



Использование нейронных сетей для реконструкции углов прилёта частиц в нейтринном телескопе Baikal-GVD

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-22-20063

Леонов Алексей Юрьевич, 1 курс магистратуры МФТИ
Научный руководитель: Калашев Олег Евгеньевич, д.ф.-
м.н. ИЯИ РАН

Москва 2023

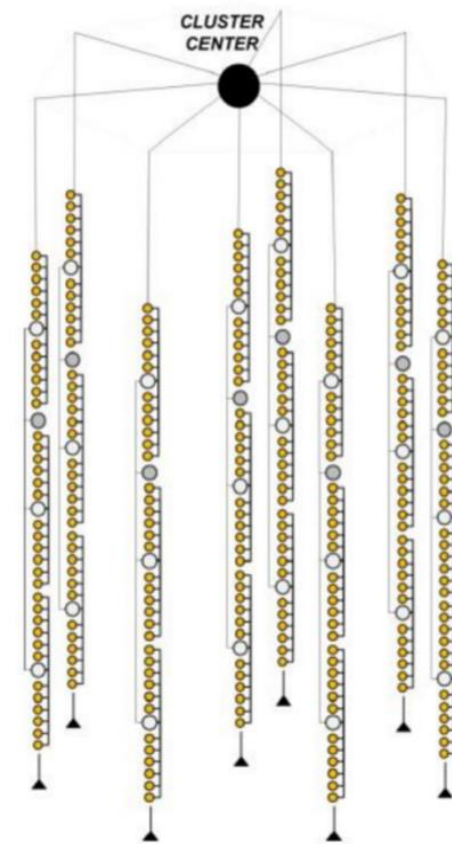
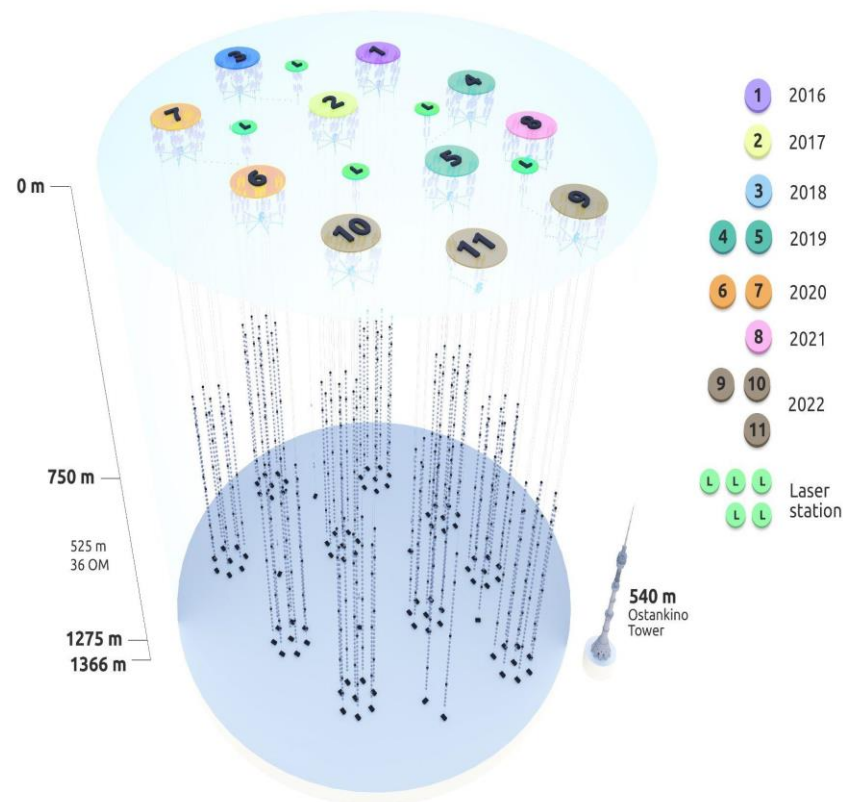
Эксперимент Baikal-GVD

BAIKAL-GVD - нейтринный подводный телескоп

-Телескоп состоит из 11 кластеров

-Кластер - 8 струн, в виде правильного 7-угольника с центром

-На каждой струне 36 равномерно размещенных детекторов

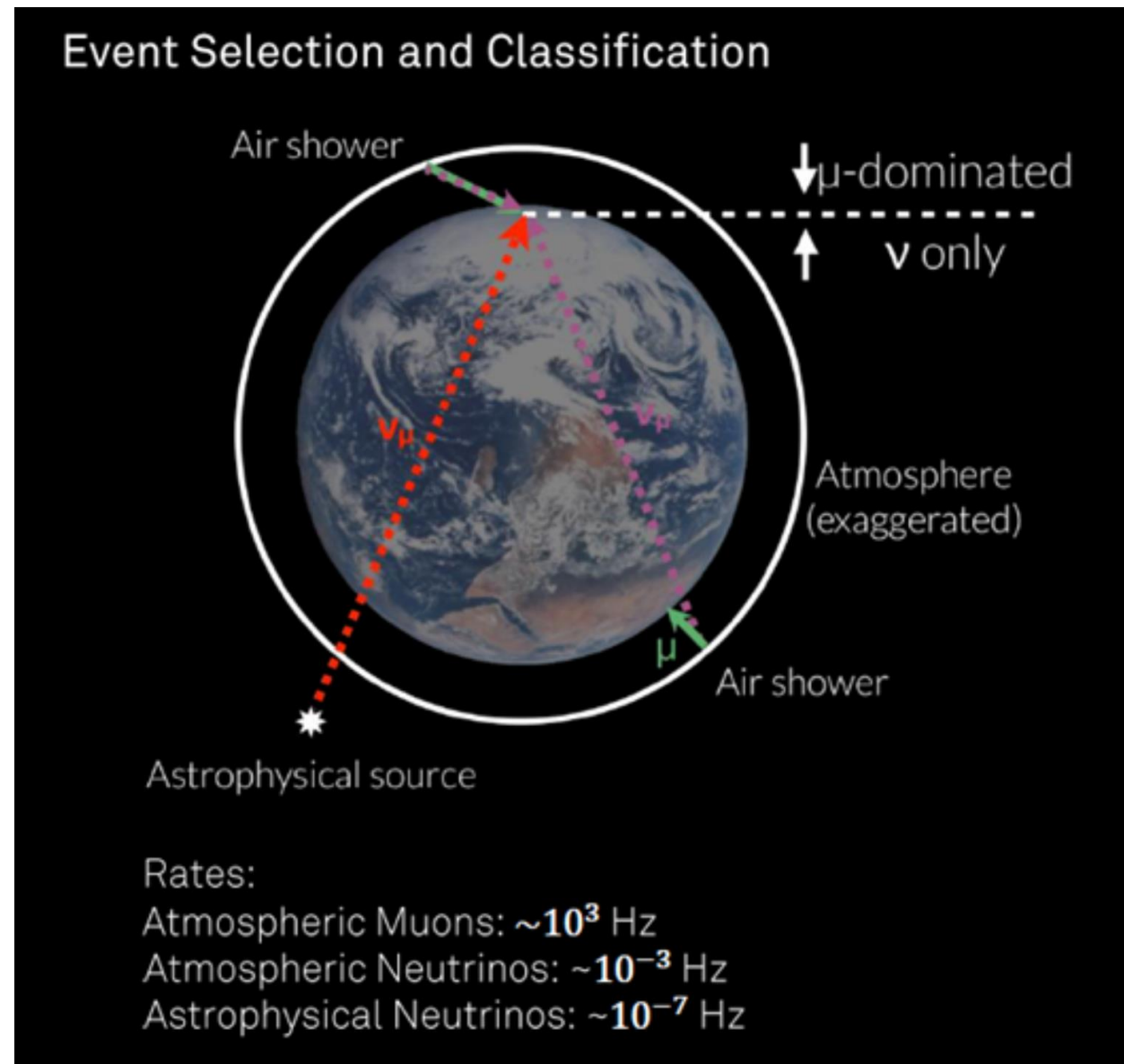


Состояние на 2022 год[1]

Регистрируемые частицы

1) Данные - атмосферные мюоны
(сверху) и нейтрино (снизу)

2) Цель - астрофизические нейтрино



Актуальность.

- Нейтрино не отклоняются магнитным полем и обладают малым сечением взаимодействия.

- Угловое распределение атмосферных нейтрино успешно моделируется.

- Астрофизические нейтрино – важный источник информации об астрофизических объектах высоких энергий.

- Улучшение углового разрешения позволит уменьшать фон атмосферных событий при изучении астрофизических нейтрино.

Данные

Монте-Карло моделирование[2]

Сигнал детектора:

1)Заряд

2)Время срабатывания

3-5) Координаты

-Сигналы упорядочиваются по времени и очищены от шума

-События однокластерные

Реконструкция углов

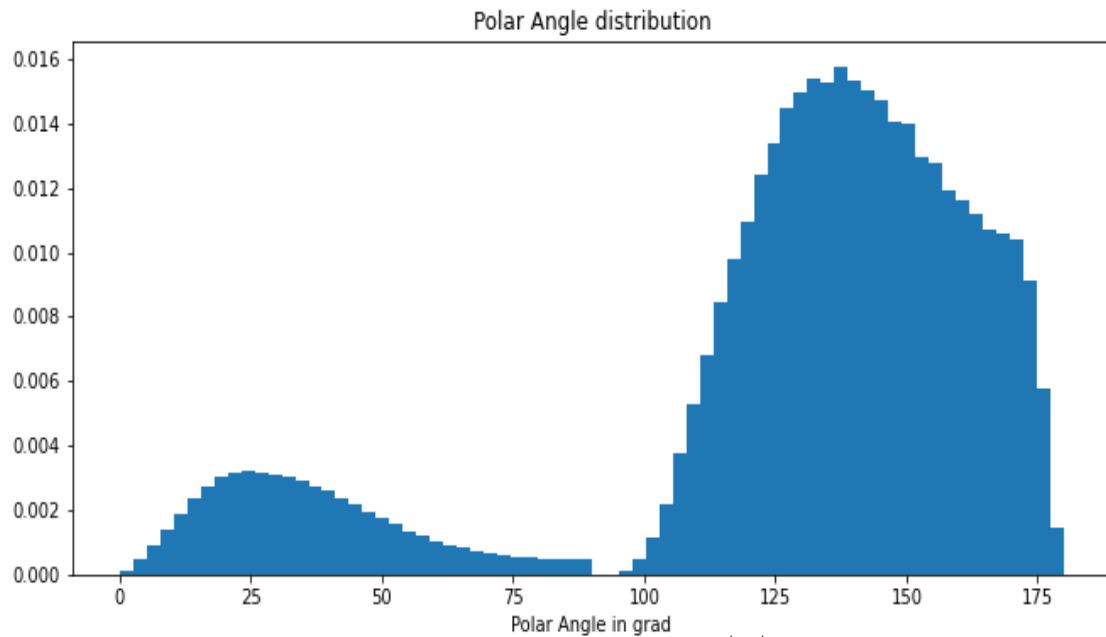
1) Направление (3-мерный полярный вектор)

$$\vec{R} = (\cos \phi \sin \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \theta)$$

2) Только полярный угол (2-мерный полярный вектор)

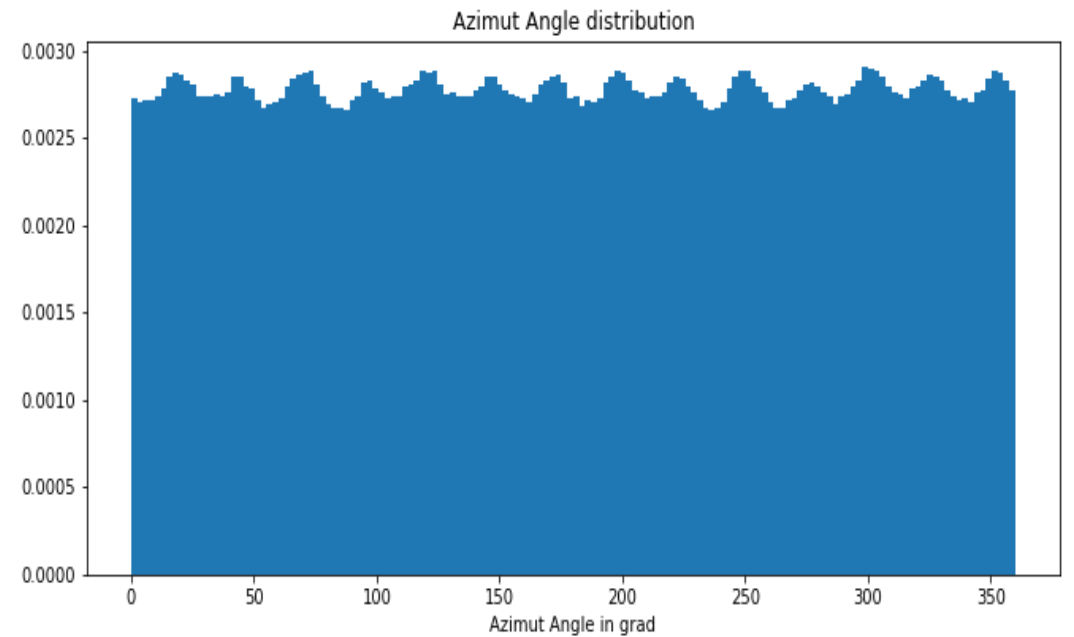
$$\vec{r}_\theta = (\cos \theta, \sin \theta)$$

