



Поиск мюонного катализа $d^3\text{He}$ ядерного синтеза
в рамках эксперимента MuSun

П. Кравченко



Мотивация

Ядерная реакция синтеза

W.H.Geist et al. Phys.Rev. C, 60, 054003, (2003)



играет важную роль

- астрофизика
- теория ядерных реакций
- источник термоядерной энергии
- ...

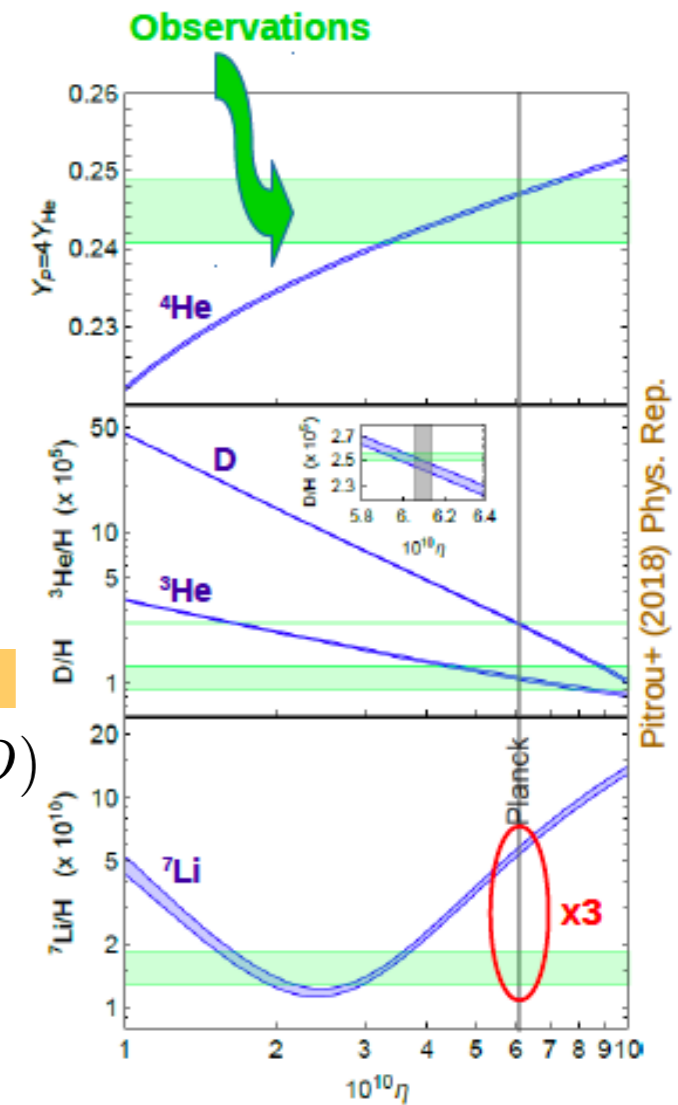
Процесс первичного ядерного синтеза легких элементов в ранней вселенной

Стандартная модель нуклеосинтеза большого взрыва (SBBN) предсказывает образование легких ядер (${}^2\text{H}$, ${}^3,4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$).

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

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

Сегодня, распространенность “abundance” изотопов ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$ (or D) соответствует прогнозам SBBN.



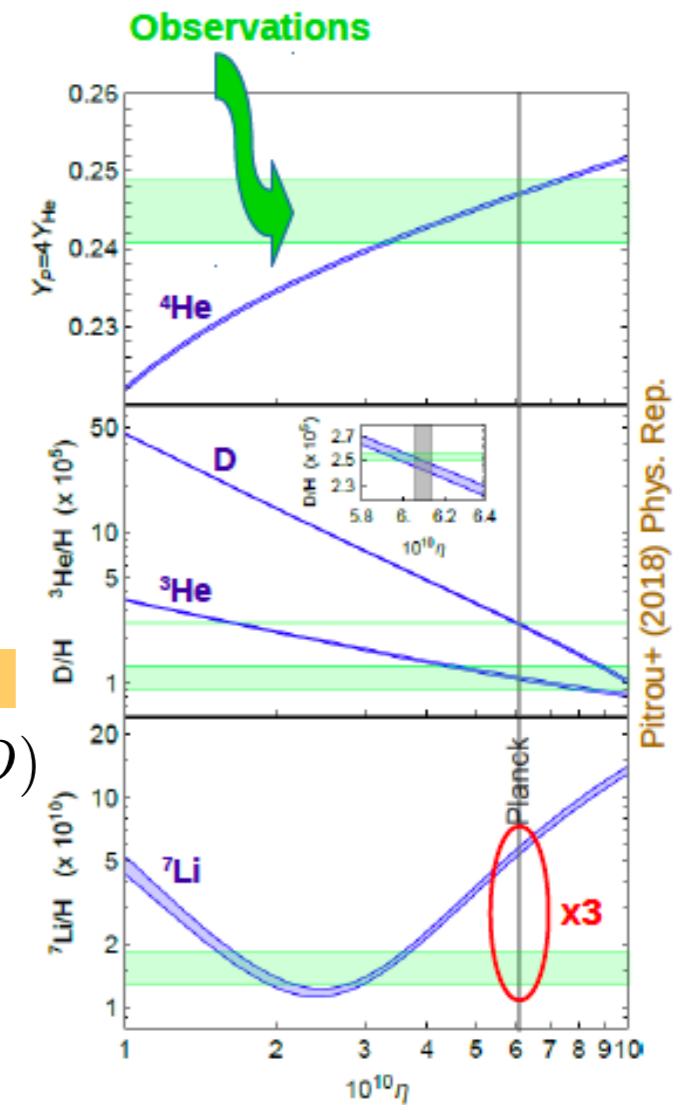
Процесс первичного ядерного синтеза легких элементов в ранней вселенной

Стандартная модель нуклеосинтеза большого взрыва (SBBN) предсказывает образование легких ядер (${}^2\text{H}$, ${}^3,4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$).

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

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

Сегодня, распространенность “abundance” изотопов ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$ (or D) соответствует прогнозам SBBN.



Для ${}^3\text{He}$ экспериментально определен лишь верхний предел ${}^3\text{He}/\text{H} \leq 1.3 \cdot 10^5$

Предсказания для отношения ${}^7\text{Li}/\text{H}$ расходятся с наблюдаемыми измерениями с фактором 3 !!

Астрофизическая проблема
“Lithium depletion” (Недостаток лития) не решена

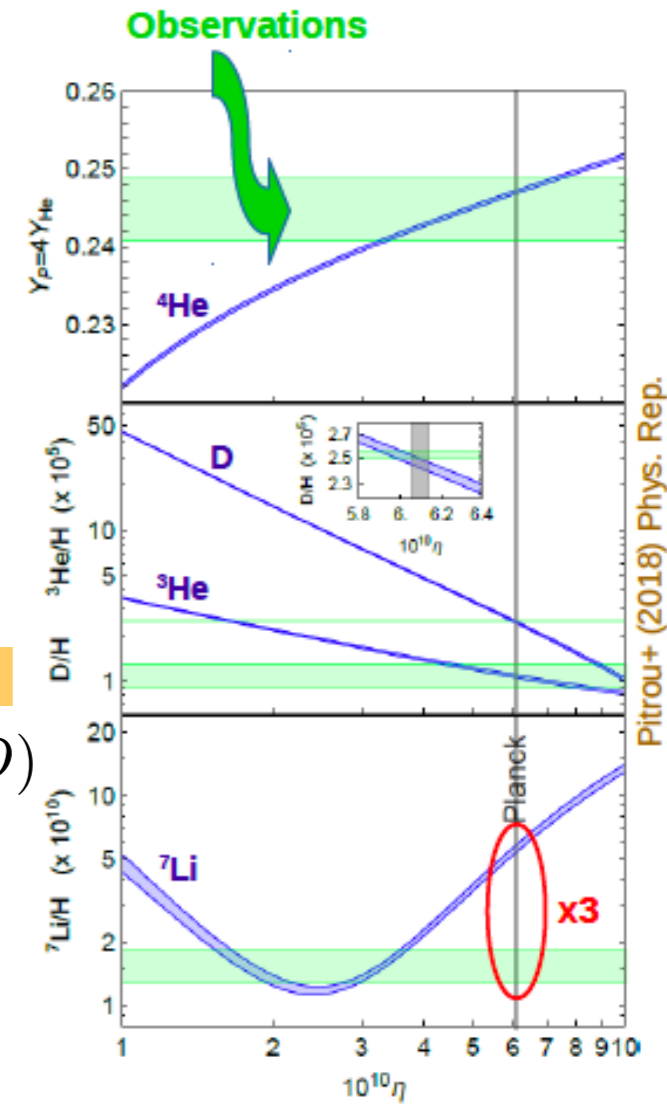
Процесс первичного ядерного синтеза легких элементов в ранней вселенной

Стандартная модель нуклеосинтеза большого взрыва (SBBN) предсказывает образование легких ядер (${}^2\text{H}$, ${}^3,4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$).

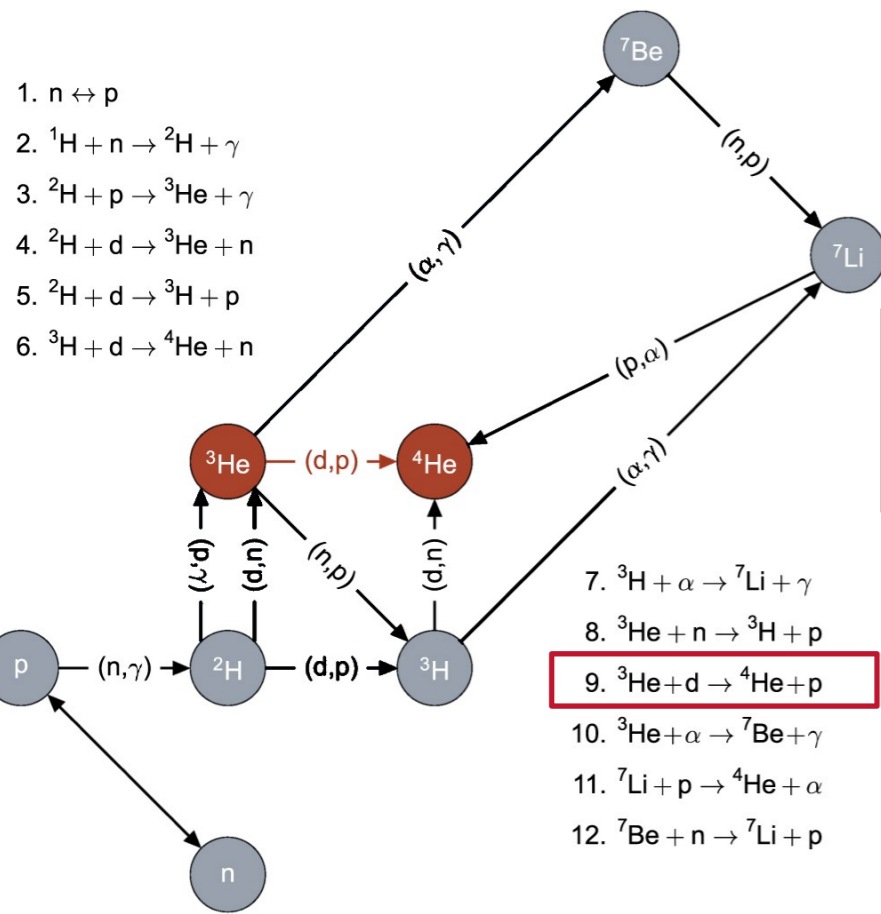
R.G.Pizzone et al. IOP Conf.Series:Journal of Physics:Conf.Series 1078 of (2018) 012017

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

Сегодня, распространенность “abundance” изотопов ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$ (or D) соответствует прогнозам SBBN.



