

# Изучение возможности восстановления гиперонов в эксперименте $BM@N$

Выполнил студент гр. М21-115:

Барак Р.К.

Руководитель научно-исследовательской работы:

в.н.с. Белоцкий К. М.

Консультант научно-исследовательской работы:

в.н.с. Мерц С. П.

# Введение

- Столкновения тяжелых релятивистских ионов позволяют нам изучать ядерную материю при экстремальных плотности и температуре.
- При достаточно высоких температуре и плотности энергии формируется так называемая Кварк-глюонная плазма (КГП) [1]:
  - Производство гиперонов.
- Теоретические модели предлагают разные описания [2],[3]:
  - Нужны новые экспериментальные данные для разъяснения.

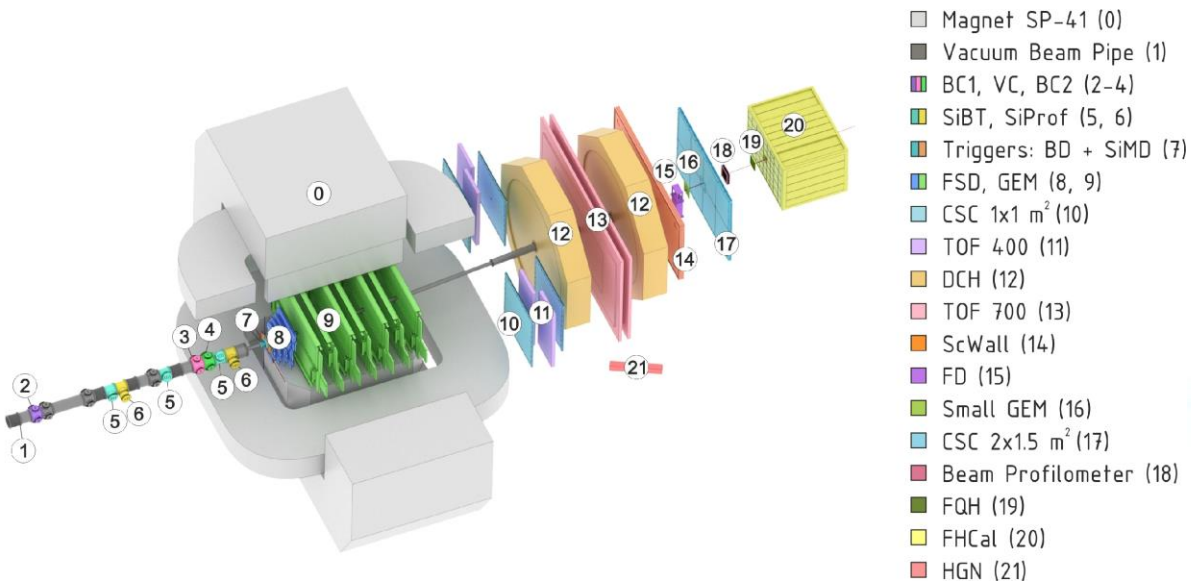
[1] Kapishin.M, “Studies of baryonic matter at the BM@N experiment (JINR).” Nuclear Physics A 982 (2019) 967–970.

[2] J. A. et al Nucl. Phys., vol. A 757, pp. 102–183, 2005.

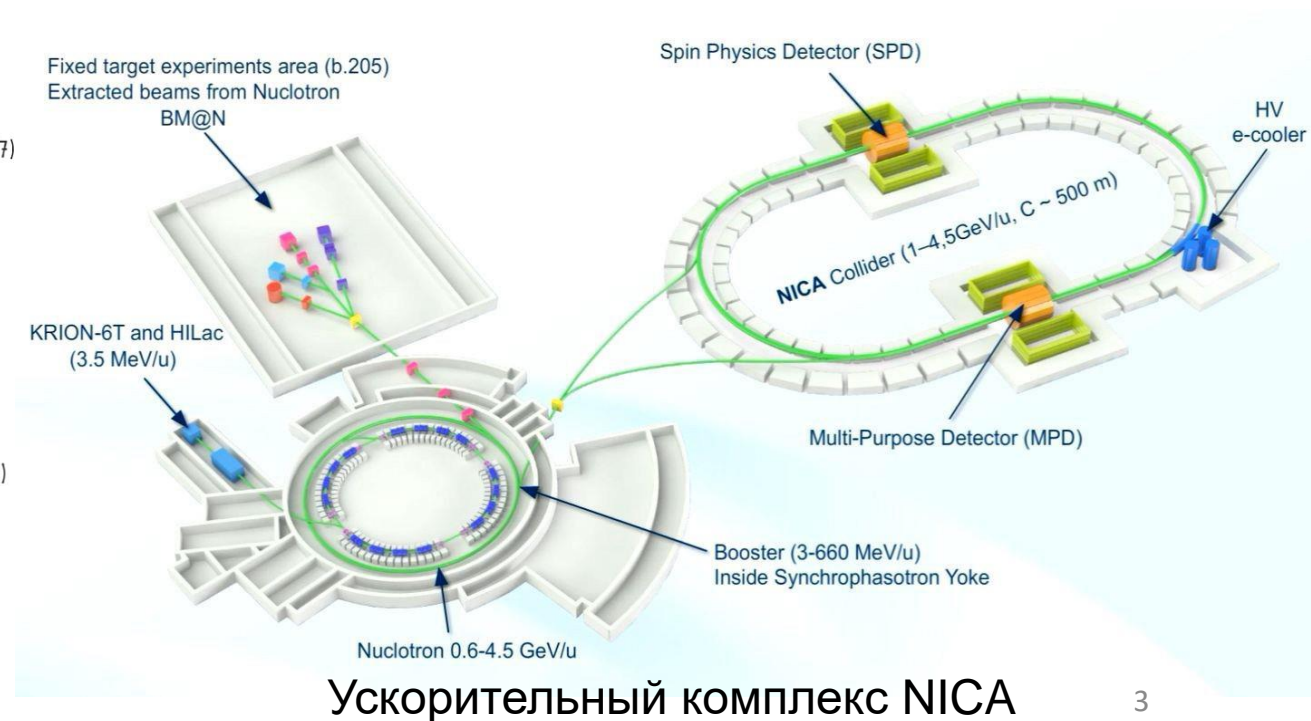
[3] K. A. et al Nucl. Phys., vol. A 757, pp. 184–283, 2005.

# Эксперимент BM@N на комплексе NICA

- Столкновения элементарных частиц и ионов с неподвижной мишенью при энергиях до 4 ГэВ на нуклон.
- Изучение свойств плотной барионной материи, образование гиперматерии, странность и адронную фемтоскопию.



Экспериментальная установка BM@N



Ускорительный комплекс NICA

# Цель работы

Поиск гиперонов в данных эксперимента  $BM@N$  с помощью математических алгоритмов.

## Задачи

- Моделирование и реконструкция данных для анализа.
- Разработка и реализация алгоритма для восстановления гиперонов.
- Определение источников повышения фона в массовом распределении.
- Исследование влияния источников фона на качество восстановления.
- Исследование зависимости множественности гиперонов от фазового пространства.

## Новизна

- Количественный анализ источников возникновения ложных и вторичных треков заряженных частиц.
- Анализ множественности реконструированных гиперонов в фазовом пространстве.

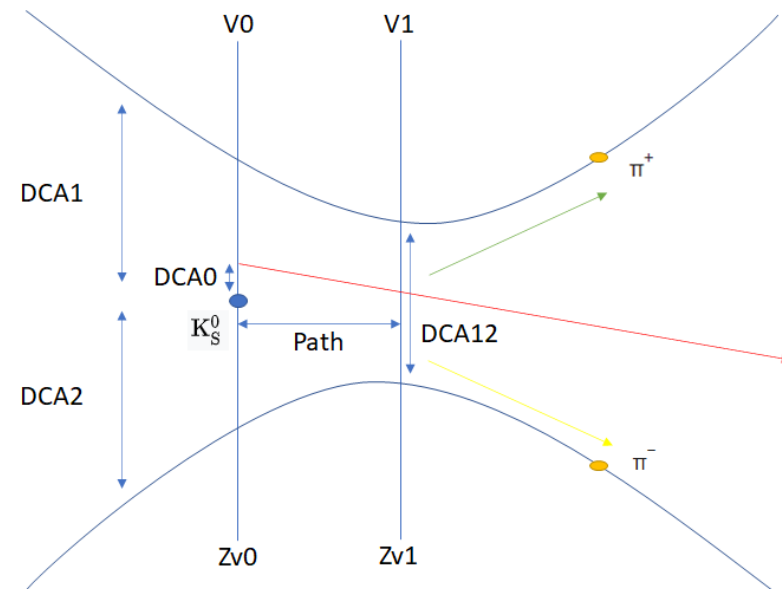
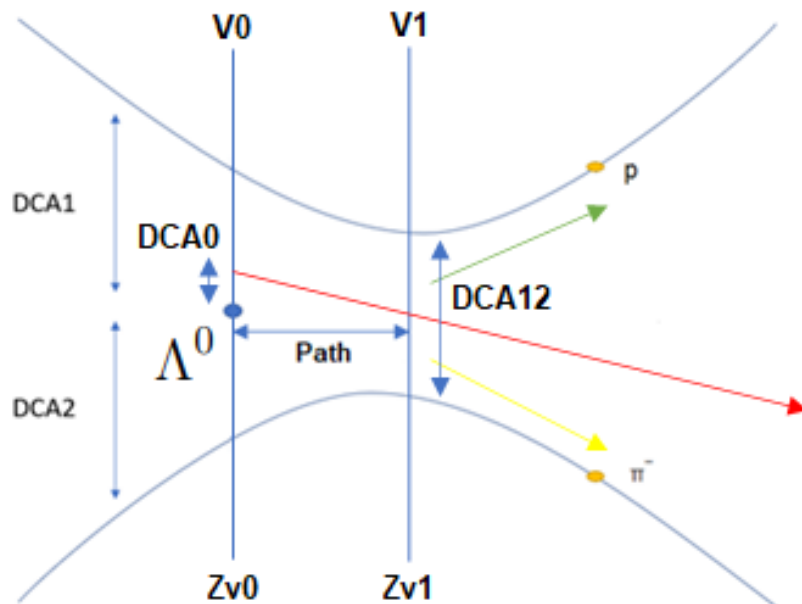
# Данные

- Для анализа использовались данные, полученные из Монте-Карло генератора DCM-SMM [4]. Было смоделировано 100000 событий.

