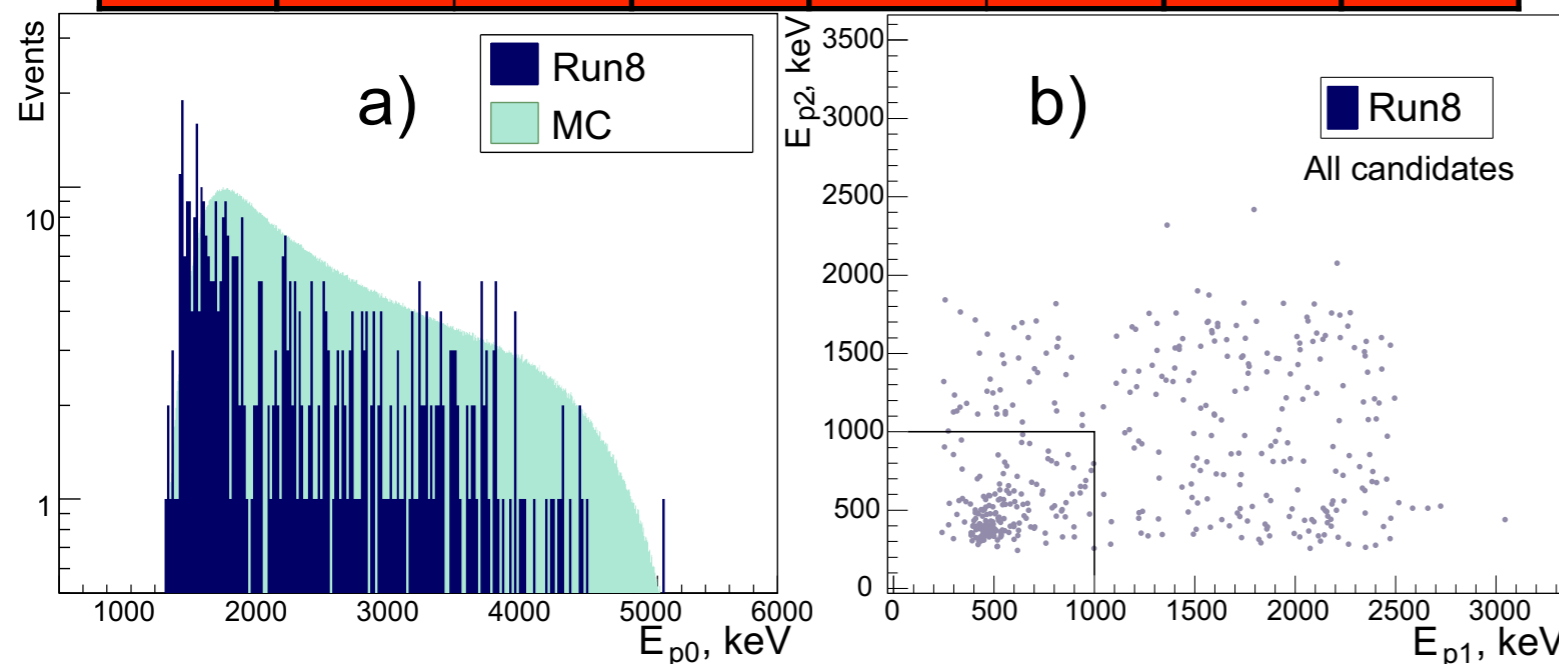
набрано  $10^{10}$  остановок  $\mu$

**Run 9 (2016)**

газовая смесь  $D_2 + 5\% ^3He$

набрано  $10^9$  остановок  $\mu$

**6 дней работы пучка**

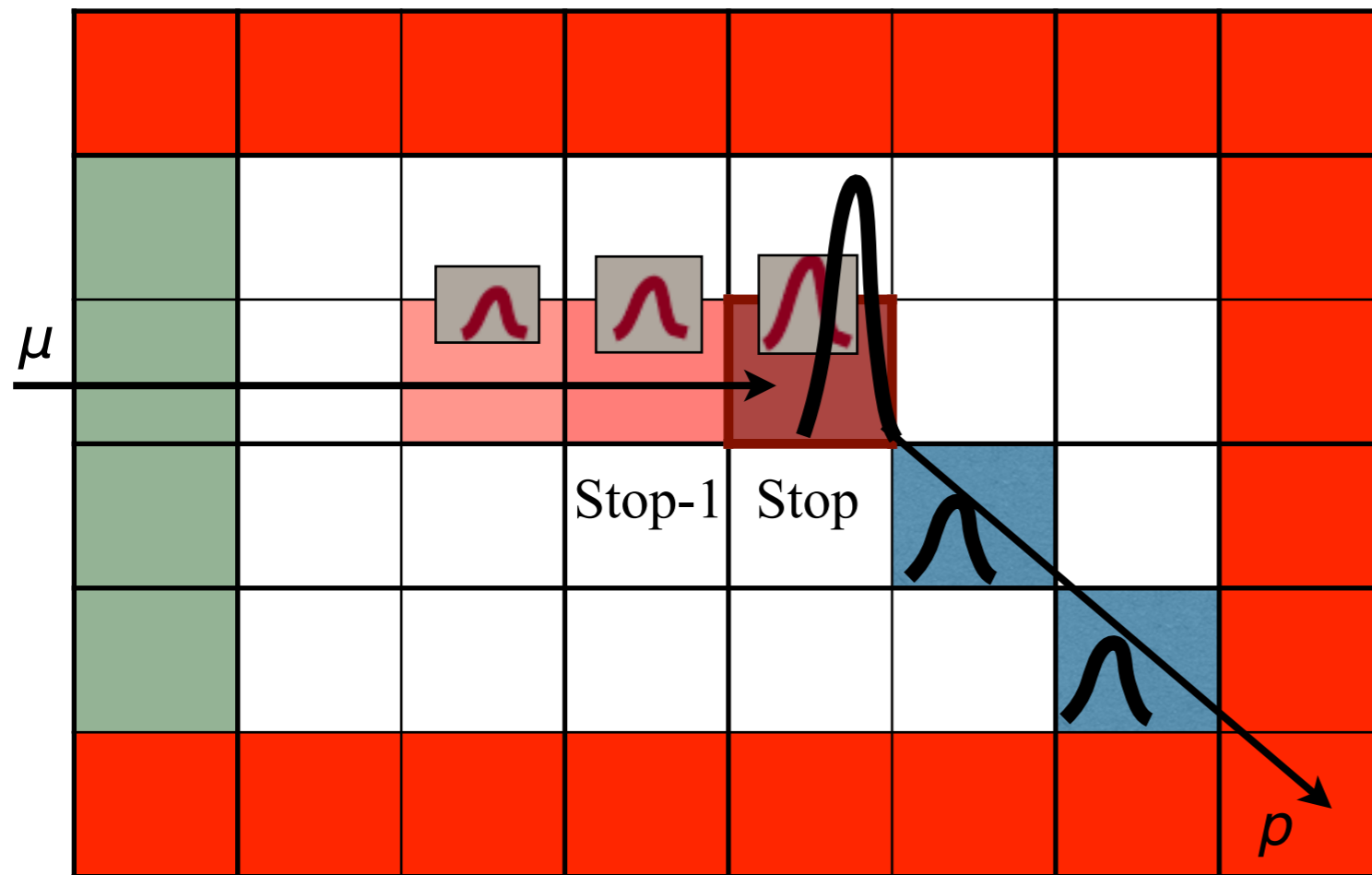


При энергии второго сигнала  
на паде остановке  $>2MeV$

run	Ntot	NFinF/Npileup
Run8	99	77/22
Run9	2	1.9/0.34

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Текущее состояние.



**Run 8 (2015)**

ЧИСТЫЙ  $D_2$

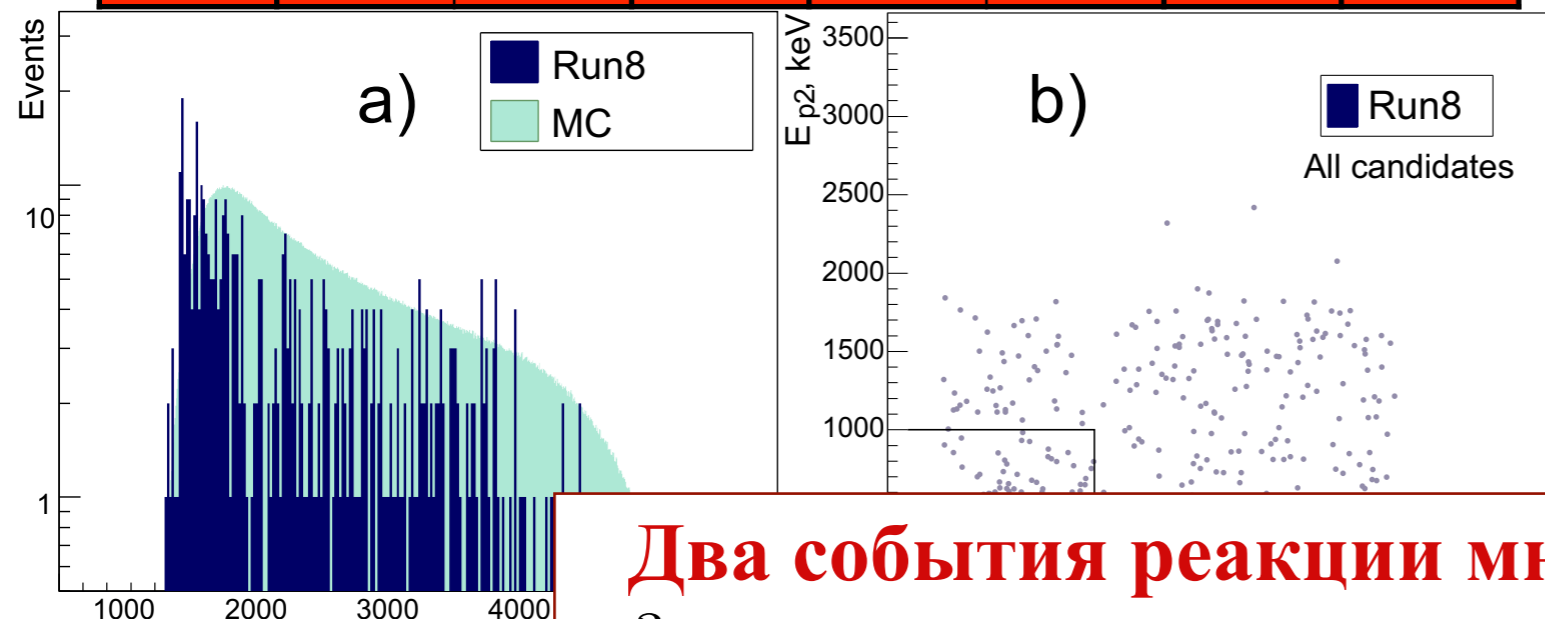
набрано  $10^{10}$  остановок  $\mu$

**Run 9 (2016)**

газовая смесь  $D_2 + 5\% ^3He$

набрано  $10^9$  остановок  $\mu$

**6 дней работы пучка**



При энергии второго сигнала  
на паде остановке  $>2MeV$

run	Ntot	NFinF/Npileup
Run8	99	77/22
Run9	2	1.9/0.34

**Два события реакции мюонного катализа  $d^3He$  ядерного синтеза были найдены при фоне  $2.2 \pm 0.3$**

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Подготовка к новому сеансу. Этап IV.

### Run 10 (2019) 4 недели

газовая смесь  $HD + 5\% ^3He$

*уменьшение фоновых событий*

*“синтез на лету” в 4 раза*

сохранение условий работы ТРС

модификация формы сигнала

*(уменьшение мертвого времени)*

*увеличение эффективности*

*регистрации в 5 раз*

### Run 8 (2015)

чистый  $D_2$

### Run 9 (2016)

газовая смесь

$D_2 + 5\% ^3He$   
**6 дней работы пучка**

run	Ntot	NFinF/Npileup
Run8	99	77/22
Run9	2	1.9/0.34

Используя теоретическое предсказание для скорости ядерного синтеза

$$\lambda_f \approx 2.5 \cdot 10^4 s^{-1}$$

**можем увидеть до 30 полезных событий при 8 фоновых**

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза

## Подготовка к новому сеансу. Этап IV.

### Технические работы 2018 года

высокая цена гелия

 эвакуация гелия из газовой системы

 технология регенерации  $^3He$

 технология производства  $HD$

# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3\text{He}$ синтеза

## Выводы

Предлагается метод по исследованию процесса мюонного катализа ядерной реакции  $d^3\text{He}$  синтеза с использованием в качестве активной мишени криогенной время-проекционной камеры

Экспериментальная установка может позволить увеличить чувствительность к реакции  $d\mu + {}^3\text{He} \rightarrow d\mu^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + \mu$  в  $\sim 50$  раз по сравнению с предыдущими экспериментами

