



## Изучение реакций синтеза легких ядер

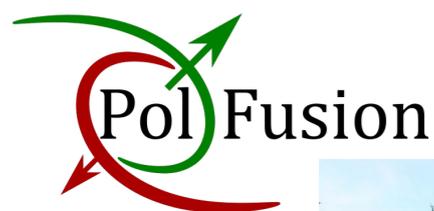
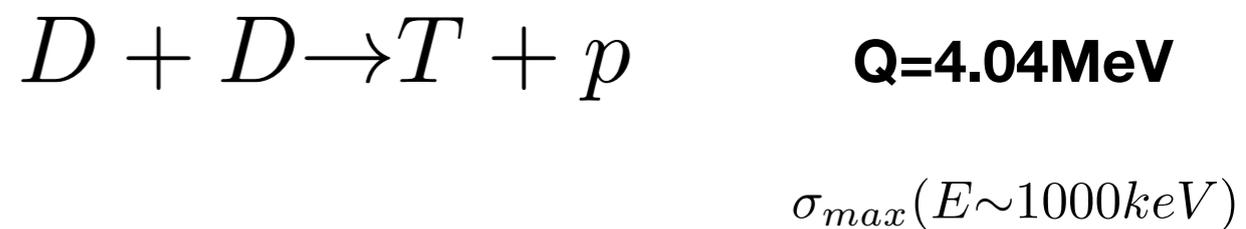
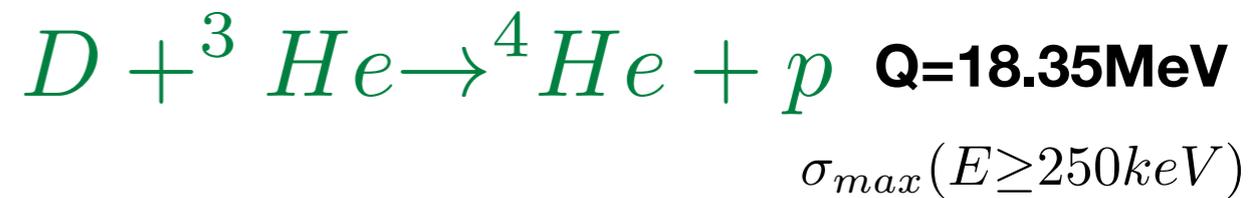
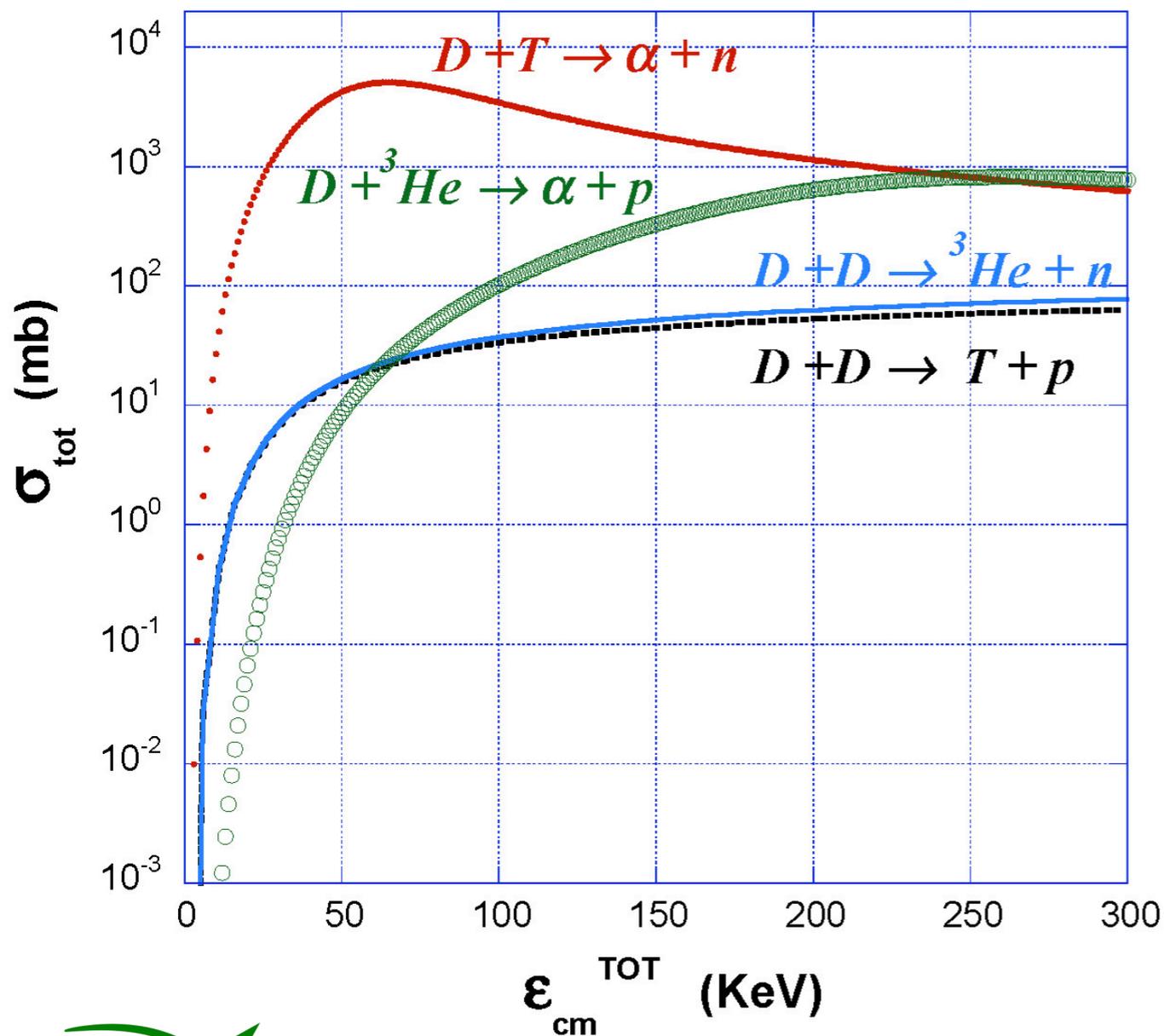
# Поиск мюонного катализа ядерного $d^3He$ синтеза



П. Кравченко



# Мотивация



ЛКСТ, ПИЯФ



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



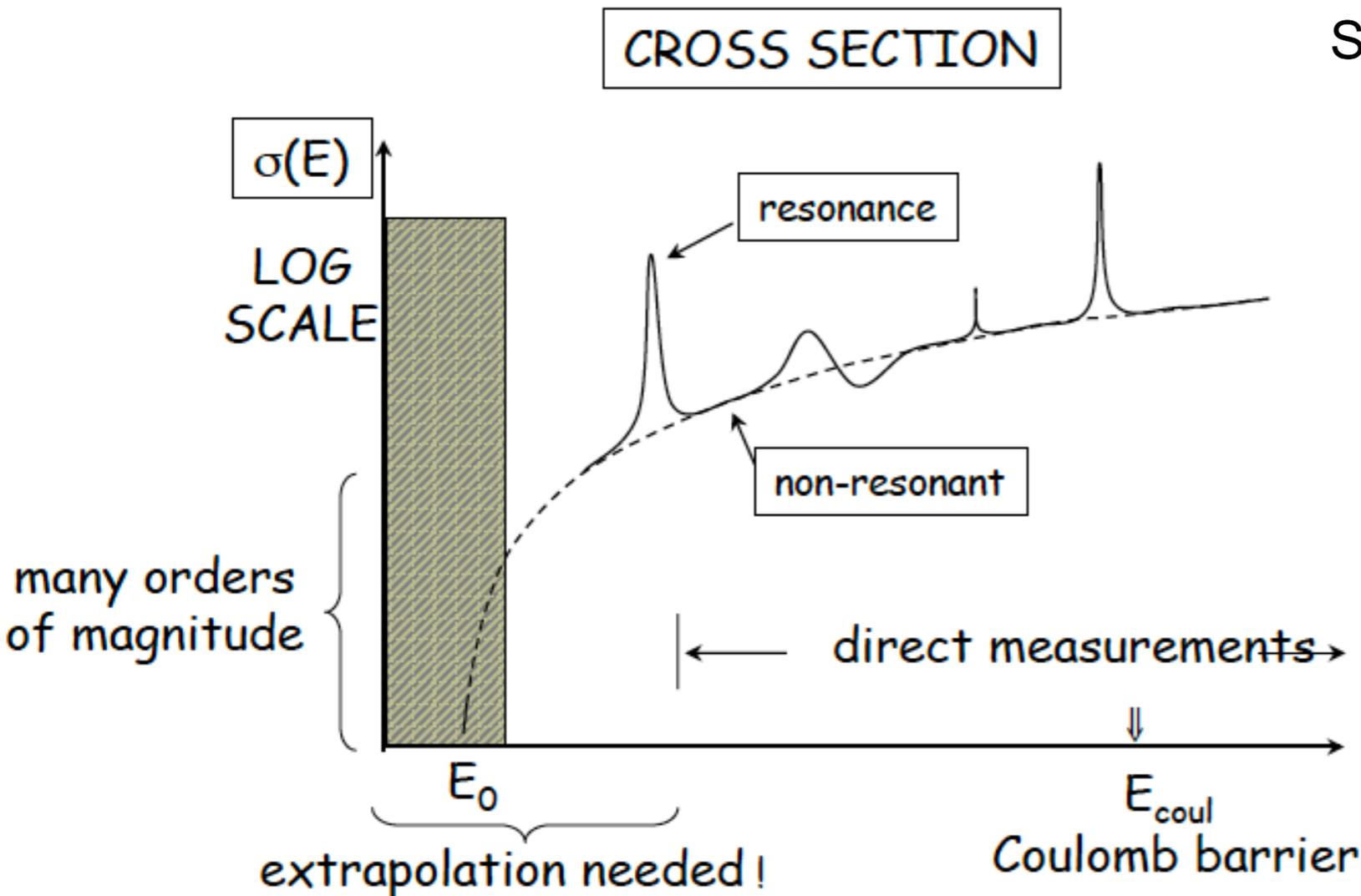
Космология

Теория ядерного взаимодействия



Специфика ядерной астрофизики. Сечение в области низких энергий

Требуется **экстраполяция** данных в область низких энергий

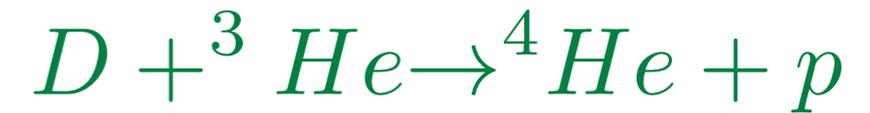


$S(E)$  плавная, медленно меняющаяся функция, зависящая от энергии, содержащая все ядерные эффекты