[4] Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V. Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM, Physics of Particles and Nuclei Letters 17, 3, 303-324 (2020)

# Обработка данных

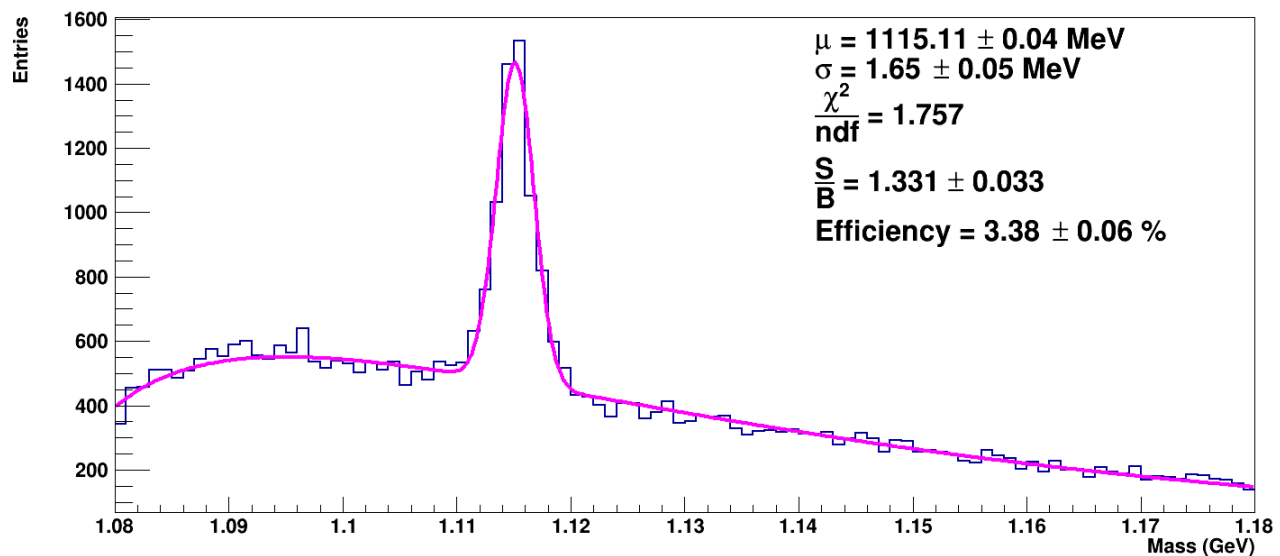
- Проведена реконструкция трэков частиц.
- Разработаны и реализованы математические алгоритмы для поиска траекторий лямбда-гиперонов по каналу распада на протон и отрицательный пи-мезон и короткоживущих нейтральных каонов по каналу распада на положительный и отрицательный пи-мезоны:
  - перебор пар частиц с разными знаками
  - вычисление инвариантной массы
  - наложение ряда геометрических ограничений на параметры каждой пары



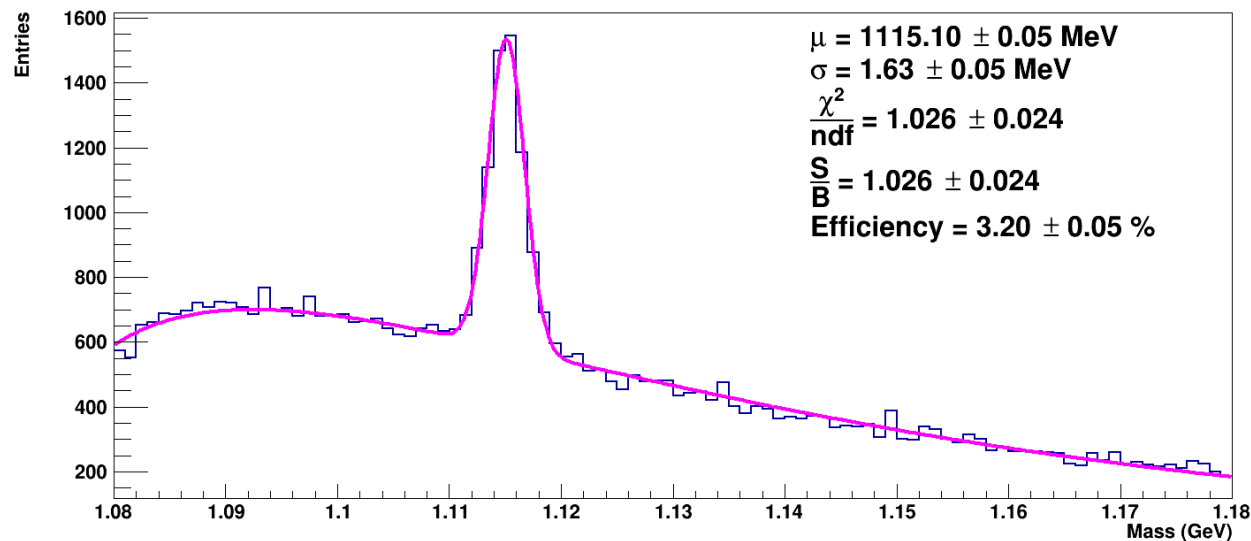
# Источники ухудшения сигнала

- **Размытие пучка**
  - В наименее реалистичном случае принимается, что пучок точечный. В реальности присутствует размытие пучка в поперечной плоскости, а также небольшой разброс по углу.
- **Триггерные детекторы SiMD и BD**
  - На рождение вторичных частиц и, как следствие, повышение фона в массовом распределении лямбда-гиперонов и короткоживущих нейтральных каонов, может влиять наличие вещества триггерных детекторов, расположенных после мишени до трековых детекторов.
- **Наличие материала мишени**
  - Так как мишень является протяженным объектом, то помимо первичного взаимодействия пучка с мишенью, возникают взаимодействия вторичных частиц с ядрами мишени. Это также может быть источником повышенного фона в массовых спектрах.

# Результаты Лямбда



Идеальный случай



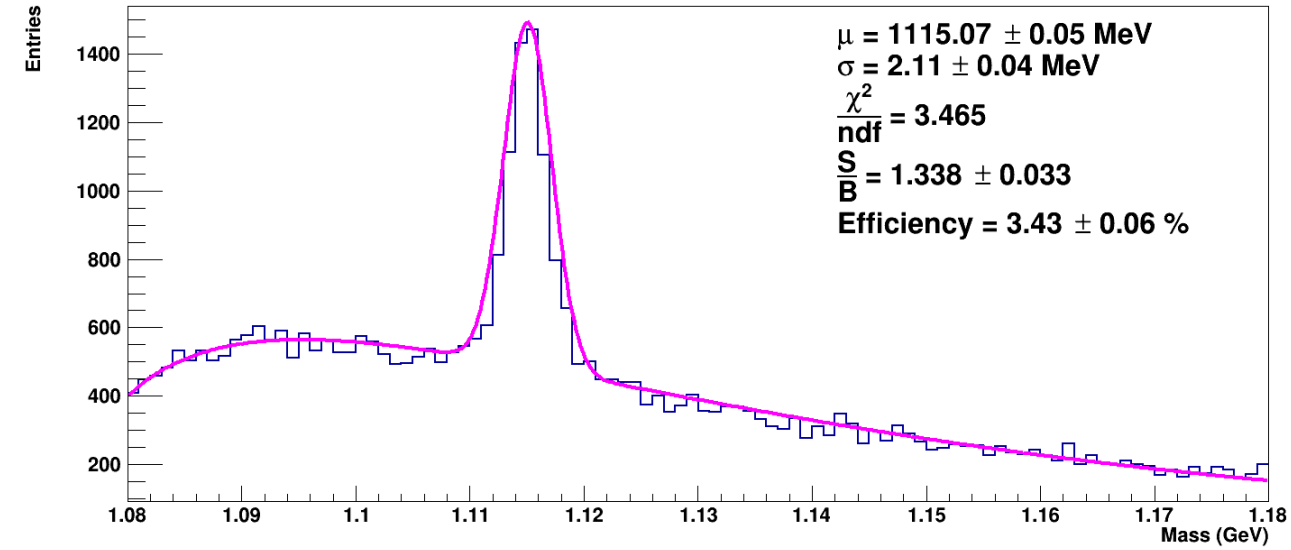
SiMD, BD, мишень и размытие пучка

- Ограничения
  - $3.0 < \text{path} < 20$
  - $0.0 < \text{DCA12} < 0.4$
  - $0.0 < \text{DCA0} < 0.2$
  - $0.1 < \text{DCA1} < 3.0$
  - $0.3 < \text{DCA2} < 3.0$

