



JOINT
INSTITUTE
FOR NUCLEAR
RESEARCH



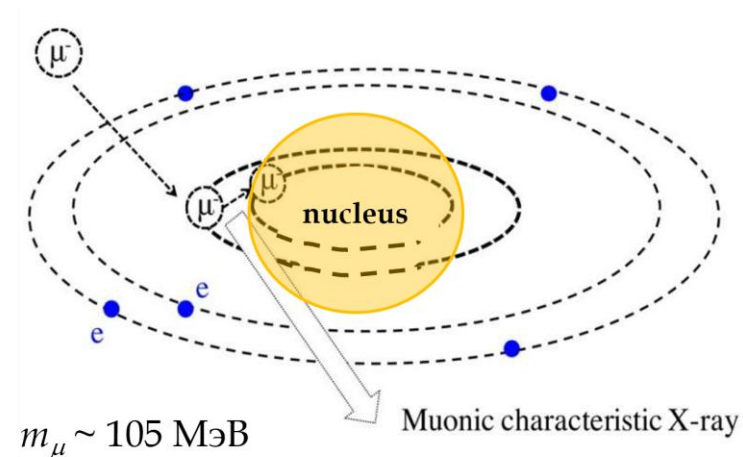
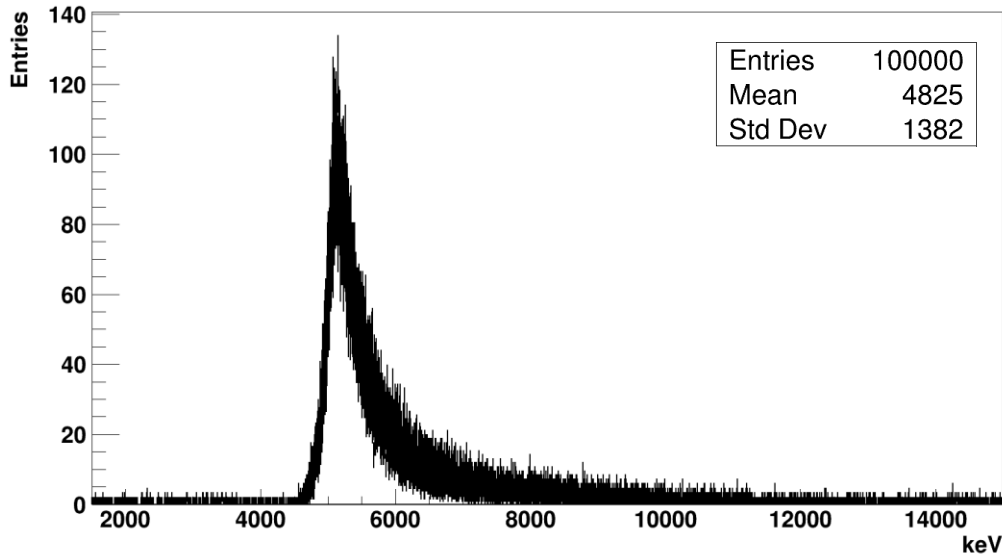
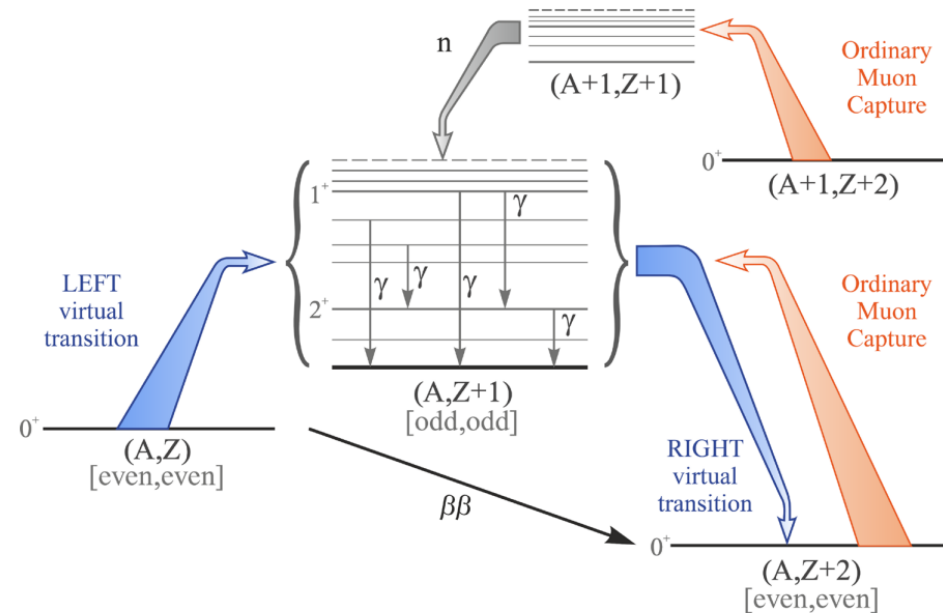
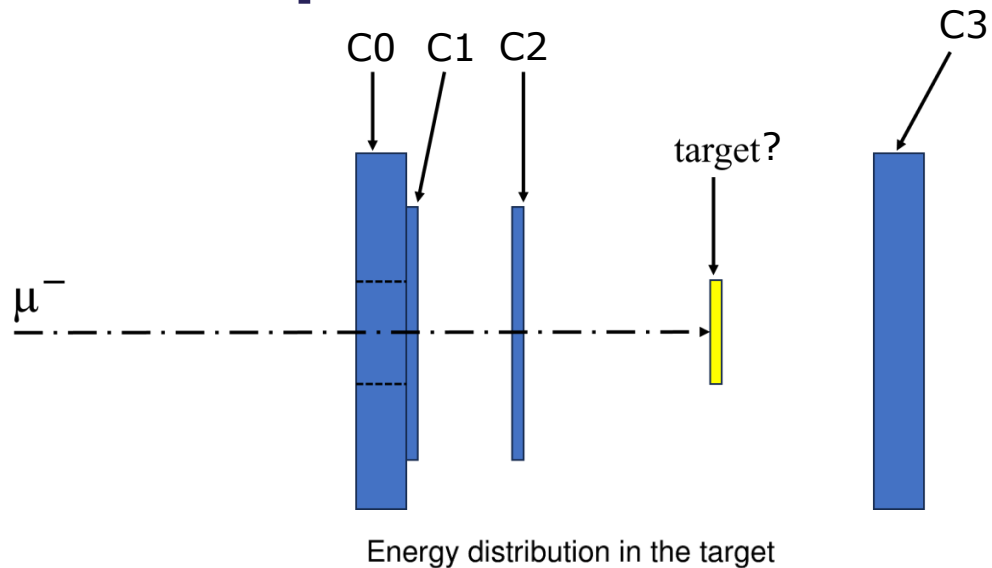
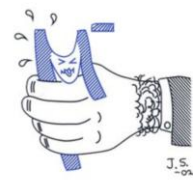
GEANT4-моделирование экспериментальной установки «Монумент»

