

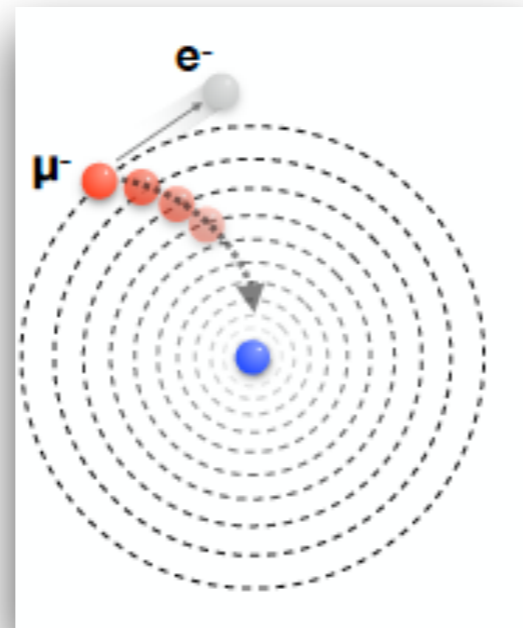
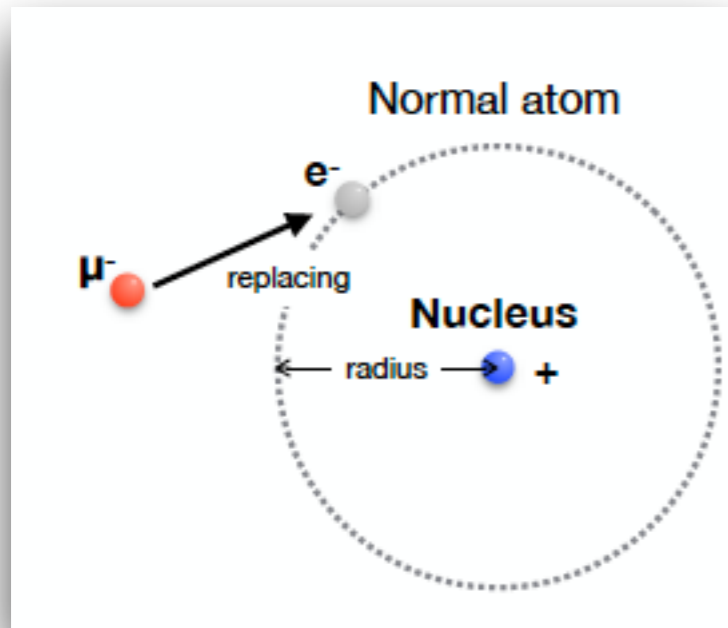


Поиск мюонного катализа ядерного $d^3\text{He}$ синтеза



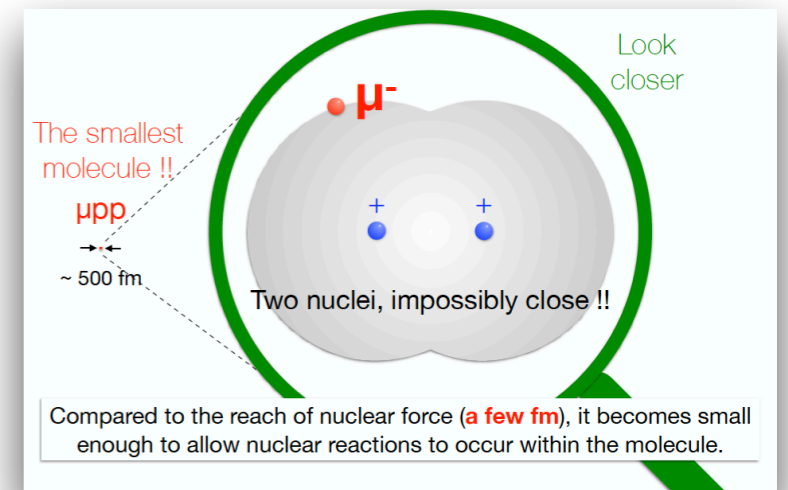
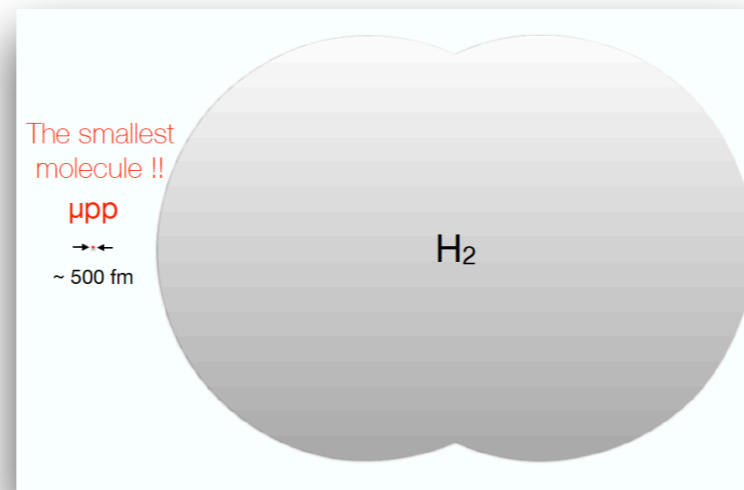
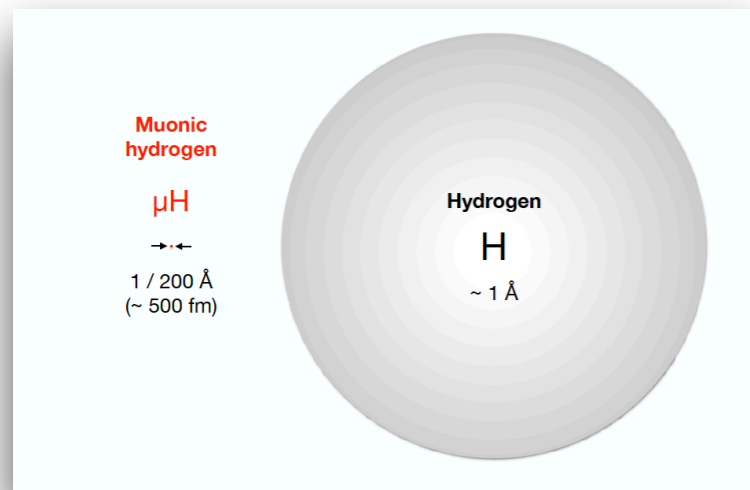
А.А. Васильев, М.Е. Взнуздаев, А.А. Воробьев, Н.И. Воропаев,
В.А.Ганжа, К.А.Ившин, Л.М.Коченда, П.А. Кравцов, П.В. Кравченко, Е.М.Маев,
С.М.Микиртычьянц, А.В.Надточий, А.Н. Соловьев, И.Н.Соловьев,
В.А.Трофимов, В.Д. Фотьев

- Введение
- Современная мотивация для проведения эксперимента
- Методика эксперимента
- Анализ данных
- Результаты



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

Мюон может образовывать связанные системы совместно с ядрами изотопов водорода





Thermonuclear fusion

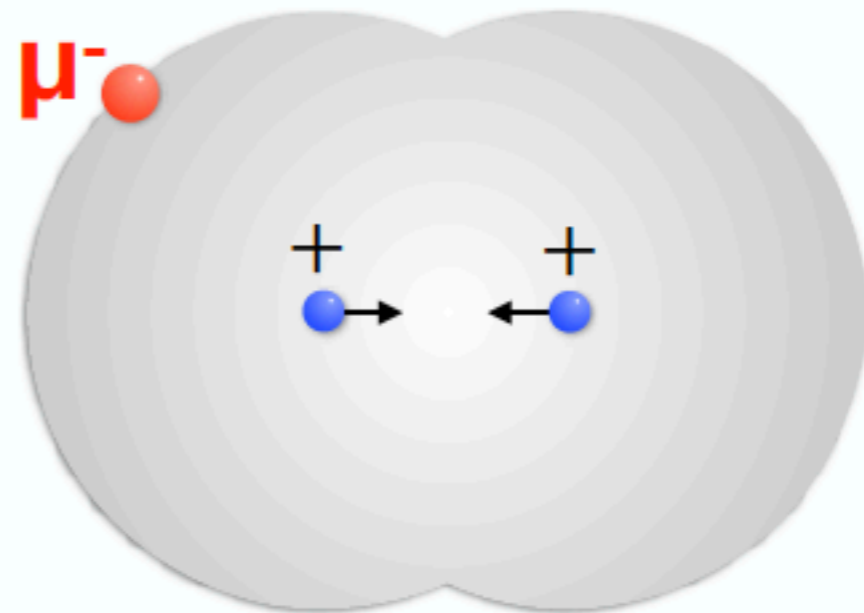
Vigorous collisions in plasma
at several hundred million
degrees Celsius



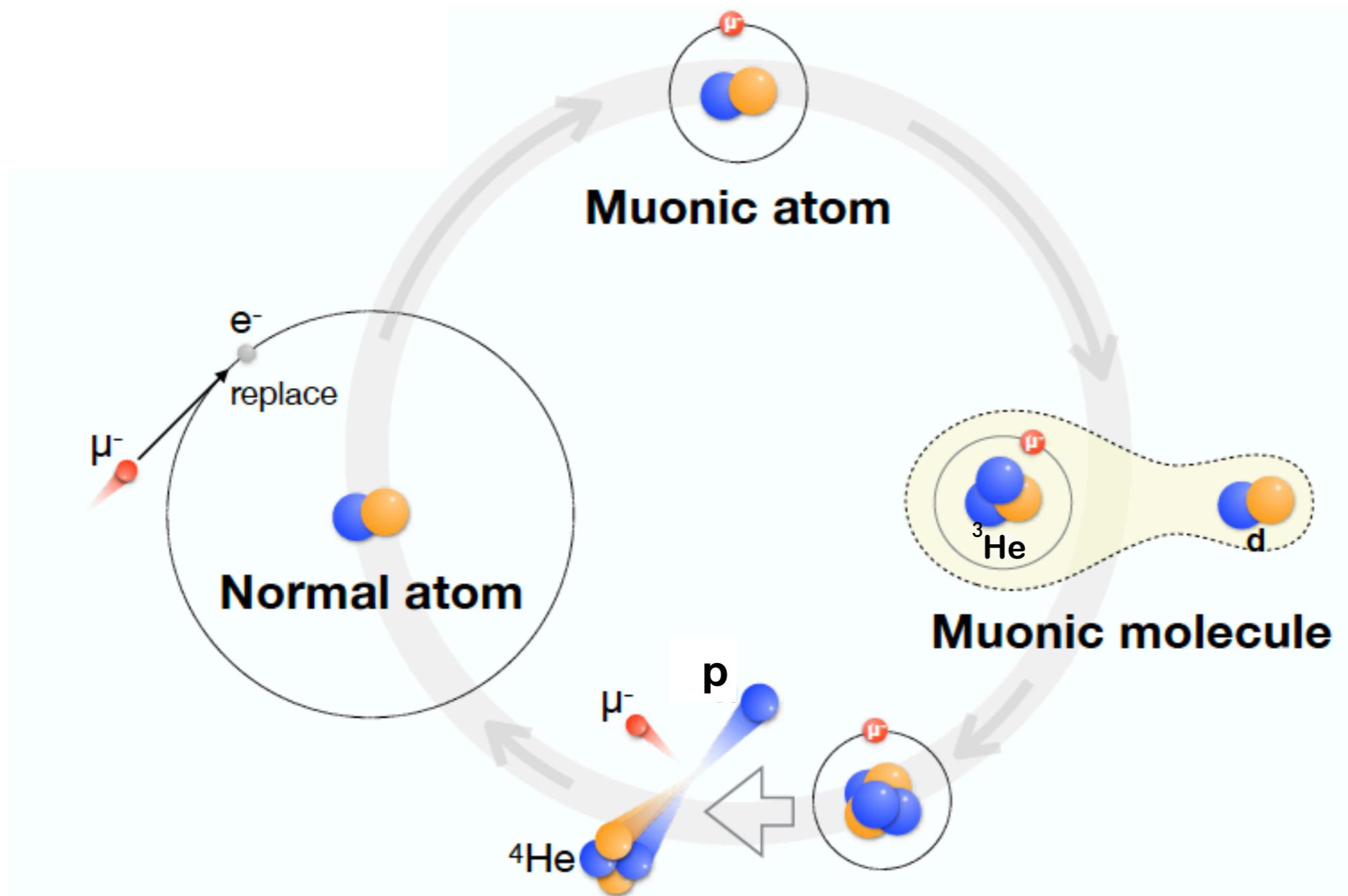
Large repulsion due to
electromagnetic force

Fusion with muons

Nuclei easily approach
each other



No repulsion by
electromagnetic forces
up to the size of a muonic
molecule



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



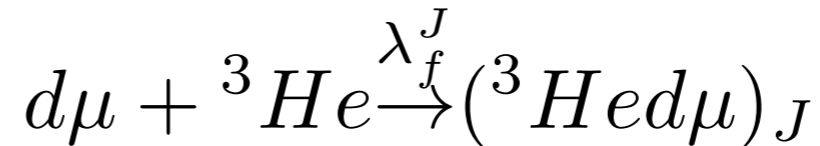
Мюонный катализ позволяет изучать реакцию при практически нулевой энергии $E \leq 1\text{keV}$

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

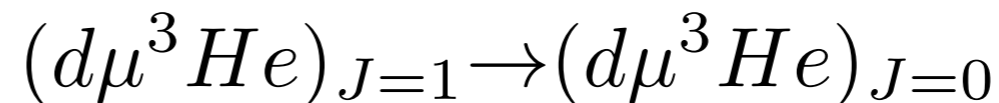


Распад

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 $\lambda_f = P_0\lambda_f^0 + P_1\lambda_f^1$

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



E.M.Maev et al. *Hyperfine Int.* 118, 171 (1999)

верхний предел для скорости реакции

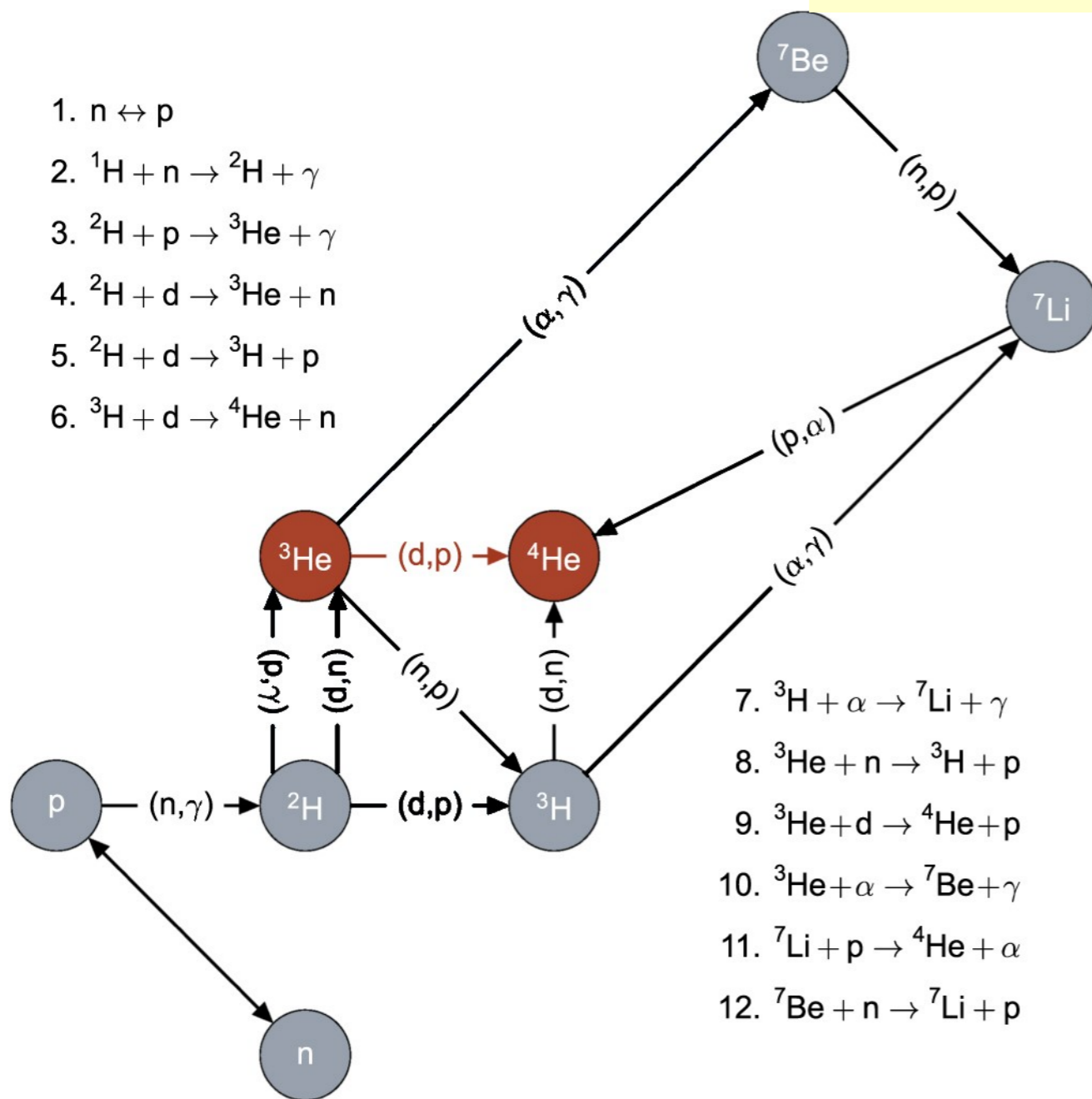
Experiment	Year	Gas mixture	Fusion rate λ_f, s^{-1}	Comments
PNPI	1990	$\text{D}_2 + {}^3\text{He}(5\%)$	$< 4 \cdot 10^8$	Upper limit 90% CL
PNPI-PSI	1998	$\text{HD} + {}^3\text{He}(5,6\%)$	$< 6 \cdot 10^4$ фактор 10!!	Upper limit 90% CL
JINR-PSI	1998/2006	$\text{D}_2 + {}^3\text{He}(5\%)$	$(4.5 \pm 2.6/2.0) \cdot 10^5$	Possible observation
<p>первое наблюдение реакции</p> <p>V.M.Bystritsky et al. <i>Eur. Phys. J.</i> 38(3), 455 (2006)</p>				
Theory M.Faifman	1999		$2.5 \cdot 10^4$	precision 30%



