



Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИГНАЛОВ В ДЕТЕКТОРЕ FARICH УСТАНОВКИ SPD НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

Научный руководитель:

Научный консультант:

Студент:

Е.Ю. Солдатов

А. С. Жемчугов

К. Ю. Массалов

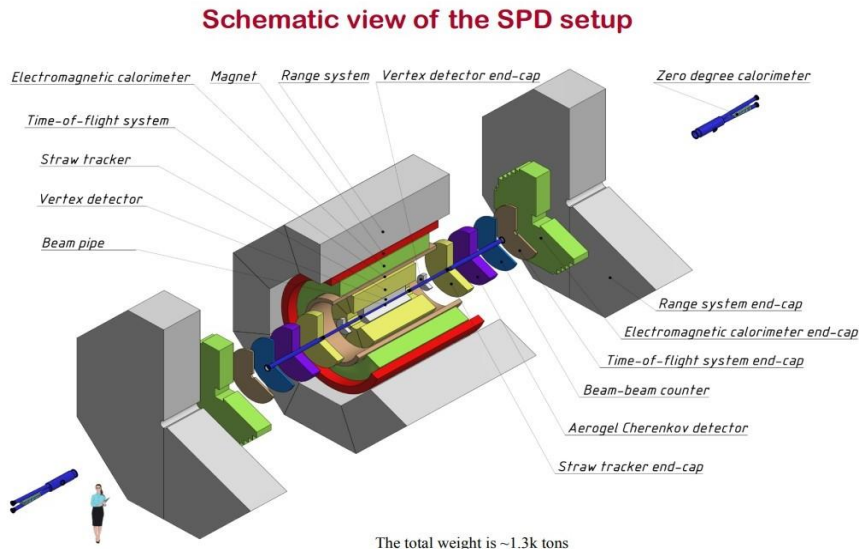
Москва
2025

Цели SPD

Основная цель эксперимента SPD - это всестороннее **изучение внутренней спиновой структуры нуклона**

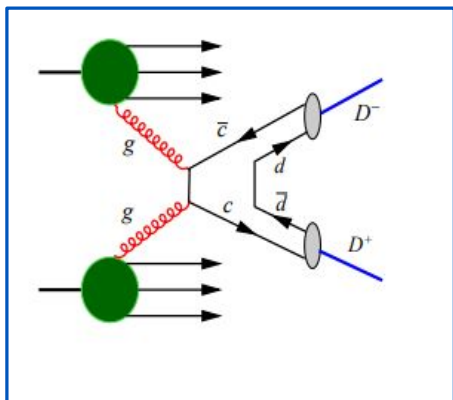
Основное внимание будет уделено изучению:

- поляризованной глюонной компоненты в реакциях инклюзивного рождения чармониев
- **открытого чарма**
- прямых фотонов
- прочих спин-зависимых явлений в p-p / dd столкновениях

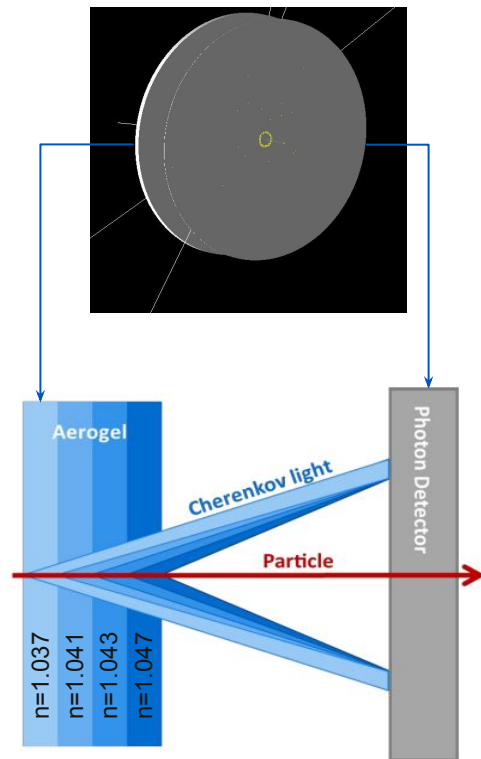


Детектор FARICH

Основная цель детектора FARICH - это **идентификация пионов и каонов из распада D-мезонов**



$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$$
$$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$$



Онлайн-фильтр

Частота регистрации событий ~ 4 МГц
Поток данных ~ 2 ПБ/день или 200 ПБ/год



Онлайн-фильтр для уменьшения потока данных в
 ~ 50 раз



Классические методы:

- + Легко интерпретируемы
- Довольно медленные
- Сложно поддаются распараллеливанию



Искусственные нейронные сети:

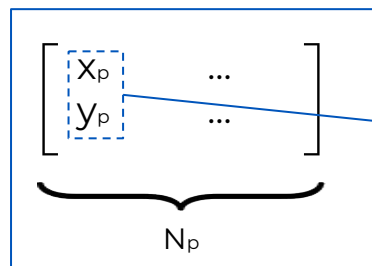
- + Легко поддаются распараллеливанию и могут быть очень быстрыми
- Сложность интерпретации
- Сложность в оценке ошибки

Цель

1. Создание нейросетевых методов реконструкции сигналов с детектора FARICH
2. Изучение их характеристик и сравнение с классическими подходами



