

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БЫСТРОГО МОНИТОРИНГА СТОЛКНОВЕНИЯ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В. С. Сандул *, *Г. А. Феофилов*, *Ф. Ф. Валиев*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена система быстрого мониторинга столкновений интенсивных пучков в экспериментах на коллайдере NICA на основе сегментированных кольцевых детекторов на микроканальных пластинах. Проведено моделирование системы мониторинга с использованием генератора событий DQGSM. Показано, что в каждом событии столкновения система мониторинга и алгоритмы машинного обучения могут обеспечивать точность нахождения положения точки взаимодействия с величиной среднеквадратичного отклонения $\sigma \leq 12$ мм.

A system for a fast monitoring of intense beam collisions in experiments at the NICA collider, based on segmented ring detectors on microchannel plates, is considered. The system was modeled using the DQGSM event generator. It is shown that in each collision event, the monitoring system and machine learning algorithms can ensure the accuracy of finding the position of the interaction point with the standard deviation $\sigma \leq 12$ mm.

PACS: 07.05.-t; 29.40.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Детальное изучение фазовой диаграммы КХД в области высоких барионных плотностей планируется в столкновениях тяжелых ионов с энергиями до 11 ГэВ/нуклон на строящейся сегодня экспериментальной установке МРД коллайдера NICA в ОИЯИ. В проекте SPD, втором эксперименте на коллайдере NICA, планируется изучение спиновой структуры протона и дейтрона и других спиновых явлений с поляризованными пучками протонов и дейтронов при энергии столкновения до 27 ГэВ и светимости до 10^{32} см⁻²·с⁻¹. Также планируется получение более подробных данных по функциям распределения кварков и антикварков в нуклонах. При отборе на пучках коллайдера NICA событий, отвечающих определенным критериям, важное значение для последующего

* E-mail: vladislav2018@yandex.ru

физического анализа в обоих экспериментах имеют такие характеристики, как положение первичной вершины в некоторой заданной области акцептанса, множественность заряженных частиц, время события, центральность, плоскость реакции. Для пособытийного отбора данных в условиях высокоинтенсивных пучков на коллайдере NICA необходим эффективный триггер — быстродействующий детектор с высоким временным разрешением, обладающий высокой радиационной стойкостью. Также необходима и соответствующая «быстрая» электроника, способная определять в режиме реальных столкновений координату Z первичной вершины внутри акцептанса экспериментальной установки.

В работе [1] предложена система быстрого контроля столкновений пучков (ФВВС), основанная на компактных детекторах на микроканальных пластинах (МКП), расположенных симметрично по обе стороны от основной экспериментальной установки. В настоящей работе рассматривается первая часть задачи отбора событий, связанная с быстрым определением координаты Z первичной вершины внутри заданного акцептанса экспериментальной установки. Предлагается конструкция ФВВС, состоящая из 6 кольцевых детекторов на МКП (3 установлены справа и 3 слева от центра установки). МКП-детекторы с сегментированными секторными анодами размещаются внутри ионопровода симметричными парами на расстояниях 90, 150 и 250 см от центра установки. Такая конфигурация должна охватывать интервалы псевдобыстрот $3,9 \lesssim |\eta| \lesssim 5,5$ для случая положения вершины события в центре. Также в этой работе предлагаются новые методы пособытийного определения координаты вершины события, основанные на алгоритмах машинного обучения, что позволяет уменьшить погрешность измерения координаты.

Детекторы на МКП выбраны в связи с рядом положительных известных особенностей: малой длительностью (менее 2 нс) и быстрым временем нарастания сигнала (менее 1 нс), низким уровнем шума, способностью работать в сильных магнитных полях, высокой радиационной стойкостью и небольшим количеством вещества в области детектора. Первые экспериментальные оценки временного разрешения и высокой эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц детекторами на МКП были получены ранее [2], результаты последующих измерений обобщены в работе [3].