Первичный нуклеосинтез в модели Большого Взрыва

Ключевая роль ядерных реакции синтеза в области низких энергий в предсказании теории (SBBN) об образовании легких ядер и распространенности элементов

1. $n \leftrightarrow p$
2. $^1\text{H} + n \rightarrow ^2\text{H} + \gamma$
3. $^2\text{H} + p \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$
4. $^2\text{H} + d \rightarrow ^3\text{He} + n$
5. $^2\text{H} + d \rightarrow ^3\text{H} + p$
6. $^3\text{H} + d \rightarrow ^4\text{He} + n$



7. $^3\text{H} + \alpha \rightarrow ^7\text{Li} + \gamma$
8. $^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p$
9. $^3\text{He} + d \rightarrow ^4\text{He} + p$
10. $^3\text{He} + \alpha \rightarrow ^7\text{Be} + \gamma$
11. $^7\text{Li} + p \rightarrow ^4\text{He} + \alpha$
12. $^7\text{Be} + n \rightarrow ^7\text{Li} + p$

R.G.Pizzone et al. IOP Conf.Series:Journal of Physics:Conf.Series 1078 (2018) 012017

R.S.de Souza, C. Iliadis and A. Coc. The Astrophysical Journal 872:75 (2019)

Прямые эксперименты:

- распространенность изотопов соответствует прогнозам SBBN для H(D), ^4He

- экспериментально определен лишь верхний предел для ^3He

- предсказания для ^7Li расходятся с наблюдениями

A. Coc, E. Vangioni. J.Phys.:Conf.Ser. 202 012001 (2010)

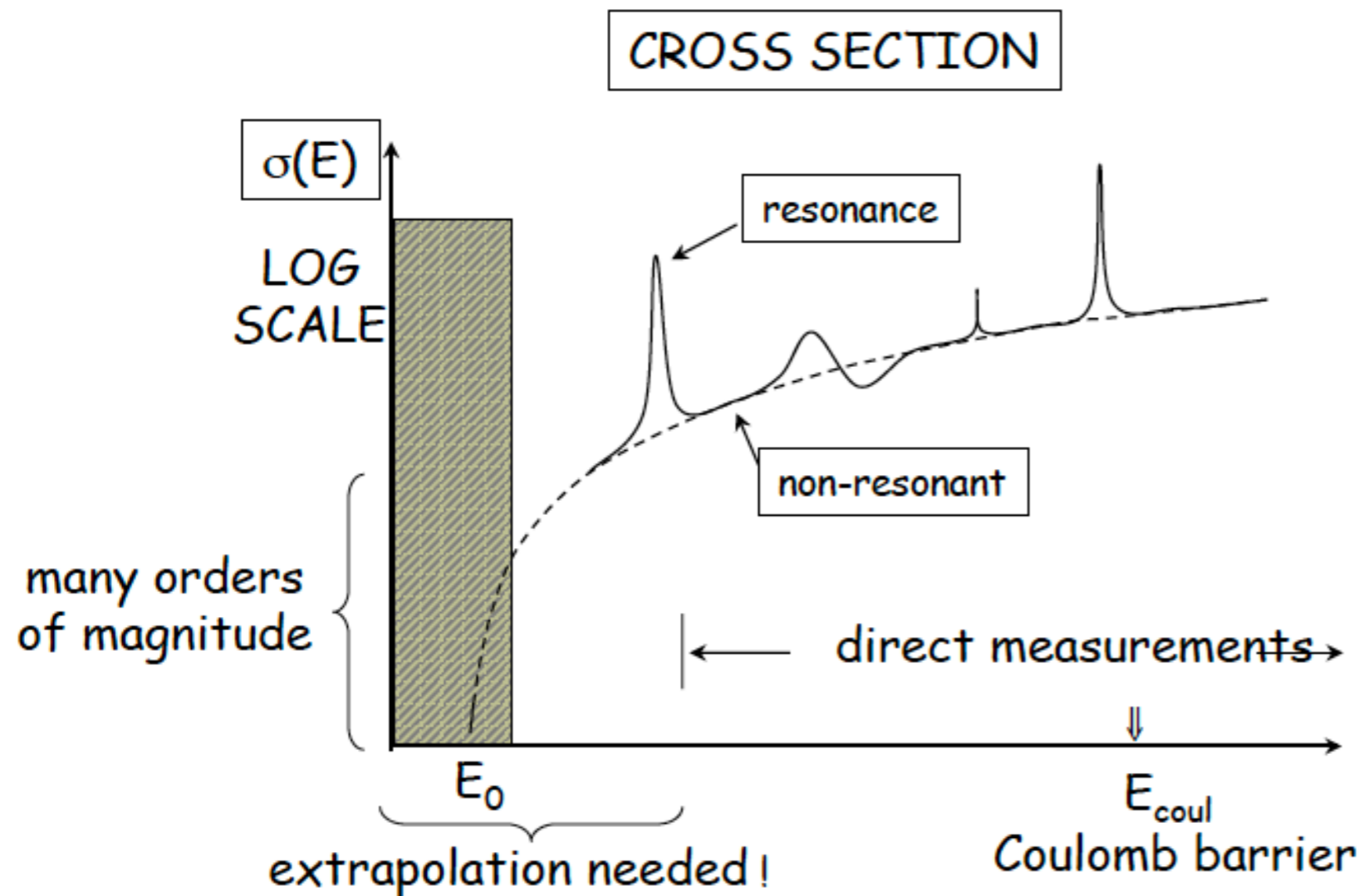
5% ошибка измерения скорости реакции соответствует 4% изменению теоретического предсказания для ^3He и ^7Li

При наличии большого количества прямых экспериментов вычисление скорости реакции из измеренных сечений остается **сложной задачей**



Сечение в области астрофизических энергий

Необходима экстраполяция данных в область сверхнизких энергий



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

$S(E)$ в отличие от сечения, слабо меняющаяся от энергии функция, содержащая все ядерные эффекты

С астрофизическим $S(E)$ -фактором процедура экстраполяции значительно проще



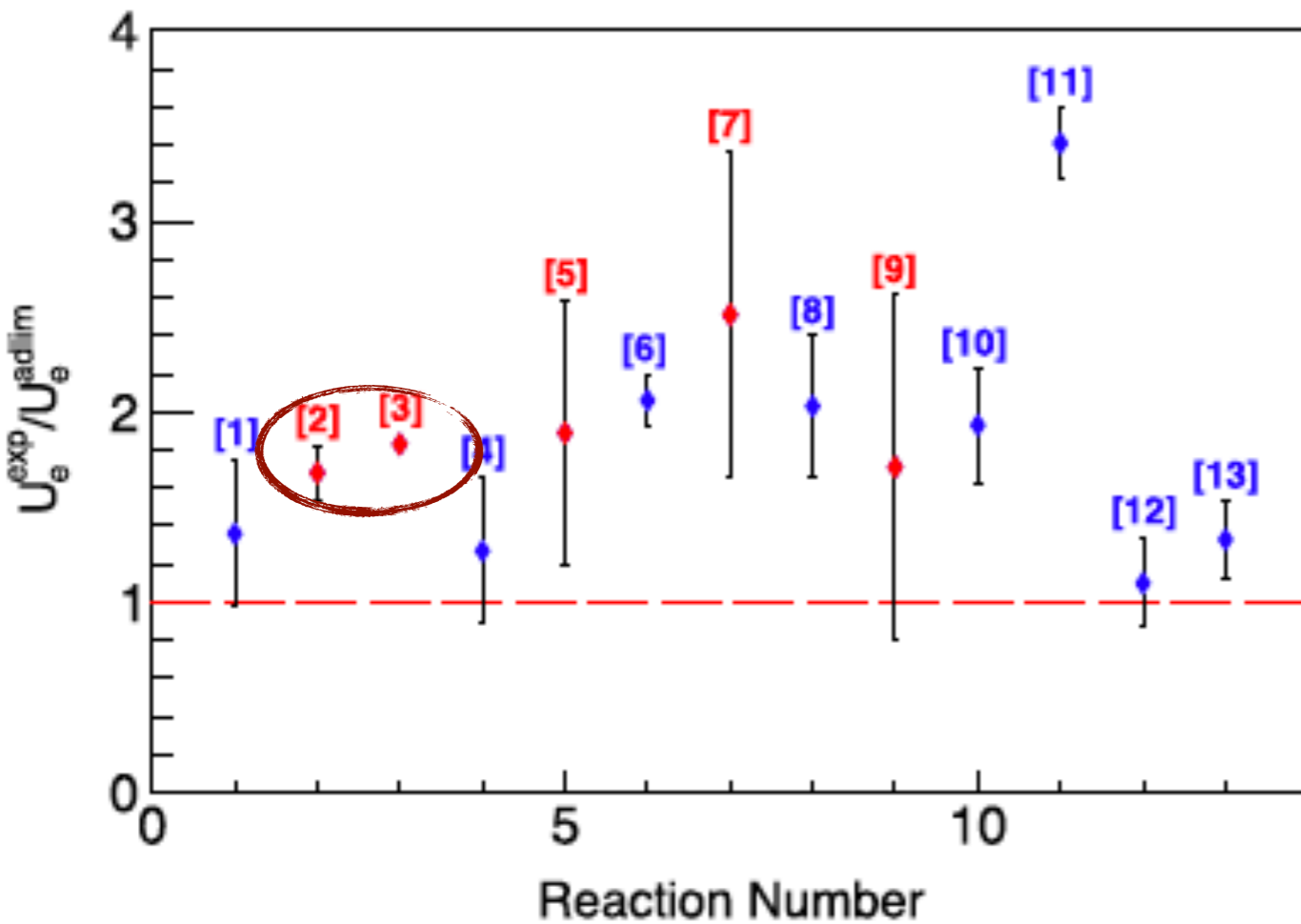
Потенциал электронного экранирования

При низких энергиях измерения S-фактора демонстрируют выраженный рост связанный с эффектом электронной экранировки

Превышение экранированного сечения по отношению к сечению на "голом" ядре учитывается путем введения дополнительного параметра U_e

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

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



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

Результат сильно зависит от набора данных и теоретической модели. Если реакция идет через резонанс, описание сечения усложняется



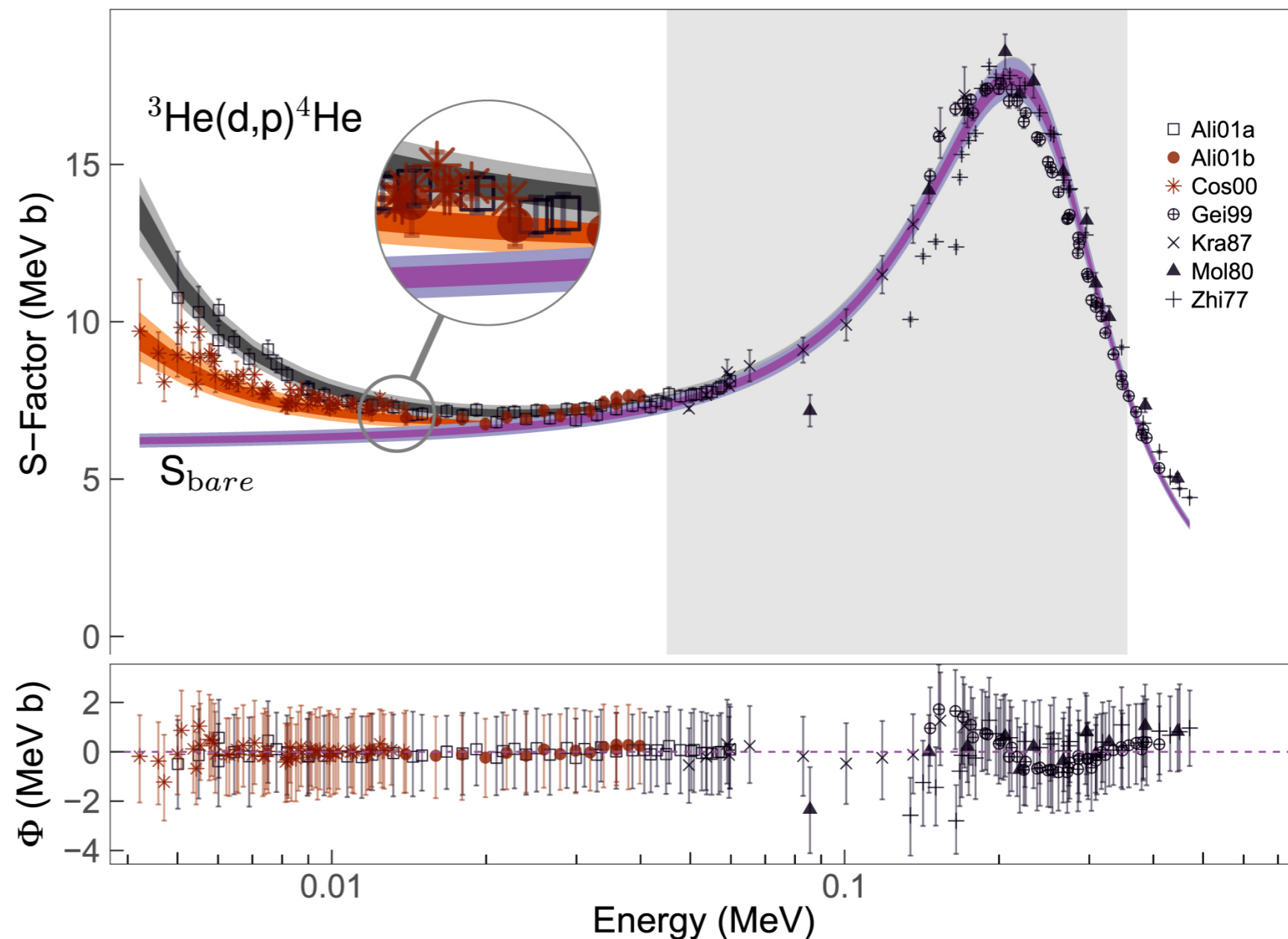
Two channel approximation of R-matrix theory

R.S.de Souza, The Astrophysical Journal 872:75 (2019)

