

## Содержание

1. Введение . . . . .	4
2. Детектор КМД-3 и LХе калориметр . . . . .	5
3. Формат входных данных с калориметра . . . . .	7
4. Библиотека TMVA и метод BDT . . . . .	7
5. Алгоритм разделения кластеров . . . . .	9
6. Результаты . . . . .	9
7. Заключение . . . . .	9
Список литературы . . . . .	9

## 1. Введение

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000. Коллайдер имеет два места встречи пучков, в которых установлены детекторы КМД-3 (криогенный магнитный детектор) и СНД (сферический нейтральный детектор). В программу проекта ВЭПП-2000 включено измерение сечений процессов, наблюдаемых при столкновениях электронов и позитронов в диапазоне энергий до 2 ГэВ [1]. В число изучаемых процессов входят процессы с фотонами в конечном состоянии.

Для регистрации фотонов в детекторе КМД-3 используется жидкоксеноновый (LXe) калориметр. Фотон, попадая в калориметр, порождает электромагнитный ливень из вторичных электронов, позитронов и фотонов. Частицы ливня регистрируются сигнальными полосками, расположенными на слоях калориметра. Сработавшие сигнальные полоски группируются в кластеры.

При столкновениях электронов  $e^-$  и позитронов  $e^+$  большое сечение рождения имеют процессы, содержащие нейтральный пион  $\pi^0$  в конечном состоянии. Одним из таких процессов является  $e^-e^+ \rightarrow \pi^0\gamma$ . Нейтральный пион с вероятностью 99% распадается на два фотона  $\gamma$ . Минимальный угол между фотонами при более высокой энергии пи-мезона становится меньше, и при значении  $E_{\pi^0} = 1$  ГэВ этот угол составляет 0,27 радиана. Электромагнитные ливни таких фотонов в калориметре могут перекрываться, и появляется вероятность принять два слившихся кластера, образованных двумя фотонами, за одиночный кластер от одного фотона [2]. Чтобы увеличить статистику событий, повысить точность измерения сечения и других параметров процесса, необходимо разделять такие кластеры.

Таким образом, требуется разработать алгоритм различения однофотонных и двухфотонных кластеров в LXe калориметре детектора КМД-3. Для решения этой задачи выполнены следующие шаги:

- описание детектора КМД-3 и LXe калориметра,
- обзор библиотеки TMVA 4 и метода BDT,
- анализ задачи разделения кластеров,
- обучение алгоритма разделения по методу BDT.

Результаты данной работы планируется сравнить с результатами работ [1].

## 2. Детектор КМД-3 и LXe калориметр

На рис. 1 представлена схема криогенного магнитного детектора КМД-3.