Угловые распределения в данных



Нейтрино

Мюоны



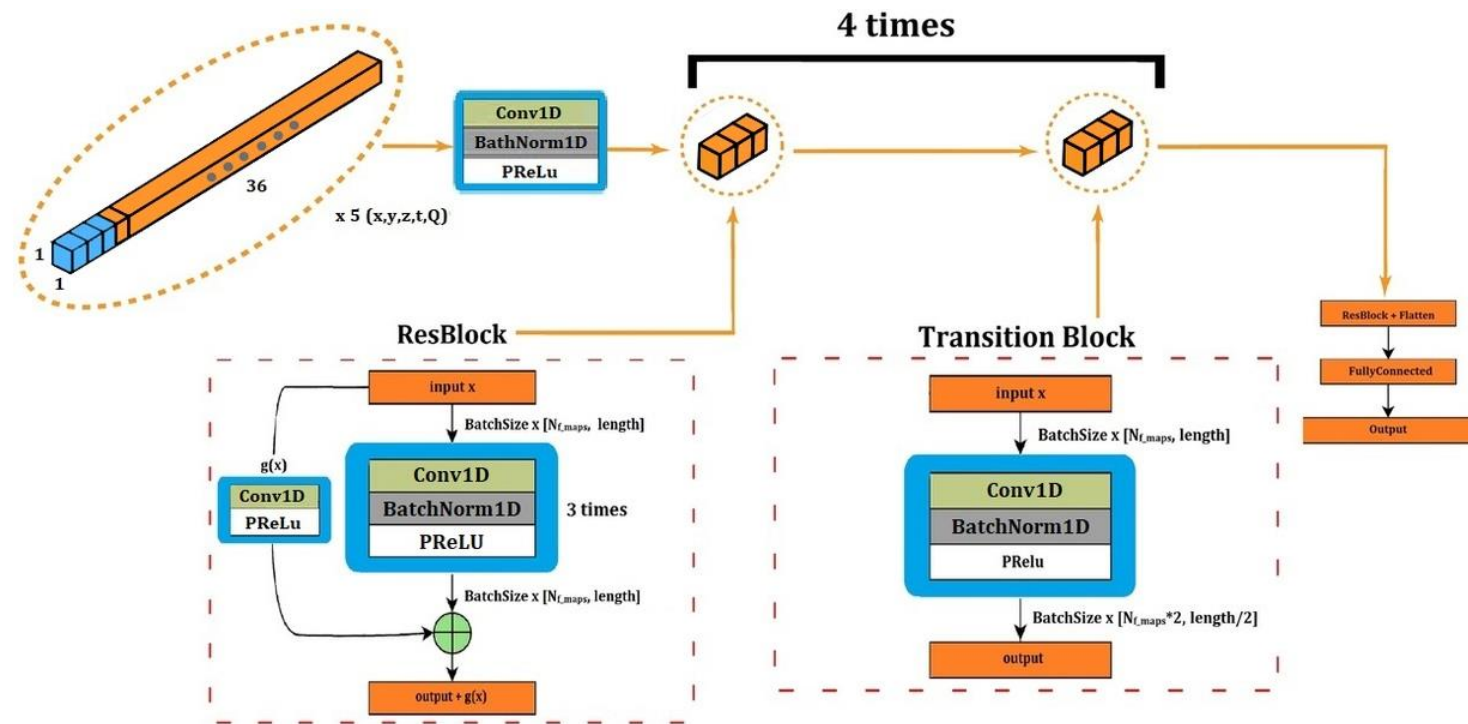
Нейронная сеть

- Используются:

А) сверточная нейронная сеть (CNN) на основе сети ResNet [3]

Б) графовая сверточная нейронная сеть (EdgeGNN[4])

- Работа сети оценивается по медианным угловым разрешениям



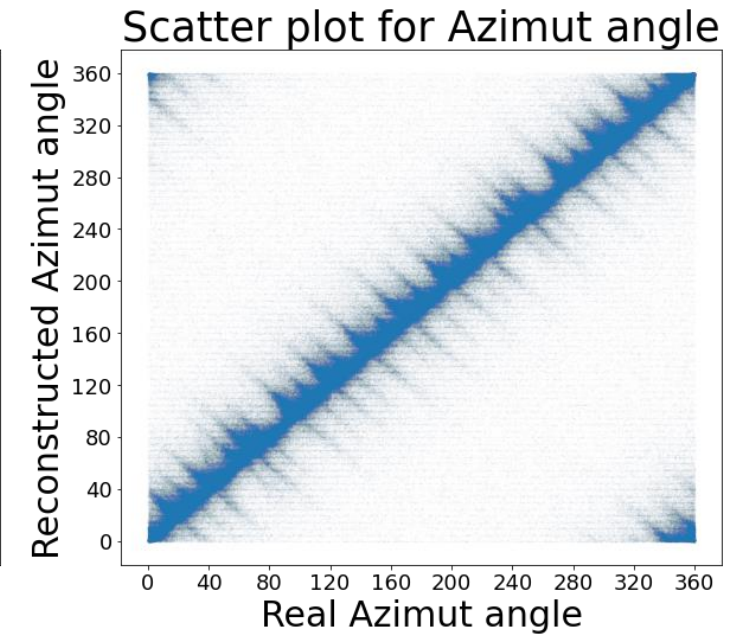
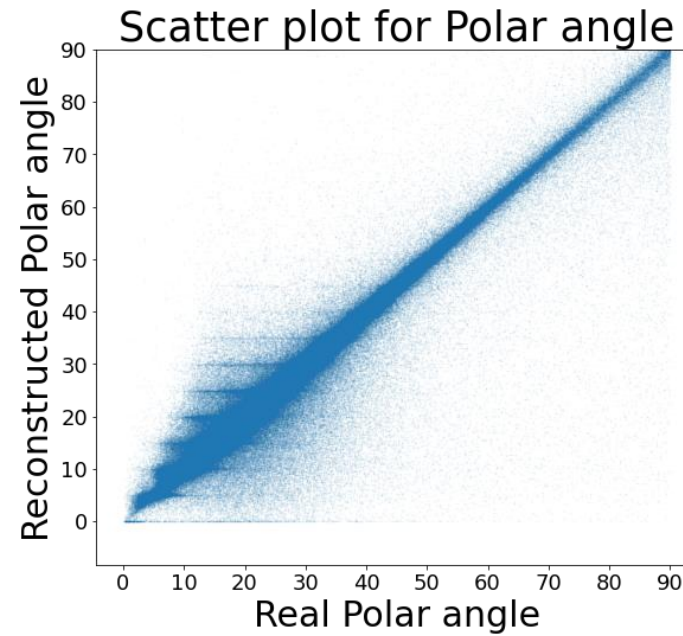
Архитектура CNN

[3] arxiv.org/abs/1512.03385

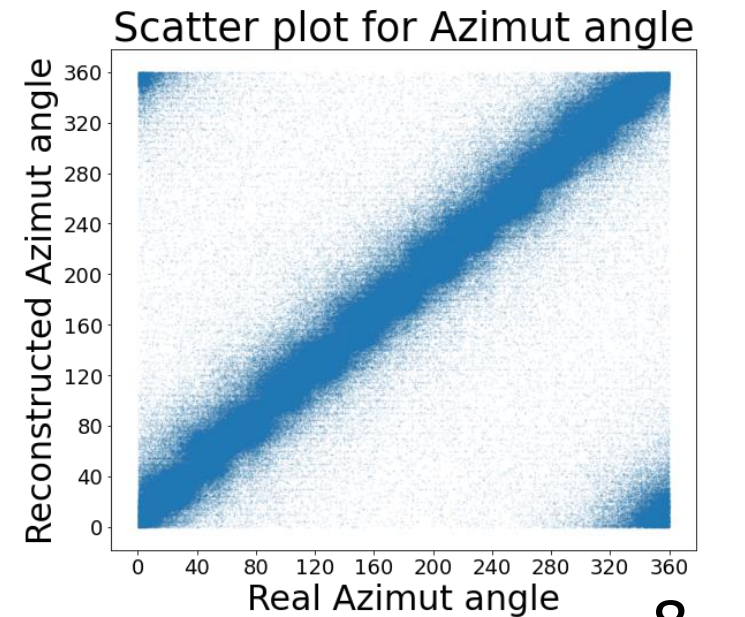
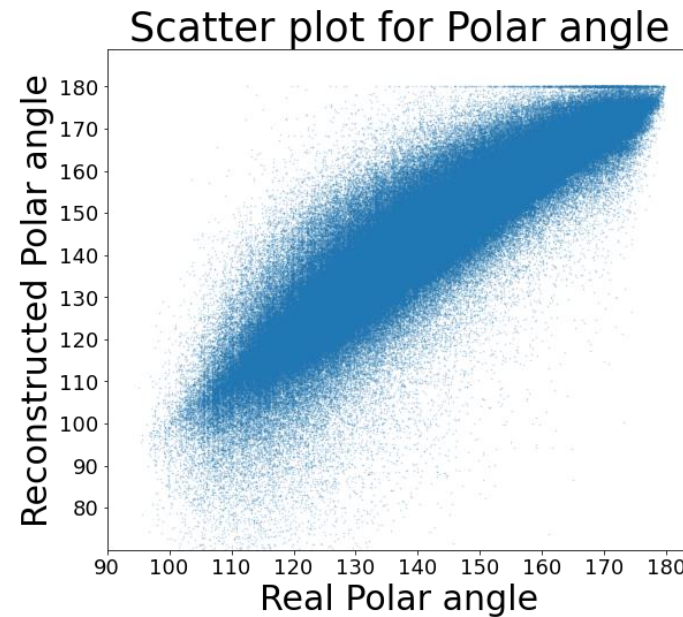
[4] arxiv.org/abs/1801.07829

Стандартная
реконструкция[4]

Атмосферные нейтрино
(прилетают снизу)

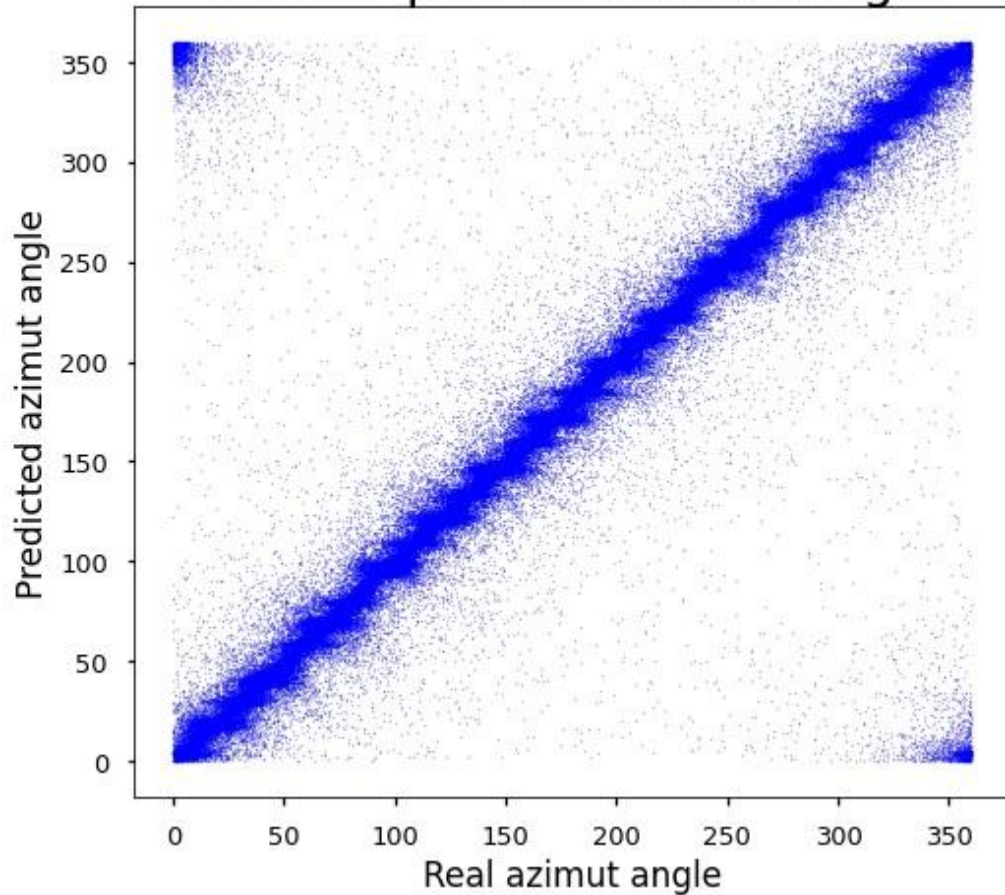


Атмосферные мюоны
(прилетают сверху)

