

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.384.82

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ VM@N NICA

© 2021 г. К. И. Машицин<sup>а</sup>, \*, С. П. Мерц<sup>б</sup>, С. А. Немнюгин<sup>а</sup>, К. И. Рогалев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Санкт–Петербургский государственный университет, Санкт–Петербург, 199034 Россия

<sup>б</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

\*E-mail: MashKonst@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 04.03.2021 г.

VM@N (Baryonic Matter at the Nuclotron)—первый эксперимент на ускорительном комплексе NICA (Nuclotron–based Ion Collider fAcility), в рамках которого с 2018 года проводятся физические запуски установки со сбором экспериментальных данных. Задача идентификации частиц необходима для физического анализа материи, образовавшейся при столкновении пучка с мишенью. В данной работе обсуждаются алгоритмы идентификации, основанные на методе  $n_\sigma$  и вариации метода расстояний. Они были протестированы на смоделированных данных, представлены результаты эффективности идентификации и процент примесей для различных типов частиц.

**Ключевые слова:** VM@N, NICA, PID, идентификация частиц, эффективность, примеси,  $n_\sigma$ , TOF, времяпролетная камера, импульс, магнитная жесткость

**DOI:** 10.56304/S2079562920060391

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron–based Ion Collider fAcility), который создается на базе Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), позволит изучать свойства барионной материи в условиях экстремальной температуры и плотности [1]. Первым этапом реализации мегапроекта NICA является эксперимент VM@N [2]. Он направлен на изучение столкновений тяже-

лых ионов с неподвижной мишенью. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В этой статье описаны алгоритмы идентификации частиц, основанные на методе  $n_\sigma$  [3] и вариации метода расстояний. Реализованные алгоритмы были протестированы на 15000 смоделированных событий, полученных с помощью генератора QGSM. В данной работе определялись восемь различных типов частиц:  $p, e^\pm, \pi^\pm, K^\pm, D, T, {}^3\text{He}^{++}, {}^4\text{He}^{++}$ . Мето-

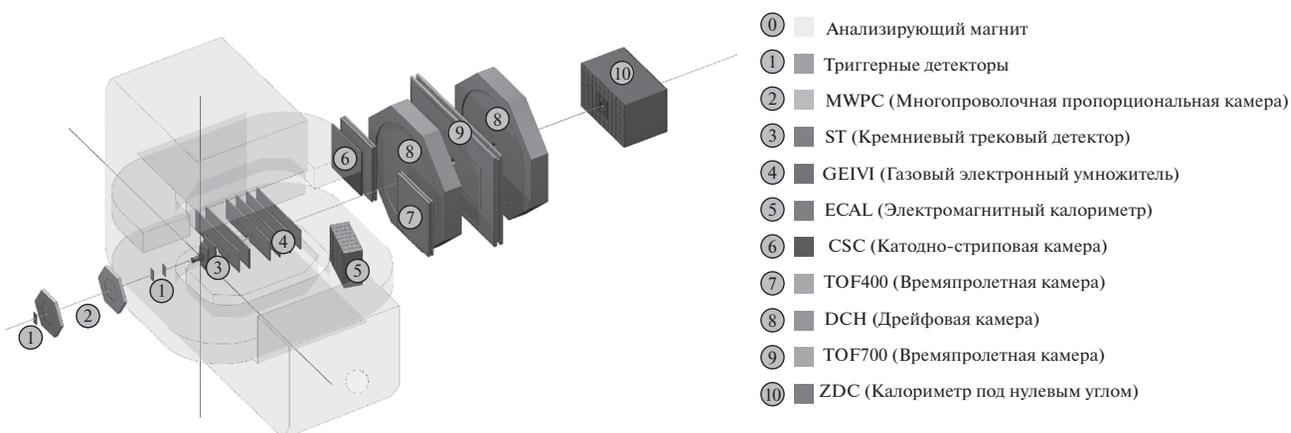


Рис. 1. Вид экспериментальной установки VM@N [4].