Потенциал экранирования как параметр фитирования

Процедура фитирования зависит от набора данных

Экстраполяция сечения в область сверхнизких энергий



Результат превышает адиабатический предел
Объяснить расхождение пока не удастся



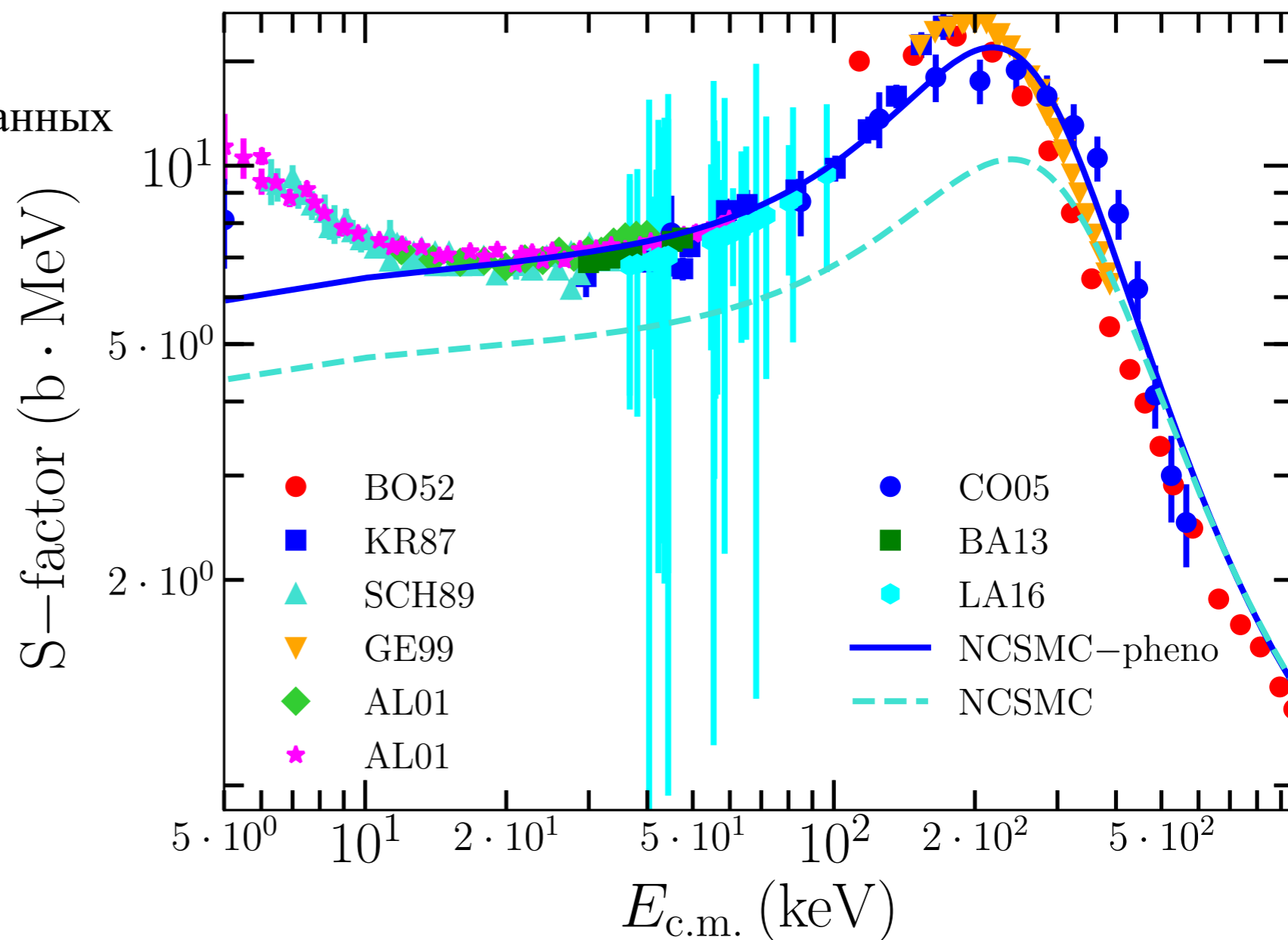
Ab initio many-body calculations

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

Не зависит от экспериментальных данных

Нуклон-нуклонное взаимодействие описано небольшим числом параметров

Поведение S-фактора в области низких энергий зависит от параметров описывающих резонанс





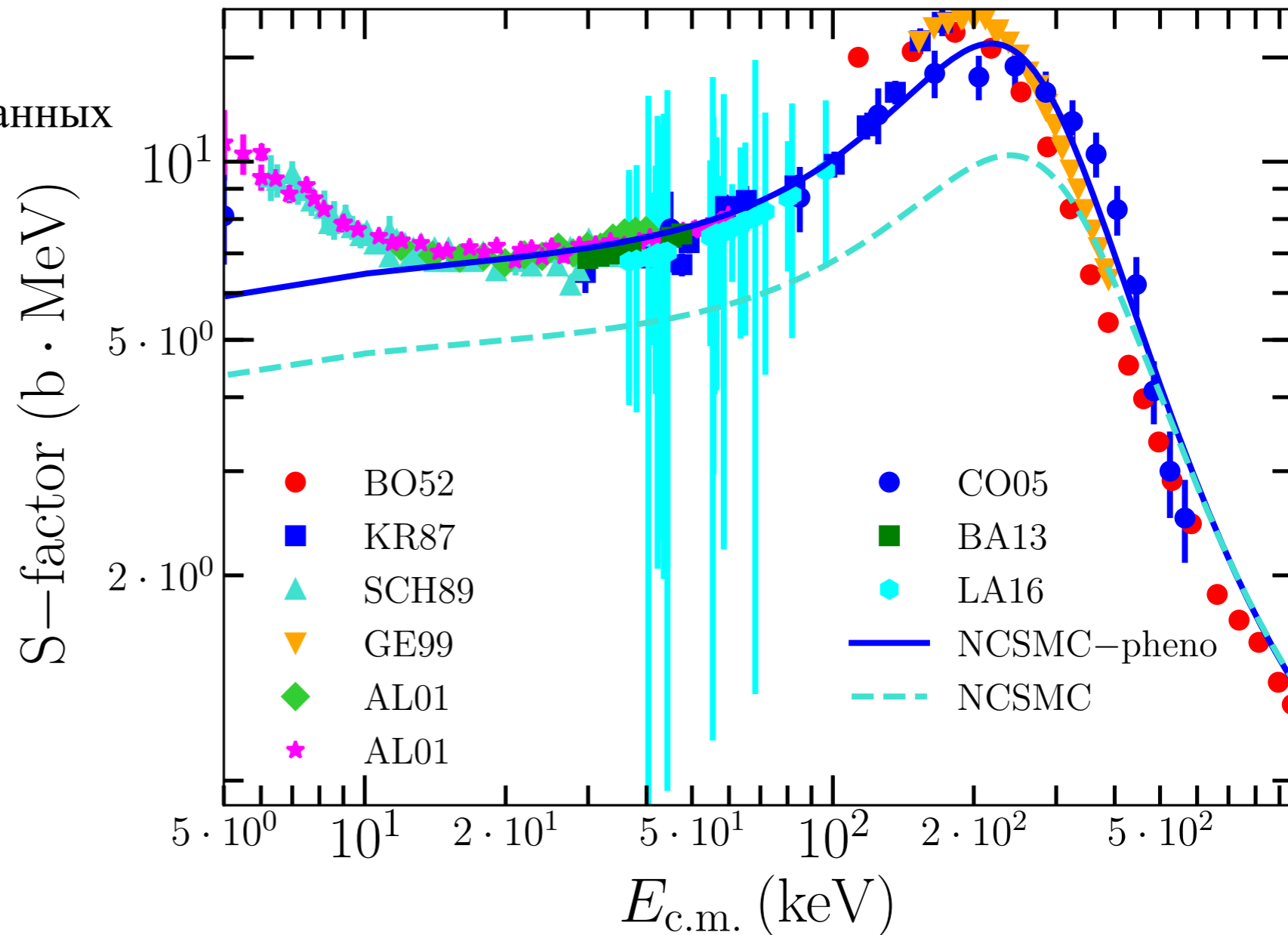
Ab initio many-body calculations

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

Не зависит от экспериментальных данных

Нуклон-нуклонное взаимодействие описано небольшим числом параметров

Поведение S-фактора в области низких энергий зависит от параметров описывающих резонанс

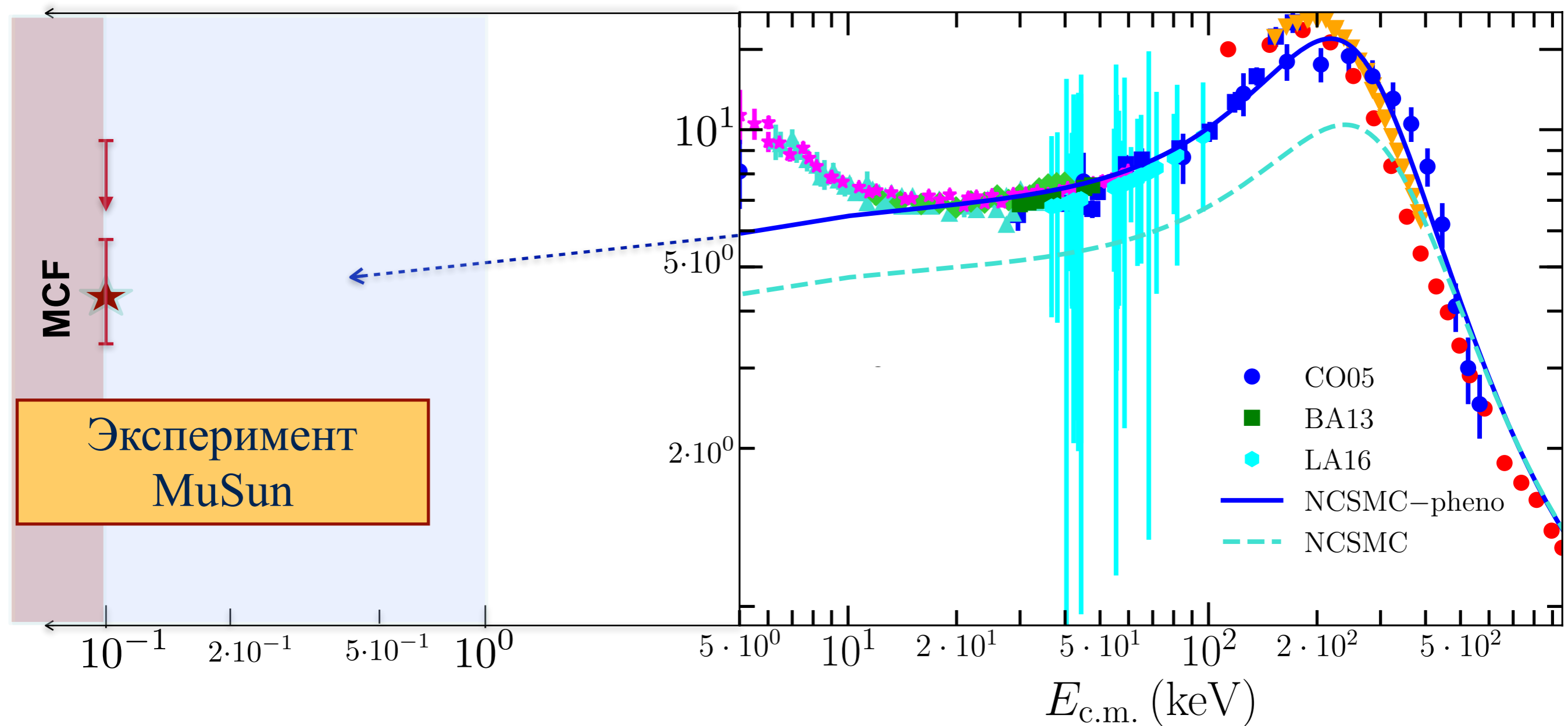


При таком подходе сложно получить абсолютное сечение на "голом" ядре, экстраполяция S-фактора в область сверхнизких энергий затруднена из-за наличия резонанса



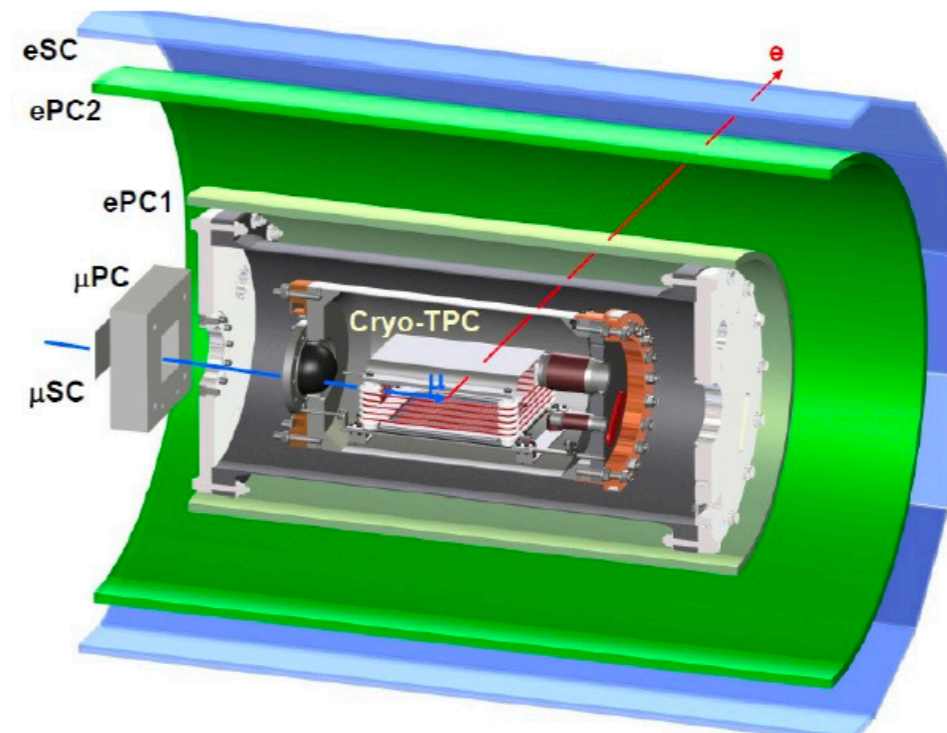
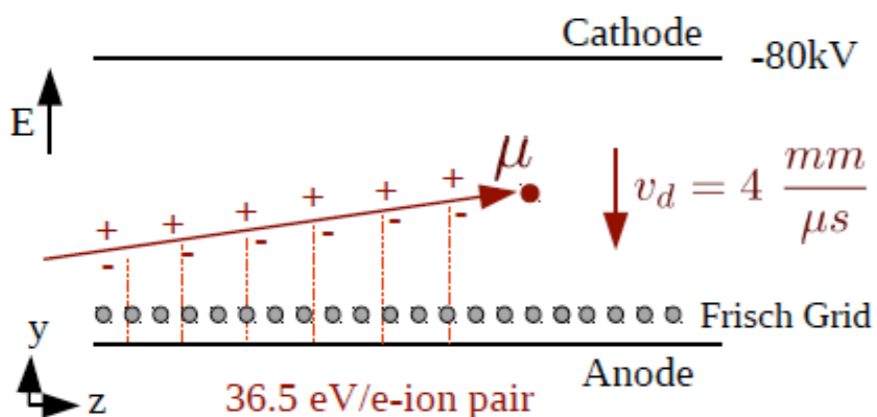
Астрофизический S-фактор в области сверхнизких энергий

Эксперимент по изучению мюонного катализа реакций синтеза позволяет получить сечение на "голом" ядре в области сверхнизких энергий

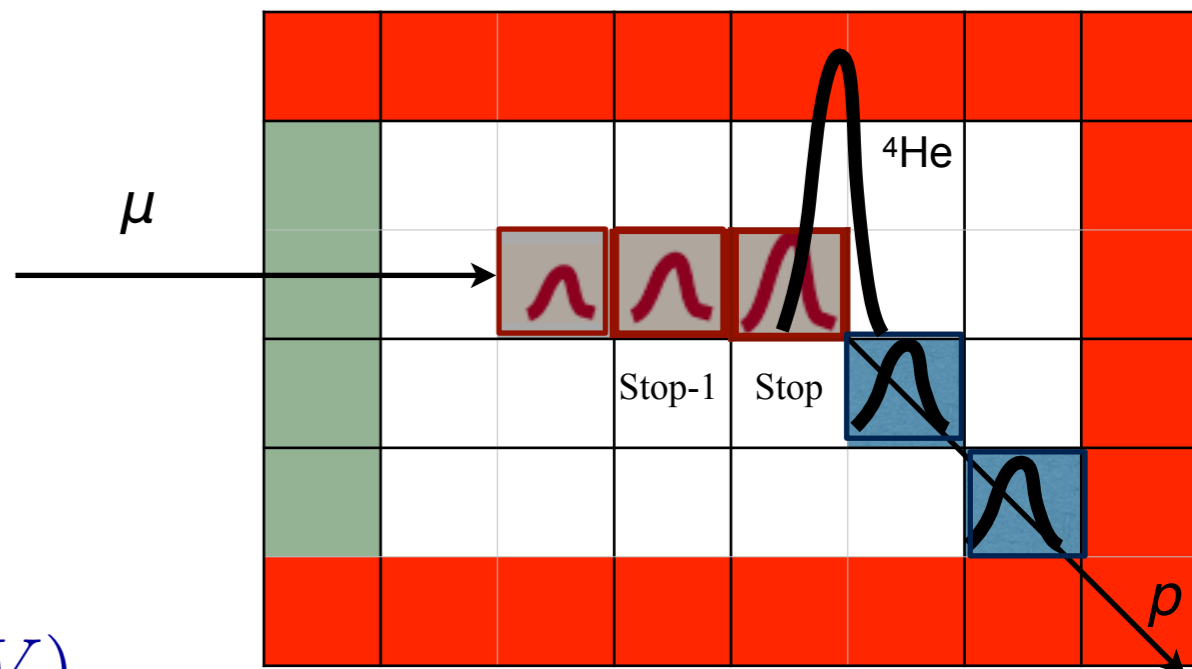
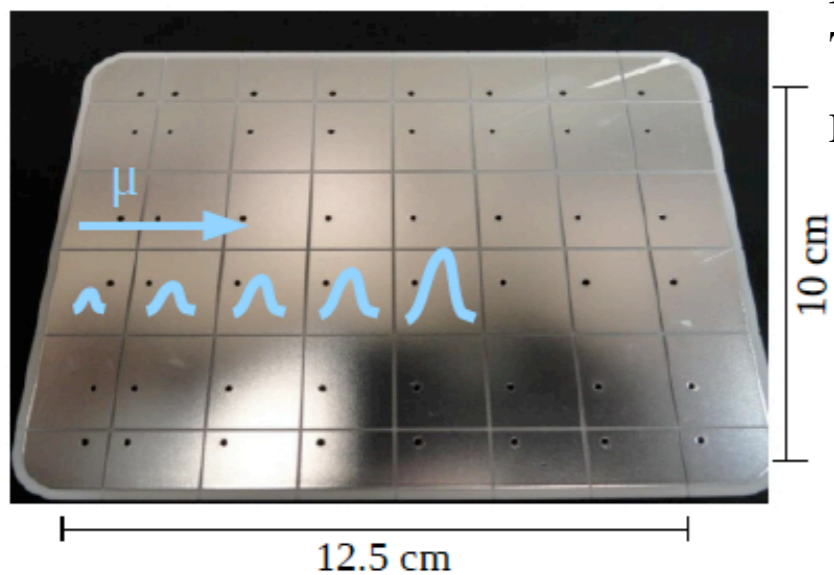




