

Правительство Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет»

Кафедра вычислительной физики

Каргин Тимофей Юрьевич

Идентификация заряженных частиц в эксперименте VM@N

Направление 010900 – «Прикладная математика и физика»

Бакалаврская работа

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., доцент С. А. Немнюгин

Рецензент:

к. ф.-м. н., с.н.с. ОИЯИ С. П. Мерц

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1 Описание эксперимента VM@N | 6 |
| 2 Обзор литературы | 8 |
| 2.1 Методы идентификации заряженных частиц | 8 |
| 2.2 Фильтр Калмана | 10 |
| 3 Реконструкция треков и идентификация частиц | 14 |
| 3.1 Реконструкция глобальных треков | 14 |
| 3.2 Идентификация частиц | 16 |
| 3.3 Реализация алгоритма | 18 |
| 3.4 Анализ эффективности идентификации | 19 |
| Выводы | 23 |
| Благодарности | 24 |
| Литература | 25 |

Введение

Одной из актуальных задач современной физики является изучение особого фазового состояния вещества – кварк-глюонной плазмы – сверхгорячей и плотной ядерной материи [1]. Уникальную возможность для получения таких условий обеспечивают столкновения тяжелых ионов высоких энергий.

Экстремальные условия хорошо подходят для исследования ядерной материи, в частности – для поиска и изучения ранее не наблюдавшихся ее состояний. Теоретические модели предлагают различные возможные сценарии, поэтому новые экспериментальные данные необходимы для того, чтобы подтвердить или опровергнуть теоретические модели.

Исследование сверхгорячей и плотной ядерной материи является одной из программ Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). На базе уже существующего ускорителя «Нуклотрон» создается ускорительно-накопительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility, рис. 1) [2].



Рис. 1: Схема строящегося ускорительно-накопительного комплекса NICA

На первой стадии реализации мегапроекта NICA создается установка для экспериментов на фиксированной мишени ВМ@N (Barionic Matter at Nuclotron, рис. 2).