Многоанодный съёмщик сигналов каждого детектора на МКП в нашей конструкции — керамическое кольцо с внутренним (15 мм) и внешним (25 мм) радиусом с нанесенными на поверхность анодами. Кольцевая пластина съёмщика разделена на 4 равных радиальных слоя и 8 равных азимутальных секторов. Каждый сектор пластины подключен к отдельному каналу считывания.

Исследования возможности применения ФВВС для определения координаты Z (точки взаимодействия ионов в одном событии) по разности времен прилета частиц на симметрично расположенные МКП-детекторы проводились на основе данных моделирования методом Монте-Карло

генератором событий DQGSM [4]. Для анализа был смоделирован 1 млн событий столкновений Au+Au при энергии 11 ГэВ на пару нуклонов в системе центра масс.

Для обработки сигналов FBBC была написана на языке C++ специальная библиотека FBBClib [5]. В расчетах на данном этапе предполагалось, что эффективность регистрации заряженных частиц детекторами на МКП равна 90%, а точность временной отметки составляет ~ 50 пс. В силу того, что продольные размеры банчей на коллайдере NICA весьма существенны, расчеты были проведены в предположении, что распределение координаты Z вершины события в области перекрытия банчей подчинится нормальному закону с $\sigma = 250$ мм.

На рис. 1 показаны гистограммы распределений времен прилета T заряженных частиц на МКП-детекторы, размещенные на разных расстояниях от центра установки (90, 150 и 250 см). Из этих расчетов получается, что в одном событии среднее число заряженных частиц, регистрируемых этими кольцевыми детекторами на МКП, примерно составляет в данном случае 5, 3 и 1 соответственно.

На рис. 2 приведены гистограммы распределений времен прилета T заряженных частиц на МКП. Представлены результаты для отдельных типов частиц — пионов, протонов и легких ядер ($A < 5$). Из этого рисунка видно, что в данной области псевдобыстрот ($3,9 \lesssim |\eta| \lesssim 5,5$) для случая положения вершины события в центре наиболее распространенными типами частиц, регистрируемых МКП-детекторами, являются протоны и легкие ядра, такие как дейтроны и изотопы гелия.

Для решения задачи восстановления координаты Z вершины события мы использовали методы машинного обучения, в частности нейронные сети (NN) и алгоритм градиентного бустинга на решающих деревьях

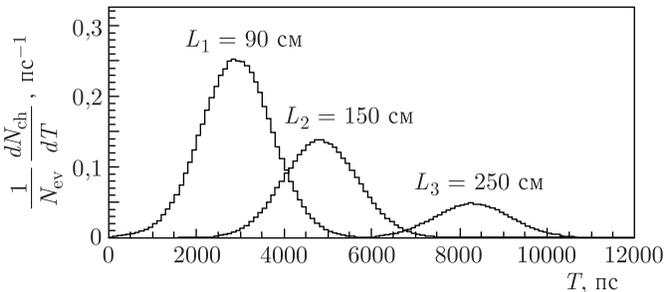


Рис. 1. Нормированные на число событий N_{ev} гистограммы распределений времен T прилета заряженных частиц на МКП-детекторы, установленные на расстояниях от центра установки $L_1 = 90$ см, $L_2 = 150$ см и $L_3 = 250$ см. Среднее число заряженных частиц, регистрируемых МКП-детекторами в одном столкновении Au+Au при энергии 11 ГэВ на пару нуклонов в системе центра масс, составляет 5, 3 и 1 частицу соответственно

