



JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH  
Veksler and Baldin laboratory of High Energy Physics

## FINAL REPORT ON THE INTEREST PROGRAMME

*Implementation of the first method of  
particle identification algorithm for BM@N  
experiment*

**Supervisor:**

Dr. Sergei Pavlovich Merts

**Student:**

Konstantin Mashitsin, Russia  
St Petersburg University

**Participation period:**

November 02 – December 11,  
Wave 2

Dubna, 2020

**Аннотация.** The BM@N (Baryonic Matter at the Nuclotron) is an experiment at the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) accelerator complex. The first physics runs were carried out with the collection of experimental data in 2018. The problem of particle identification is necessary for the physical analysis of the matter formed after the collision of the beam with the target. This paper describes identification algorithms based on the  $n_\sigma$  method and a variation of the distance method. The algorithms were tested on simulated data, the results are analyzed for efficiency and degree of contamination

## 1. Введение

Современная физика, за счет столкновения ядер на ускорителях, пусть в довольно небольших объемах и на короткие промежутки времени, формирует условия экстремальной температуры и плотности, стремясь получить особое состояние вещества – кварк-глюонную плазму.

### 1.1. Мегaproект NICA

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility, рис. 1), который создаётся на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия), позволит изучать свойства барионной материи в экстремальных условиях [1].



**Рис. 1.** Схема строящегося ускорительно-накопительного комплекса NICA

Основная научная задача состоит в том, чтобы из миллиардов взаимодействий, наблюдаемых детектором, найти те события и частицы, которые будут свидетельствовать, о том, что в данной системе возникло смешанное состояние ядерной материи.

Чтобы получить новую информацию о фундаментальных свойствах вещества, необходимо восстановить реальную картину того, что происходило при взаимодействии пучка с мишенью. Таким образом, большую актуальность имеет задача идентификации частиц, которая используется для физического анализа материи, образовавшейся после взаимодействия.

## 1.2. Эксперимент *BM@N*

*BM@N* (Baryonic Matter at the Nuclotron, рис. 2) – первый эксперимент на ускорительном комплексе NICA, в рамках которого проводились физические запуски установки со сбором экспериментальных данных. Его характеристики позволяют исследовать столкновения частиц и ионов с неподвижной мишенью при энергиях до 6 ГэВ на нуклон [2].

Для анализа данных эксперимента *BM@N* используется программный комплекс *BmnRoot*, разработанный на основе ROOT (ЦЕРН) [3] и *FairRoot* (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца) [4].

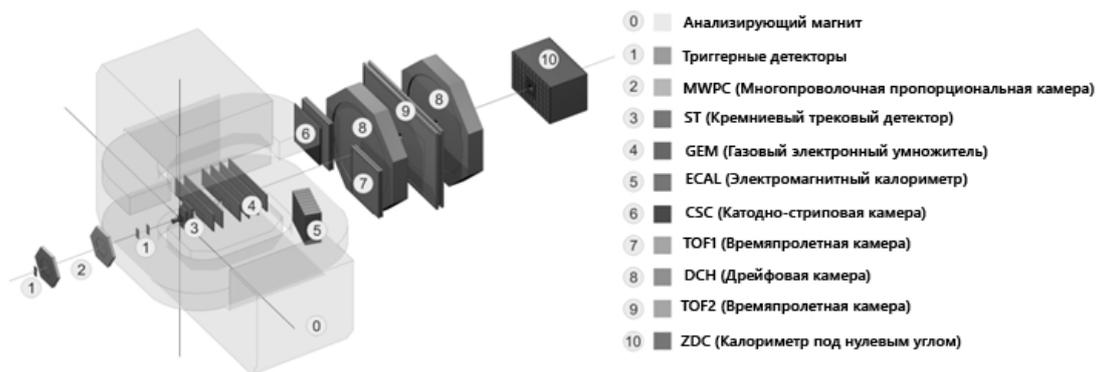


Рис. 2. Вид экспериментальной установки *BM@N* [5]

Центральная трековая система установки состоит из трех кремниевых детекторов и шести плоскостей газовых электронных умножителей, расположенных внутри магнита, а также из двух многопроволочных камер, расположенных перед ним [6]. Данные, полученные с этих детекторов, позволяют реконструировать траектории заряженных частиц. Из кривизны траектории в магнитном поле с индукцией  $B$  определяем магнитную жесткость, равную отношению импульса частицы к ее заряду.