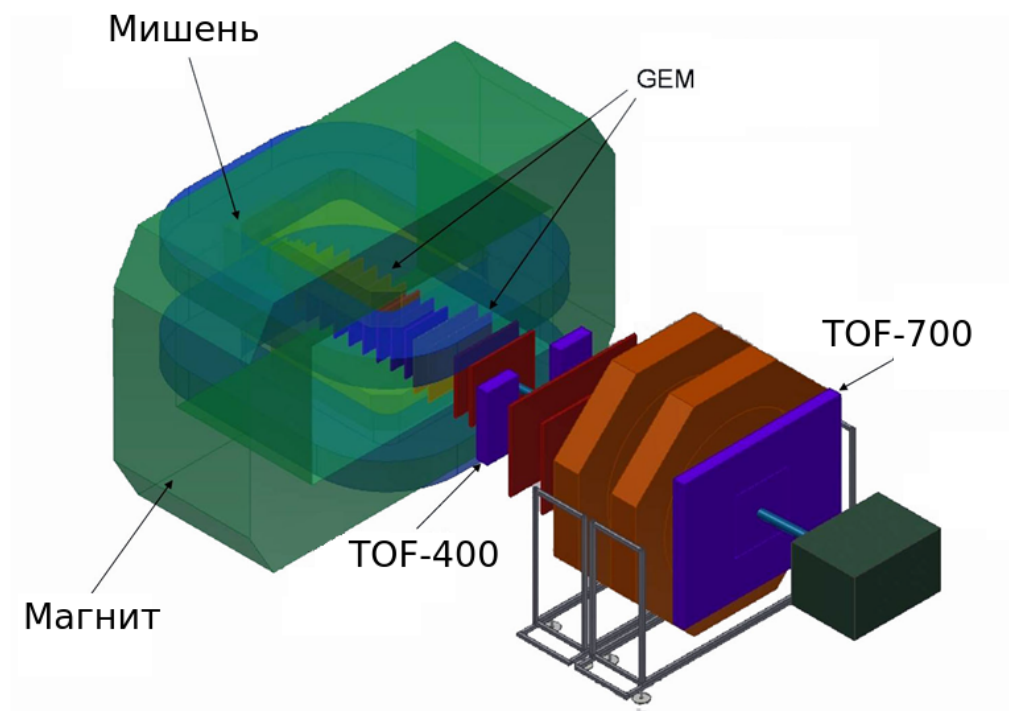


Рис. 2: Схема экспериментальной установки ВМ@N

Техническая установка состоит из поддетекторных систем, которые позволяют восстановить траектории движения заряженных частиц, провести их идентификацию и проанализировать их свойства.

Для физического анализа материи, образовавшейся в точке удара пучка и мишени необходимо определить свойства частиц, порожденных этим взаимодействием, в том числе – их тип. Таким образом, идентификация частиц является одной из важных и актуальных задач восстановления событий для экспериментов физики высоких энергий [1].

Цель работы – реализовать алгоритм идентификации заряженных частиц в эксперименте $ВМ@N$.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Исследование существующих методов идентификации частиц в экспериментах физики высоких энергий.
- Разработка и внедрение в программный пакет $VmnRoot$ алгоритма связывания треков частиц с откликами на них детектора TOF .
- Реализация алгоритма идентификации заряженных частиц в качестве модуля для программного пакета $VmnRoot$.

Описание эксперимента VM@N

Основным трековым детектором установки VM@N является GEM (Gas Electron Multipliers), который состоит из 12-ти параллельных плоскостей, стоящих одна за другой по ходу движения пучка частиц. После первичной обработки экспериментальных данных, полученных с поддетекторной системы, становятся известными координаты «хитов» – восстановленных откликов детектора (точек, через которые прошла частица).

В последующем этапе реконструкции полученные хиты объединяются в треки, геометрия которых позволяет определить знак заряда частицы, ее импульс.

Для идентификации частиц предусмотрены времяпролетные камеры TOF-400 и TOF-700 (расположенные в 400 см и 700 см от мишени, соответственно. См. рис. 2). TOF-400 состоит из двух частей, разнесенных друг от друга в плоскости, перпендикулярной направлению движения пучка частиц (см рис. 2). Данный детектор предназначен для регистрации времени пролета частиц с малыми энергиями, которые из-за магнитного поля изменяют направление своего движения. Частицы больших энергий пролетают между двумя частями TOF-400 и регистрируются при помощи TOF-700.

На последнем этапе реконструкции формируются «глобальные треки» (хиты с разных подсистем объединяются в один общий трек, к которому приписываются различные характеристики, такие как импульс, длина, время

пролета и др.) [3].

После получения параметров глобального трека реализуется идентификация частицы.

Для поддержки эксперимента разрабатывается программный пакет BmnRoot [4]. Он является мощным инструментом для изучения работы детекторов, моделирования событий, разработки алгоритмов реконструкции и физического анализа данных, обработки экспериментальных данных для установки BM@N.

BmnRoot разрабатывается на основе программных средств ROOT (CERN) и FairRoot (GSI – Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца, Дармштадт, Германия) [5]. На рис. 3 приведена схема, описывающая структуру программного пакета.