Главная цель эксперимента MuSun - $\mu^- + d \rightarrow n + n + \nu$
 измерение скорости захвата Λ_d мюона на дейтроне с точностью 1.5%



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

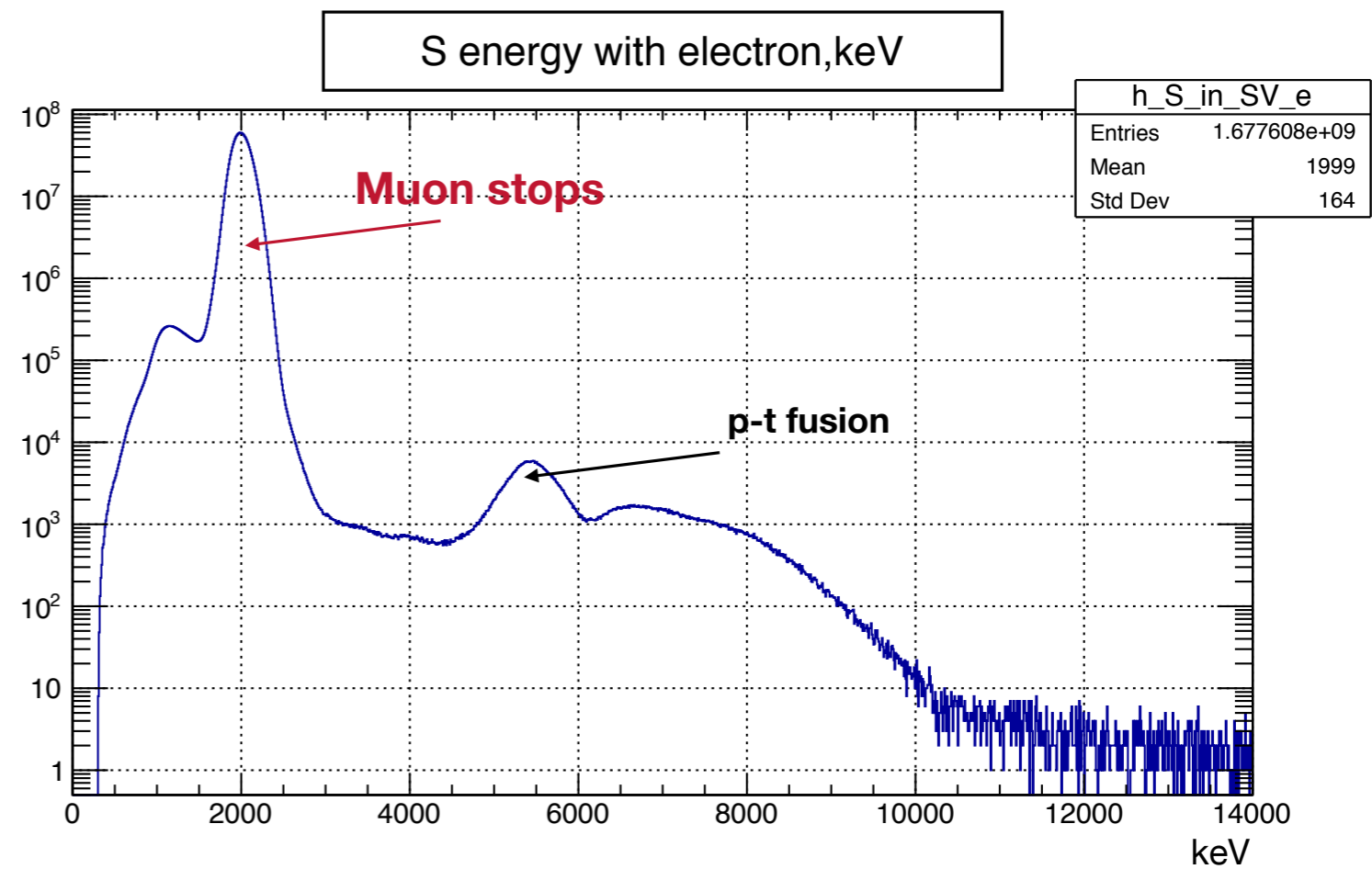
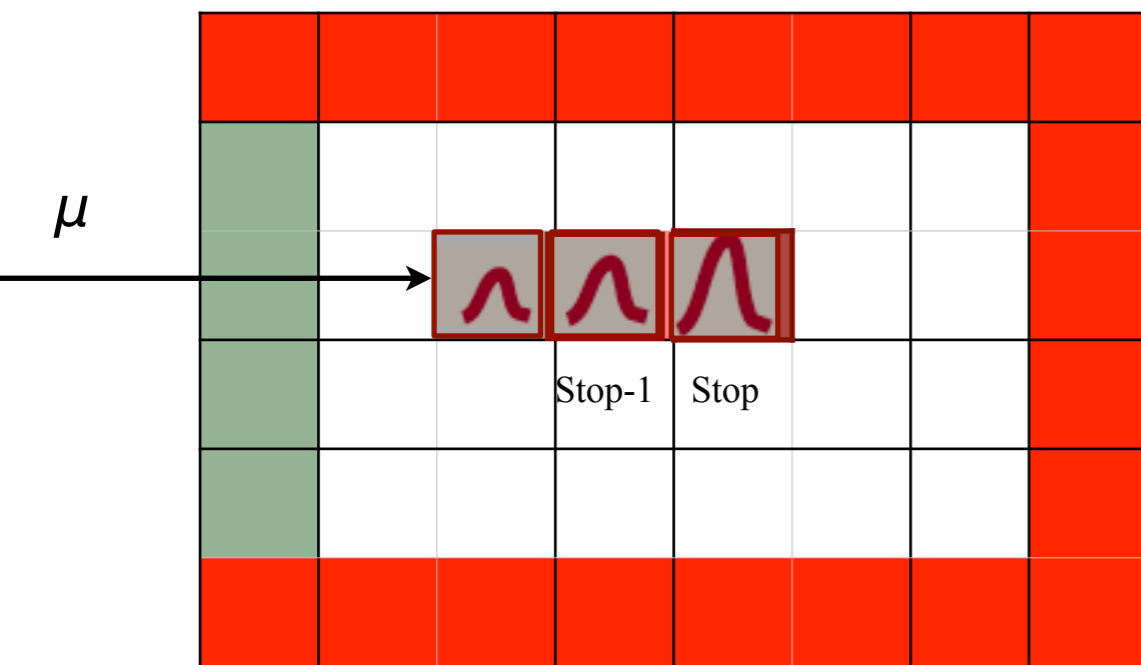


ТРС детектирует мюоны, кот. остановились в центре,
 а так же заряженные продукты реакции





1. Остановка мюона в центре камеры. Пад остановки.

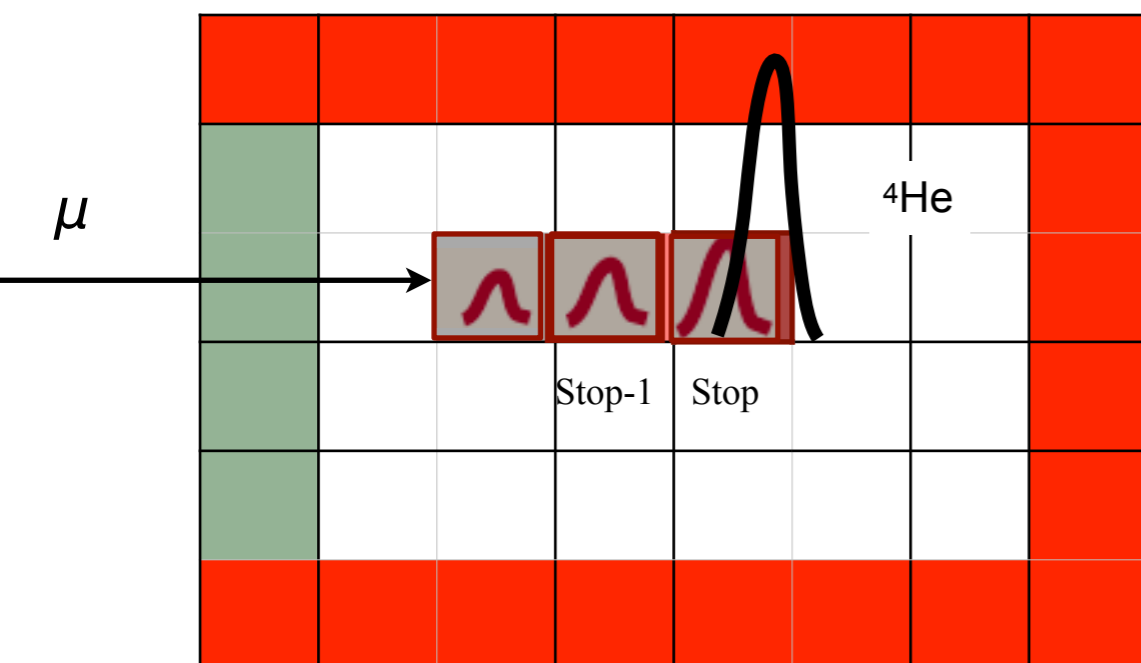
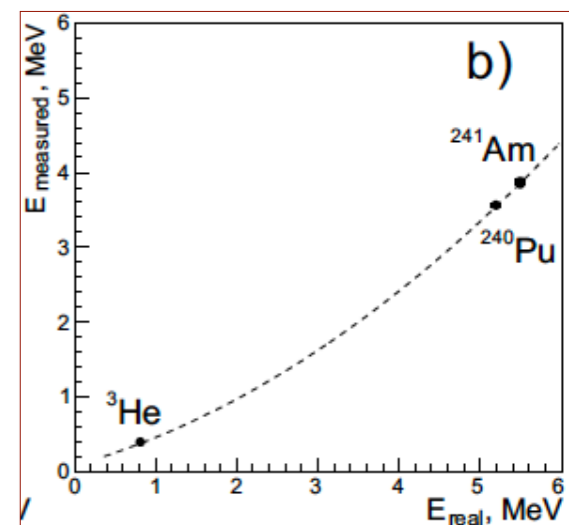




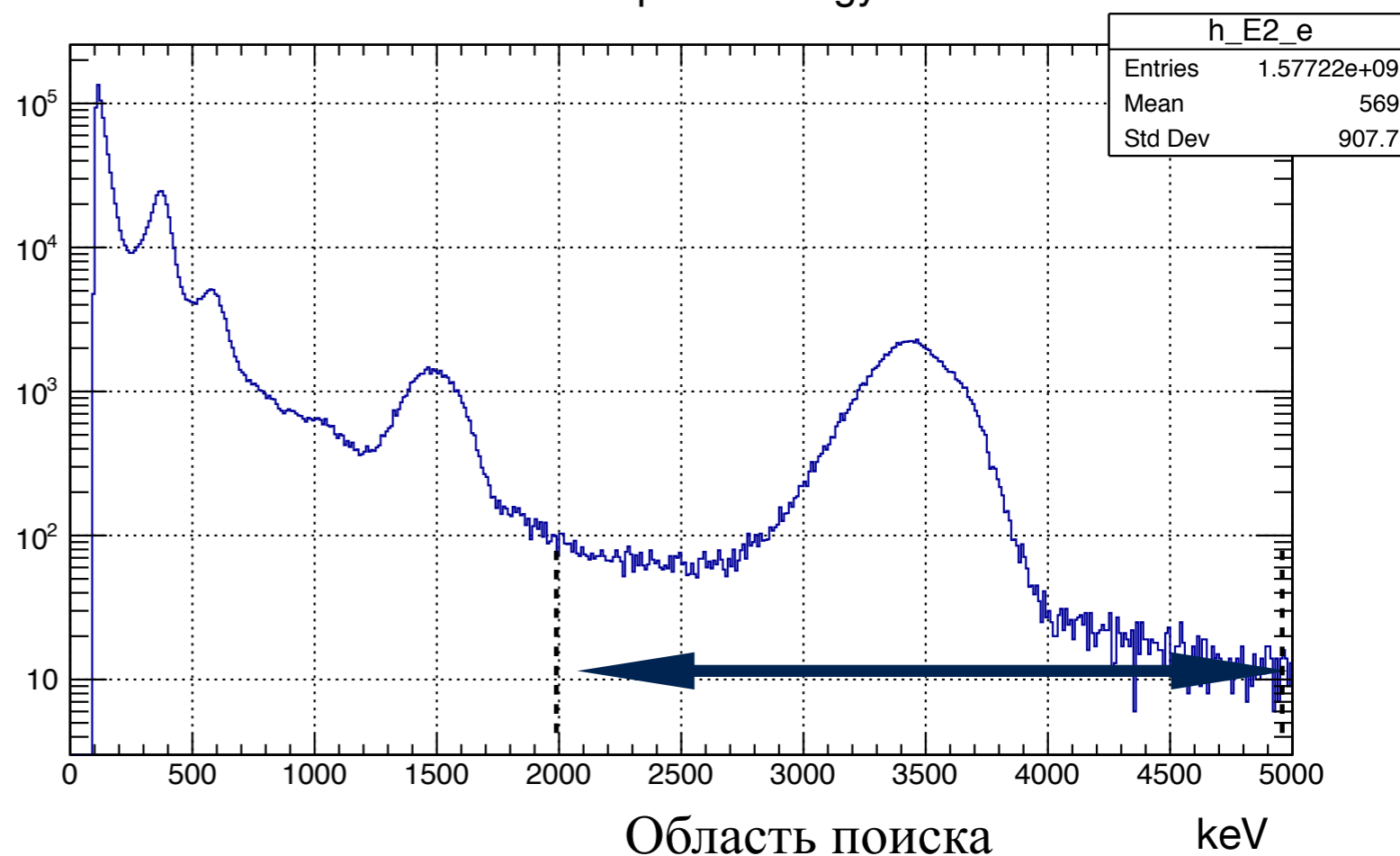
1. Остановка мюона в центре камеры. Пад остановки.
2. На паде остановки второй сигнал большой амплитуды.