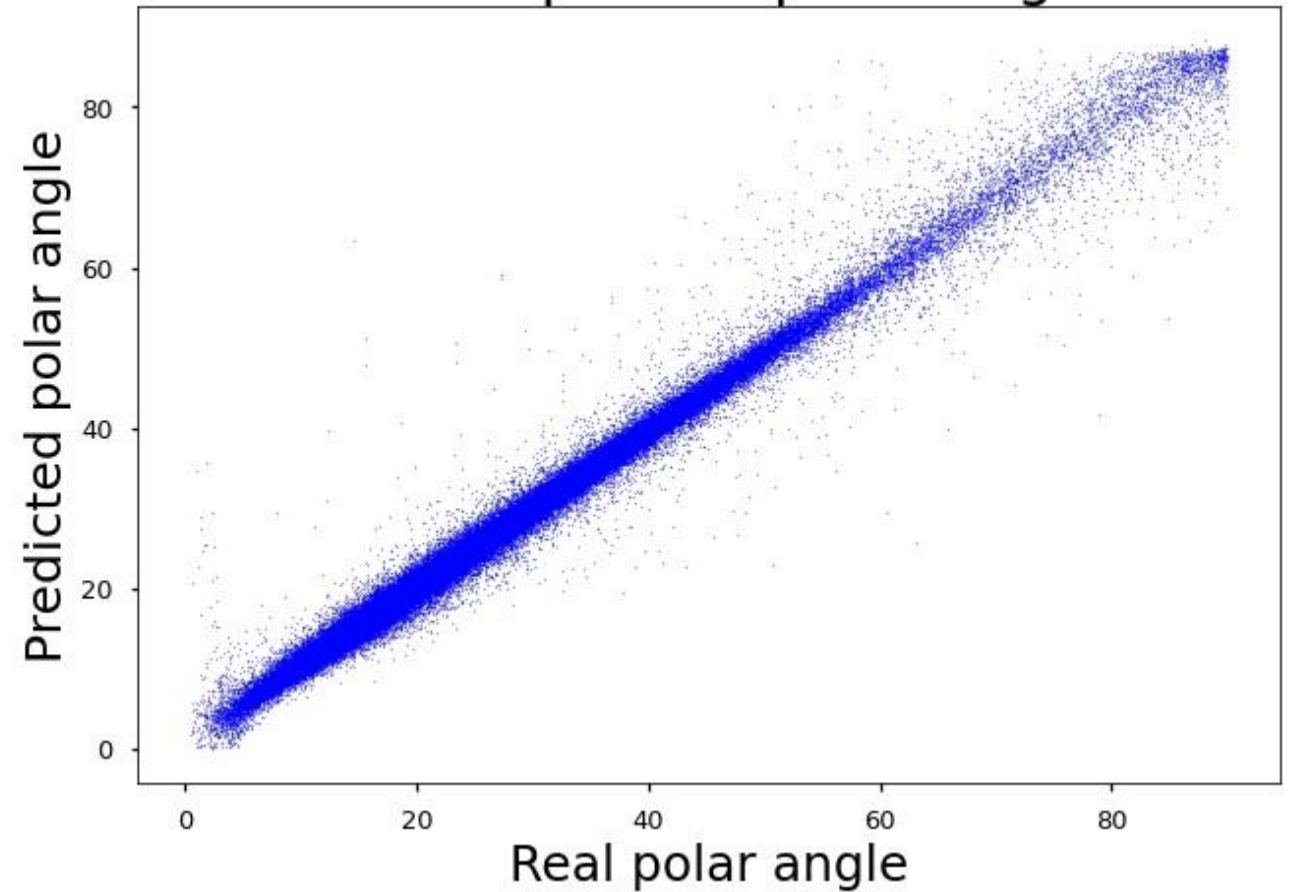


Нейтрино: Восстановленные углы

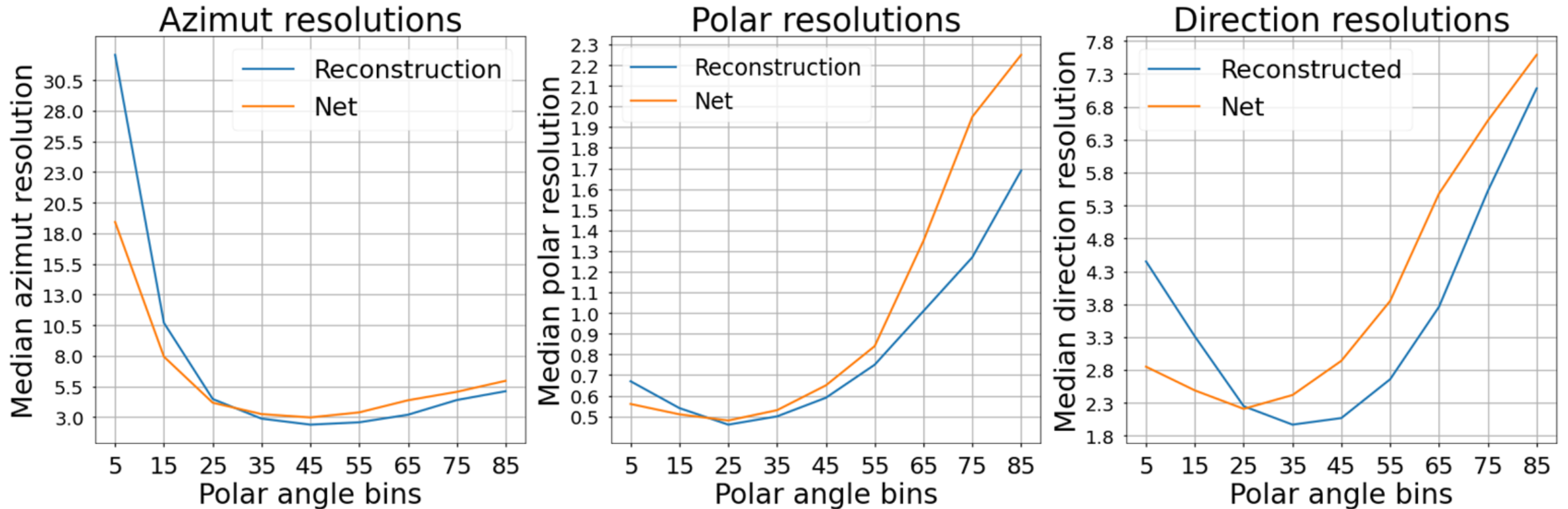
Scatter plot for azimuth angle



Scatter plot for polar angle



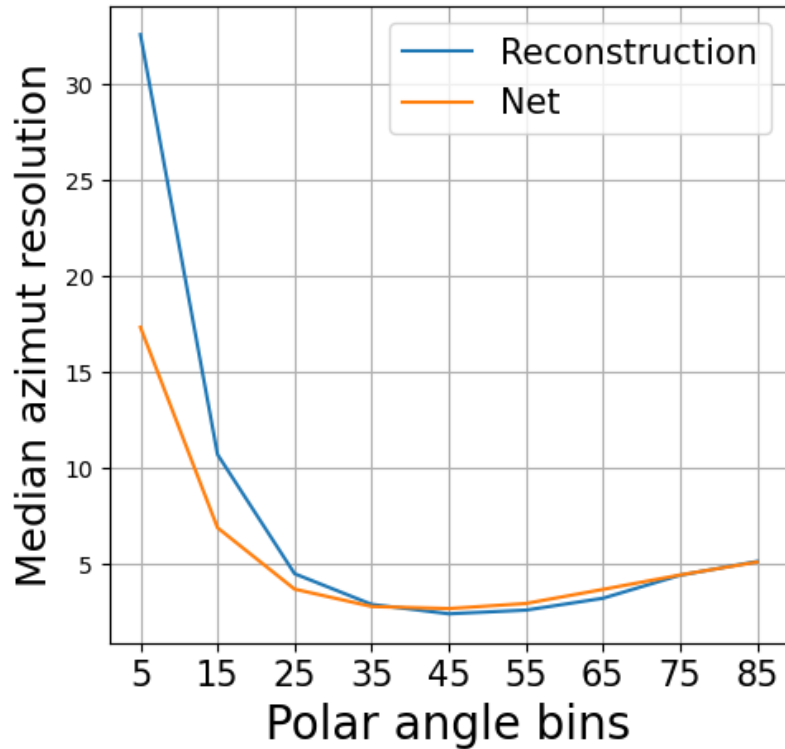
Нейтрино : Угловые разрешения CNN



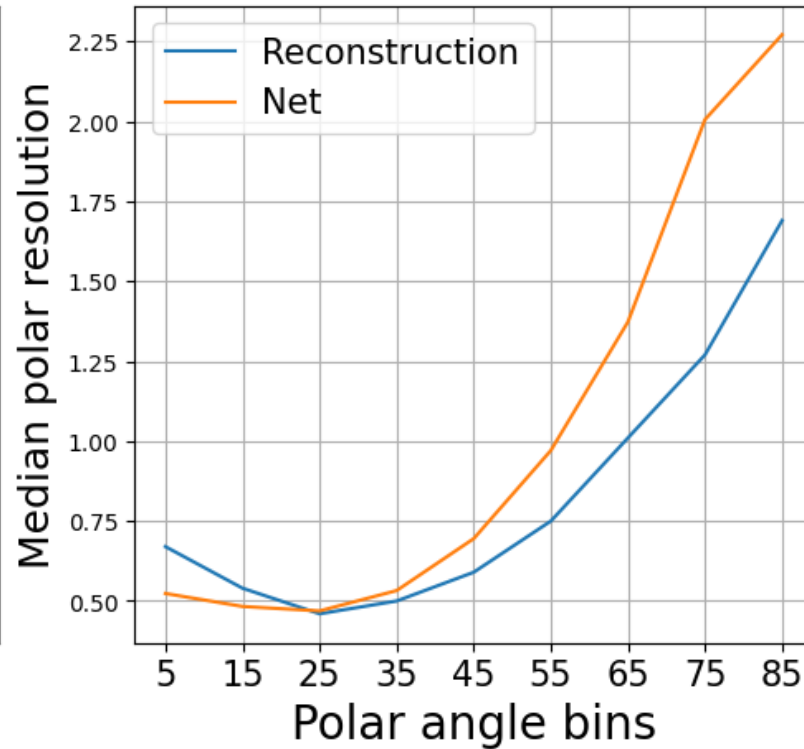
Нейтрино : Угловые разрешения

GCN

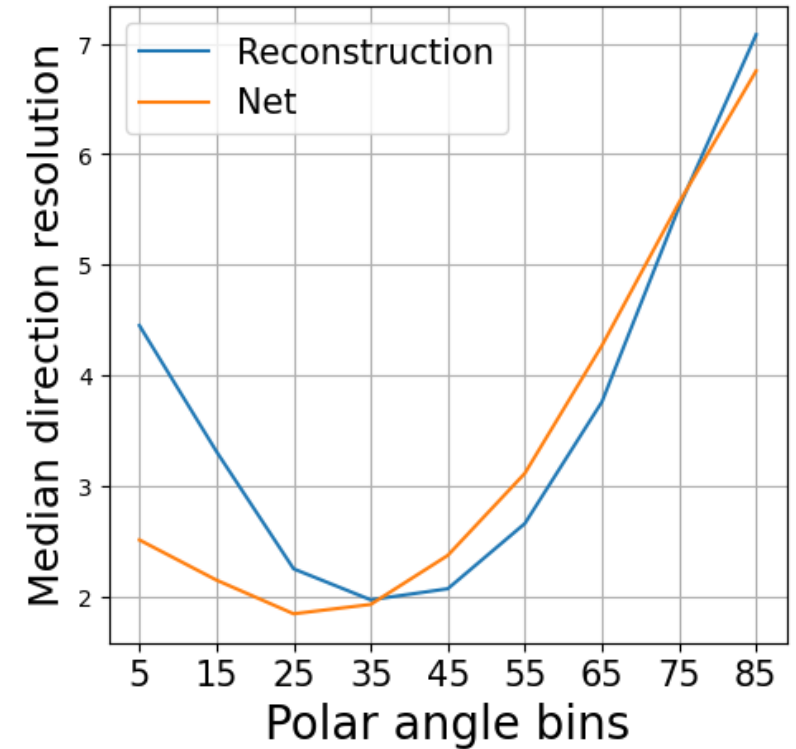
Azimuth resolution



Polar resolution



Direction resolution



Результаты

Метрики моделей

При малых полярных углах углы восстанавливаются точнее.