Быстряков А.Д.¹²³, Васильев С.И.¹, Зинатулина Д.Р.¹² (от коллаборации
«Монумент»)

- ¹ Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980
Дубна, Россия
- ² Государственный университет «Дубна», ул. Университетская, 19, 141980
Дубна, Россия
- ³ Физический институт имени П. Н. Лебедева, Ленинский проспект, 53, 119991
Москва, Россия

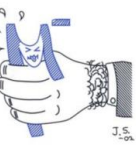
Моделирование мюонного захвата

Мотивация



Как негативные мюоны взаимодействуют с мишенью?

Процесс мюонного захвата



Цель и задачи

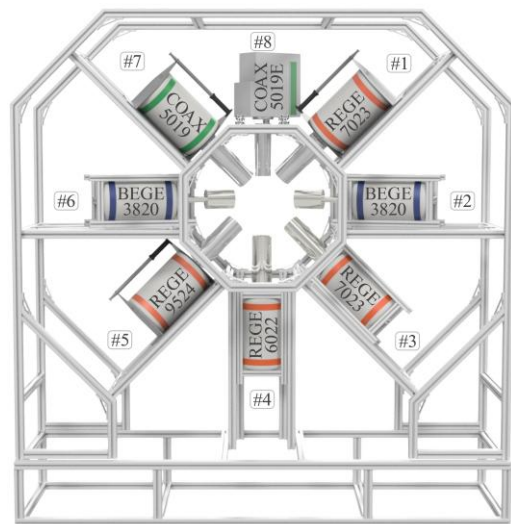
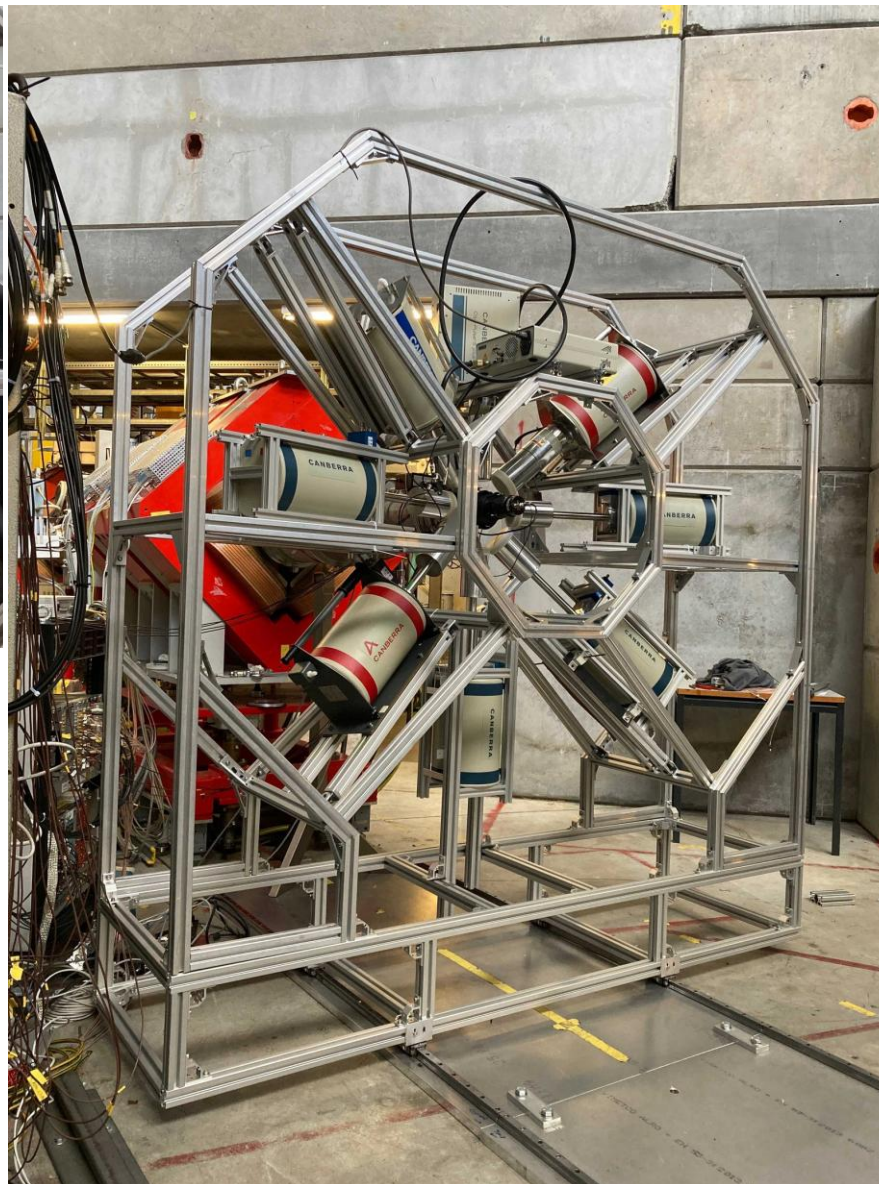
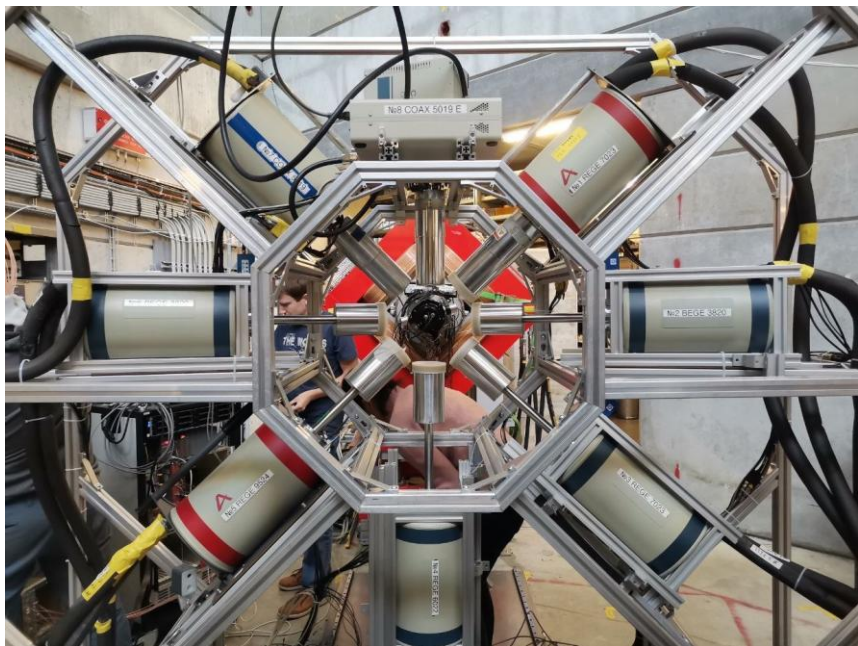
Цель работы:

Анализ эффективности регистрации мюонов с мишенью с помощью GEANT4.

Задачи:

- Моделирование установки «Монумент» при помощи GENAT4
- Моделирование прохождения негативных мюонов через мишени (Fe, Cu, Al, BaCO₃).
- Анализ полученных результатов
- Оптимизация экспериментальной установки для будущих измерений с мишенью из углерода (C).

Экспериментальная установка



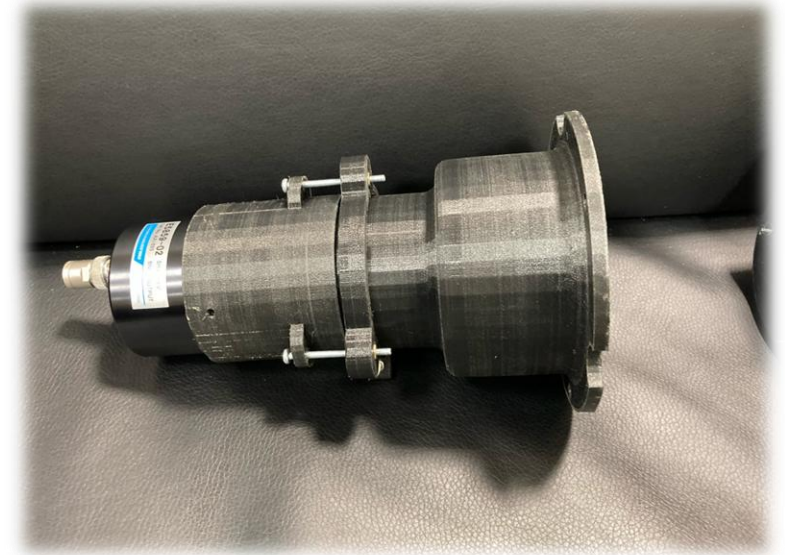
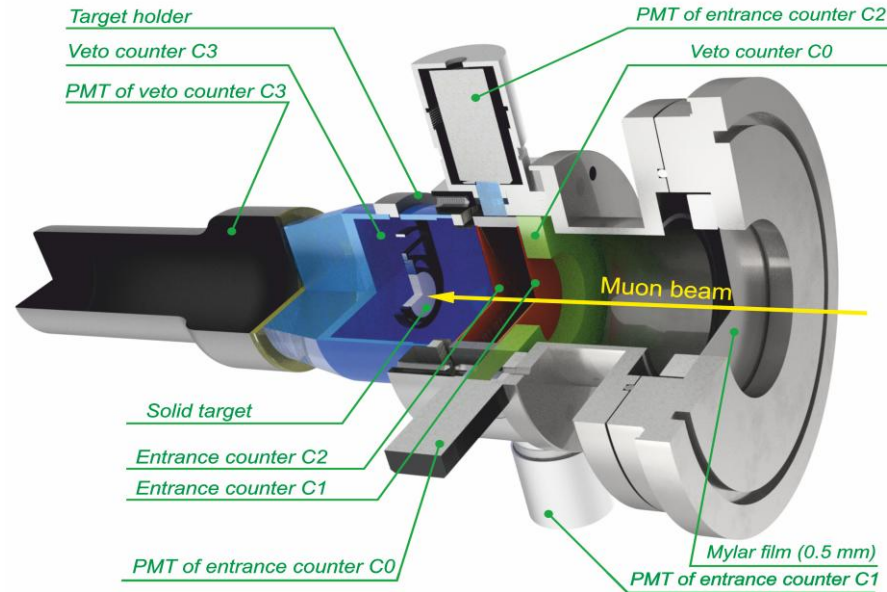
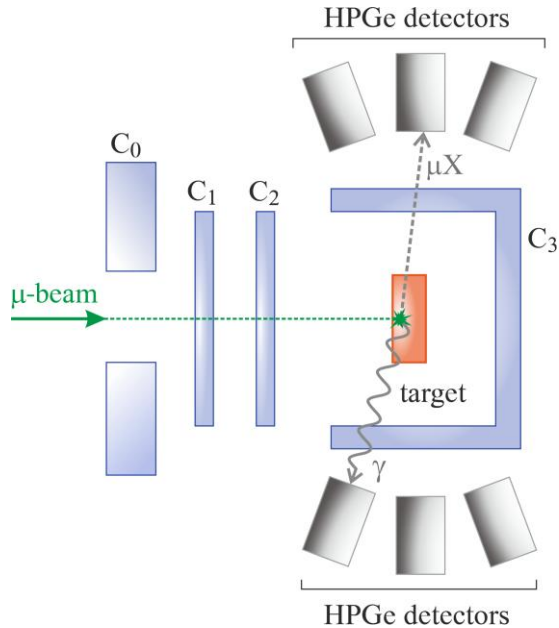
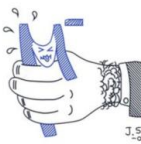
Алюминиевая рама, на которой установлены германиевые детекторы (HPGe), расположенные в 12 см от мишени.