$$E_{recomb} = E \cdot (A \cdot \sqrt{\Theta} + B \cdot \Theta), \quad \Theta = Z^2 M / E$$

measured in 2017 in MuSun



Second pulse energy





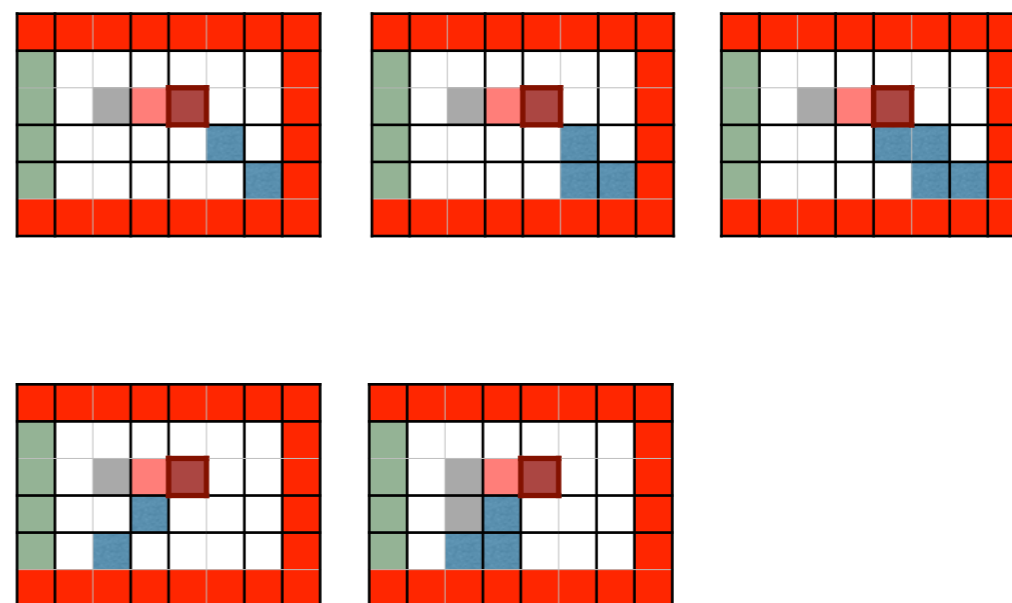
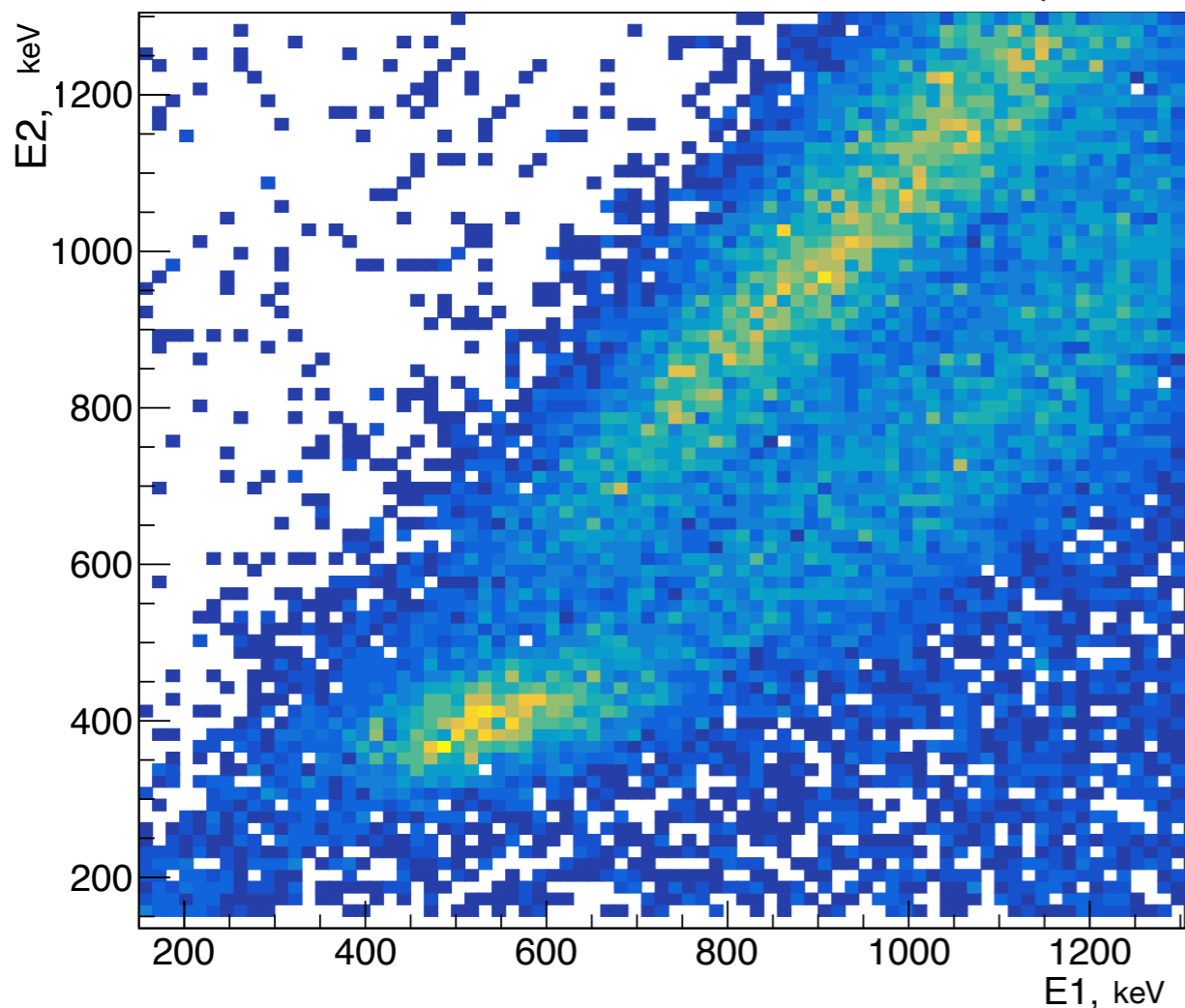
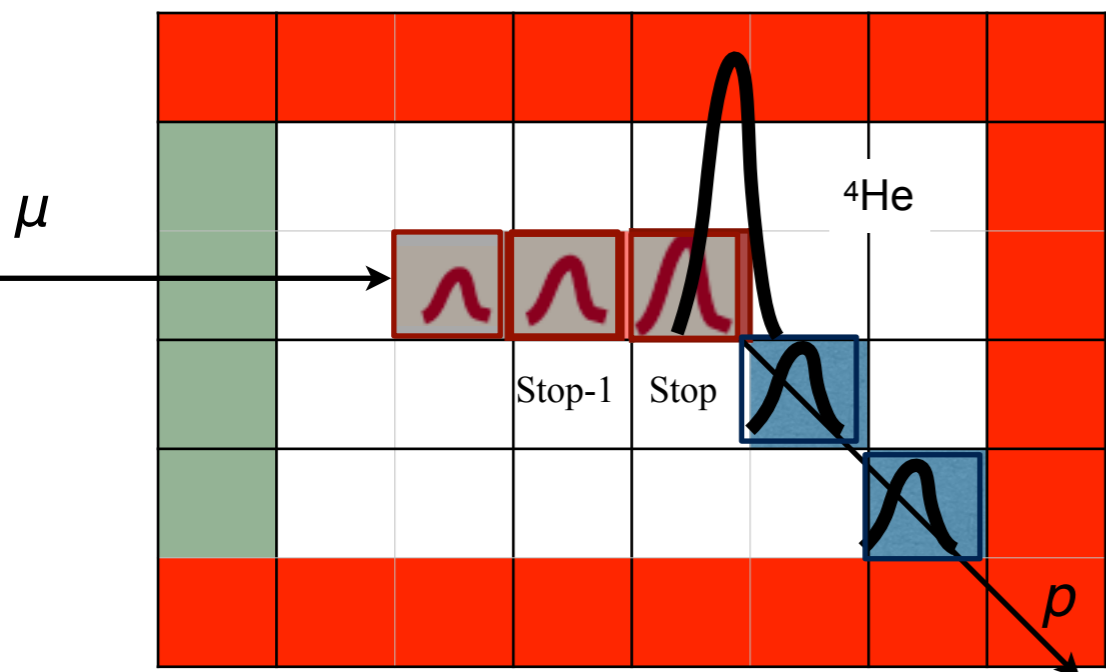
1. Остановка мюона в центре камеры. Пад остановки.

2. На паде остановки второй сигнал большой амплитуды.

3. Сигналы на первом и втором кольцах вокруг пада остановки, последовательно перекрывающиеся по времени

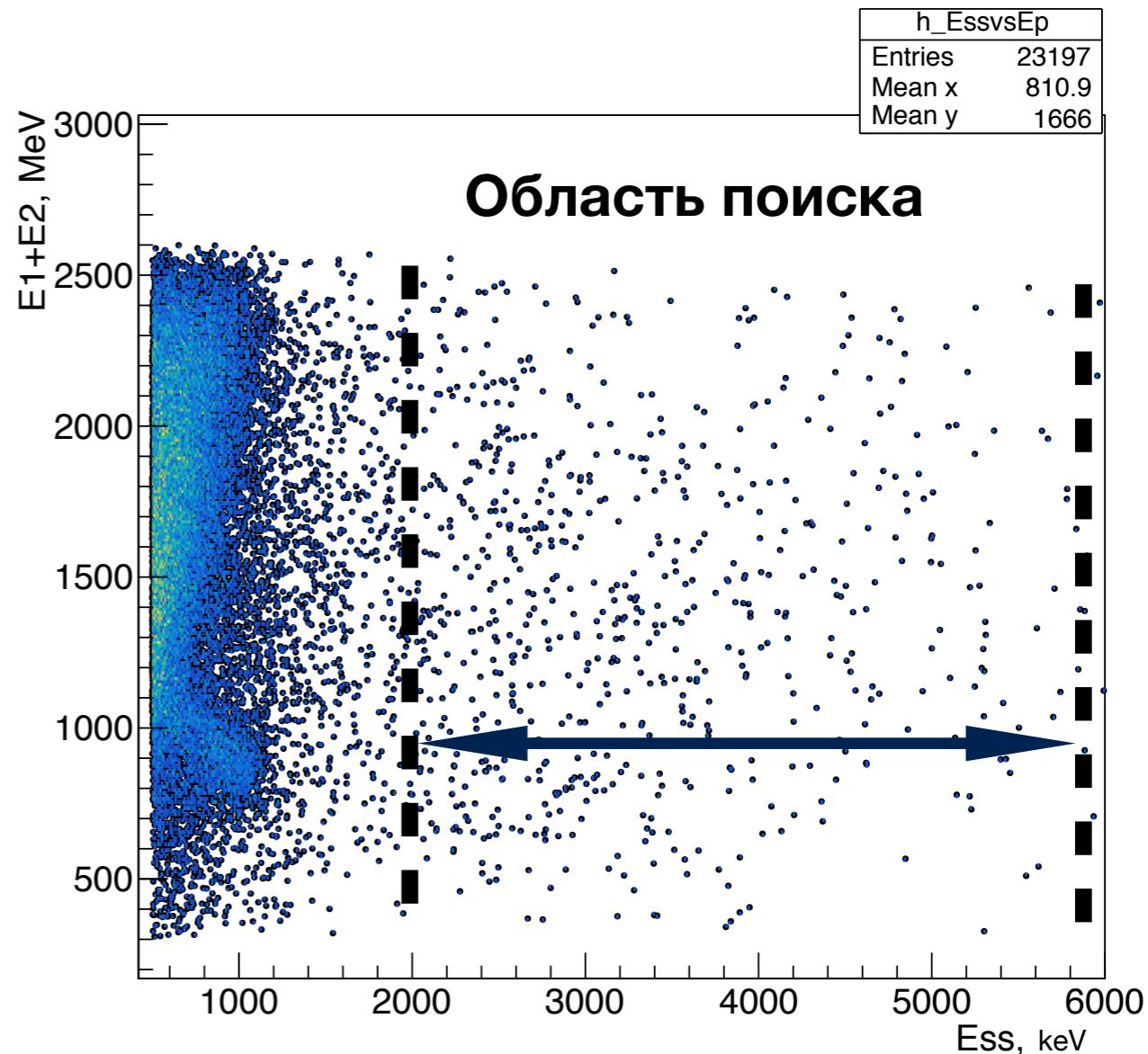
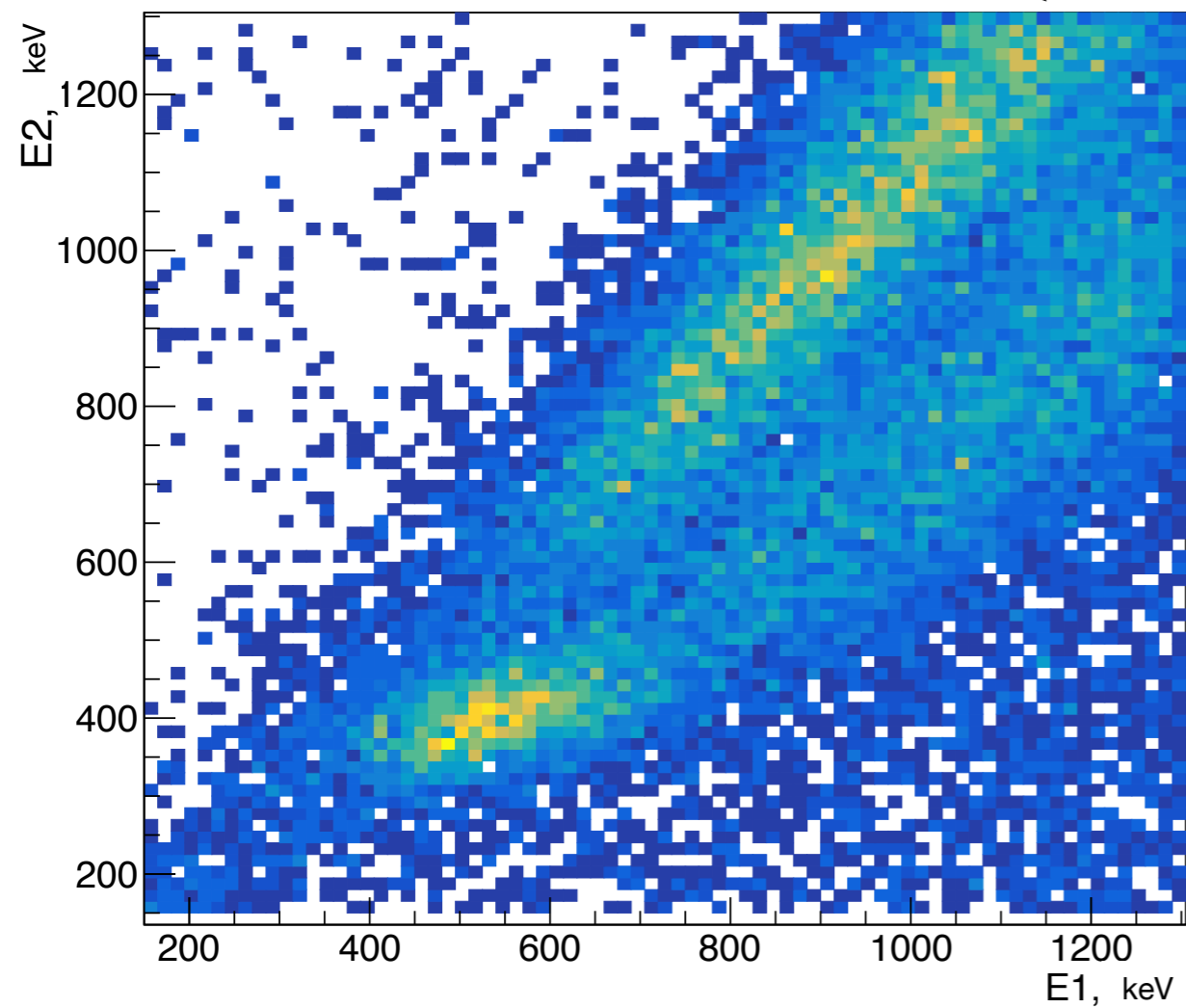
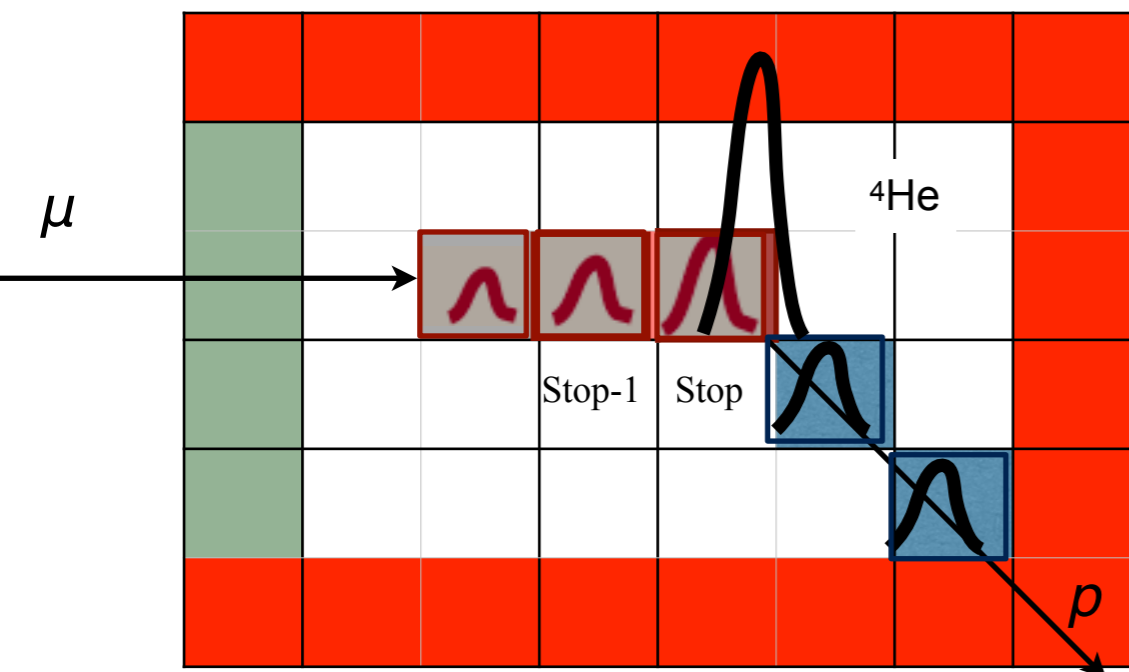
свободный пробег

	E(MeV)	E_{obs} (MeV)	R(mm)
${}^3\text{He}$	0.82	0.32	0.3
n	2.45	0-2.5	(long)
$\mu^3\text{He}$	0.80	0.50	0.6
t	1.01	~ 0.8	0.9
p	3.02	~ 3	12.9
α	3.66		1.7
ρ	14.64		190