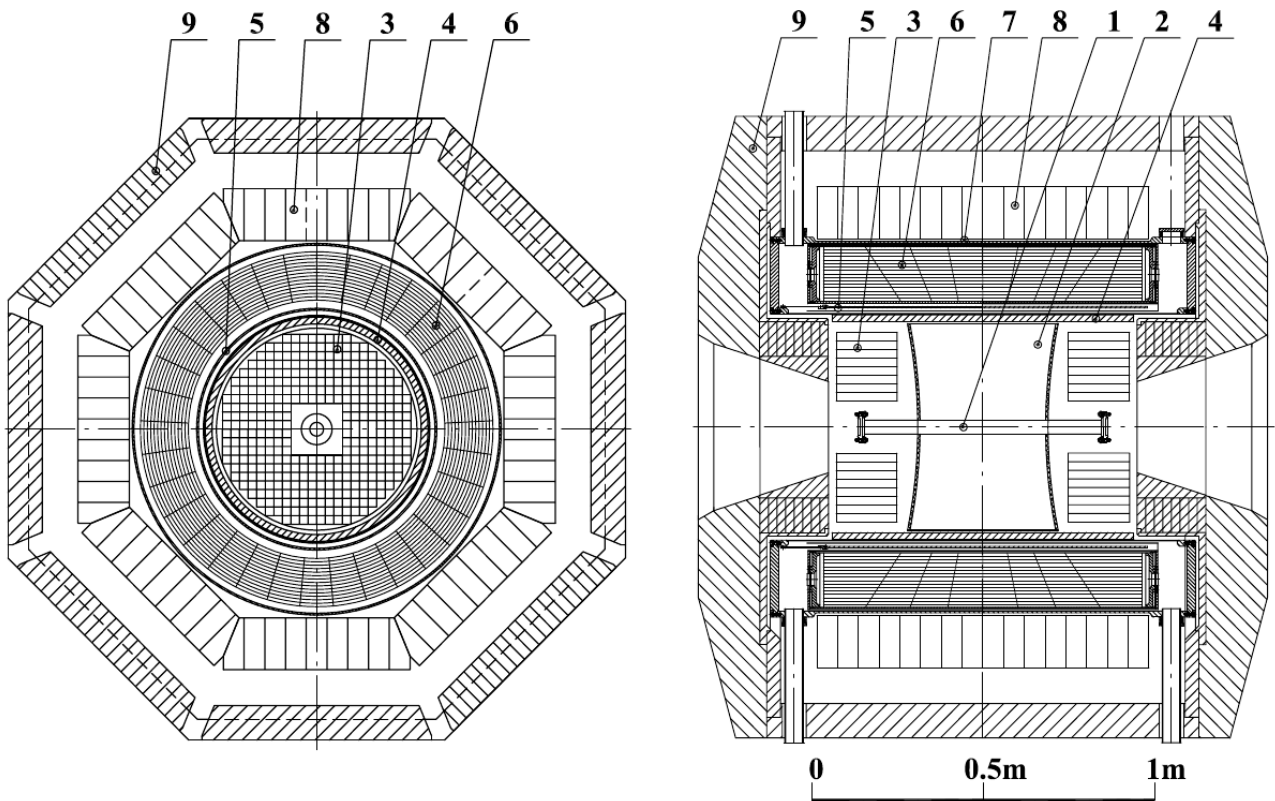


Рис. 1. Схема детектора КМД-3: 1 – вакуумная камера, 2 – дрейфовая камера, 3 – торцевой BGO калориметр, 4 – Z-камера, 5 – сверхпроводящий соленоид, 6 – цилиндрический жидкоксеноновый калориметр, 7 – времяпролётная система, 8 – цилиндрический CsI калориметр, 9 – ярмо магнита [3]

Цилиндрический электромагнитный калориметр детектора регистрирует фотоны и электроны, которые вылетают под большими углами к оси пучков (от  $39^\circ$  до  $141^\circ$ ), и охватывает телесный угол  $0,8 \cdot 4\pi$ . Он состоит из двух соосных подсистем: жидкоксенонового LXe калориметра и кристаллического

CsI калориметра.

Жидкоксеноновый калориметр образован семью соосными катодами и восемью анодами, образующими систему ионизационных камер. Структура электродов LXe калориметра представлена на рис. 2 [3].