Pitrou+ (2018) Phys. Rep.



Для ${}^3\text{He}$ экспериментально определен лишь верхний предел ${}^3\text{He}/\text{H} \leq 1.3 \cdot 10^{-5}$

Предсказания для отношения ${}^7\text{Li}/\text{H}$ расходятся с наблюдаемыми измерениями с фактором 3 !!

Астрофизическая проблема “Lithium depletion” (Недостаток лития) не решена

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

5% ошибка измерения скорости реакции соответствует

4% изменению теоретического предсказания для ${}^3\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$

● Экспериментальное изучение эффекта электронного экранирования

Для понимания процессов эволюции и производства энергии в звездах требуется точное знание сечения ядерных реакций при энергиях $E \leq 100 \text{keV}$.

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

Увеличение сечения при измеряемых энергиях за счет экранирования зарядов ядер отрицательно заряженными электронами приводит к введению эффективного потенциала U_e

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

● Экспериментальное изучение эффекта электронного экранирования

C. Spitaleri et al. Phys.Lett. B, 755 (2016) 275-278

Для понимания процессов эволюции и производства энергии в звездах требуется точное знание сечения ядерных реакций при энергиях $E \leq 100 \text{ keV}$.

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

Увеличение сечения при измеряемых энергиях за счет экранирования зарядов ядер отрицательно заряженными электронами приводит к введению эффективного потенциала U_e

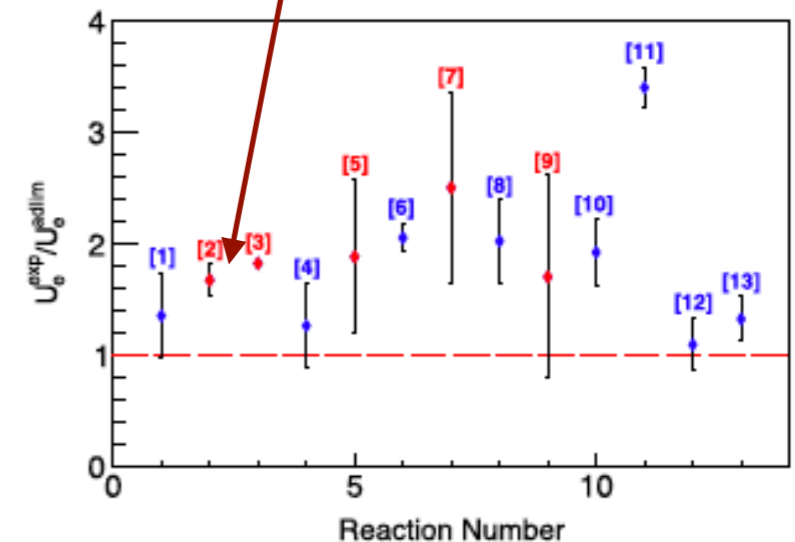
$$\sigma_s(E)/\sigma_b(E) = (S_s(E)/S_b(E))(E/(E + U_e)) \exp(\pi\eta U_e/E)$$

“electron screening puzzle”

Table 1

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]	$^9\text{Be}(p, \alpha_0)^6\text{Li}$	240	788 ± 70		[24,25]
[12]	$^{10}\text{B}(p, \alpha_0)^7$	340	376 ± 75		[26,27]
[13]	$^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$	340	447 ± 67		[26,28]



Данные при низких энергиях необходимы для получения потенциала, но результат сильно зависит от набора данных и выбранной теоретической модели.

Теоретические модели

P. Descouvemont. EPJ Web of Conferences 117 09001 (2016)

Theoretical methods: Many different cases → no “unique” model!

Model	Applicable to	Comments
Potential/optical model	Capture Fusion	<ul style="list-style-type: none">• Internal structure neglected• Antisymmetrization approximated
R-matrix	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none">• No explicit wave functions• Physics simulated by some parameters
DWBA	Transfer	<ul style="list-style-type: none">• Perturbation method• Wave functions in the entrance and exit channels
Microscopic models	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none">• Based on a nucleon-nucleon interaction• A-nucleon problems• Predictive power

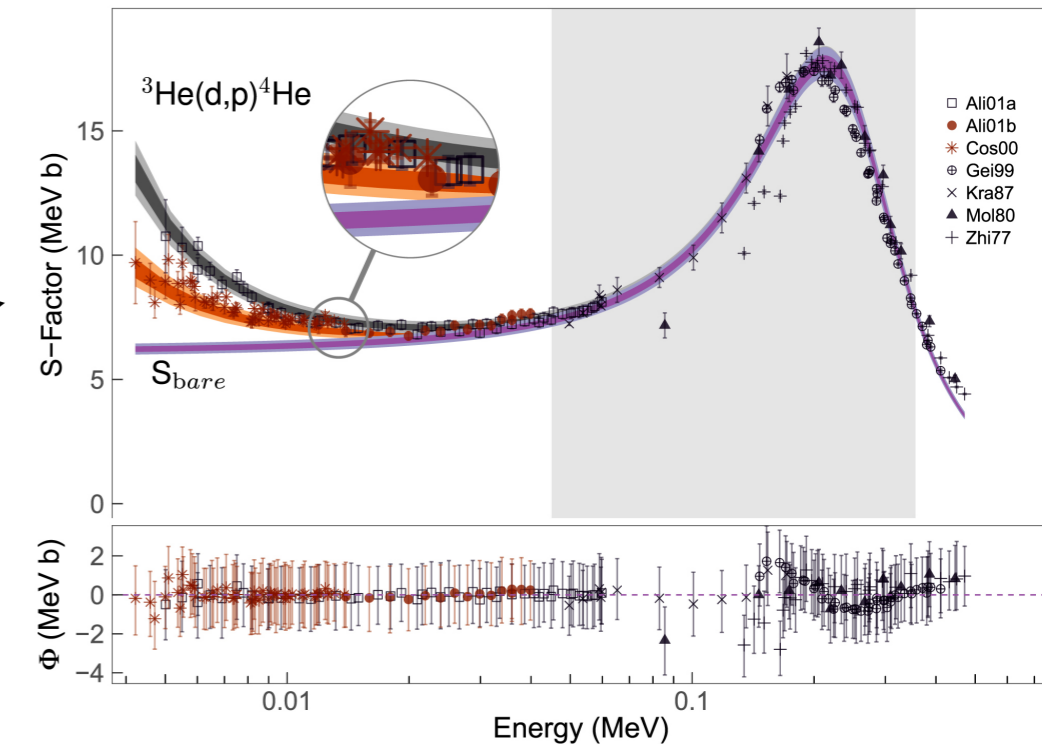
Теоретические модели

P. Descouvemont. EPJ Web of Conferences 117 09001 (2016)

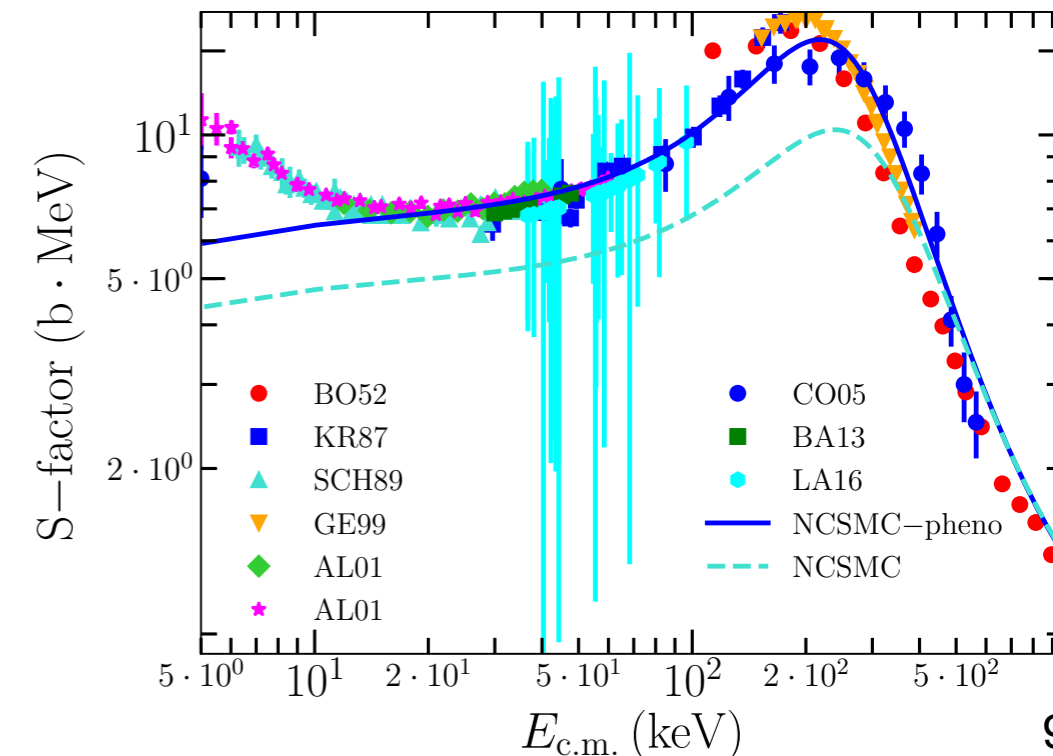
Theoretical methods: Many different cases → no “unique” model!