Времяпролетные камеры TOF400 и TOF700, находящиеся на расстоянии 400 см и 700 см от мишени, определяют время, за которое частица достигла детектора. Стоит отметить, что детекторы TOF400 стоят слева и справа от оси движения, чтобы регистрировать треки с меньшим радиусом кривизны, поэтому при анализе эффективности для них, мы не будем рассматривать ядра гелия и трития, поскольку по ним не набралось достаточно статистики.

## 2. Цель проекта

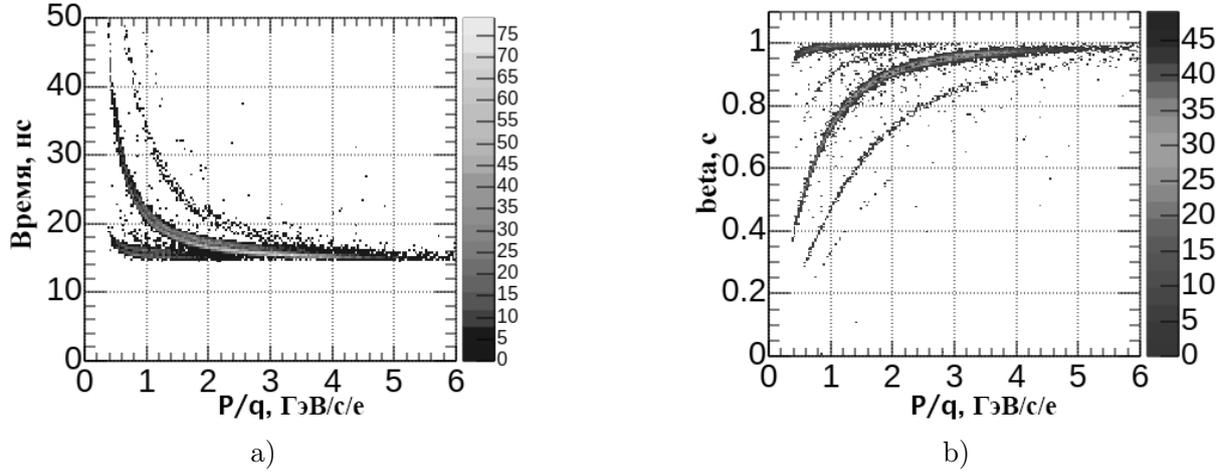
Цель данной работы состояла в реализации методов идентификации заряженных частиц. Данная задача была разбита на несколько частей:

- Анализ методов идентификации, применяемых в других экспериментах.
- Программная реализация алгоритмов.
- Добавление в систему гистограмм, оценивающих качество идентификации.
- Оценка эффективности методов на смоделированных данных.

## 3. Объем работ

В ходе работы все поставленные задачи были выполнены. В качестве отдельных модулей программного пакета *BmnRoot* были реализованы два метода идентификации частиц, которые проводятся на основе разделения по времени ( $n_\sigma$  метод) или с использованием алгоритма поиска ближайшей теоретической кривой для экспериментальной точки,

расположенной на графике зависимости скорости  $\beta = v/c$  от магнитной жесткости  $r = p/q$  (метод расстояний). На рис. 3 представлены графики с входной информацией, которую получают алгоритмы.



**Рис. 3.** Гистограммы зависимости от магнитной жесткости а) времени пролета б) скорости частиц

Помимо самих алгоритмов, были реализованы классы для оценки качества идентификации. В них использовались формулы для эффективности и примесей:

$$\text{Эффективность} = \frac{N_{\text{верных}}}{N_{\text{всего}}}, \quad \text{Примеси} = \frac{N_{\text{ложных}}}{N_{\text{идент}}}, \quad (1)$$

где

- $N_{\text{верных}}$  – количество верно идентифицированных частиц данного типа.
- $N_{\text{всего}}$  – общее число смоделированных частиц определенного типа.
- $N_{\text{ложных}}$  – количество частиц, которые были неверно идентифицированы как данный тип.
- $N_{\text{идент}} = N_{\text{верных}} + N_{\text{ложных}}$  – общее число частиц, идентифицированных как определенный тип.

