

74-я международная конференция по ядерной физике  
«ЯДРО-2024: Фундаментальные вопросы и приложения»

## Влияние неправильной юстировки на реконструкцию треков в время-проекционной камере детектора MPD

В.А. Кузьмин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 30.09.2024; после доработки 20.11.2024; подписана в печать 26.11.2024)

При использовании ранее разработанного метода юстировки время-проекционной камеры (ТРС) в детекторе MPD изучается влияние ошибок юстировки на восстановленные параметры трека заряженной частицы, такие как поперечный импульс и быстрота. Для ТРС введено понятие меры неправильной юстировки. Моделируя реакцию ТРС на заряженные частицы, рассматриваются искажения, которые вносятся в восстановленные параметры трека в зависимости от величины неправильной юстировки. Влиянием ошибок юстировки на реконструированные параметры трека в MPD ТРС можно пренебречь. Существует систематическое изменение измеряемого поперечного импульса в зависимости от ширины проекции трека на плоскость измерительных элементов. Эта ширина определяется состоянием газа и электрическим полем в камере детектора. Инструменты юстировки, разработанные для время-проекционной камеры MPD, позволяют оценить эту ширину из экспериментальных данных и внести коррективы в восстановленные параметры трека.

PACS: 29.20.-c, 29.40.Gx, 29.90.+r, 02.70.Uu УДК:

Ключевые слова: юстировка, трековый детектор, трек частицы, хиты трека, время-проекционная камера (ТРС), детектор MPD (MPD).

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530204](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530204)

### ВВЕДЕНИЕ

Многие научные результаты современной физики высоких энергий получены путем сравнения смоделированных теоретических предсказаний с экспериментальными данными. Точная реконструкция трека частицы необходима для решения широкого спектра физических задач, включая реконструкцию первичных вершин, идентификацию лептонов и кварков и точное измерение инвариантных масс. Трековые детекторы предоставляют основную информацию о заряженных частицах, наблюдаемых в эксперименте [1–4], и позволяют определить все кинетические параметры рождающихся при взаимодействии частиц. Точность найденных величин зависит от разрешающей способности датчиков устройства и от точного знания их относительного положения в пространстве или от юстировки. Хорошее знание юстировки позволяет избежать неточностей при сравнении экспериментальных и теоретических распределений различных физических величин. Несущие конструкции детекторов часто подвергаются деформациям, зависящим от времени, которые приводят к нарушению ранее известной геометрии. Это требует постоянного контроля за положением частей детектора. Высокоточное знание местоположения датчиков в глобальной

системе координат детектора является основой для его высокого разрешения и получения объективных физических результатов. Частично такое знание может быть получено с помощью оптической съемки, например с помощью лазерных систем, которые используются для определения фактического положения датчиков. Однако оказывается, что наиболее точная юстировка, так называемая «юстировка по трекам» [5–8], может быть получена на основе экспериментальных данных путем реконструкции треков в миллионах событий и минимизации величины их среднего отклонения по всем измеренным точкам трека от его модели [9], которая выглядит следующим образом:

$$\left( \frac{\mathbf{h}_i - \mathbf{T}_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{h}_i$  — измеренная точка трека,  $\mathbf{T}_i$  — ближайшая к ней точка кривой математической модели трека, а  $\sigma_i$  — ошибка измерения.

Обычно в крупном эксперименте целая команда работает над проблемой юстировки и пытается свести к минимуму значение (1) для экспериментальных данных для определения положения частей детектора. Затем все экспериментальные данные снова восстанавливаются с использованием новой юстировки, после чего сравниваются физические распределения до и после. На основании формы этих распределений делается вывод, удалось ли улучшить юстировку частей детектора. Современные

\* E-mail: [kuzmin@sinp.msu.ru](mailto:kuzmin@sinp.msu.ru)

трековые детекторы состоят из множества элементов, и реальное положение каждого из них в пространстве является случайным. Таким образом, набор случайных параметров определяет конкретную юстировку, влияющую на точность восстановления параметров трека заряженной частицы.