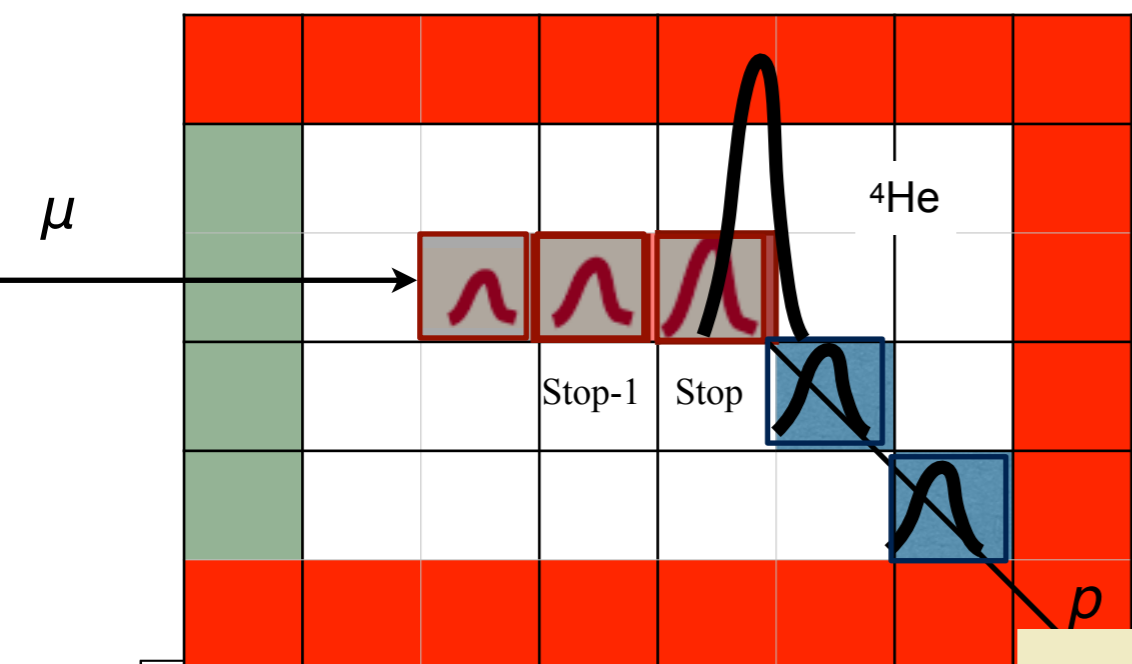


Анализ данных. Отбор полезных событий

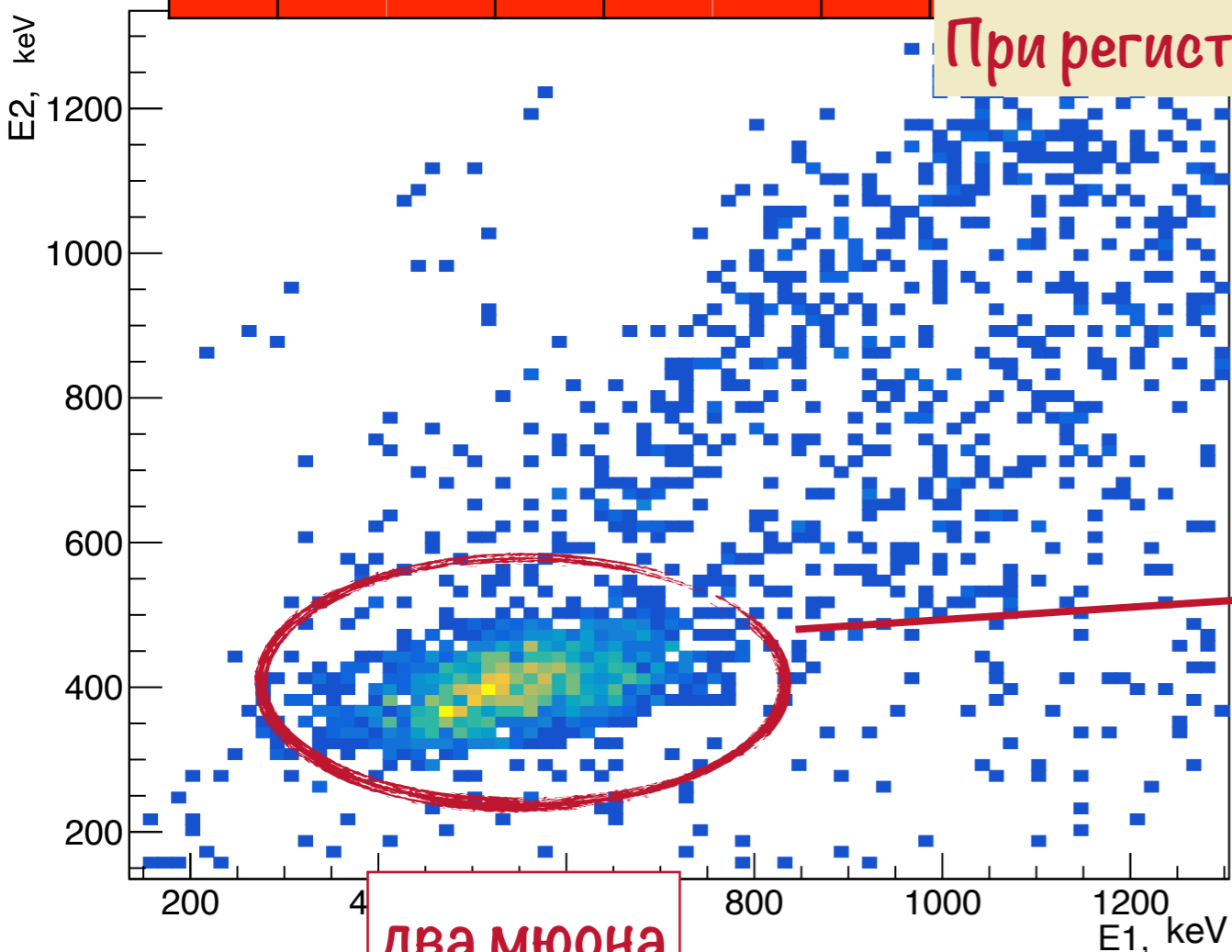




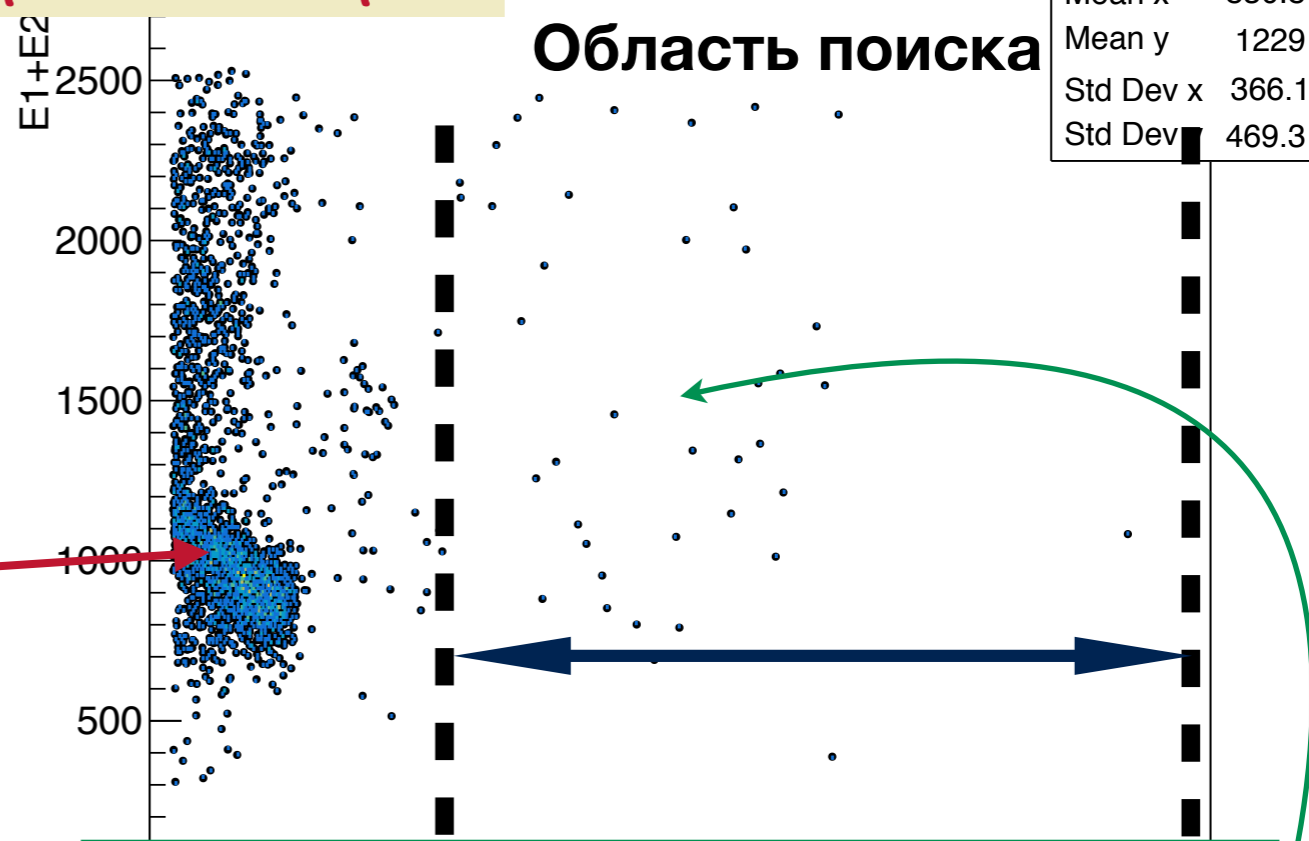
Анализ данных. Отбор полезных событий



При регистрации электрона



два мюона



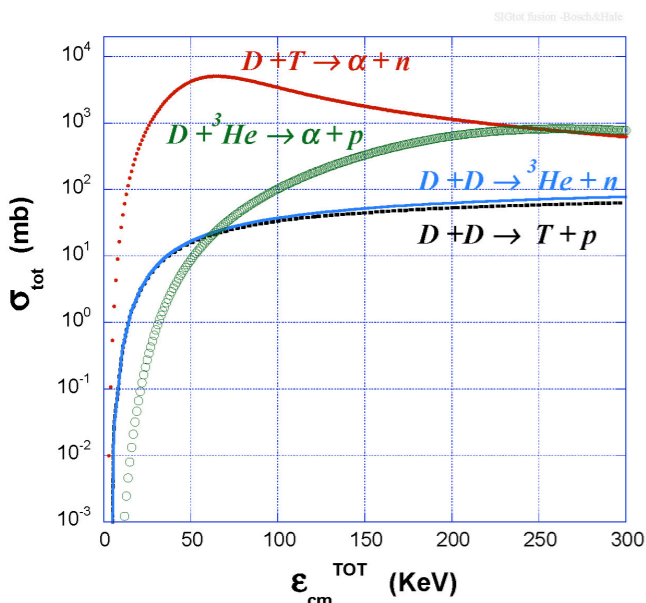
Область поиска

h_EssvsEp	
Entries	2302
Mean x	830.8
Mean y	1229
Std Dev x	366.1
Std Dev y	469.3

Важно оценить долю фоновых событий

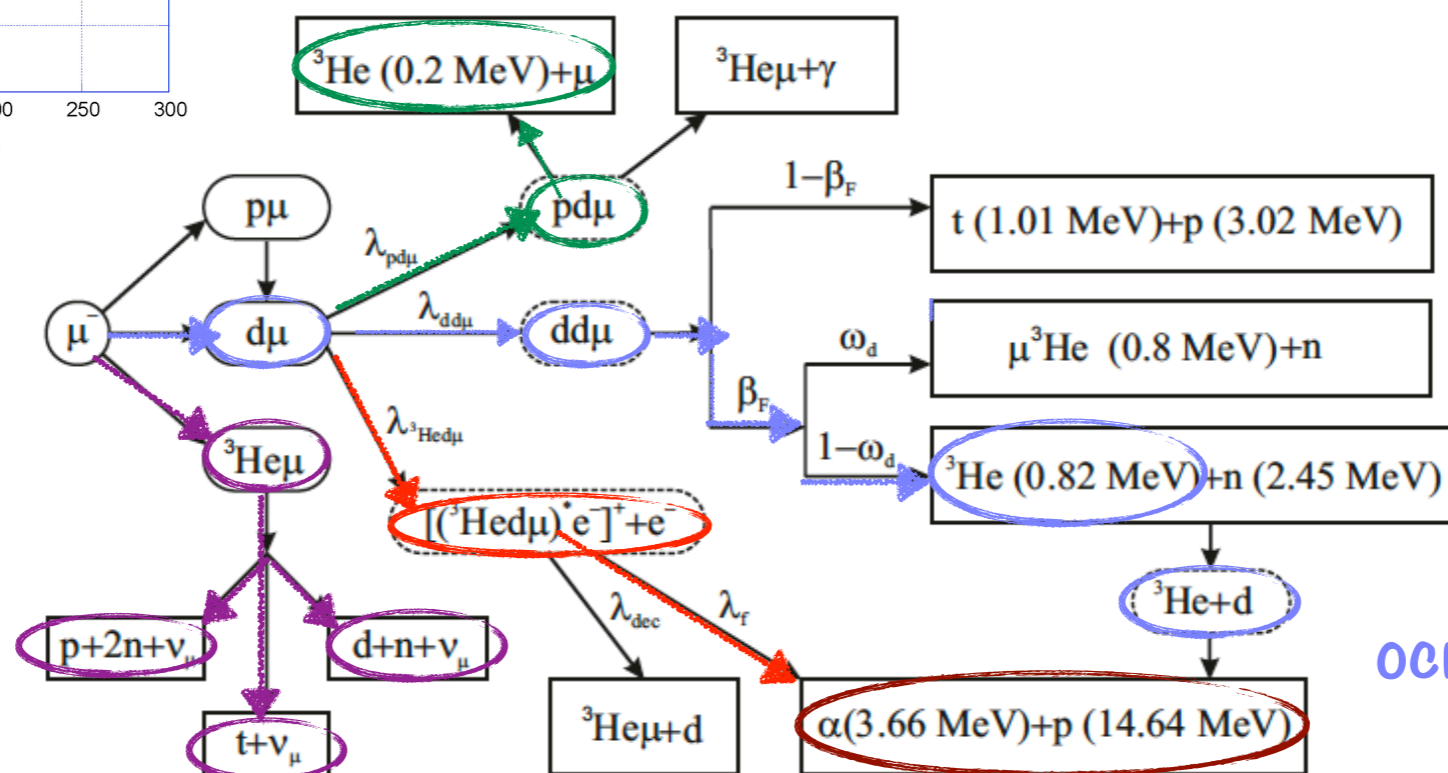


Анализ данных. Источники фона



сечение синтеза мало

Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в HD + 3He



“синтез-на-лесту”
основной источник фона

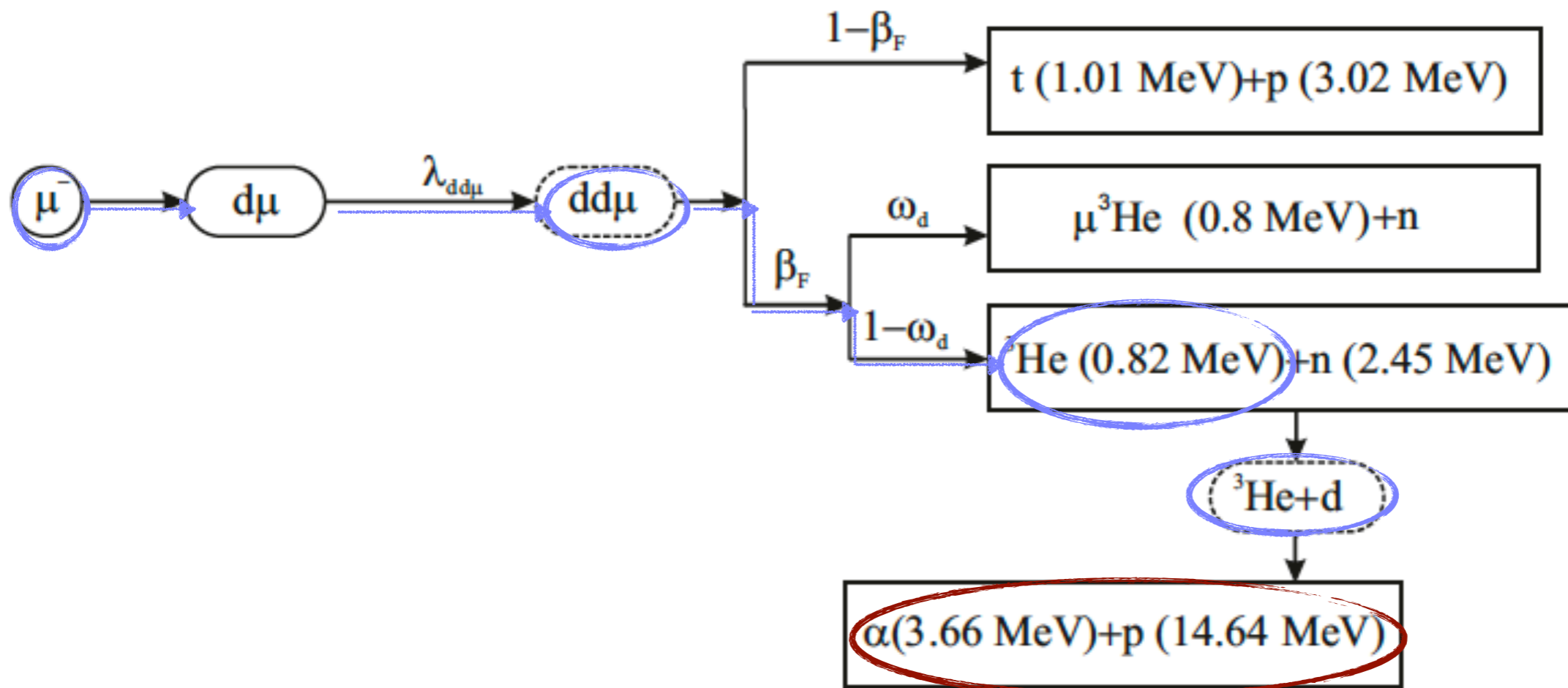
“Break up”

нет длиннопробежной частицы



“Синтез-на-лету” в MuSun эксперименте. Run 8

The MuSun оказался “идеальным” экспериментом по изучению $d^3\text{He}$ “синтез-на-лету” реакции (**ultra-clean D_2 , $6.3 \cdot 10^9$ muon stops**)



Все параметры схемы известны так же как и сечение ${}^3\text{He}(0.82\text{MeV}) + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$ реакции.