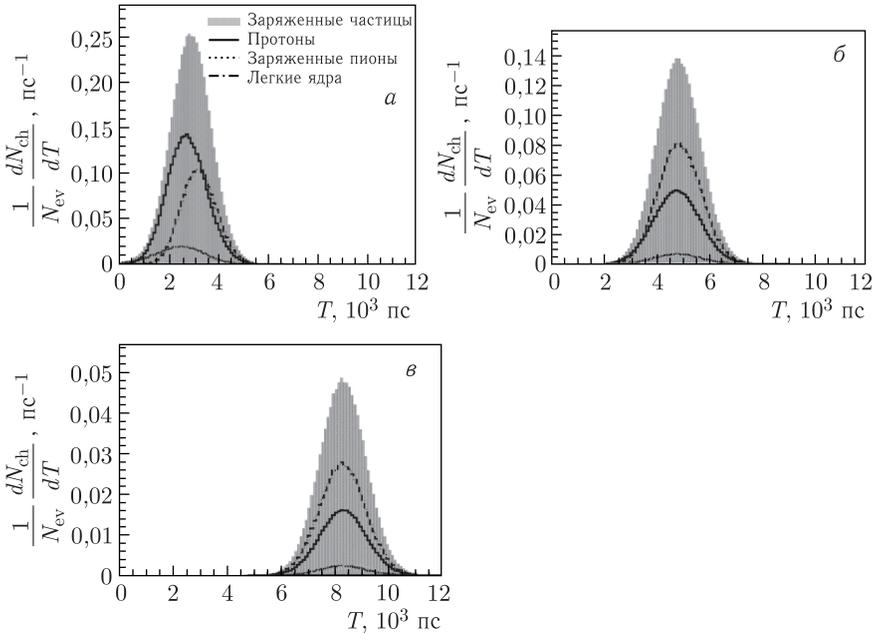


Рис. 2. Нормированные на число событий N_{ev} гистограммы распределений времен прилета T на МКП-детекторы заряженных частиц, а также отдельных типов частиц — пионов, протонов и легких ядер ($A < 5$). МКП-детекторы установлены на разных расстояниях от центра установки: а) 90 см; б) 150 см; в) 250 см

XGBoost [6]. Это широко используемые и хорошо зарекомендовавшие себя методы машинного обучения.

Целевой переменной моделей, использующих вышеуказанные алгоритмы машинного обучения, является сама координата Z . В качестве признаков объектов обучения (samples) мы использовали следующие характеристики событий:

- средние времена прилета частиц на отдельные детекторы на МКП;
- времена прилета первой частицы на отдельные детекторы;
- множественности заряженных частиц, регистрируемых отдельным детектором;
- отношения множественностей заряженных частиц, регистрируемых каждым отдельным детектором, к суммарной множественности заряженных частиц, зарегистрированных ФВВС в событии (сумма по всем МКП-детекторам).

Для процедуры обучения были выбраны следующие настройки алгоритмов. Нейронная сеть составлена из 6 слоев нейронов:

- входного слоя;
- слоя нормализации (для приведения признаков к единому масштабу);

— трех внутренних слоев с количеством нейронов, равным количеству признаков, два из которых имеют функцию активации ReLU и один — сигмоидную функцию активации;

— одним суммирующим внутренним слоем с линейной функцией активации и одним нейроном;

— выходным слоем, содержащим целевую переменную — искомую координату Z .

В случае использования алгоритма XGBoost максимальная глубина решающих деревьев была выбрана равной 6, а также использовалась L_2 -регуляризация с параметром регуляризации $\lambda = 1$.

Так как средняя множественность заряженных частиц в области псевдобыстрот, покрываемой детекторами FBBC, невысока, о чем говорилось выше, то в отдельно взятом событии далеко не все детекторы на МКП нашей установки могут зарегистрировать хотя бы одну частицу. Поэтому необходимо рассмотреть все возможные конфигурации системы из 6 кольцевых МКП-детекторов. Полное количество возможных конфигураций составляет 63.

На первой стадии расчетов были получены результаты работы алгоритмов для 8 наиболее часто встречающихся конфигураций срабатывания детекторов для идеального случая временного разрешения $\sigma = 0$ пс (табл. 1). Приведены результаты расчетов частоты появления конфигураций и среднеквадратичных отклонений для определения координаты Z столкновения с использованием двух типов алгоритмов машинного обучения.