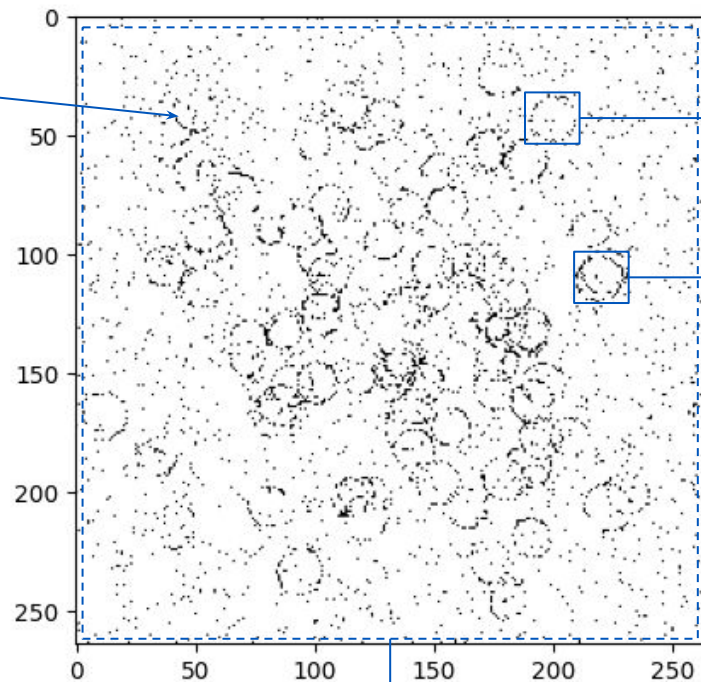
Формат входных данных



Набор точек



Изображение

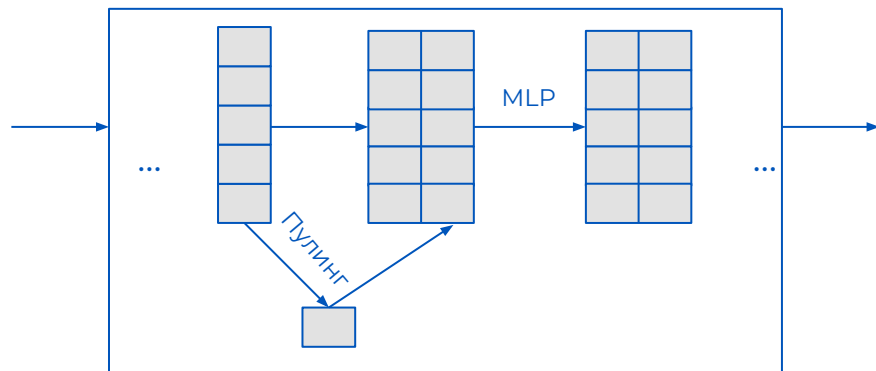


По одному

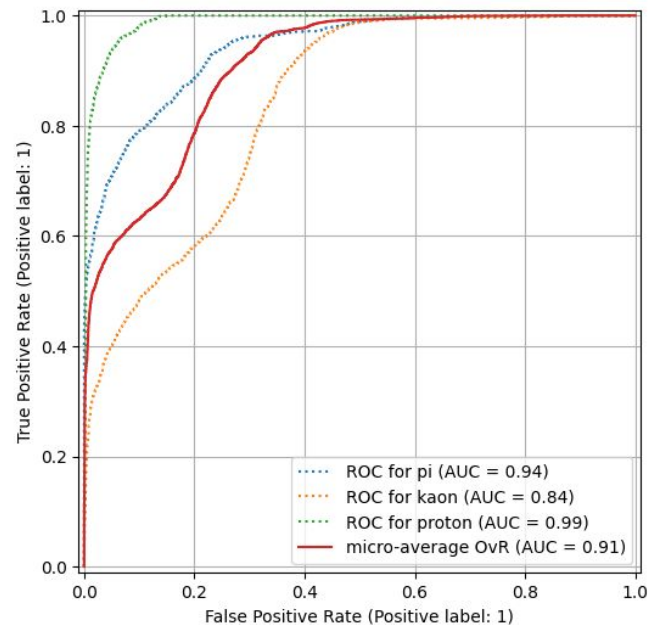


Целиком

Набор точек. PointNet¹



Результаты



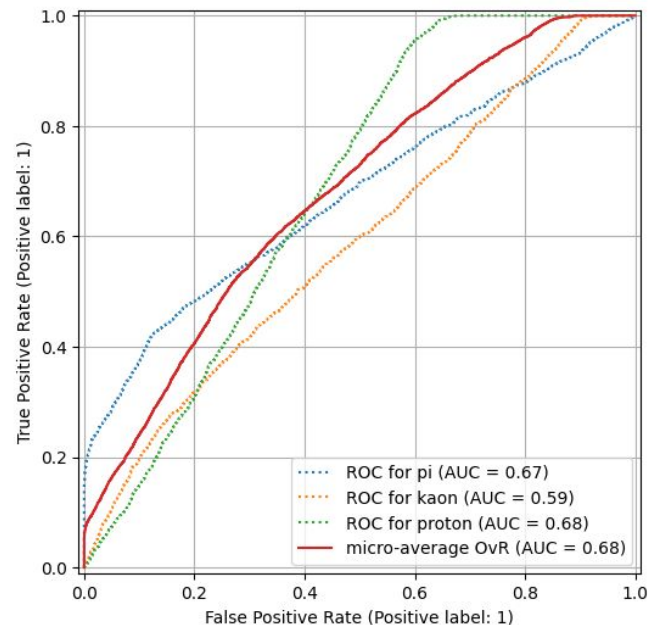
¹ Charles R. Qi and Hao Su and Kaichun Mo and Leonidas J. Guibas. (2017). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation

Набор точек. Трансформеры

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

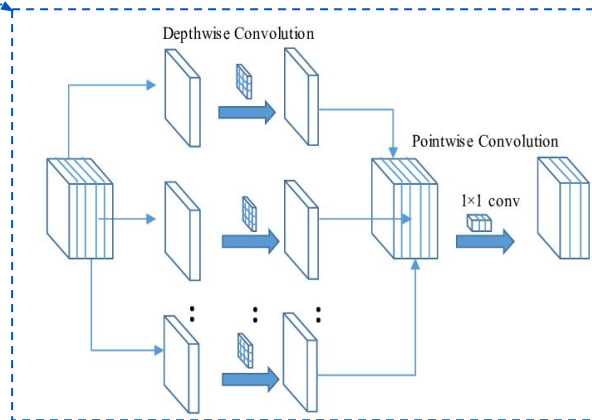
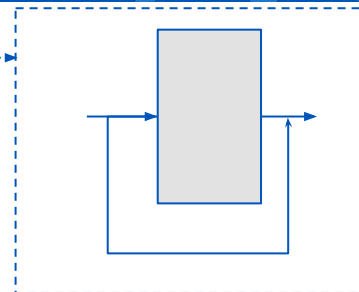
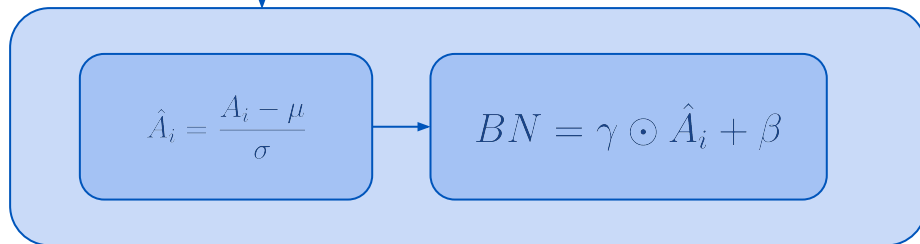
- $\text{softmax}(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}}$
- $Q = XW_Q$
- $K = XW_K$
- $V = XW_V$

Результаты

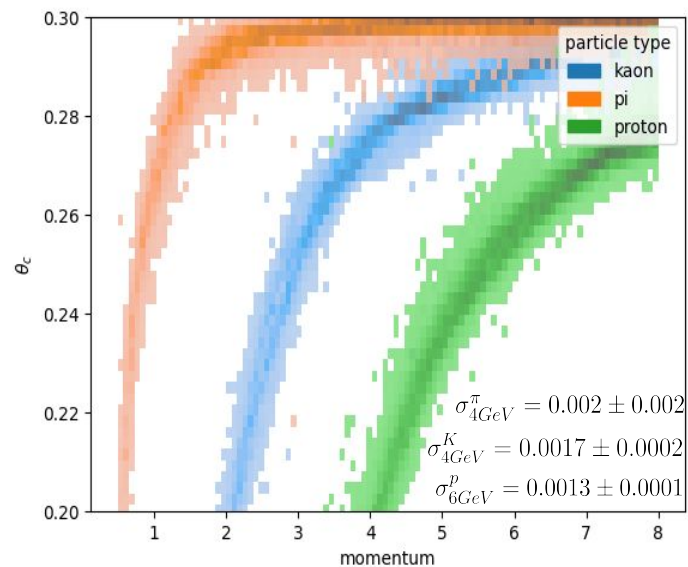
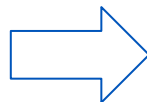
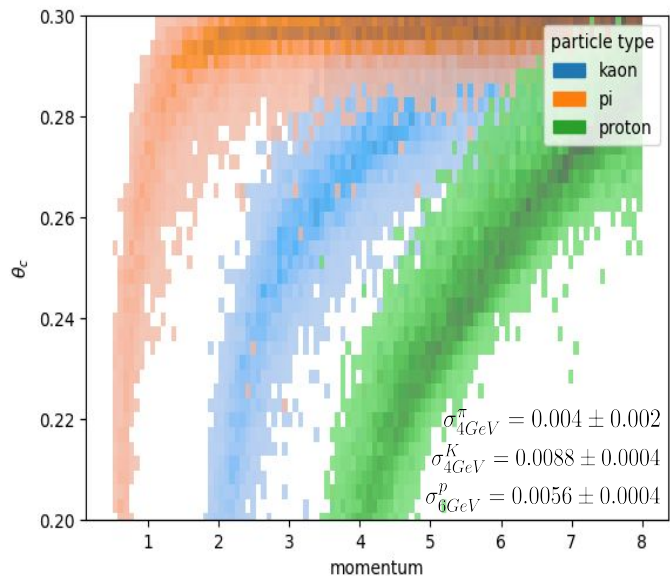


Изображение. Сверточные нейронные сети

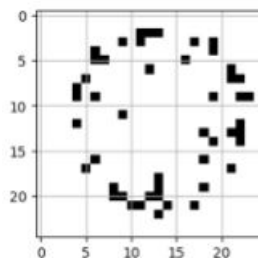
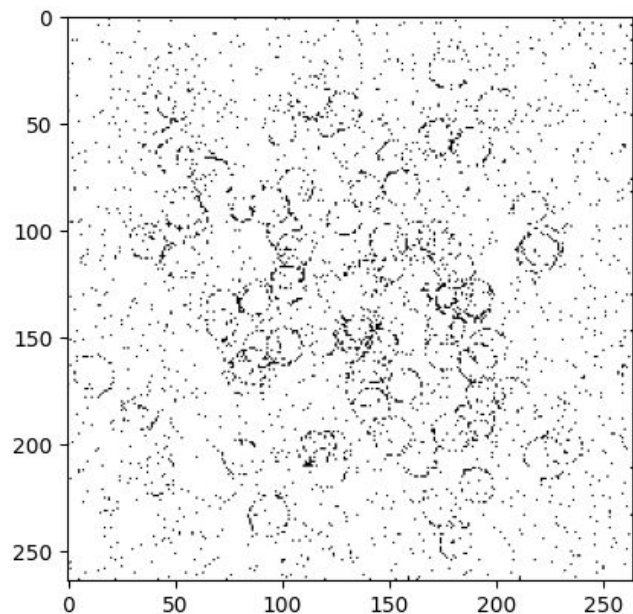
- Остаточное соединение (Skip connection)
- Разделяемый свёрточный слой (separable convolution)
- Батч нормализация