Это позволяет предсказать число "синтезов-на-лету", которое должно зарегистрироваться в ТРС.

Сравнение с зарегистрированным числом определило эффективность регистрации $\sim 30\%$.

Так же была протестирована процедура отбора полезных событий



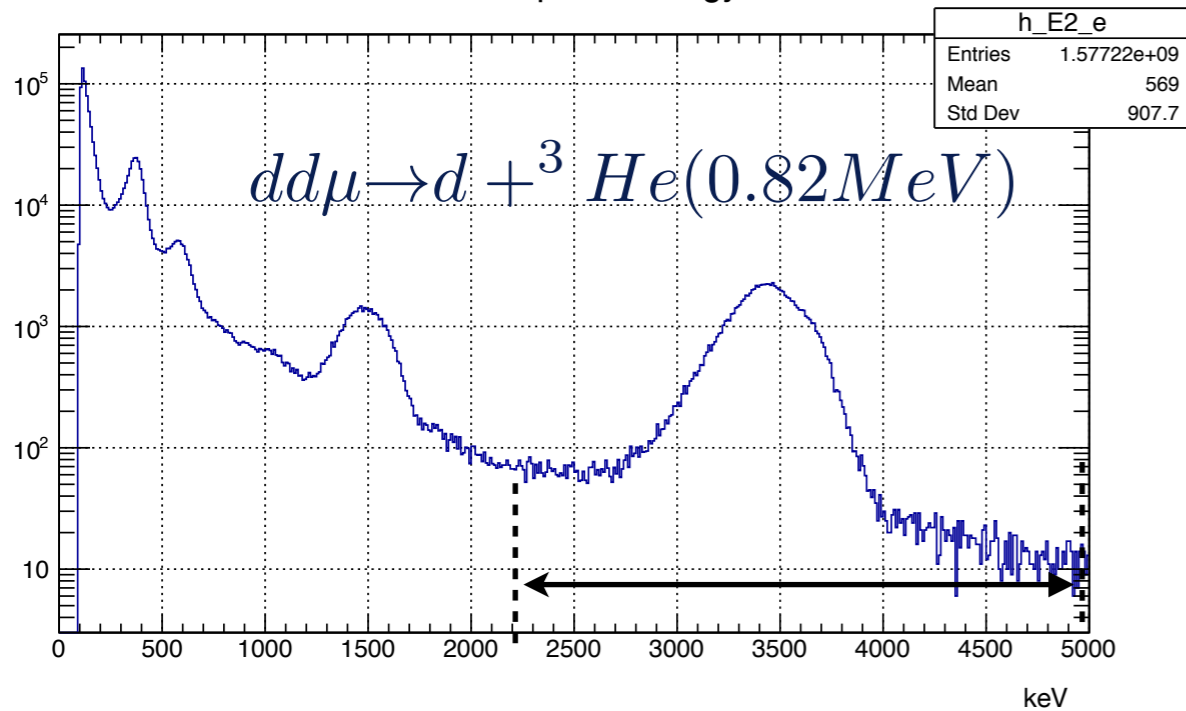
Анализ данных. "Синтез-на-ленту"

$HD+{}^3He$
 $D_2+{}^3He$
 D_2

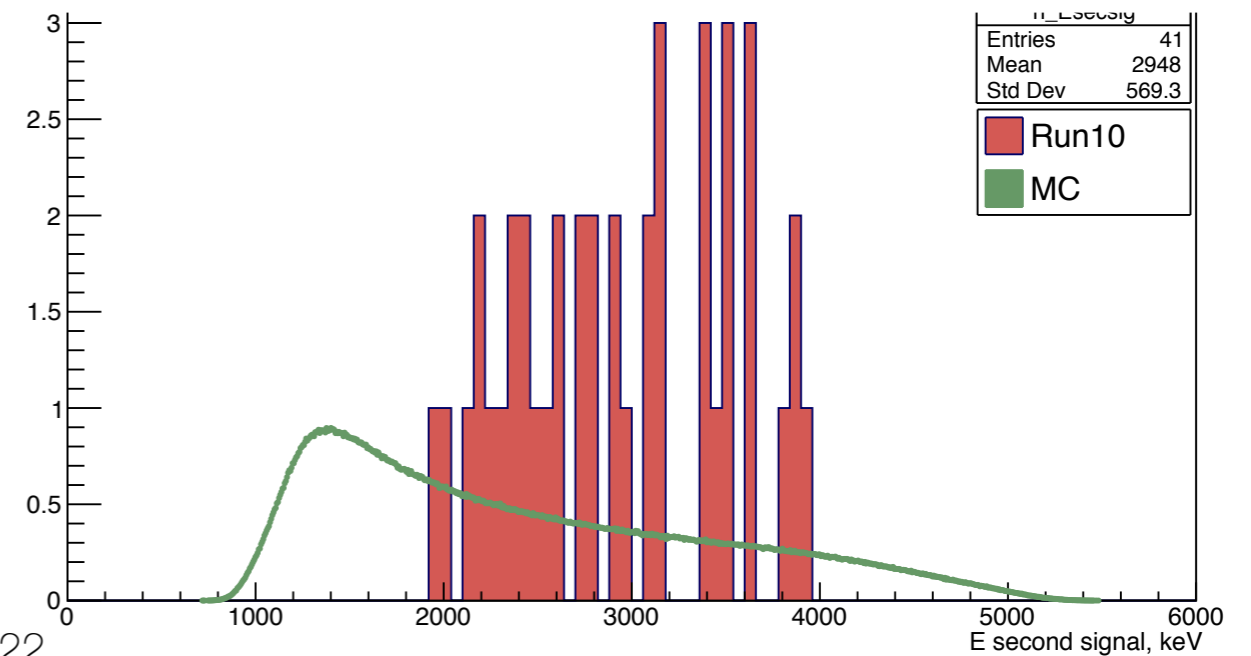
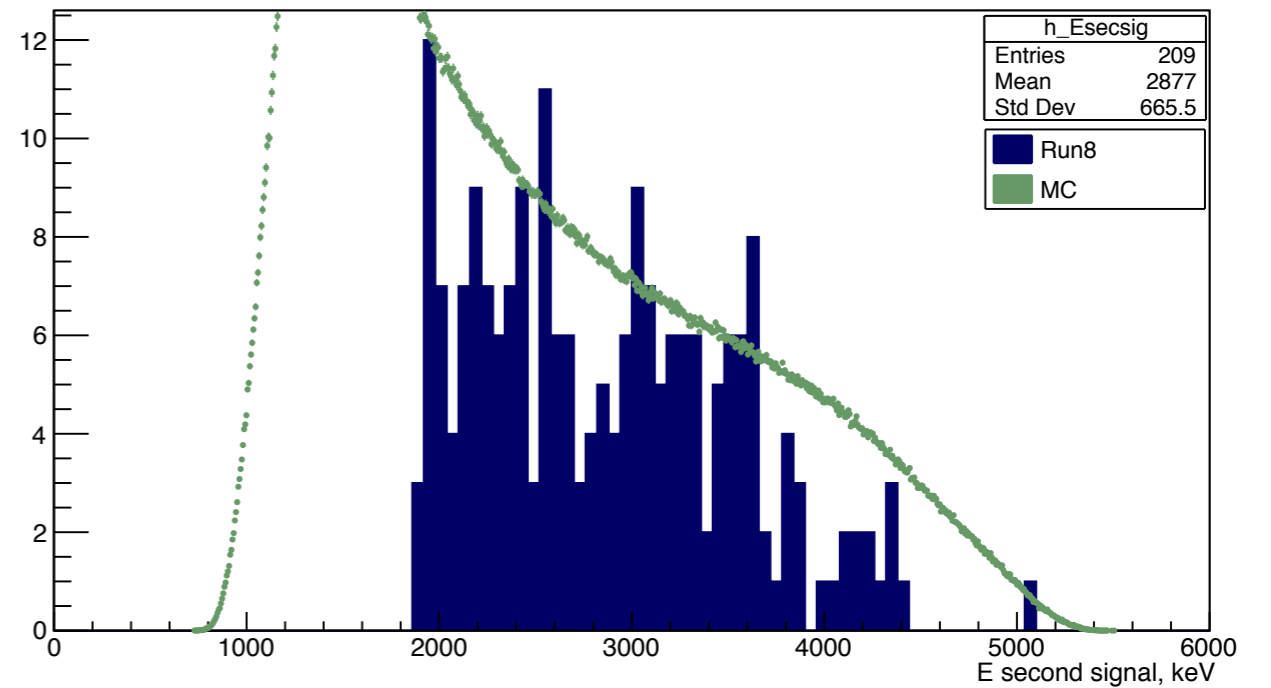
run	μ stop	Weeks	3He	$\mu{}^3He_d$	Ntot	NFinF	Npileup
Run10(2022)	3.85E+09	3	4.00E+05	3.94E+08	17	1.53±0.17	<0.005
Run10(2021)	1.68E+09	3	1.75E+05	1.72E+08	9		
Run9	1.0E+09	1	3.34E+05	9.30E+07	2	1.9±0.22	0.34±0.07
Run8	6.3E+09	4	1.28E+07	-	99	77	22

Second pulse energy

Esecsig

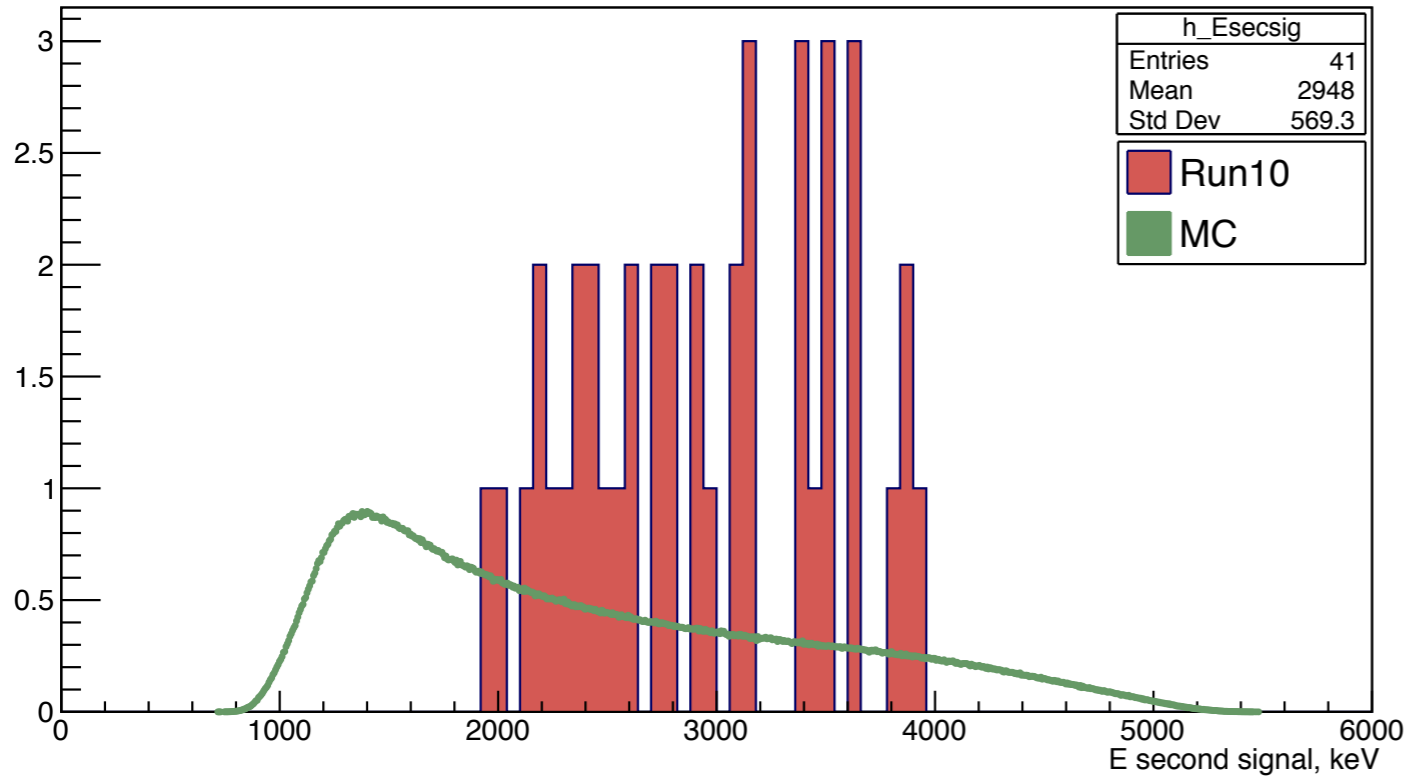


Область поиска



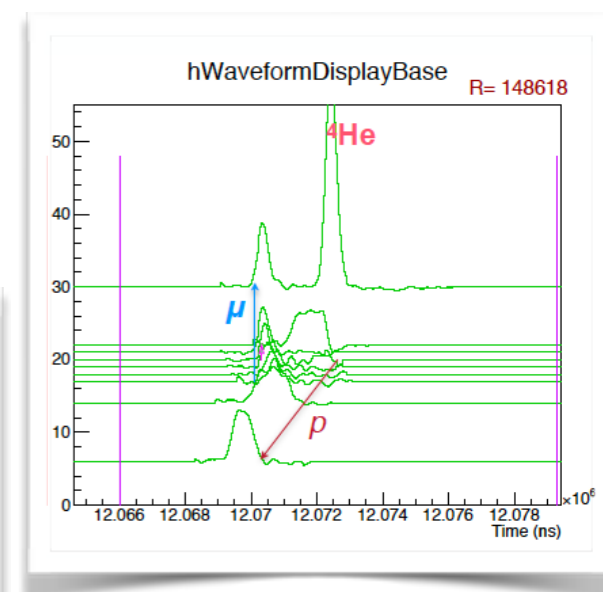
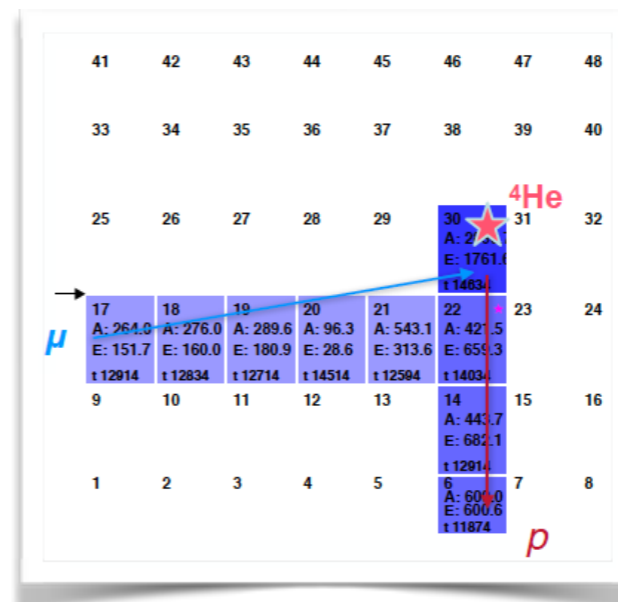
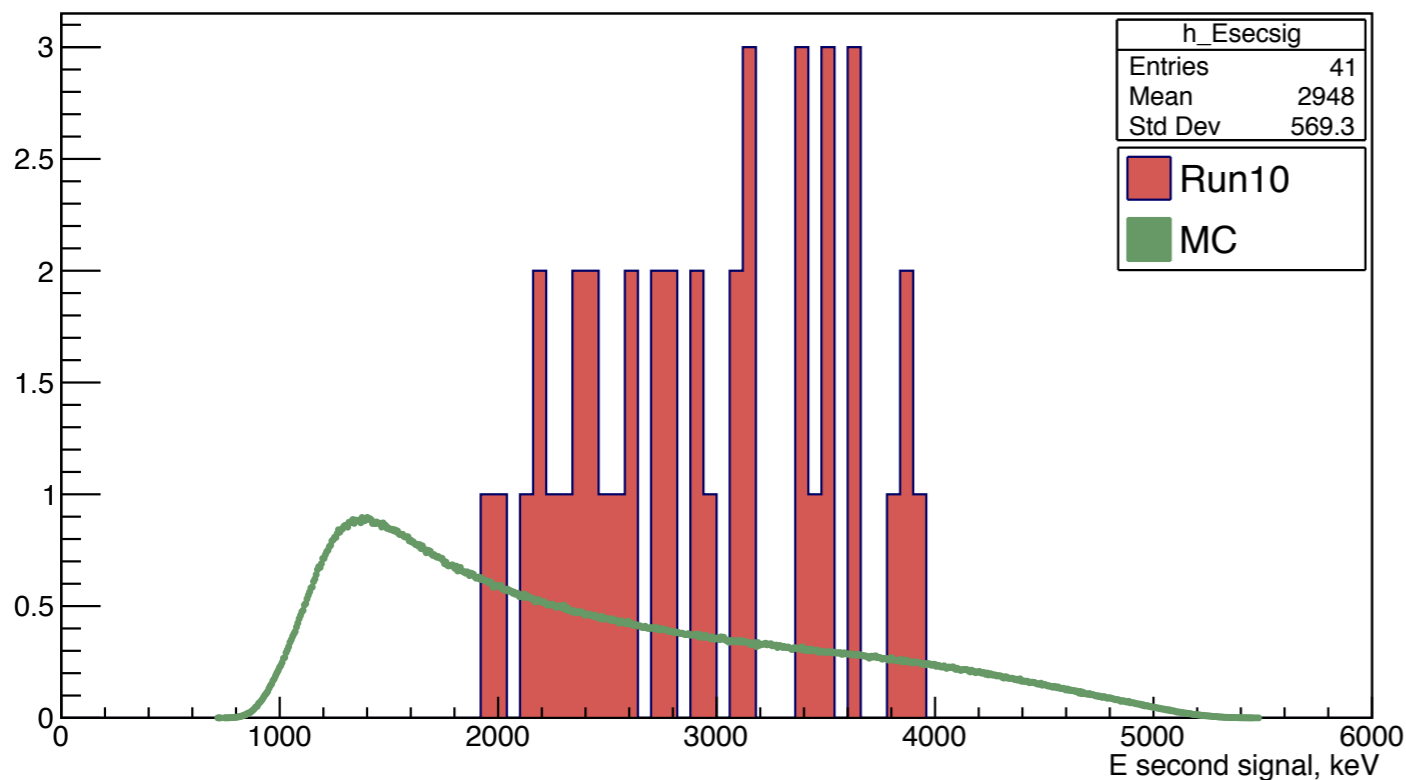