Model	Applicable to	Comments
Potential/optical model	Capture Fusion	<ul style="list-style-type: none"> Internal structure neglected Antisymmetrization approximated
R-matrix	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none"> No explicit wave functions Physics simulated by some parameters
DWBA	Transfer	<ul style="list-style-type: none"> Perturbation method Wave functions in the entrance and exit channels
Microscopic models	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none"> Based on a nucleon-nucleon interaction A-nucleon problems Predictive power

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



G. Hupin, S. Quaglioni and P. Navrátil. Supplementary Information. Nature communications (2019)



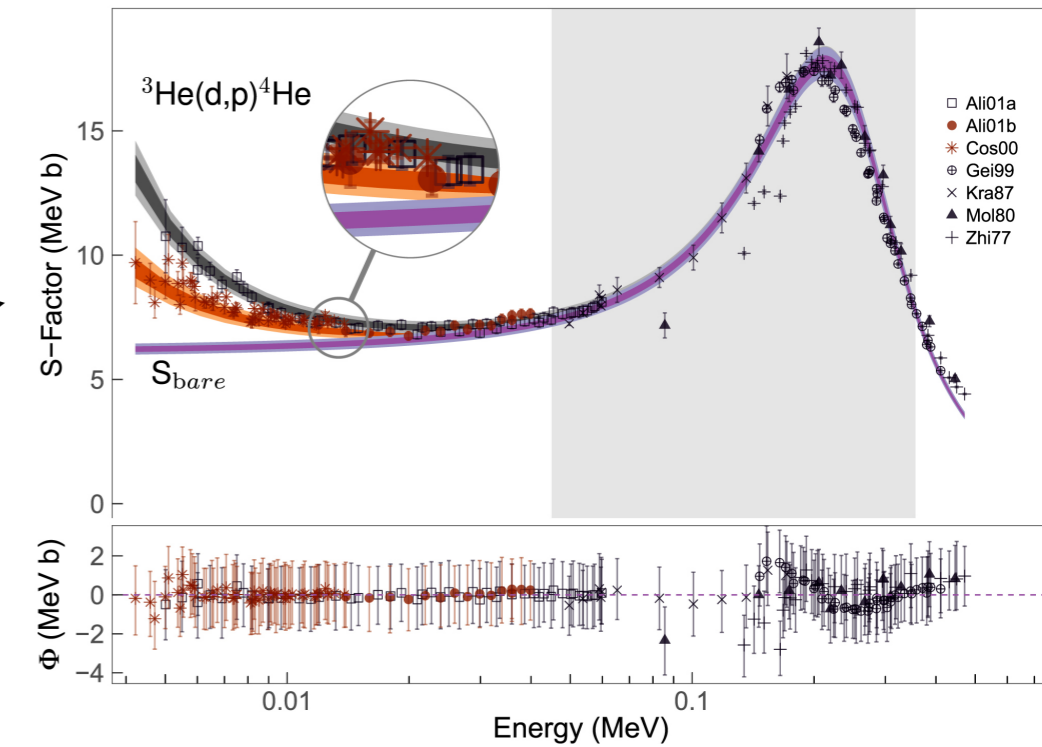
Теоретические модели

P. Descouvemont. EPJ Web of Conferences 117 09001 (2016)

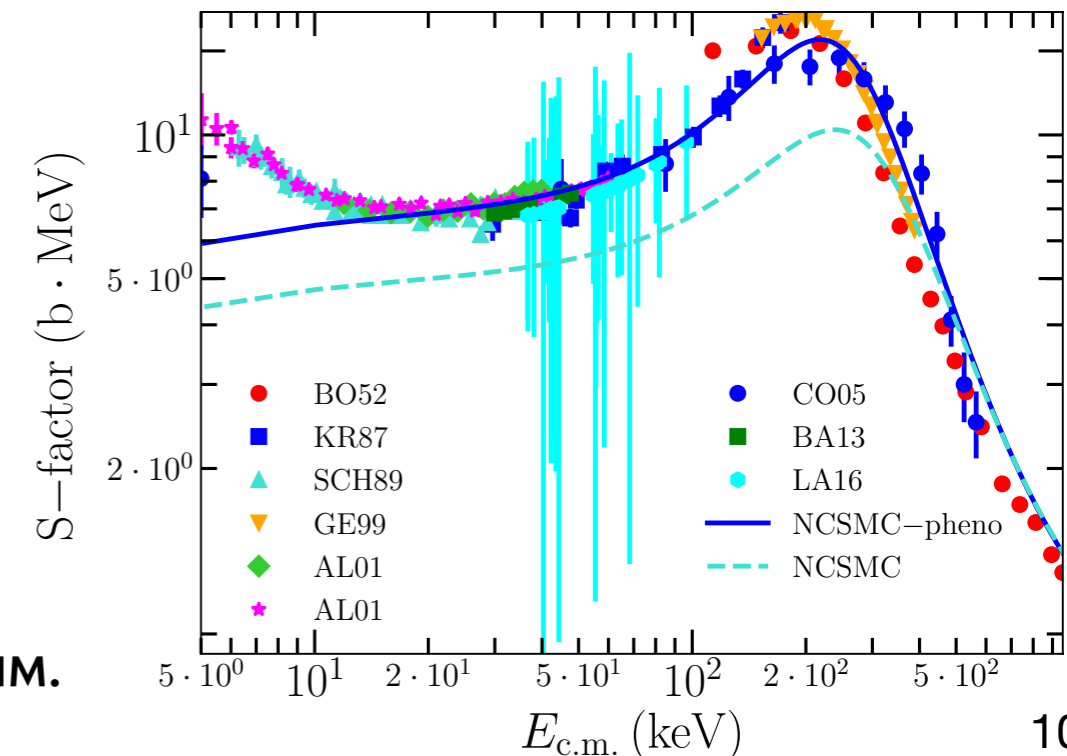
Theoretical methods: Many different cases → no "unique" model!

Model	Applicable to	Comments
Potential/optical model	Capture Fusion	<ul style="list-style-type: none"> Internal structure neglected Antisymmetrization approximated
R-matrix	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none"> No explicit wave functions Physics simulated by some parameters
DWBA	Transfer	<ul style="list-style-type: none"> Perturbation method Wave functions in the entrance and exit channels
Microscopic models	Capture Transfer	<ul style="list-style-type: none"> Based on a nucleon-nucleon interaction A-nucleon problems Predictive power

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



G. Hupin, S. Quaglioni and P. Navrátil. Supplementary Information. Nature communications (2019)



Физический механизм роста экранированного сечения не определен, в связи с трудностью определения абсолютной величины сечения "голого" ядра S_{bare}

Экстраполяция измеренного S -фактора не гарантирует получение результата из-за наличия резонансных состояний при низких энергиях, а так же эффектов связанных с атомарными электронами пучка/мишени в экспериментах по прямым столкновениям.

Мюонный катализ



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

Мюонный катализ

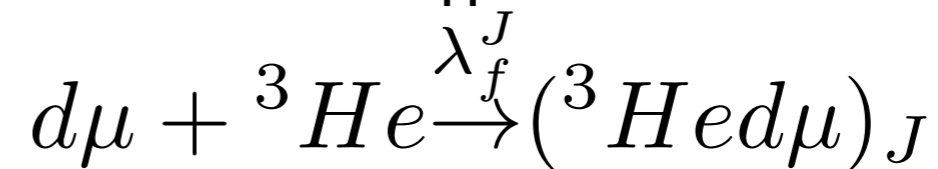
Синтез происходит в ${}^3\text{He}d\mu$ мезомолекуле

$${}^3\text{He}d\mu \rightarrow {}^4\text{He}(3.66\text{MeV}) + p(14.64\text{MeV}) + \mu$$

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

Формирование молекулы происходит при столкновении медленных атомов

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



предсказано как промежуточный шаг при перехвате мюона $\lambda_{d^3\text{He}} = 1.48 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$

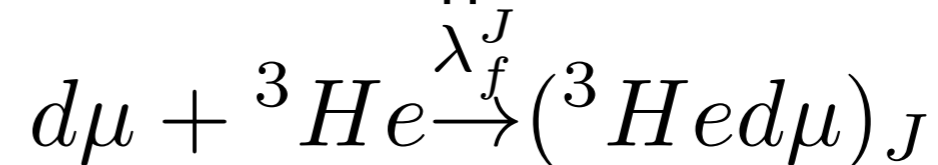
Мюонный катализ



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

Формирование молекулы происходит при столкновении медленных атомов

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

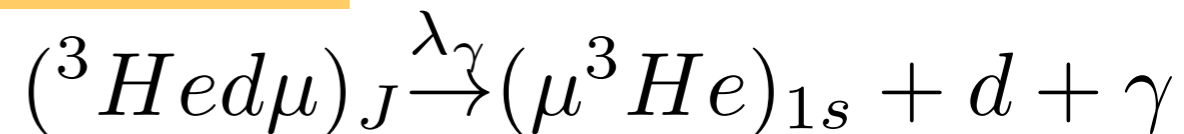


предсказано как промежуточный шаг при перехвате мюона $\lambda_{d^3\text{He}} = 1.48 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$

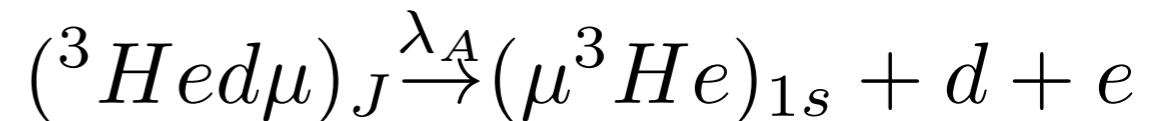
Распад

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

➤ γ -излучение



➤ Оже-переход



➤ прямая диссоциация



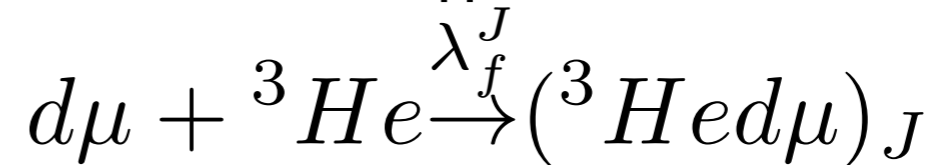
Мюонный катализ

Синтез происходит в ${}^3\text{He}d\mu$ мезомолекуле
 ${}^3\text{He}d\mu \rightarrow {}^4\text{He}(3.66\text{MeV}) + p(14.64\text{MeV}) + \mu$

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

Формирование молекулы происходит при столкновении медленных атомов

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

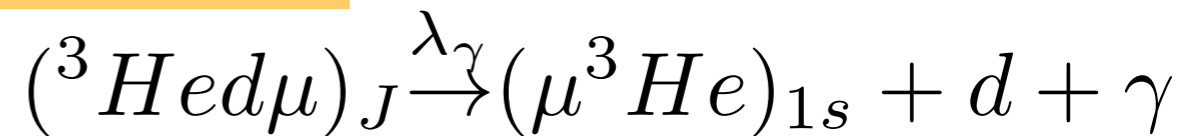


предсказано как промежуточный шаг при перехвате мюона $\lambda_{d^3\text{He}} = 1.48 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$

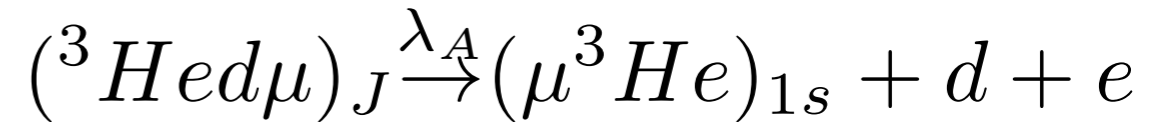
Распад

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

➤ γ -излучение



➤ Оже-переход



➤ прямая диссоциация



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

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

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

Предыдущие эксперименты

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

Верхний предел
для скорости реакции $d\mu^3He$

Ref.	Collaboration	Year	Gas Mixture	λ_f
[12]	PNPI-PSI	1990	$D_2 + {}^3He(5\%)$	$< 4 \cdot 10^8 s^{-1}$
[13]	PNPI-PSI	1998	$HD + {}^3He(5.6\%)$	$< 1.6 \cdot 10^6 s^{-1}$
[14]	PNPI-PSI	1998	$HD + {}^3He(5.6\%)$	$< 6 \cdot 10^4 s^{-1}$
[15]	JINR-PSI	1998-2006	$D_2 + {}^3He(5\%)$	$(4.5 + 2.6/2.0) \cdot 10^5 s^{-1}$

V.M. Bystritsky et al. *Eur. Phys.J.* 38(3), 455 (2006)

Фактор 10 !?