Позиционное кодирование



Выделение областей интереса на основе треков



+p

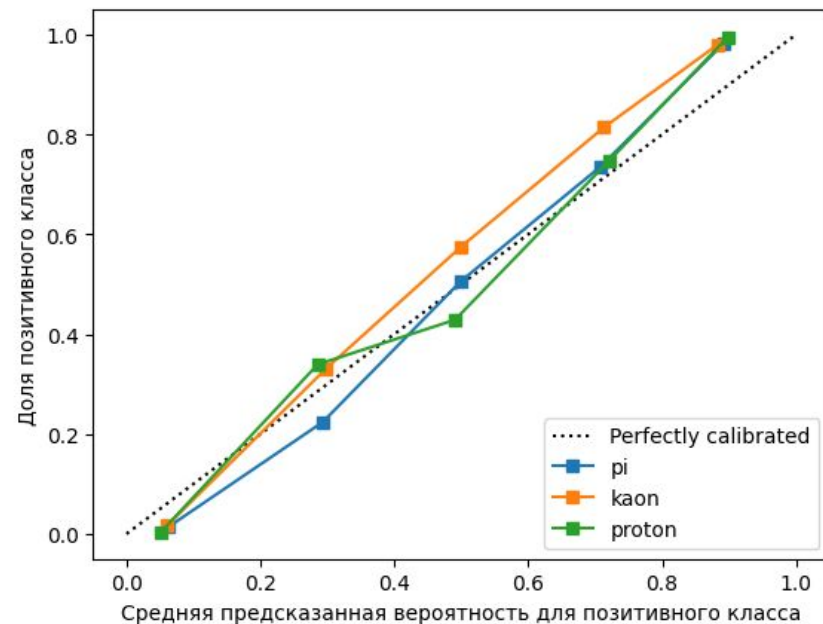
батч размера N



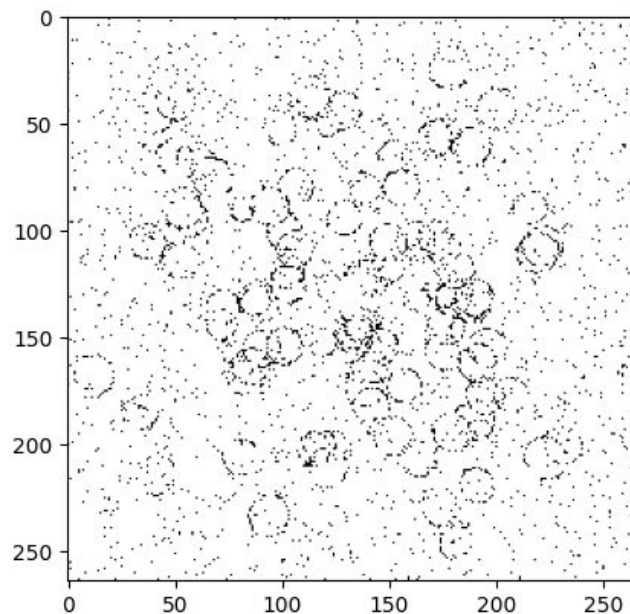
Тип частицы,
скорость, угол
конуса

Результаты. Классификация

	Точность (Precision)	Полнота	F1	Точность (accuracy)
π-мезон	0.97	0.92	0.92	0.93
K-мезон	0.97	0.89	0.90	
Протон	0.99	0.99	0.99	
Среднее	0.93	0.93	0.93	