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp(-2\pi\eta)$$

Астрофизический  $S(E)$ -фактор легче экстраполировать в 0

Космология



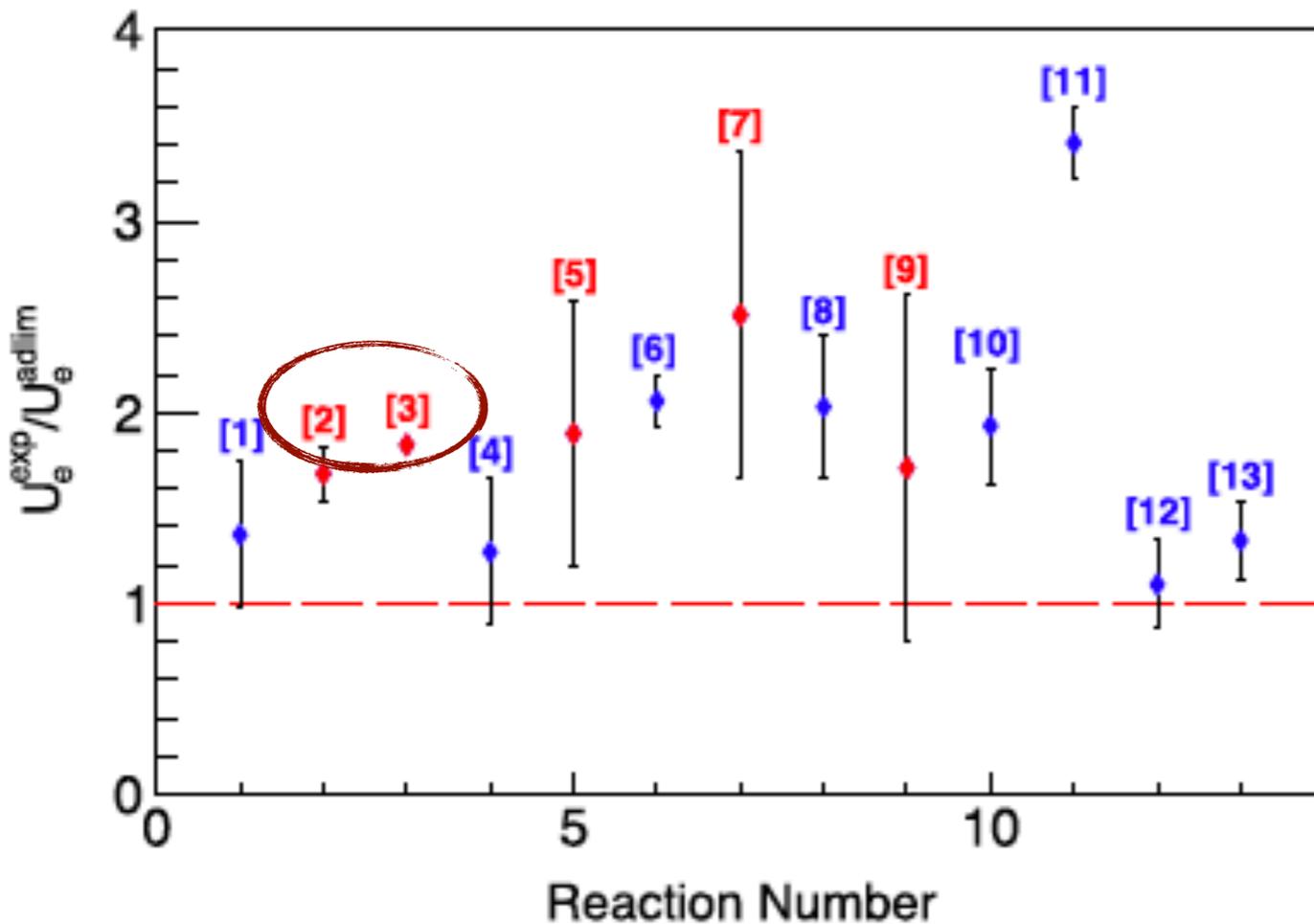
Теория ядерного взаимодействия

Электронный экранирующий потенциал  $U_e$

Измерения астрофизического  $S(E)$  фактора при низких энергиях демонстрируют **увеличение сечения** связанное с эффектом электронной экранировки

$$\frac{\sigma_s(E)}{\sigma_b(E)} = \frac{S_s(E)}{S_b(E)} \frac{E}{(E + U_e)} \exp(\pi\eta U_e/E)$$

The experimental values of the electron screening potentials,  $U_e^{\text{exp}}$ , and theoretical adiabatic limits,  $U_e^{\text{adlim}}$ .



Reaction	$U_e^{\text{adlim}}$ (eV)	$U_e^{\text{exp}}$ (eV)	Note	Ref.
[1] ${}^2\text{H}(d, t){}^1\text{H}$	14	$19.1 \pm 3.4$		[16,17]
[2] ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$	65	$109 \pm 9$	D <sub>2</sub> gas target	[18]
[3] ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$	120	$219 \pm 7$		[18]
[4] ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$	240	$305 \pm 90$	compilation	[2]
[5] ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$	175	$330 \pm 120$	H gas target	[19]
[6] ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$	175	$330 \pm 49$		[19,20]
[7] ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$	175	$440 \pm 150$	H gas target	[19]
[8] ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$	175	$355 \pm 67$		[19,21,22]
[9] ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$	175	$300 \pm 160$	H gas target	[19]
[10] ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$	175	$363 \pm 52$		[19,21,23]
[11] ${}^9\text{Be}(p, \alpha_0){}^6\text{Li}$	240	$788 \pm 70$		[24,25]
[12] ${}^{10}\text{B}(p, \alpha_0){}^7\text{Li}$	340	$376 \pm 75$		[26,27]
[13] ${}^{11}\text{B}(p, \alpha_0){}^8\text{Be}$	340	$447 \pm 67$		[26,28]

Результат строго зависит от выбранного набора данных и ядерной модели. Наличие резонанса играет существенную роль.

Космология

Теория ядерного взаимодействия



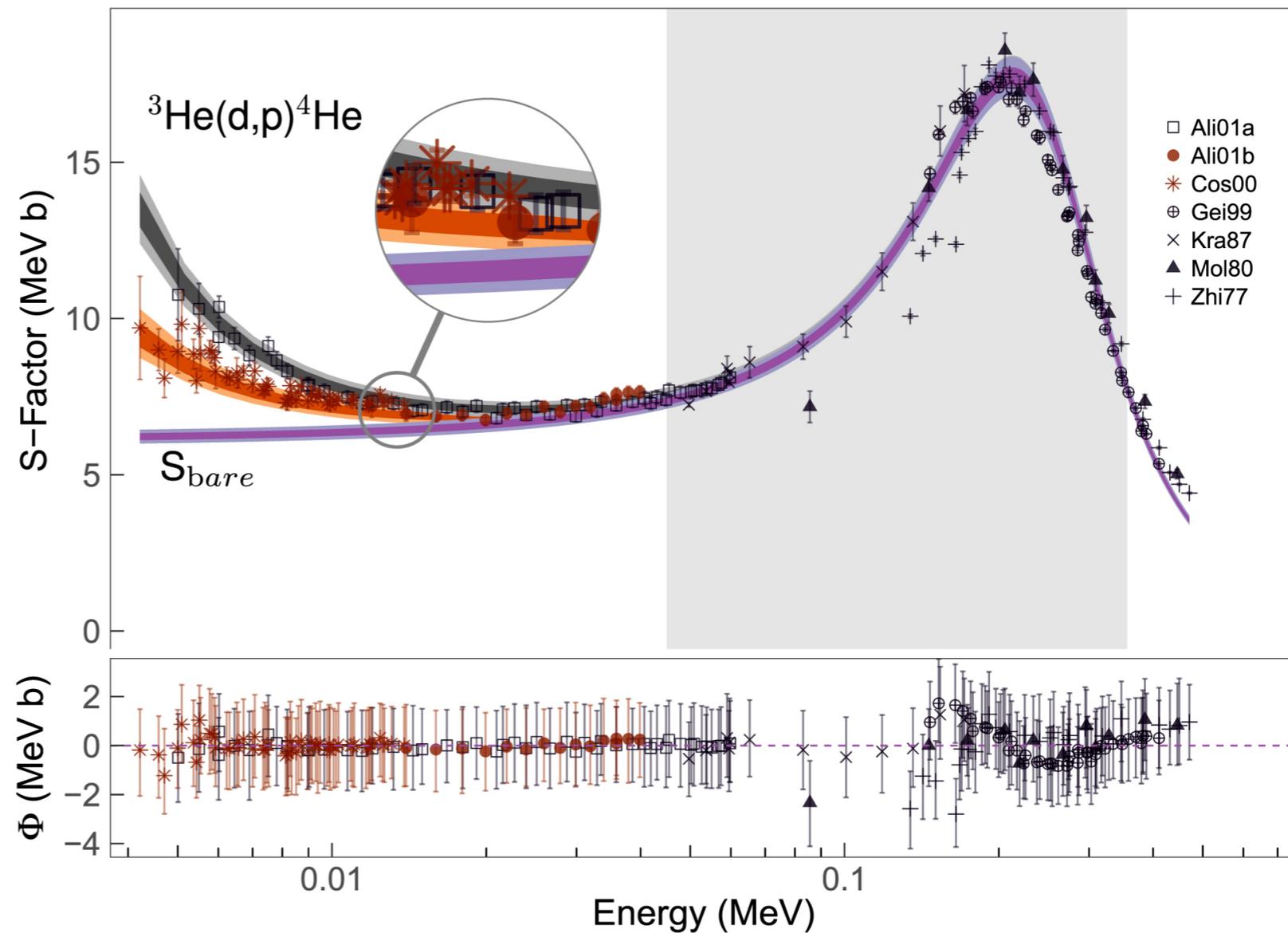
Астрофизический S(E)-фактор

R.S.de Souza, ... The Astrophysical Journal 872:75 (2019)  
*Two channel approximation of R-matrix theory*