Алгоритмы тестировались на 15000 смоделированных событий генератора QGSM, методы идентифицировали восемь различных типов частиц:  $p, e^{\pm}, \pi^{\pm}, K^{\pm}, D, T, {}^3\text{He}^{++}, {}^4\text{He}^{++}$ .

#### 4. Метод $n_{\sigma}$

Самым логичным способом идентификации нам показался алгоритм разделения частиц по времени пролета. Метод, основанный на разделении по определенному параметру, который измеряет детектор, используется в эксперименте ALICE [8] и называется  $n_{\sigma}$ .

##### 4.1. Принцип работы

Алгоритм основывается на формуле:

$$n_{\sigma} = \frac{S - S(H_i)}{\sigma}, \quad (2)$$

в которой  $S$  – необработанный сигнал детектора с разрешающей способностью  $\sigma$ , а за  $S(H_i)$  обозначают ожидаемый отклик детектора, полученный из предположения, что его

вызвала частица типа  $i$ . Переменная  $n_\sigma$  определяется как отклонение экспериментально полученного сигнала от теоретически рассчитанного, основанного на гипотезе  $H_i$ . Идея метода заключается в том, что если для предположения  $H_i$  получают  $|n_\sigma| < 2$  или  $|n_\sigma| < 3$ , то частице присваивается тип  $i$ .

Для детектора TOF за  $S$  принимают время пролета частицы  $t_{TOF}$ , его получаем из хитов – координат точек в плоскости детектора, которые создала заряженная частица. Каждому треку специальными процедурами сопоставляется ближайший хит, что позволяет рассчитать длину трека. Она используется для расчета теоретического времени достижения частицей детектора:

$$t_i = \frac{L}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{m_i}{p}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $m_i$  – масса частицы типа  $i$  в , а  $p$  – ее импульс. Таким образом, для времяпролетной камеры получаем выражение:

$$n_\sigma = \frac{t_{TOF} - t_i}{\sigma}. \quad (4)$$

Реализация алгоритма заключается в следующем:

В метод передается вектор из частиц, которые нужно идентифицировать, для каждой частицы получаем теоретическое время и сравниваем его с экспериментальным. Затем треку назначается тип частицы, для которой условие на  $n_\sigma$  выполнено и минимально. Данный метод прост в реализации и выполняется достаточно быстро, однако возникают вопросы о том, какими выбрать параметры  $n$  и  $\sigma$ . Недостатком алгоритма также является то, что условие на  $n_\sigma$  может быть выполнено для нескольких типов частиц или не выполниться вовсе.

#### 4.2. Результаты

Мы протестировали алгоритм для  $n_\sigma < 2$  и  $n_\sigma < 3$ , чтобы посмотреть как меняется его эффективность и количество примесей с увеличением допустимого условия. В таблицах 1 и 2 представлены средние значения эффективности и количества примесей, а также процент частиц, которые не удалось идентифицировать, используя этот метод. По полученным данным сделан вывод, что разумнее использовать условие на  $|n_\sigma| < 3$ , поскольку при максимальном росте примесей на 4%, общая эффективность может улучшаться до 10%, и число частиц, не удовлетворяющих условию, понижается примерно на 10% для каждого типа.