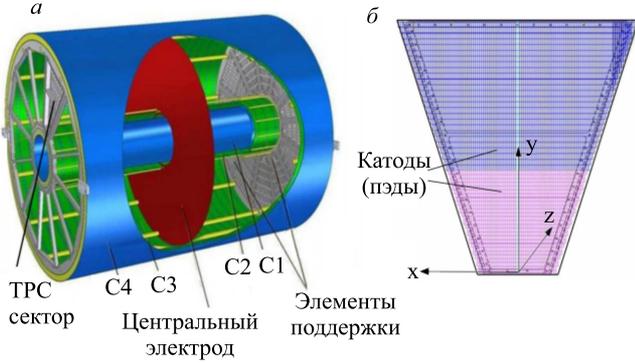


Рис. 1. Время-проекционная камера детектора MPD. *a* — общий вид, *b* — сектор ТРС. С1, С2, С3 и С4 обозначают цилиндры защиты от электрического поля камеры

В настоящей статье на примере время-проекционной камеры (ТРС) детектора MPD [10] на коллайдере NICA (г. Дубна) мы вводим меру нарушения юстировки ТРС и исследуем влияние её величины на точность восстановления параметров трека.

## 1. ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННАЯ КАМЕРА MPD ДЕТЕКТОРА

Время-проекционные камеры детектора MPD являются детекторами заряженных частиц, образующихся в результате межъядерных столкновений внутри коллайдера NICA, работающего в диапазоне энергий нуклон–нуклон в системе центра масс

$$\|A_i\| = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_s) & \sin(\gamma_s) \\ 0 & -\sin(\gamma_s) & \cos(\gamma_s) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\beta_s) & 0 & -\sin(\beta_s) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta_s) & 0 & \cos(\beta_s) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_s) & \sin(\alpha_s) & 0 \\ -\sin(\alpha_s) & \cos(\alpha_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

определяет его ориентацию в ЛСК.

Теоретически чувствительные элементы сектора лежат в плоскости торца цилиндра камеры. Положение и ориентация теоретической ЛСК сектора определяется поворотом в ГСК детектора вокруг оси цилиндра ( $z$ -ось ГСК), а затем ее последовательным перемещением вдоль осей  $z$  и  $y$ . Преобразование от  $X_s^{tl}$  к  $X_s^g$  в ГСК:

$$X_s^g = S_s^{tl} + \|T_s^{-1}\| X_s^{tl}. \quad (4)$$

Вектор  $S_s^{tl}$  и матрица  $\|T_s^{-1}\|$  в (4) определены однозначно проектом детектора в отличие от аналогичных величин  $S_s^A$  и  $\|A_s^{-1}\|$  в уравнении (2), которые нужно найти, решая задачу юстировки ТРС. Решение этой задачи — нахождение 24 векторов:

$$p^s(S_{sx}^A, S_{sy}^A, S_{sz}^A, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s). \quad (5)$$

$4 < \sqrt{S_{NN}} < 11$  ГэВ. ТРС представляет собой цилиндр, разделенный центральным электродом на две части (см. рис. 1, *a*). Внутренний и внешний диаметры камеры составляют 54 и 280 см. Длина камеры составляет 340 см. Камера заполнена газовой смесью, состоящей на 90% из аргона и на 10% из метана, при давлении на 2 мбар выше атмосферного. На торцевой крышке каждой половины камеры имеются 12 секторов с чувствительными элементами и электроникой для индикации следов заряженных частиц. Система считывания показаний ТРС основана на многопроводных пропорциональных камерах (MWPC) с катодной площадкой для считывания сигналов, которая называется пэдом (pad). Сектор содержит более четырех тысяч чувствительных элементов, которые регистрируют дрейф электронов, образуемых следом заряженной частицы (рис. 1, *b*). Ширина пэда составляет 0.5 см. Высота составляет 1.2 см в узкой части сектора и 1.8 см в широкой части. Элементы прочно закреплены на основании сектора, с которым связана локальная система координат (ЛСК) сектора.

ЛСК сектора (рис. 1, *b*) — это правая декартова система координат. Ее начало находится в середине малого основания трапеции сектора. Ось  $y$  лежит в плоскости сектора и перпендикулярна основанию сектора. Ось  $z$  направлена наружу от камеры. Однако реальное положение и ориентация сектора в глобальной системе координат (ГСК) могут отличаться от теоретических. Следовательно, необходимо ввести дополнительное преобразование координат  $X_s^l$  реальной ЛСК сектора к их теоретическим значениям  $X_s^{tl}$ :

$$X_s^{tl} = S_s^A + \|A_s^{-1}\| X_s^l. \quad (2)$$

Рассмотрим механическое основание сектора ТРС и расположенные на нем датчики-пэды как единое целое. Тогда матрица  $\|A\|$

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА РЕАКЦИИ ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДЕТЕКТОРА MPD