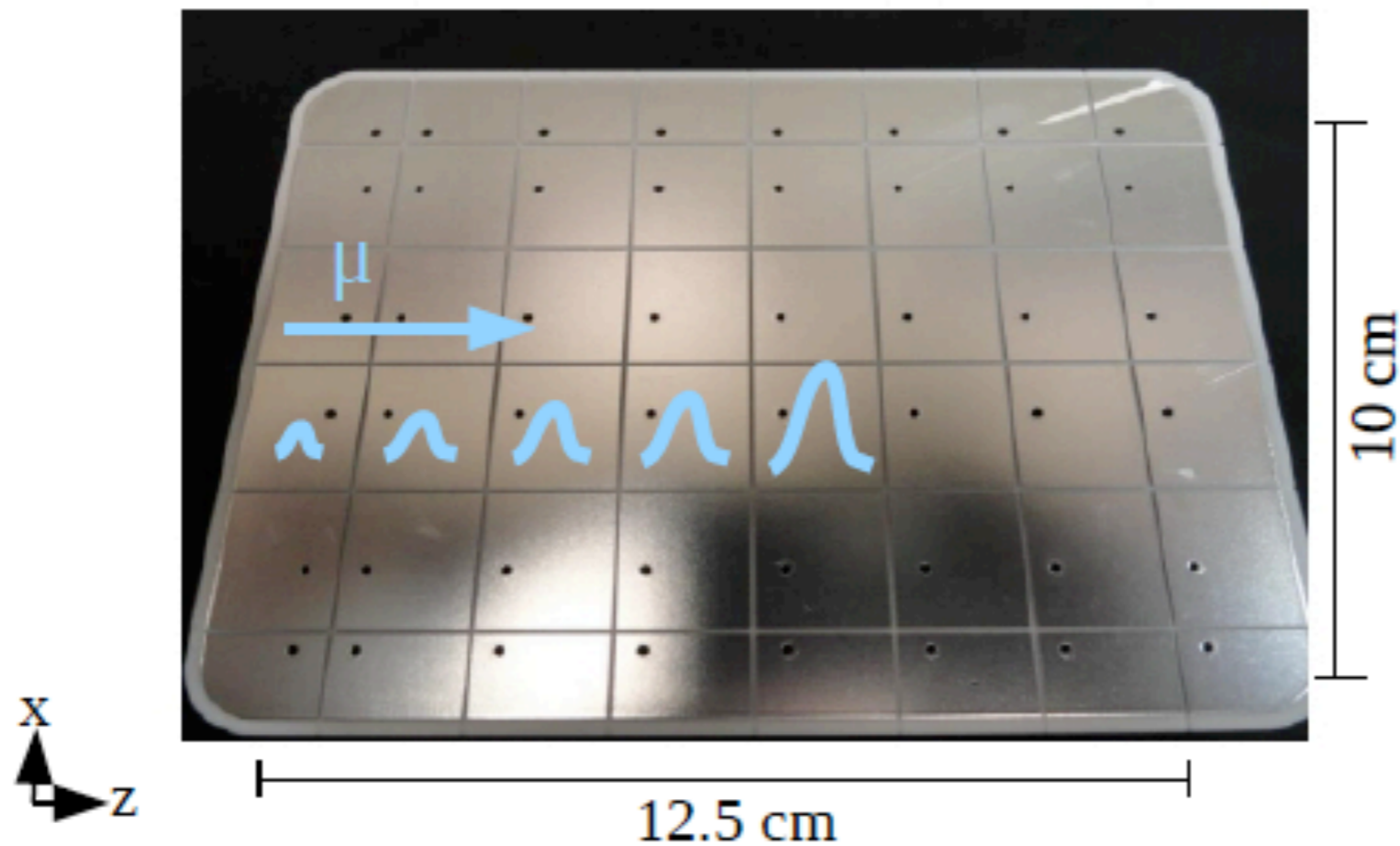
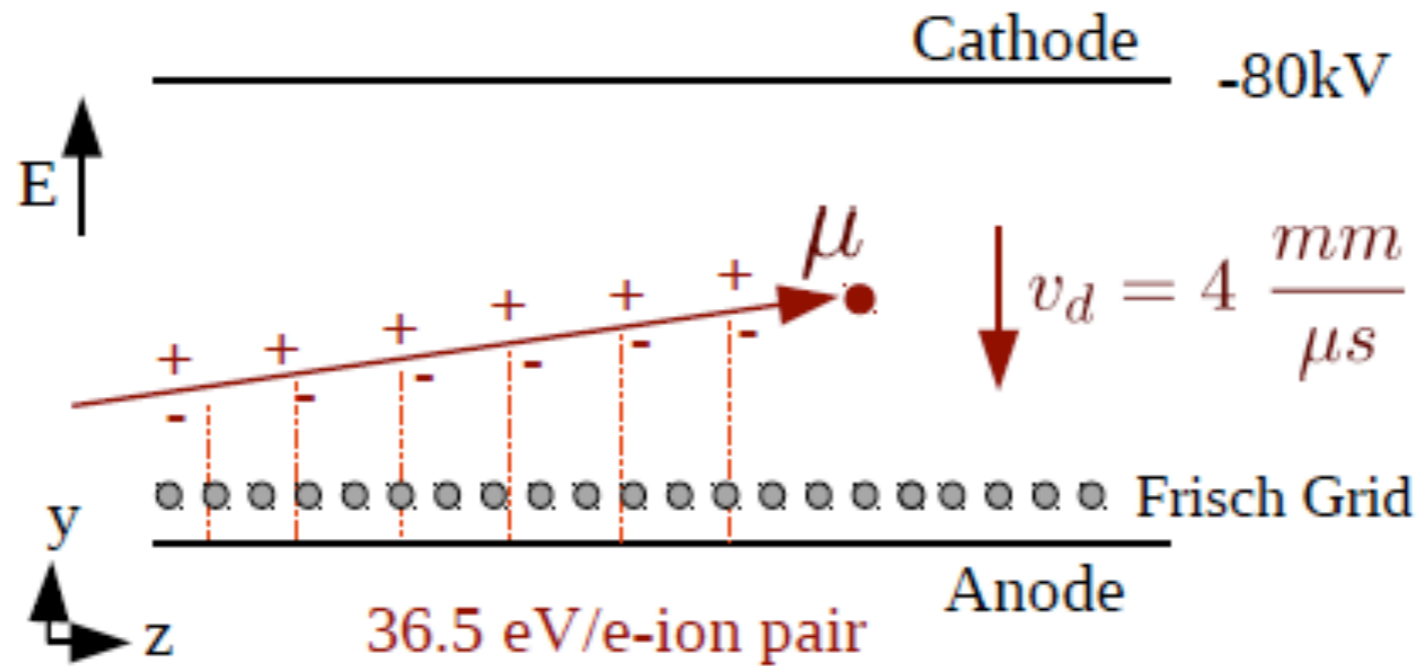
Целью предполагаемого проекта является обнаружение процесса мюонного катализа ядерной реакции синтеза и измерение его скорости с точностью  $\sim 20\%$



Спасибо!

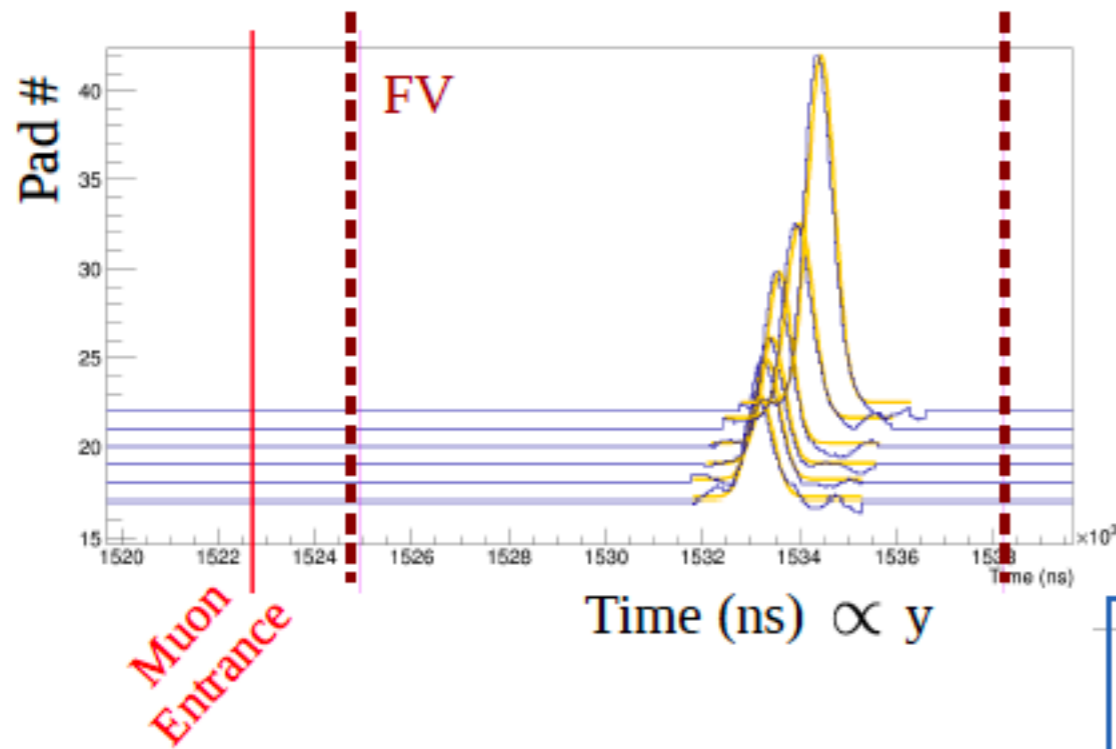


# Cryogenic time projection chamber (31K, 5bar)



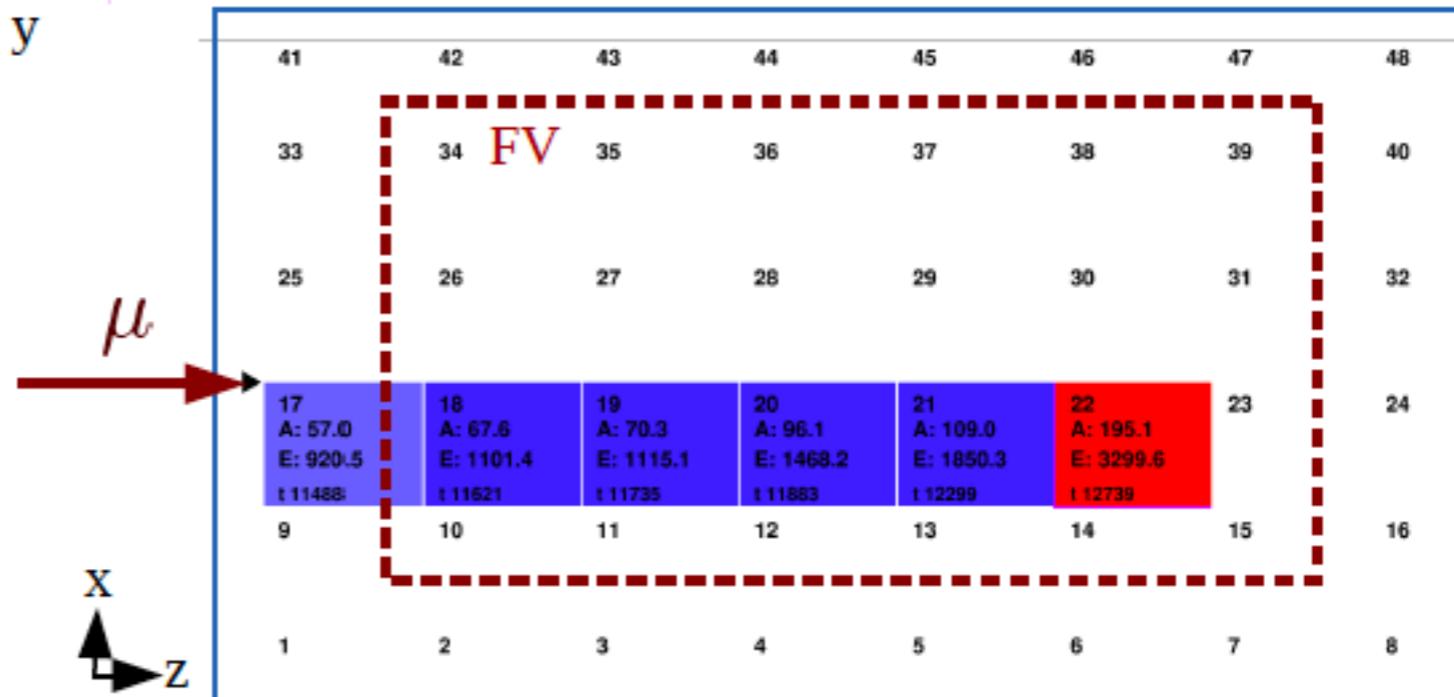
# Muon stop reconstruction

Y from drift time

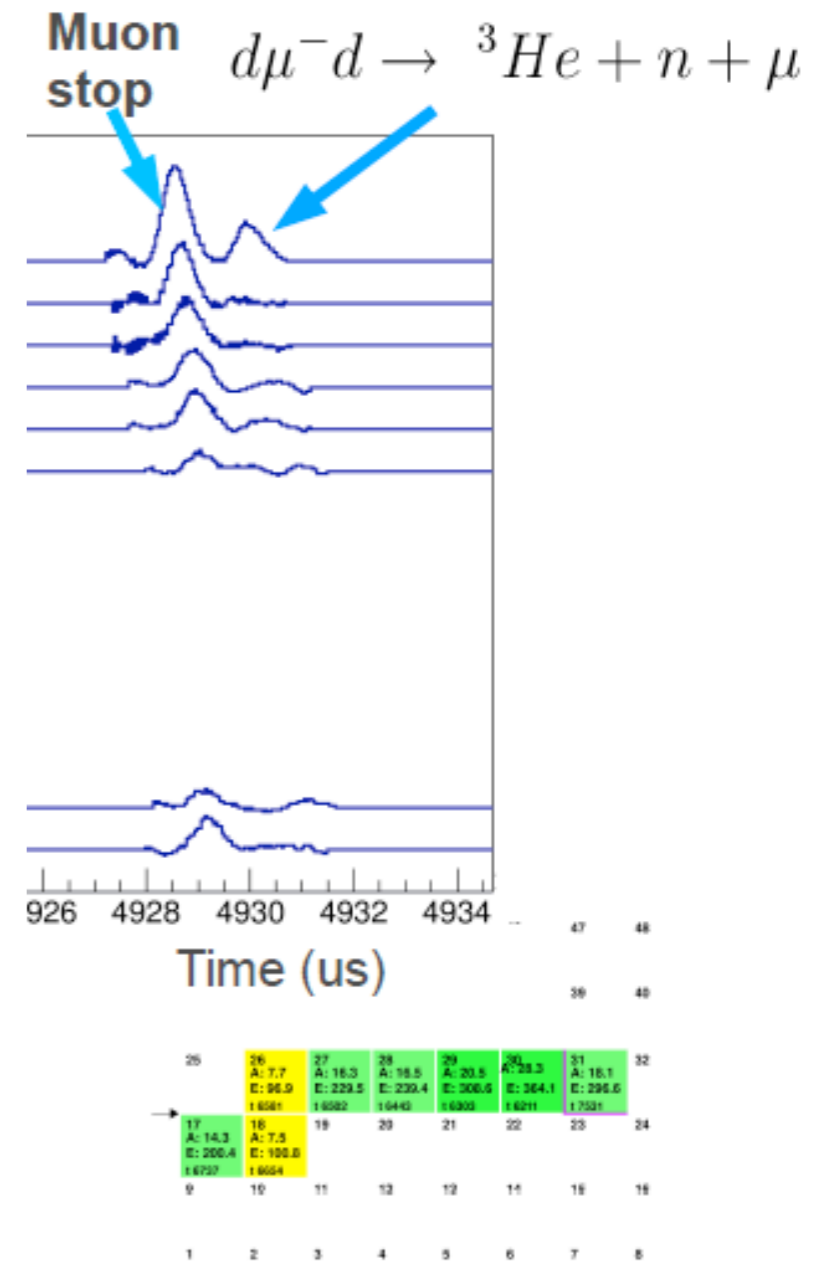
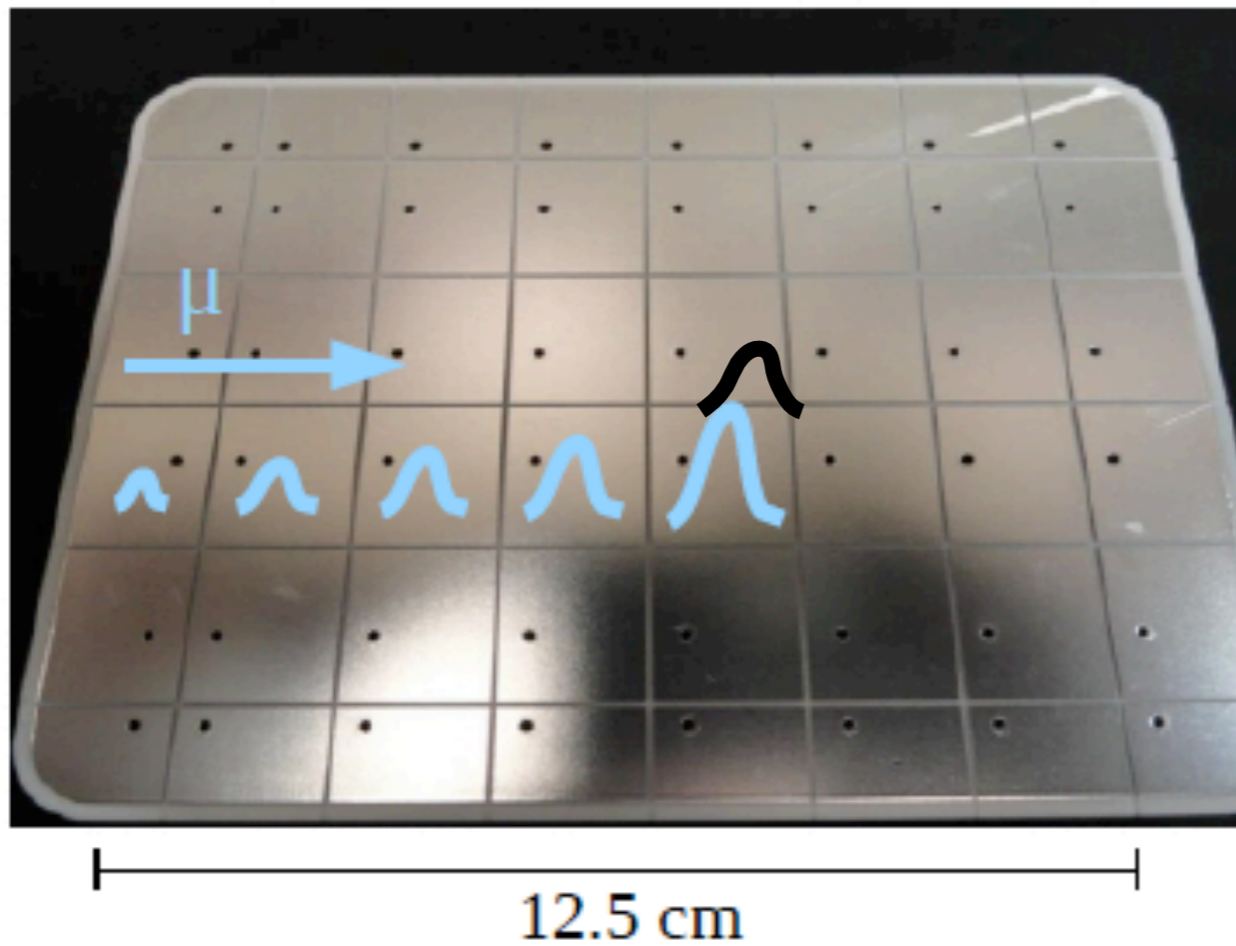