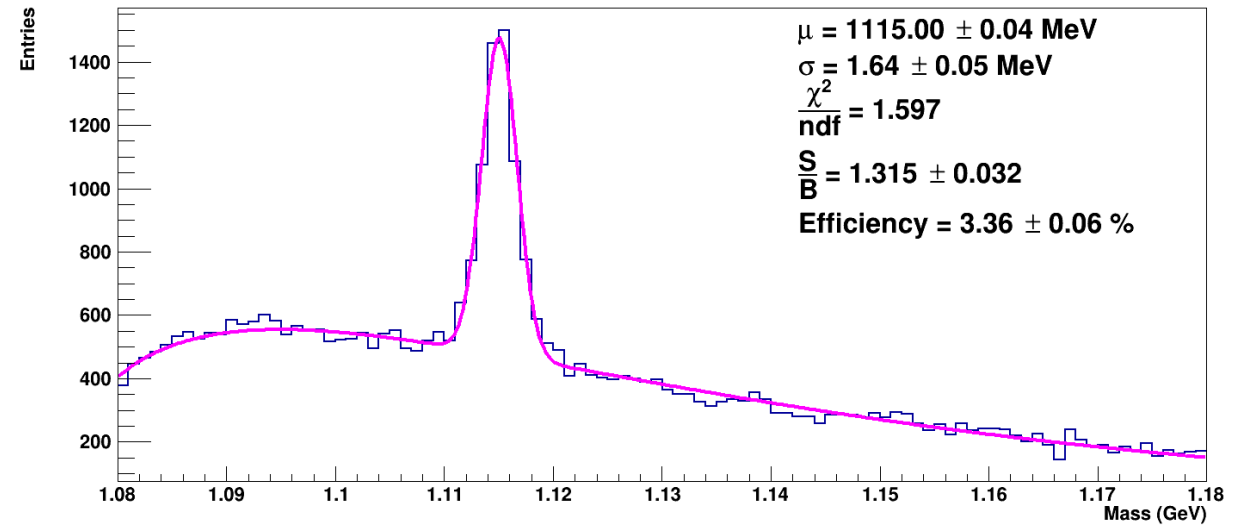


# Результаты

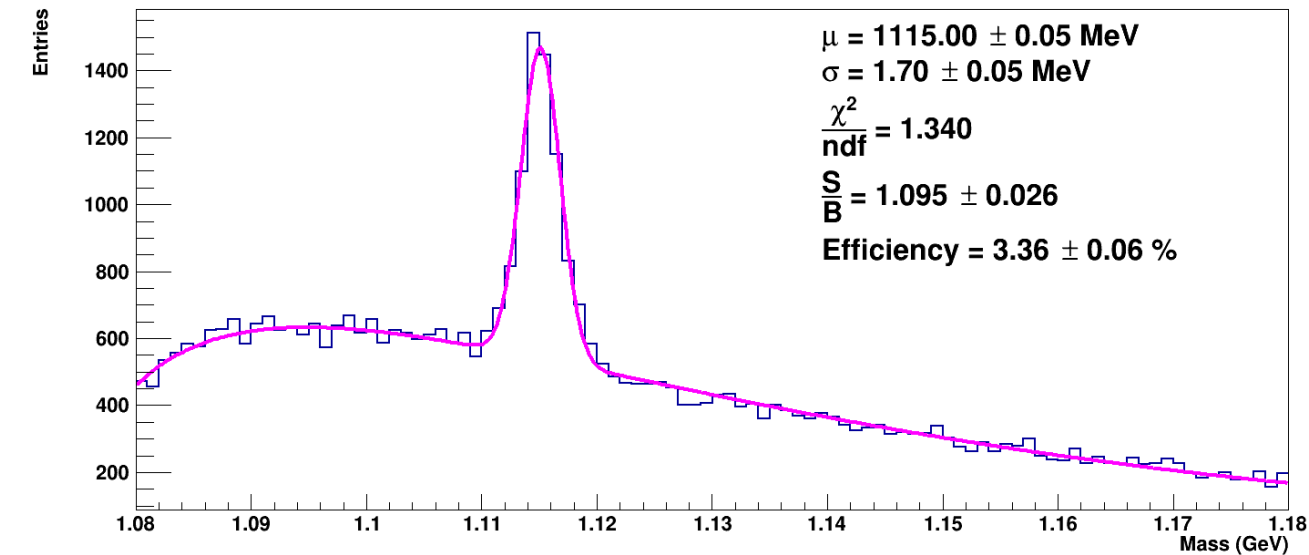
## Лямбда



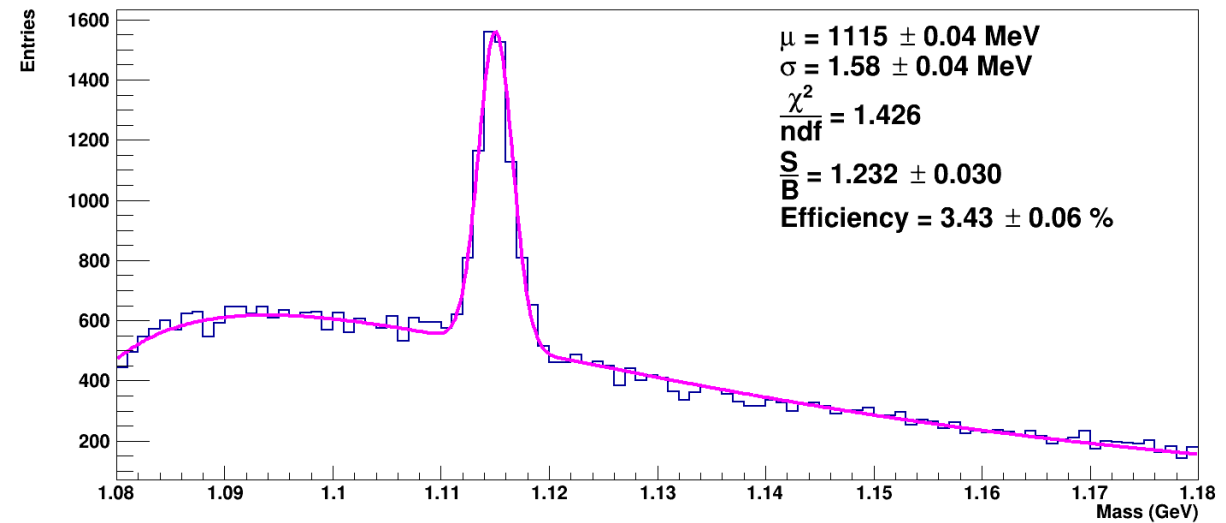
SiMD



BD



Размытие пучка



Мишень

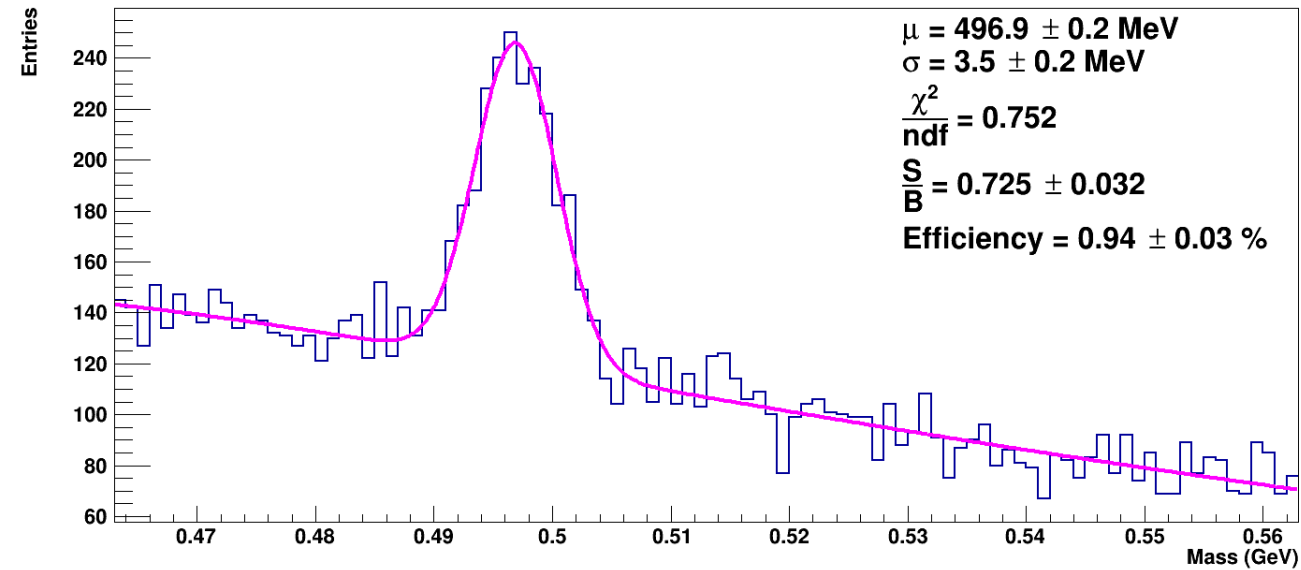
# Результаты

## Лямбда

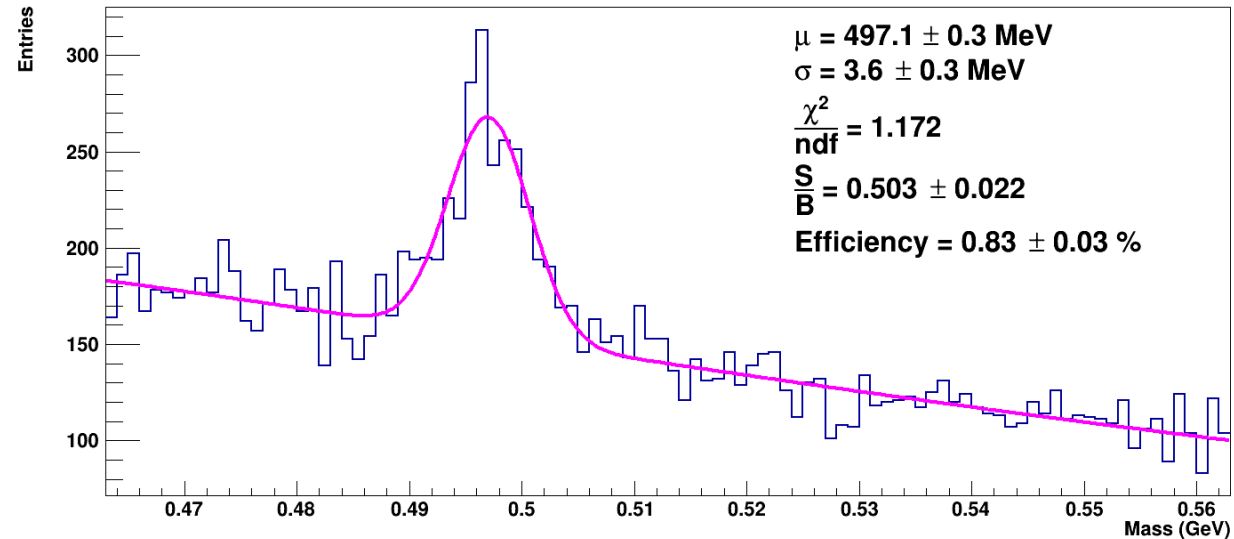
	Идеальный случай	SiMD, BD, target и размытие пучка	SiMD	BD	Target	Размытие пучка
$\mu$ (МэВ)	1115.11±0.04	1115.10±0.05	1115.07±0.05	1115.00±0.04	1115.03±0.04	1115.00±0.05
$\sigma$ (МэВ)	1.65±0.05	1.63±0.05	2.11±0.04	1.64±0.05	1.58±0.04	1.70±0.05
$\frac{\chi^2}{ndf}$	1.757	1.201	3.465	1.597	1.426	1.340
S	3802±98	3615±103	3851±98	3788±98	3860±101	3583±101
B	2855±53	3522±59	2878±54	2881±54	3133±56	3273±57
$\frac{S}{B}$	1.33±0.04	1.03±0.03	1.34±0.04	1.32±0.04	1.23±0.04	1.10±0.04
Efficiency (%)	3.38±0.09	3.20±0.09	3.43±0.09	3.36±0.09	3.43±0.09	3.36±0.10

# Результаты

## $K_S^0$



Идеальный случай

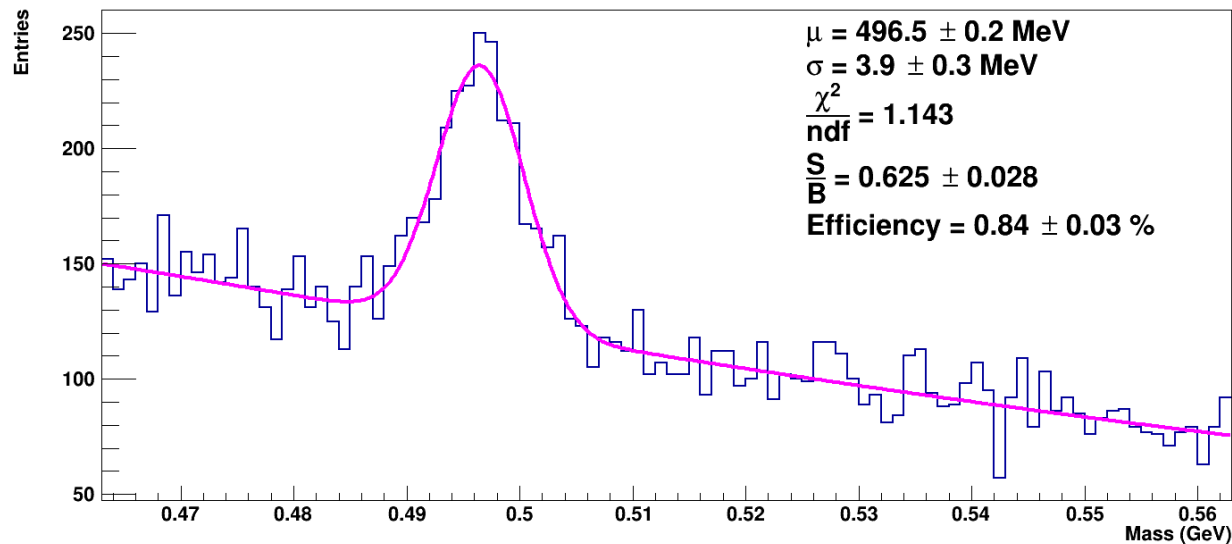


SiMD, BD, мишень и размытие пучка

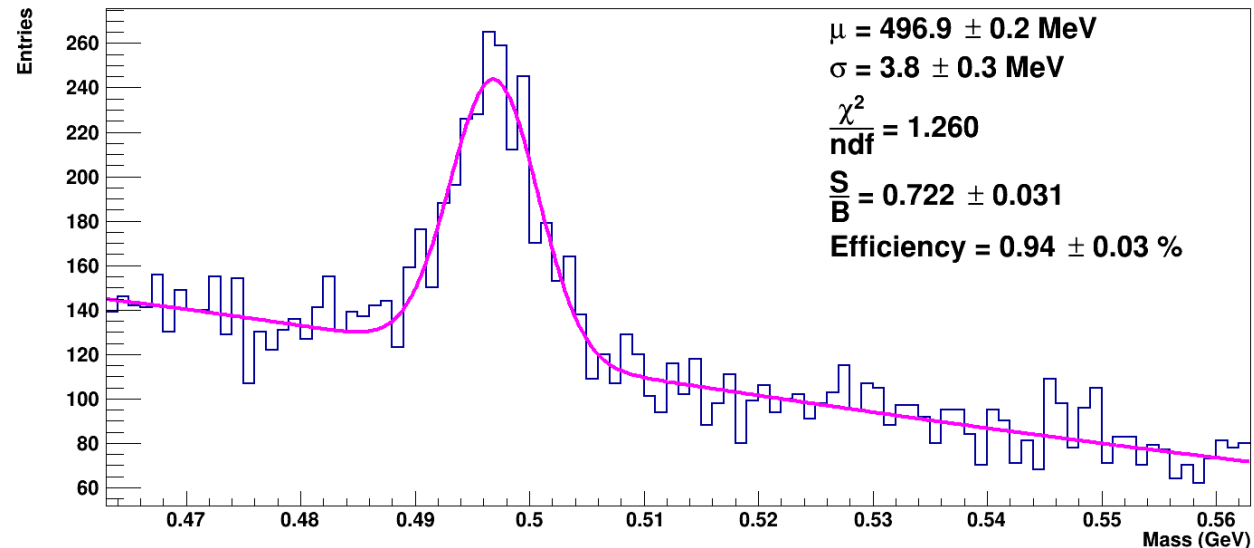
- Ограничения
  - $1.0 < \text{path} < 20$
  - $0.0 < \text{DCA12} < 0.3$
  - $0.0 < \text{DCA0} < 0.2$
  - $0.2 < \text{DCA1} < 3.0$
  - $0.2 < \text{DCA2} < 3.0$