Сегментация



Батч
размером 1

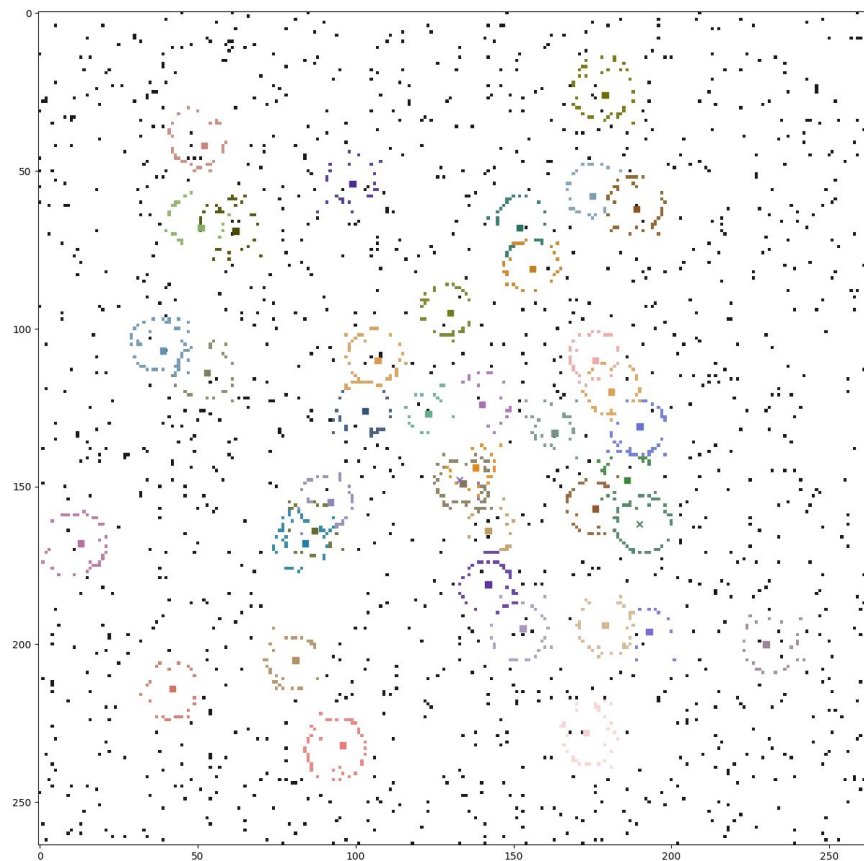


Размер выхода = размеру
входа, для пикселей,
соответствующих точке
пересечения трека и
детектора, предсказывается
скорость, угол, класс. Кроме
того, для каждого
сработавшего пикселя
предсказывается, к треку
какой частицы он относится
(или к фону)

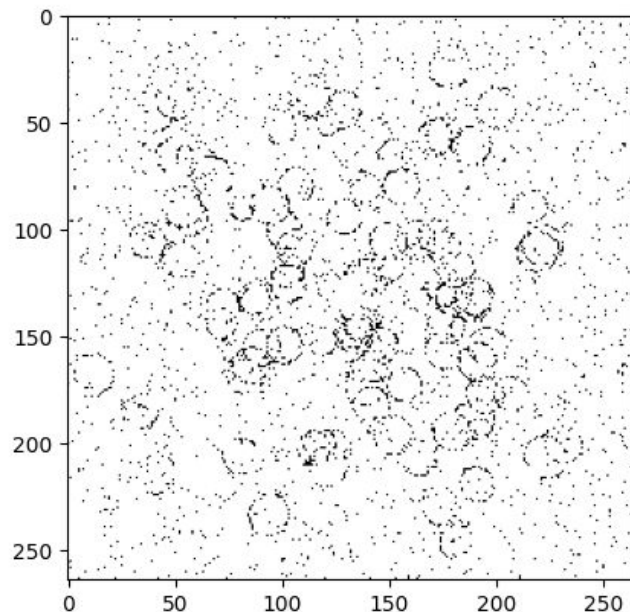
Результаты. Сегментация

Квадратами отмечены центры частиц, классифицированных верно, крестами - центры частиц, классифицированных неверно. Пиксели относятся к тому центру, который такого же цвета. Черный цвет - шум.