X, Z from pad plane

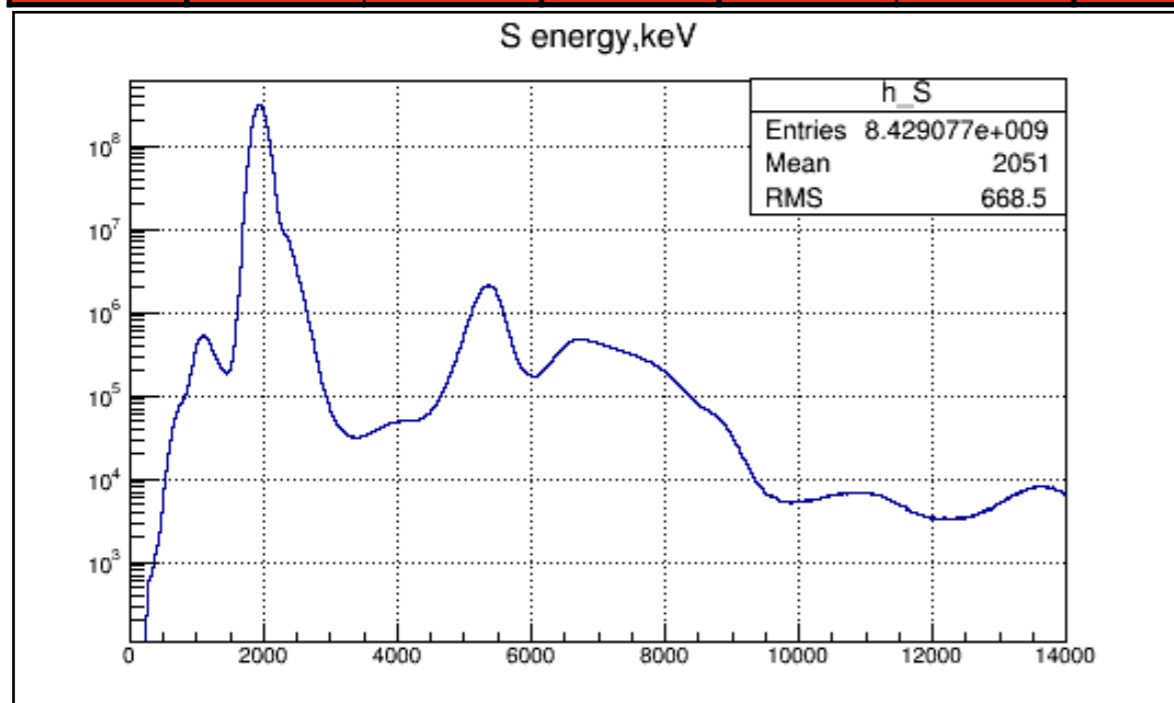
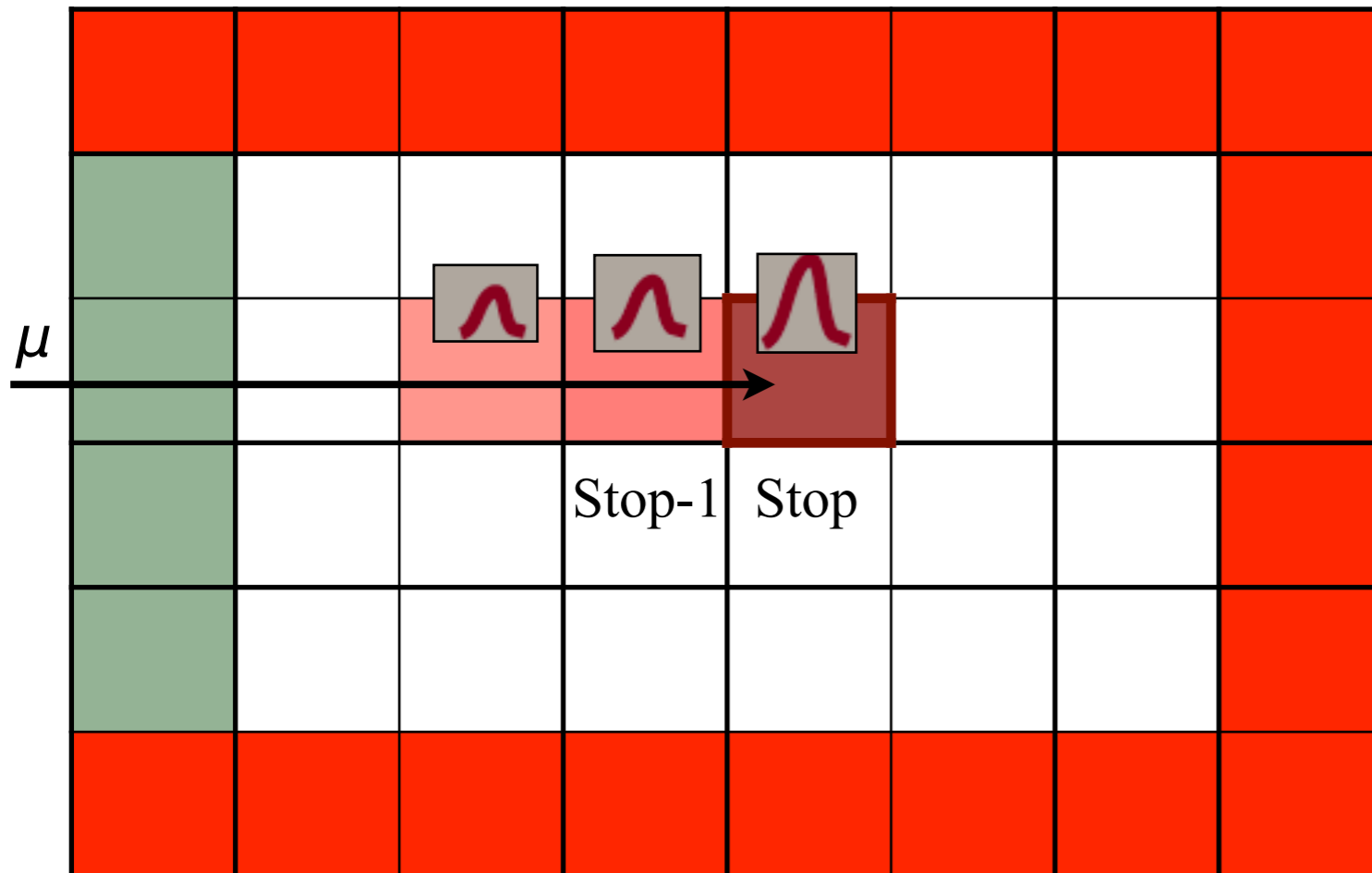
Fiducial volume cuts:  
Ensure muon stops in gas



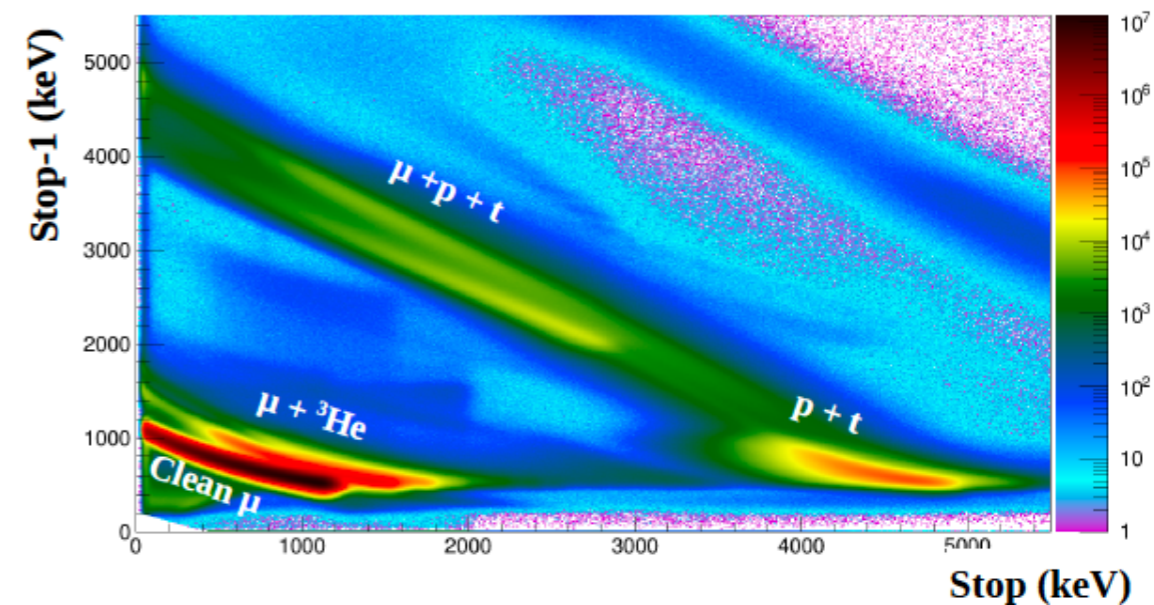
# Second signal on stop pad. $^3\text{He}$



# Event selection. Muon



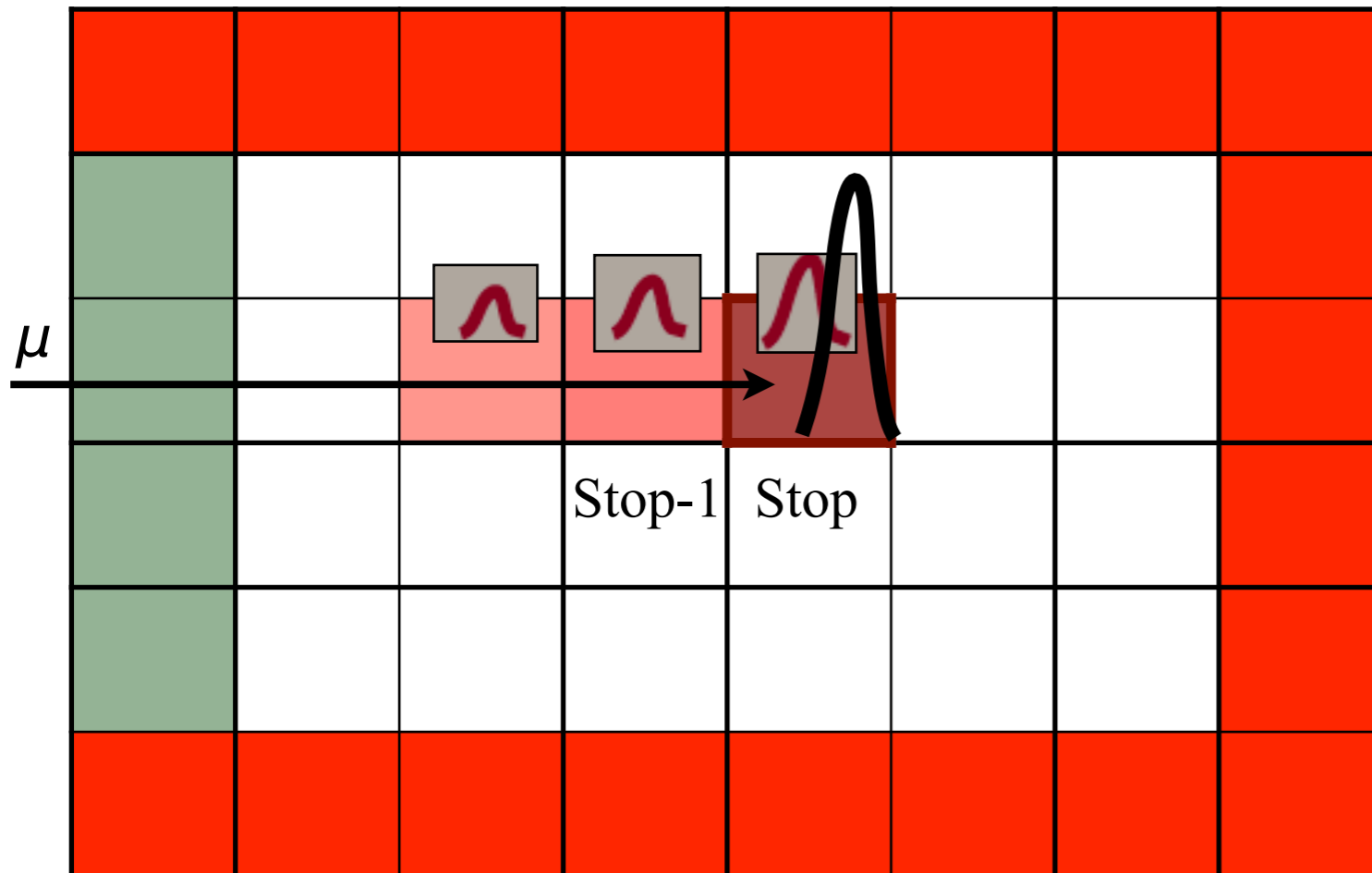
Fiducial volume cut  
 Stop-1:  $E_1$   
 Stop:  $E_0$  first signal