В данный момент GCN эффективнее CNN

Standart Reconstruction			
Metrics	Azimut Angle	Polar Angle	Direction
50% Resolution	5.42	0.53	2.62
68% Resolution	13.2	0.95	5.62
GCN Net			
Metrics	Azimut Angle	Polar Angle	Direction
50% Resolution	4.16	0.53	2.10
68% Resolution	7.13	0.83	3.18
CNN Net			
Metrics	Azimut Angle	Polar Angle	Direction
50% Resolution	4.77	0.63	2.57
68% Resolution	7.90	0.93	3.62

Заключение

В данной задаче алгоритмы глубинного машинного обучения применимы и сравнимы по метрикам со стандартной реконструкцией.

В случае атмосферных нейтрино нейронные сети работают лучше в области малых полярных углов.

Худшее восстановление азимутального угла может быть объяснимо спецификой структуры кластеров.

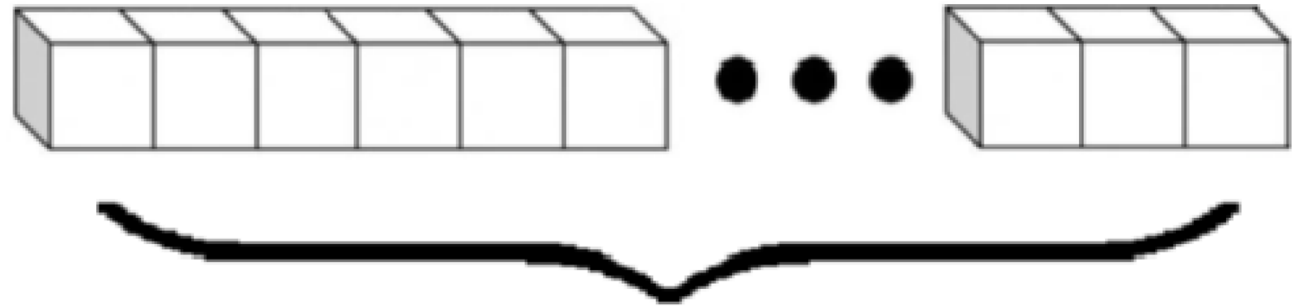
Дальнейшее развитие решения задачи будет идти в направлении оптимизаций архитектур сверточных и графовых нейронных сетей и применения нейронных сетей для повышения точности стандартной реконструкции.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Приложения

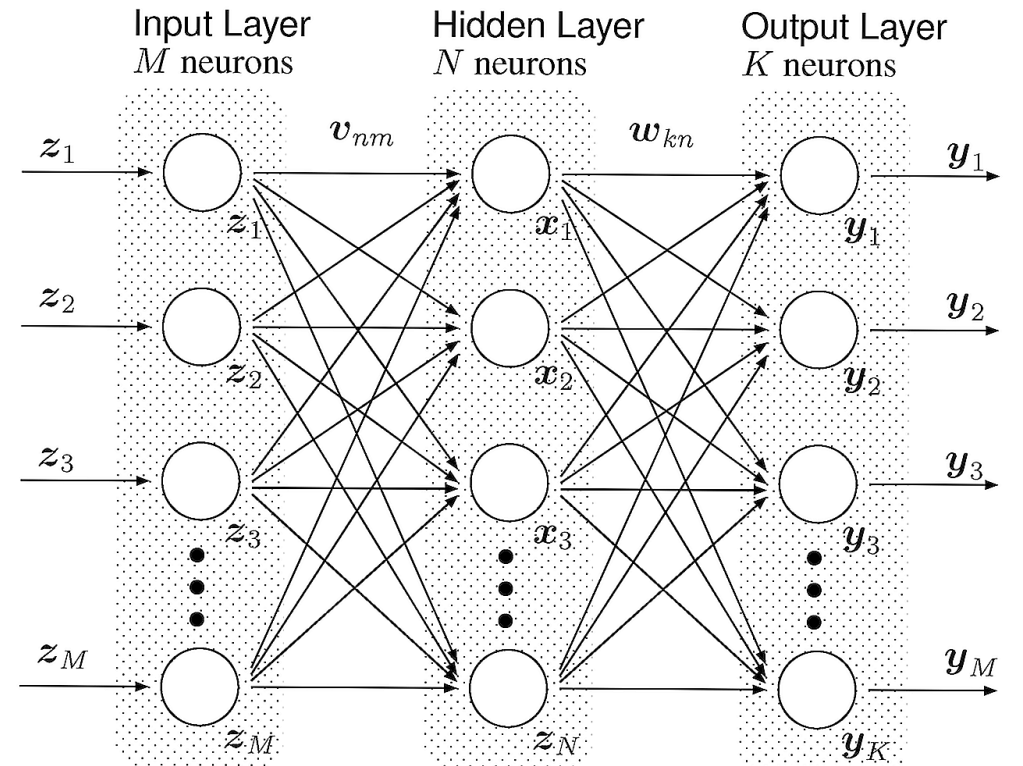
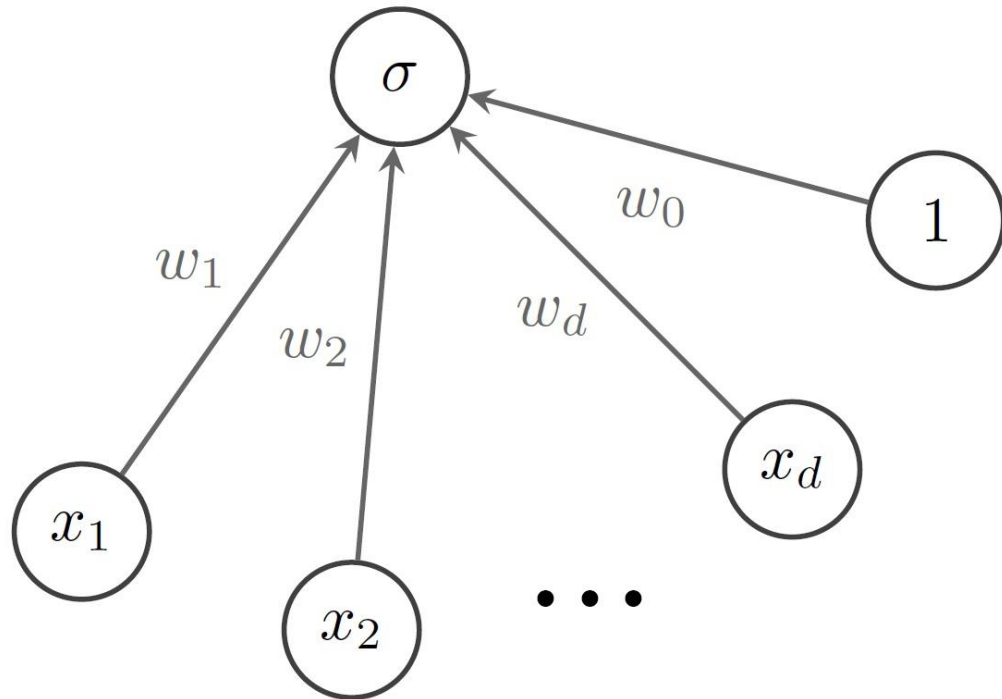
Представление данных

$input = \{x, y, z, t, Q\}$

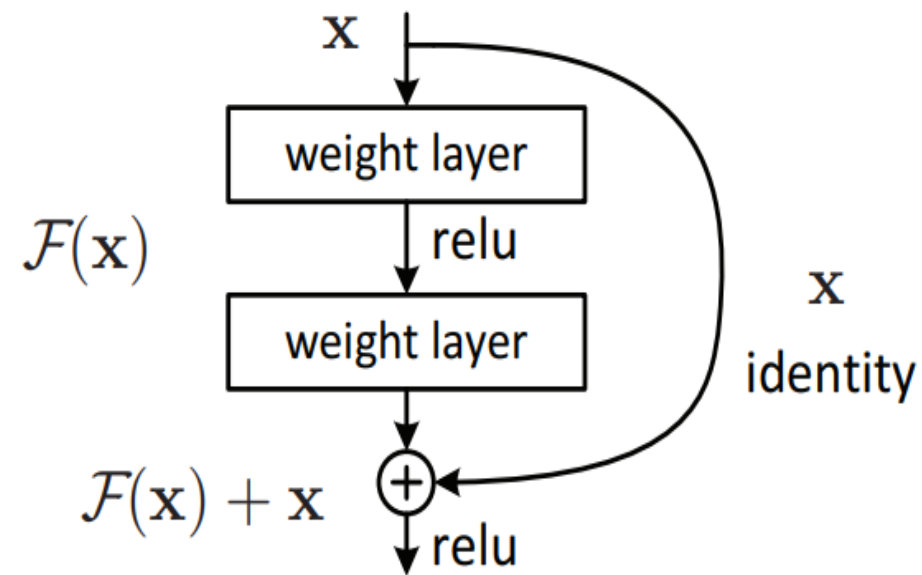
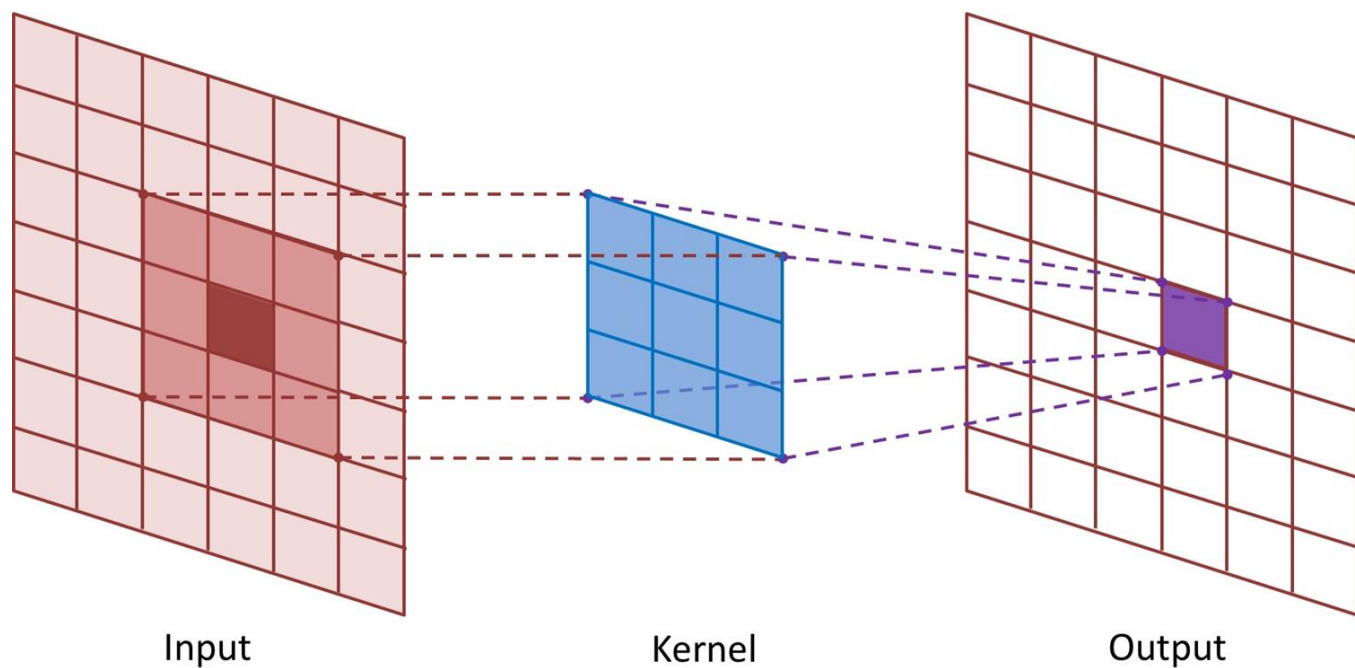