Качество сегментации для не шумовых пикселей: $f1 = 0.68$



Детекция

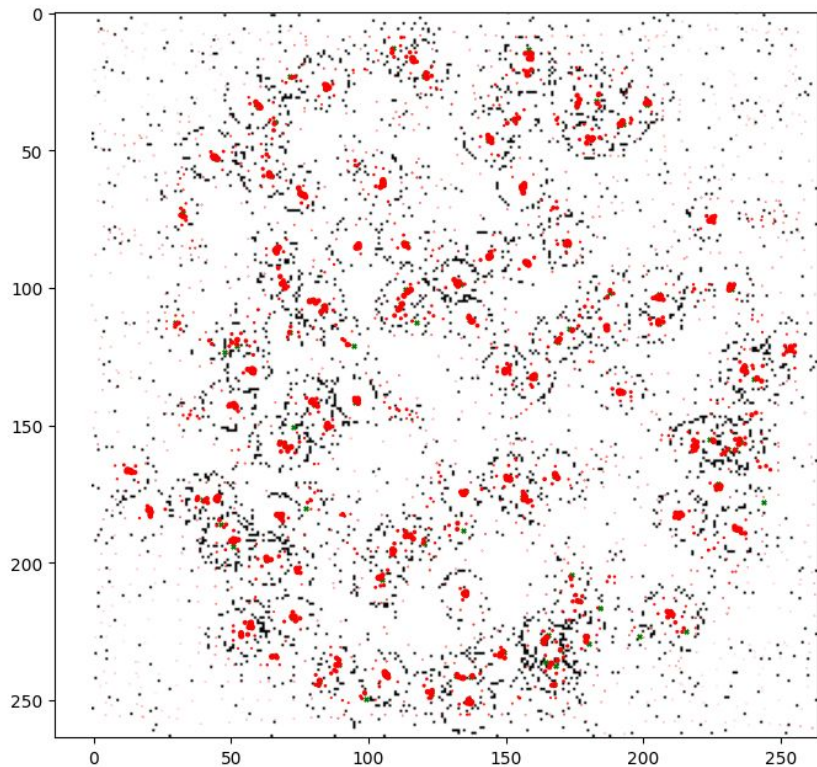


Батч
размером 1

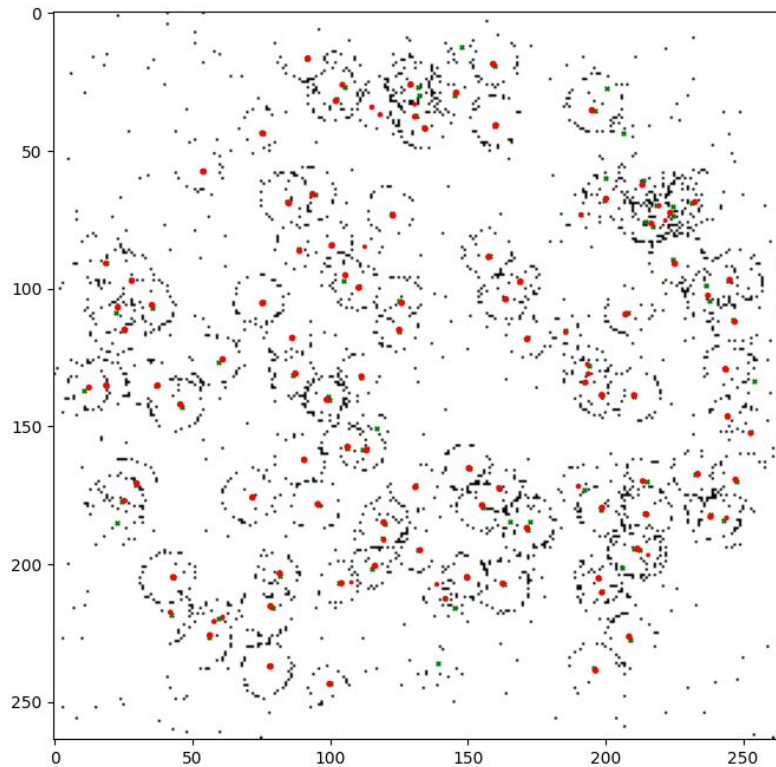


Изображение разбивается на
квадратные области
(например, размера 12×12) и в
каждой области
предсказывается $n \times 4$ чисел: x ,
 y , уверенность в наличии
трека, угол конуса (либо
скорость).