# Результаты

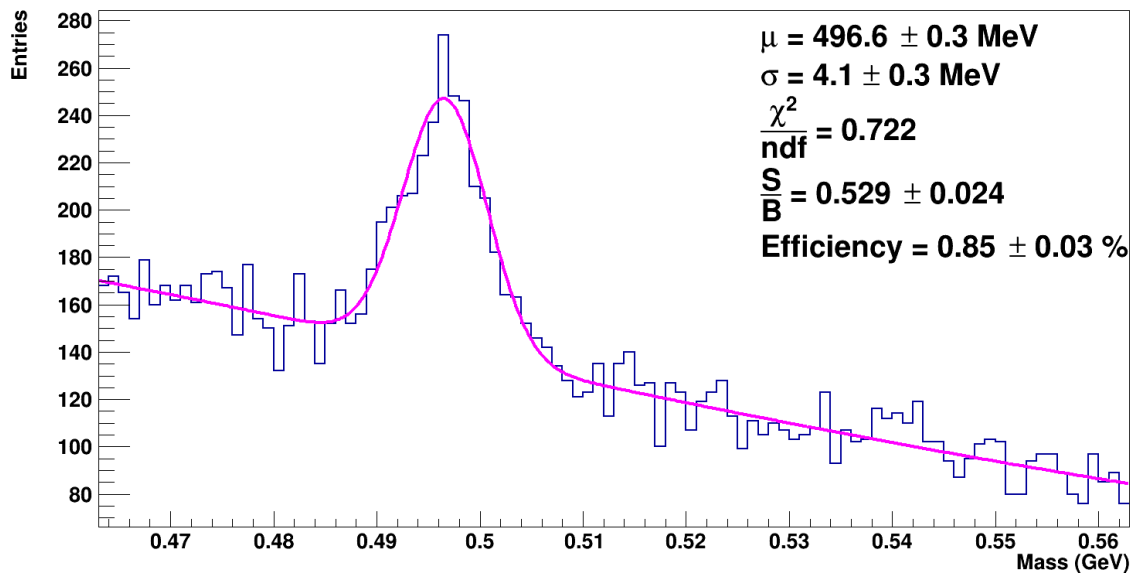
$K_S^0$



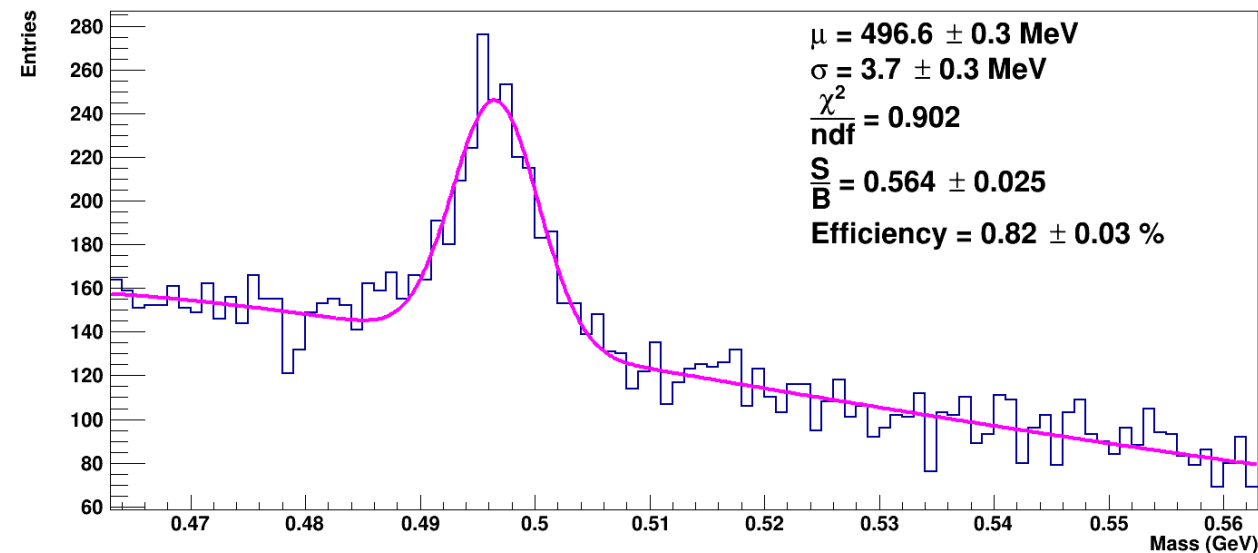
SiMD



BD



Размытие пучка



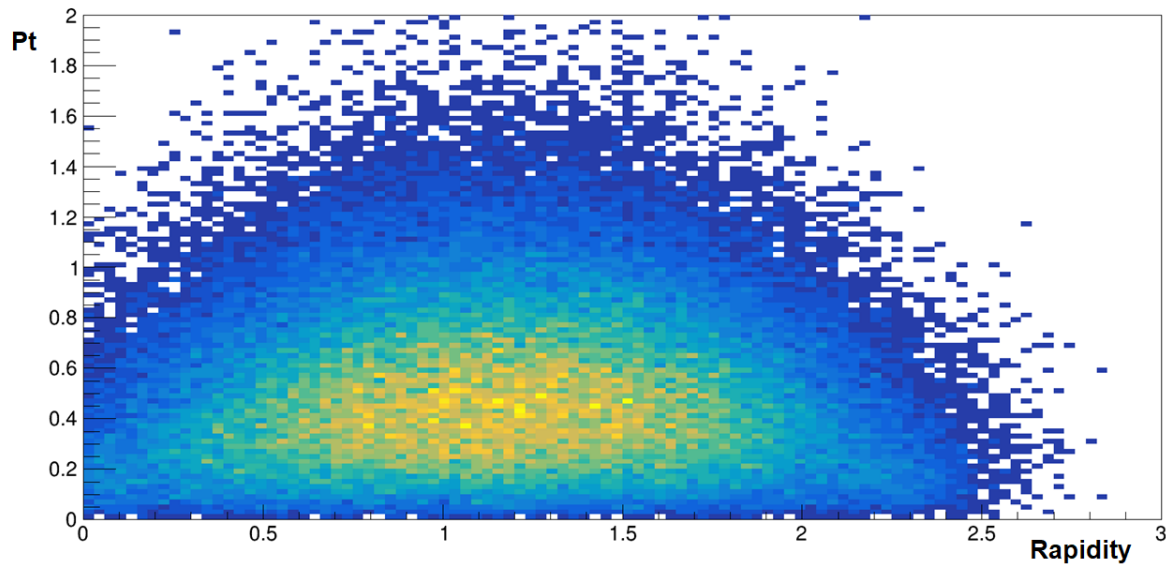
Мишень

# Результаты

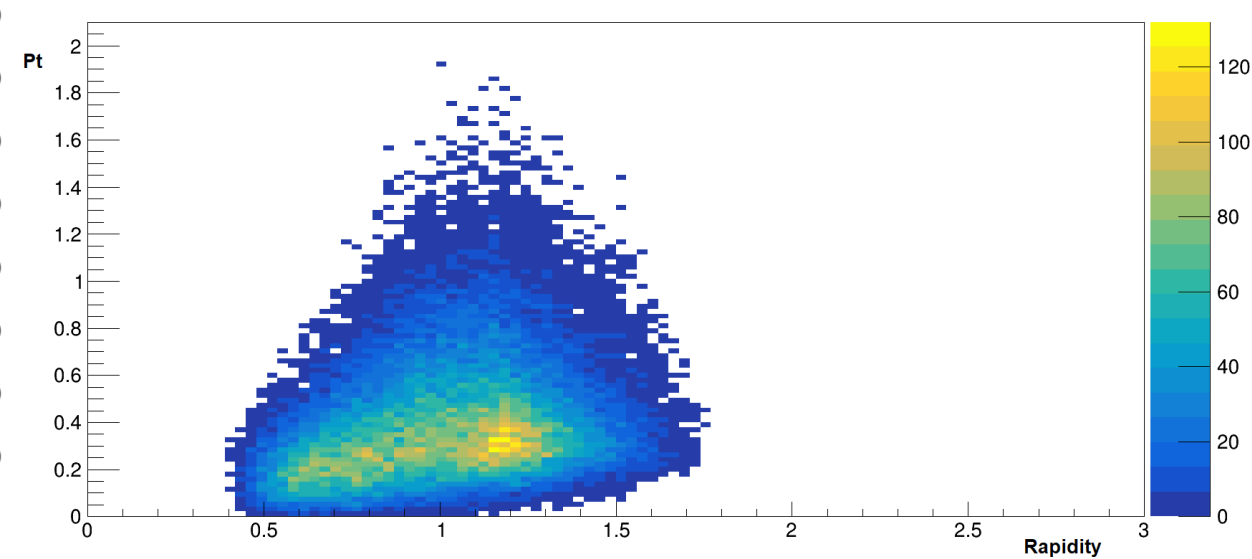
## $K_S^0$

	Идеальный случай	SiMD, BD, target и размытие пучка	SiMD	BD	Target	Размытие пучка
$\mu$ (МэВ)	496.9±0.2	497.1±0.3	496.5±0.2	496.9±0.2	496.6±0.3	496.6±0.3
$\sigma$ (МэВ)	3.5±0.2	3.6±0.3	3.9±0.3	3.8±0.3	3.7±0.3	4.1±0.3
$\frac{\chi^2}{ndf}$	0.752	1.172	1.143	1.260	0.902	0.722
S	900±58	803±63	804±58	909±59	791±60	775±61
B	1240±35	1596±40	1286±36	1259±35	1401±37	1463±38
$\frac{S}{B}$	0.73±0.05	0.50±0.04	0.63±0.05	0.72±0.05	0.56±0.05	0.53±0.04
Efficiency (%)	0.94±0.06	0.83±0.07	0.84±0.06	0.94±0.06	0.82±0.06	0.85±0.07