Первое наблюдение реакции

Предыдущие эксперименты

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

Верхний предел
для скорости реакции $d\mu^3He$

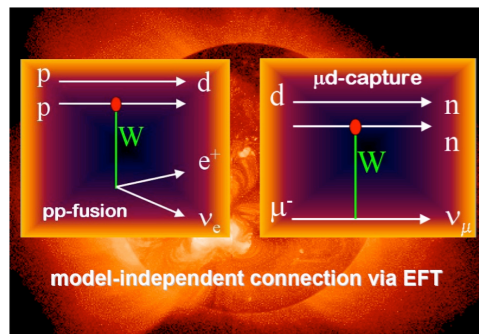
Ref.	Collaboration	Year	Gas Mixture	λ_f
[12]	PNPI-PSI	1990	$D_2 + {}^3He(5\%)$	$< 4 \cdot 10^8 s^{-1}$
[13]	PNPI-PSI	1998	$HD + {}^3He(5.6\%)$	$< 1.6 \cdot 10^6 s^{-1}$
[14]	PNPI-PSI	1998	$HD + {}^3He(5.6\%)$	$< 6 \cdot 10^4 s^{-1}$
[15]	JINR-PSI	1998-2006	$D_2 + {}^3He(5\%)$	$(4.5 + 2.6/2.0) \cdot 10^5 s^{-1}$

V.M. Bystritsky et al. *Eur. Phys.J.* 38(3), 455 (2006)

Фактор 10 !?

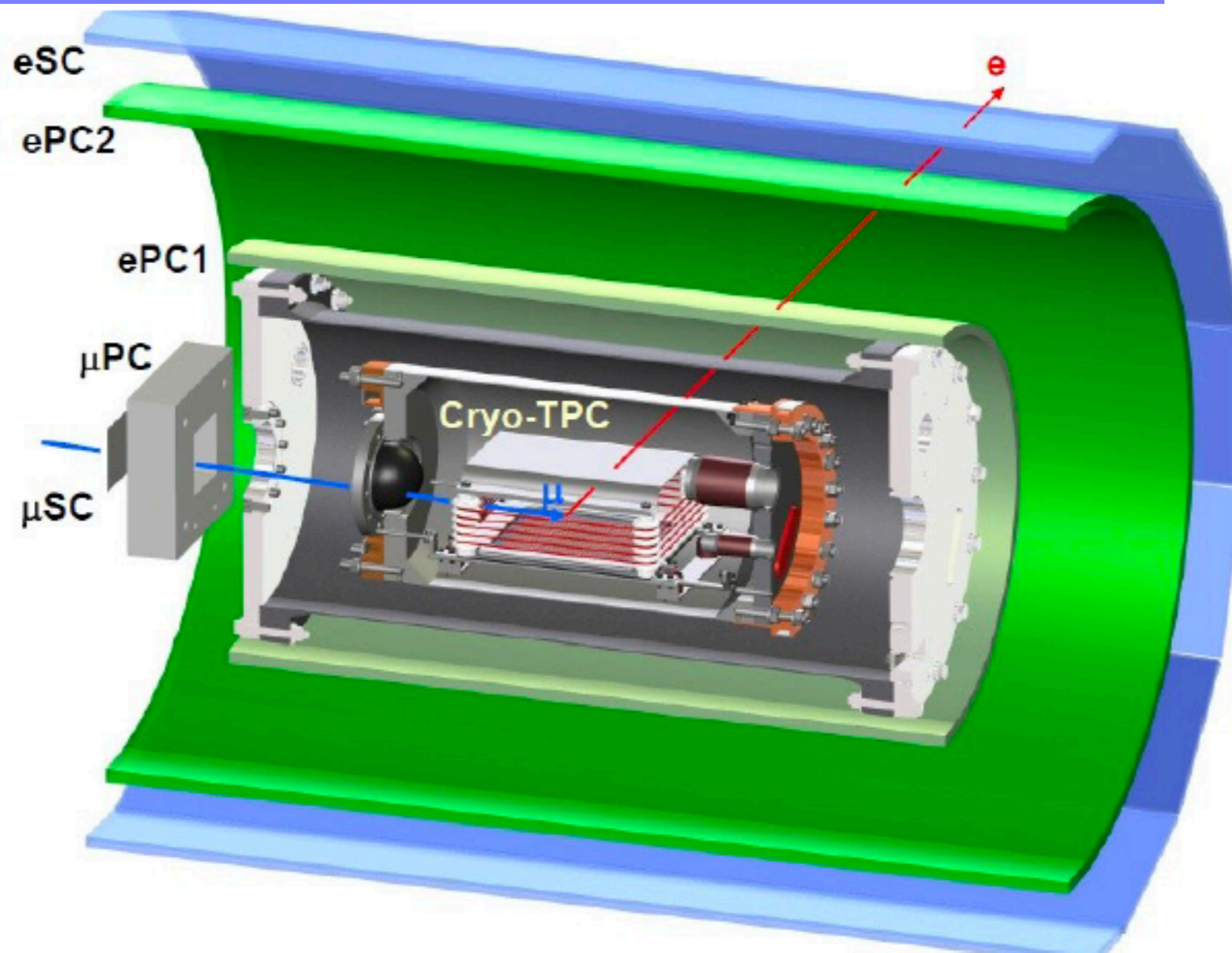
Первое наблюдение реакции

MuSun эксперимент



как фоновый процесс столкновения ${}^3He(0.82MeV)$
продукта реакции dd-синтеза с D_2

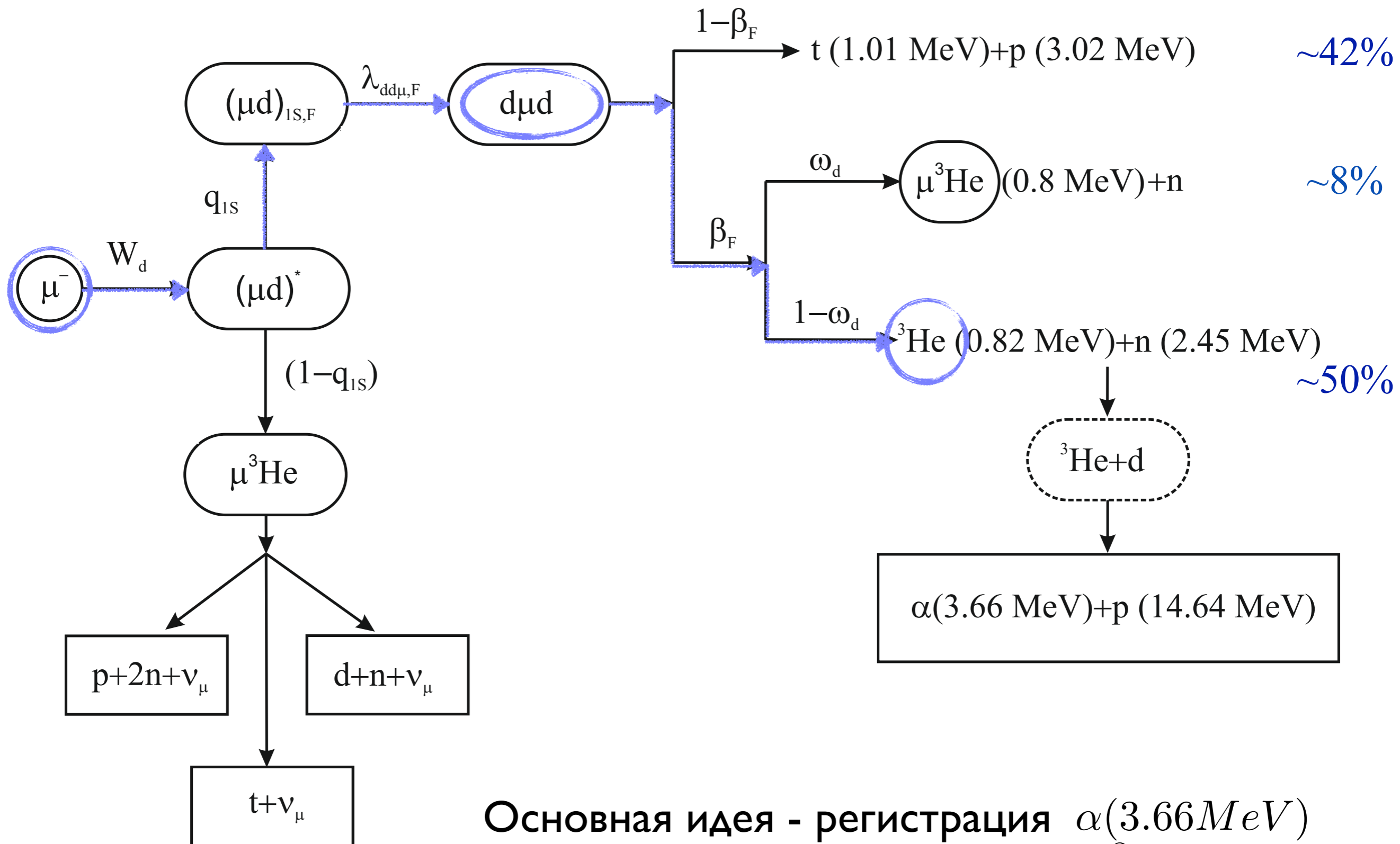
Экспериментальная установка (MuSun)



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 D₂



Основная идея - регистрация $\alpha(3.66 \text{ MeV})$ и длиннопробежного протона (14.64 MeV) от $d\mu^3\text{He}$ -синтеза ₁₈

Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D₂

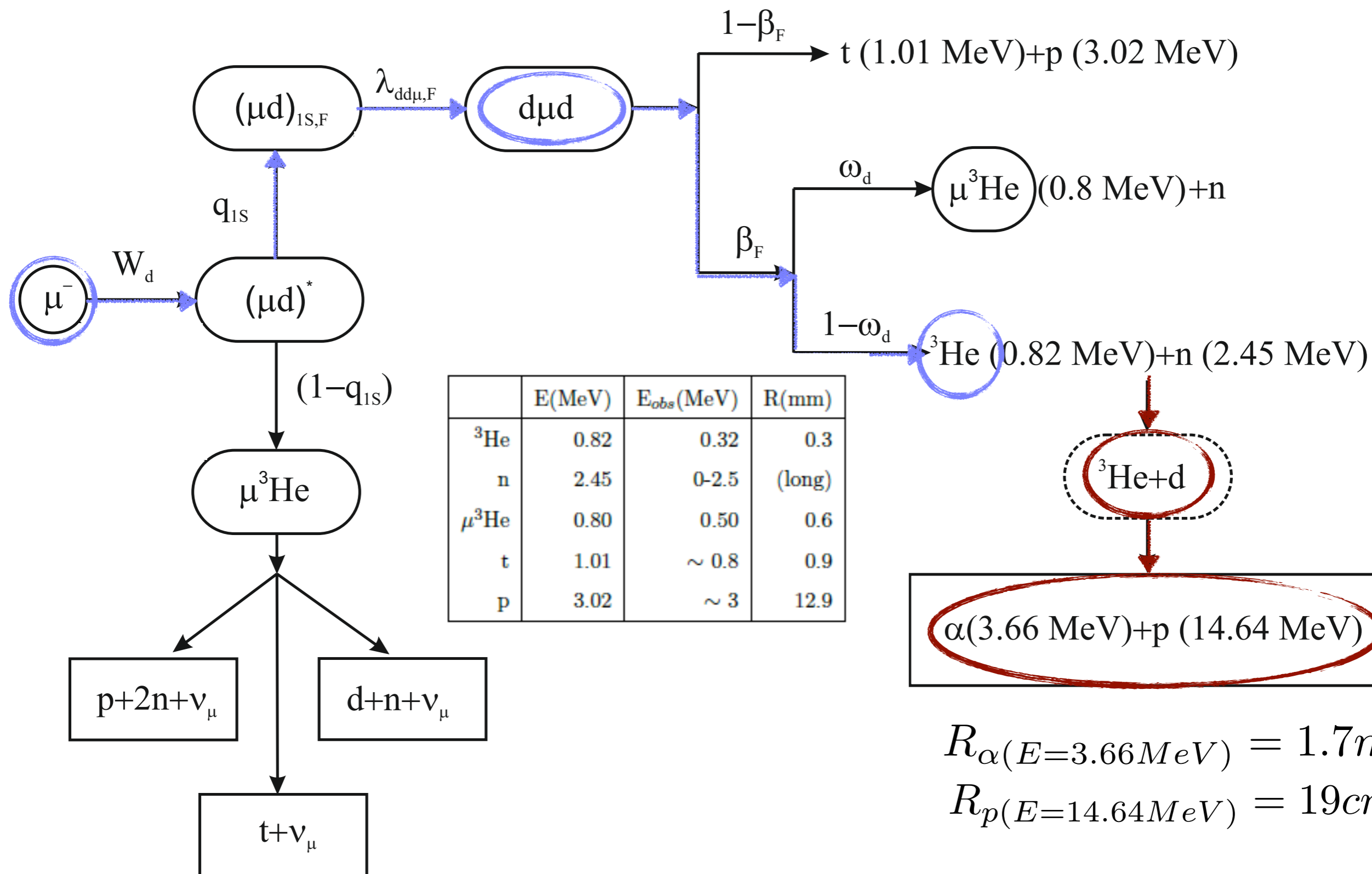
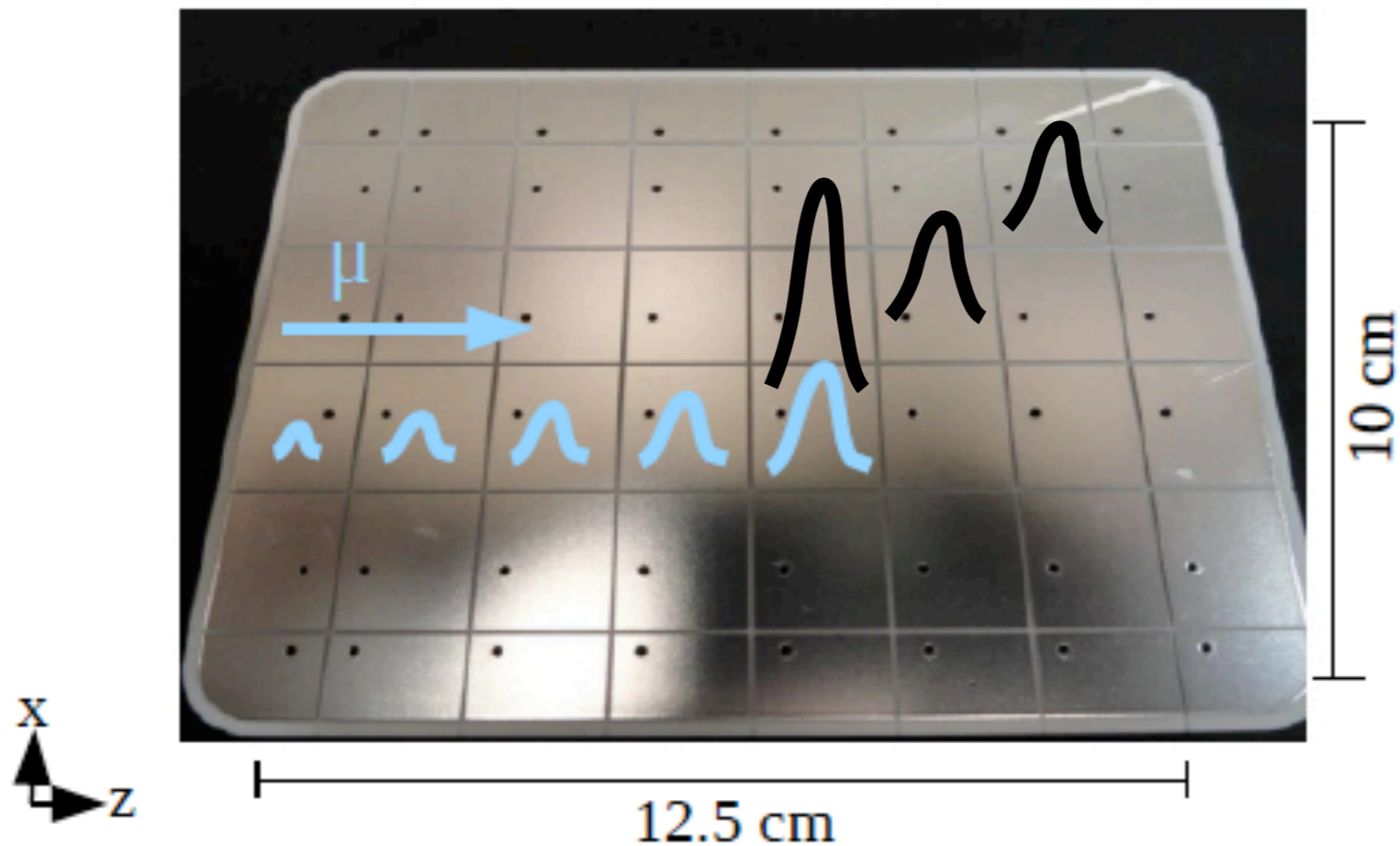


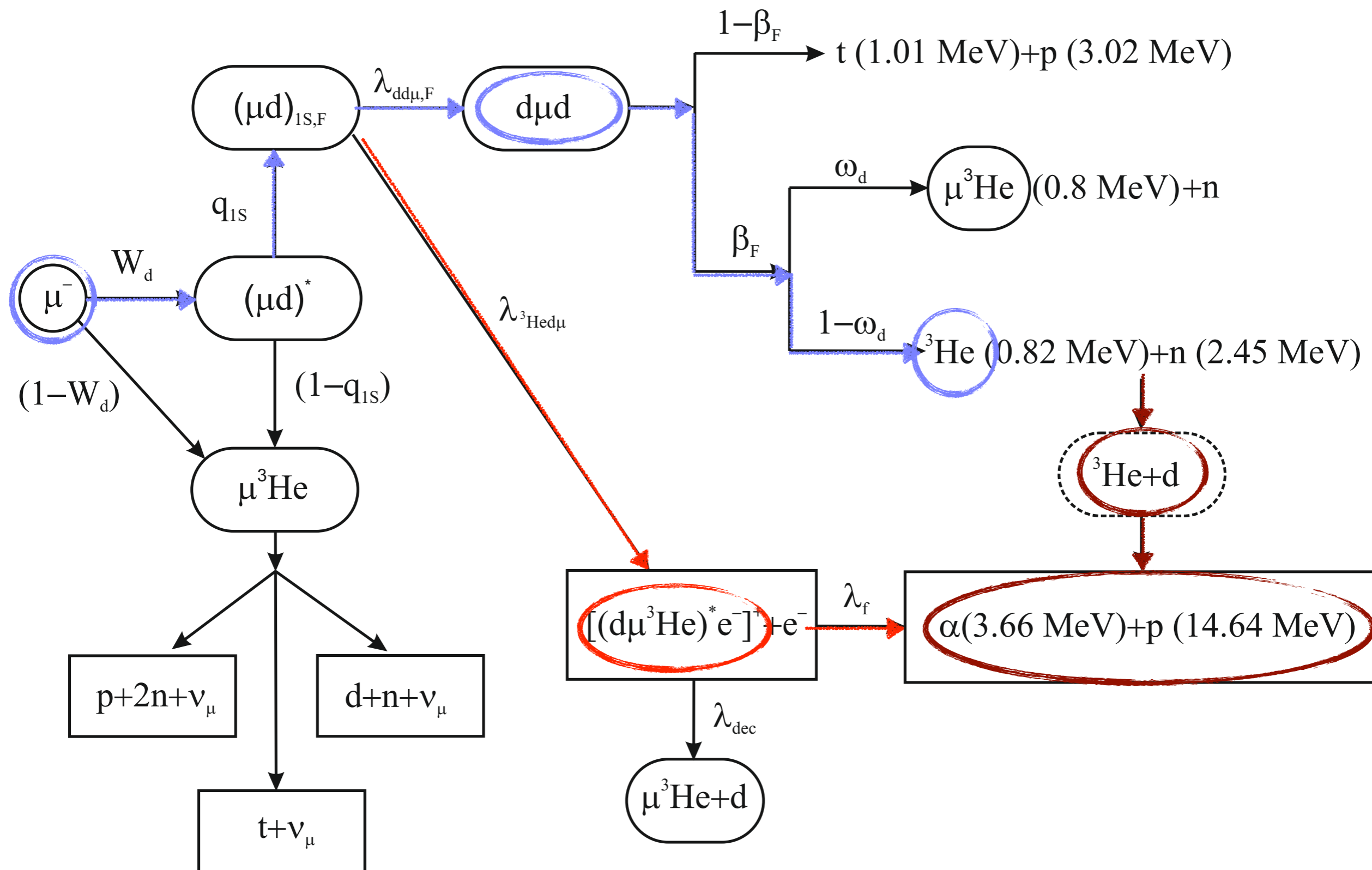
Схема реакции мюонного катализа ядерного синтеза в D_2