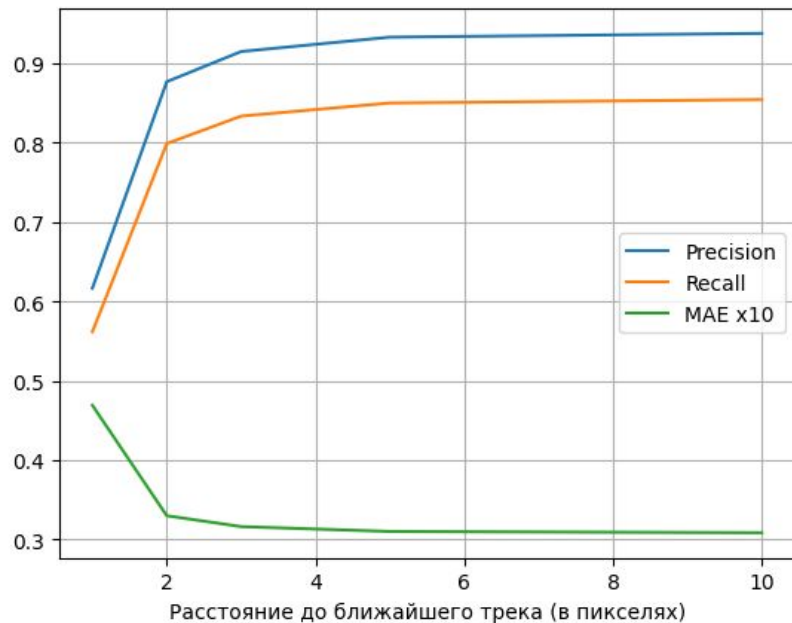
Детекция. Пример работы



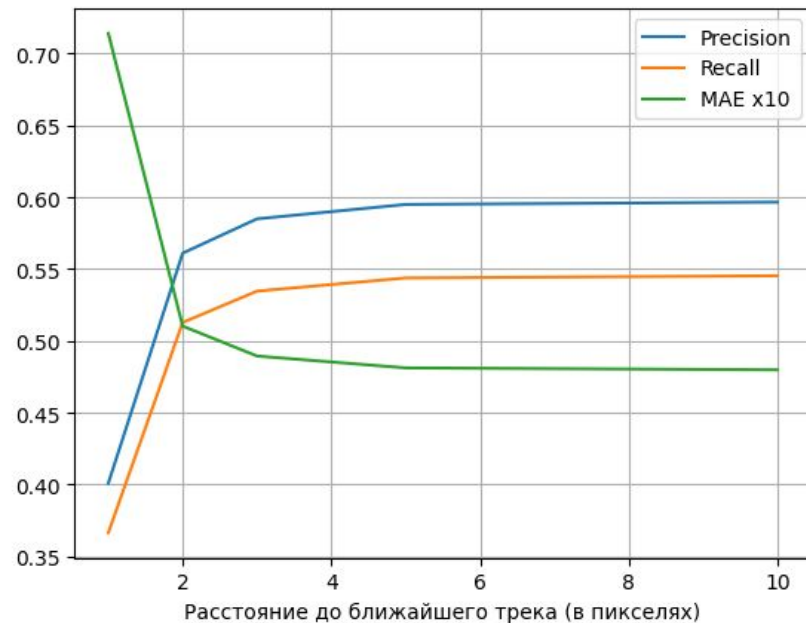
nms



Детекция. Результаты



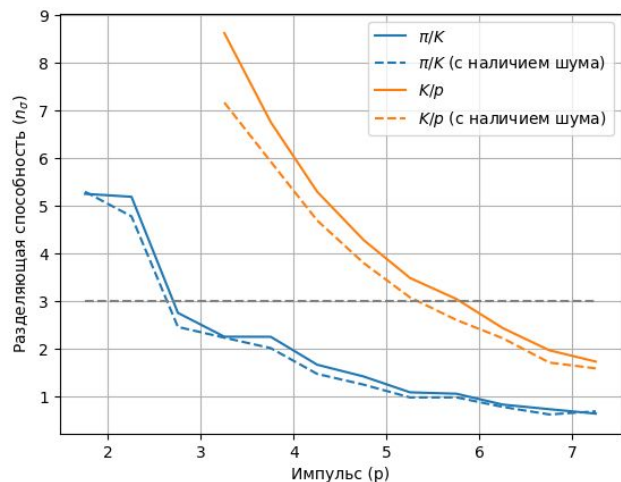
Без учета правильности
регрессии



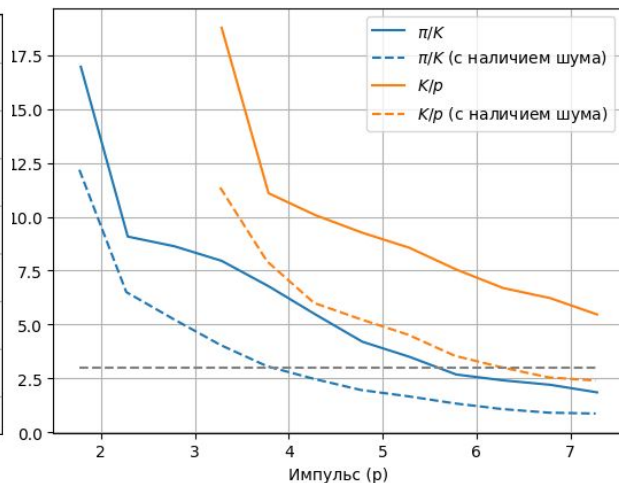
С учетом правильности
регрессии

Классические методы

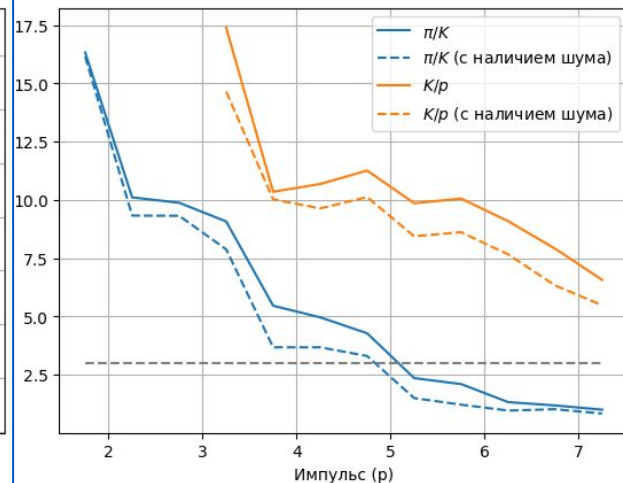
$$n_{\sigma} = \frac{R_A - R_B}{\langle \sigma_{A,B} \rangle}$$



Метод вторых моментов



Реконструкция на основе зависимости азимутального угла черенковского конуса от полярного



Нейросеть

Сравнение. Реконструкция на основе угловой зависимости (слева) и нейросеть (справа)

Без шума/ С шумом	Precision	Recall	F1	Accuracy
π-мезон	0.92/0.95	0.93/0.65	0.92/0.77	0.94/0.81
K-мезон	0.92/0.70	0.90/0.81	0.91/0.75	
Протон	0.99/0.84	1.00/1.00	0.99/0.91	
Среднее	0.94/0.83	0.94/0.82	0.94/0.81	

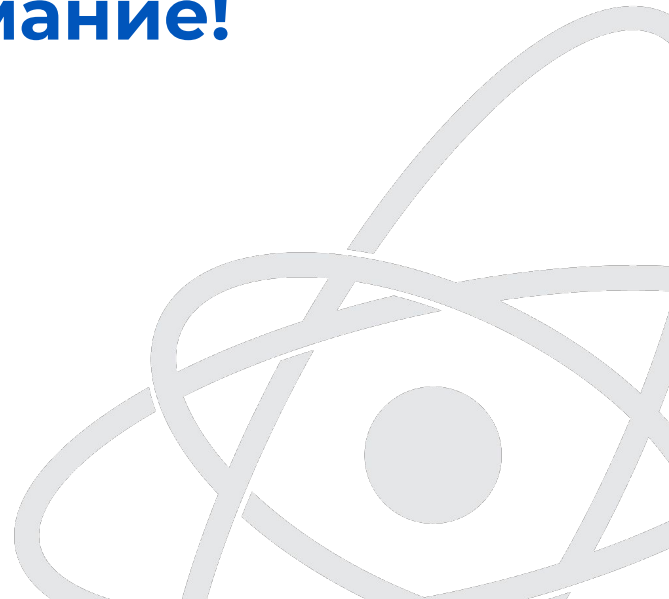
Без шума/ С шумом	Precision	Recall	F1	Accuracy
π-мезон	0.92/0.91	0.94/0.92	0.93/0.92	0.95/0.93
K-мезон	0.93/0.91	0.90/0.89	0.92/0.90	
Протон	0.99/0.99	0.99/0.99	0.99/0.99	
Среднее	0.95/0.93	0.95/0.93	0.95/0.93	

*Без шума/С шумом

Итоги

- Разработана нейросеть для определения скорости и типа частиц. Эффективность повышена **позиционным кодированием**. Изучена **устойчивость к шуму** и разработана модель с очисткой от шума.
- Также предложена архитектура для **сегментации и детекции** треков для обработки сигналов из детектора FARICH параллельно с обработкой сигналов из трекового детектора. Модель для сегментации дополнительно обучена определять принадлежность хитов к родительским трекам.
- Проведено **сравнение** модели с такими **классическими подходами**, как разделение методом вторых моментов, фитирование эллипсом, реконструкция по зависимости азимутального угла черенковского конуса от полярного. Модель способна разделять с уверенностью в 3σ пионы и каоны в диапазоне импульсов до 5 ГэВ, протоны и каоны в диапазоне импульсов до 8 ГэВ. Полученная модель сравнима с классическими подходами, а уже при уровне шума 1% превосходит их.