8 HPGe детекторов:

- Четыре крупных германиевых детектора n-типа (REGe) с тонким бериллиевым входным окном (3—PSI, 1—TUM);
- Два крупных коаксиальных детектора p-типа (COAX), оснащенные электромеханическим охлаждающим устройством (ОИЯИ);
- Два относительно крупных HPGe p-типа (BEGe (2—PSI)).



Экспериментальная установка



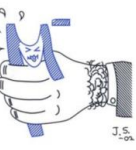
Мюонная триггерная система состоит из:

- активного счетчика C0 (толщиной 1 см), расположенного на входе в корпус мишени;
- двух тонких (0,5 мм) счетчиков C1 и C2;
- Счетчик C3, расположенный вокруг мишени (в виде чаши).

Четыре счетчика мюонов позволяют контролировать прохождение мюонов через мишень (μ -stop).

$$\mu_{\text{stop}} = \overline{C0} \wedge C1 \wedge C2 \wedge \overline{C3}$$

При оптимальных условиях более 95% записанных данных соответствовали мюонам, остановившимся в мишени.

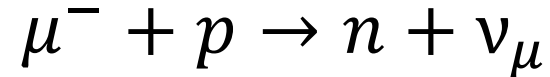


Процессы включенные в моделирование

Что такое мюонный захват?

Отрицательный мюон (μ^-) замедляется в материале, в результате чего любой из них может захватиться.

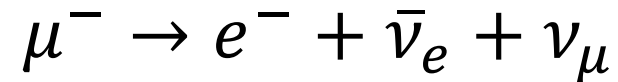
Процесс мюонного захвата(ОМС):

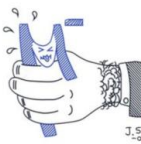


Что такое мюонный распад?

Отрицательный мюон (μ^-) замедляется в веществе и впоследствии распадается из-за слабого взаимодействия.

Процесс мюонного распада:





Пример: вероятность мюонного захвата в зависимости от элемента

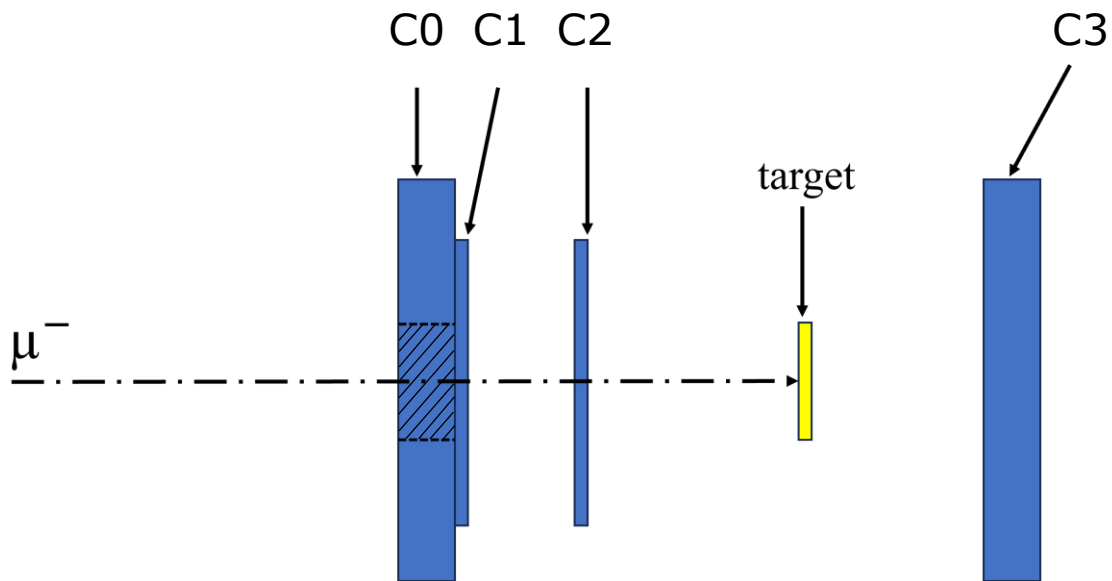
Material	Z	Capture Probability
H (Водород)	1	~0.1%
C (Углерод)	12	~5%
Al (Алюминий)*	13	~60%
Fe (Железо)**	26	~87%
Cu (Медь)**	29	~91%
Ba (Барий)	56	>98%

→ Именно поэтому **Ba** является особенно интересной мишенью: он обеспечивает высокую вероятность захвата мюонов.