Таблица 1. Результаты определения частоты появления конфигураций сработавших детекторов и среднеквадратичных отклонений координаты Z вершины события σ_{NN} с использованием нейронной сети (NN) и $\sigma_{XGBoost}$ с использованием алгоритма XGBoost. Расчет для идеального временного разрешения детектора на МКП ($\sigma = 0$ пс)

Конфигурация МКП	Частота появления конфигурации, %	σ_{NN} , ММ	$\sigma_{XGBoost}$, ММ
●●● ●●●	31,6	2	2
●●● ●●○	10,4	4	3
○●● ●●●	10,4	3	3
○●● ●●○	6,6	4	4
○○● ●●○	2,5	6	5
○●● ●○○	2,5	7	6
●●● ●○○	2,2	5	5
○○● ●●●	2,2	5	5
Всего/ в среднем	68,4	3	3

Примечание. Обозначение конфигураций: ● — детектор сработал, ○ — детектор не зарегистрировал ни одной частицы.

Таблица 2. Результаты определения частоты появления конфигураций сработавших детекторов и среднеквадратичных отклонений координаты Z вершины события σ_{NN} с использованием нейронной сети (NN) и $\sigma_{XGBoost}$ с использованием алгоритма XGBoost. Расчет для временного разрешения детектора на МКП ($\sigma = 50$ пс)

Конфигурация МКП	Частота появления конфигурации, %	σ_{NN} , мм	$\sigma_{XGBoost}$, мм
●●● ●●●	31,6	3	3,5
●●● ●●○	10,4	4,5	5
○●● ●●●	10,4	4,5	4,5
○●● ●●○	6,6	5,5	6
○○● ●●○	2,5	8	8
○●● ●○○	2,5	8	8
●●● ●○○	2,2	6	7
○○● ●●●	2,2	6	6,5
Всего/ в среднем	68,4	4,5	4,5

Примечание. Обозначение конфигураций: ● — детектор сработал, ○ — детектор не зарегистрировал ни одной частицы.

Данные расчеты были выполнены в предположении о том, что известно истинное время столкновения, относительно которого и рассчитывались времена прилета на МКП-детекторы родившихся частиц, и нулевое временное разрешение ($\sigma = 0$ пс) детекторов на МКП.

В табл. 2 представлены более реалистичные результаты работы алгоритмов для 8 наиболее часто встречающихся конфигураций сработавших детекторов для случая конечного временного разрешения ($\sigma = 50$ пс) детекторов на МКП.

Аналогичные расчеты для случая временного разрешения детекторов на МКП $\sigma = 100$ пс в среднем дают среднеквадратичное отклонение координаты Z вершины события на уровне 7 мм.

Результаты проведенного нами анализа показывают, что использованные алгоритмы эффективно справляются с задачей определения координаты Z по временам прилета частиц и по их множественности. Максимальная величина стандартного отклонения пособытийного восстановления вершины по приведенным основным конфигурациям для случая разрешения детекторов $\sigma = 100$ пс не превышает 12 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена система быстрого контроля столкновений пучков (FBVC) в виде 6 колец МКП с сегментированными анодами, установленными внутри ионопровода симметричными парами на расстояниях 90, 150 и 250 см от центра экспериментальной установки.

Написана специальная библиотека FBBClib для моделирования данных, получаемых с детекторов FBBC. Установлена при использовании моделирования методом Монте-Карло и методов машинного обучения (нейронные сети, XGBoost) возможность восстановления в каждом событии положения точки взаимодействия сталкивающихся ядер по оси Z с величиной среднеквадратичного отклонения $\sigma \leq 12$ мм.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-40097/19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baldin A. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 958, No. 1. 162154.
2. *Baldin A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 323. P. 439.
3. *Feofilov G. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 1. P. 150.
4. *Gudima K. K., Mashnik S. G., Sierk A. J.* Report LA-UR-01-6804. Los Alamos, 2001.
5. <https://github.com/vsandul/FBBClib>
6. *Chen T., Guestrin C.* // KDD'16: Proc. of the 22nd ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, Aug. 2016. P. 785–794.