экранирующий потенциал  
как параметр фита

экспериментальные данные

экстраполяция в область  
малых энергий



Полученный результат превышает адиабатический предел

Расхождения не объяснены

Космология

Теория ядерного взаимодействия



Астрофизический  $S(E)$ -фактор

G. Hupin, S. Quaglioni and P. Navrátil. *Suppl. Inf. Nature com.* (2019)

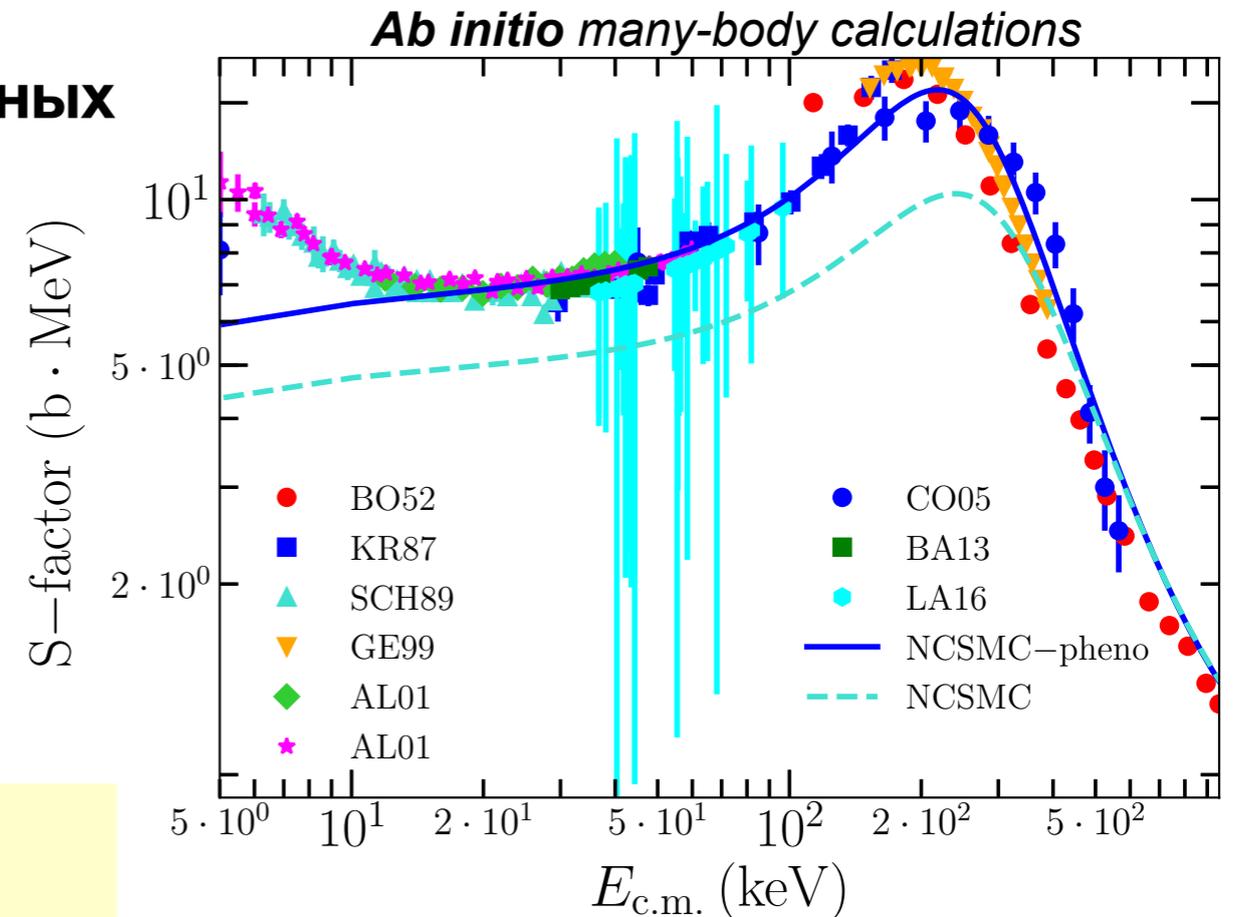
не зависит от экспериментальных данных

физические параметры  
NN-взаимодействия

Высокая чувствительность  
поведения  $S(E)$  фактора в области  
низких энергий от параметров резонанса

Трудность в определении абсолютной величины “bare” сечения

Трудность в экстраполяции измеряемого фактора в область  
энергий в связи с наличием резонансного состояния

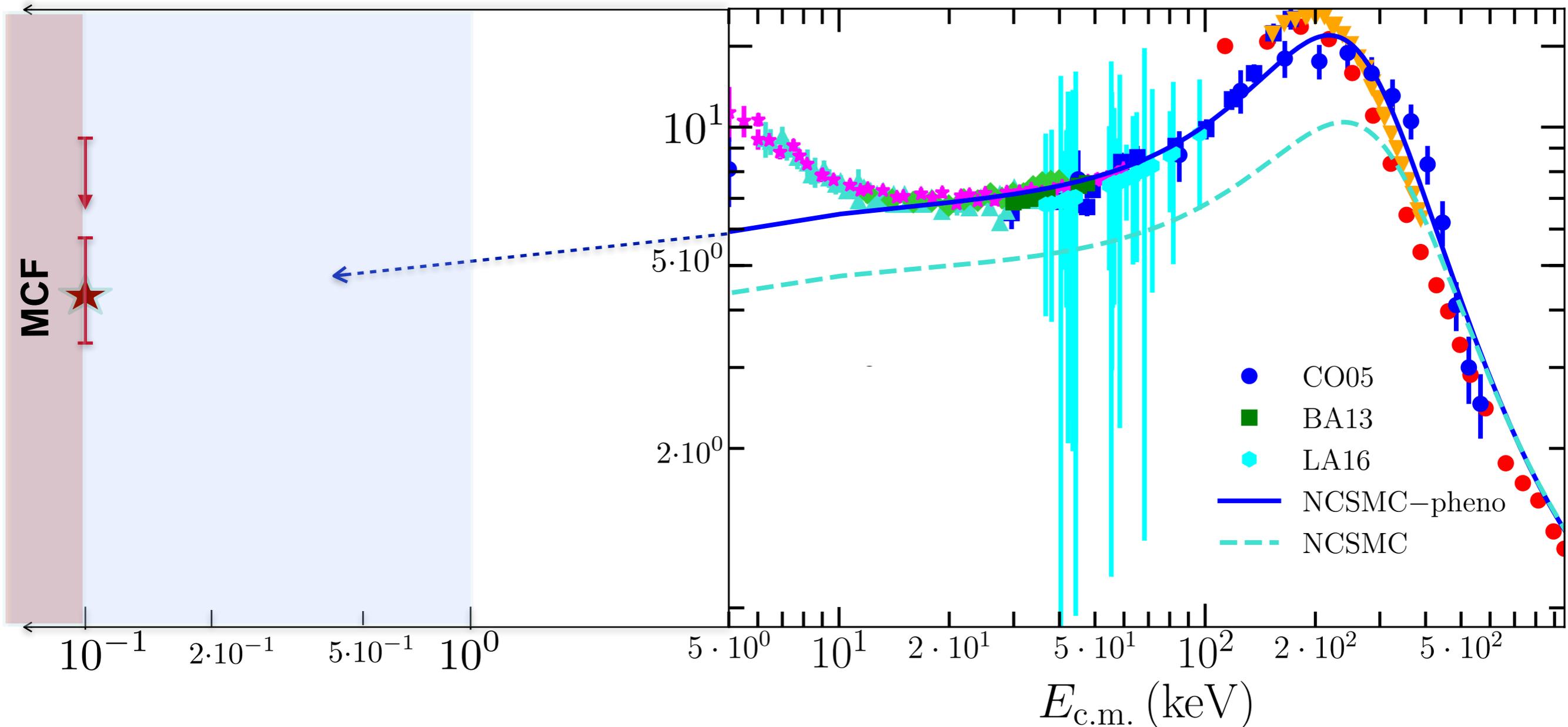


Космология



Теория ядерного взаимодействия

Экстраполяция астрофизического  $S(E)$  фактора в область сверхнизких энергий



МCF эксперимент **предоставляет уникальную возможность** измерить скорость реакции в области сверх-низких энергий без влияния электронного экранирования



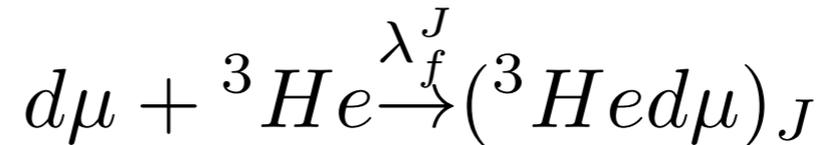
**Мюонный катализ позволяет изучать реакцию при практически нулевой энергии  $E \leq 1\text{keV}$**

**Синтез** происходит в  ${}^3\text{Hed}\mu$  мезомолекуле



**Формирование** молекулы происходит при столкновении медленных атомов

Yu.A. Aristov, A.V. Kravtsov, N.P. Popov *Yad.Fiz.* 33 (1981)1066

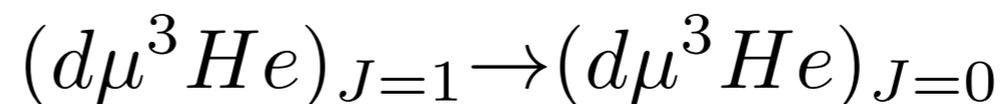


## Распад

L.N. Bogdanova, S.S. Gershtein, L.I. Ponomarev *PSI-PR-97-33* October 1997



## Переход

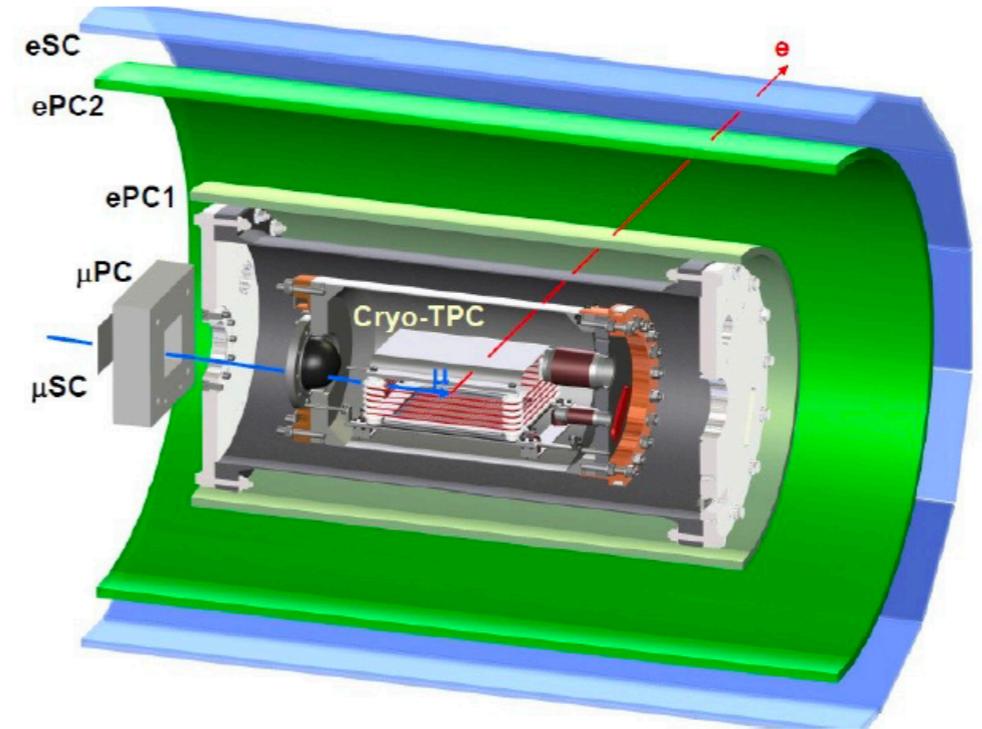
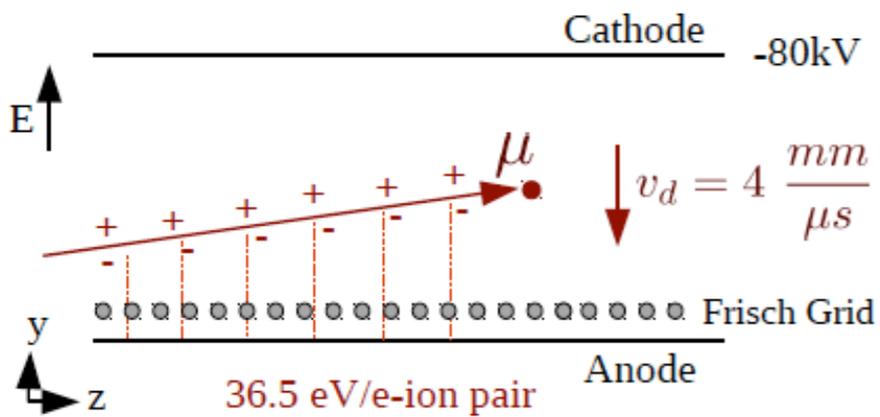