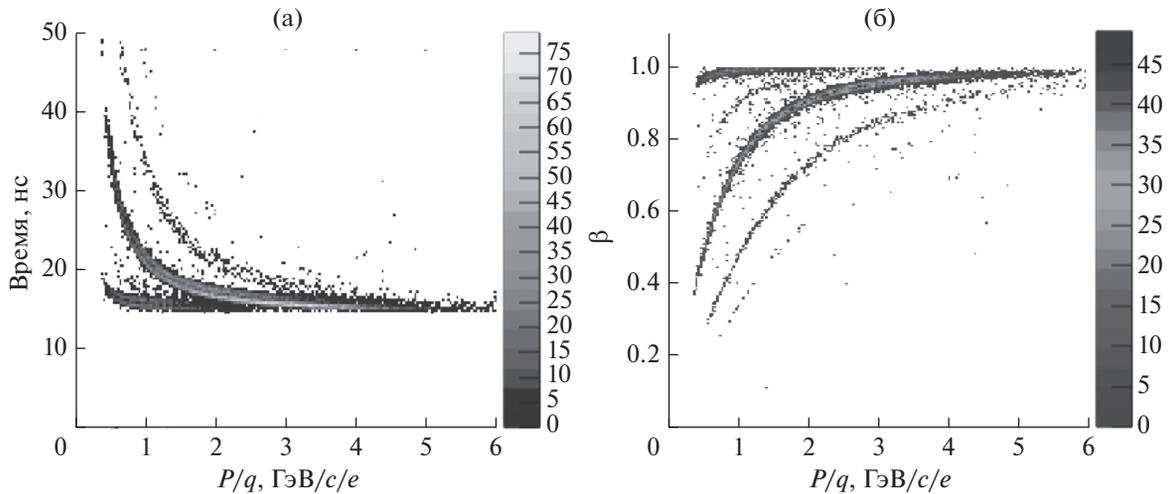


Рис. 2. Гистограммы зависимости от магнитной жесткости времени пролета (а) и скорости частиц (б).

ды реализованы как часть программного комплекса BmnRoot [5], который предоставляет широкий набор инструментов для изучения характеристик детектора, моделирования событий и анализа данных [6]. BmnRoot разработан на основе ROOT (ЦЕРН) [7] и FairRoot (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца) [8].

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ

Информация о траекториях движения частиц, полученная с трековых детекторов, позволяет определить важную характеристику – магнитную жесткость, равную отношению импульса частицы к ее заряду [9]. Времяпролетные камеры измеряют время достижения частицей детектора, которое используется для вычисления скорости.

Процедура идентификации проводится 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). Графики с входной информацией, которую получают алгоритмы, представлены на рис. 2.

### 2.1 Анализ эффективности

Для оценки качества идентификации использовались формулы для эффективности и примесей:

$$\text{Эффективность} = \frac{N_{\text{верных}}}{N_{\text{всего}}}, \tag{1}$$

$$\text{Примеси} = \frac{N_{\text{ложных}}}{N_{\text{идент}}},$$

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.

Результаты представлены для времяпролетных детекторов TOF400 и TOF700, находящихся на расстоянии 400 и 700 см от мишени соответственно. Детекторы TOF400 стоят по бокам (см. рис. 1), чтобы регистрировать треки с меньшим радиусом кривизны, поэтому в результатах эффективности для них не учитываются  $T$ ,  ${}^3\text{He}^{++}$  и  ${}^4\text{He}^{++}$ .

### 2.2 $n_\sigma$ метод

Пусть  $S$  – необработанный сигнал детектора с разрешающей способностью  $\sigma$ . Первый способ идентификации частиц состоит в разделении их по типам на основе этого значения. За  $S(H_i)$  обозначим 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  $H_i$

$$n_\sigma = \frac{S - S(H_i)}{\sigma}. \tag{2}$$

Идея метода заключается в том, что если для предположения  $H_i$  получают  $|n_\sigma| < 2$  или  $|n_\sigma| < 3$ , то частице присваивается тип  $i$ .

**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	$80.7 \pm 0.3$	$66.8 \pm 0.9$	$32.7 \pm 2.3$	$88.4 \pm 2.9$	$71.4 \pm 4.4$
Примеси	$0.08 \pm 0.03$	$3.9 \pm 0.5$	$7.9 \pm 2.2$	$66.5 \pm 2.6$	$90.8 \pm 1.1$
Не определен	$16.8 \pm 0.3$	$4.9 \pm 0.4$	$38.6 \pm 2.4$	$9.1 \pm 2.6$	$10.5 \pm 3.1$
$ n_{\sigma}  < 3$					
Эффективность	$89.6 \pm 0.3$	$69.1 \pm 0.9$	$42.8 \pm 2.4$	$94.2 \pm 2.1$	$75.2 \pm 4.2$
Примеси	$0.09 \pm 0.03$	$4.4 \pm 0.5$	$8.9 \pm 2.1$	$68.9 \pm 2.4$	$90.5 \pm 1.1$
Не определен	$7.2 \pm 0.2$	$2.2 \pm 0.3$	$22.7 \pm 2.1$	$3.3 \pm 1.6$	$5.7 \pm 2.3$