Чтобы исследовать влияние юстировки детектора на точность получаемых им экспериментальных данных, необходимо смоделировать процедуру обнаружения и реконструкции треков частиц в детекторе. Моделирование необходимо проводить для различных юстировок детектора. Процесс минимизации функции (1) для определения параметров юстировки (5) является интерактивным процессом, что, в свою очередь, увеличивает количество вычис-

лений. Полное моделирование работы детектора достаточно долгий вычислительный процесс. Вышеперечисленные факторы могут являться причиной практического отсутствия литературы, посвященной исследованиям воздействия неправильной юстировки трековых детекторов на точность восстановления трека. Чтобы решить эту проблему, требуется создать упрощенное моделирование реакции ТРС на заряженные частицы с последующей реконструкцией треков. Условия мини-Монте-Карло следующие:

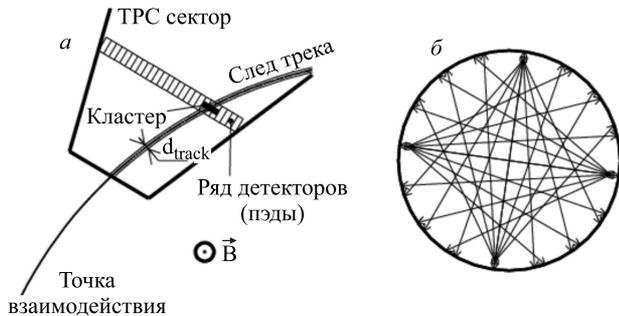


Рис. 2. Моделирование ТРС детектора MPD: *a* — проекция заряженной частицы на плоскость сектора, *b* — лучи лазерной системы ТРС

1. Заряженная частица оставляет в камере след ионизации шириной  $d_{track}$  (см. рис. 2, *a*). Трек проектируется вдоль электрического поля на плоскость пэдов. Результаты [11] показывают, что величина  $d_{track}$  следа должна быть около 1 см.
2. Амплитуда сигнала пэда пропорциональна его площади покрытия полосой, и конечное значение размывается в соответствии с функцией Гаусса. Значение стандартного отклонения составляет 10% от сигнала пэда.
3. Расстояние вдоль электрического поля от частицы до плоскости площадки разыгрывается по распределению Гаусса. Стандартное отклонение выбирается в размере 1% от фактического расстояния, составляя около 2 см для самых удаленных точек трека, что в среднем соответствует точности измерений в плоскости пэдов.
4. Соседние пэды одного ряда с сигналом выше порогового значения образуют кластер. Локальные координаты кластера определяются как взвешенная сумма координат отдельных пэдов. Используя эти координаты, в ГСК детектора вычисляются координаты измеренной точки трека или «хита» (hit).
5. Параметры трека определяются фитированием его хитов в ГСК.
6. По найденным параметрам трека вычисляется функция (1)

Моделировались следующие типы треков:

1. Космические мюоны в отсутствие в детекторе магнитного поля.
2. Одиночные мюоны, рожденные в точке взаимодействия при наличии магнитного поля детектора. Положение вершины вдоль оси  $z$  распределено по функции Гаусса с  $\sigma = 50$  см. Направление импульса мюона изотропно в пространстве, и его абсолютное значение выбирается из условия равномерного распределения поперечного импульса трека в интервале [30 МэВ, 1500 МэВ].
3. Треки, инициируемые лазерной системой ТРС. Эта система спроектирована исключительно для мониторинга свойств газа ТРС. В каждой половине ТРС имеются четыре плоскости, перпендикулярные продольной оси детектора, в которые вводится лазерное излучение, способное ионизировать газ ТРС. В каждой плоскости четыре источника излучают по семь лучей. Траектории лучей охватывают площади всех секторов. Схема расположения лазерных лучей в этих плоскостях показана на рис. 2, *b*.

### 3. НЕПРАВИЛЬНАЯ ЮСТИРОВКА И ЕЕ ЕДИНИЦЫ

Проблема точности юстировки для ТРС MPD-детектора была решена в [9]. В случае космических мюонов и лазерных лучей достигнутая точность составляет около 1 мм для смещения положения сектора и 7 угловых минут для углов Эйлера. Если использовать мюоны, рожденные в результате столкновений между ядрами, точность становится в несколько раз хуже. Однако проблемы с возможными искажениями при окончательной реконструкции трека и механическим состоянием несущих конструкций детектора остались не решенными. Например, важно точно определить положение каждого лазерного луча внутри MPD ТРС для контроля свойств газа.