M.P. Faifman, L.I. Men'shikov *Hyperfine Int.* 118, 187 (1999)

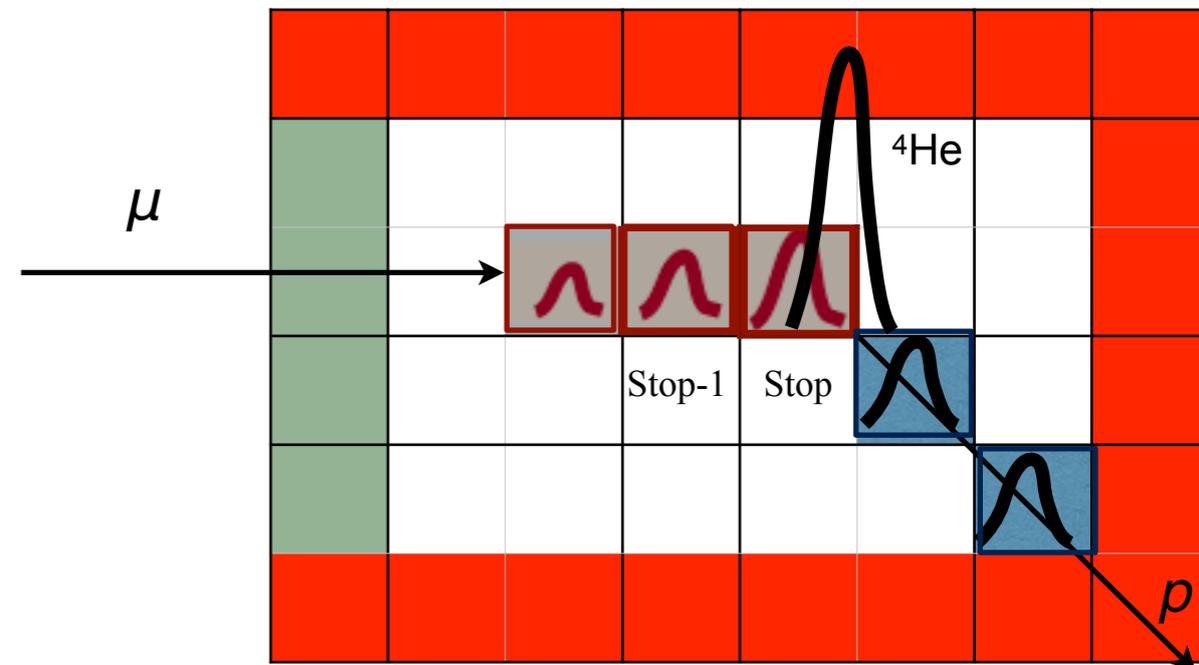
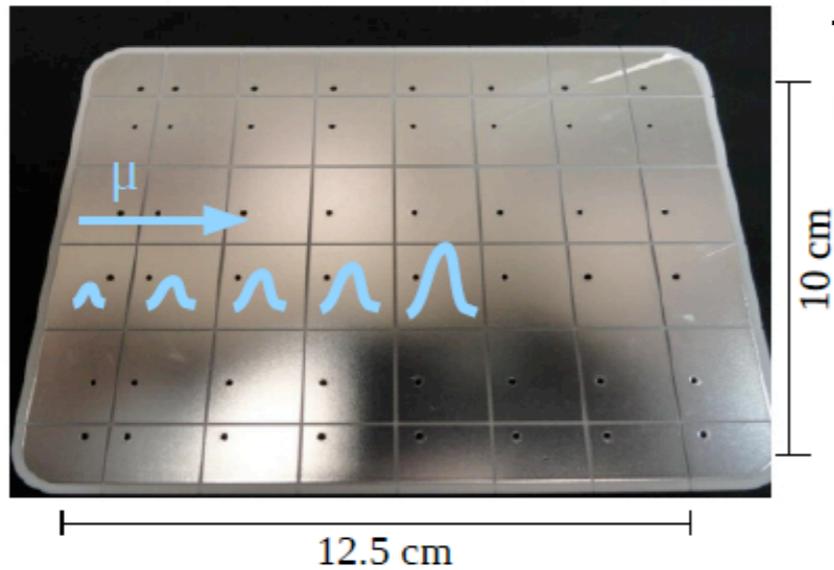
как следствие **наблюдаемый**  $d\mu^3\text{He}$  ядерный синтез со скоростью реакции  $\lambda_f = P_0\lambda_f^0 + P_1\lambda_f^1$

$$\lambda_f = 2.5 \cdot 10^4 \text{s}^{-1}, \quad \lambda_f(J=0) = 2.5 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}, \quad \lambda_f(J=1) = 6.5 \cdot 10^2 \text{s}^{-1}$$

**Главная цель** эксперимента MuSun -  
измерение времени жизни мюона в чистом D2



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

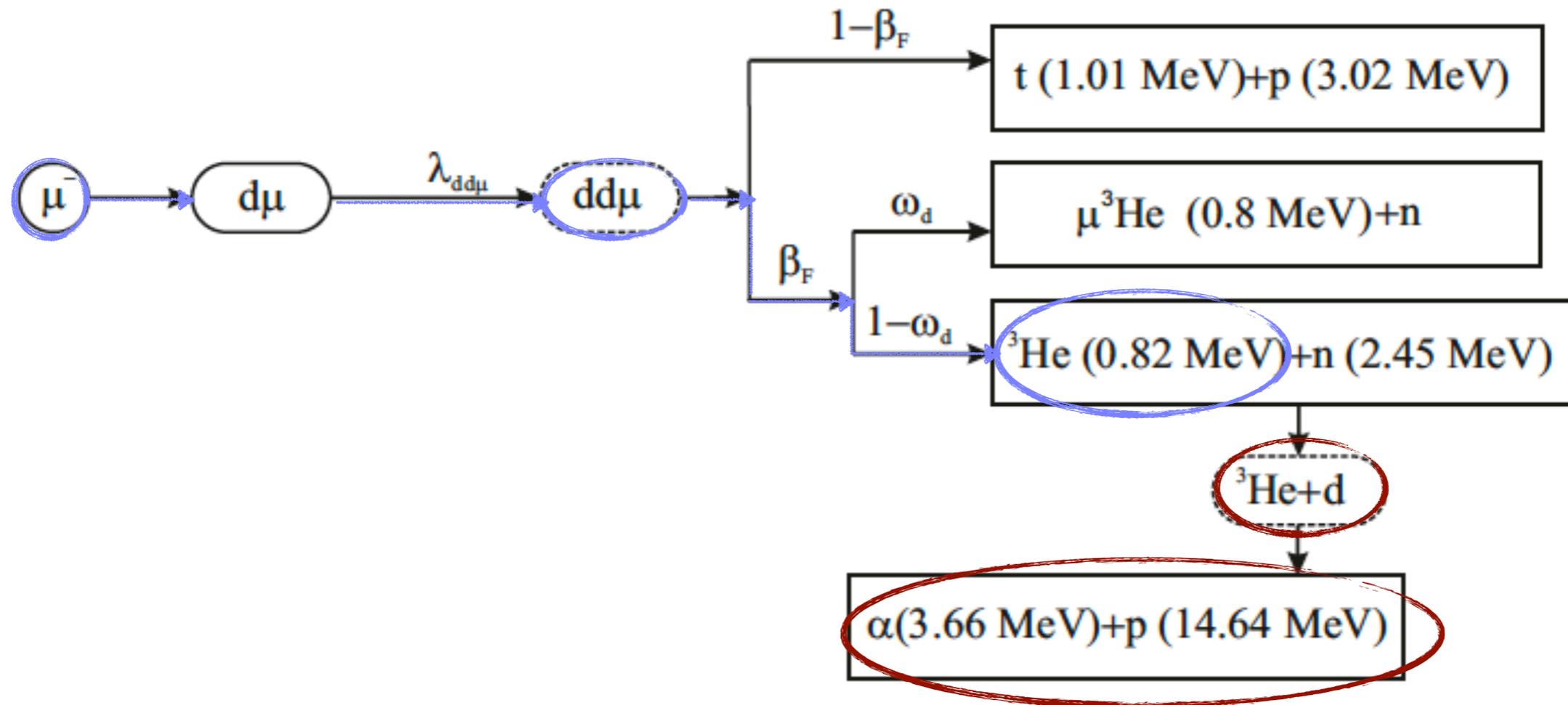


TPC детектирует мюоны, кот. остановились в центре,  
а так же заряженные продукты реакции