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

$ n_{\sigma}  < 2$								
	$p$	$\pi^{\pm}$	D	$K^{\pm}$	$e^{\pm}$	${}^3\text{He}^{++}$	${}^4\text{He}^{++}$	T
Эффективность	$74.1 \pm 0.3$	$61.7 \pm 0.9$	$35.9 \pm 1.1$	$71.9 \pm 5.1$	$30.9 \pm 4.8$	$70.5 \pm 3.3$	$35.1 \pm 5.5$	$62.8 \pm 3.2$
Примеси	$0.5 \pm 0.1$	$9.4 \pm 0.7$	$12.2 \pm 1.2$	$94.8 \pm 0.7$	$95.9 \pm 0.8$	$82.3 \pm 1.4$	$96.2 \pm 0.7$	$26.4 \pm 3.1$
Не определен	$17.8 \pm 0.3$	$13.3 \pm 0.7$	$16.7 \pm 0.9$	$19.5 \pm 4.4$	$44.7 \pm 5.1$	$11.6 \pm 2.3$	$12.2 \pm 3.8$	$19.9 \pm 2.6$
$ n_{\sigma}  < 3$								
Эффективность	$81.4 \pm 0.3$	$66.6 \pm 0.9$	$41.5 \pm 1.1$	$76.8 \pm 4.7$	$32.9 \pm 4.8$	$73.7 \pm 3.2$	$35.1 \pm 5.5$	$72.3 \pm 2.9$
Примеси	$0.5 \pm 0.1$	$11.9 \pm 0.6$	$12.7 \pm 1.1$	$95.6 \pm 3.1$	$95.9 \pm 0.7$	$84.7 \pm 1.2$	$96.4 \pm 0.7$	$30.4 \pm 2.9$
Не определен	$8.1 \pm 0.2$	$7.08 \pm 0.5$	$8.6 \pm 0.6$	$10.9 \pm 3.5$	$36.2 \pm 5.1$	$3.7 \pm 1.4$	$5.4 \pm 2.6$	$8.7 \pm 1.9$

Для детектора TOF за  $S$  принимают время пролета частицы  $t_{\text{TOF}}$ , а теоретическое время вычисляют по формуле:

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

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

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

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.

Метод был протестирован для  $|n_{\sigma}| < 2$  и  $|n_{\sigma}| < 3$ , в табл. 1 и 2 представлены средние значения эффективности и количества примесей, а также про-

цент частиц, которые не удалось идентифицировать, используя метод  $n_{\sigma}$ . Приведенные в таблицах результаты являются средними по распределениям, предсказываемым Монте-Карло генератором, поэтому в отдельных диапазонах магнитной жесткости качество идентификации может значительно варьироваться (см. рис. 3).

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  ${}^4\text{He}^{++}$ , это объясняется практически совпадающим отношением массы к заряду для дейтронов и альфа-частиц и перекрывающимся временем пролета для легких частиц. На рис. 3 представлены гистограммы эффективности для  $e^{\pm}$  и  $\pi^{\pm}$ , по графикам видно, как с ростом примесей электро-

