

Применение глубокого обучения к данным детектора KASCADE

Маргарита Цобенко¹, Павел Безъязыков², Сергей Головачев³, Дмитрий Костюнин⁴, Владимир Ленок⁵, Иван Плохих⁶, Никита Петров⁶, Даниил Реутский⁷, Владимир Сотников³, Виктория Токарева⁵, Олег Щеголев⁷

Введение

В нынешнем году эксперименты Tibet-ASgamma и LHAASO измеряли поток фотонов с энергиями от 100 ТэВ до 1 ПэВ от галактического диска и отдельных галактических источников [1,2], что открыло эпоху гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Исследования в этой области должны помочь понять свойства соответствующих источников излучения, механизмы происхождения космических лучей сверхвысоких энергий и свойства диффузного фона гамма излучения.

В данном проекте мы занимаемся переобработкой данных KASCADE, одного из самых результативных детекторов космических лучей в диапазоне > 1 ПэВ. Проект проработал порядка 15 лет, его данные опубликованы в открытом доступе.

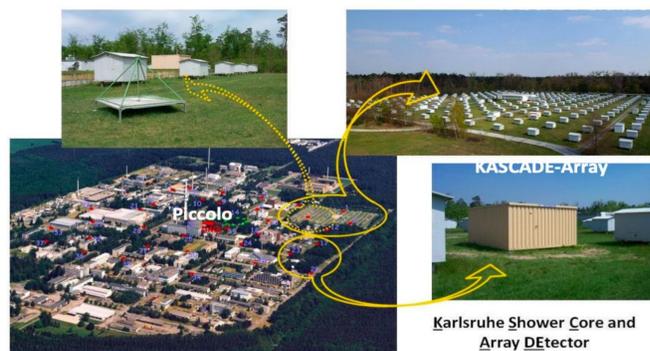
Архив данных включает в себя порядка полумиллиарда зарегистрированных атмосферных ливней, а полная экспозиция составляет примерно половину экспозиции LHAASO, использованной в их исследовании [2]. Данные KASCADE содержат события, вызванные первичными гамма-лучами с энергиями от нескольких сотен ТэВ до ПэВ, и задача сводится к тому, чтобы выделить эти события из гигантского фона адронных событий.

Основная проблема состоит в том, что наблюдательные сигнатуры, оставляемые адронами и фотонами, имеют схожие характеристики. Для решения данной проблемы мы представляем классификатор типа первичной частицы (гамма-кванта или протона), обученный на основе симуляционных данных детектора KASCADE.

Для классификации применяются различные подходы с использованием методов глубокого обучения, такие как: сверточная нейронная сеть, механизм внимания и графовая нейронная сеть.

Эксперимент KASCADE

Эксперимент представляет собой детектор большой площади для измерения космических лучей высоких энергий. Он состоит из 252 детекторных станций, оснащенных детекторами для измерения электромагнитной и мюонной составляющей ливня.



Описание данных

В данной работе используются архивные данные KASCADE, опубликованные в рамках проекта KCDC (KASCADE Cosmic Ray Data Centre [3]), с целью выявления гамма-квантов сверхвысоких энергий.

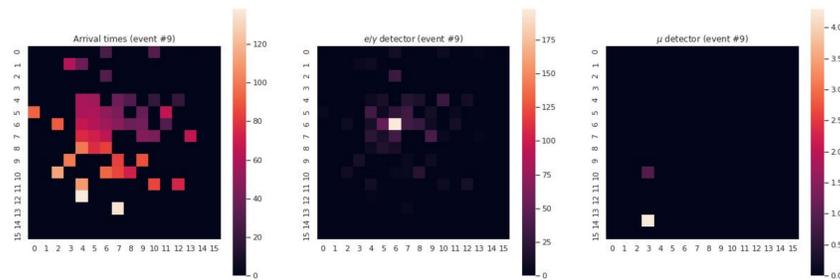
Датасет KCDC содержит порядка 300 миллионов высококачественных событий, а также модельные наборы, сгенерированные с использованием пакета CORSIKA [4] и трех различных адронных моделей: QGSjet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c. С помощью каждой модели сгенерировано порядка полумиллиона широких атмосферных ливней, рожденных гамма-квантами и протонами.

Каждое событие описывается 3 матрицами: время прибытия частиц и энерговыделения электромагнитной составляющей и мюонной составляющей.