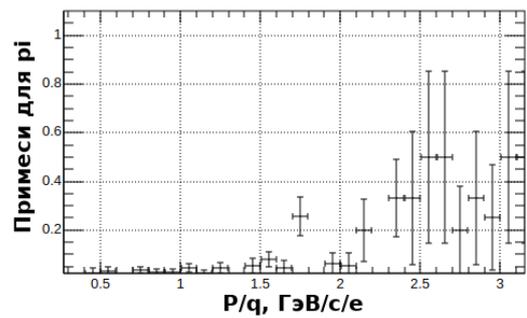
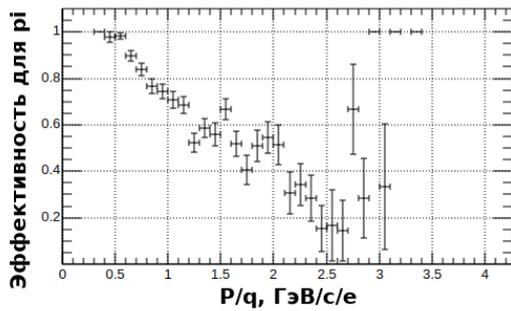
Самые низкие эффективности наблюдаются для  $e^\pm$ ,  $D$  и  ${}^4He^{++}$ , это объясняется практически совпадающим отношением массы к заряду для дейтронов и альфа-частиц и перекрывающимся временем пролета для легких частиц. На рис. 4 представлены гистограммы эффективности для  $e^\pm$  и  $\pi^\pm$ , по графикам видно, как с ростом примесей электронов падает эффективность пи-мезонов.

**Таблица 1.** Общая эффективность идентификации (%), количество примесей (%) и процент неидентифицированных частиц для детектора TOF400

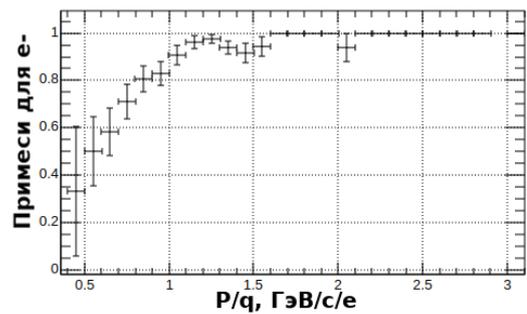
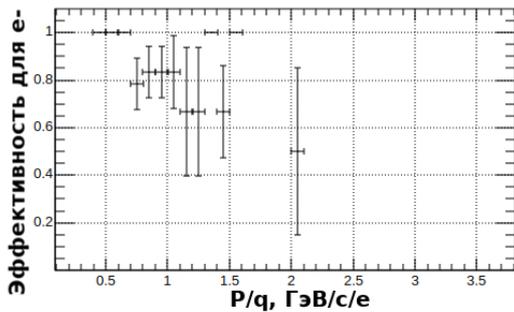
	$ n_\sigma  < 2$				
	$p$	$\pi^\pm$	$D$	$K^\pm$	$e^\pm$
Эффективность	80.7	66.8	32.7	88.4	71.4
Примеси	0.1	3.9	7.9	66.5	90.8
Не определен	16.8	4.9	38.6	9.1	10.5
	$ n_\sigma  < 3$				
Эффективность	89.6	69.1	42.8	94.2	75.2
Примеси	0.1	4.4	8.9	68.9	90.5
Не определен	7.2	2.2	22.7	3.3	5.7

**Таблица 2.** Общая эффективность идентификации (%), количество примесей (%) и процент неидентифицированных частиц для детектора TOF700

	$ n_\sigma  < 2$								
	$p$	$\pi^\pm$	$D$	$K^\pm$	$e^\pm$	${}^3He^{++}$	${}^4He^{++}$	$T$	
Эффективность	74.1	61.7	35.9	71.9	30.9	70.5	35.1	62.8	
Примеси	0.5	9.4	12.2	94.8	95.9	82.3	96.2	26.4	
Не определен	17.8	13.3	16.7	19.5	44.7	11.6	12.2	19.9	
	$ n_\sigma  < 3$								
Эффективность	81.4	66.6	41.5	76.8	32.9	73.7	35.1	72.3	
Примеси	0.5	11.9	12.7	95.6	95.9	84.7	96.4	30.4	
Не определен	8.1	7.08	8.6	10.9	36.2	3.7	5.4	8.7	



а)



б)

**Рис. 4.** Эффективность и примеси для а) пи-мезонов б) электронов

## 5. Метод расстояний

Метод  $n_\sigma$  не обеспечил достаточную эффективность, основной его недостаток в том, что довольно большой процент частиц вовсе не может быть идентифицирован. Поэтому для улучшения эффективности было решено увеличить число параметров разделения и для каждой частицы получать вероятность, с которой она может иметь определенный тип, и идентифицировать частицы в плоскости зависимости скорости от магнитной жесткости  $(p, \beta)$ . Каждому треку в этой плоскости будет соответствовать определенная экспериментальная точка  $(p_{exp}, \beta_{exp})$ .