$N = 32$

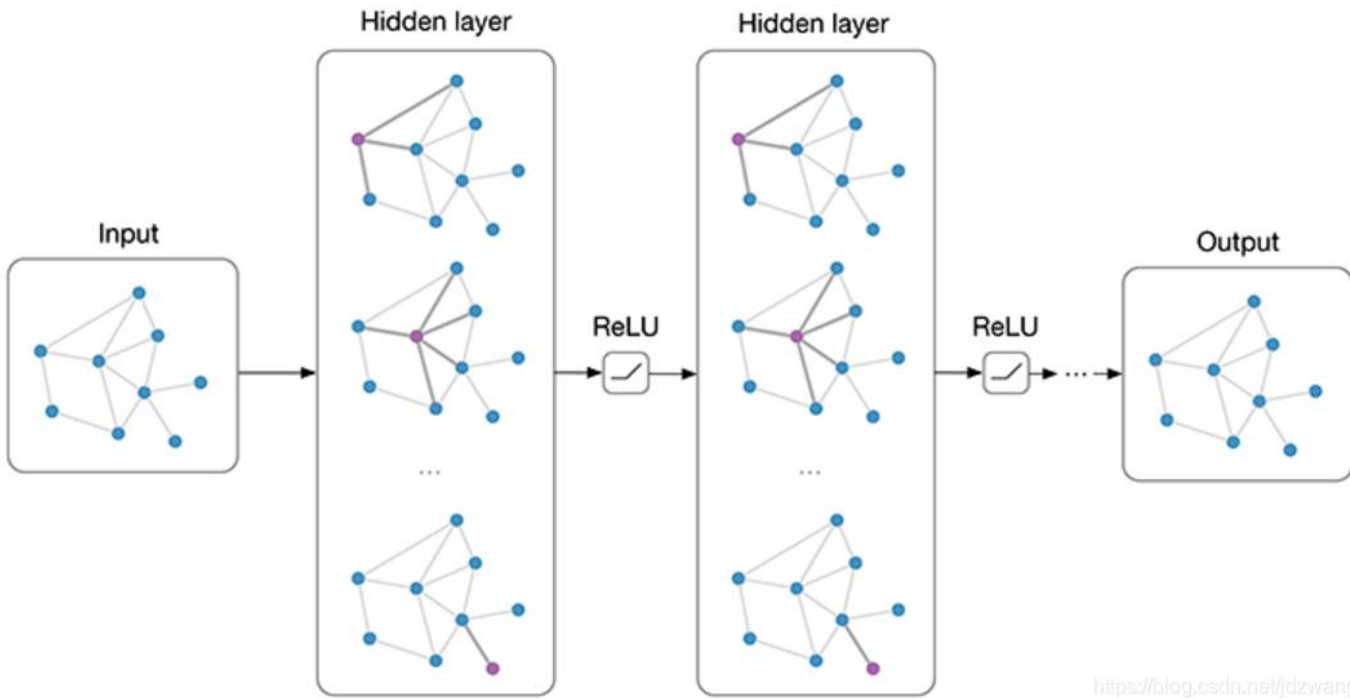
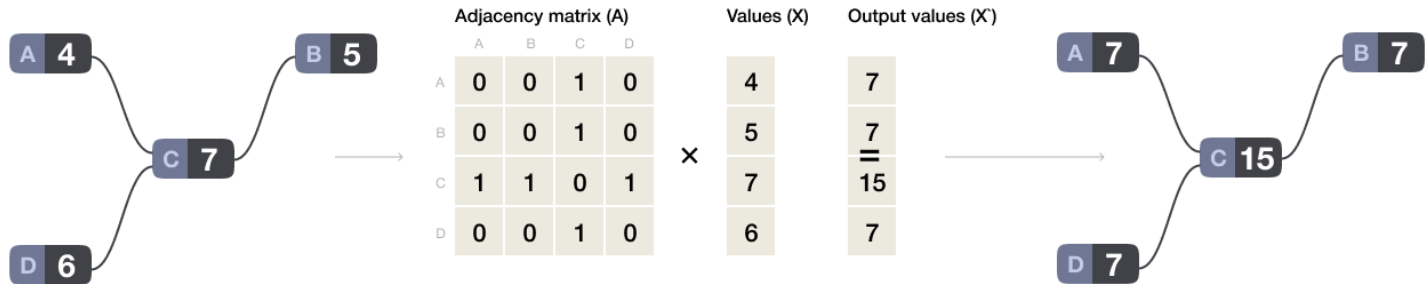
Нейронные сети



Операция свертки; Res connection



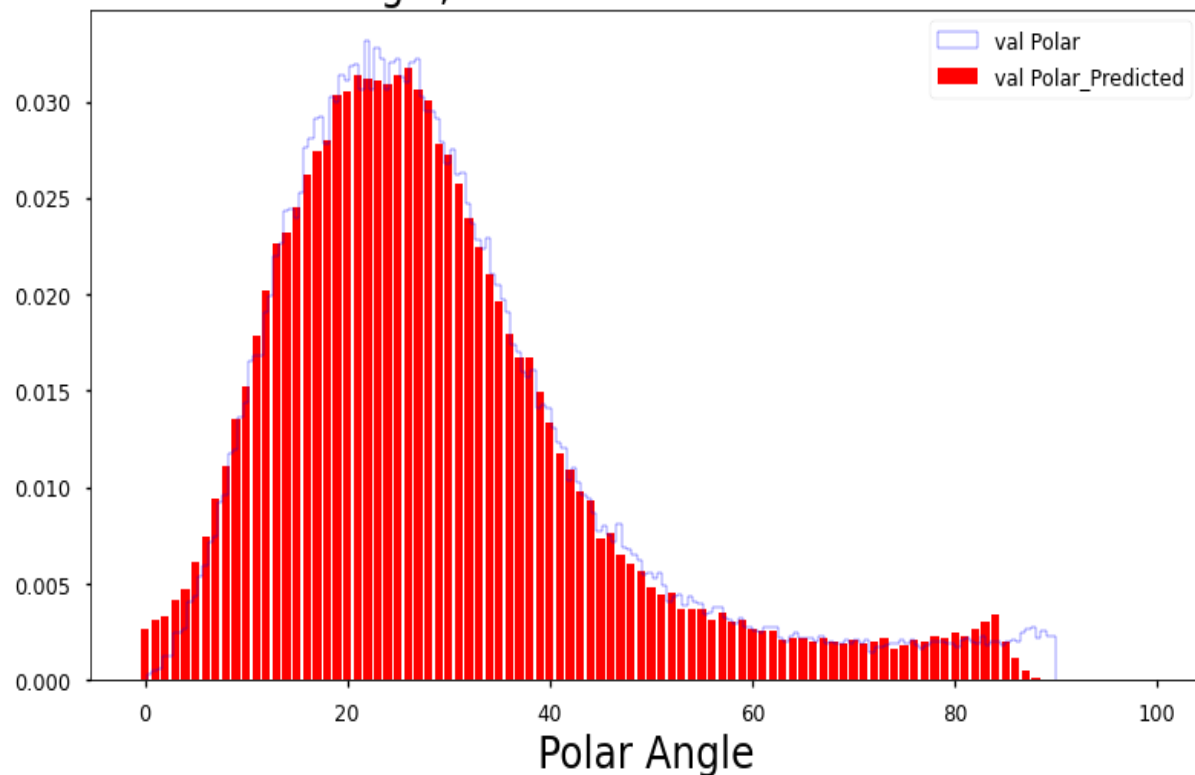
Graph Convolution Layer



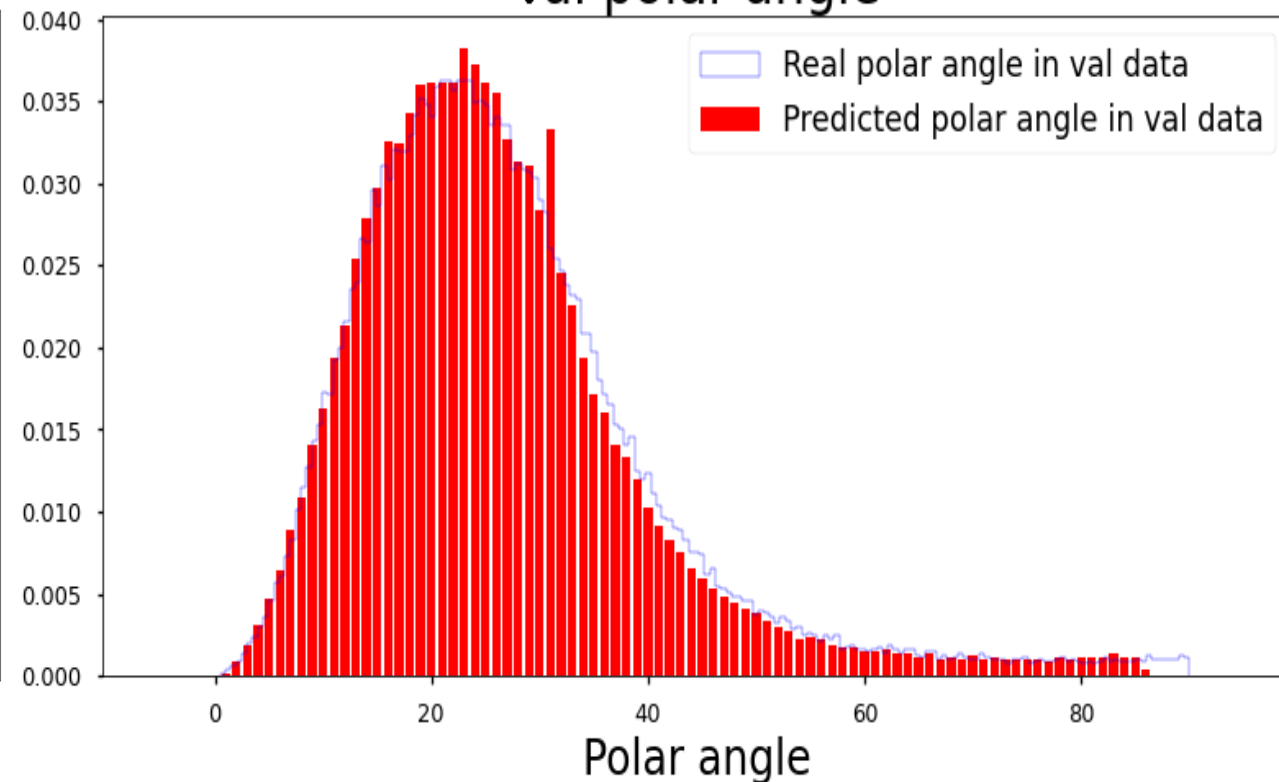
<https://blog.csdn.net/jdzwanghao>

Полярный угол при восстановлении направления и только угла

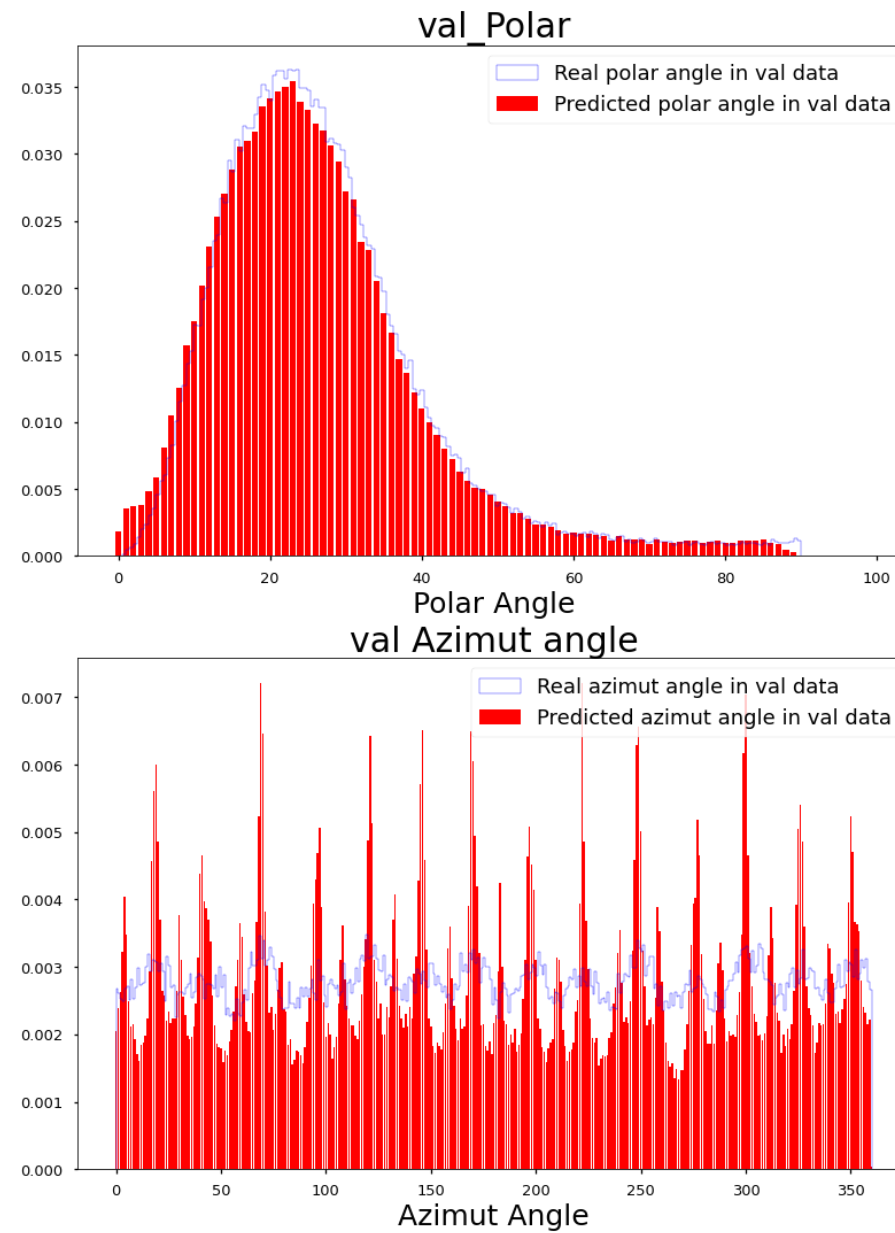
Polar Angle, case of direction reconstruction