$$SE = E_0 + 2E_1$$

$$1.6 \text{ MeV} < SE < 2.2 \text{ MeV}$$

# Event selection. Second signal on stop pad



Fiducial volume cut

Stop-1:  $E_1$

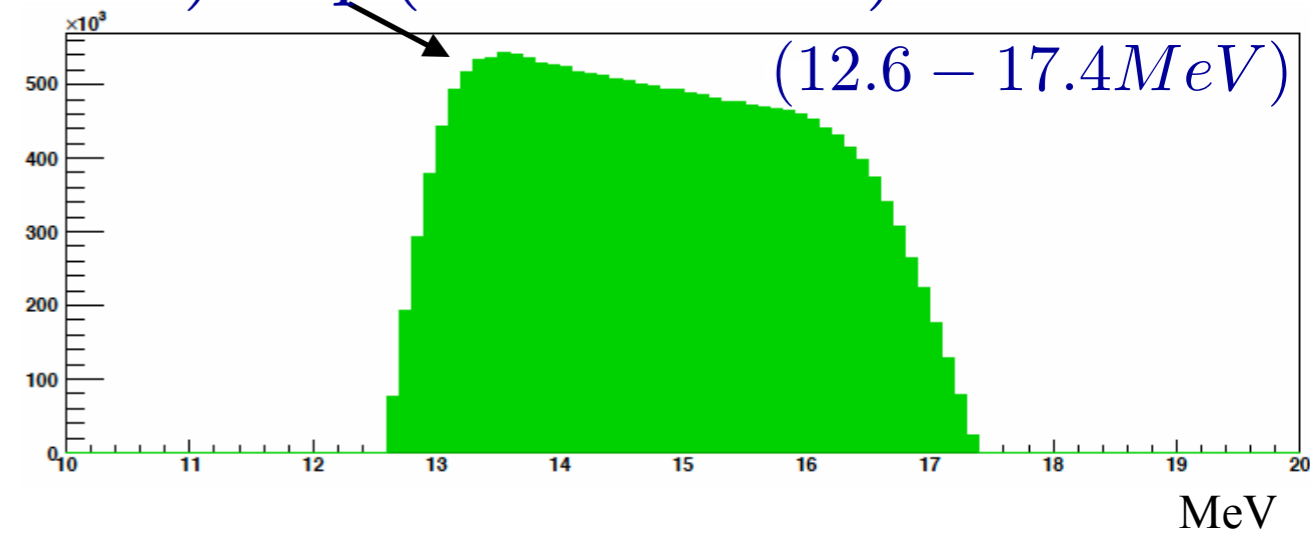
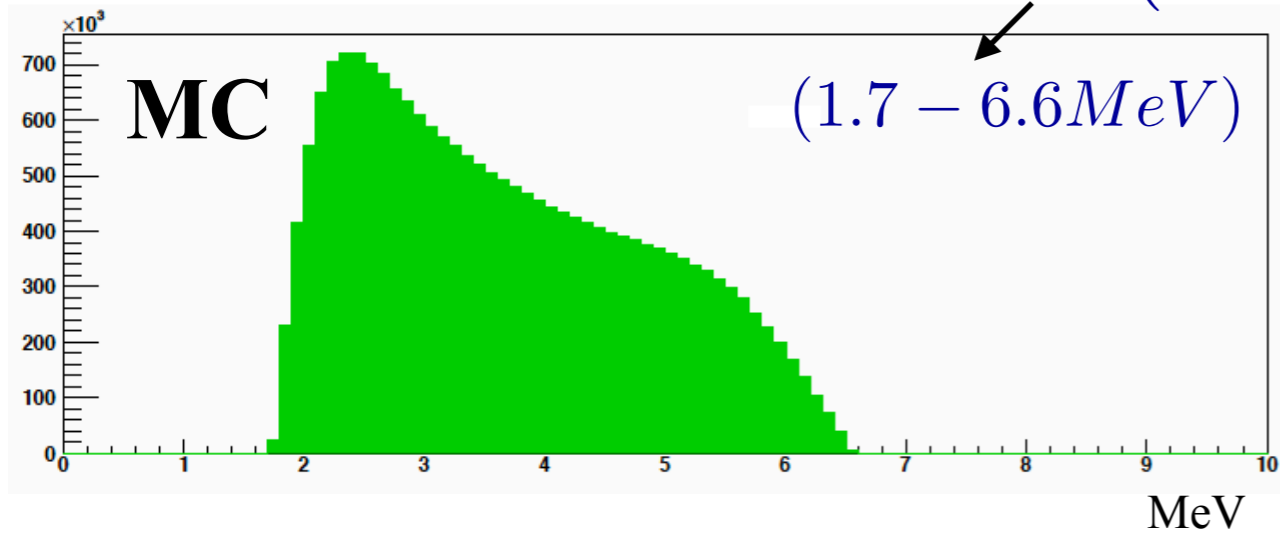
Stop:  $E_0$  first signal

$E_s$  second signal

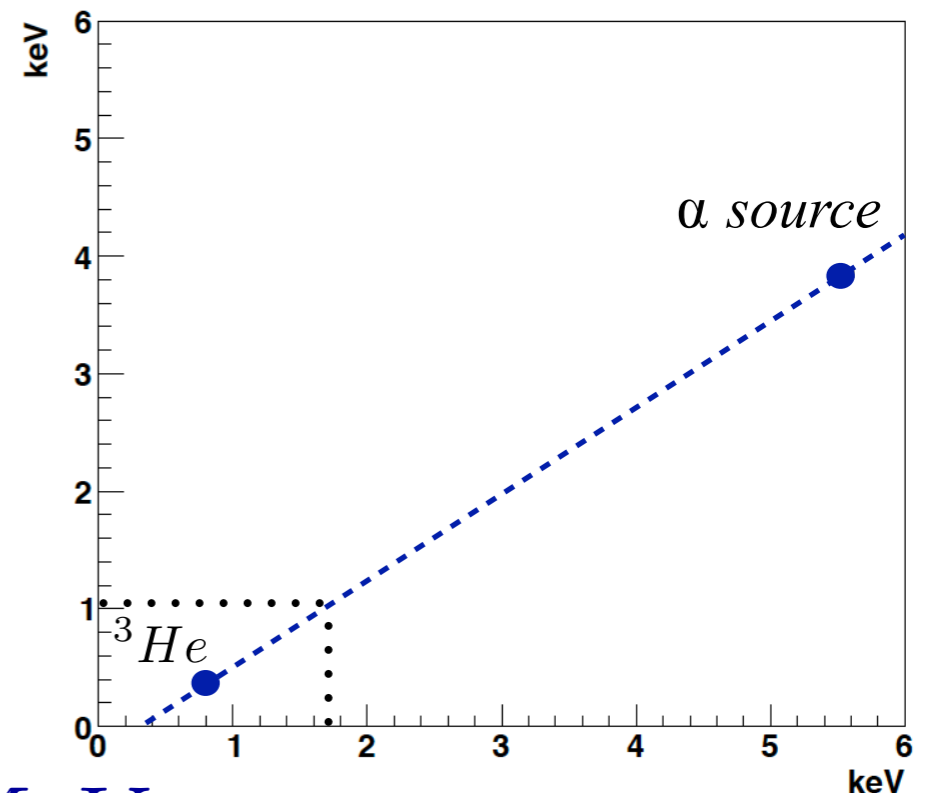
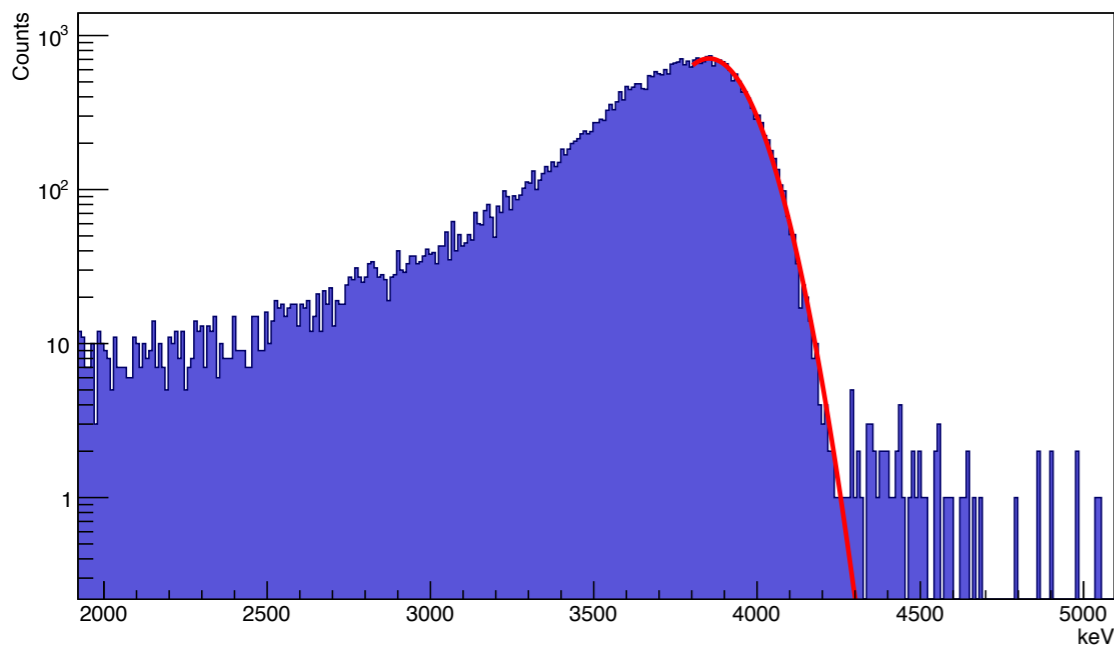


# Event selection. Second signal on stop pad

$(0 - 0.82\text{MeV})$

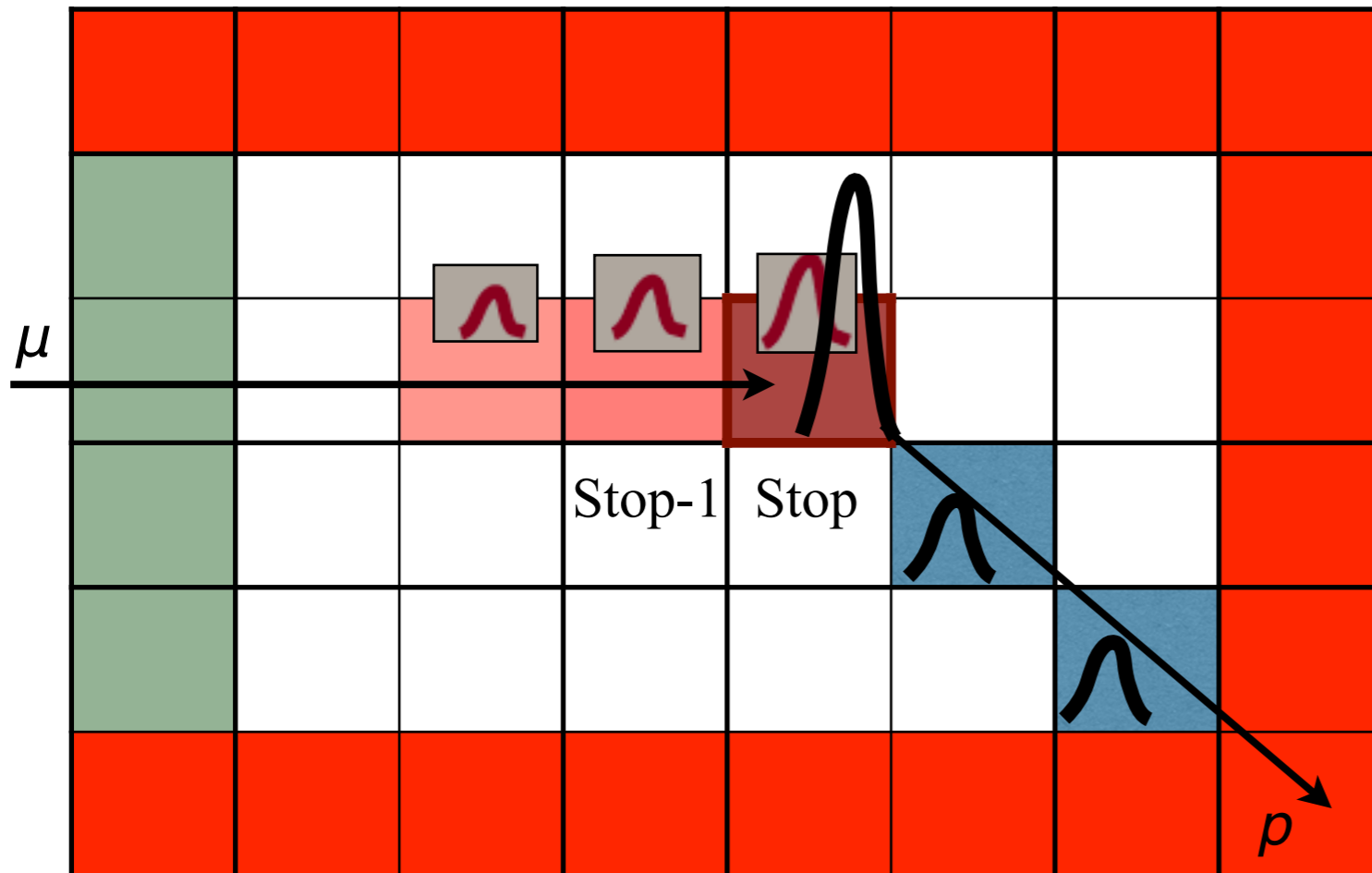


$\alpha$  source ( $E=5.5\text{MeV}$ )



$$E_s > 1.2\text{MeV}$$

# Event selection. Proton



Fiducial volume cut

Stop-1:  $E_1$

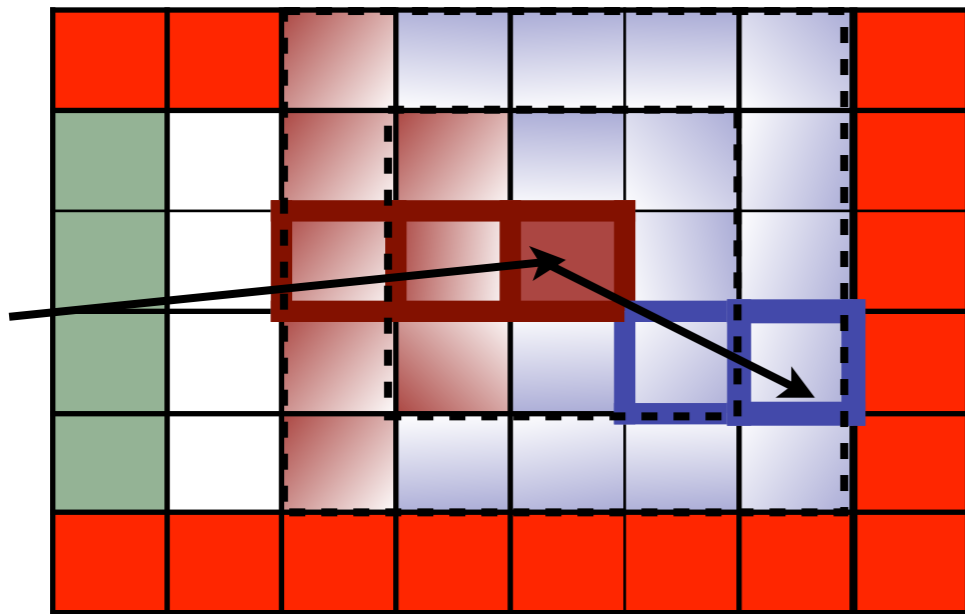
Stop:  $E_0$  first signal  
 $E_s$  second signal