Детектор состоит из различных компонент, и положение каждого элемента в пространстве является случайным. Таким образом, набор случайно выбранных параметров определяет конкретную юстировку детектора. Попробуем определить, насколько фактическая юстировка ТРС отличается от теоретической, а затем, основываясь на этой величине, исследуем ошибки восстановленных параметров трека. Рассмотрим следующий набор юстировок, каждая из которых отличается от теоретической таким образом, что смещение начала ЛСК сектора для каждой оси равномерно распределено по сегменту  $[-A, A]$  см, а каждый угол Эйлера в (3) также равномерно распределен в интервале  $[-A, A]$  градусов. Таким образом,  $A$  представляет собой величину максимального смещения сектора и отклонения его углов Эйлера от теоретических значений.

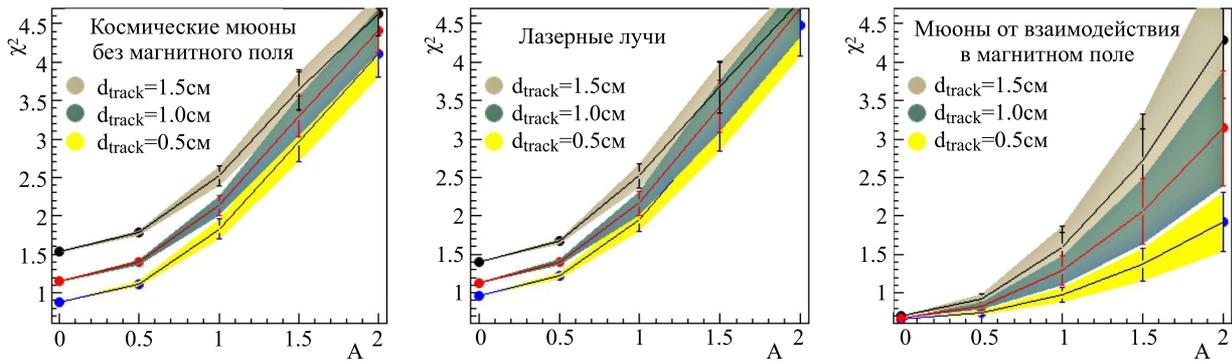
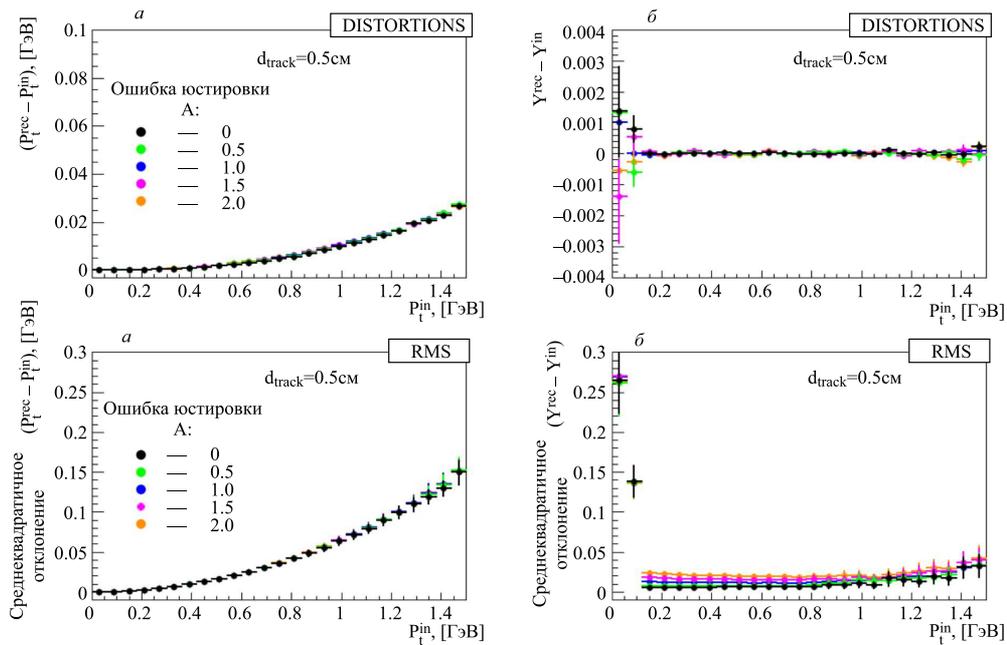


Рис. 3. Зависимость функции (1) от величины неправильной юстировки


 Рис. 4. Влияние юстировки на искажения, вносимые в поперечный импульс  $P_t$  и быстроту  $y$  в варианте с  $d_{track} = 0.5$  см

Мы будем использовать  $A$  для измерения неправильной юстировки ТРС, если при реконструкции треков используется теоретическая юстировка.