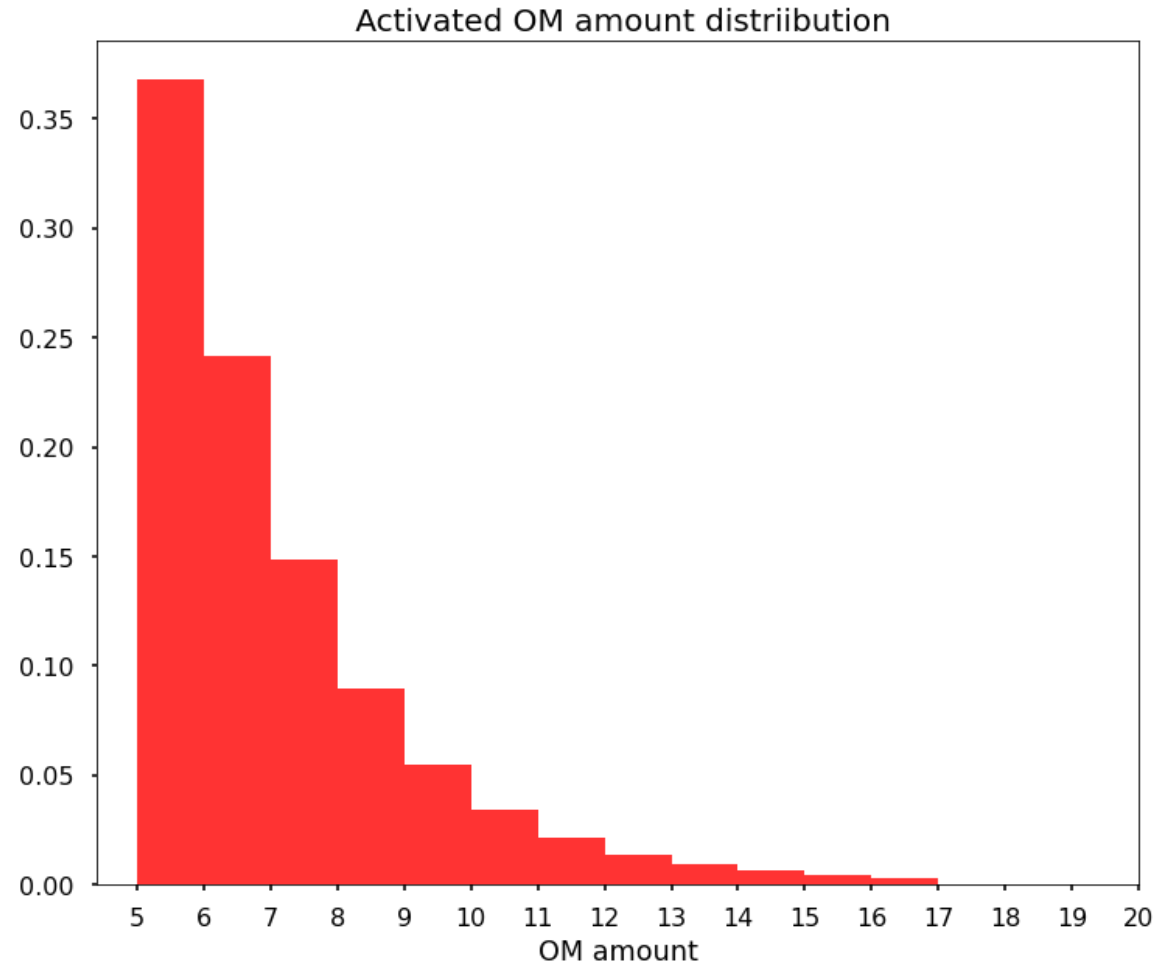
Val polar angle



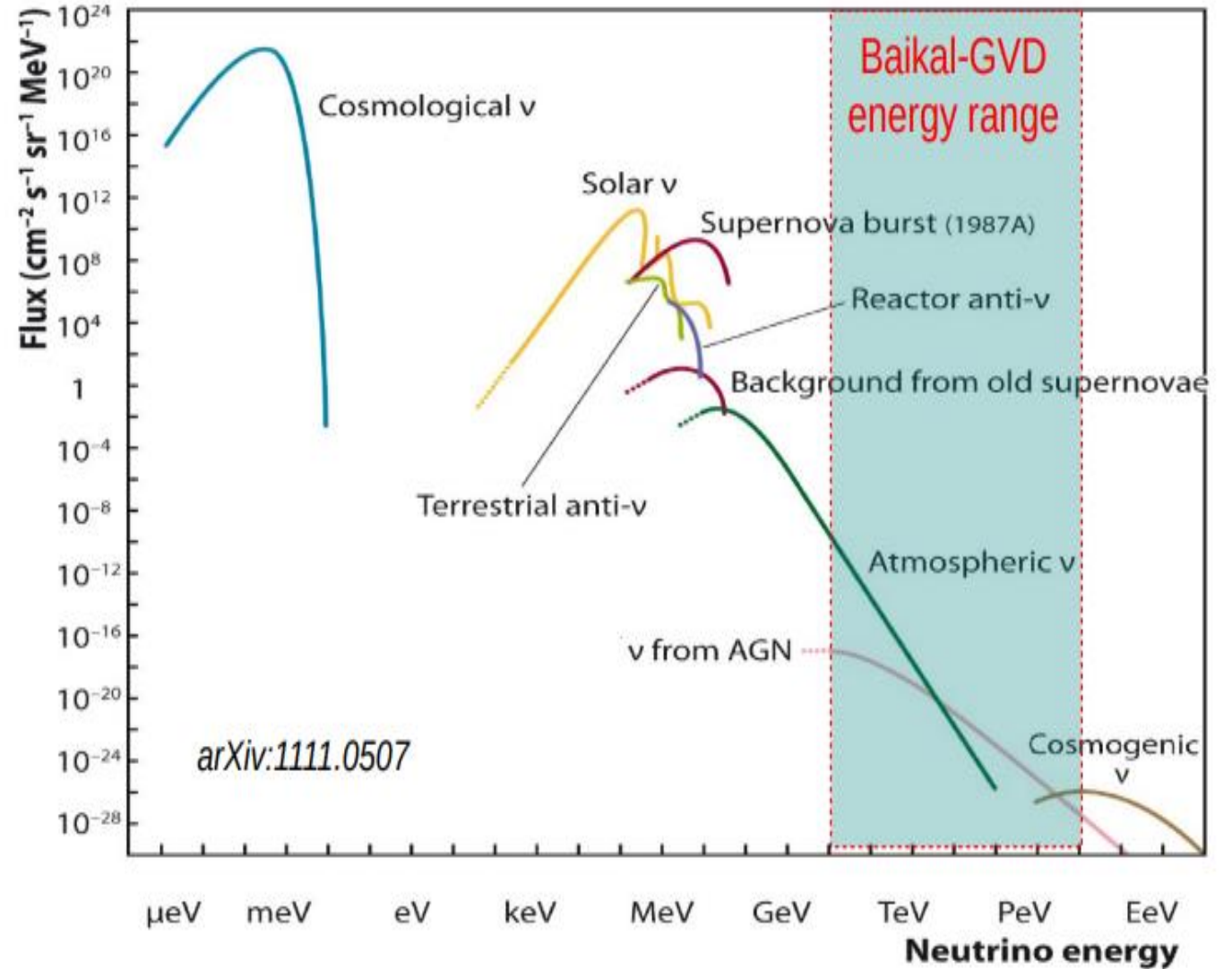
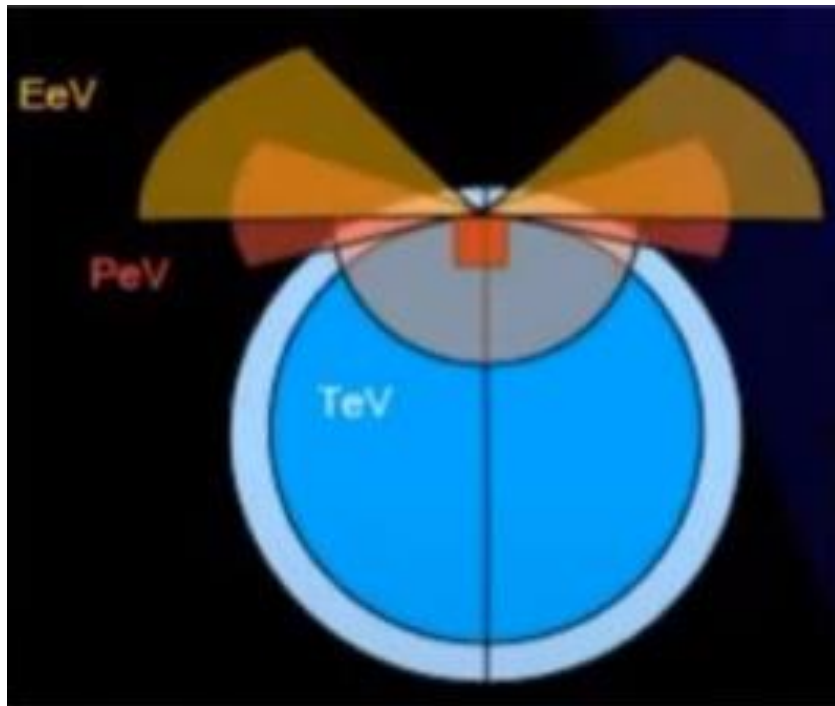
Восстановленные
угловые
распределения



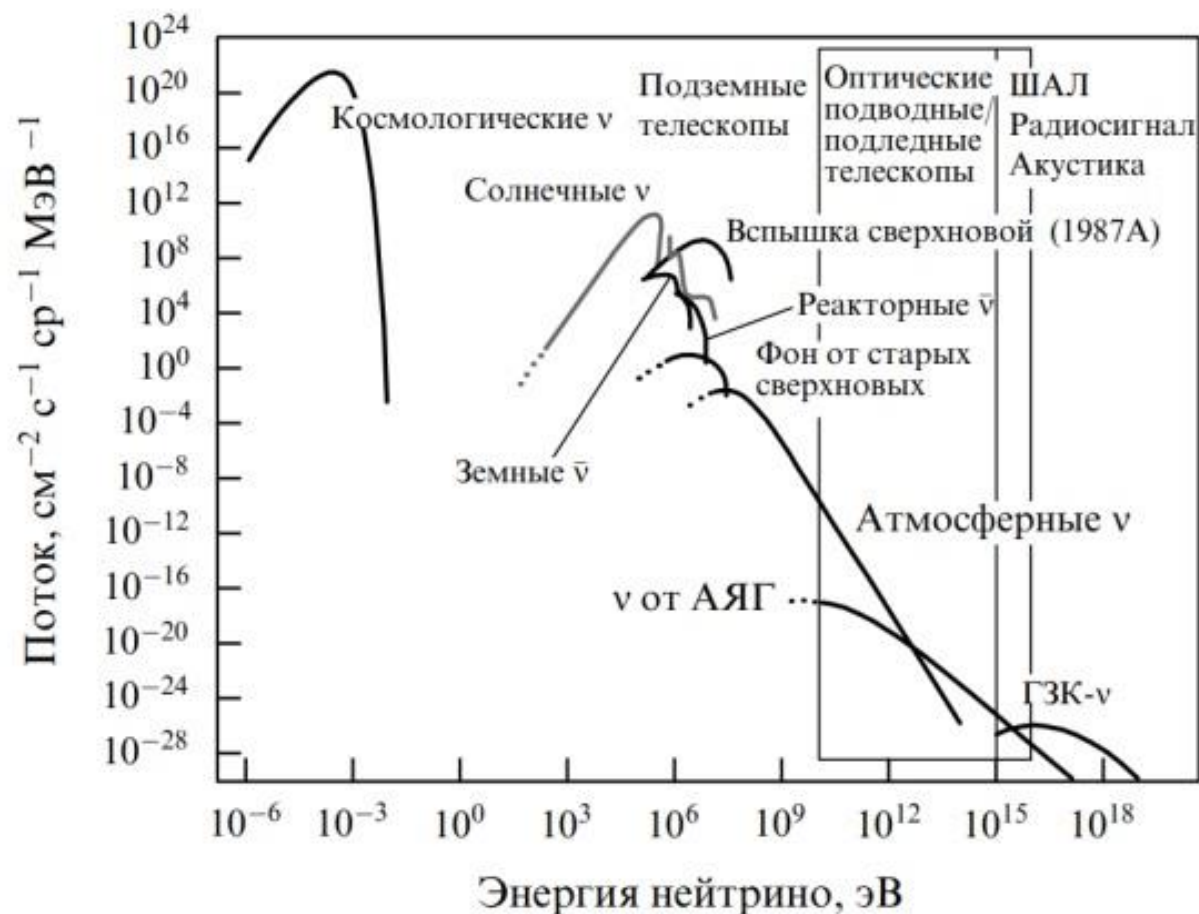
Распределение по
количеству
сработавших
детекторов