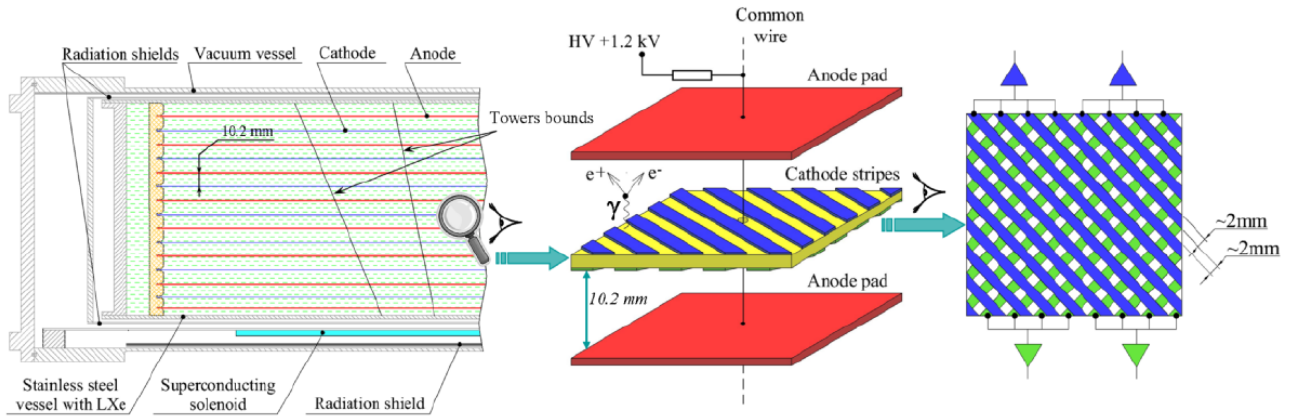


Рис. 2. Структура электродов жидкоксенонового калориметра

Поверхность каждого анода разделена на 264 прямоугольные площадки – восемь вдоль оси пучков  $Z$ , тридцать три в перпендикулярной ей плоскости  $R, \varphi$ . Площадки с одинаковым положением по  $Z$  и  $\varphi$  соединены проводником в «башню». Такая «башня» ориентирована в место встречи пучков. Аноды используются для измерения выделенной энергии.

Каждый катод разбит на 2112 полосок, что позволяет точно измерять координаты и удельное энергосодержание. Полоски объединены в группы по четыре, и к каждой такой группе подключён один сигнальный канал. На противоположных сторонах катода полоски ориентированы взаимно перпендикулярно и находятся под углом  $45^\circ$  к оси пучков  $Z$  [3].

LXe калориметр позволяет измерять координаты с погрешностью от 0,7 для первого слоя до 1,4 мм для шестого слоя [4, 5]. Точность измерения энергии составляет примерно 8,5% для нейтральных пи-мезонов [6].

Регистрация фотонов производится путём сбора информации о частицах электромагнитного ливня, порождённого при взаимодействии фотона с материалом калориметра.

### 3. Формат входных данных с калориметра

### 4. Библиотека TMVA и метод BDT

Библиотека TMVA (The Toolkit for Multivariate Analysis) предоставляет среду для расчёта, параллельного вычисления и применения методов многомерной классификации и, начиная с версии TMVA 4, многомерной регрессии. В данной библиотеке представлены только алгоритмы машинного обучения с учителем. Они используют тренировочные события с известным результатом, чтобы определить отображение, которое описывает либо критерии классификации, либо регрессионное приближение для функции результата. Среда TMVA разработана в основном для нужд физики высоких энергий, но может применяться и в других областях [7].

Для обучения алгоритма в данной работе используется метод BDT (boosted decision trees), основанный на нахождении множества деревьев решений с присвоенными им весами. Дерево решений – это классификатор, построенный в виде двоичного дерева. Пример такого дерева изображён на рис. 3.

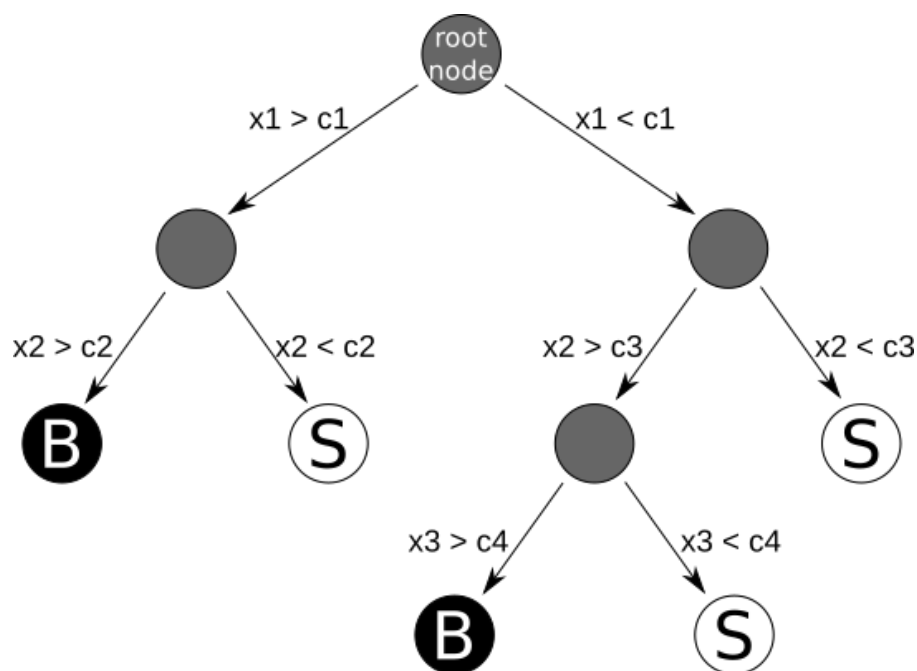


Рис. 3. Пример дерева решений. Решения принимаются на основе переменных  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , критериями являются величины  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ .

Работа алгоритма, использующего дерево решений, заключается в том,

чтобы пройти это дерево, начиная с корневого узла и заканчивая на одном из листьев дерева. В каждом узле находится критерий выбора дочернего узла по значению одной из переменных. В результате алгоритм относит событие к категории сигнальных или фоновых.

Тренировка дерева производится поэтапно, начиная с корневого узла. Выбирается критерий, наиболее эффективно делящий события на фоновые и сигнальные, то есть дающий наибольшую долю правильно классифицированных событий в обеих категориях. Такая же процедура выбора критерия выполняется на каждом из двух образовавшихся подмножеств событий и так далее до определённой глубины дерева. Таким образом, фазовое пространство оказывается поделено на сегменты, помеченные как сигнал или фон в зависимости от того, событий какого типа больше всего попало в данный сегмент при тренировке алгоритма.

Достоинства дерева решений – простота описания и интерпретации, а также возможность разбивать фазовое пространство на большое число гиперкубов, обозначаемых как фон или сигнал – в отличие от анализа на основе совокупности пороговых значений, которая выделяет лишь один гиперкуб. Недостатком дерева решений является его чувствительность к статистическим флуктуациям в тренировочном наборе событий. Например, две переменные, одинаково влияющие на классификацию событий, под действием флуктуаций могут идти в разном порядке следования сравнений, что изменит и всю дальнейшую структуру дерева, в итоге воздействуя на результат классификации.

Для уменьшения неопределённости, связанной с флуктуациями, метод BDT использует взвешенные деревья. Для того чтобы построить такой классификатор, сначала создаются несколько деревьев – лес. Обучение всех деревьев из леса происходит по одному и тому же набору тренировочных событий, но событиям в наборе присваиваются веса, и распределение весов для раз-

ных деревьев отличается. Входным переменным назначаются веса по частоте их использования в узлах деревьев и по эффективности разделения. Самим деревьям также присваиваются веса [7].

5. Алгоритм разделения кластеров

6. Результаты

7. Заключение

Список литературы

- [1] Семенов А. В. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$  в области энергии до 2 ГэВ с детектором КМД-3. Выпускная квалификационная работа, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2019.
- [2] Лакомов А. Е. Разделение близких фотонов в калориметре КМД-3. Выпускная квалификационная работа, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2019.
- [3] Шебалин В. Е. Реконструкция фотонов и энергетическая калибровка цилиндрического калориметра детектора КМД-3. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2016.
- [4] Denis Epifanov. Electromagnetic calorimeters of the CMD-3 detector. Journal of Physics: Conference Series, 293:012009, April 2011.
- [5] N. S. Bashtovoy A. A. Grebenuk B. I. Khazin E. V. Kravchenko Yu. N. Pestov L. A. Priymenko P. Yu. Stepanov S. G. Zverev A. V. Anisyonkov, L. M. Barkov. Liquid xenon calorimeter for a cmd-3 detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 598:266–267, January 2009.
- [6] L. M. Barkov N. S. Bashtovoy L. B. Epshteyn A. A. Grebenuk F. V. Ignatov

- S. V. Karpov B. I. Khazin A. N. Kozyrev I. B. Logashenko K. Yu. Mikhailov Yu. N. Pestov A. S. Popov A. A. Ruban V. E. Shebalin V. M. Titov A. A. Talyshev Yu. V. Yudin A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko. Status of the liquid xenon calorimeter of the CMD-3 detector. *Journal of Instrumentation*, 9(08):C08024–C08024, August 2014.
- [7] J. Stelzer J. Thernaag E. von Toerne H. Voss A. Hoecker, P. Speckmayer. TMVA 4. Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT. Users Guide. Regents of CERN et al., 2005-2009.