1 pad after Stop:  $E_{p1}$

2 pad after Stop:  $E_{p2}$

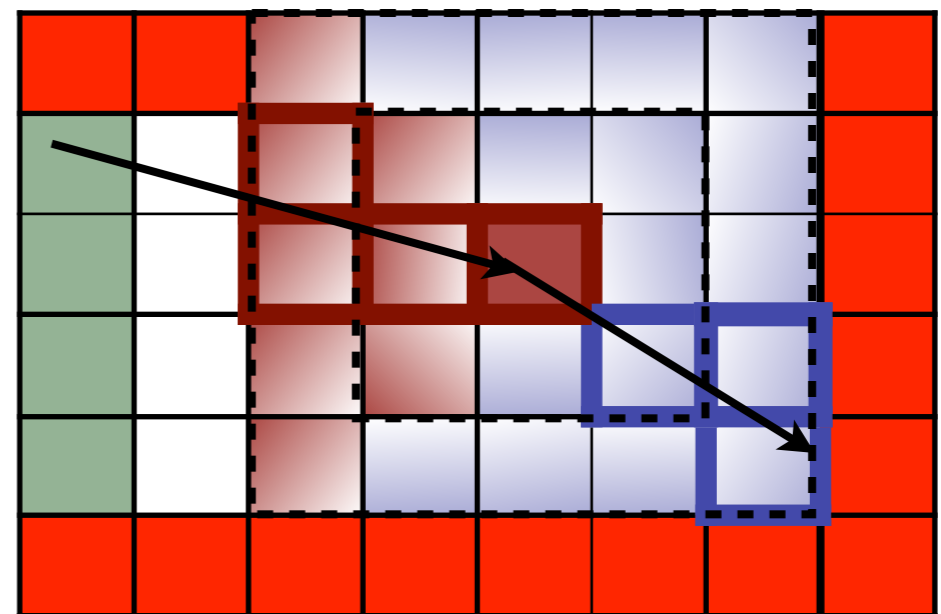


# Event selection.

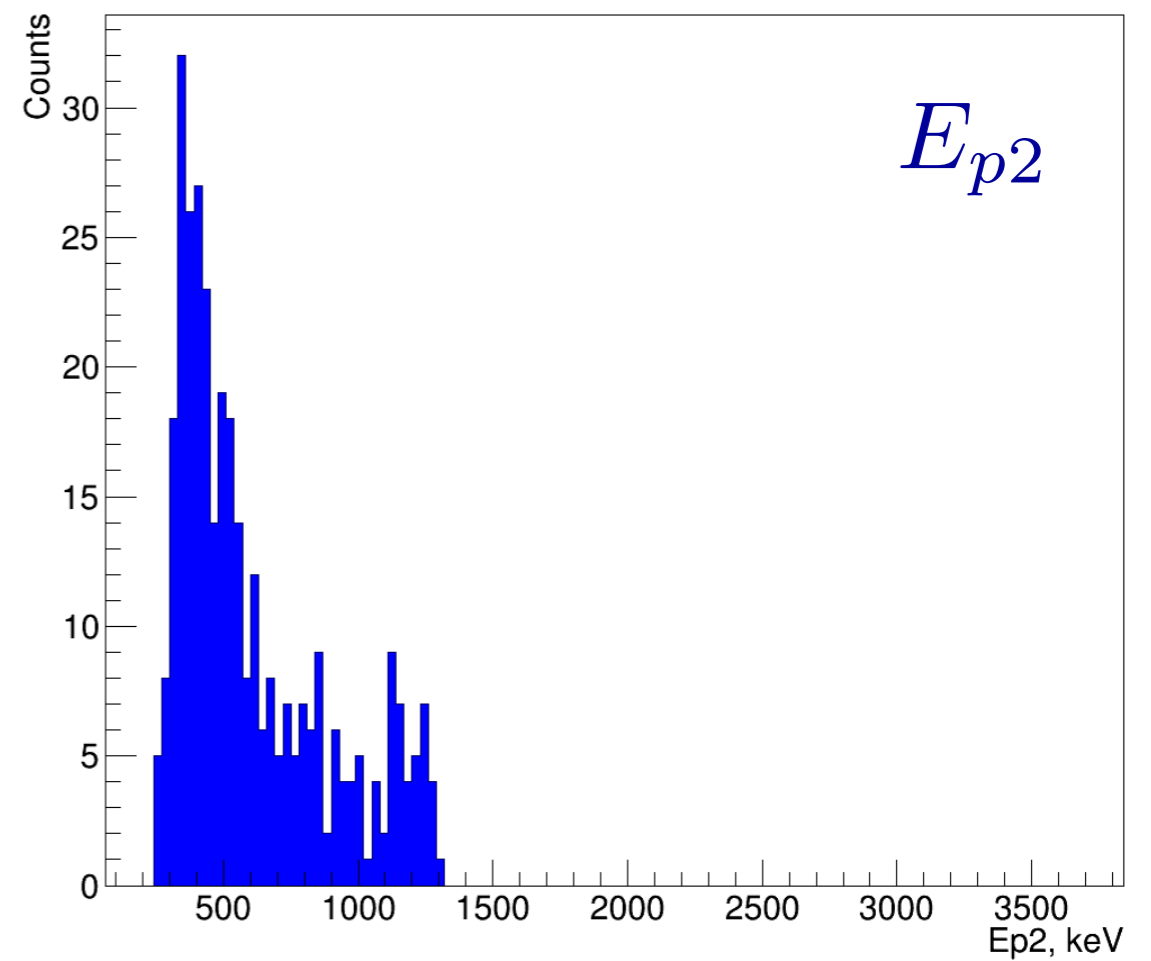
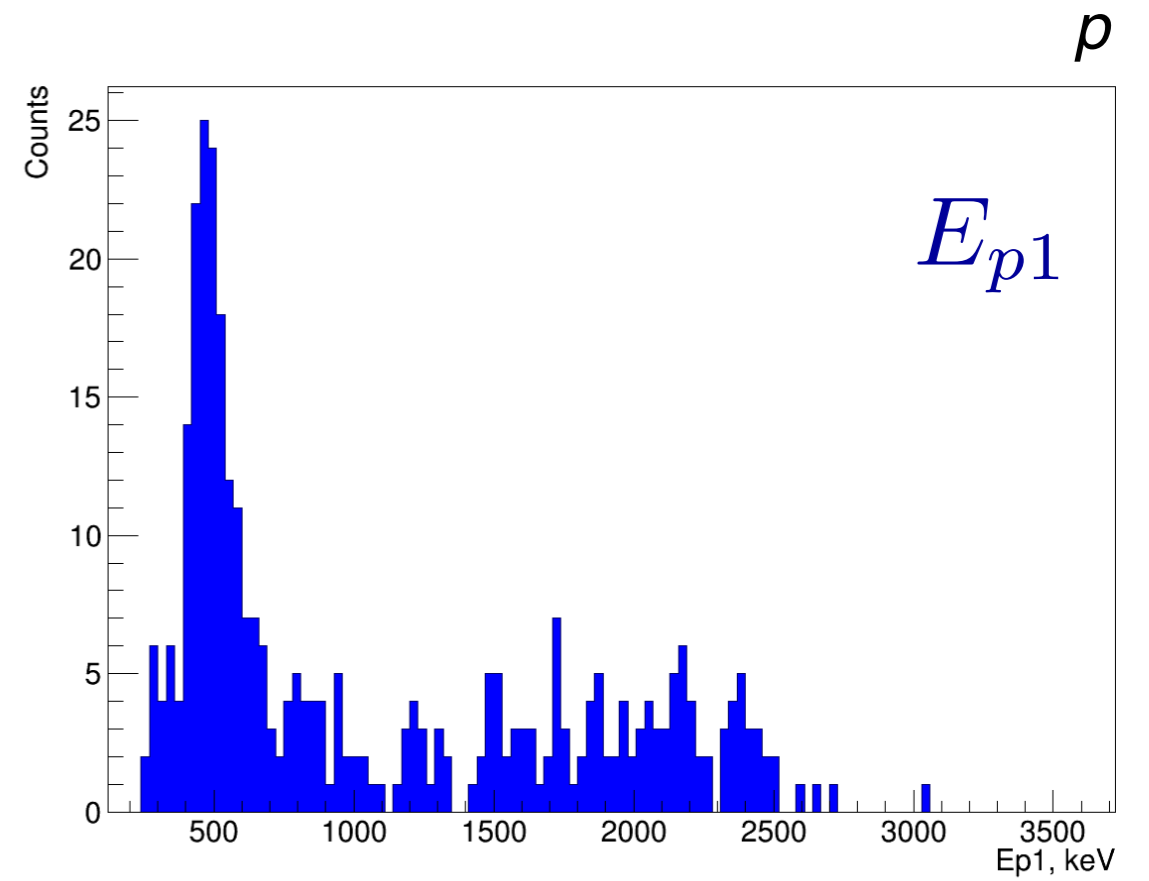
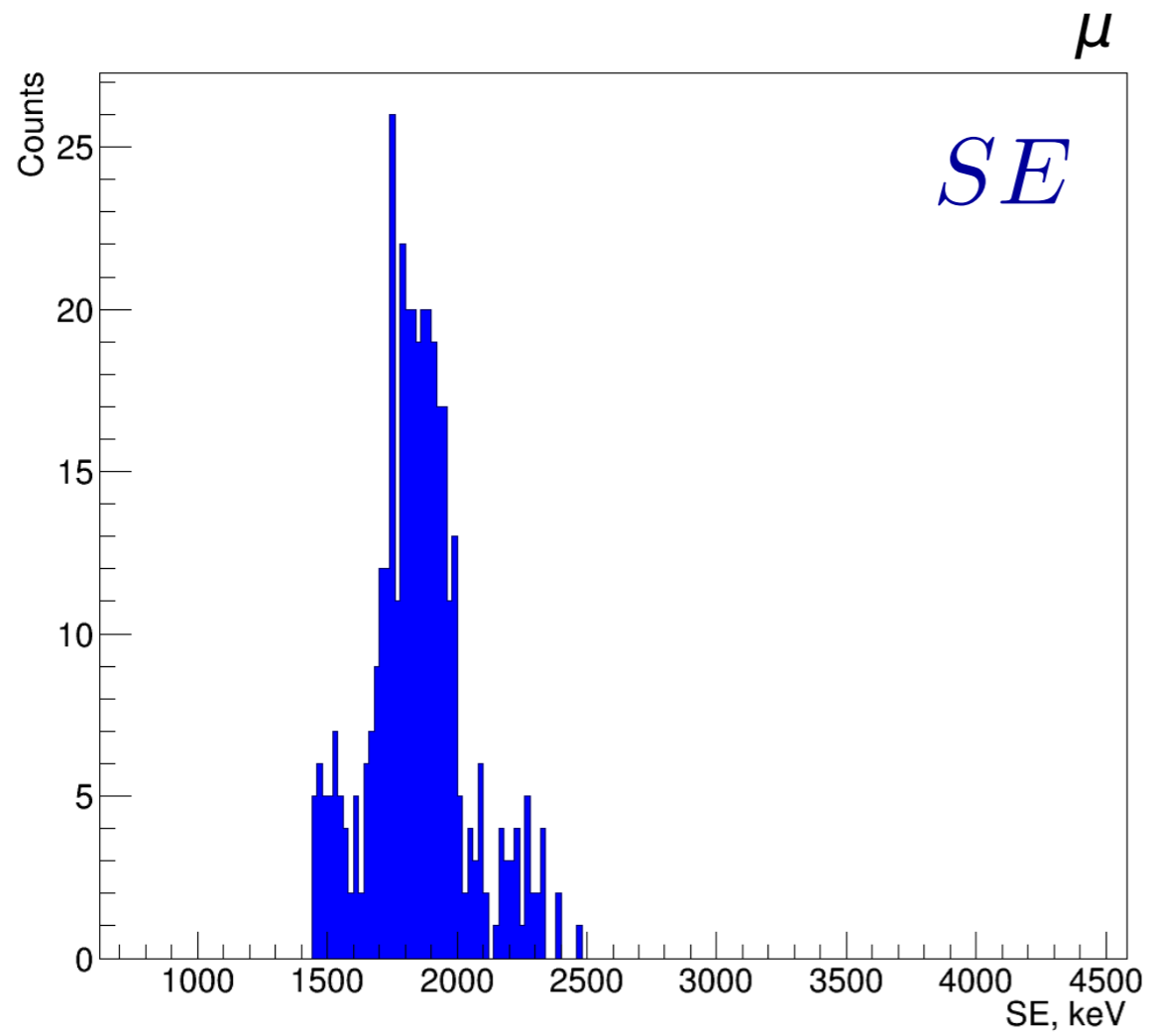


(85%)