*Mu2e Collaboration. Universe9010054 (13 January 2023) doi.org/10.3390/universe9010054

** Yu. I. Primakov, G. A. Barkov, A. N. Smirnov, Journal of Nuclear Physics 34 (1981)

Геометрия модели Моделирование пучка



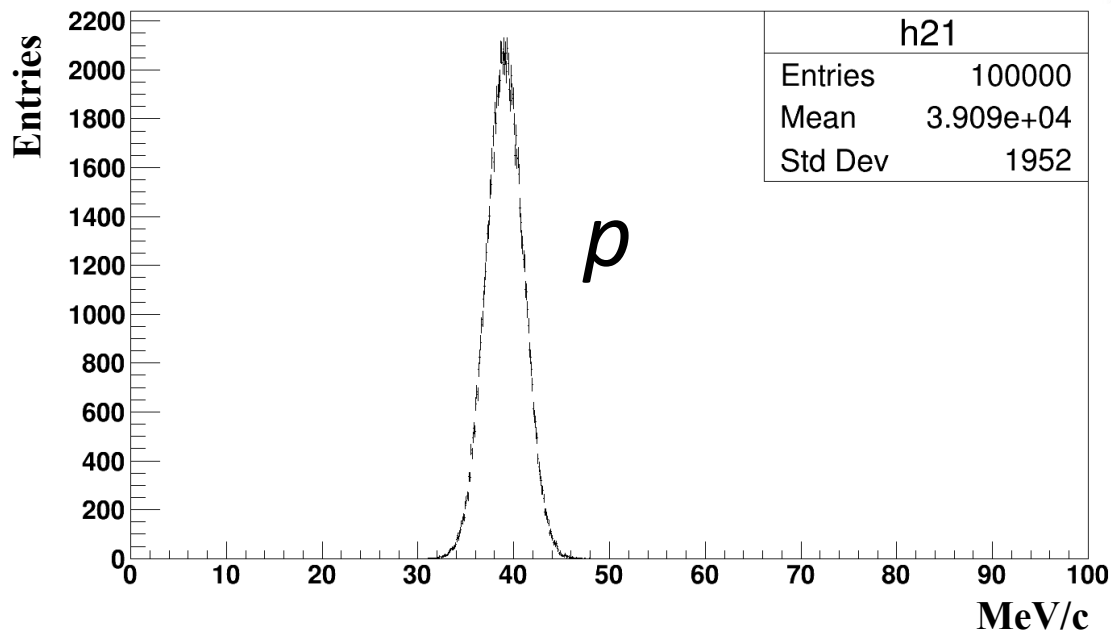
$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$$