$d + {}^3\text{He}$ "синтез на лету"

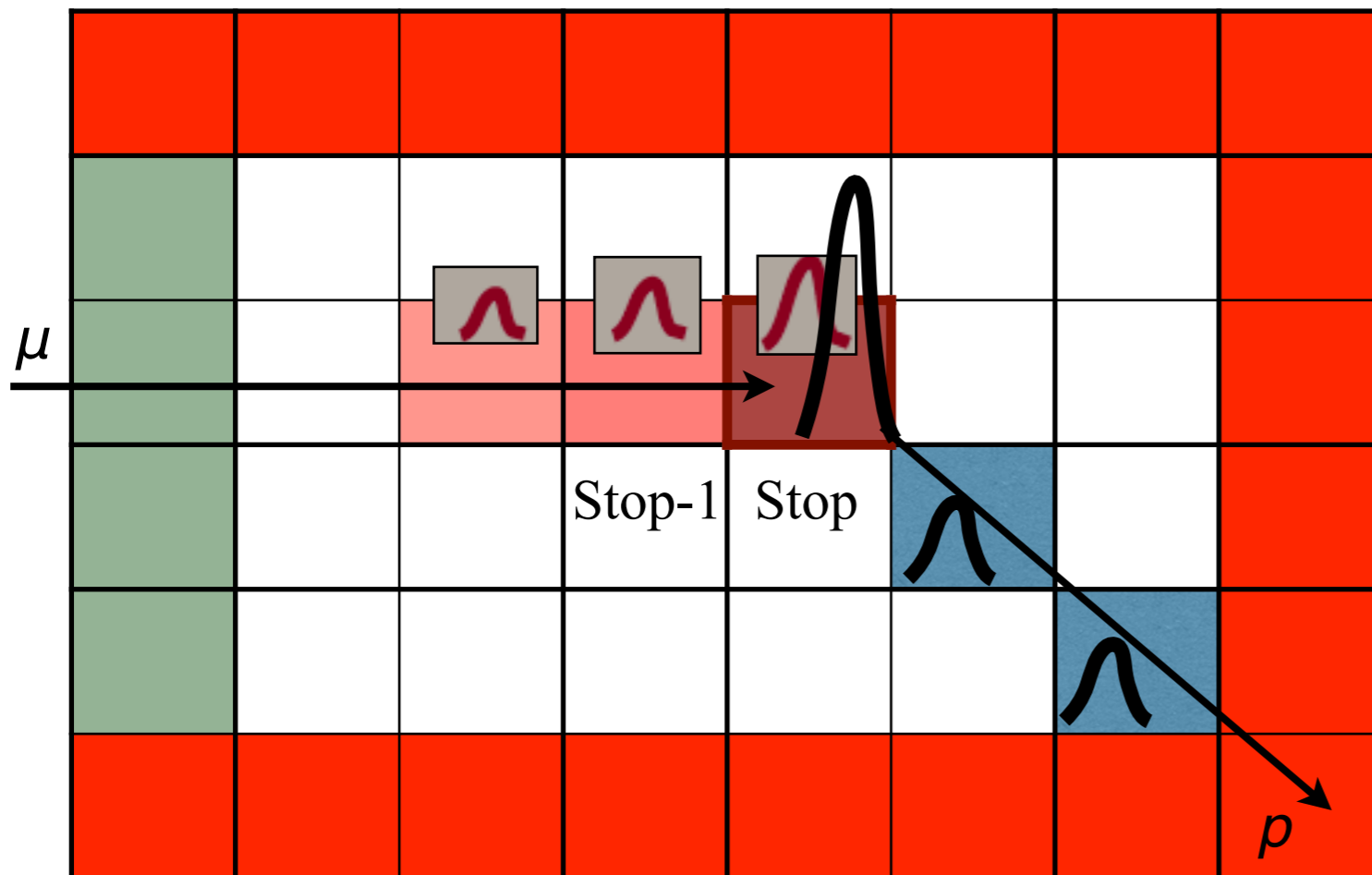
Схема реакции мюонного катализа

ядерного синтеза в $D_2 + 5\% {}^3He$



Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Текущее состояние. Этап I.



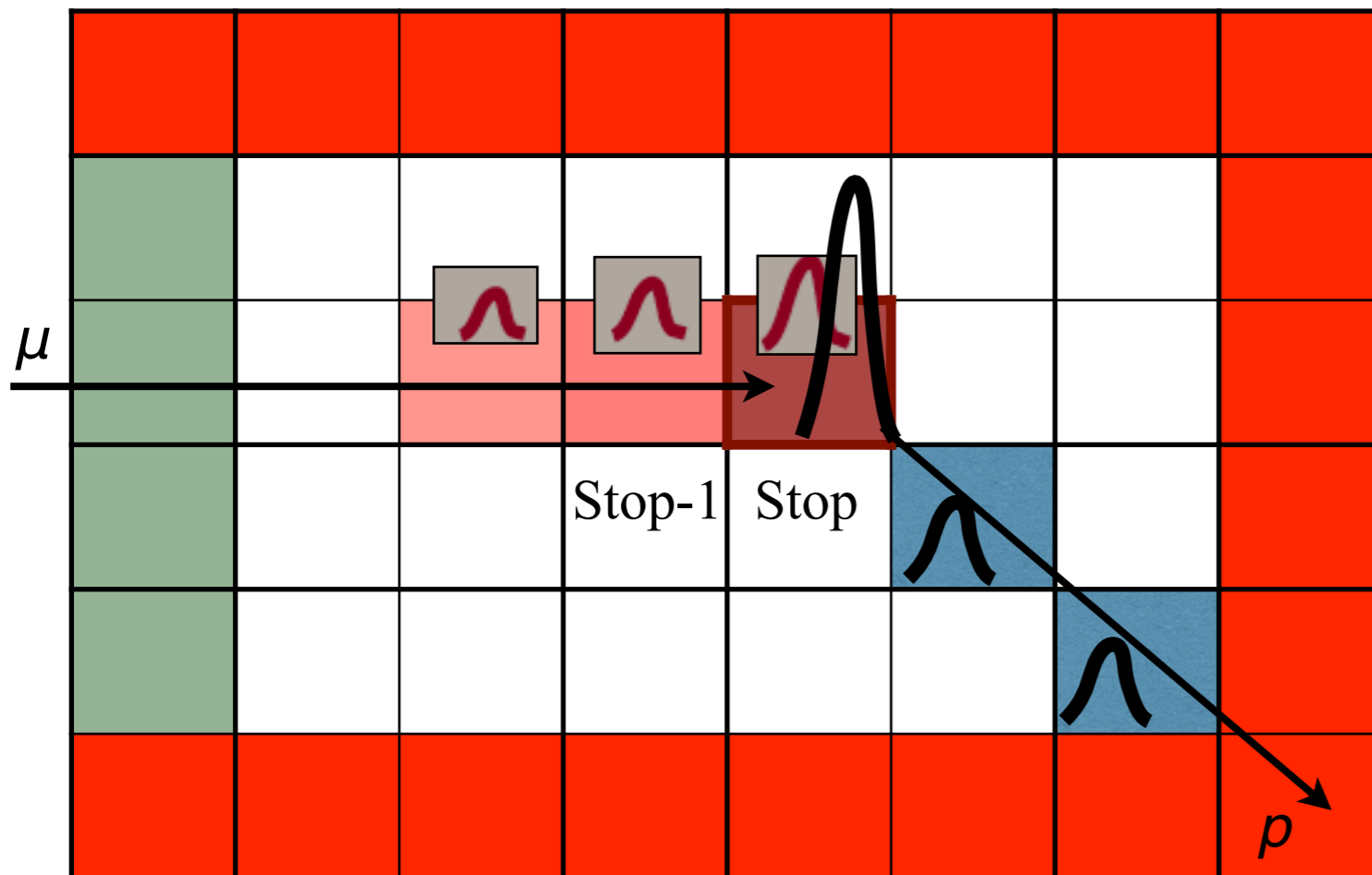
Run 8 (2015)

ЧИСТЫЙ D_2

набрано 10^{10} остановок μ

Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Текущее состояние. Этап II.



Run 8 (2015)

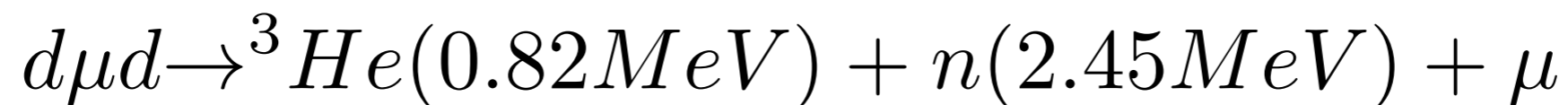
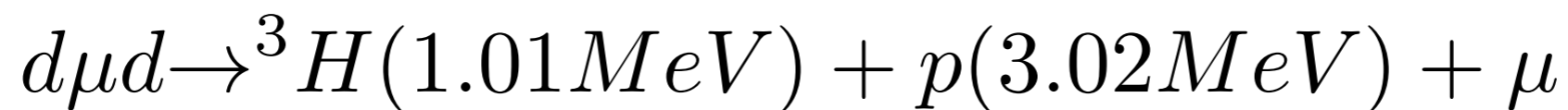
ЧИСТЫЙ D_2
набрано 10^{10} остановок μ

Run 9 (2016)