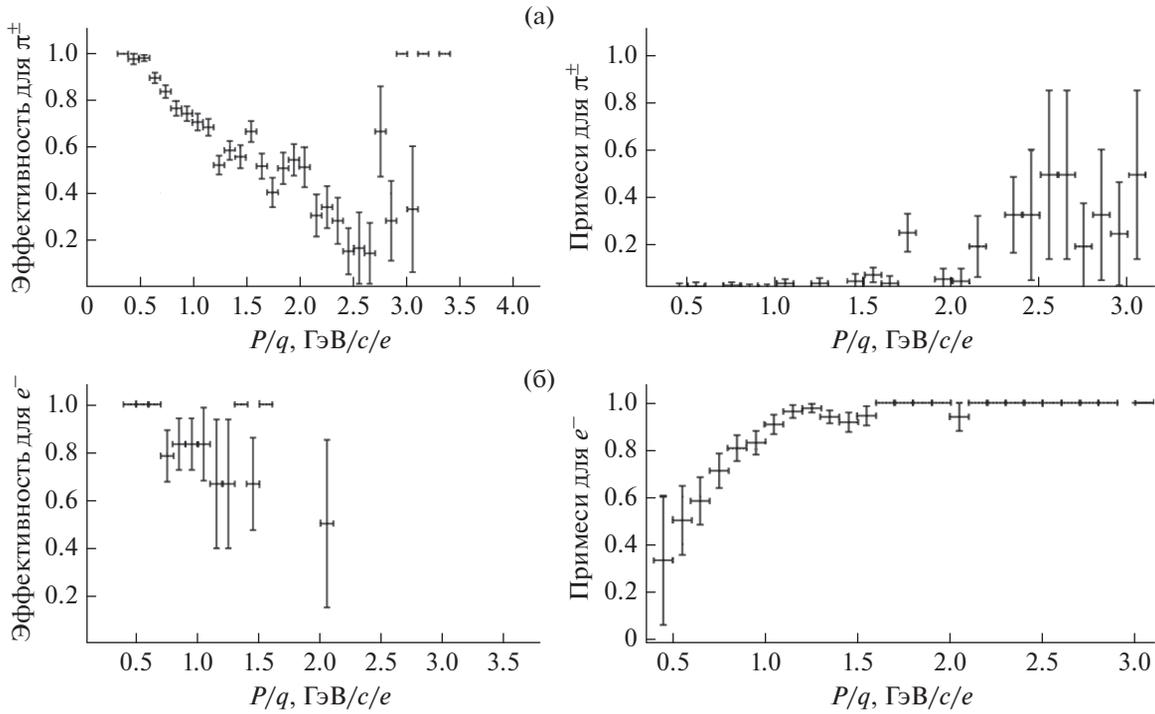


Рис. 3. Эффективность и примеси для пи-мезонов (а) и электронов (б).

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	$95.7 \pm 0.2$	$66.1 \pm 0.9$	$57.5 \pm 2.4$	$95.9 \pm 1.8$	$20.9 \pm 4.1$
Примеси	$0.15 \pm 0.02$	$4.9 \pm 0.5$	$10.9 \pm 1.9$	$73.5 \pm 2.1$	$92.6 \pm 1.5$

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

Метод расстояний								
	$p$	$\pi^\pm$	D	$K^\pm$	$e^\pm$	$^3\text{He}^{++}$	$^4\text{He}^{++}$	T
Эффективность	$85.4 \pm 0.2$	$55.1 \pm 0.9$	$45.3 \pm 1.1$	$75.6 \pm 4.7$	$1.1 \pm 0.9$	$73.7 \pm 3.2$	$35.1 \pm 5.5$	$79.7 \pm 2.2$
Примеси	$0.6 \pm 0.1$	$20.6 \pm 0.9$	$18.6 \pm 1.2$	$96.2 \pm 0.5$	$99.2 \pm 0.8$	$87.3 \pm 1.1$	$96.7 \pm 0.6$	$84.5 \pm 1.1$

нов падает эффективность идентификации пи-мезонов.

### 2.3 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 было решено увеличить число параметров разделения и для каждого трека в плоскости  $(p, \beta)$  находить расстояние  $L$  до ближайшей теоретической кривой

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

затем по формуле  $w = C/L$ , где  $C$  – константа нормировки, определять вероятность, с которой частица имеет тип  $i$ . При анализе эффективности частице присваивается тип с наибольшим весом, большим заданного порогового значения. Оценка качества алгоритма, представленная в табл. 3 и 4, показала более высокие результаты эффективности по сравнению с методом  $n_\sigma$  для протонов, дейтронов и ядер трития. Для процедуры идентификации вновь возникают трудности с разделением  $e^\pm$  и  $\pi^\pm$ , а также  ${}^4\text{He}^{++}$  и  $D$ , описанные в разд. 2.2.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обсуждались принципы работы реализованных методов идентификации частиц. 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  ${}^4\text{He}^{++}$ .

В дальнейшем планируется комбинировать эти методы, чтобы максимально повысить эффектив-

ность идентификации, и перейти к проверке алгоритмов на экспериментальных данных.

### 4. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-02-40104. Автор выражает благодарность Ресурсному образовательному центру по направлению “Физика” Научного парка СПбГУ за предоставленные ресурсы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Kekelidze V.* // J. Instrum. 2017. V. 12. P. 06012.
2. *Baranov D. et al.* // KnE Energ. Phys. 2018. V. 3. P. 291.
3. *Adam J. et al.* // Eur. Phys. J. Plus. 2016. V. 131. P. 168.
4. *Baranov D. et al.* // EPJ Web Conf. 2020. V. 226. P. 03003.
5. *Gertsenberger K. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 16214.
6. *Merts S. et al.* // EPJ Web Conf. 2020. V. 226. P. 03013.
7. *Brun R., Rademakers F.* // Phys. Res. A. 1997. V. 389. P. 81.
8. *Turany Al-M. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 022001.
9. *Merts S. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1479. P. 012043.

## Development of Particle Identification Methods in the BM@N Experiment at the NICA

K. I. Mashitsin<sup>1, \*</sup>, S. P. Merts<sup>2</sup>, S. A. Nemnyugin<sup>1</sup>, and K. I. Rogalev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

\*e-mail: MashKonst@yandex.ru

Received December 24, 2020; revised February 24, 2021; accepted March 4, 2021

The BM@N (Baryonic Matter at the Nuclotron) is an experiment at the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). 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 contaminations.

*Keywords:* BM@N, NICA, PID, particle identification, efficiency, contaminations,  $n_\sigma$ , tof, momentum, rigidity