Также для каждого события есть следующий список восстановленных свойств:

- Тип и энергия первичной частицы
- Координаты прихода первичной частицы
- Количество электронов и мюонов
- Форма ливня

Пример события KASCADE.



Архитектуры моделей

CNN

```
Layer (type:depth-idx)
=====
CNN_B
-Sequential: 1-1
  | Conv2d: 2-1
  | ReLU: 2-2
-Sequential: 1-2
  | Conv2d: 2-3
  | ReLU: 2-4
-Sequential: 1-3
  | Conv2d: 2-5
  | ReLU: 2-6
-Linear: 1-4
-Linear: 1-5
-Linear: 1-6
=====
Total params: 362,117
```

Self-attention

```
Layer (type)
=====
input_1 (InputLayer)
-----
dense (Dense)
-----
dropout (Dropout)
-----
attention (Attention)
-----
dense_1 (Dense)
-----
dropout_1 (Dropout)
-----
attention_1 (Attention)
-----
dense_2 (Dense)
=====
Total params: 20,898
```

GNN

```
Layer (type:depth-idx)
=====
GCN
-GCNConv: 1-1
  | Linear: 2-1
-GCNConv: 1-2
  | Linear: 2-2
-GCNConv: 1-3
  | Linear: 2-3
-Linear: 1-4
-Sequential: 1-5
  | Linear: 2-4
  | ReLU: 2-5
  | Linear: 2-6
=====
Total params: 2,952
```

Описание моделей

CNN

Согласно структуре данных, получаемых с детекторных станций, каждое событие можно представить в виде трехканального изображения. Результат применения сверток записывается в виде вектора, который конкатенируется с вектором признаков. Полученное векторное представление подается на вход линейному классификатору.

Self-attention

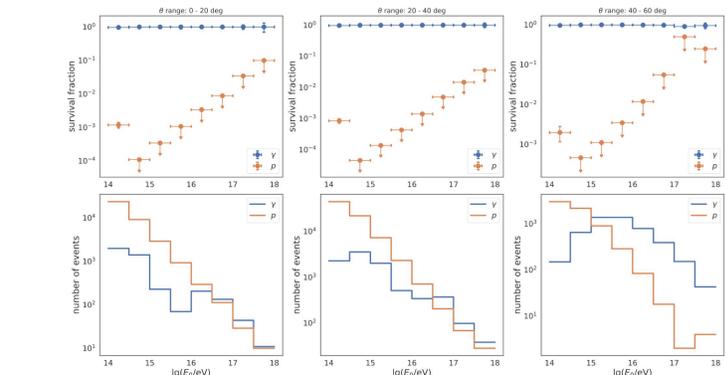
Альтернативным подходом к решению задачи определения типа первичной частицы является применение многослойных перцептронов с механизмом внутреннего внимания (self-attention MLP). В отличие от сверточной сети, подобный род моделей не является пространственно инвариантным. Данная архитектура работает с одномерным представлением матриц энерговыделения и времен прихода.

GNN

Каждое событие можно представить в виде взвешенного неориентированного графа, вершинами которого являются детекторные станции. Длины ребер между вершинами задаются с учетом реального расстояния между детекторными станциями. Каждая вершина содержит признаковое описание. Построенный граф подается на вход Graph Convolutional Network.

Текущие результаты

Все модели были обучены на симуляционных данных. Модель Self-attention показала самые лучшие результаты.



Выше представлена доля выживших протонов и гамма-квантов в зависимости от энергии и угла прихода для модели self-attention. Модель показывает высокую степень подавления протонов, что практически сопоставимо с размерами модельного датасета.

Эффективность детектора на низких энергиях составляет не 100%, поэтому разрешающая способность классификатора падает. Ослабление верхних пределов связано с падением статистики в моделировании, в дальнейшем мы планируем использовать новые симуляции.

Заключение

В результате работы были разработаны три классификатора типа первичной частицы (гамма-кванта или протона) на основе данных детектора KASCADE. В дальнейшем планируется улучшить качество моделей и применить модели к реальным данным.

Источники

- [1] Tibet ASgamma Collaboration, Phys.Rev.Lett. 126 (2021) 141101
- [2] LHAASO Collaboration, Nature 594 (2021) 33
- [3] <https://kcdc.ikp.kit.edu/>
- [4] <https://www.ikp.kit.edu/corsika/>

¹Высшая школа экономики

²Иркутский государственный университет

³JetBrains Research

⁴DESY

⁵Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Astroparticle Physics

⁶Новосибирский государственный университет

⁷Московский физико-технический институт