### 5.1. Принцип работы

Идея метода заключается в нахождении расстояния  $L$  от экспериментальной точки до ближайшей теоретической кривой

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m_i^2}} \quad (5)$$

и присвоении каждой частице вероятности принадлежать треку, которая рассчитывается по формуле  $w = C/L$ , где  $C$  – константа нормировки. При анализе эффективности частице присваивается тип с наибольшим весом, превышающим заданное пороговое значение.

Вопрос состоит лишь в том, как определять это расстояние. Мы переходим, в оси зависимости скорости от импульса, чтобы вычисление было точнее, и определяем расстояние

- Простым методом, когда за  $L$  принимается разница между теоретической скоростью, соответствующей данному импульсу, и экспериментальной, полученной из трека.

$$L_{simple} = \left| \frac{p}{\sqrt{p^2 + m_i^2}} - \beta_{exp} \right| \quad (6)$$

- Евклидовым методом, когда мы сначала находим перпендикуляр от экспериментальной точки до кривой, а потом рассчитываем расстояние как квадрат разности координат.

$$L_{euclidean} = (p_1 - p_{exp})^2 + (\beta_1 - \beta_{exp})^2 \quad (7)$$

В евклидовом случае не получается аналитически определить кратчайшее расстояние от точки до кривой, поэтому рассчитываем его численно. Поскольку  $L^2$  принимает наименьшее значение для импульса  $p_0$ , его производная должна быть равна нулю в этой точке и иметь разный знак производной до и после нее. Поэтому можем воспользоваться методом дихотомии.

$$\left. \frac{dL^2(p)}{dp} \right|_{p=p_0} = 0 \quad (8)$$

За начало интервала принимаем импульс, соответствующий экспериментальному значению скорости

$$p_1 = \frac{m \times \beta_{exp}}{\sqrt{1 - \beta_{exp}^2}}, \quad (9)$$

а для последнего значения в интервале берем экспериментальный импульс  $p_2 = p_{exp}$  (см. рис. 5). Далее делим отрезок пополам, рассчитываем значение функции для среднего импульса и сравниваем его знак с началом интервала, если их знаки совпали, то перемещаем начало в эту точку, иначе помещаем в нее конец интервала.

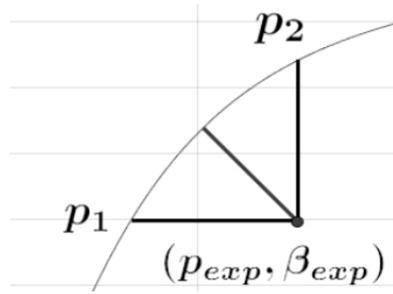


Рис. 5. Выбор начального интервала в процедуре дихотомии

### 5.2. Результаты

Оценка качества алгоритма, представленная в таблицах 3 и 4, показала хорошие результаты эффективности для протонов, количество примесей для них минимально. Также хорошо идентифицируется кривая, соответствующая дейтронам или альфа-частицам, однако из-за сложностей в их разделении, описанных в разделе 4, общая эффективность идентификации  $D$  и  ${}^4He^{++}$  невысокая. На рис. 6 представлен немного искусственный, но наглядный пример, в котором альфа-частицы, пролетающие через детектор, не регистрировались, и метод идентифицировал только дейтроны, в этом случае эффективность их идентификации значительно повышается.