## Run8 (2015)

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

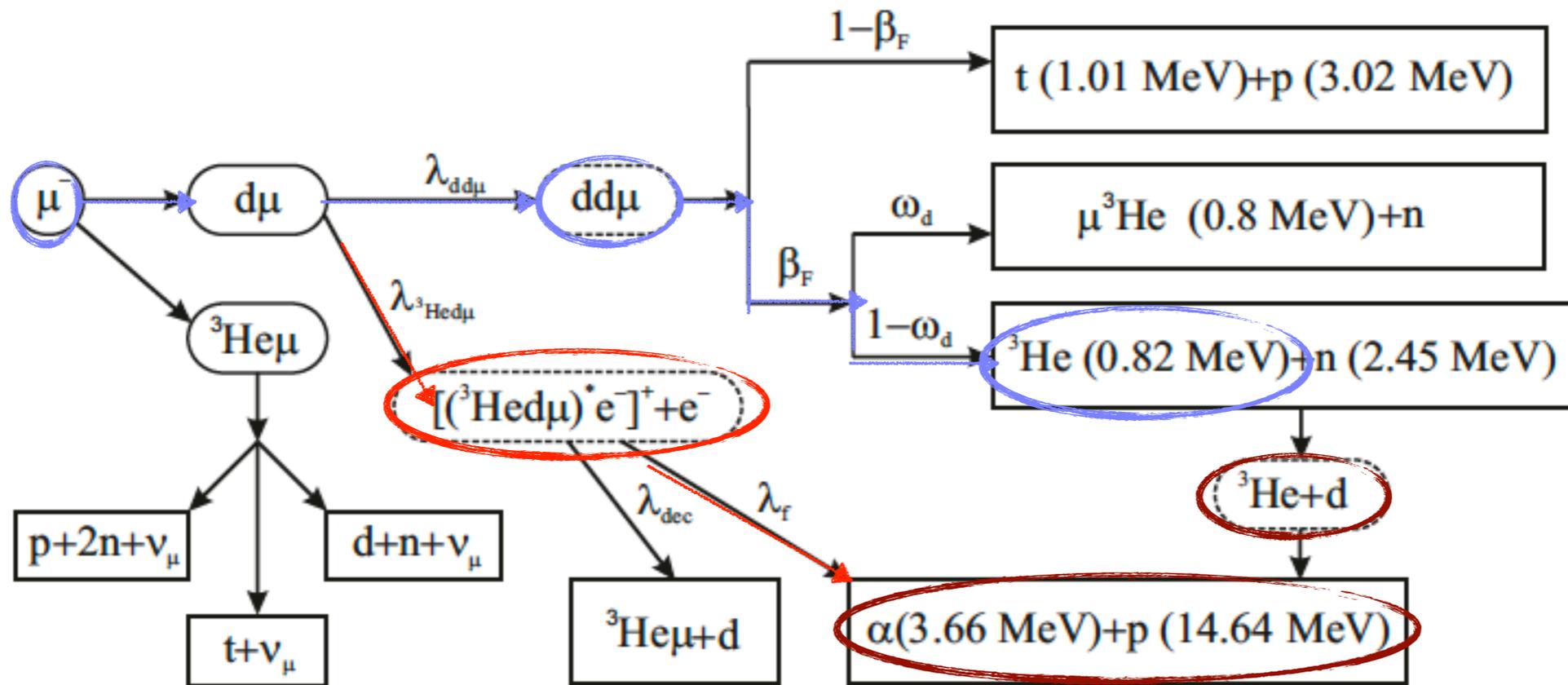


**"синтез на лету"**



## Run9 (2016)

Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D2 + 5%  $^3\text{He}$



### Статистика

run	$\mu$	Weeks	Ntot	NFinF/ Npileup
Run8	1.3E+10	9	99	77/22
Run9	1.0E+09	1	2	1.9/0.34

верхний предел вероятности синтеза в  $d^3\text{He}\mu$  молекуле

$$P_{\text{fusion}}(d^3\text{He}\mu) \leq 9.0 \cdot 10^{-8} \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

верхний предел эффективной скорости  $d^3\text{He}$  синтеза

$$\lambda_f \leq 6.3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1} \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

2017-2020 гг.

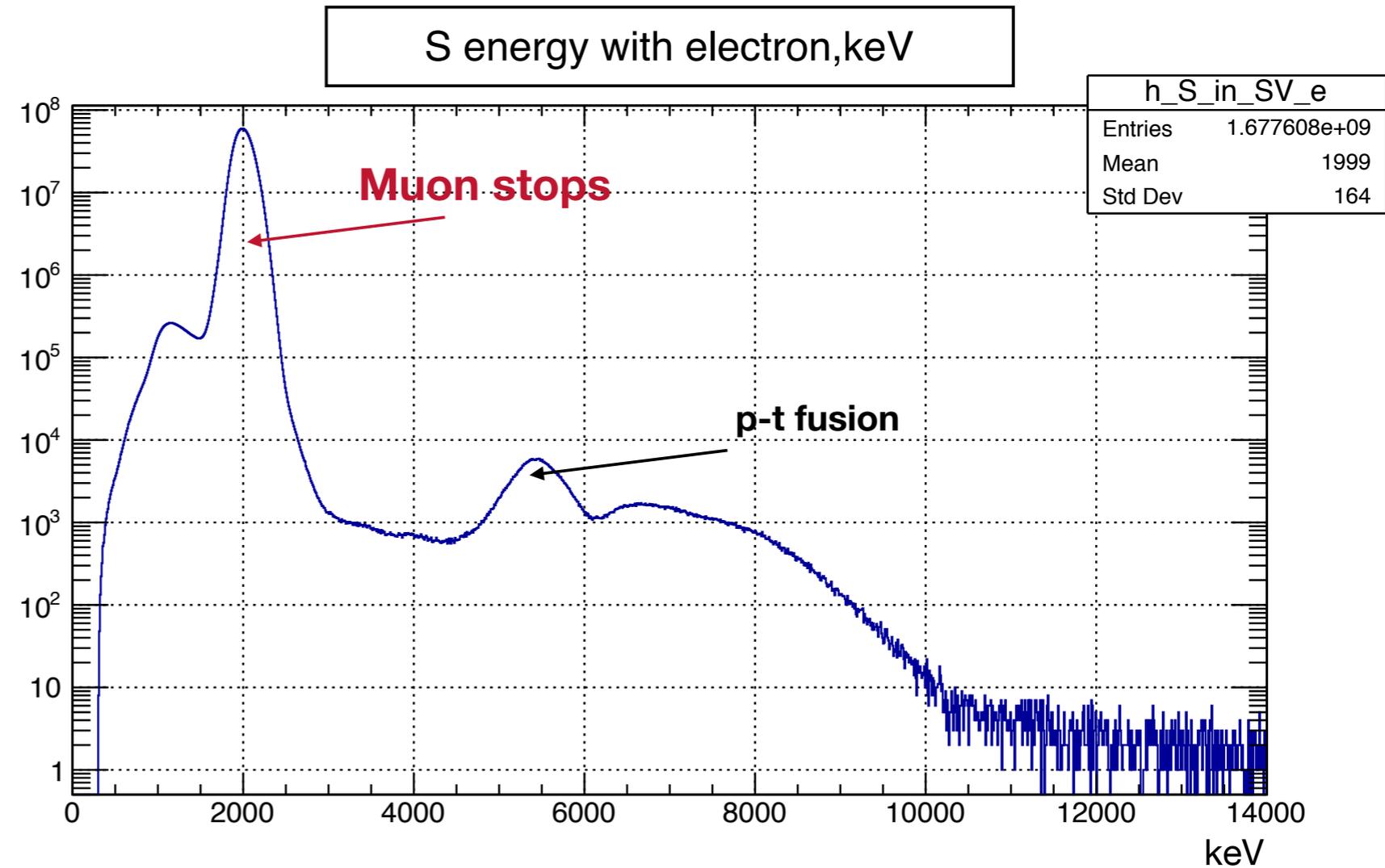
подготовительные и тестовые сеансы  
2021 - первый физический сеанс

## Run10 (2021)

**First stage:**

muon stops

$$1.6 \cdot 10^9$$



## Run10 (2021)

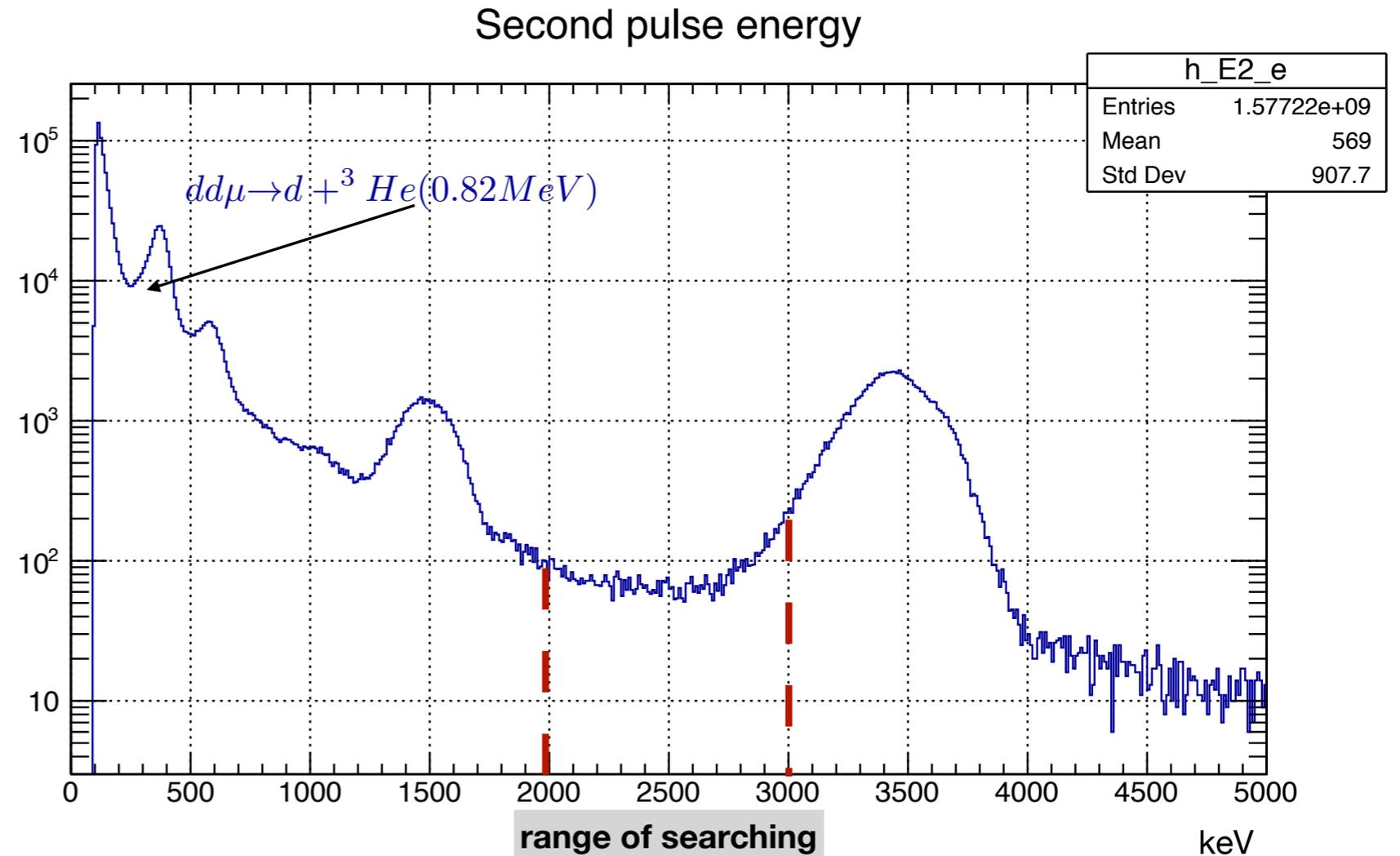
### First stage:

muon stops  $1.6 \cdot 10^9$

### Second stage:

Background “fusion-in flight”