Зависимости функции (1) от величины неправильной юстировки  $A$  приведены на рис. 3. Результаты показаны для различных типов треков и разных значений  $d_{track}$ . Значение функции в точке  $A$  является средней величиной по множеству юстировок, а ошибки в этих точках ее среднеквадратичное отклонение. Для каждого значения  $A$  было смоделировано 100 случайных юстировок. Градиент функции (1) для мюонов в магнитном поле вблизи нуля меньше, чем для космических мюонов или лучей лазерной системы ТРС. Это объясняет меньшую точность юстировки в присутствии магнитного поля.

На графиках для космических и лазерных лучей в диапазоне точности юстировки ТРС детектора MPD ( $A \sim 0, 1$ ), четко разделены функции (1) с различными значениями  $d_{track}$ . Это важно, поскольку

позволяет определить величину  $d_{track}$  по экспериментальным данным.

#### 4. ЮСТИРОВКА И РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ

Наш искусственный эксперимент определяется величинами  $d_{track}$  и  $A$ . Для каждого значения  $A$  генерировалось 100 случайных юстировок. Для каждой случайной юстировки случайным образом сгенерировано 24 000 треков с использованием метода, описанного в разд. 3. Параметры каждого трека были восстановлены по его хитам и сравнены с их первоначальными значениями. Результаты для поперечного импульса  $P_t$  и быстроты  $y$  показаны на рис. 4 и 5 в зависимости от исходного значения  $P_t^{in}$ .

Графики, отмеченные буквой «а», представляют результаты для поперечного импульса  $P_t$ , а те, что отмечены буквой «б», для быстроты  $y$ . Точки для разных значений ошибок юстировки  $A$  обозначены

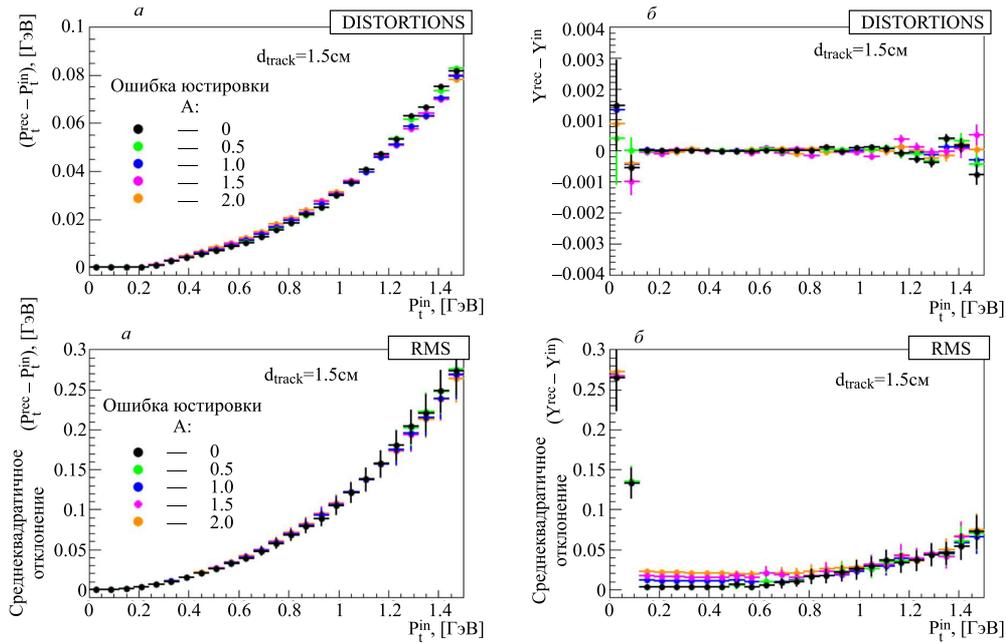


Рис. 5. Влияние юстировки на искажения, вносимые в поперечный импульс  $P_t$  и быстроту  $y$  в варианте с  $d_{track} = 1.5$  см

ны разными цветами. На обоих рисунках верхние графики показывают зависимости искажений, вносимых в конечные значения параметров трека из-за неправильной юстировки и ошибок процедуры реконструкции. Так как цветные точки, обозначающие различные величины ошибок юстировки на верхних графиках обоих рисунков, совпадают, можно сделать вывод, что ошибки юстировки не приводят к заметным систематическим ошибкам в восстановленных параметрах трека. Нижние графики на обоих рисунках иллюстрируют искажения среднеквадратичных отклонений (RMS) этих значений. Средние значения искажений определяют систематические сдвиги исходных параметров, а искажения в среднеквадратичных значениях влияют на ширину конечных распределений, что обычно и наблюдаются в экспериментах после улучшения юстировки детекторов. В нашем случае наблюдается такой эффект для бустроты  $y$ .