# Результаты Лямбда

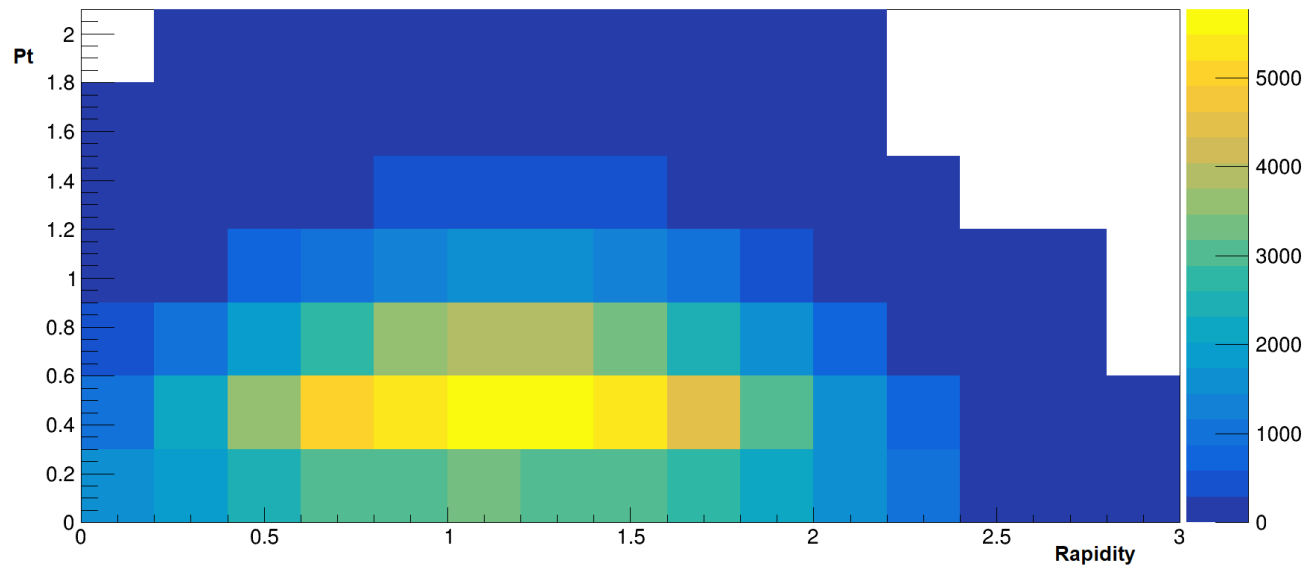


Распределение количества лямбда-гиперонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных с помощью Монте-Карло генератора

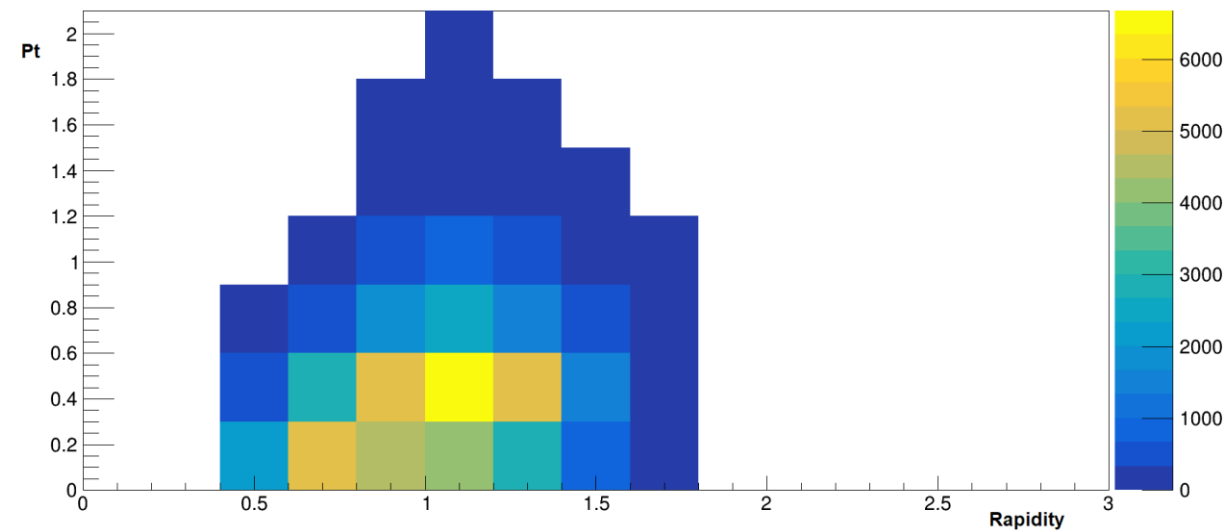


Распределение количества лямбда-гиперонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных после процесса реконструкции и наложения геометрических ограничений

# Результаты Лямбда

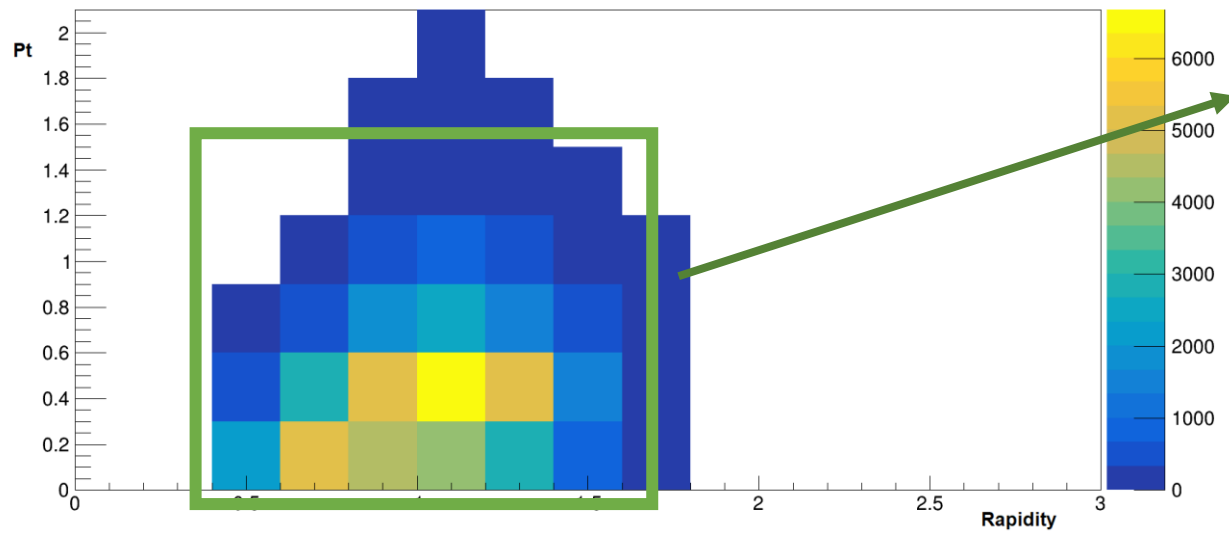


Распределение количества лямбда-гиперонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных с помощью Монте-Карло генератора с уменьшением биннинга

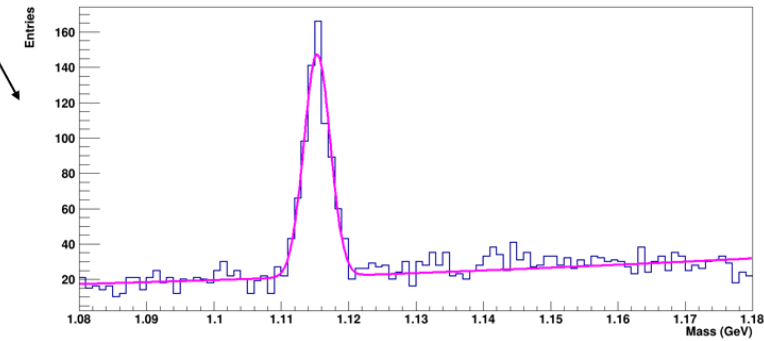


Распределение количества лямбда-гиперонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных после процесса реконструкции и наложения геометрических ограничений с уменьшением биннинга

# Результаты Лямбда

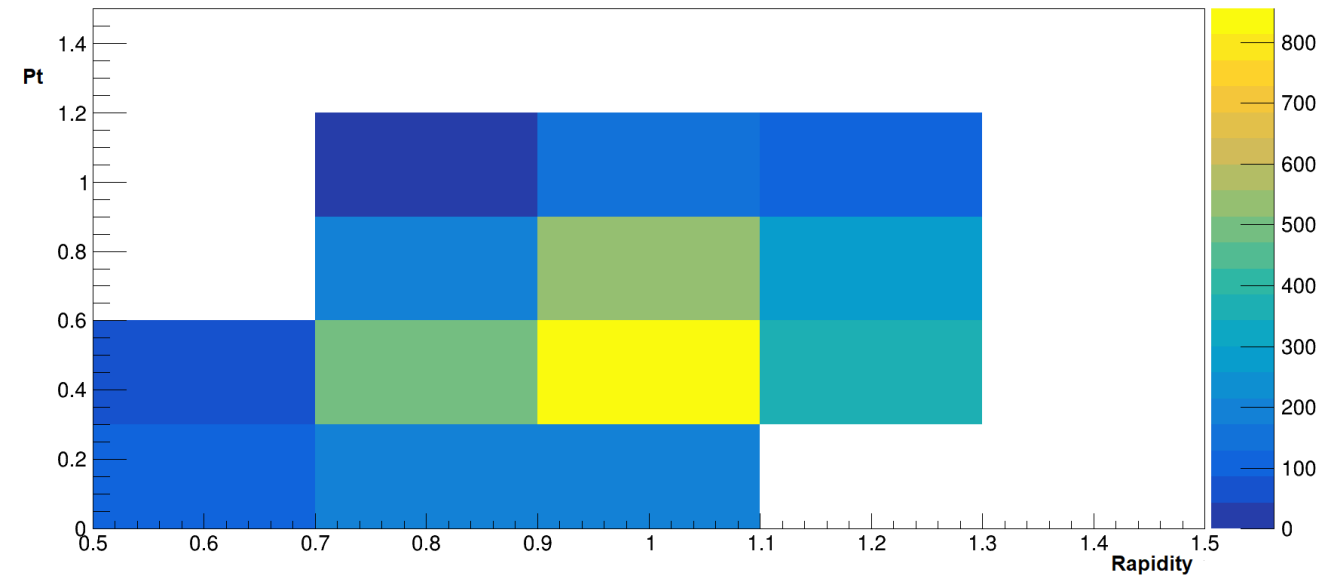


Pt	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>24</b>
	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>23</b>
	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>22</b>
	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>16</b>	<b>21</b>
	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
	0				
					Rapidity