${}^3\text{He}(0.82\text{MeV})$   $1.9 \cdot 10^5$



## Run10 (2021)

### First stage:

muon stops  $1.6 \cdot 10^9$

### Second stage:

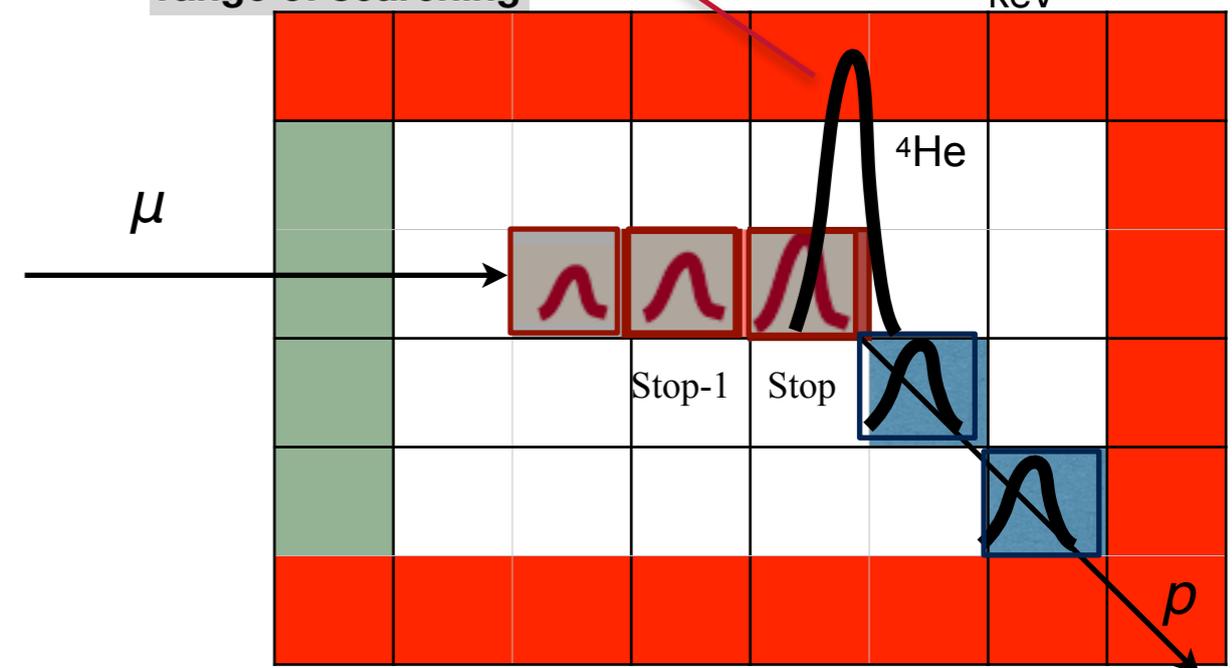
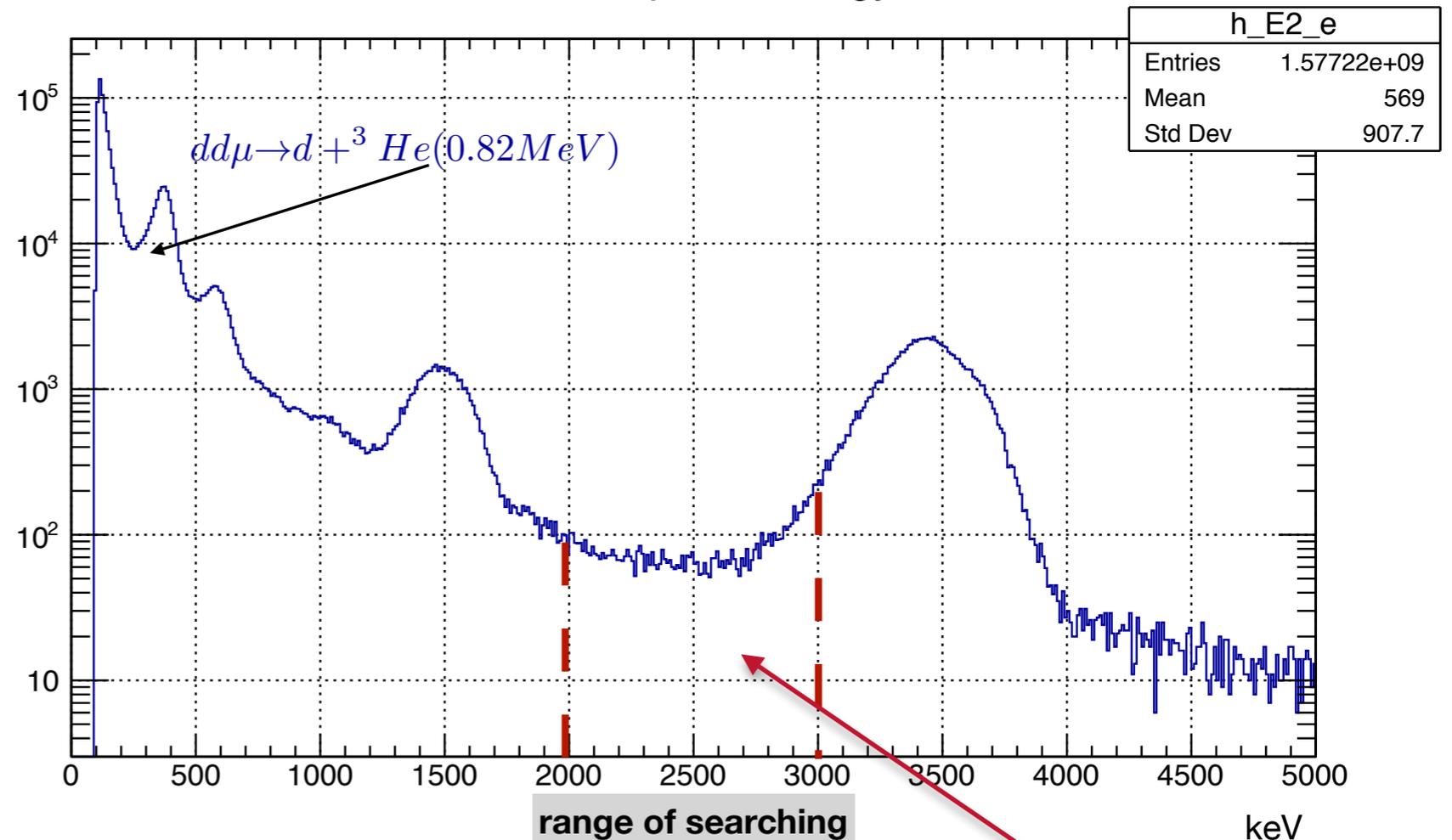
Background “fusion-in flight”

${}^3\text{He}(0.82\text{MeV})$   $1.9 \cdot 10^5$

### Third stage:

$d^3\text{He}$  fusion events (list of fusion candidates)

Second pulse energy



## Run10 (2021)

### First stage:

muon stops  $1.6 \cdot 10^9$

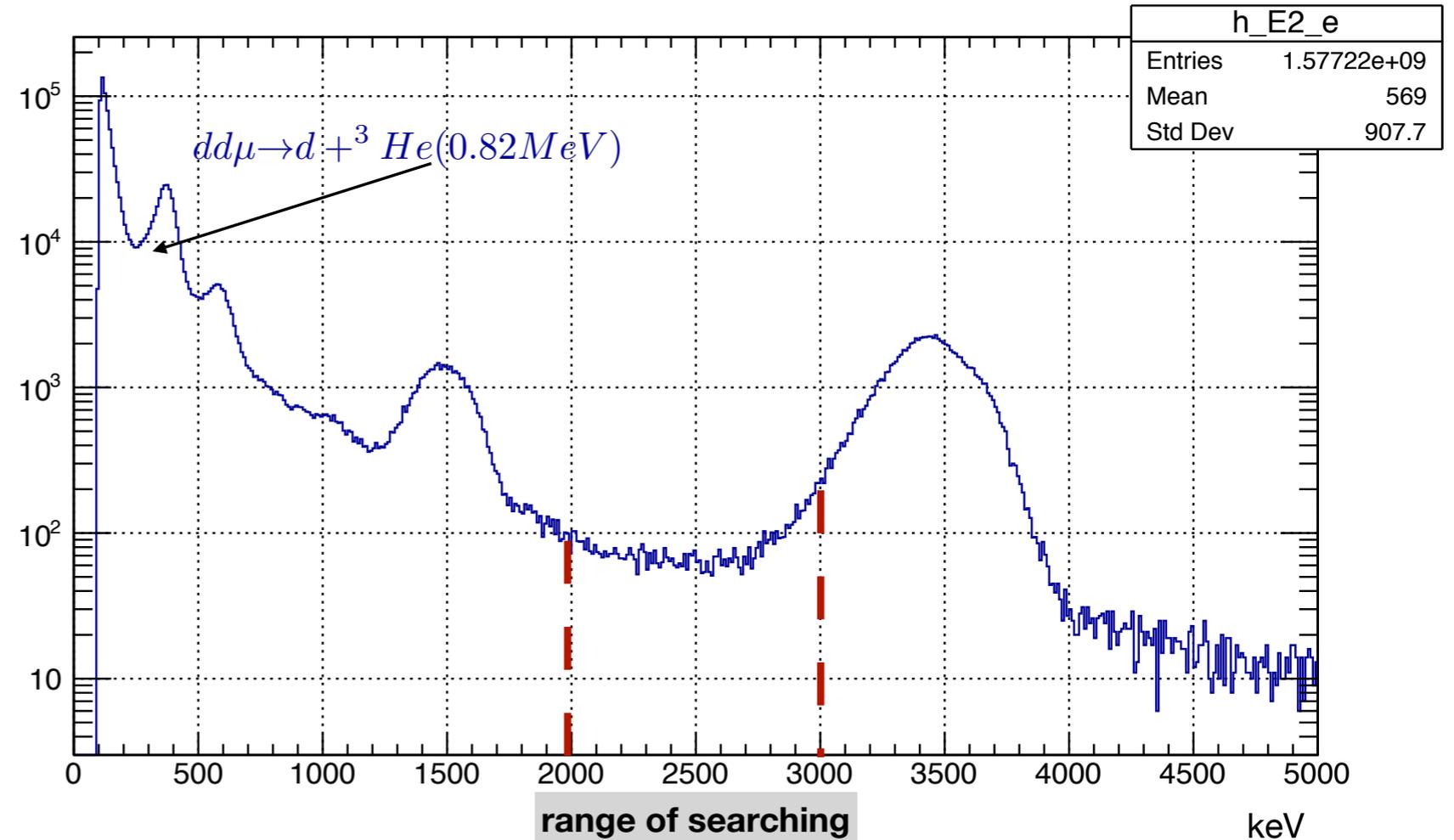
### Second stage:

Background “fusion-in flight”

${}^3\text{He}(0.82\text{MeV})$   $1.9 \cdot 10^5$

### Third stage:

Second pulse energy



$d^3\text{He}$  fusion events (list of fusion candidates)