Результаты моделирования демонстрируют существенную зависимость искажений восстановленных значений  $P_t$  как от исходного значения  $P_t$ , так и от значения ширины проекции трека  $d_{track}$  на плоскость сектора. Величина  $d_{track}$  определяется свойствами газа внутри камеры и электрическим полем ТРС. Результаты, приведенные в предыдущем разделе, позволяют использовать разработанные мето-

ды нахождения юстировки ТРС для экспериментального определения значения  $d_{track}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Для время-проекционной камеры введена мера неправильной юстировки.
- Влияние ошибок юстировки на параметры реконструированного трека во время-проекционной камере детектора МРД незначительно.
- Моделирование реконструкции трека демонстрирует систематическую зависимость восстановленного поперечного импульса частицы от его фактического значения. Этот систематический сдвиг зависит от ширины проекции трека, которая определяется свойствами газа и электрическим полем внутри камеры детектора. Инструменты юстировки, разработанные для время-проекционной камеры детектора МРД, позволяя, используя экспериментальные данные, оценить величину этой ширины и внести коррективы в восстановленные параметры трека.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

[1] Ackermann K.H., Adams N., Adler C. et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. **499**(2). 624 (2003).  
 [2] The CMS Collaboration, Chatrchyan S., Hmay-

kyan G., Khachatryan V. et al. // *Journal of Instrumentation*. **3**(8). S08004 (2008).  
 [3] The ATLAS Collaboration. Aad G., Abat E., Abdallah J. et al. // *Journal of Instrumentation*. **3**(8).

- S08003 (2008).
- [4] *The ALICE Collaboration. Aamodt K., Abrahantes Quintana A., Achenbach R. et al. // Journal of Instrumentation. 3(8). S08002 (2011).*
- [5] *Billoir P., Compagne J.E. // DELPHI-note 87-87 PROG 95, 1987.*
- [6] *Blobel, Volker, Kleinwort, Claus // DESY-note-02-87, 2002.*
- [7] *Butti P. // Nuclear and Particle Physics Proceedings. 273-275. 2533 (2016).*
- [8] *The CMS Collaboration // Journal of Instrumentation. 9. P06009 (2014).*
- [9] *Kuzmin V. // Physics. 5. 508 (2023).*
- [10] *Abraamyan Kh.U., Afanasiev S.V., Alfeev V.S. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 628(1). 99 (2011).*
- [11] *Kolesnikov V., Mudrokh A., Vasendina V., Zinchenko A. // Phys. Part. Nucl. Lett. 16(1). 6 (2019).*

## Misalignment influence on MPD TPC track reconstruction

V. A. Kuzmin

*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: kuzmin@sinp.msu.ru*

Using the previously developed method for finding the alignment of the Time Projection Camera (TPC) in the MPD detector, we study the effect of misalignment on the reconstructed parameters of a charged particle track, such as transverse momentum and velocity. The concept of a misalignment unit is introduced for TPC. By simulating the reaction of the TPC to charged particles, we study the distortions that are introduced into the reconstructed track parameters depending on the magnitude of the misalignment. The effect of misalignment on the reconstructed track parameters in the MPD TPC is negligible. There is a systematic shift in the measured transverse momentum, depending on the track projection width. This width is determined by the gas and electrical field conditions within the detector chamber. Alignment tools developed for the MPD Time Projection Chamber allow us to estimate this width using experimental data and apply corrections to the reconstructed track parameters.

PACS: 29.20.-c, 29.40.Gx, 29.90.+r, 02.70.Uu.

*Keywords:* alignment, tracking detector, particle track, track hits, time projection chamber (TPC), multipurpose detector (MPD).

*Received 30 September 2024.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2025. 80, No. . Pp. .*

### Сведения об авторе

Кузьмин Валентин Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник;  
e-mail: kuzmin@sinp.msu.ru.