Классификация Нейтрино



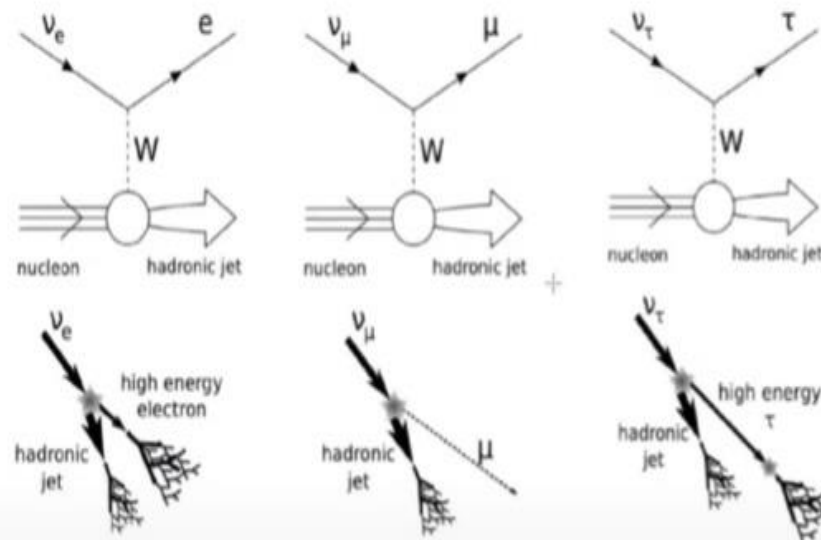
Рассматриваемые энергии



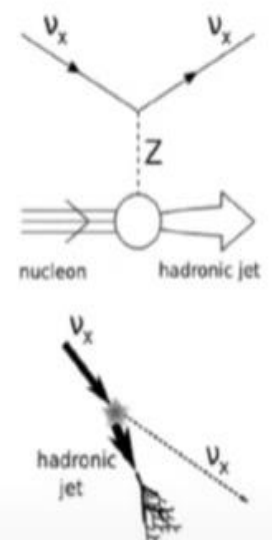
Взаимодействие нейтрино с веществом

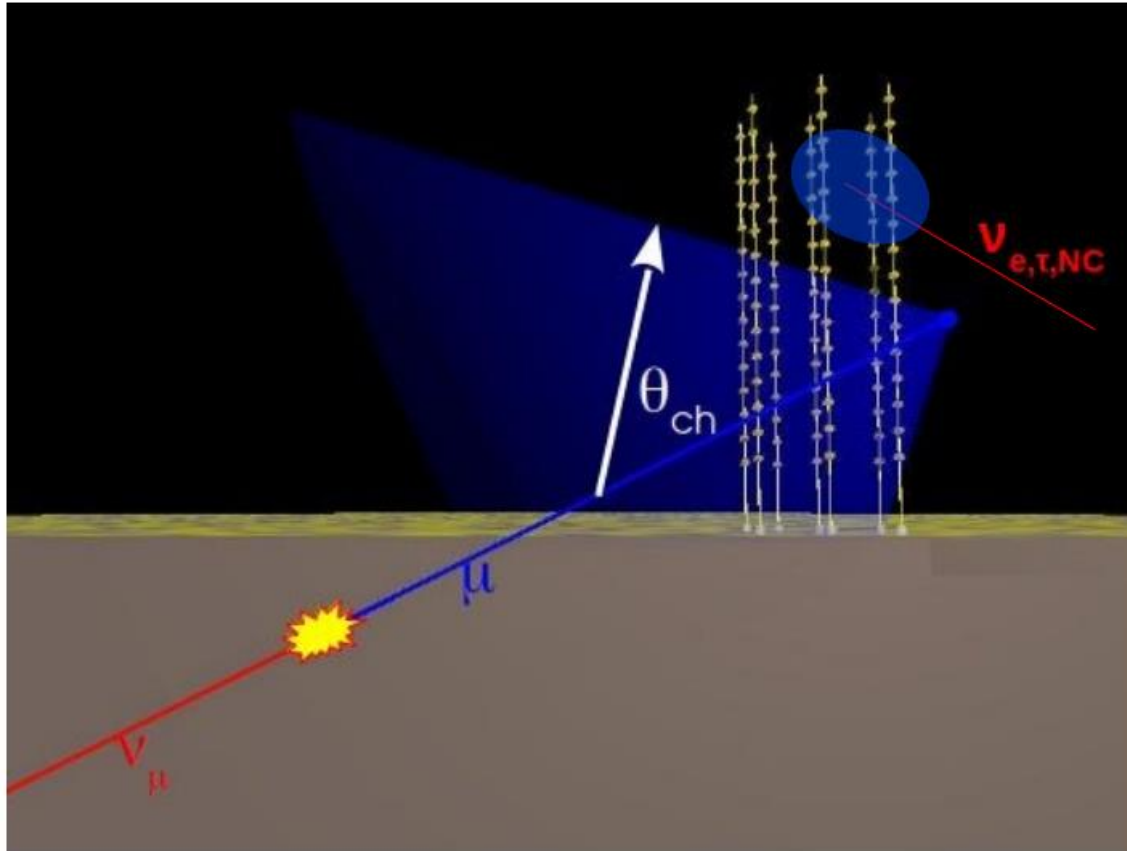
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino

“Заряженные токи”: взаимодействие через W^\pm бозоны



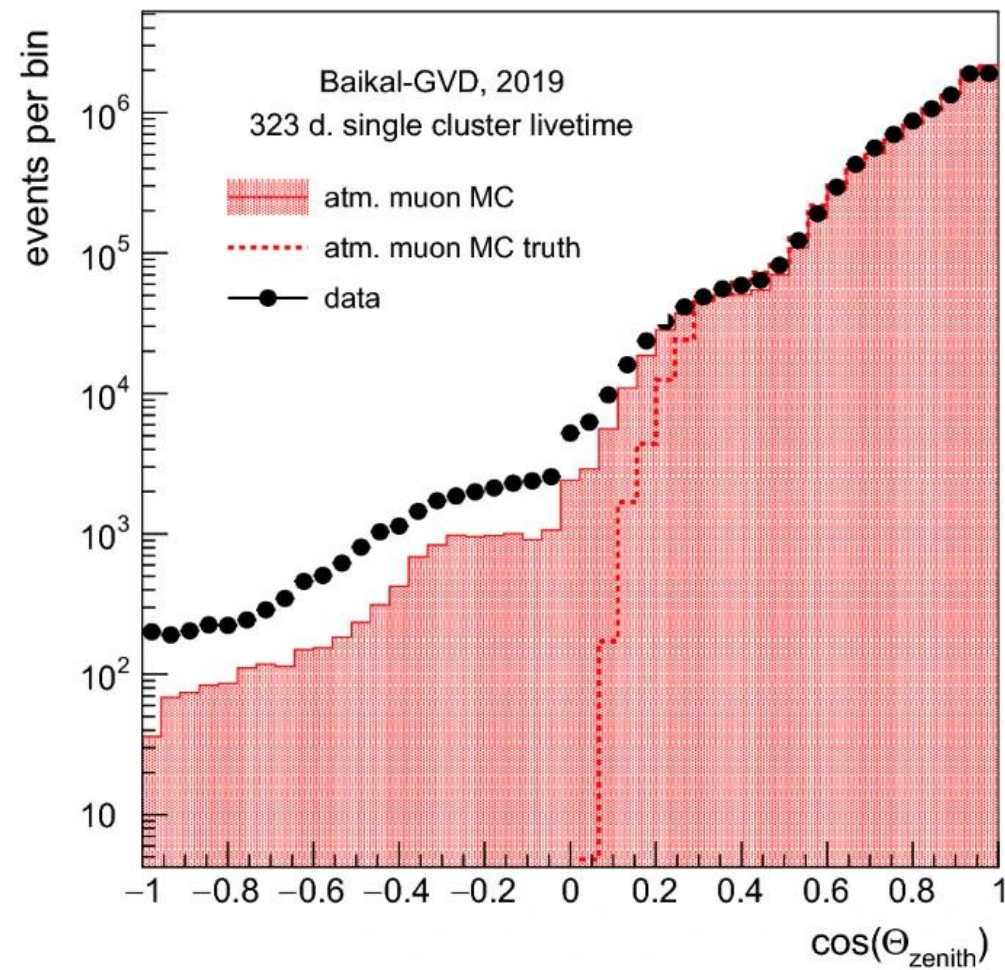
“Нейтральный ток”:
Взаимодействие через
 Z^0 -бозон





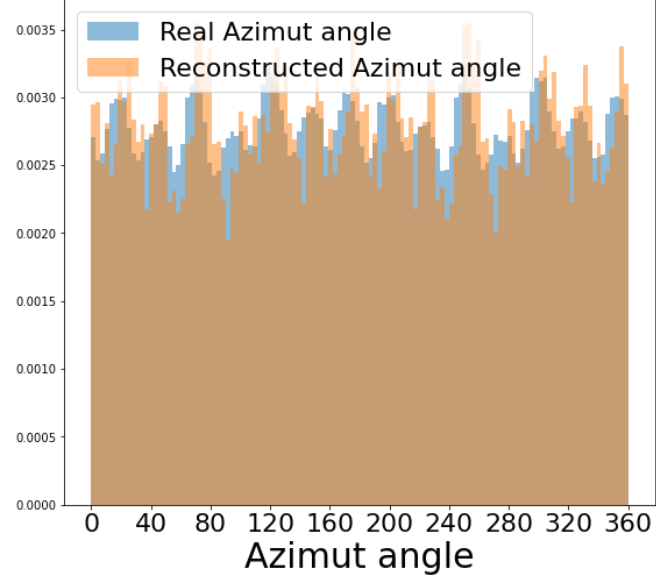
- Large arrays of PMTs in water or ice
- Cherenkov light detected by PMTs
- “Tracks”: ν_{μ} CC
- “Cascades”: ν_e & ν_{τ} CC + NC
- Direction reconstructed from hit positions and times
- Energy reconstructed from hit charges

Монте – Карло и реальные данные

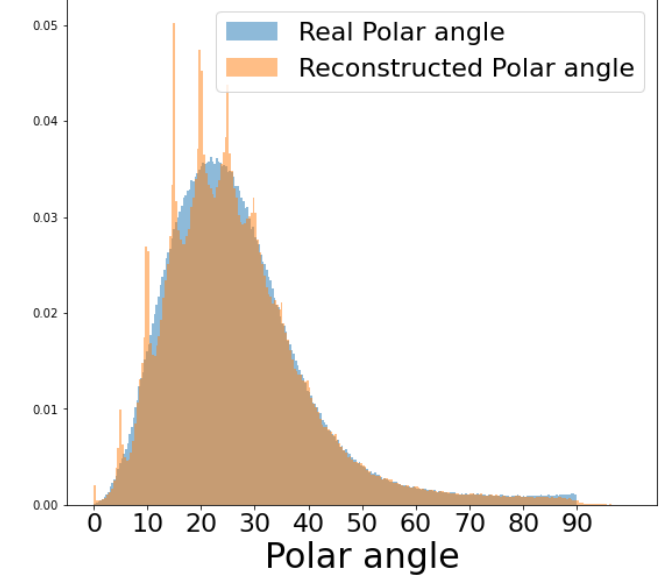


Стандартная реконструкция

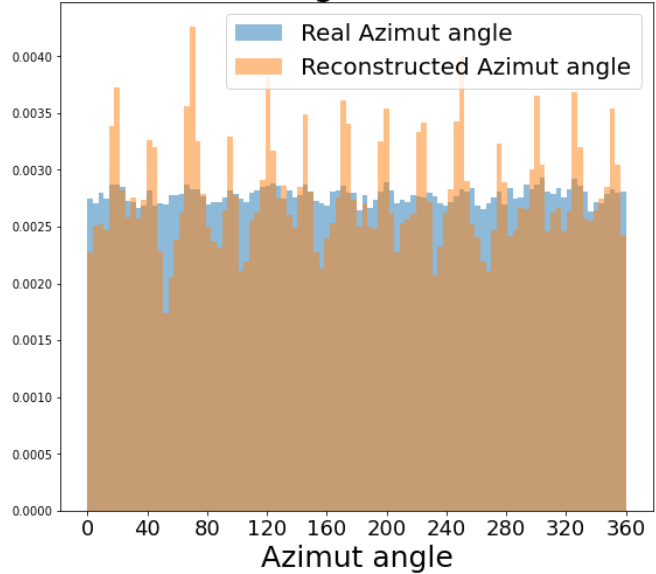
Azimuth angle histogram



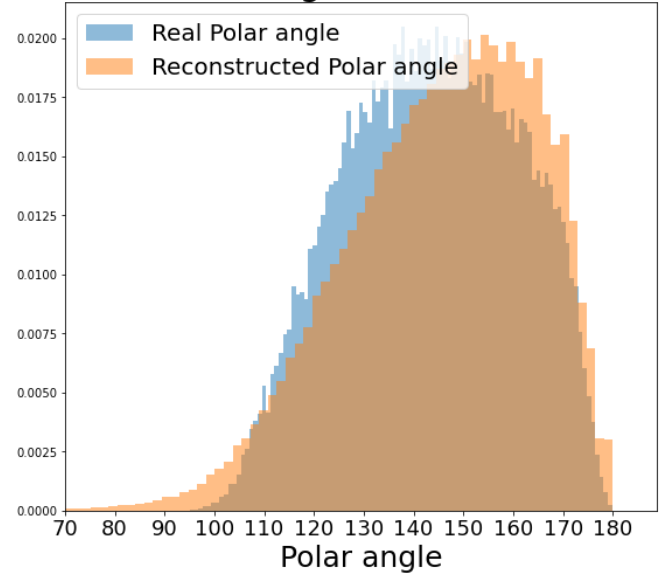
Polar angle histogram



Azimuth angle distribution



Polar angle distribution



Технические данные

$$\lambda_{scatterina}^{eff} \approx 480\text{м при } 475 \text{ nm} \quad \lambda_{absorption}^{max} \approx 24\text{м}$$