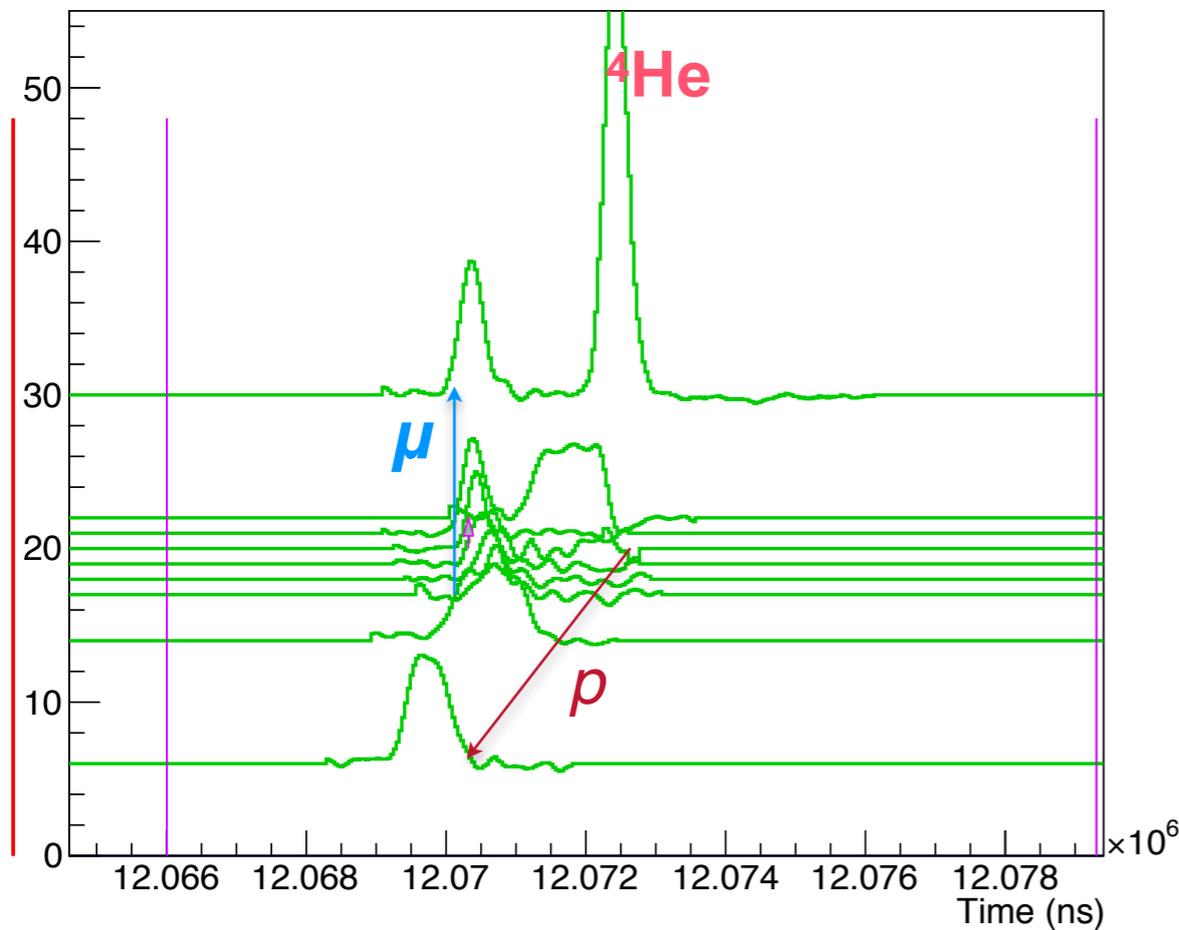
run	$\mu$ stop (Expectation)	Weeks	Ntot	NFinF
Run8	1.3E+10	9		
Run9	1.0E+09	1	2	1.9
Run10(2021)	1.6E+09	3	10	1

**preliminary!!!**

## Run10 (2021)

“good” candidate

hWaveformDisplayBase R= 148618



41	42	43	44	45	46	47	48
33	34	35	36	37	38	39	40
25	26	27	28	29	30	31	32
17	18	19	20	21	22	23	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8

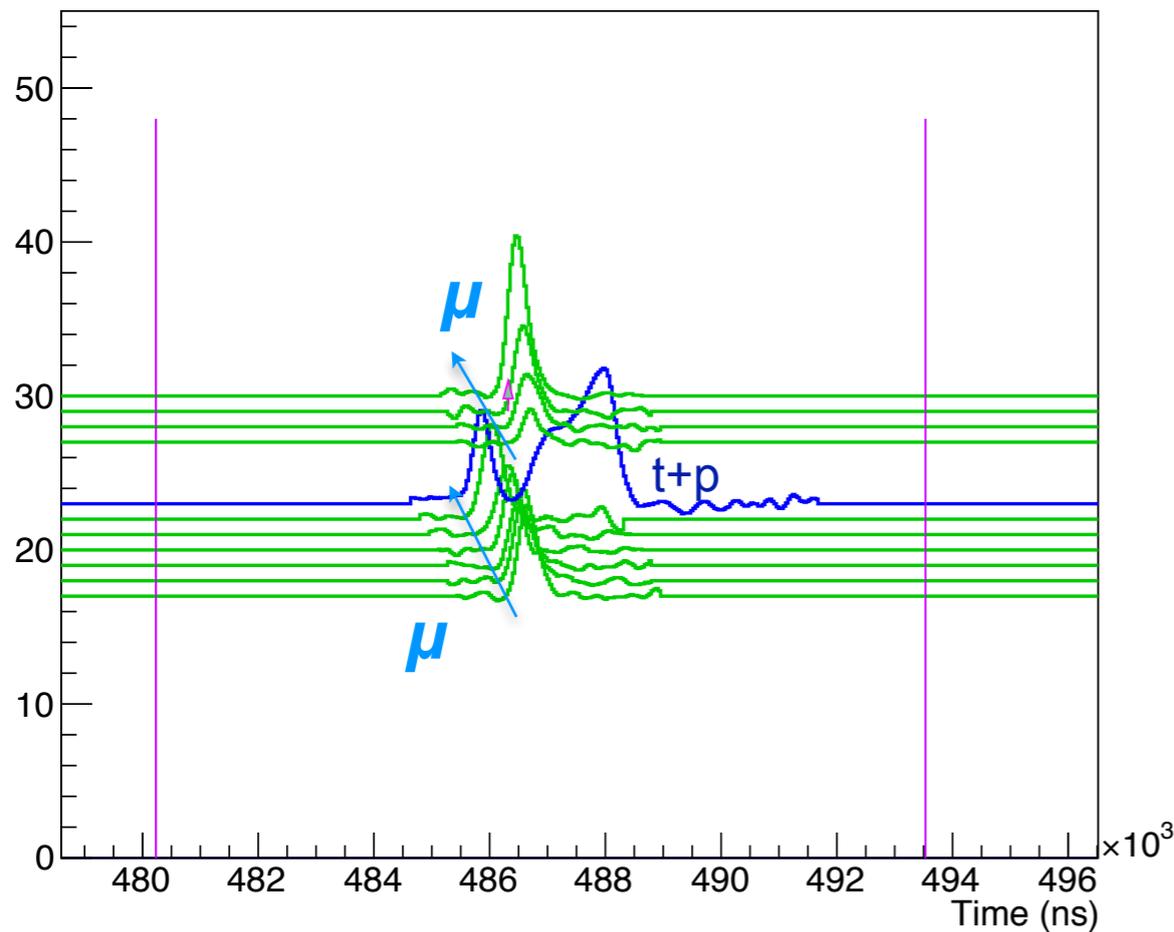
μ → 4He  
p

A: 264.0	A: 276.0	A: 289.6	A: 96.3	A: 543.1	A: 421.5
E: 151.7	E: 160.0	E: 180.9	E: 28.6	E: 313.6	E: 659.3
t 12914	t 12834	t 12714	t 14514	t 12594	t 14034
A: 443.7					
E: 682.1					
t 12914					
A: 600.0					
E: 600.6					
t 11874					

## Run10 (2021)

**“bad” candidate**

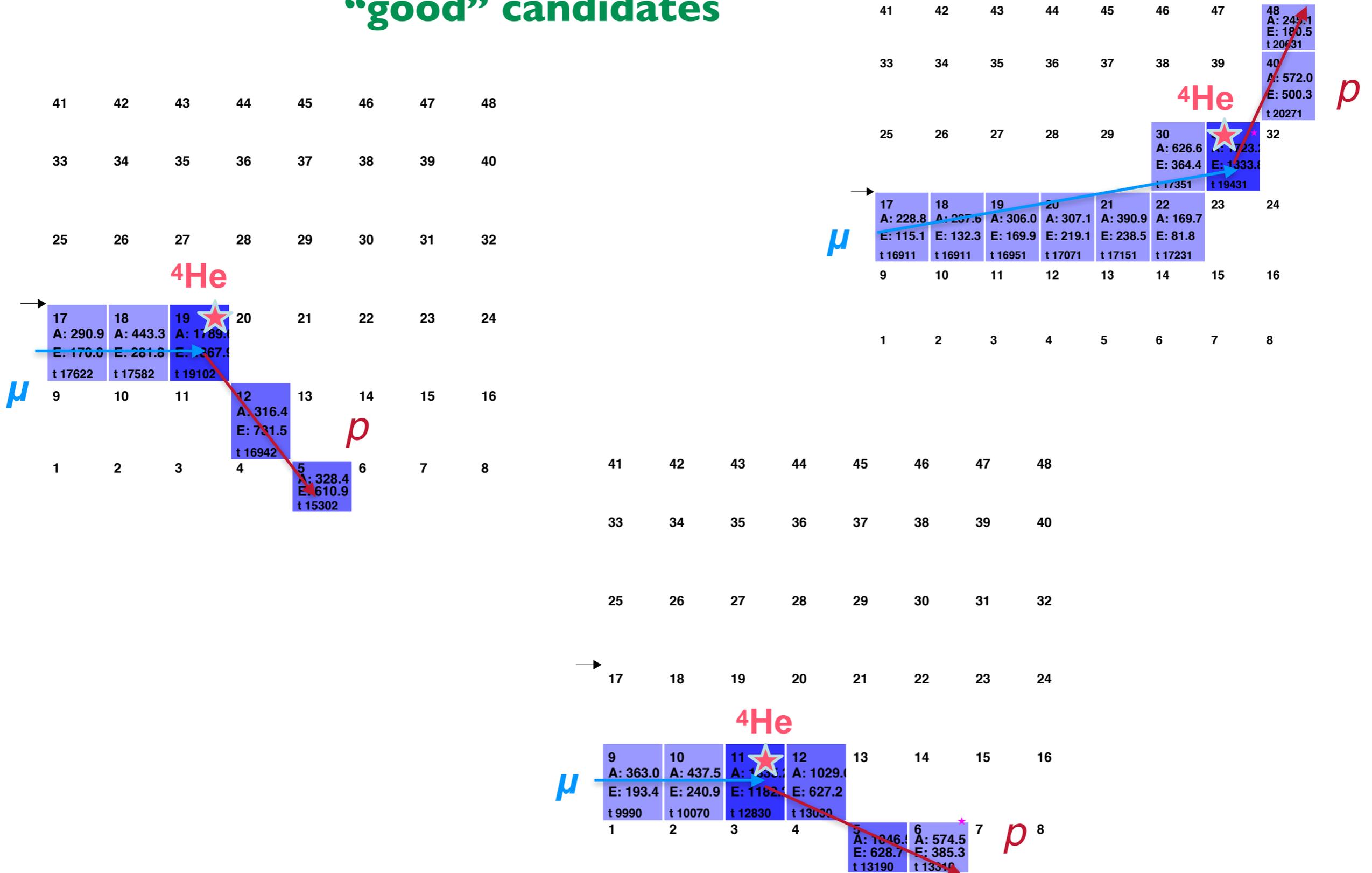
hWaveformDisplayBase R= 149658



41	42	43	44	45	46	47	48		
33	34	35	36	37	38	39	40		
25	26	27	28	29	30	31	★ 32		
		A: 193.2	A: 315.8	A: 478.2	A: 975.3				
		E: 97.5	E: 211.0	E: 300.4	E: 615.8				
		t 14646	t 14606	t 14526	t 14406				
→		17	18	19	20	21	22	23	24
		A: 492.2	A: 511.4	A: 370.7	A: 418.7	A: 390.9	A: 544.2	A: 814.1	
		E: 301.3	E: 329.6	E: 246.1	E: 227.1	E: 245.7	E: 360.6	E: 1309.1	
		t 14606	t 14526	t 14446	t 14366	t 14286	t 14006	t 15926	
		9	10	11	12	13	14	15	16
		1	2	3	4	5	6	7	8