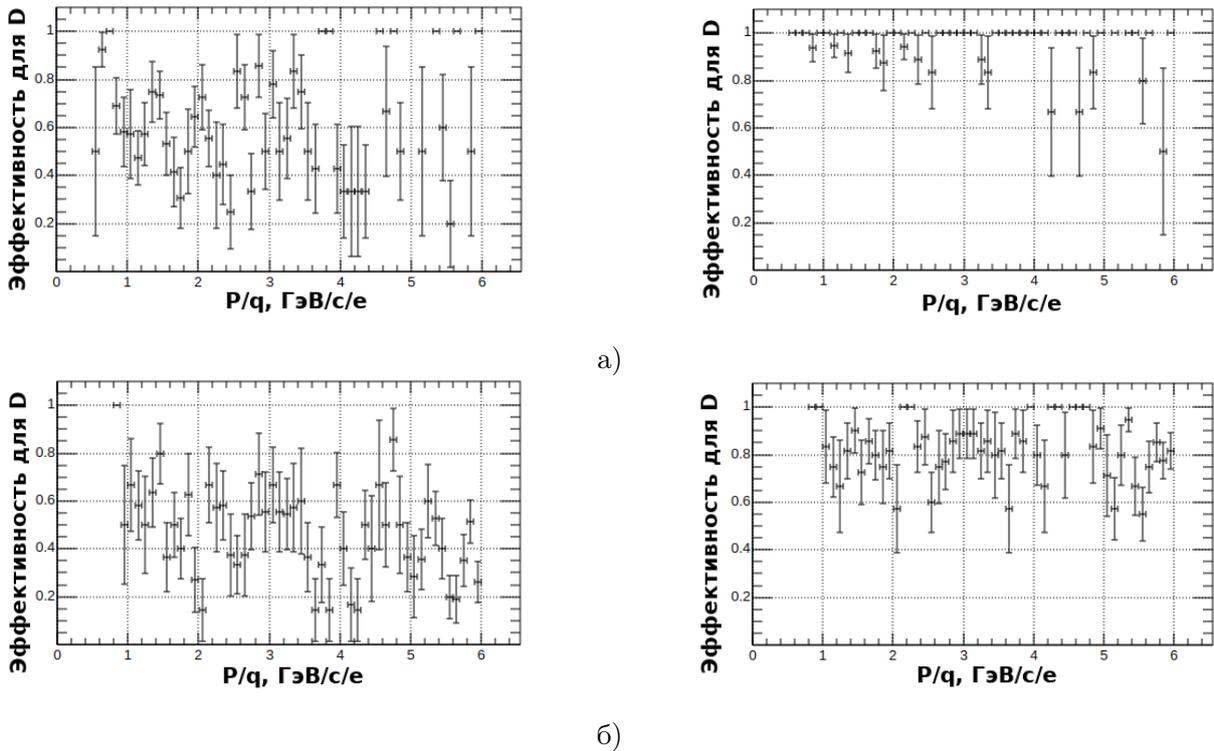


Рис. 6. Эффективность идентификации дейтронов а) с учетом альфа-частиц б) без учета альфа-частиц

**Таблица 3.** Общая эффективность идентификации (%) и количество примесей (%) в методе расстояний для детектора TOF400

	Метод расстояний				
	$p$	$\pi^\pm$	$D$	$K^\pm$	$e^\pm$
Эффективность	95.7	66.1	57.5	95.9	20.9
Примеси	0.2	4.9	10.9	73.5	92.6

**Таблица 4.** Общая эффективность идентификации (%) и количество примесей (%) в методе расстояний для детектора TOF700

	Метод расстояний							
	$p$	$\pi^\pm$	$D$	$K^\pm$	$e^\pm$	${}^3He^{++}$	${}^4He^{++}$	$T$
Эффективность	85.4	55.1	45.3	75.6	1.1	73.7	35.1	79.7
Примеси	0.6	20.6	18.6	96.2	99.2	87.3	96.7	84.5