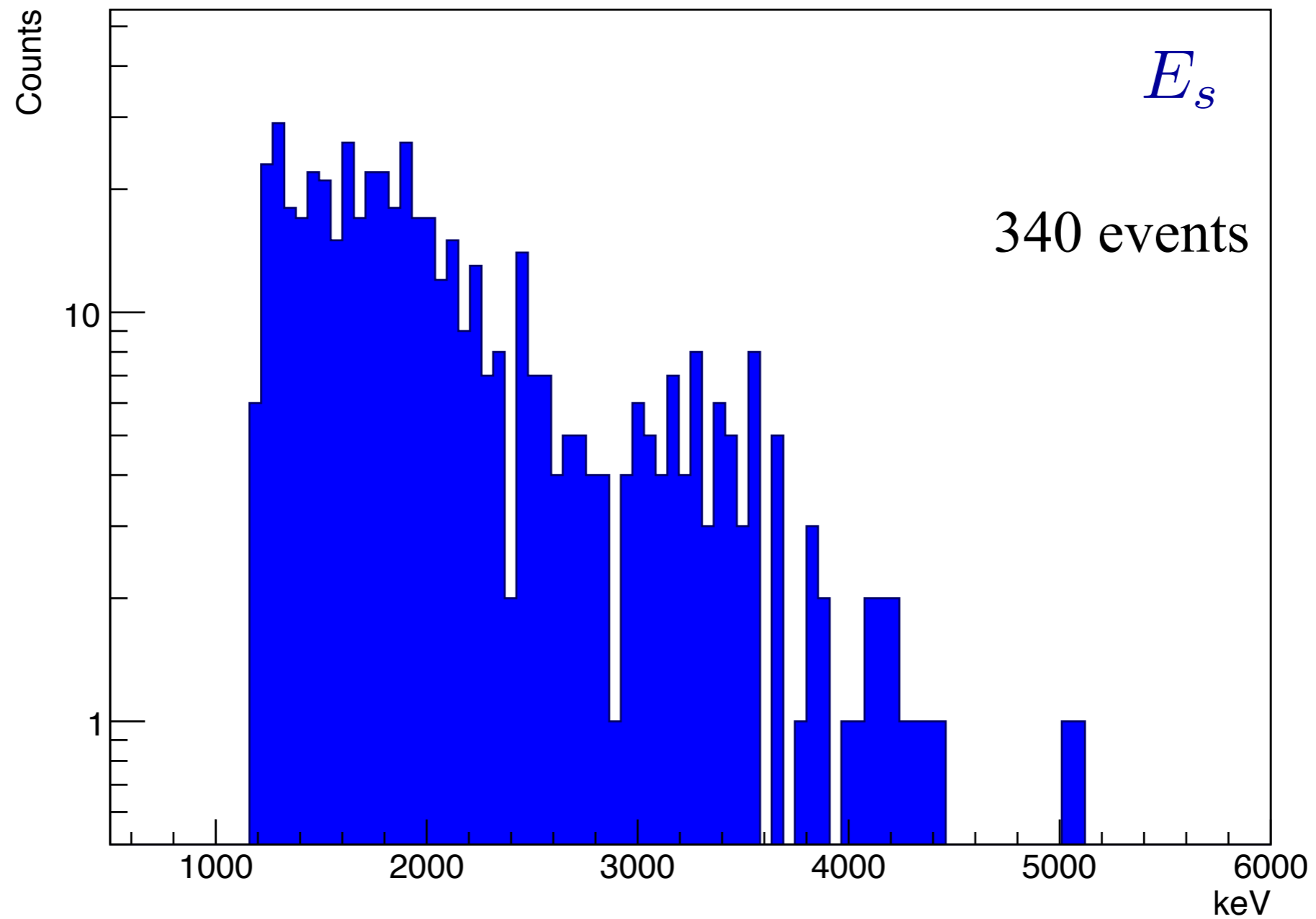
(15%)