p — момент пучка, 39 MeV/c

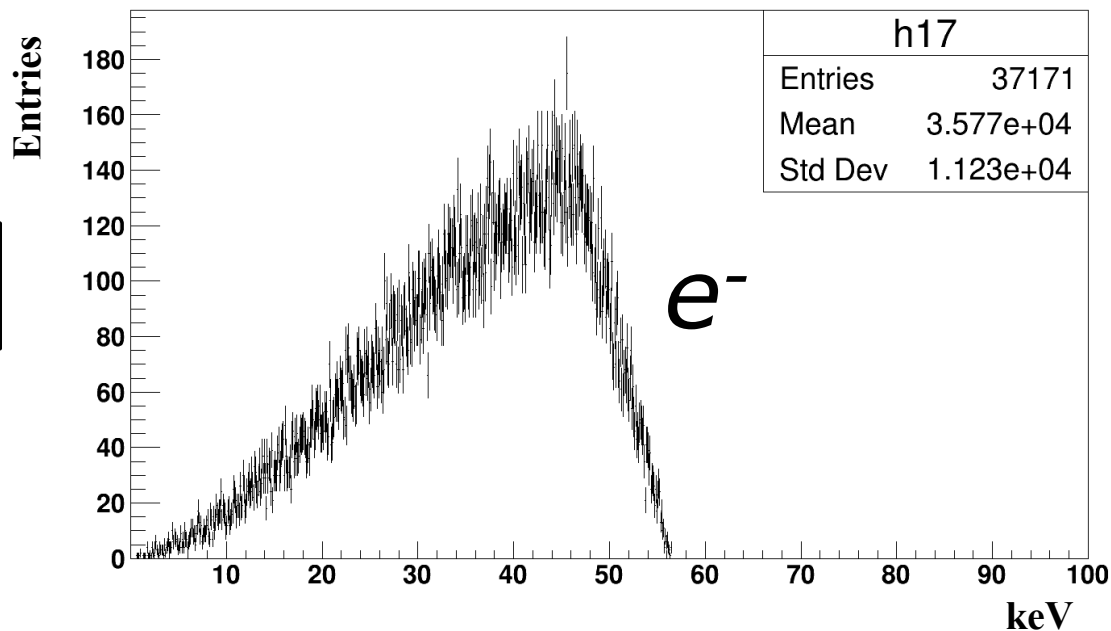
m_0 — масса мюона в покое

c — скорость света

Distribution of the beam momentum



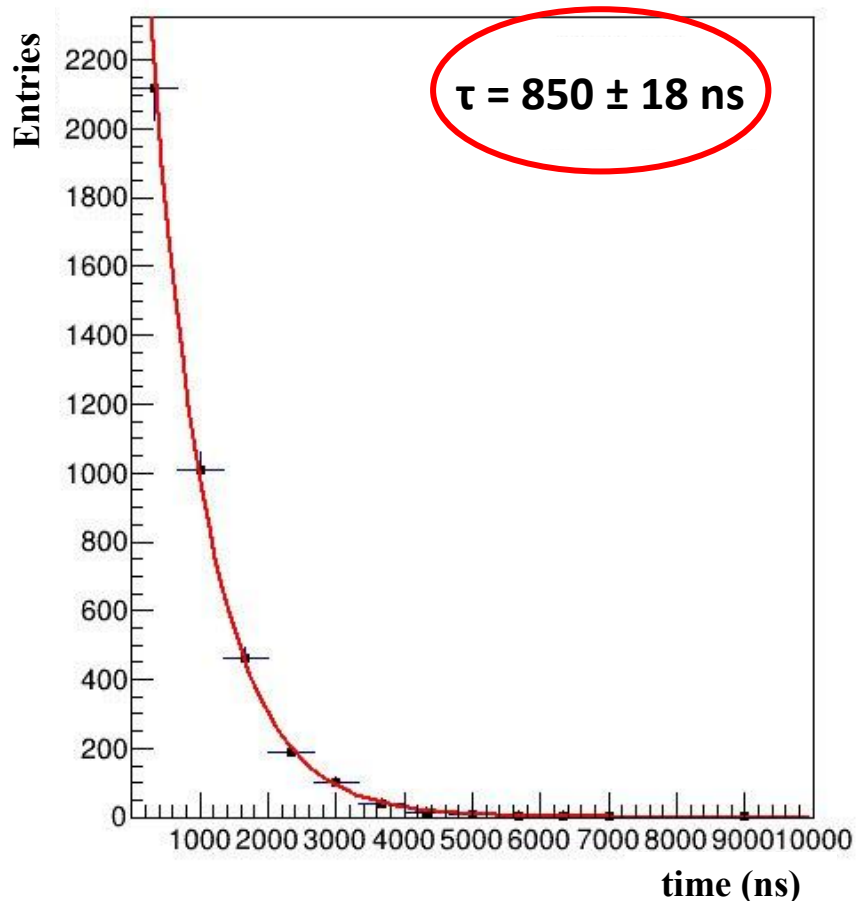
Electrons spectrum from decay





Результаты моделирования Время жизни мюона

Muon lifetime (^{27}Al)



2218

T. SUZUKI, D. F. MEASDAY, AND J. P. ROALSVIG

35

TABLE IV. Compendium of total muon capture results for medium and heavy nuclei. (Z_{eff} is taken from Ref. 77. When it is underlined, it is an estimate. Entries in parentheses in column 4 are not given in the original reference.)

Z (Z_{eff})	Element	Mean life (ns)	Total capture rate ($10^6/\text{s}$)	Huff factor	Refs.
10 (<u>9.14</u>)	Ne	1520 \pm 23	0.204 \pm 0.010	0.997	46
			0.167 \pm 0.030		47
			0.30 \pm 0.02		48
11 (9.95)	Na	1450 \pm 10	0.235 \pm 0.005	0.996	7
		1190 \pm 20	0.387 \pm 0.015		40
12 (10.69)	Mg	1204.0 \pm 2.0	0.3772 \pm 0.0014	0.995	a
		1040 \pm 20	0.507 \pm 0.020		40
		1071 \pm 2	0.480 \pm 0.002		42
		1021 \pm 25	0.52 \pm 0.02		49
13 (11.48)	<u>Al</u>	1067.2 \pm 2.0	0.4841 \pm 0.0018	0.993	a
		880 \pm 10	0.691 \pm 0.020		40
		864 \pm 2	0.662 \pm 0.003		42
		905 \pm 12	0.650 \pm 0.015		45
		864.0 \pm 1.0	0.7054 \pm 0.0013		a
14 (12.22)	Si	810 \pm 10	0.777 \pm 0.025	0.992	40
		767 \pm 2	0.850 \pm 0.003		42
		758 \pm 20	0.86 \pm 0.04		49
		756.0 \pm 1.0	0.8712 \pm 0.0018		a

*864 \pm 1 ns время жизни на атоме ^{27}Al из результатов эксперимента «Mu2e»

*Mu2e Collaboration. Universe9010054 (13 January 2023) doi.org/10.3390/universe9010054

T. Suzuki and D. F. Measday PhysRevC.35.2212(1987) doi.org/10.1103/PhysRevC.35.2212

Результаты моделирования

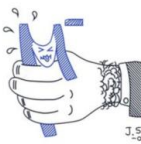
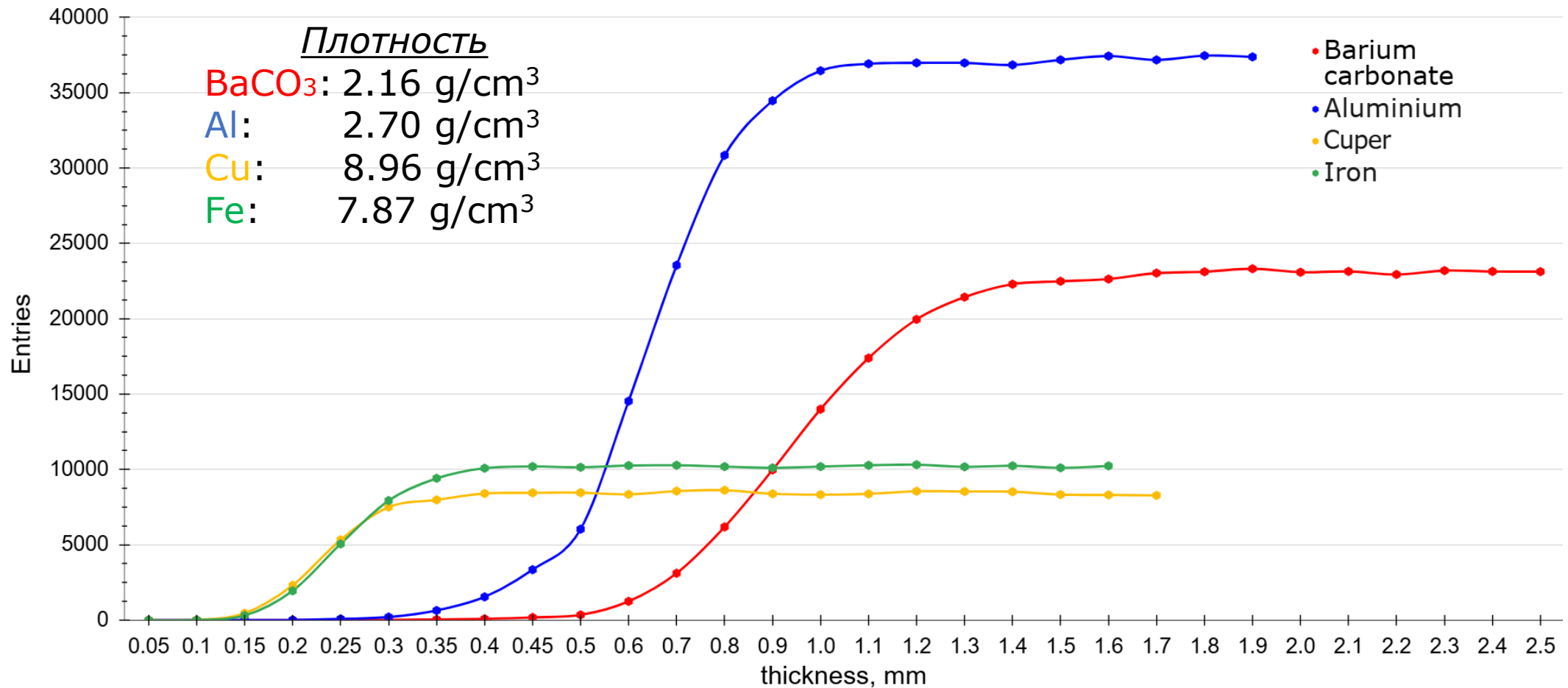
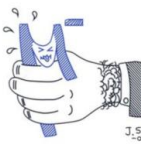