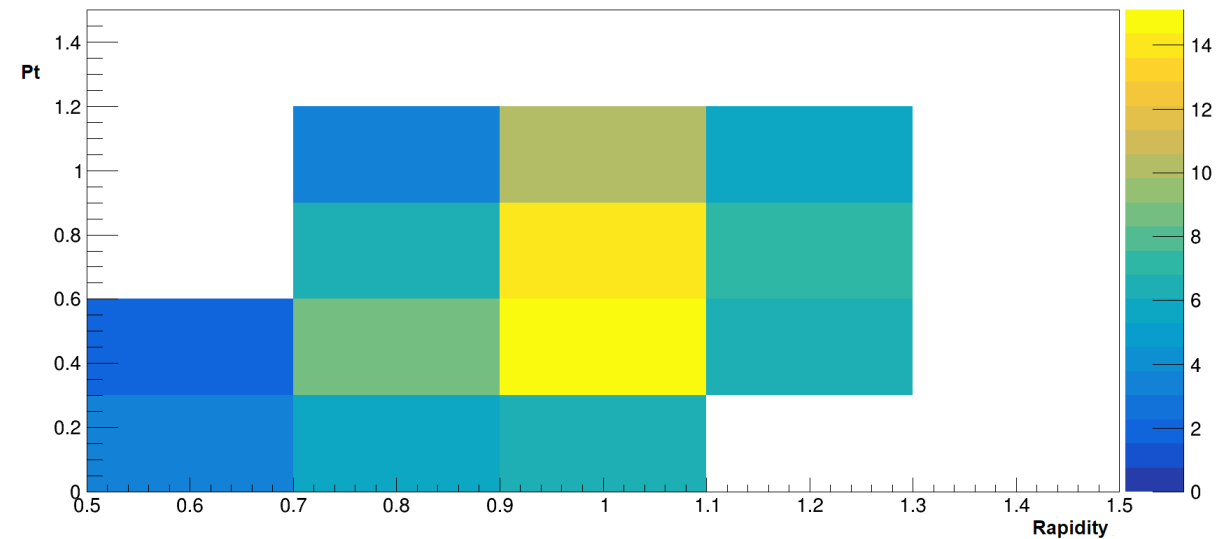




# Результаты Лямбда



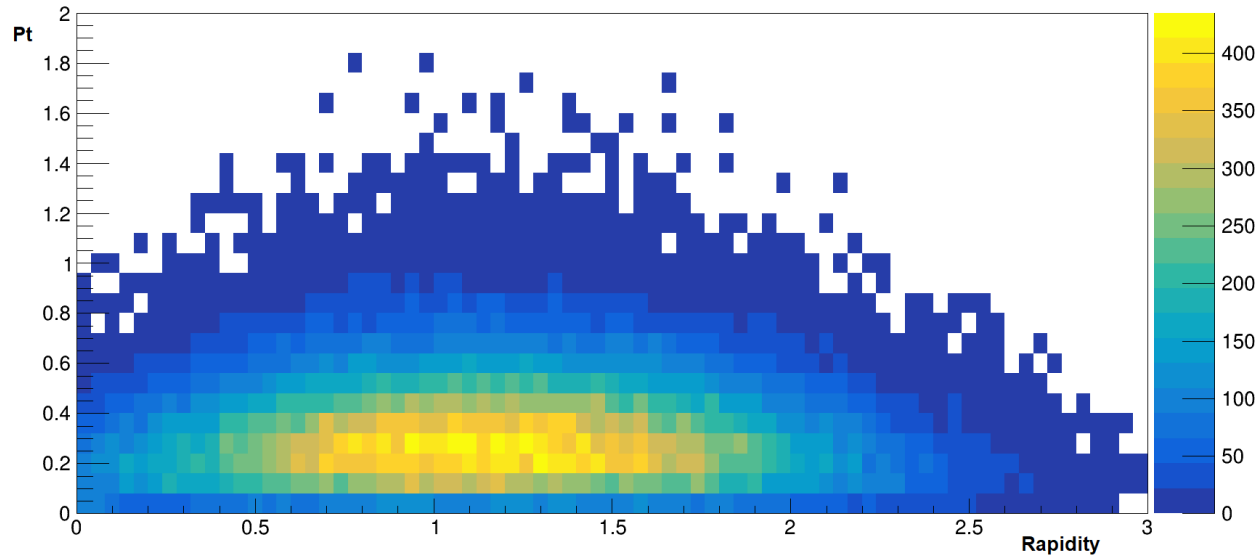
Распределение количества лямбда-гиперонов в фазовом пространстве основанное на данных полученных после процесса реконструкции, наложения геометрических ограничений и извлечения сигнала



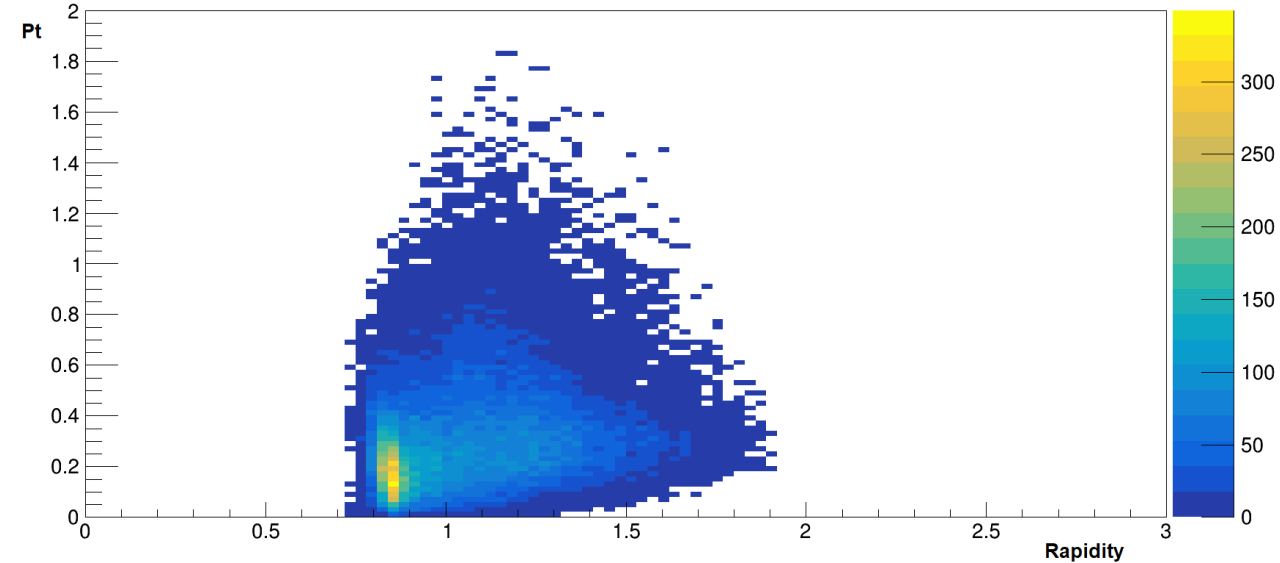
Эффективность восстановления лямбда-гиперонов в фазовом пространстве

# Результаты

## $K_S^0$



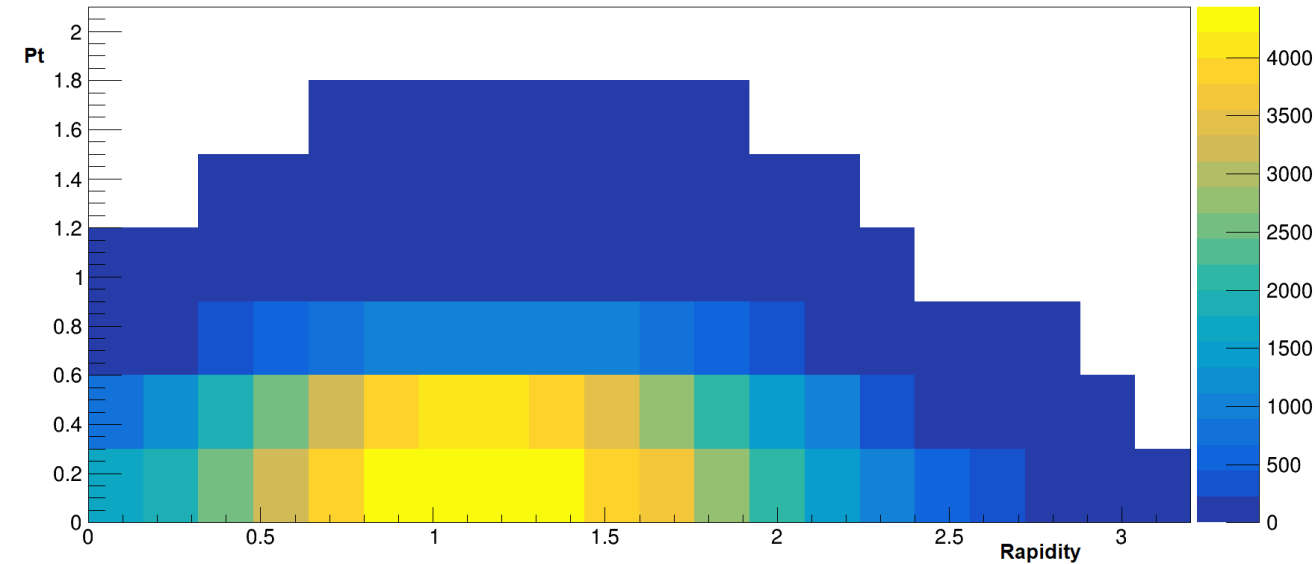
Распределение количества короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных с помощью Монте-Карло генератора



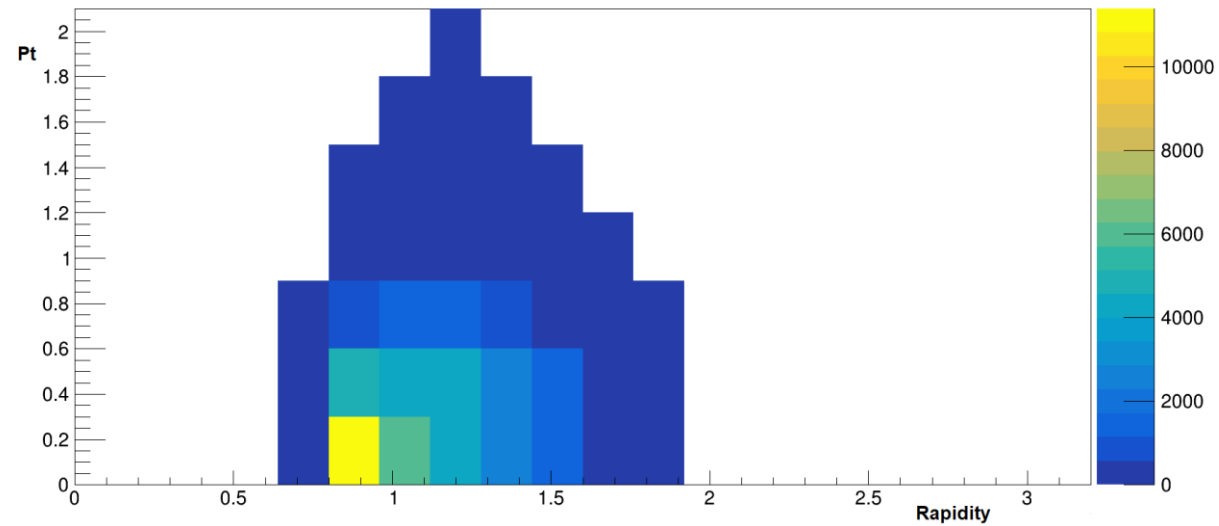
Распределение количества короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных после процесса реконструкции и наложения геометрических ограничений