## Run10 (2021)

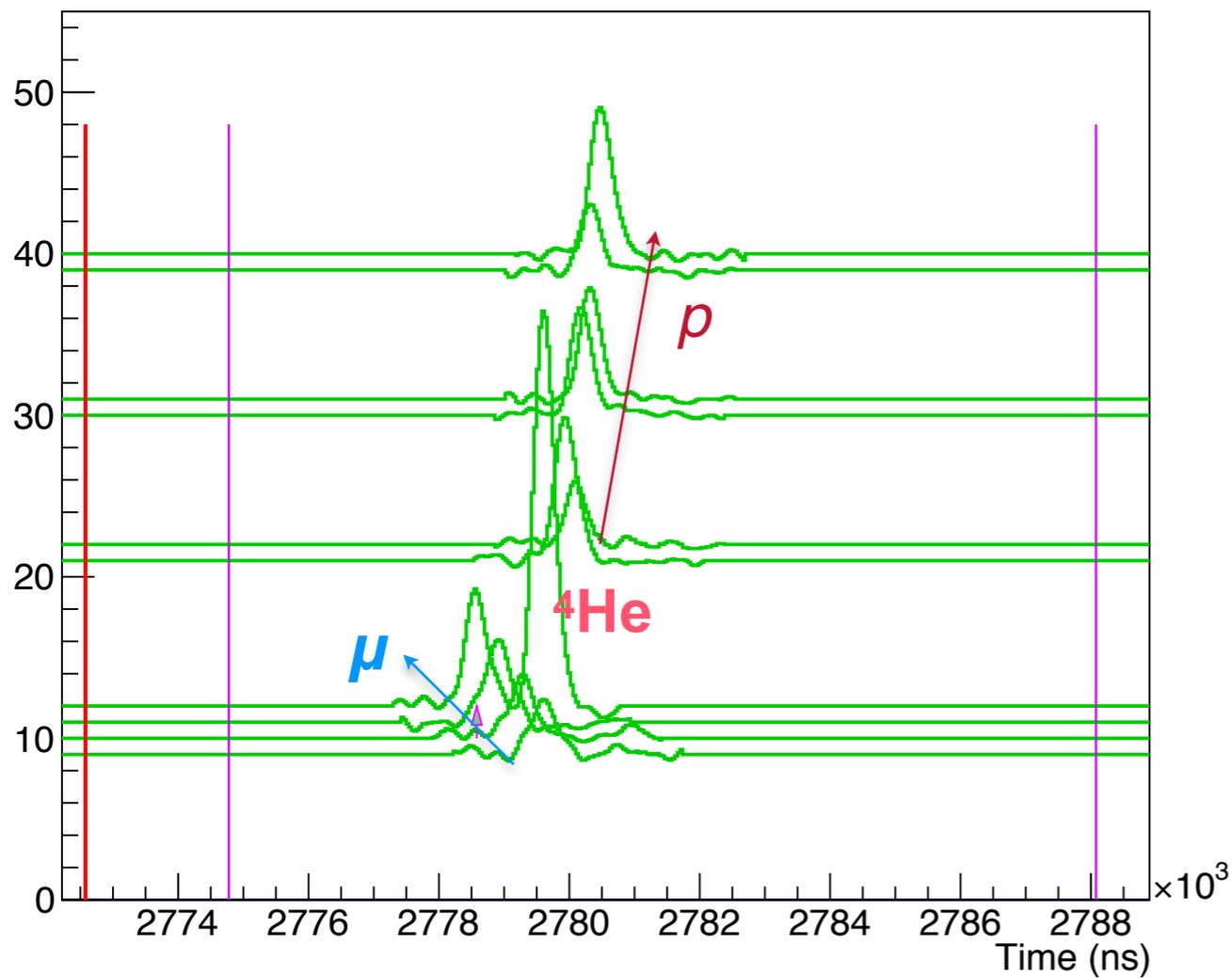
### “good” candidates



## Run10 (2021)

“good” candidate

hWaveformDisplayBase R= 150385



41	42	43	44	45	46	47	48
							A: 162.4 E: 111.7 t 14142
33	34	35	36	37	38	39	40
						A: 412.9 E: 236.0 t 13742	A: 818.6 E: 544.8 t 13902
25	26	27	28	29	30	31	32
					A: 621.4 E: 369.9 t 13582	A: 605.4 E: 359.6 t 13742	
17	18	19	20	21	22	23	24
				A: 784.6 E: 501.4 t 13342	A: 337.1 E: 186.8 t 13502		
9	10	11	12	13	14	15	16
A: 291.8 E: 201.4 t 13022	A: 338.4 E: 215.8 t 12702	A: 437.6 E: 328.3 t 12342	A: 237.8 E: 1441.8 t 13022				
1	2	3	4	5	6	7	8



## Run10 (20 октября - 30 ноября, 2022)

run	$\mu$ stop (Expectation)	Weeks	Ntot	NFinF
Run8	1.3E+10	9		
Run9	1.0E+09	1	2	1.9
Run10(2021)	1.6E+09	3	10	1
Run10(2022)	3.6E+09	3		

## Run10 (20 октября - 30 ноября, 2022)

run	$\mu$ stop (Expectation)	Weeks	Ntot	NFinF
Run8	1.3E+10	9		
Run9	1.0E+09	1	2	1.9
Run10(2021)	1.6E+09	3	10	1
Run10(2022)	3.6E+09	3		

Полностью избавились от шумов электроники  
Оптимизация DAQ и пучковых детекторов

*Петр Кравцов  
Сергей Микиртычьянц  
Василий Фотьев*

Производство HD

Хроматографический контроль чистоты и количественного состава

*Александр Васильев  
Владимир Ганжа*

**Claude Charles Petitjean, PSI**

Проводка и фокусировка пучка на уровне близком к идеальному

*Николай Воропаев*

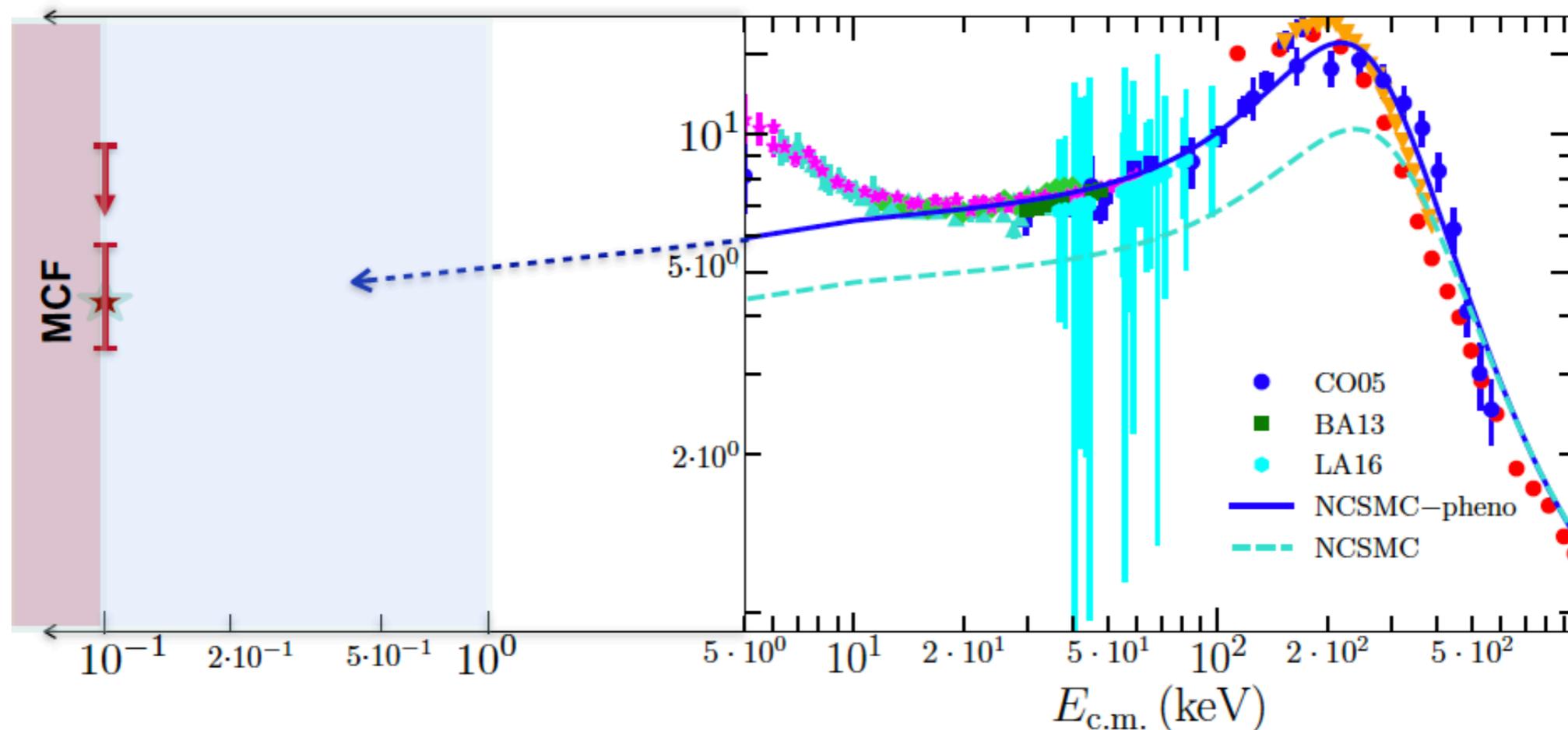
Online контроль качества данных: первый уровень обработки

## Run10 (20 октября - 30 ноября, 2022)

Экспериментальная часть проекта успешно завершена

run	$\mu$ stop (Expectation)	Weeks	Ntot	NFinF
Run8	1.3E+10	9		
Run9	1.0E+09	1	2	1.9
Run10(2021)	1.6E+09	3	10	1
Run10(2022)	3.6E+09	3		

2023 год - обработка данных





**Спасибо всем участникам эксперимента!**

**Спасибо за внимание!**