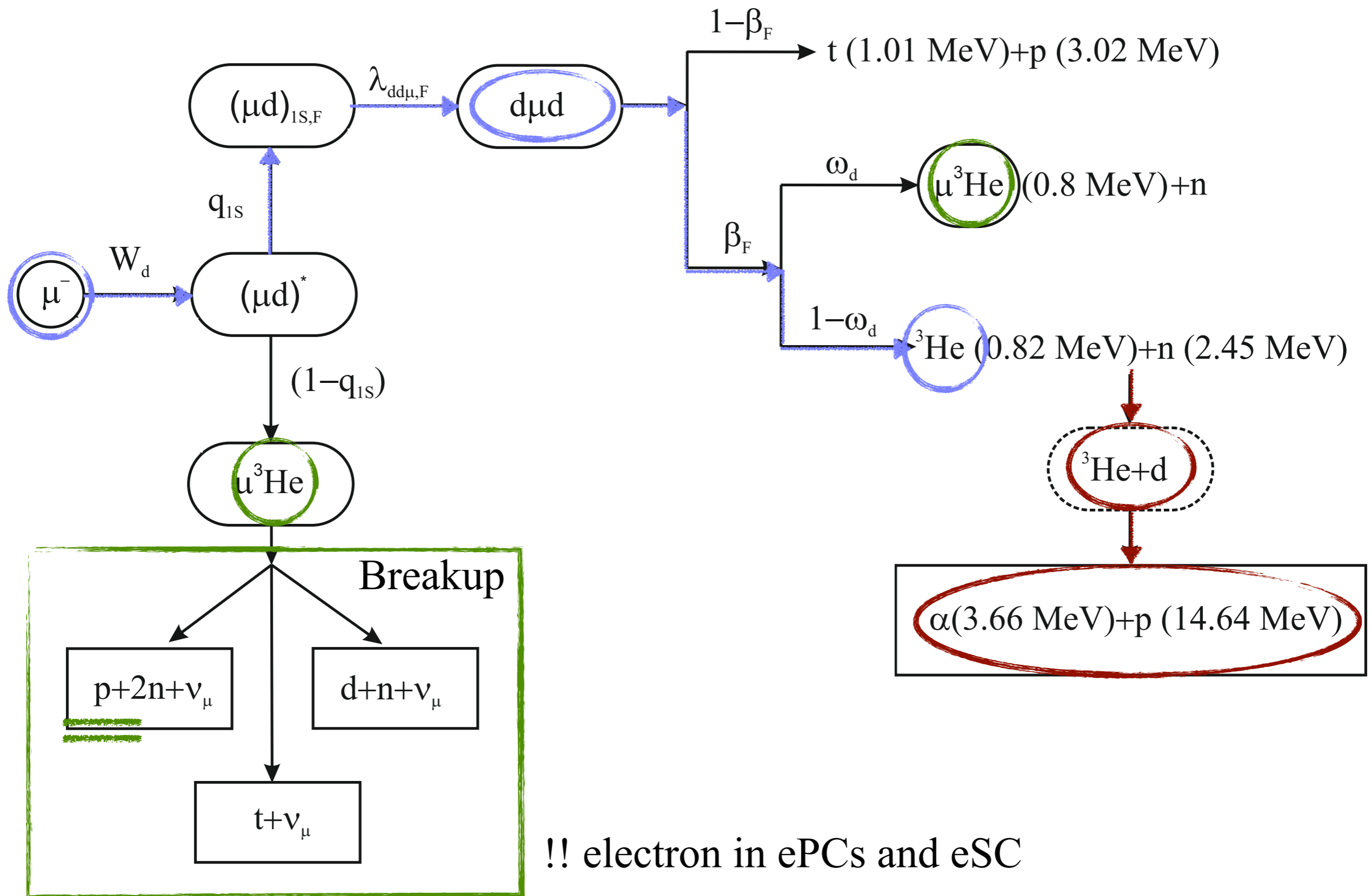
# Run8



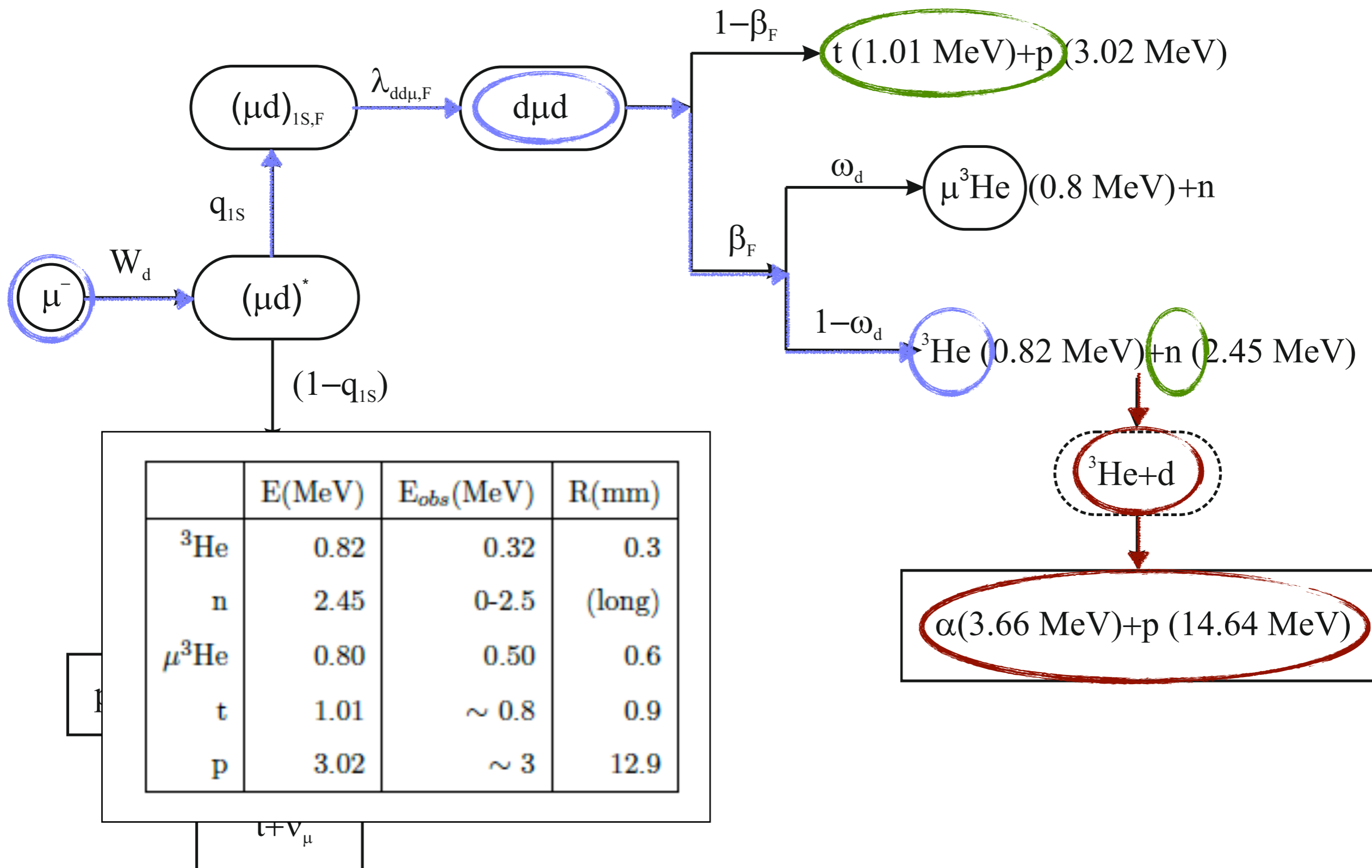
# Run 8. Fusion in the fly



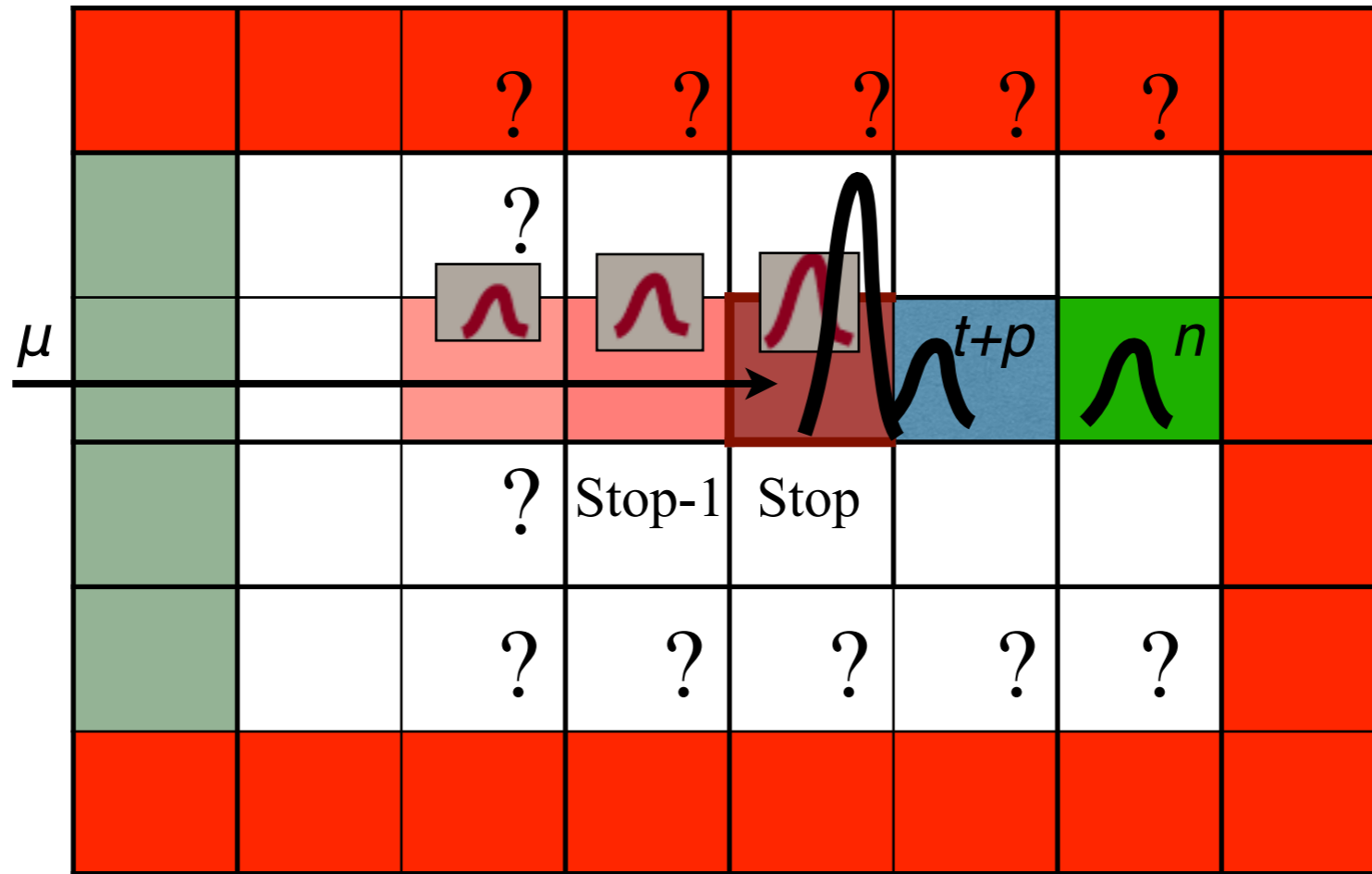
# Sources of background



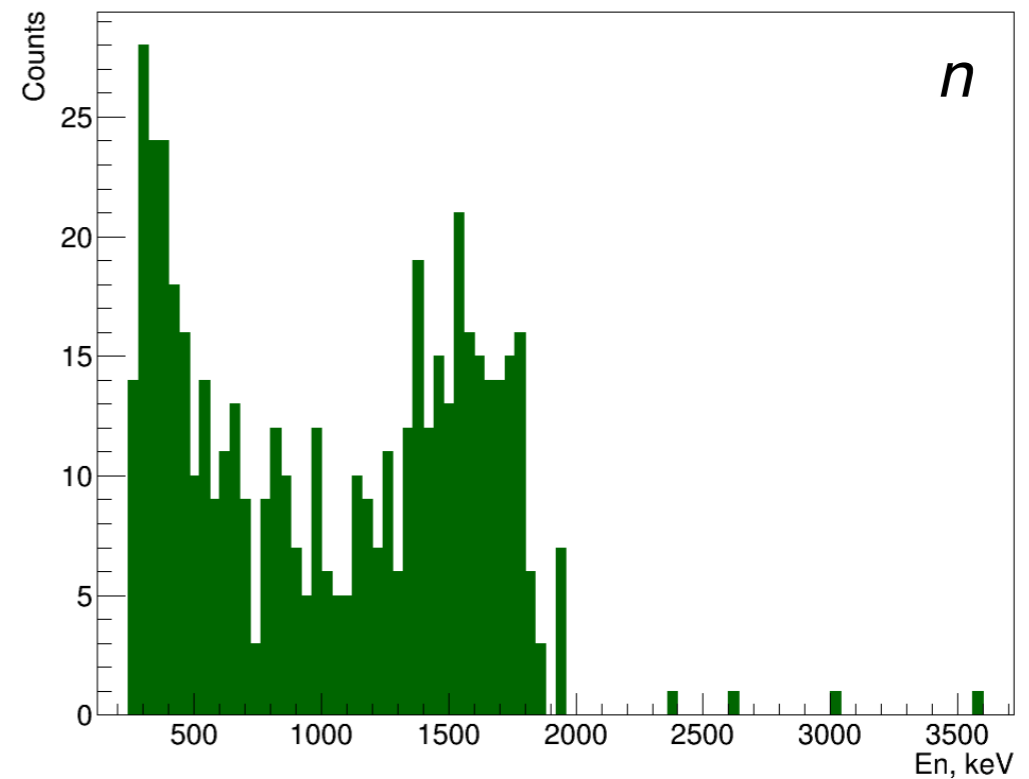
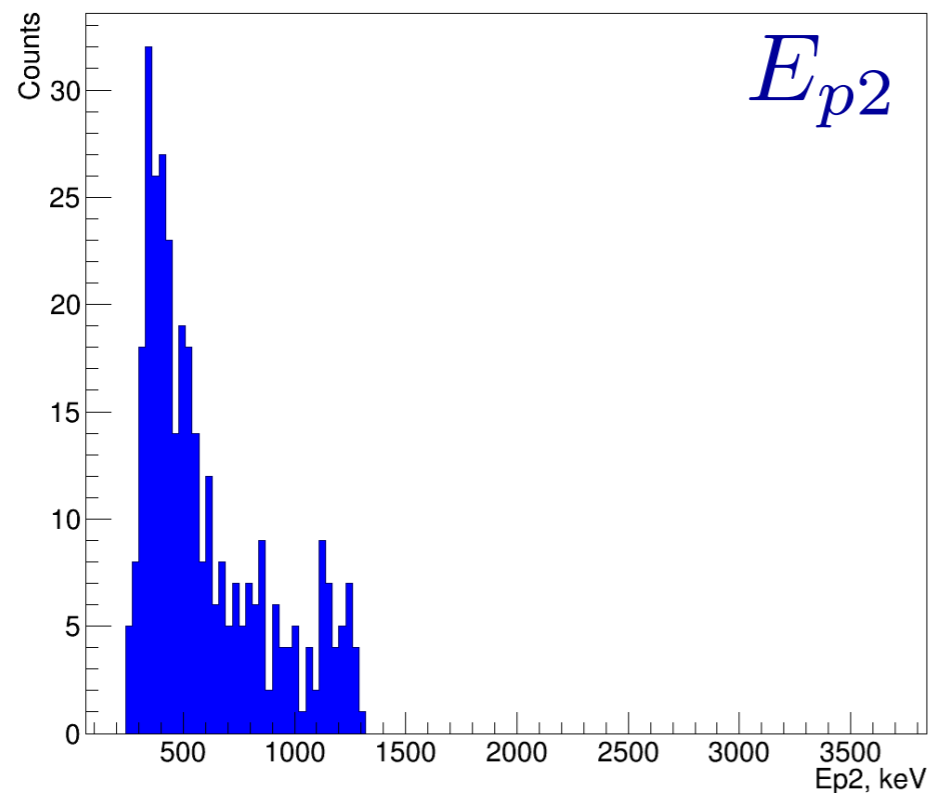
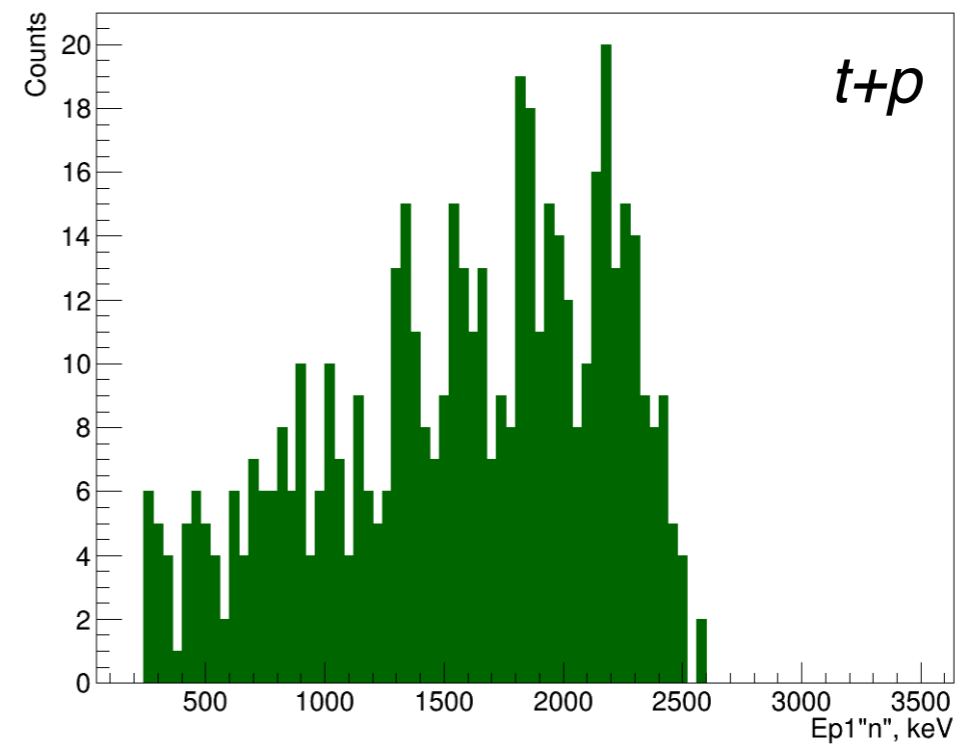
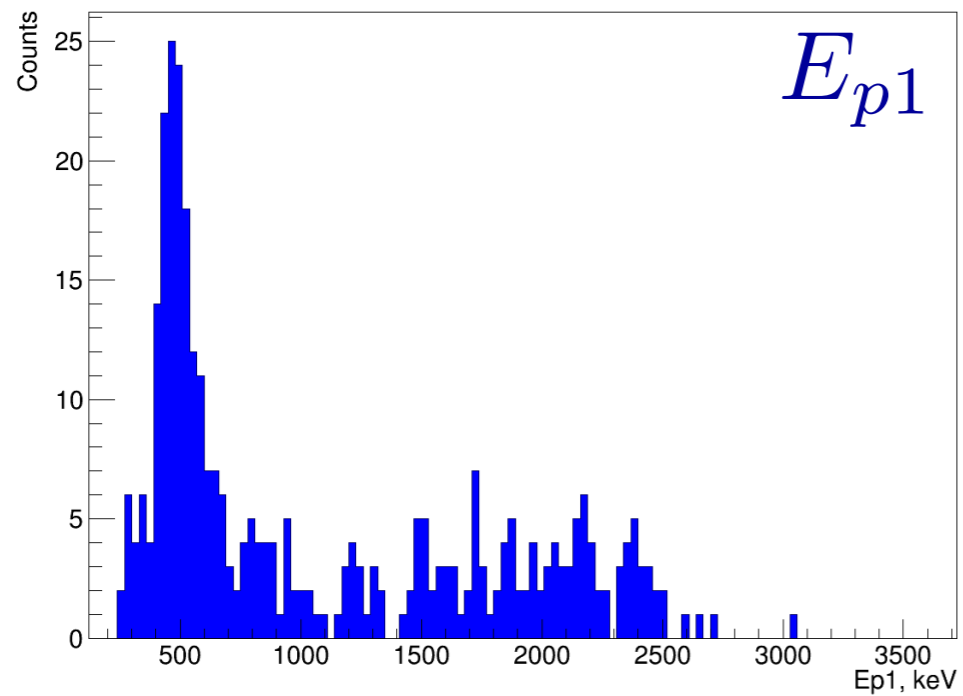
# Sources of background