События-кандидаты

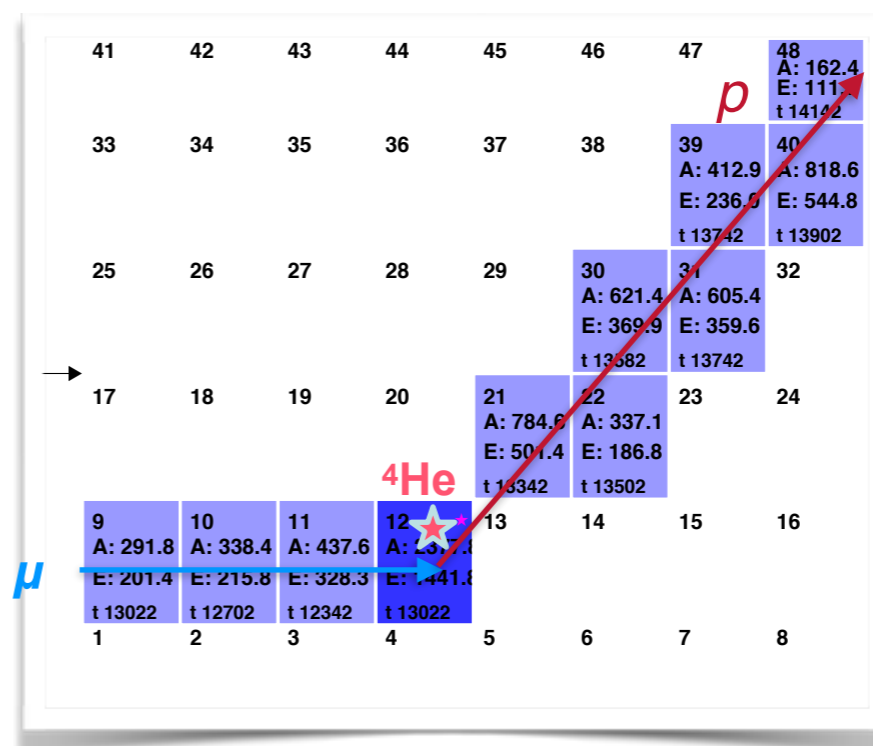
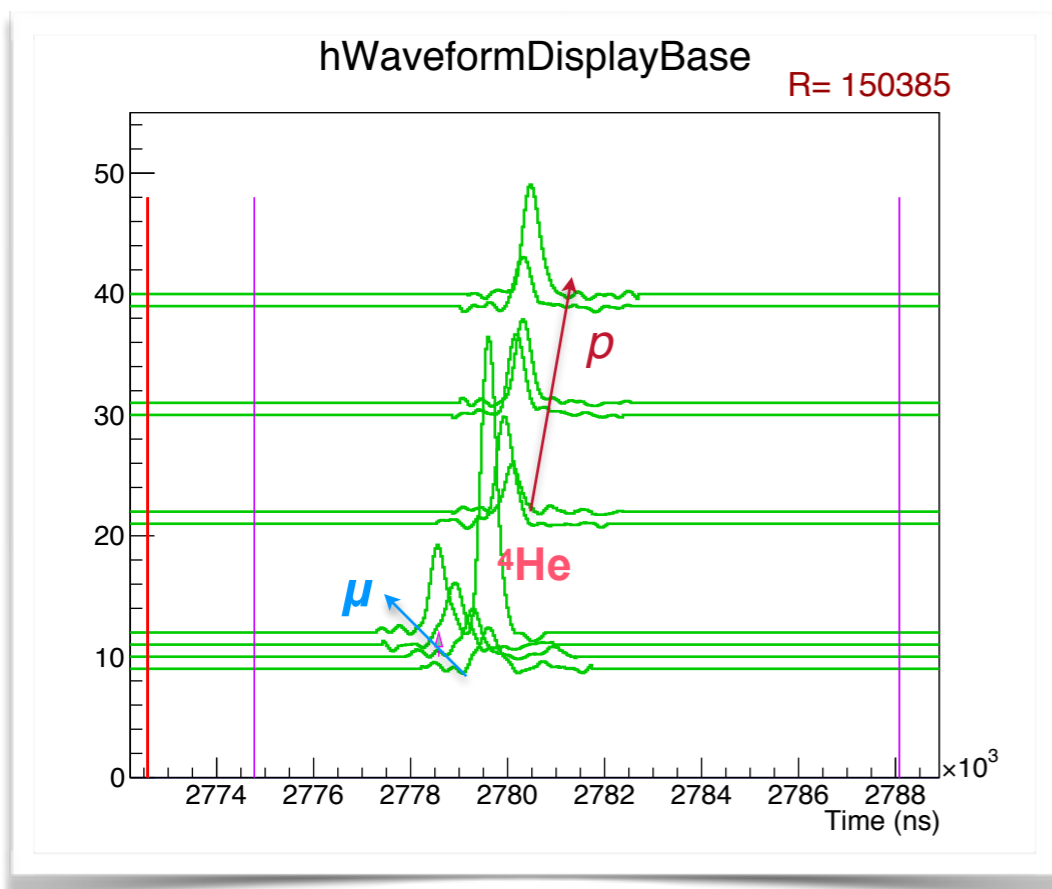




События-кандидаты

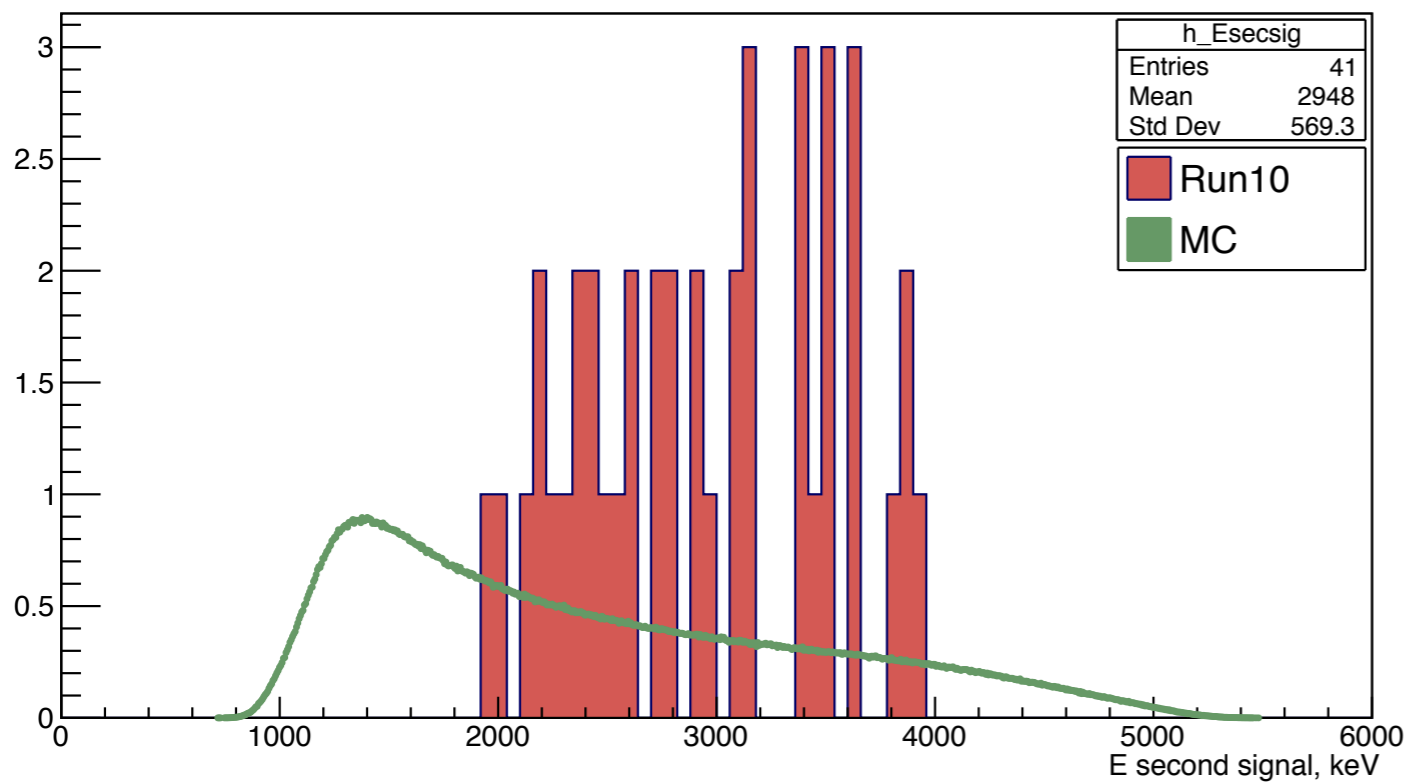


“good” candidates



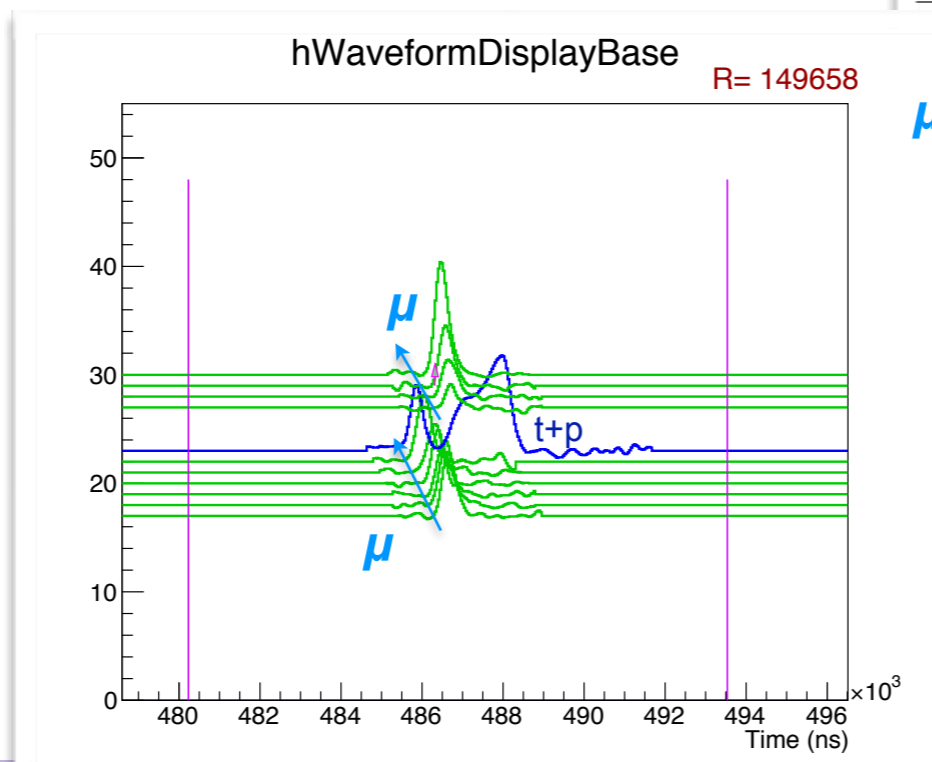


События-кандидаты



“bad” candidate

41	42	43	44	45	46	47	48
33	34	35	36	37	38	39	40
25	26	27 A: 193.2 E: 97.5 t 14646	28 A: 315.8 E: 211.0 t 14606	29 A: 478.2 E: 300.4 t 14526	30 A: 975.3 E: 615.8 t 14406	31	* 32
17 A: 492.2 E: 301.3 t 14606	18 A: 511.4 E: 329.6 t 14526	19 A: 370.7 E: 246.1 t 14446	20 A: 418.7 E: 227.1 t 14366	21 A: 390.9 E: 245.7 t 14286	22 A: 544.2 E: 360.6 t 14006	23 A: 814.1 E: 1309.2 t 15926	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8





HD+³He
D₂+³He
D₂

run	μ stop	Weeks	³ He	μ ³ He _d	N _{tot}	N _{FinF}	N _{pileup}
Run10(2022)	3.85E+09	3	4.00E+05	3.94E+08	17	1.53±0.17	<0.005
Run10(2021)	1.68E+09	3	1.75E+05	1.72E+08	9		
Run9	1.0E+09	1	3.34E+05	9.30E+07	2	1.9±0.22	0.34±0.07
Run8	6.3E+09	4	1.28E+07	-	99	77	22

вероятность протекания синтеза в мезомолекуле

МОДЕЛЬНО НЕЗАВИСИМЫЙ

экспериментально измеренный параметр

$$P_F(^3\text{He}\mu d \rightarrow ^4\text{He} + p + \mu) = N_F / [N_{^3\text{He}\mu d} \epsilon_F]$$

“эффективная” скорость реакции синтеза

$$\lambda_F = \lambda_{dec} P_F = \lambda_{dec} N_F / N_{^3\text{He}\mu d} \epsilon_F$$

скорость распада (теория)

$$\lambda_{dec} = 7 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$$

эффективность регистрации

$$\epsilon_f = 0.30$$

$$P_F = (1.44 \pm 0.32) \times 10^{-7}$$

$$\lambda_F = (10.08 \pm 2.24) \times 10^4 \text{ s}^{-1}$$



Обзор экспериментальных данных

E.M.Maev et al. *Hyperfine Int.* 118, 171 (1999)

верхний предел для скорости реакции

Experiment	Year	Gas mixture	Fusion rate λ_f, s^{-1}	Comments
PNPI	1990	D ₂ + ³ He(5%)	$< 4 \cdot 10^8$	Upper limit 90% CL
PNPI-PSI	1998	HD + ³ He(5,6%)	$< 6 \cdot 10^4$	Upper limit 90% CL
JINR-PSI	1998/2006	D ₂ + ³ He(5%)	$(4.5 \pm 2.6/2.0) \cdot 10^5$	Possible observation
<p>первое наблюдение реакции</p> <p>V.M.Bystritsky et al. <i>Eur. Phys. J.</i> 38(3), 455 (2006)</p>				
Theory M.Faifman	1999		$2.5 \cdot 10^4$	precision 30%
PNPI-PSI	2015-2016	D ₂ + ³ He(5%)	$< 7.7 \cdot 10^4$	Upper limit 90% CL
PNPI-PSI	2017-2021	HD + ³He(11.3%)	$(1.01 \pm 0.22) \cdot 10^5$	Preliminary



1. В эксперименте зарегистрированы события мюонного катализа $d^3\text{He}$ синтеза, что является экспериментальным подтверждением теории MCF
2. Получен предварительный результат по измерению
 - модельно независимой вероятности протекания $d^3\text{He}$ синтеза при распаде $[d^3\text{He}\mu]_J$ мезомолекулы образованной в $\text{HD} + {}^3\text{He}$ газовой смеси при температуре 31К
 - а так же скорость реакции синтеза
3. Результат не согласуется в теоретическим предсказанием
 - дополнительная проверка вычислений
 - проверка теоретических расчетов
 - вычисление S-фактора



Спасибо за внимание!!