График взаимодействия мюонов с мишенью в зависимости от толщины для 100 000 событий в каждой точке





Модернизация экспериментальной установки Моделирование с использованием новой мишени

Предлагаемые модификации экспериментальной установки:

1. Материал мишени:

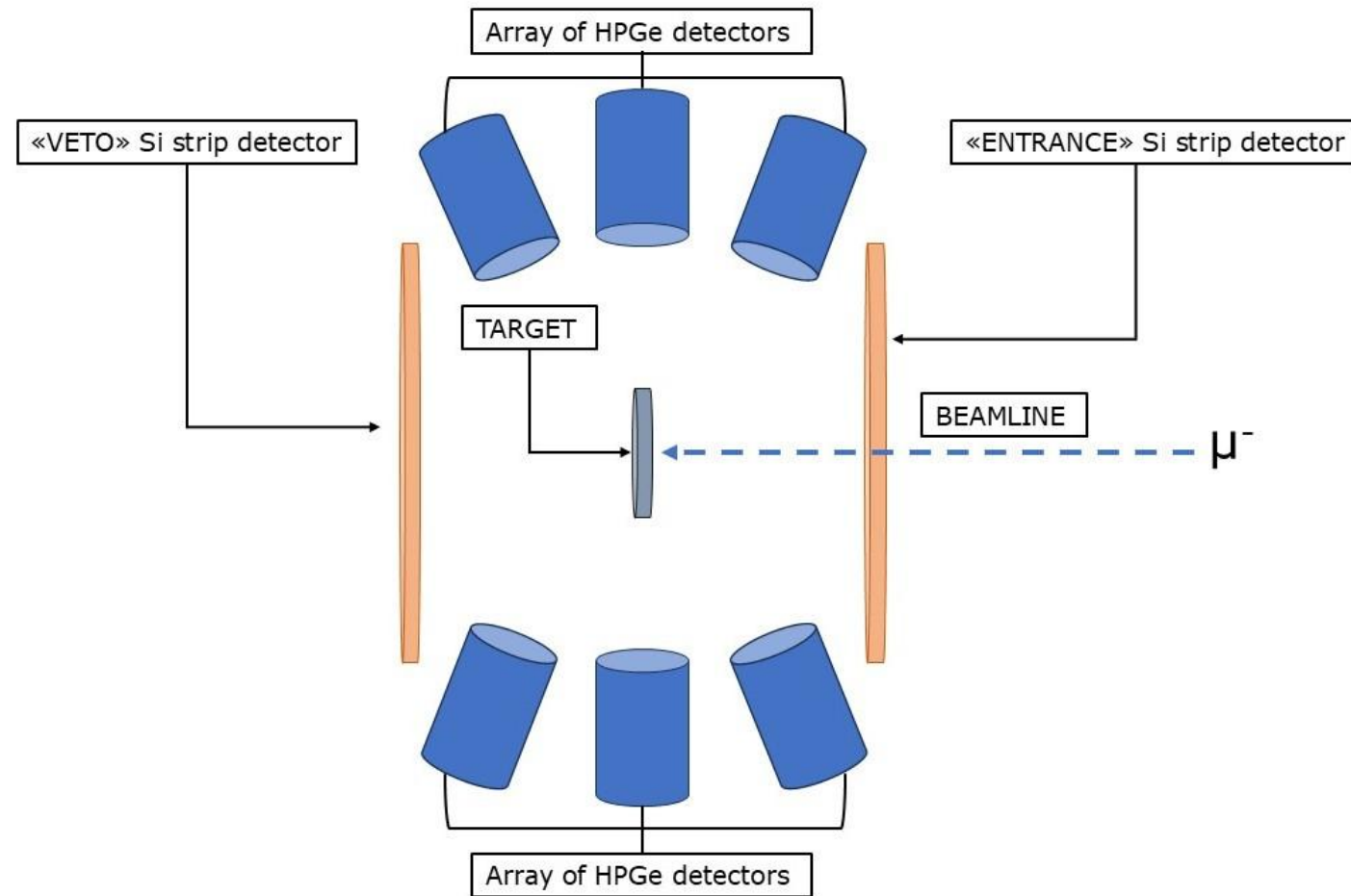
Замена существующей мишени на изотопно обогащенный углерод (^{12}C) толщиной 1 мм, диаметром 20 мм и плотностью **2.267 г/см³**, **1.677 г/см³**

2. Детекторы mu-stop:

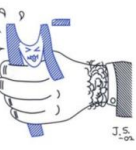
Замена пластиковых сцинтилляторов на кремниевые детекторы толщиной **300 микрон** перед и после мишени.