Трековые события :точность угла прилета $\approx 0, 25^\circ$
Каскадные события: разрешение $\approx 2^\circ$

Монте - Карло:

Взаимодействие нейтрино с ядрами : STEQ4M
(нейтрино с энергиями 10 ГэВ – 100ТэВ)

Прилет мюонов: программа CORSIKA 5.7 на модели
адронных вз-ий QGSJET

Распространение мюонов до Байкала : MUM v1.3u

Космические лучи: модель на базе KASCADE (240 ГэВ –
20 ПэВ)

Ошибка по времени 5 нс ; 30% по заряду

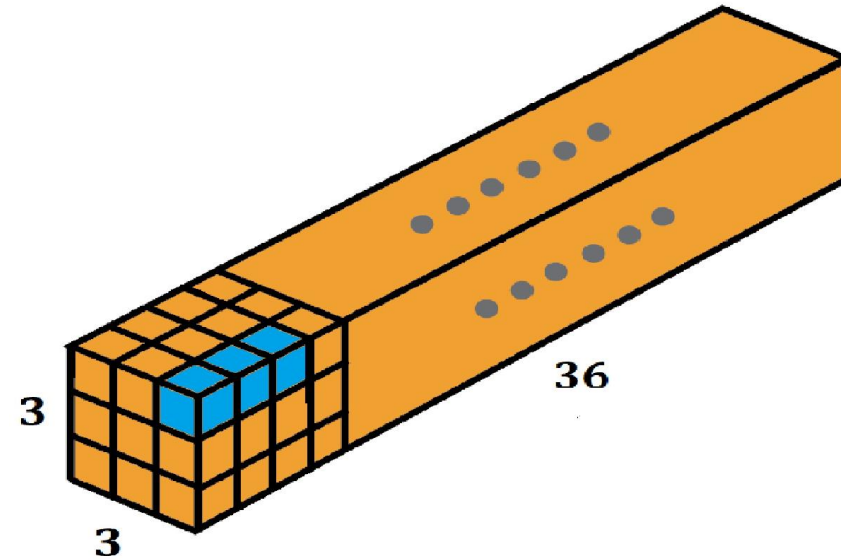
Представление данных

Геометрическое представление

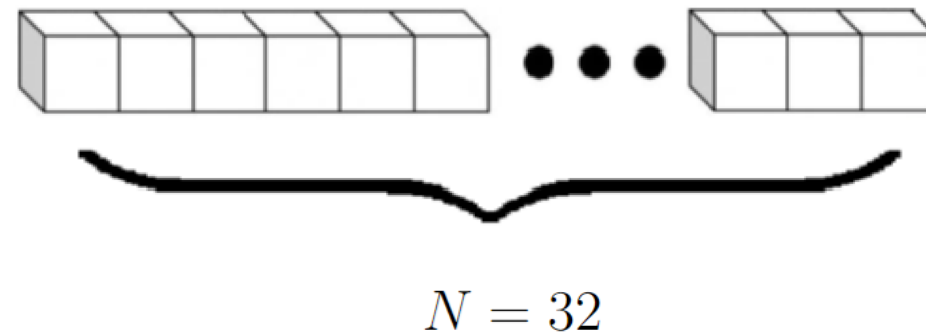
- Повторение структуры кластера
- Много пустого места
- Используются все детекторы

Временное представление

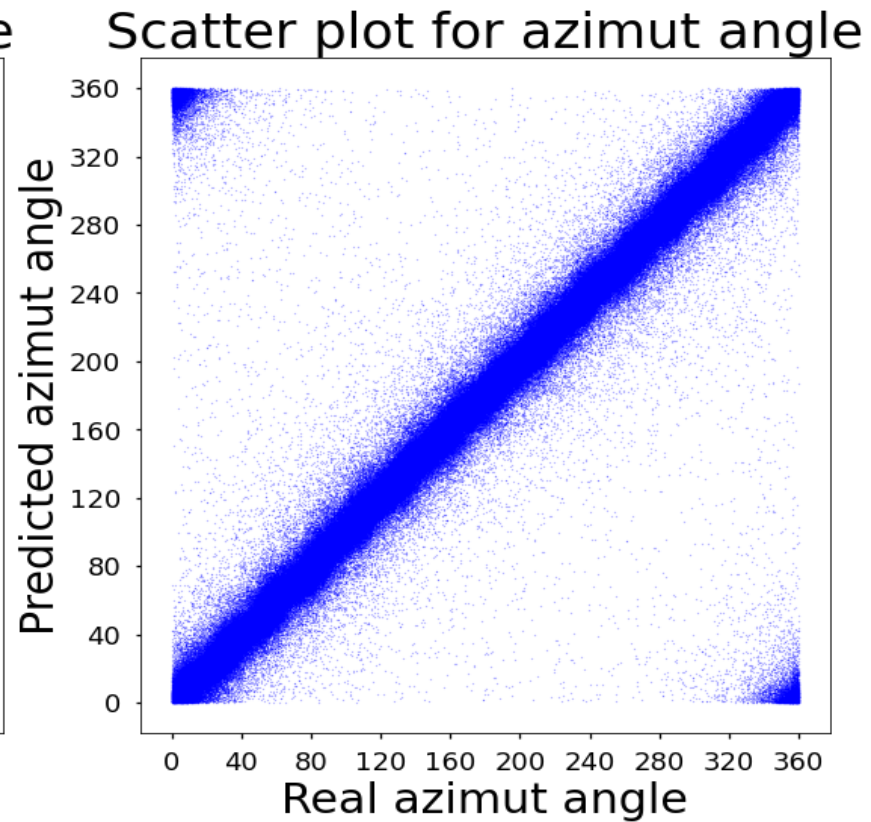
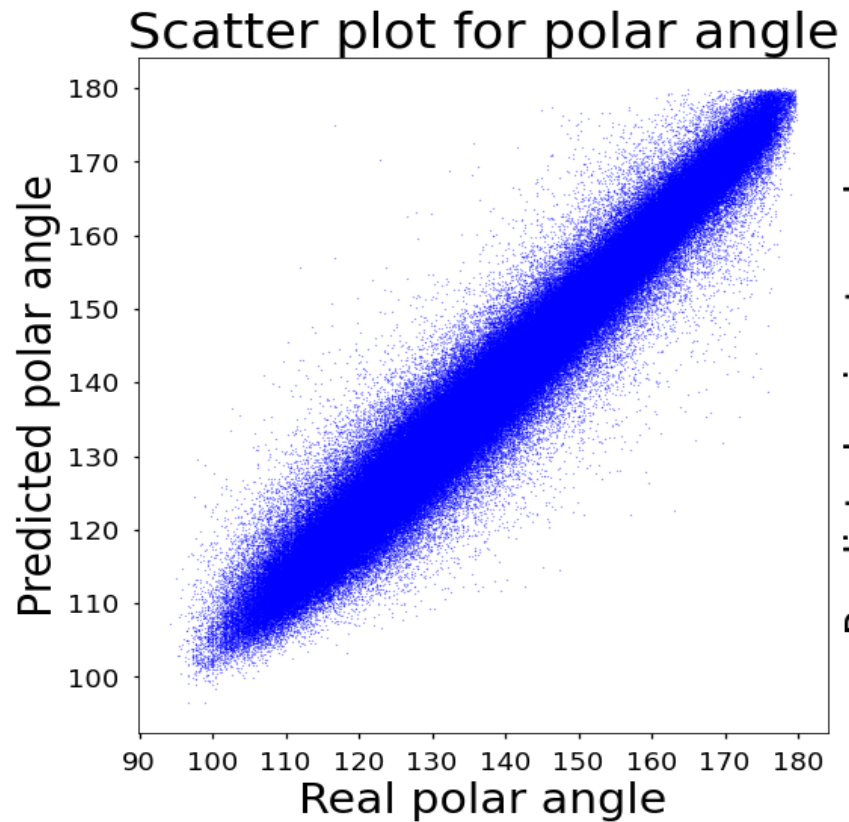
- Сигналы детекторов упорядочены по времени
- Используются только первые 32 сигнала
- Недостающие сигналы заполняются нулями



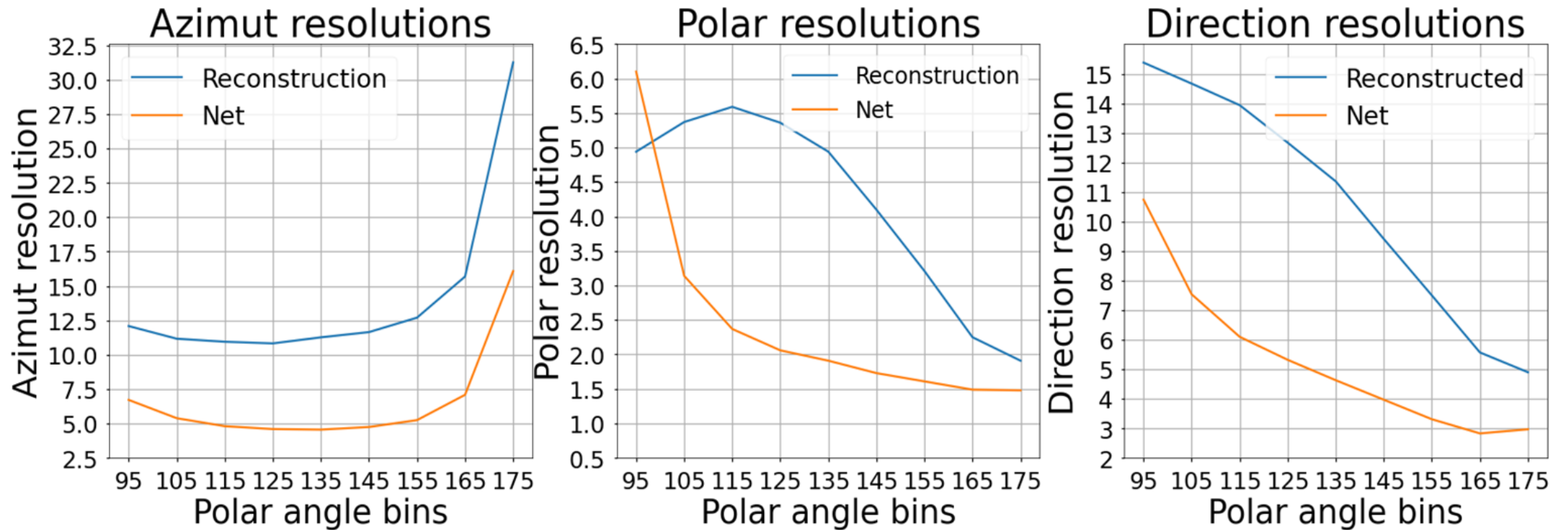
$$\text{input} = \{x, y, z, t, Q\}$$



Мюоны: Восстановленные углы



Мюоны : Угловые разрешения



Мюоны: метрики

1D Net			
Metrics	Azimuth Angle	Polar Angle	Direction
50% Resolution	5.34°	1.9°	4.35°
68% Resolution	8.26°	3.09°	6.0°
Standart Reconstruction			
Metrics	Azimuth Angle	Polar Angle	Direction
50% Resolution	12.51°	3.82°	9.11°
68% Resolution	20.73°	6.53°	13.68°