Анализ структуры широких атмосферных ливней с помощью методов машинного обучения

Позднухов Никита Алексеевич

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук Нугаев Эмин Яткярович

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук Рубцов Григорий Игоревич 25.05.2023

МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет Кафедра физики частиц и космологии

- Широкие атмосферные ливни каскады частиц, вызванные взаимодействием космических лучей с атмосферой;
- В экспериментах наблюдаются фотоны очень больших энергий, приходящие от далёких источников;
 [GRB221009A Z. Cao et al., 2022; Carpet-2 ATel #15669]
- Измерение диффузного потока фотонов и поиск точечных источников могут дать возможность проверки моделей физики за пределами Стандартной Модели.
 [Axion-like particles Troitsky, S.V., 2022]

- В эксперименте необходимо отличать фотонные события от адронных;
- Существует подход, основанный на выделении маломюонных событий; [R. Maze et al., 1960]
- Известно, что между адронными и фотонными ливнями есть различие в поперечной функции распределения частиц. Это можно применить для разделения событий; [HAWC, Abeysekara et al, 2017]

- В эксперименте необходимо отличать фотонные события от адронных;
- Существует подход, основанный на выделении маломюонных событий;
 [R. Maze et al., 1960]
- Известно, что между адронными и фотонными ливнями есть различие в поперечной функции распределения частиц. Это можно применить для разделения событий;
 [HAWC, Abeysekara et al, 2017]

Цель работы

Разработать классификатор фотонов для эксперимента Carpet-2, использующий различия в поперечной структуре ливня в дополнение к другим измеряемым параметрам ливня.

Поперечная структура ШАЛ

- По сравнению с адронными ливнями, фотонные ливни сравнимой энергии более компактны;
- Фотонные ливни менее подвержены сильным флуктуациям по мере своего развития.



Рис. 1: Моделирование ливней от различных первичных частиц с энергией 100 TeV. Электромагнитная компонента показана красным, адронная чёрным, мюонная зелёным

Carpet-2/3

- Непрерывное покрытие очень подробная информация о структуре ливня!
- Подземный мюонный детектор даёт возможность измерять число мюонов;



Рис. 2: Схема эксперимента Carpet-3

$$\begin{split} P_1 &= \frac{1}{N} \sum_k \sum_i (S_{ik} - < S_k >)^2 \\ P_2 &= \sum_k \frac{2}{N_k (N_k - 1)} \cdot \frac{1}{< S_k >} \sum_{i > j} (S_{ik} - S_{jk})^2 \end{split}$$

- Такие переменные чувствительны к угловой асимметрии распределения частиц;
- Кластеры с большим числом частиц/энергией должны увеличивать скученность.





- Анализ делается на основе МК моделирования Carpet-2;
- В исходном наборе 150 тысяч событий с энергиями от 31.6 TeV до 31.6 PeV; [CORSIKA 7.4003]
- После прохождения критериев отбора остаётся 25 тысяч событий;
- В моделировании реконструируются параметры ливня, так же как и в эксперименте.



Рис. 4: Точечные диаграммы параметров скученности и энерговыделения в детекторах

Результаты моделирования



Рис. 5: Точечные диаграммы параметров скученности и числа мюонов

- Азимутальный и зенитный углы $\phi, \theta,$
- Координаты оси Х, Ү,
- Энерговыделение в центральном детекторе E_{carpet} ,
- Число мюонов в мюонном детекторе N_{μ} ,
- Параметры скученности P_1, P_2 .

- Можно построить классификатор в таком многомерном пространстве;
- Используется градиентный бустинг на основе деревьев решений; [XGBoost]
- Классификатор выдаёт степень уверенности в том, что событие фотонное;
- Для оценки производительности строится ROC-кривая.

$$TPR = \frac{\text{true positive}}{\text{true positive} + \text{false negative}}$$
$$FPR = \frac{\text{false positive}}{\text{false positive} + \text{true negative}}$$

Классификатор событий



Рис. 6: Распределение вероятности и ROC-кривая. Пунктиром показан уровень 95% правильно определённых фотонов.

- Необходимо оценить ошибку, связанную с погрешностью восстановления оси ливня;
- Проведено дополнительное тестирование на наборе ливней, в котором случайно сдвинуты координаты оси;
- Для ливней, попадающих в цетральный массив, результат не хуже!

Классификатор событий



Рис. 7: Распределение вероятности и ROC-кривая для дополнительного набора.

- Предложен метод разделения фотонных и адронных ливней, позволяющий находить события, недоступные для маломюонного отбора;
- По результатам моделирования построен классификатор событий, который можно применить для анализа данных Carpet-2, поиска новых источников и ограничений на диффузный поток фотонов;
- Для Carpet-3 ожидается увеличение эффективности.

Спасибо за внимание!

- Число сработавших детекторов N > 300;
- Энерговыделение в центральном массиве $E_{carpet} > 500 \text{ GeV};$
- Число мюонов $N_{\mu} < 250.$

- Изначальный спектр по энергии $E^{-1};$
- После отбора событий он остаётся в достаточной степени одинаковым для фотонов и протонов.



Рис. 8: Кумулятивное распределение энергии событий

Выбор границы классификации

- В эксперименте фотонных событий очень мало!
- Необходим очень строгий отбор, чтобы защититься от ложноположительных событий. Поэтому интересна левая часть ROC-кривой (FPR $\approx 10^{-3}$)



Рис. 9: ROC-кривая классификатора