# Результаты

## $K_S^0$



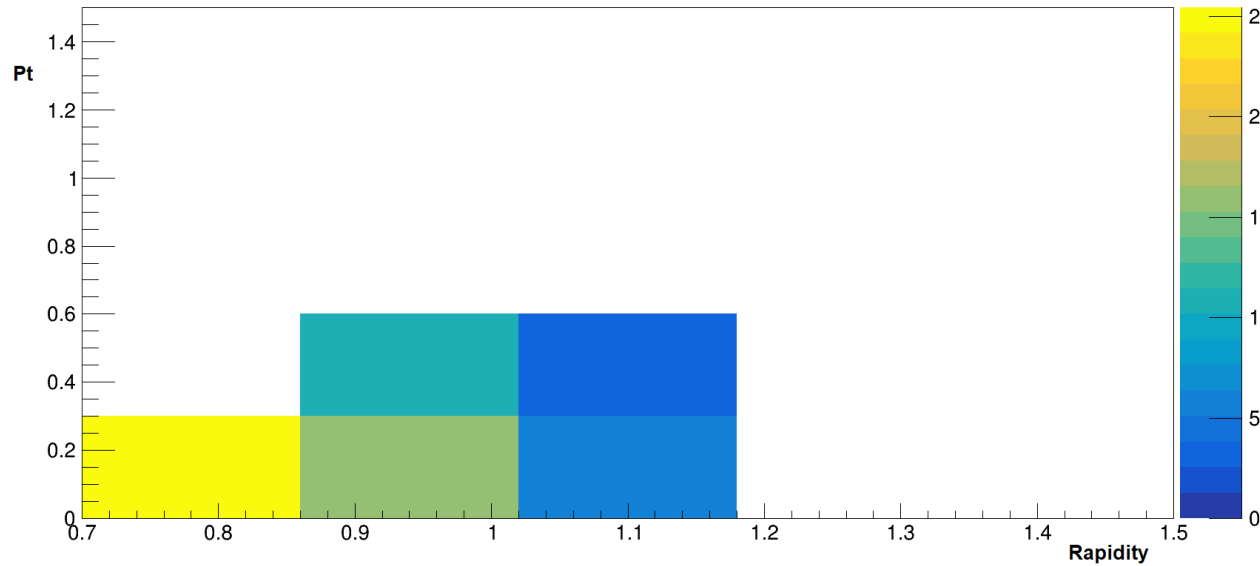
Распределение количества короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных с помощью Монте-Карло генератора с уменьшением биннинга



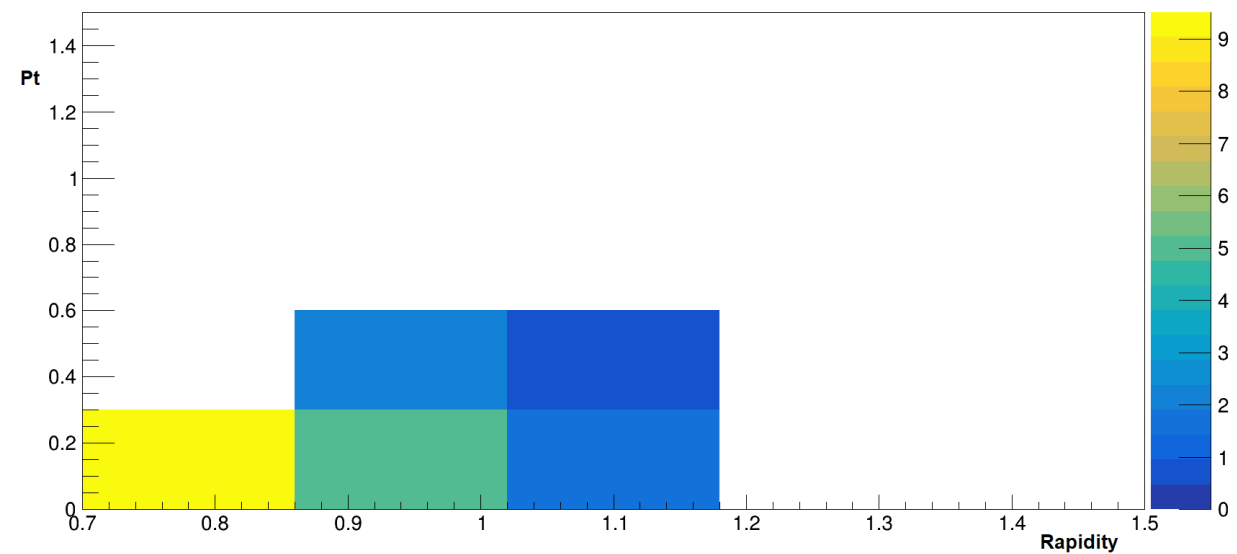
Распределение количества короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных после процесса реконструкции и наложения геометрических ограничений с уменьшением биннинга

# Результаты

## $K_S^0$



Распределение количества короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве, основанное на данных полученных после процесса реконструкции, наложения геометрических ограничений и выявления сигнала



Эффективность восстановления короткоживущих нейтральных каонов в фазовом пространстве

# Заключение

- Разработаны алгоритмы, с помощью которых было выявлено присутствие лямбда-гиперона и  $K_S^0$ .
- Проведено моделирование и анализ 100000 событий для идеального случая и случая с разными источниками ухудшения сигнала.
- Количественно показано, что размытие пучка вносит наибольший отрицательный вклад в окончательный результат восстановления гиперонов.
- Получена эффективность лямбда-гиперонов и  $K_S^0$  в фазовом пространстве.

# Апробация результатов

- Результаты этой работы были представлены на следующих конференциях:
  - XVII Всероссийская молодежная научно-инновационная школа “МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ”, г. Саров, 2023
  - 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Долгопрудный, 2023
  - 10-е коллаборационное совещание эксперимента VM@N на установке NICA, г. Санкт-Петербург, 2023
  - XII ежегодная конференция молодых ученых и специалистов “Алушта-2023”, г. Алушта, 2023

**Спасибо за внимание!**

# Планы

- Изучение влияния поворота станций кремния на восстановление странных частиц.
- Проверка алгоритма на экспериментальных данных.

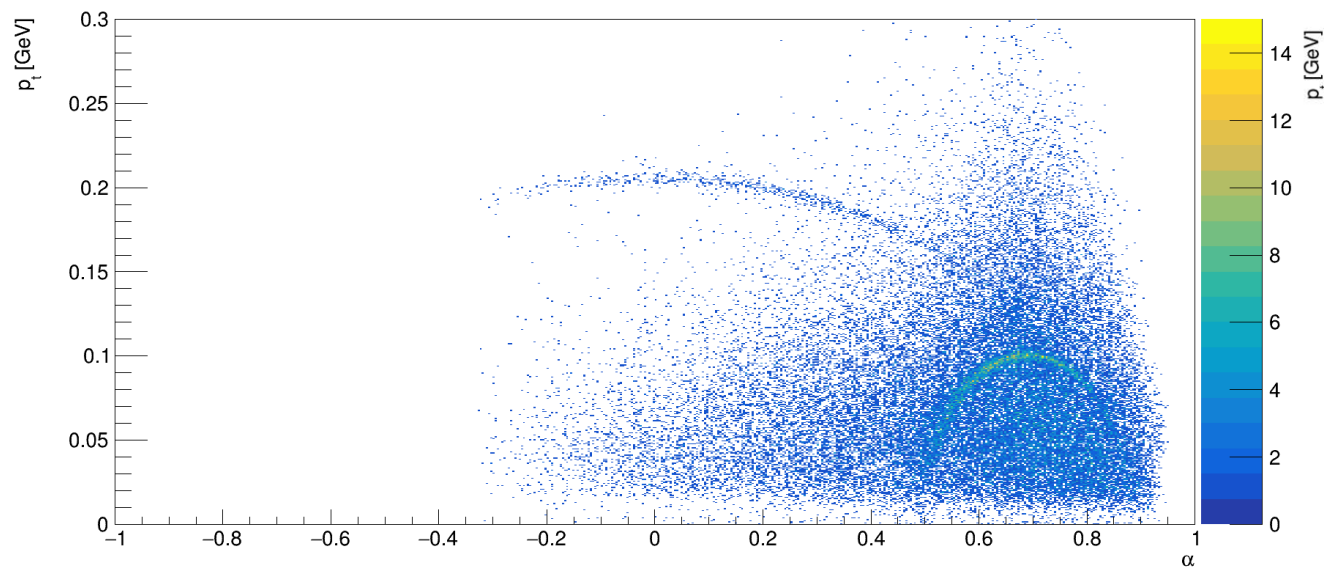


# Backup

# Результаты

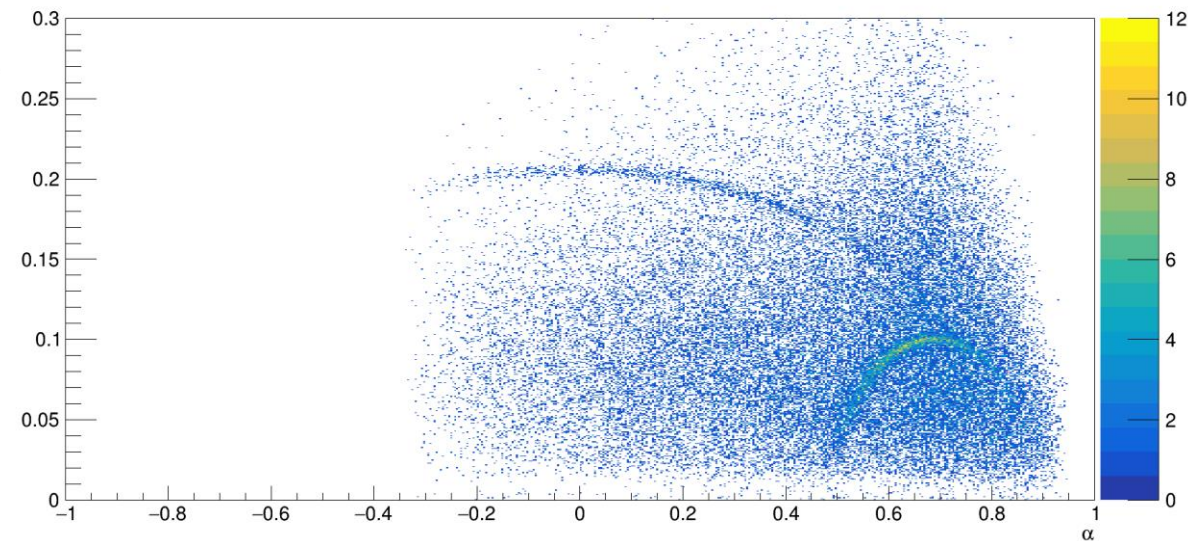
## Armenteros-Podolanski plots

Armenteros-Podolanski plot



Агоритм восстановления лямбда-гиперонов

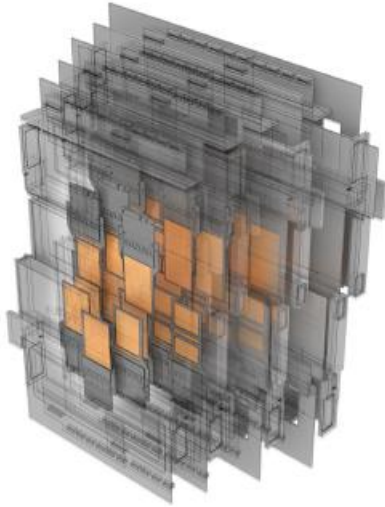
Armenteros-Podolanski plot



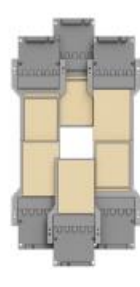
Агоритм восстановления  $K_S^0$

# Forward Silicon Detector

**Forward Silicon Detector (FSD)** is a high-precision coordinate detector of the inner tracking system of the BM@N setup. It consists of a set of silicon modules which are assembled into 4 stations.