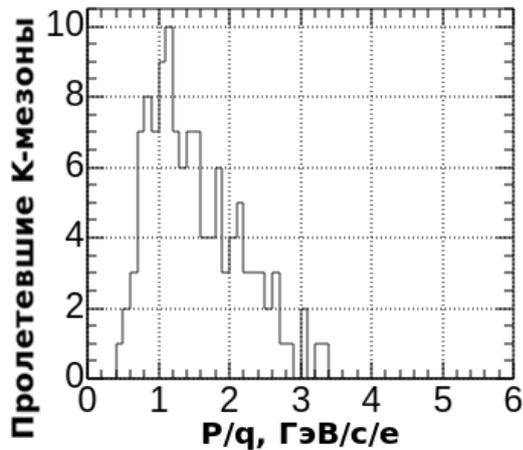
## 6. Обсуждение результатов и планы на будущее

После проверки реализованных алгоритмов на экспериментальных данных, можем сделать вывод, что алгоритм  $n_\sigma$  прост в реализации, имеет быстрое время выполнения и эффективен для идентификации пи-мезонов. Его недостатки исправляет вероятностный метод, который позволяет определить тип частицы для каждого зарегистрированного детектором трека и хорошо идентифицирует протоны и кривую, соответствующую  $D$  или  ${}^4He^{++}$ .

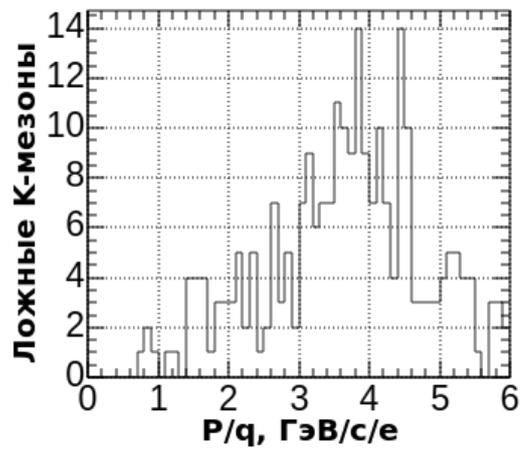
Однако для обоих алгоритмов результаты показывают большой процент примесей для К-мезонов, это объясняется недостатком методов, не учитывающих особенность рождения легких частиц. Согласно нашей модели, К-мезоны с жесткостью выше 3.5 ГэВ/с/е, не пролетают через детектор, однако алгоритм идентифицирует пролетевшие частицы как К-мезоны на всем диапазоне импульсов (см. рис. 7), что влияет на рост примесей каонов и на эффективность идентификации остальных частиц.

В дальнейшем планируется:

- Для метода  $n_\sigma$  реализовать вероятностную оценку для идентификации частиц.
- Менять параметр  $\sigma$  в зависимости от магнитной жесткости.
- Отключить идентификацию легких частиц для больших значений импульса.
- Комбинировать эти методы для получения наибольшей эффективности.
- Перейти к проверке алгоритмов на экспериментальных данных.



a)



b)

Рис. 7. Гистограммы а) действительно пролетевших К-мезонов б) ложно идентифицированных К-мезонов

## 7. Заключение

В течение второй волны задача, поставленная научным руководителем, была полностью выполнена. Были разработаны два метода идентификации частиц, описаны принципы их работы и детали реализации. Алгоритмы были протестированы на смоделированных данных, в ходе анализа результатов, были выяснены недоработки в реализованных методах, которые нужно будет исправить в дальнейшем.

## Благодарности

Выражаю признательность за помощь, а также за невероятное дружелюбие и отзывчивость моему научному руководителю – Сергею Павловичу Мерцу. В ходе выполнения данной работы я в любое время мог обращаться к нему за советом.

## Литература

- [1] Kekelidze V. // JINST. 2017. V. 12. P. 06012.
- [2] Baranov D. et al. // KnE Energ. Phys. 2018. V. 3. P. 291–296.
- [3] Brun R. and Rademakers F. // Phys. Res. A. 1997. V. 389. P. 81–86.
- [4] Al-Turany M et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 022001.
- [5] Baranov D. et al. // EPJ Web of Conferences. 2020. V. 226. P. 03003.
- [6] Merts S. et al. // J. Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1479. P. 012043.
- [7] Adam J. et al. // Eur. Phys. J. Plus. 2016. V. 131. P. 168.
- [8] Kjeld Aamodt et al. // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. 8002.