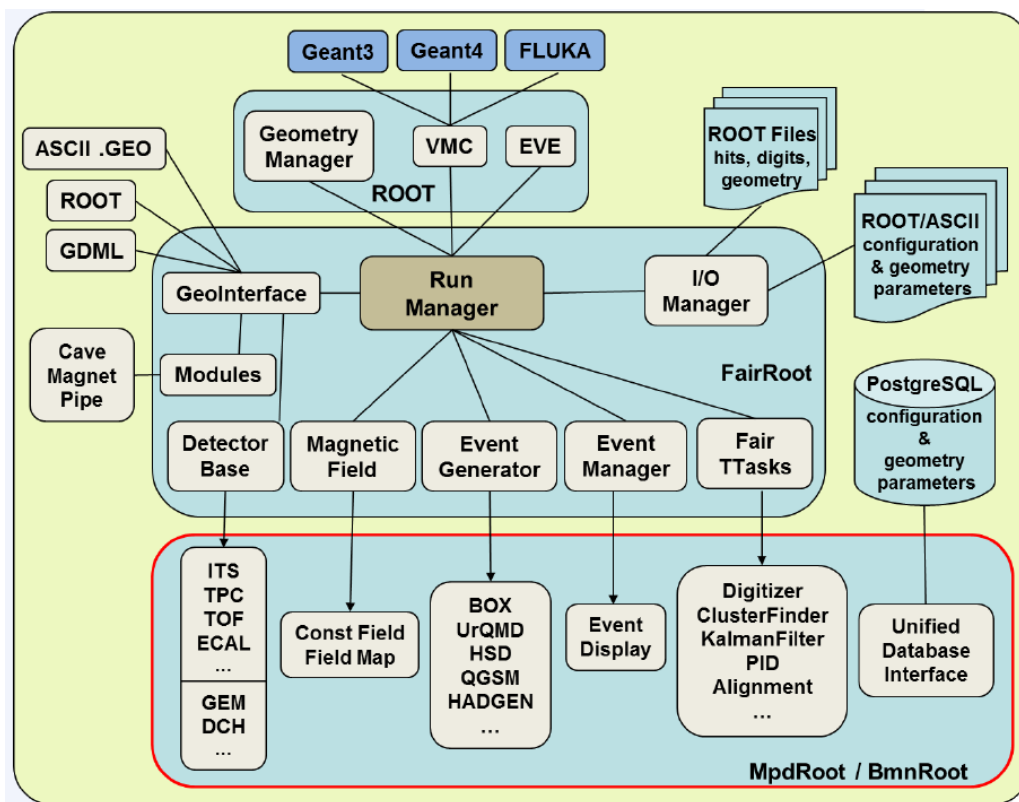


Рис. 3: Схема структуры BmnRoot

Обзор литературы

2.1 Методы идентификации заряженных частиц

В данной части работы дается обзор методов идентификации частиц в других экспериментах физики высоких энергий.

В эксперименте STAR (Solenoidal Tracker at RHIC. RHIC – The Relativistic Heavy Ion Collider, Брукхейвенская национальная лаборатория, штат Нью-Йорк) [6] изучают столкновения встречных пучков тяжелых ионов. На месте столкновения находится детектирующая система (рис. 4). Для решения задачи идентификации используются два основных типа детекторов - ТРС (Time Projection Chamber) и ТОФ (Time-Of-Flight) [7].