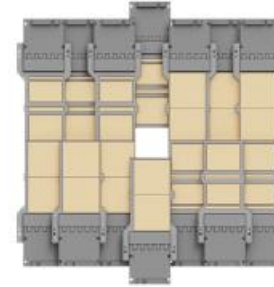
## Silicon stations



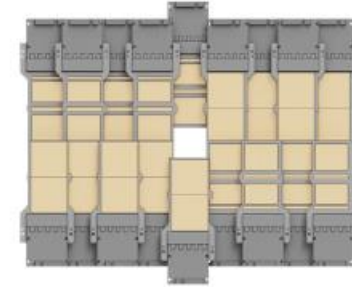
**Station 1:**  
6 modules of 63x93 mm<sup>2</sup>



**Station 2:**  
10 modules of 63x126 mm<sup>2</sup>

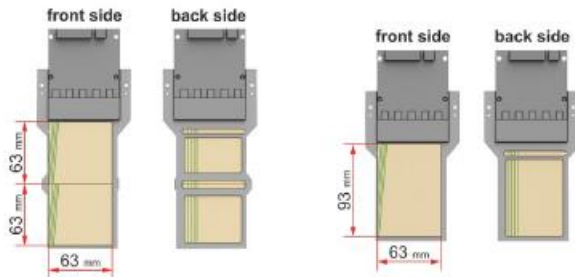


**Station 3:**  
14 modules of 63x126 mm<sup>2</sup>



**Station 4:**  
14 modules of 63x126 mm<sup>2</sup>

## Silicon module types

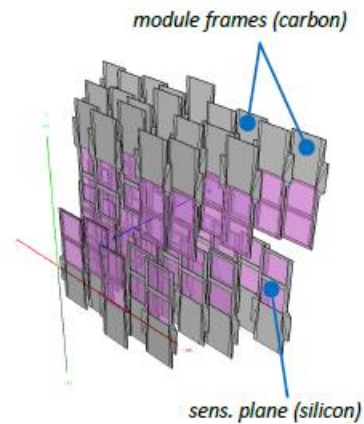


**Si-module**  
with two double-sided strip  
sensors of 63x63 mm<sup>2</sup> each

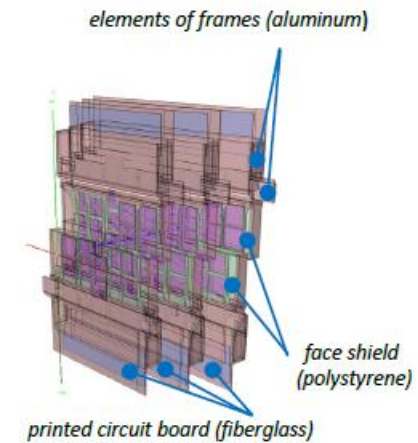
**Si-module**  
with one double-sided strip  
sensor of 63x93 mm<sup>2</sup>

sensor thickness: 300 μm  
strip pitch: ≈ 100 μm  
stereo angle between strips: 2.5°

## ROOT geometry



Basic ROOT geometry of the FSD detector



Detailed ROOT geometry of the FSD detector

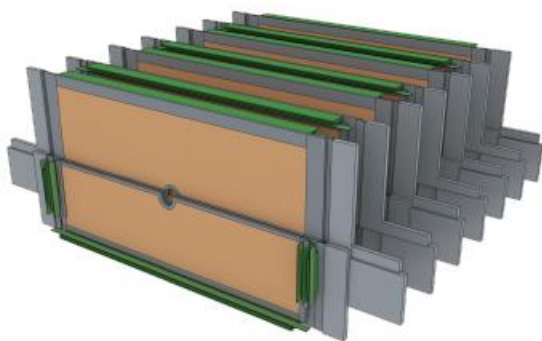
Adding passive elements to the geometry allows us to take into account detector materials which affect the passage of particles through matter. This, in turn, improves the accuracy of the Monte-Carlo simulation.



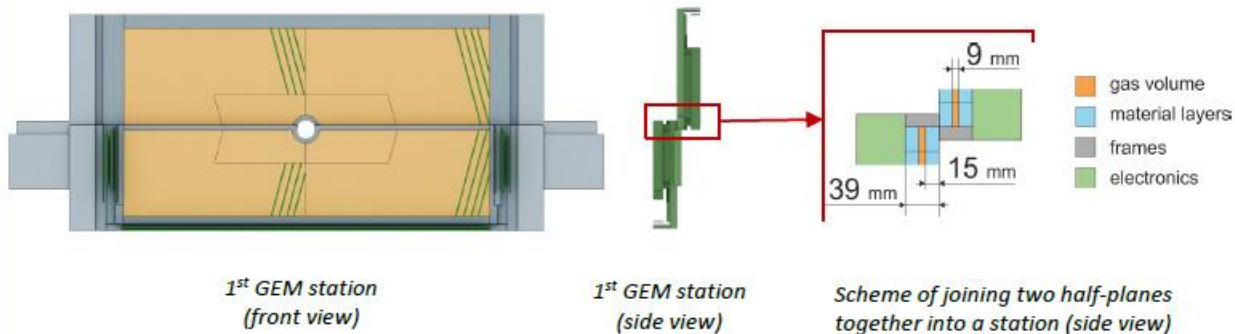
# GEM detector

**GEM (Gas Electron Multipliers)** is a microstrip coordinate detector of the central tracker in the BM@N setup. It consists of gaseous chambers with electron multiplier system inside.

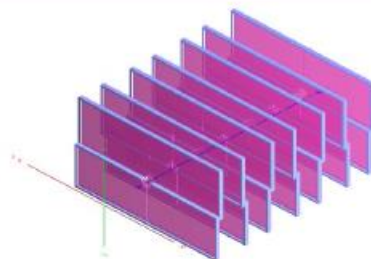
The configuration of this detectors for RUN-8 comprises **seven stations** located inside the magnet along the beam axis.



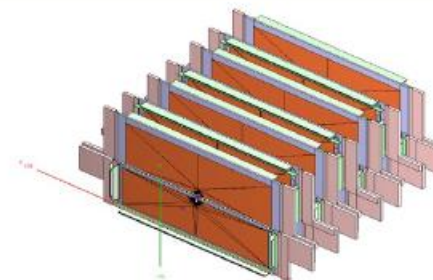
## GEM station assembly



## ROOT geometry



Basic ROOT geometry of the GEM detector

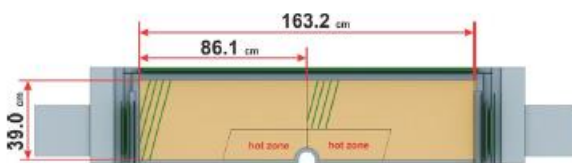


Detailed ROOT geometry of the GEM detector

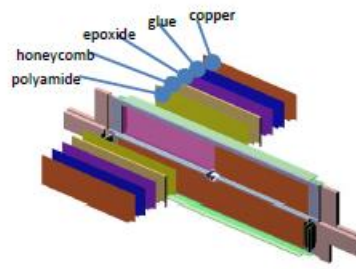
## GEM chamber types



Upper half-plane



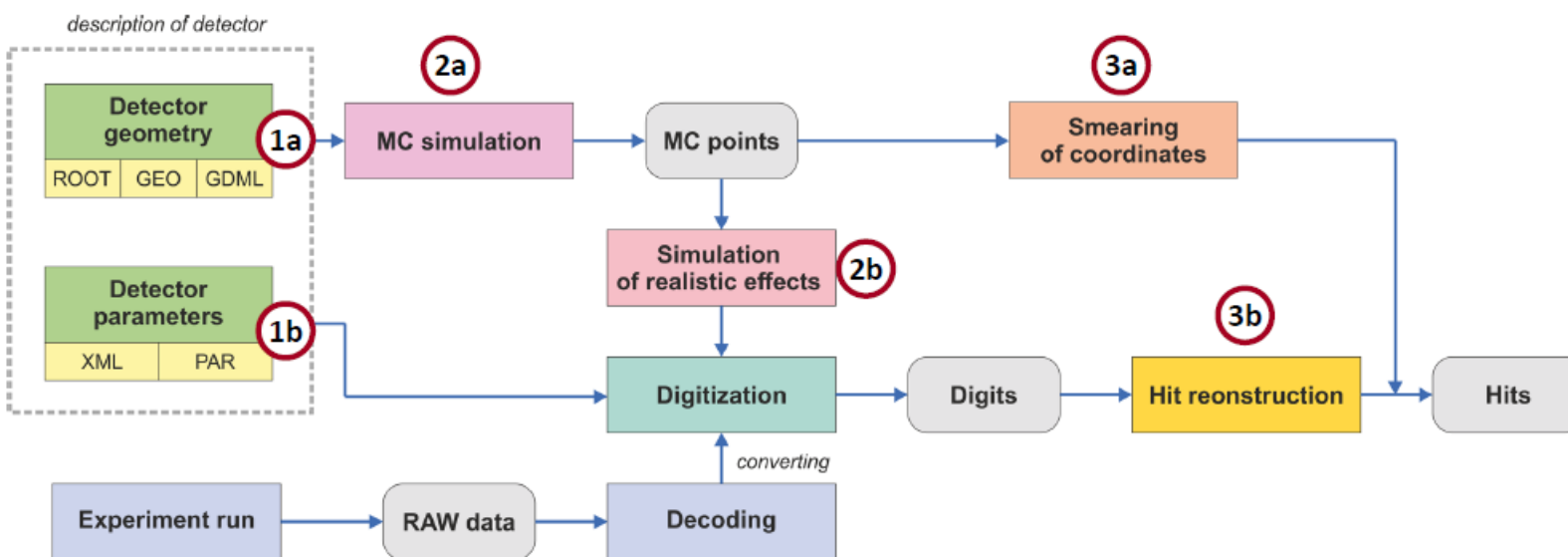
Lower half-plane



Sensitive area of a GEM chamber

Each active zone in a GEM chamber has a multi-layer structure. A layer has the following properties: thickness, material type and other characteristics which are taken into account in the Monte-Carlo simulation.

# Tracking detectors: software for data processing

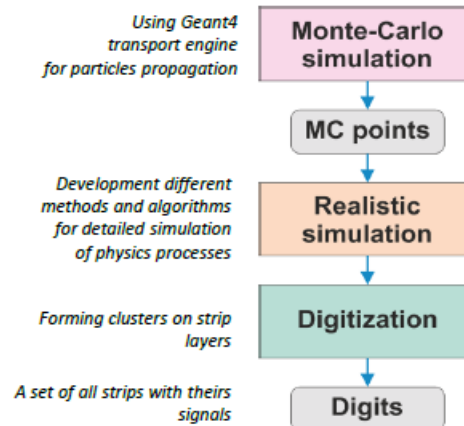


Basic stages of data processing for tracking detectors in BmnRoot

## Stages of data processing

1. **Complete description of a detector:**
  - a) Description of detector geometry (ROOT files)
  - b) Description of detector parameters (XML files)
2. **Simulation:**
  - a) Monte-Carlo simulation
  - b) Simulation of realistic effects
3. **Procedures of getting "hits" (Hit-reconstruction):**
  - a) Smearing Monte-Carlo points (hit producing)
  - b) Hit reconstruction from "digits":
    - Realistic simulation + digitization
    - RAW experimental data + digitization

## Realistic simulation steps



Complete simulation for detectors comprises the following stages:

1. Monte-Carlo simulation (getting MC-points by using Geant4)
2. Realistic simulation (taking into account the signal formation features)
3. "Digitization" (forming 'digits' as signal on the strips)