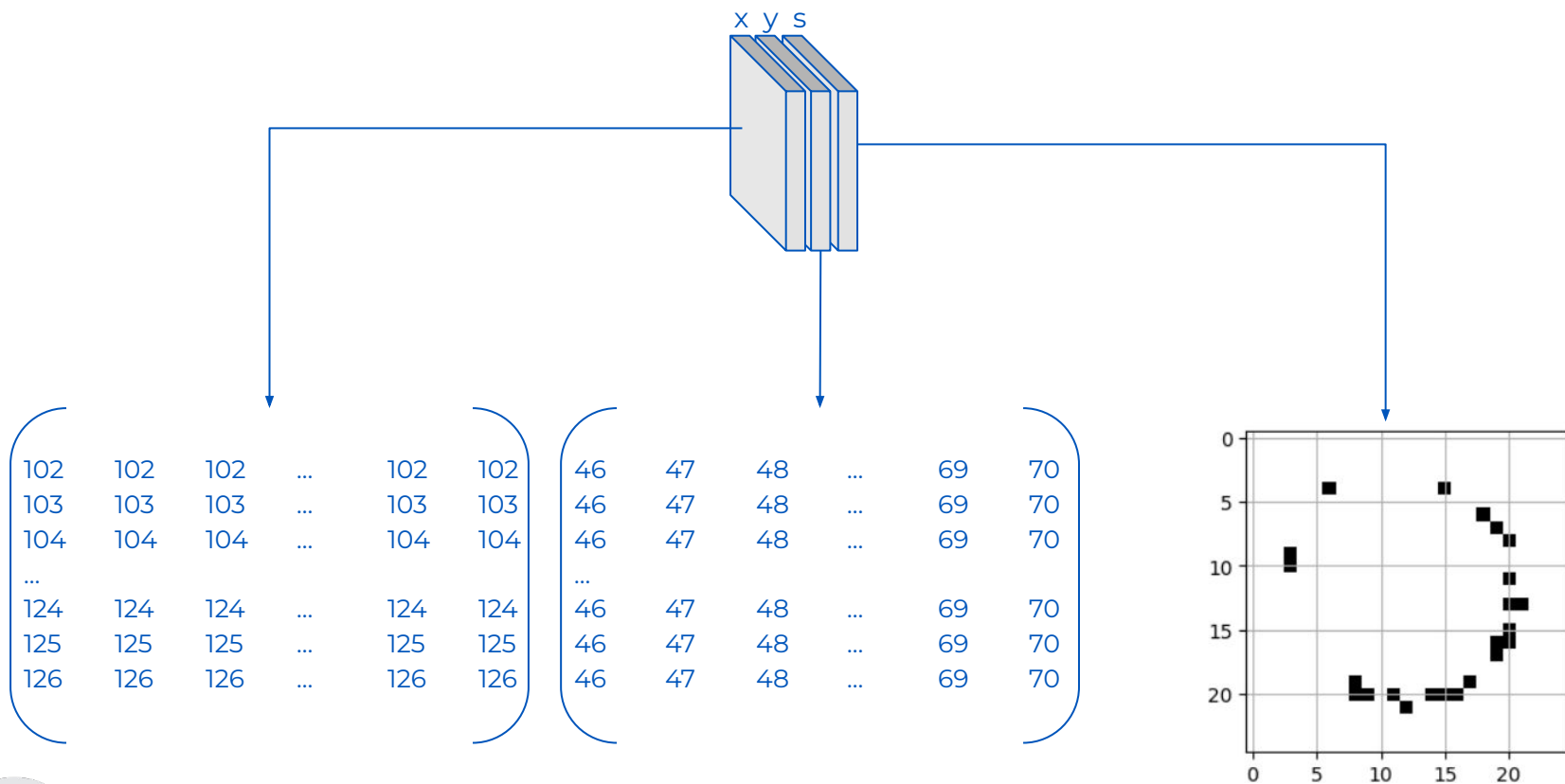
Спасибо за внимание!



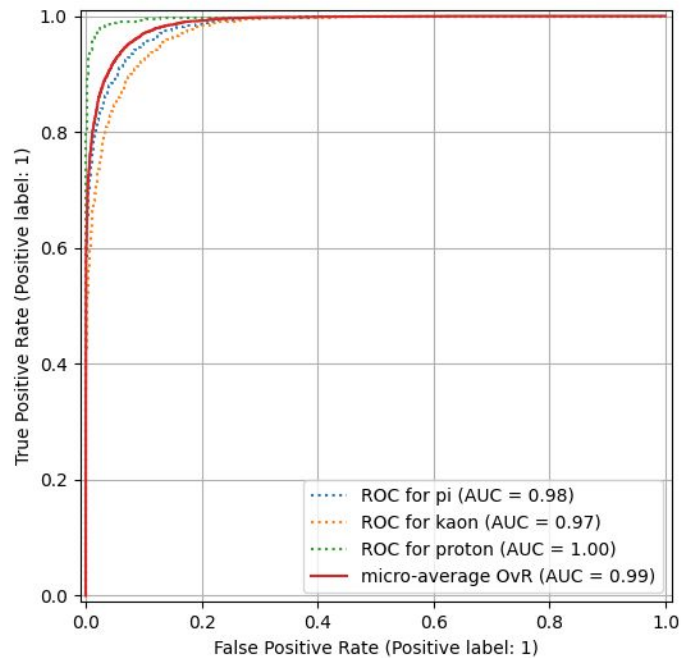
Формулы

- $\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$
- $\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$
- $\text{F1} = 2 * \text{Precision} * \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall})$
- $\text{Accuracy} = \text{TP} / (\text{P} + \text{N})$

Позиционное кодирование



Результаты. Классификация (1 подход). ROC



Результаты. Классификация (модель для сегментации). ROC

	Точность (Precision)	Полнота	F1	Точность (accuracy)
π-мезон	0.89	0.86	0.88	0.88
K-мезон	0.82	0.84	0.83	
Протон	0.95	0.95	0.95	
Среднее	0.89	0.88	0.88	