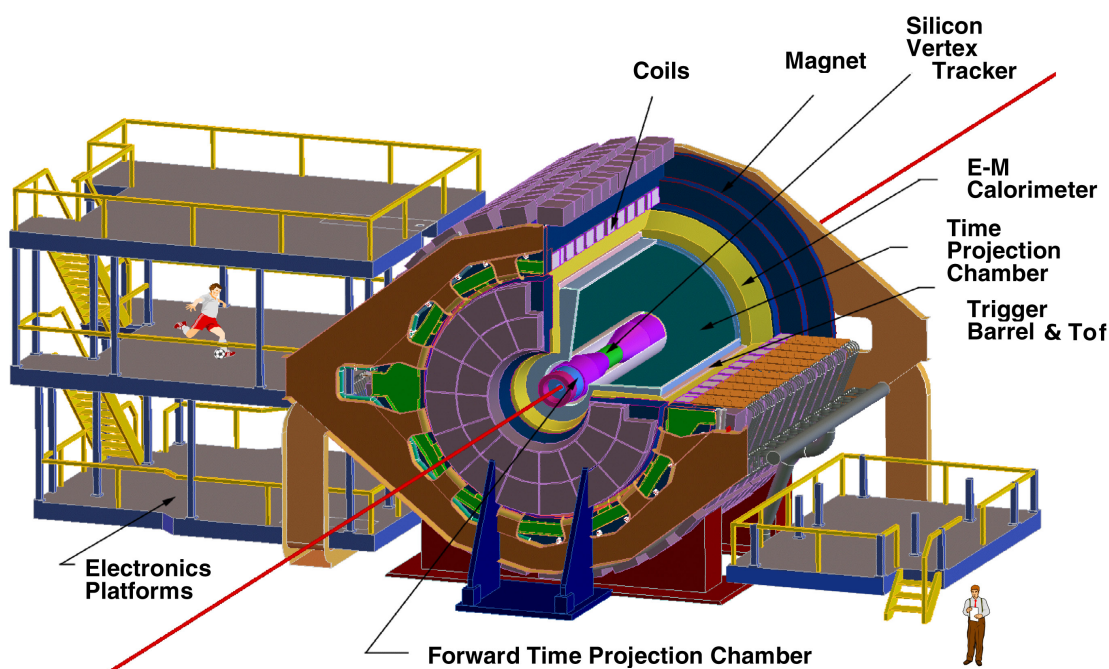


Рис. 4: Схема экспериментальной установки STAR

Столкновение происходит внутри ТРС. Дальнейшее движение продуктов взаимодействия регистрируется данным детектором. Реконструированные треки содержат информацию о том, как частицы ионизировали содержимое камеры, теряя при этом свою энергию. Одним из критериев идентификации является $(dE/dx)(p)$ (потеря энергии) – согласно этой величине можно делать предположения относительно типа рассматриваемой частицы [8]. Соответствующий график показан на рис. 5

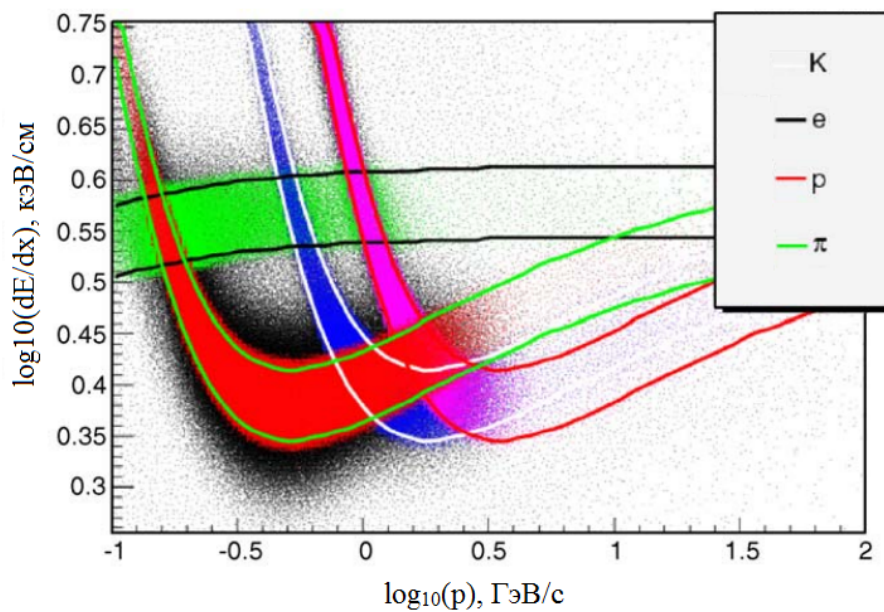


Рис. 5: Распределение $\log_{10}(dE/dx)$ как функция $\log_{10}(p)$ для e , π , K , p и их античастиц.

Далее частицы попадают в ТОФ-детектор, позволяющий определить время пролета частицы, а значит появляется возможность вычислить ее скорость ($\beta = v/c$). Таким образом, ТОФ-система позволяет разделить частицы по времени пролета, как показано на рис. 6.