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

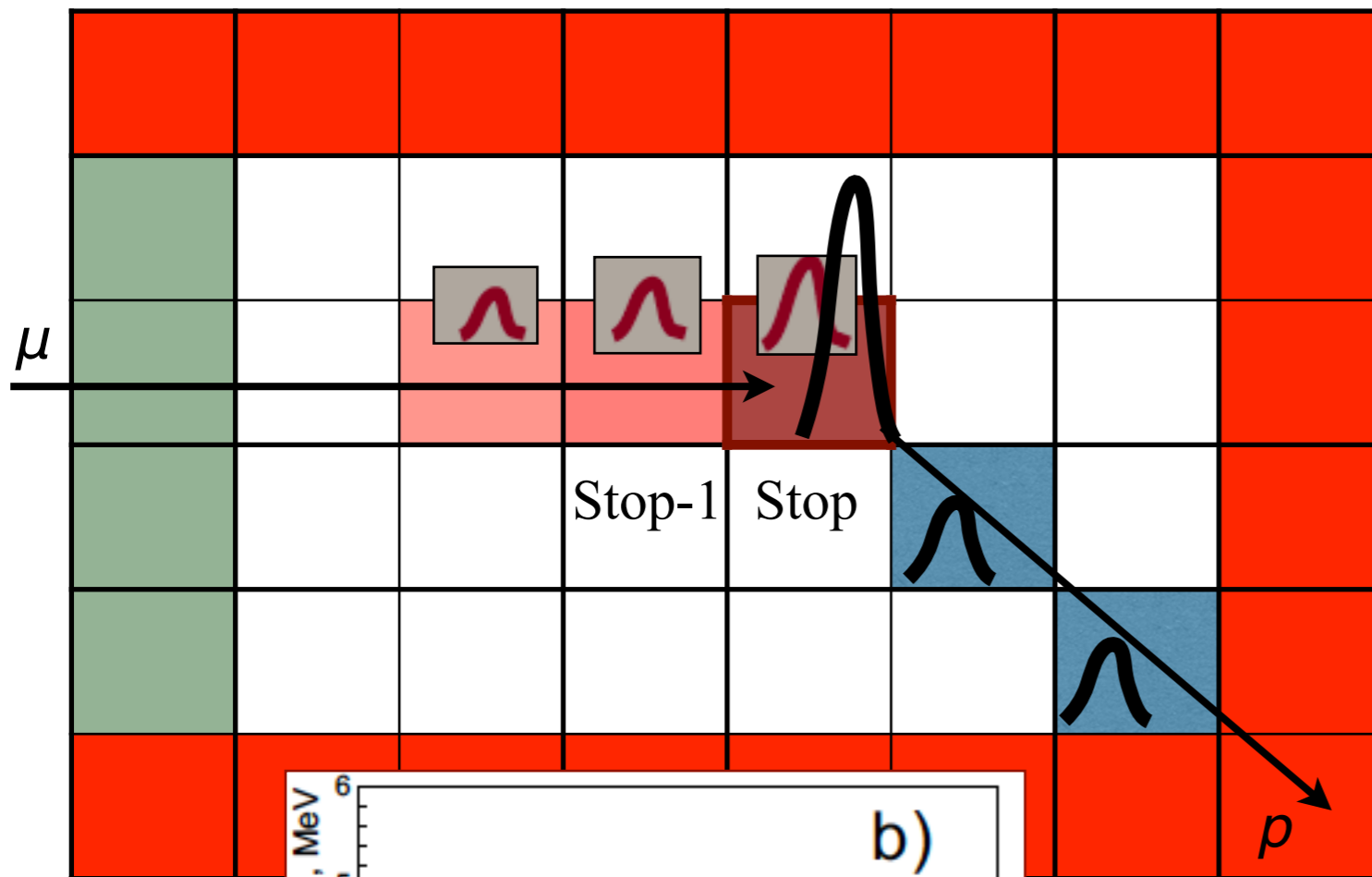
6 дней работы пучка

ИСТОЧНИКИ фона:



Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Текущее состояние. Этап III.



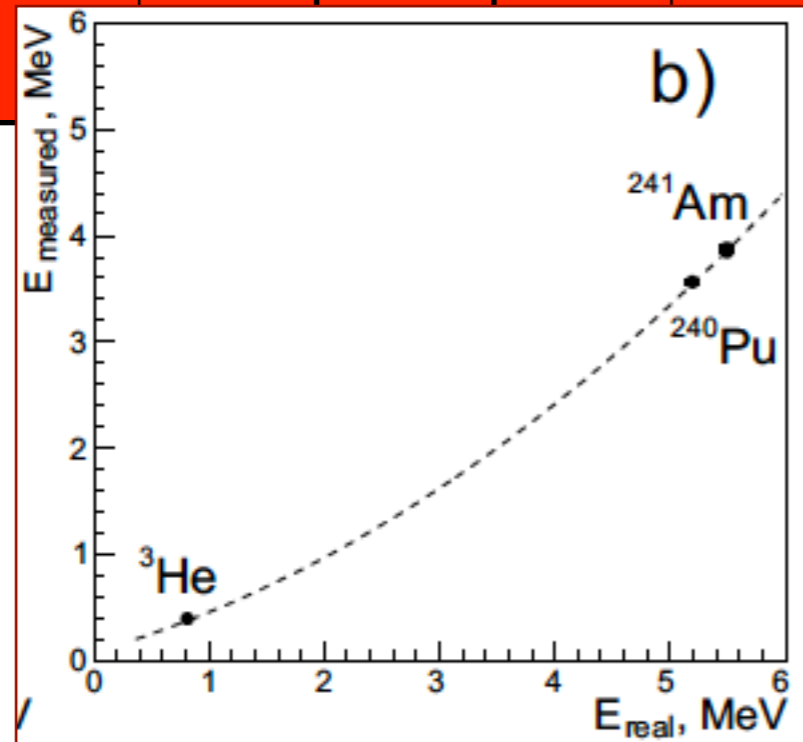
Run 8 (2015)

ЧИСТЫЙ D_2
набрано 10^{10} остановок μ

Run 9 (2016)

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

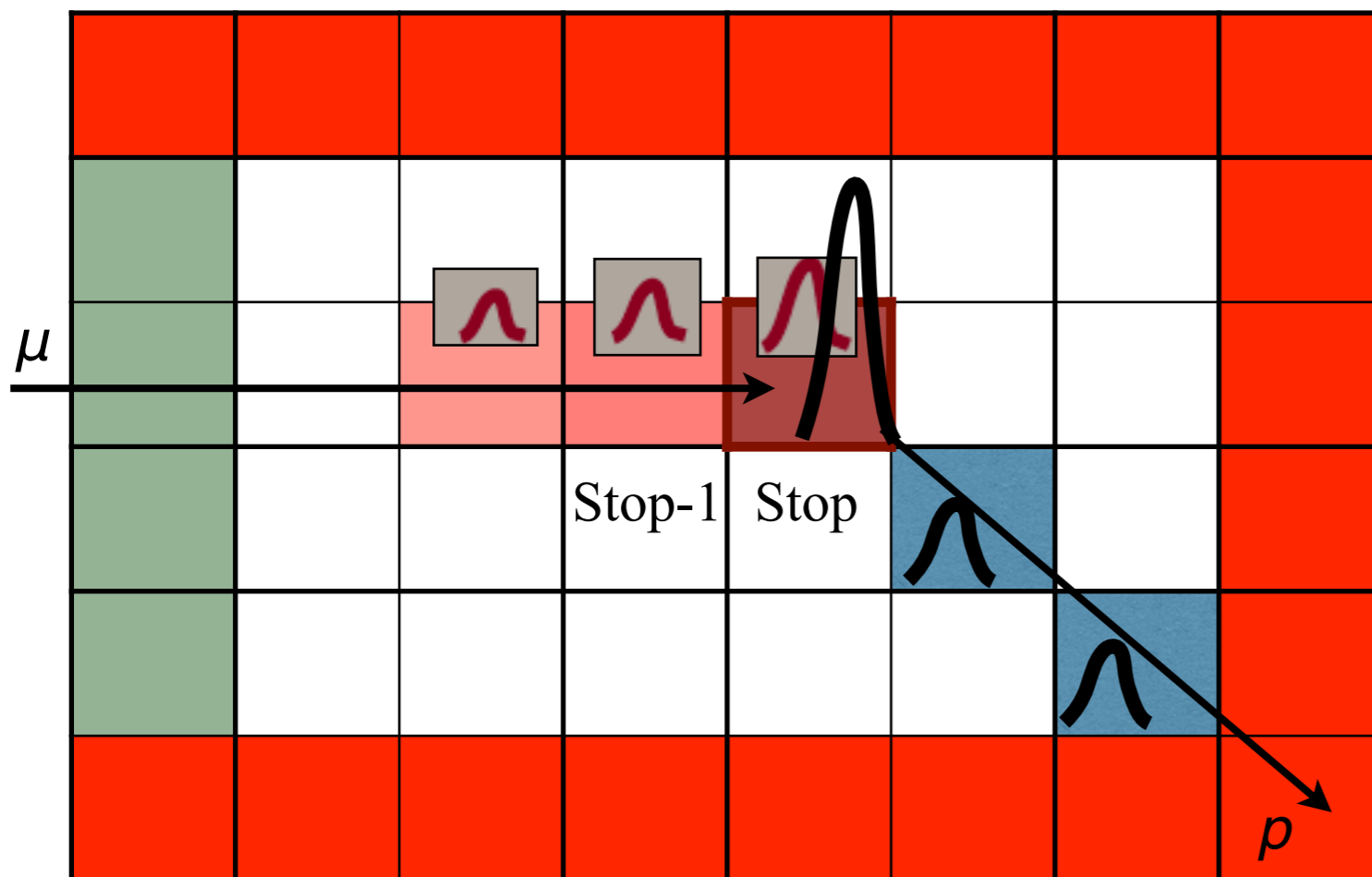
6 дней работы пучка



**Систематические
исследования (2017)**
эффект рекомбинации
катод с 6 α -источниками

Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Текущее состояние.



Run 8 (2015)