3. Параметры пучка:

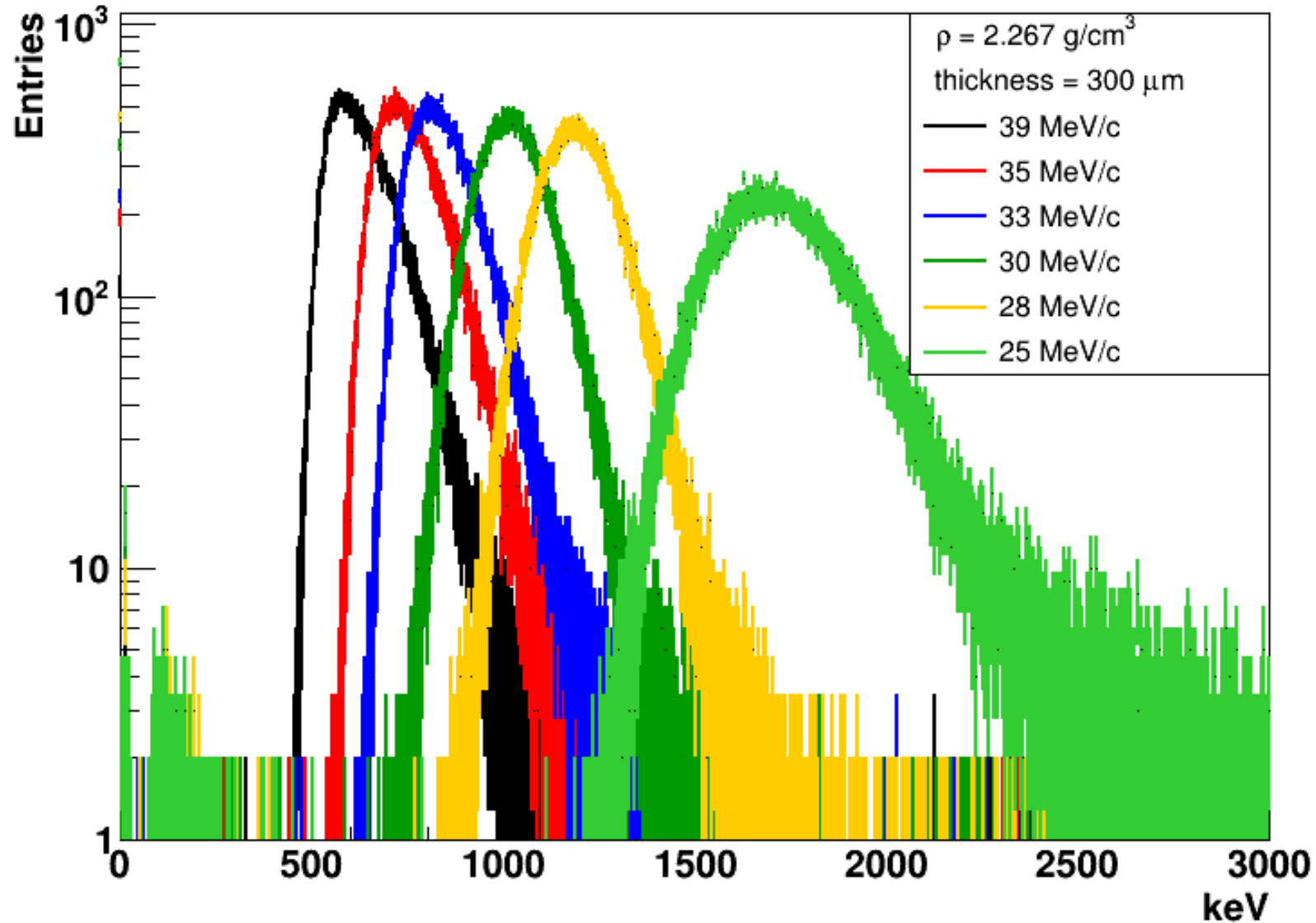
Оптимизация и точная настройка параметров пучка с учетом новых составляющих (кремниевого детектора и мишени).

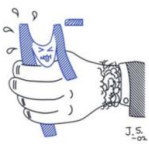


Моделирование пучка



Energy loss in the silicon detector per 100,000 muons

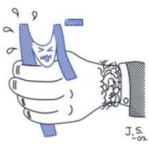




Энергетические потери

Момент пучка, p (MeV/c)	Кинетическая энергия, E (MeV)	Потери энергии в Si, (MeV)	Остановка мюона в мишени плотностью и толщиной 2.267 г/см³ 1мм, mm	Остановка мюона в мишени плотностью и толщиной 1.677 г/см³ 1мм, mm
39.0	6.96	0.65	>0.95	>1.0
35.0	5.64	0.75	0.90	>1.0
33.0	5.03	0.84	0.60	0.98
30.0	4.17	1.1	0.35	0.78
28.0	3.64	1.2	0.20	0.31
25.0	2.91	1.9	<0.10	<0.10

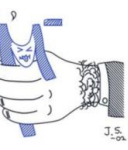




Заключение

- Моделирование экспериментальной установки MONUMENT в GEANT4 корректно описало динамику переноса отрицательных мюонов и их взаимодействие с различными мишенями, включая железо, медь, алюминий и карбонат бария.
- Результаты моделирования подтверждают, что импульс пучка оказывает существенное влияние на вероятность остановки мюонов в мишени. Оптимальный диапазон импульса пучка для углеродной мишени был определен как 28-33 МэВ/с на основе расчетов методом Монте-Карло.
- Дальнейшее уточнение результатов моделирования планируется после завершения разработки геометрии мюонной триггерной системы. Будут выбраны более точные параметры для пучка.

Проведенное моделирование не только подтверждает техническую и физическую осуществимость запланированных измерений, но и создает прочную основу для повышения научных результатов и технической надежности всего эксперимента.



Спасибо за внимание!