# Sources of background

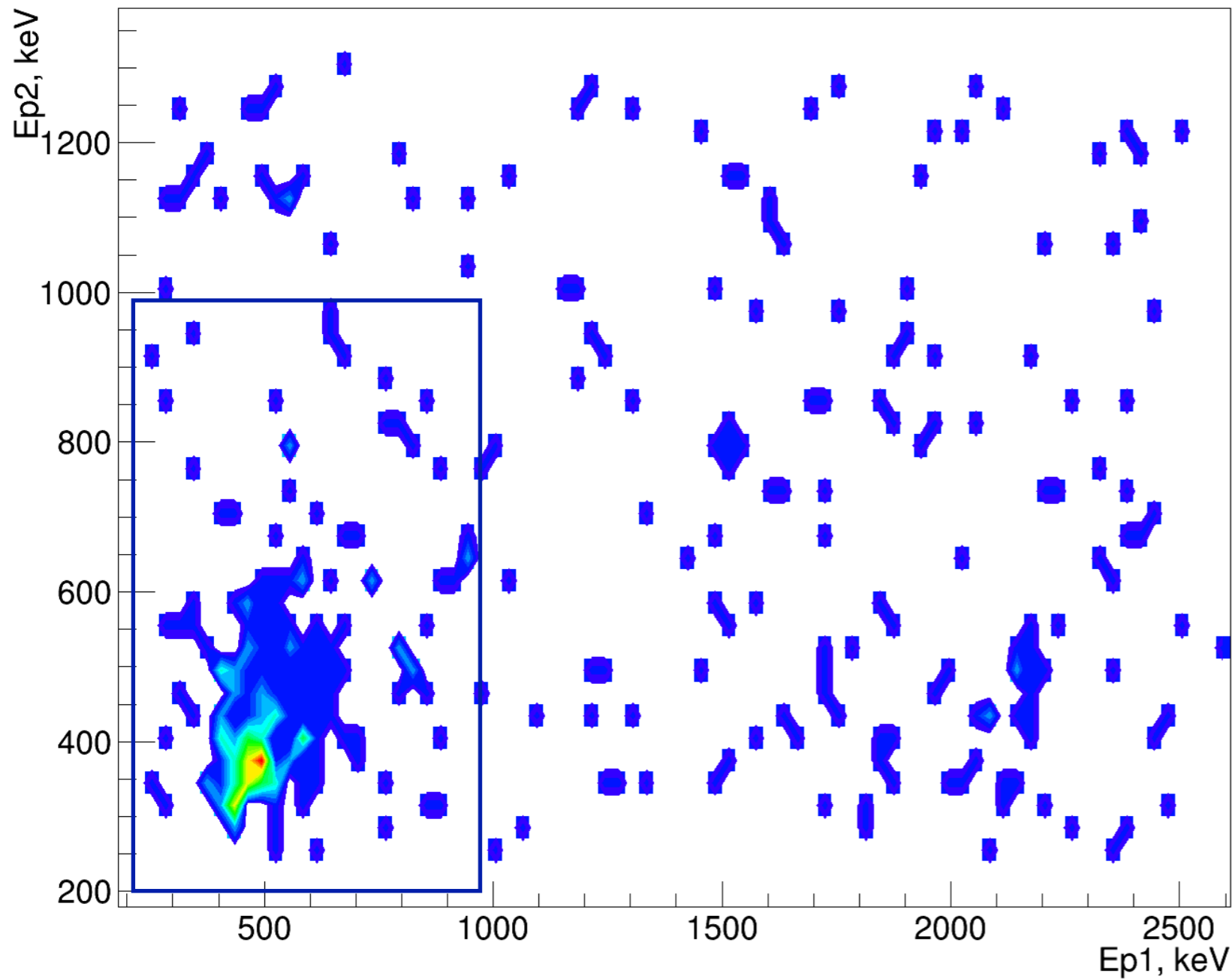


# Sources of background. Neutrons.



20% of events are from n

# Proton track.



1 pad after Stop:  $E_{p1}$   
2 pad after Stop:  $E_{p2}$

$$E_{p1}, E_{p2} < 1MeV$$

5% of events are from n

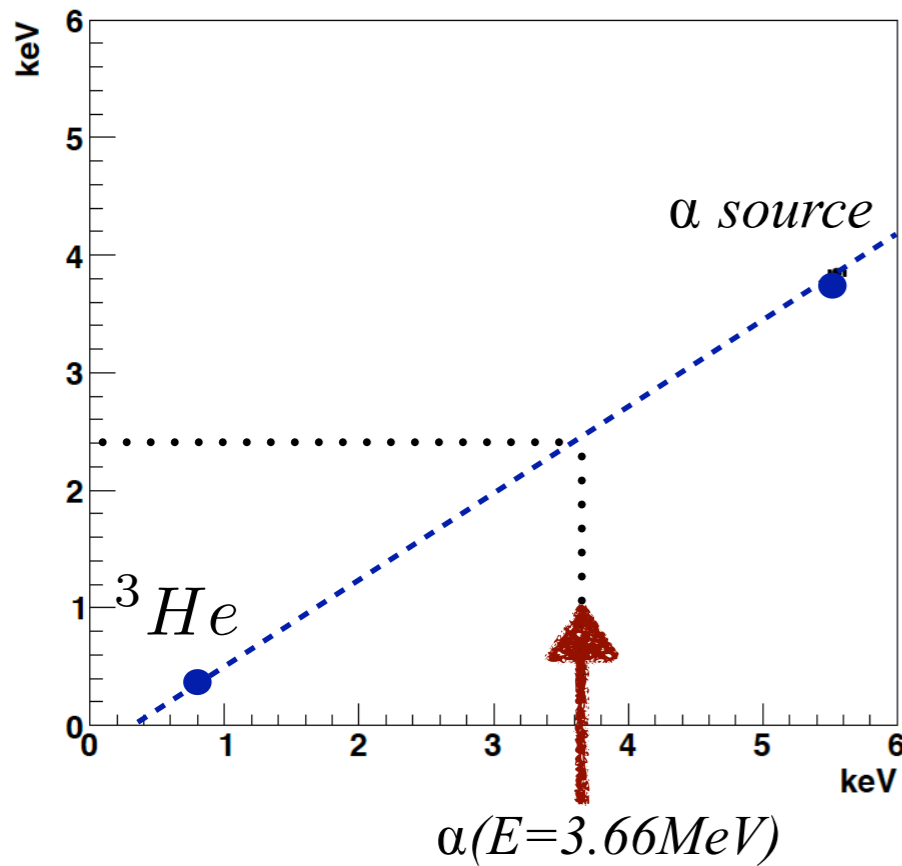
340 events



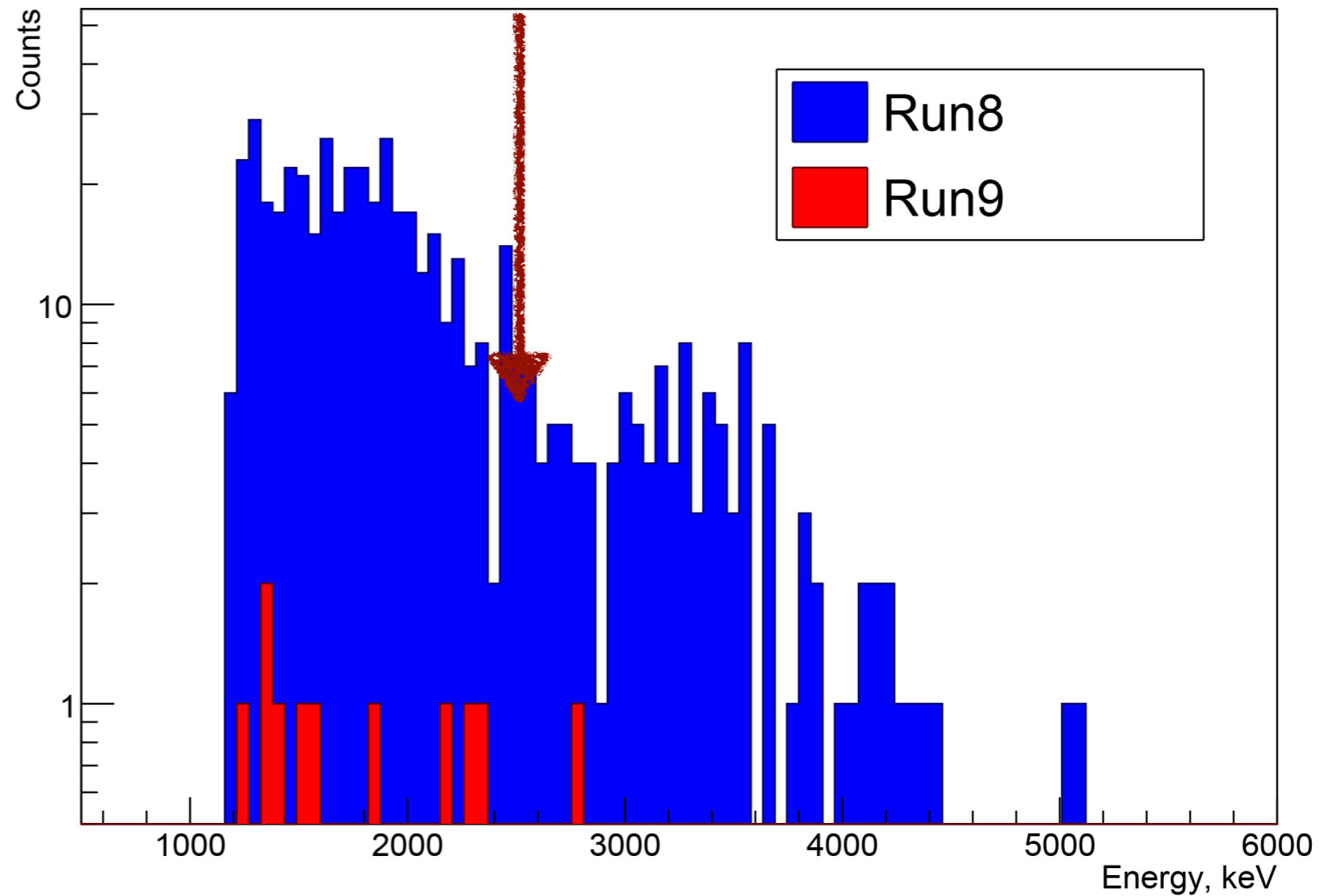
180 fusion in the fly



# Search for muon catalyzed $d^3He$ fusion



$$E_s \sim 2.5 MeV$$



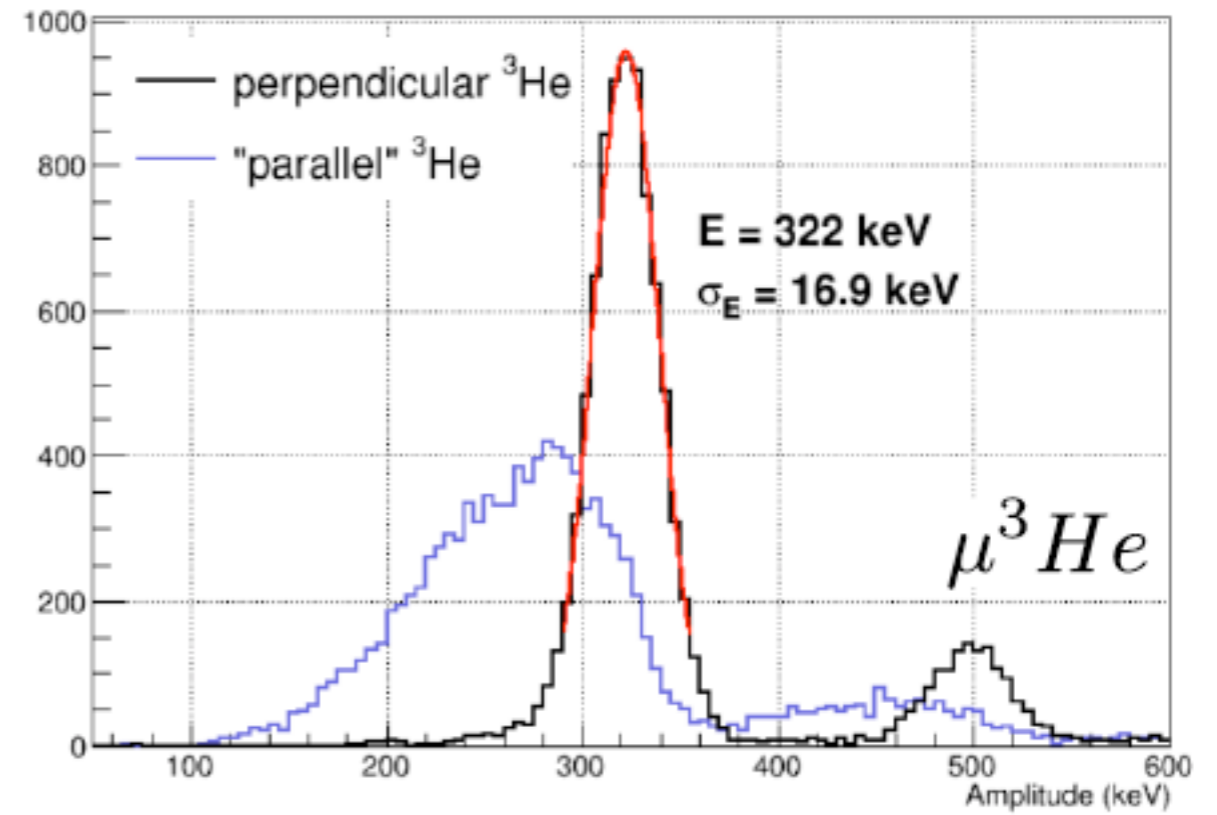
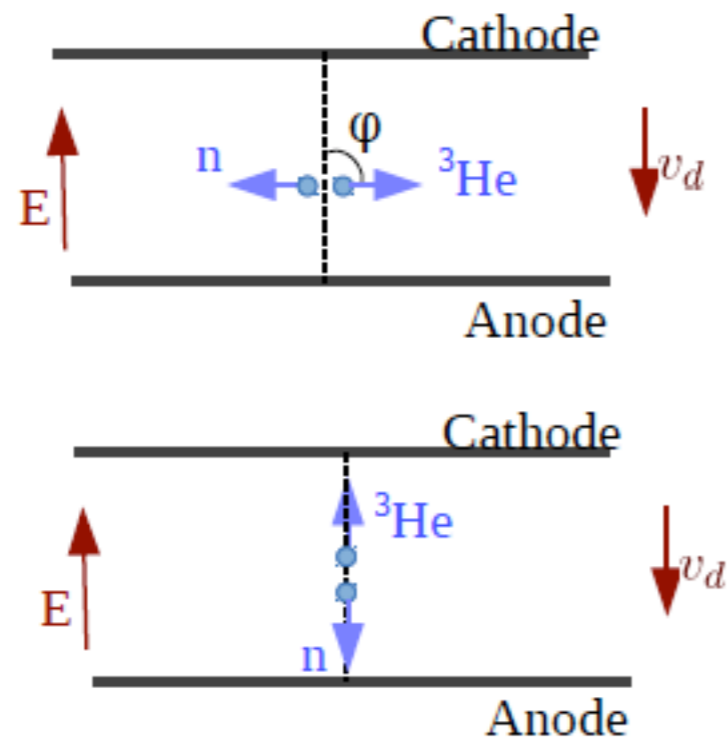
**PNPI-PSI-TUM-UCLB collaboration (HD+ $^3He$ (5.6%):**  
 $\lambda_f(\text{eff}) < 6 \cdot 10^4 s^{-1}$

$$\lambda_f < 7 \cdot 10^4 s^{-1}$$

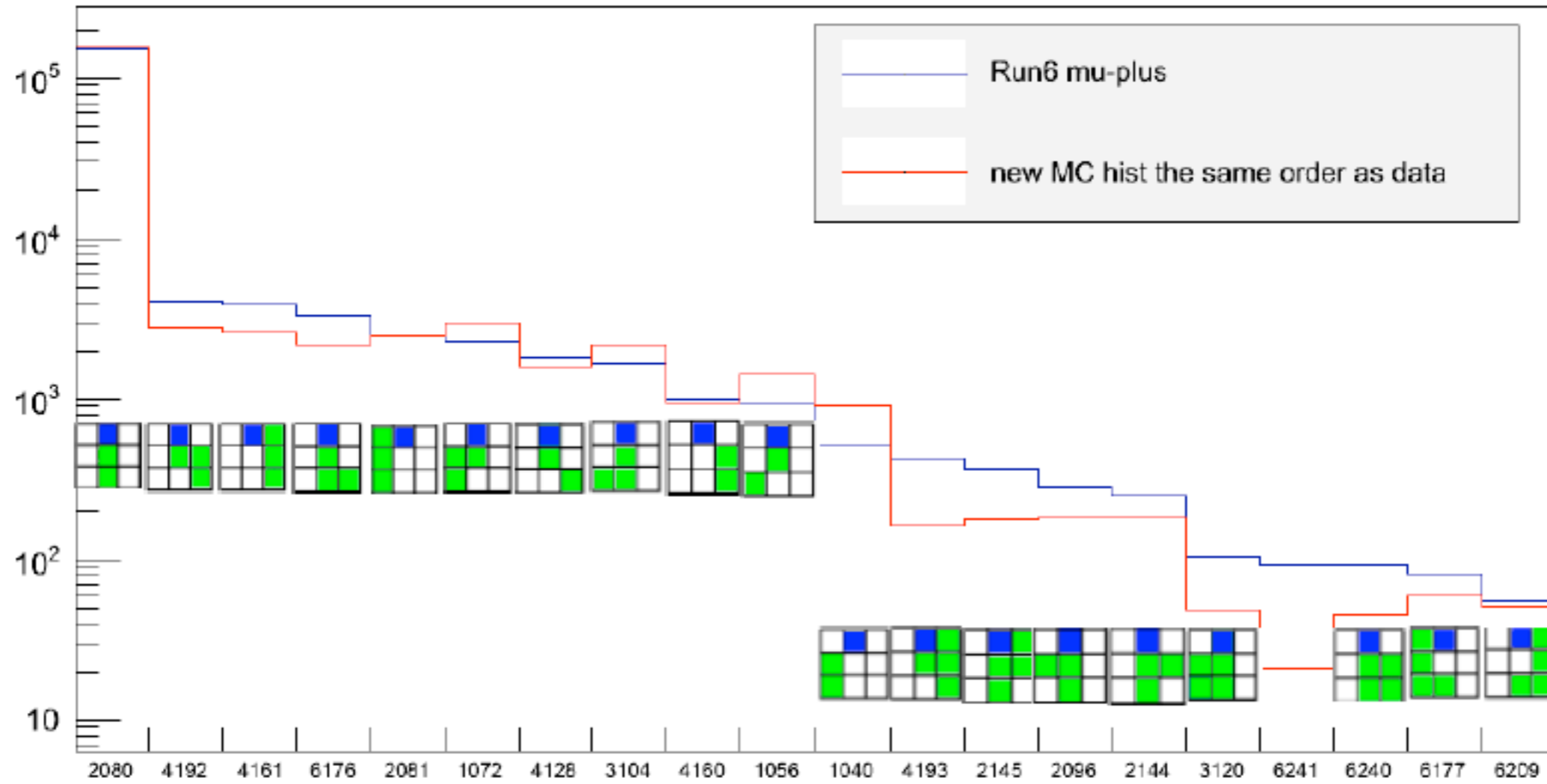
run	N( $^3He$ )	N( $^4He$ )
Run8(D2)	1.28E+07	340
Run9(D2+ $^3He$ )	3.34E+05	10

Obtain 15 keV energy resolution in the TPC

But observe long tail on the low energy side of  ${}^3\text{He}$



# hTPCTOTRoadTrackFidVolIPadPatternHash



# TPC Fiducial Volume

- Drift times between 2 $\mu$ s and 12 $\mu$ s (10mm and 61mm) are the fiducial volume Y-cut
- This cut is much easier to scan, since our resolution is better.