ЧИСТЫЙ D_2
набрано 10^{10} остановок μ

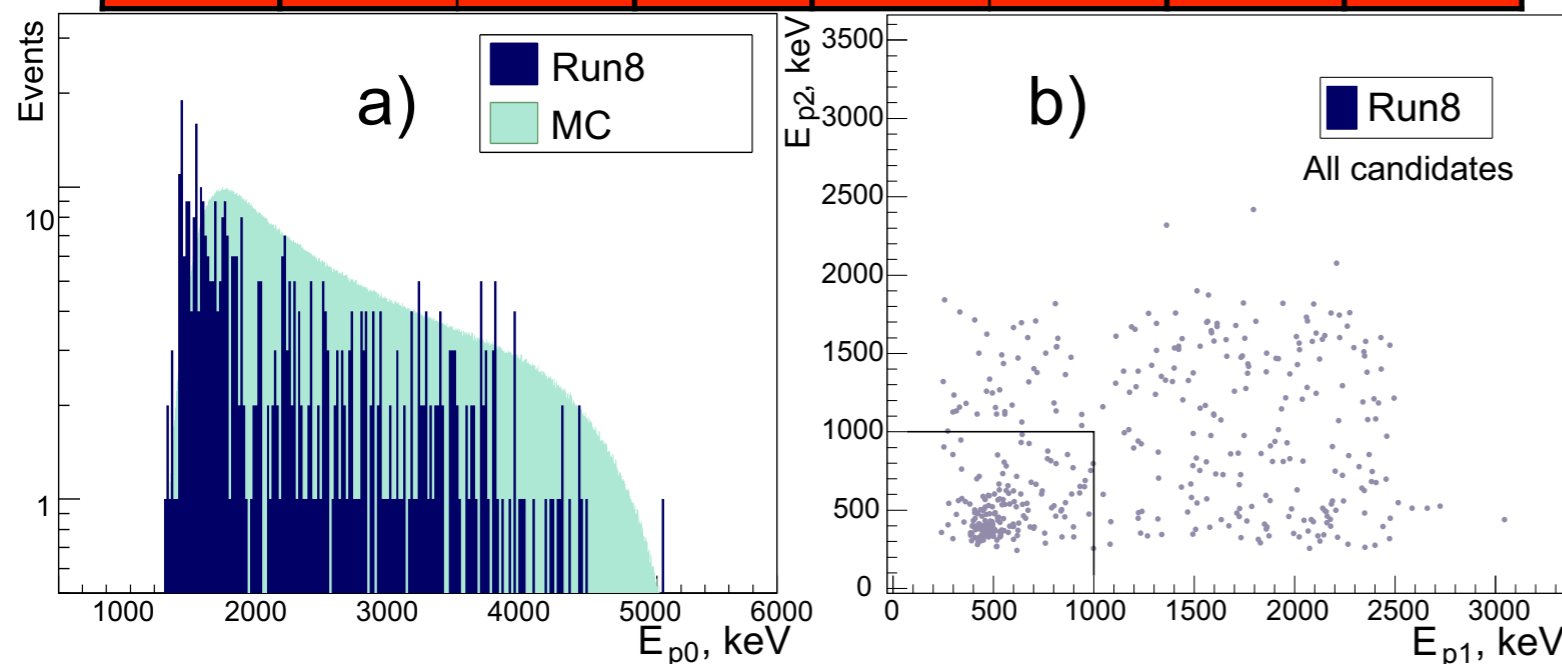
Run 9 (2016)

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

6 дней работы пучка

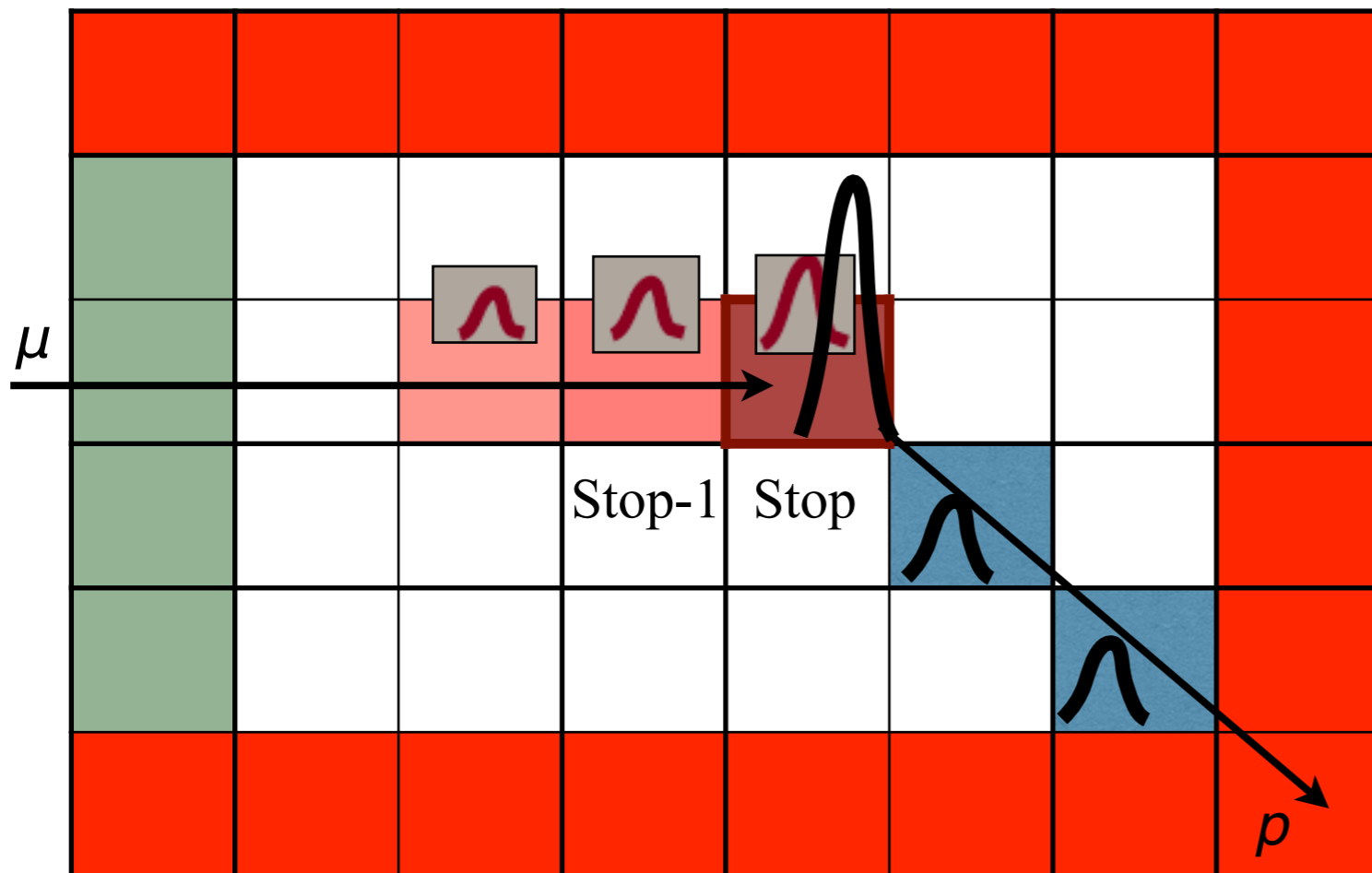
При энергии второго сигнала
на паде остановке $>2MeV$

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



Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Текущее состояние.



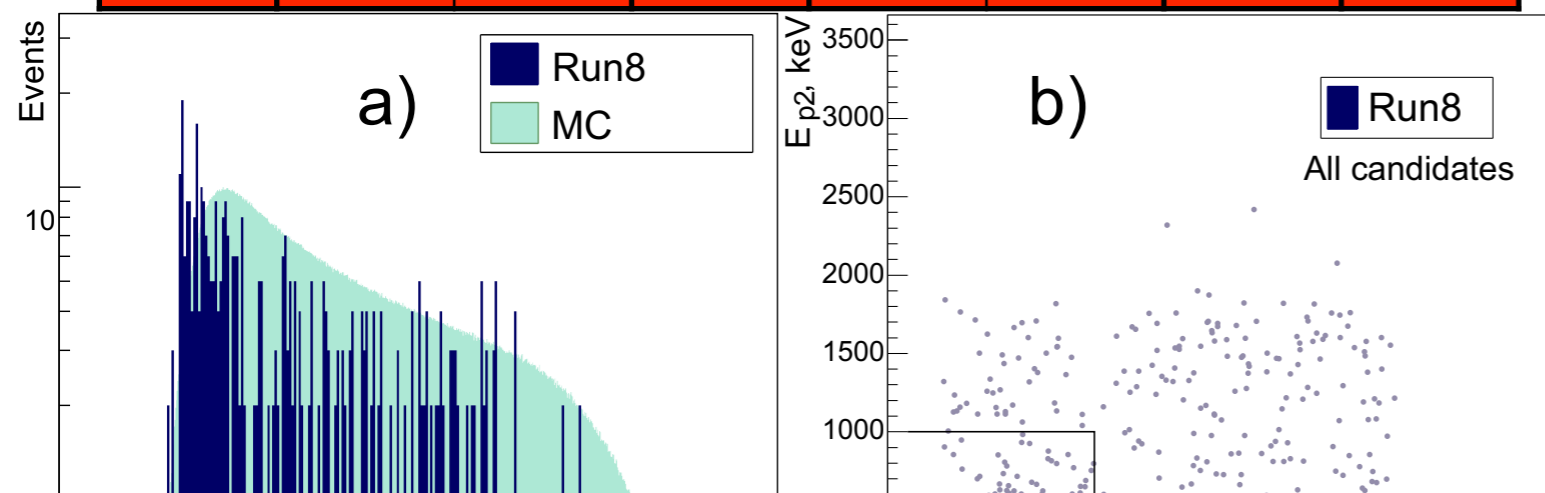
Run 8 (2015)

ЧИСТЫЙ D_2
набрано 10^{10} остановок μ

Run 9 (2016)

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

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 ± 0.3

Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Подготовка к новому сеансу. Этап IV.

Run 10 (2020) 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

Используя теоретическое предсказание для скорости ядерного синтеза

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

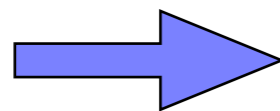
можем увидеть до 30 полезных событий при 8 фоновых

Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Подготовка к новому сеансу. Этап IV.

Технические работы 2018 -19 года

высокая цена гелия



эвакуация гелия из газовой системы



технология регенерации 3He



технология производства HD



исследование стабильности HD во времени с использованием хроматографического метода

Поиск мюонного катализа ядерного d^3He синтеза

Выводы

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

Экспериментальная установка может позволить увеличить чувствительность к реакции $d\mu + {}^3He \rightarrow d\mu^3He \rightarrow {}^4He + p + \mu$ в ~ 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!



Back up

R-08-01.2: Search for muon catalysed d+3He fusion

(P. Kravchenko et al.)

Using the MuSun experimental hardware, this experiment intends to measure the rate for muon-catalyzed fusion of d + 3He. This new data may provide new information on the very low energy fusion cross section $d + 3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + p$ that occurs during primordial nucleosynthesis. While this is an interesting experiment, the BVR would like more information on the impact of such a measurement on the understanding of electron screening effects in low energy reactions of light nuclei and the corresponding uncertainties in cross sections of interest to nuclear astrophysics before recommending beam time.

V.I. Korobov, A.V. Eskin, F.A. Martynenko and
O.S. Sukhorukova

Complex coordinate rotation method

The reaction rate is proportional to the probability density of two nuclei to be inside the fusion region $|\Psi(0)|^2$

Uncertainties of calculations 3%

Вопрос про энергию столкновения мне не раз задавали, но как мне кажется он не очень важен. Во-первых, S-фактор - это величина которая из сечения столкновения убирает кулоновское отталкивание ядер, и по этой причине слабо зависит от энергии при $E \rightarrow 0$. Энергии в мюонной молекуле легко оценить. К реакции fusion приводят 2 канала 1s и 2s в классификации объединенного атома: $E_n = -m_\mu Z^2 / 2n^2 \sim 1 \text{ keV}$, в то время как потенциалы ядерной реакции имеют шкалу МэВ. Для той точности, которую Вы можете достичь, энергию столкновения можно просто положить равной нулю.

$$\eta = \eta \cdot 10$$

The rates of the reactions depend on the density of baryons (nucleons), which is usually expressed normalized to the relic blackbody photon density **(baryon-to-photon ratio)**