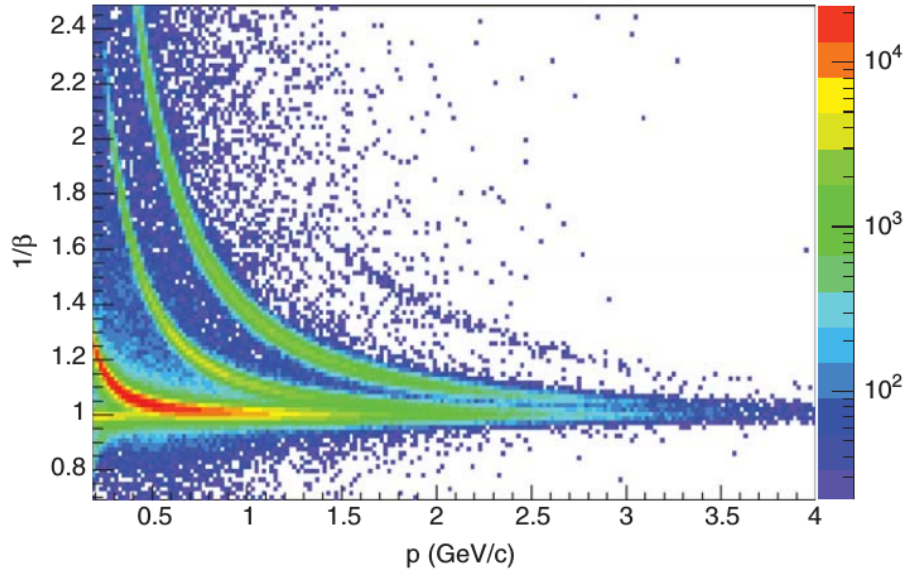


Рис. 6: Зависимость $1/\beta$ от p (в системе отсчета, связанной с центром масс) для π , K ($, p, \bar{p}$) согласно TOF для столкновения $Au + Au$ при 62.4 GeV. Разделение между π , K , p, \bar{p} достигается до $p \sim 1.6(3.0)\text{ГэВ}/c$

Рассмотренные методы идентификации (по TOF и dE/dx) являются основными для большинства экспериментов физики высоких энергий, таких как: ALICE(LHC,CERN) [9, 10], PHENIX (RHIC, BNL) [11], NA49 (SPS, CERN) [8].

2.2 Фильтр Калмана

Для реконструкции треков и дальнейшей идентификации соответствующих частиц необходимо реализовать связывание хитов разных поддетекторных систем, относящихся к одной и той же частице. Для решения этой задачи необходим инструмент, позволяющий корректно экстраполировать трек. В качестве такого инструмента используется фильтр Калмана. Рассмотрим данный алгоритм.

Фильтр Калмана – вычислительный алгоритм, оценивающий вектор состояния линейной динамической системы(набор параметров, характеризующих состояние системы в данный момент времени) [12]. Состояние системы

в текущий момент времени вычисляется из текущего измерения и состояния фильтра в предыдущий момент.

Особенность алгоритма заключается в том, что он оперирует не только оценками вектора состояния, но и оценками его неопределенности.

В рассматриваемой задаче алгоритм используется для оценивания состояния исследуемого процесса по серии зашумленных измерений.

Фильтр Калмана – рекурсивный, то есть для вычисления состояния системы на k -м шаге нужно знать «состояние фильтра» на предыдущем и измерение на текущем шаге.

Каждый шаг фильтра Калмана состоит из двух последовательных этапов: экстраполяции и коррекции. На этапе экстраполяции вычисляются предварительные оценки вектора состояния \mathbf{r}_k и ковариационной матрицы ошибок \mathbf{C}_k . На этапе коррекции оценки корректируются с учетом текущего измерения.

На рис. 7 представлена блок-схема, иллюстрирующая работу фильтра Калмана (знак «–» означает, что измерение k -го шага не учитывается).

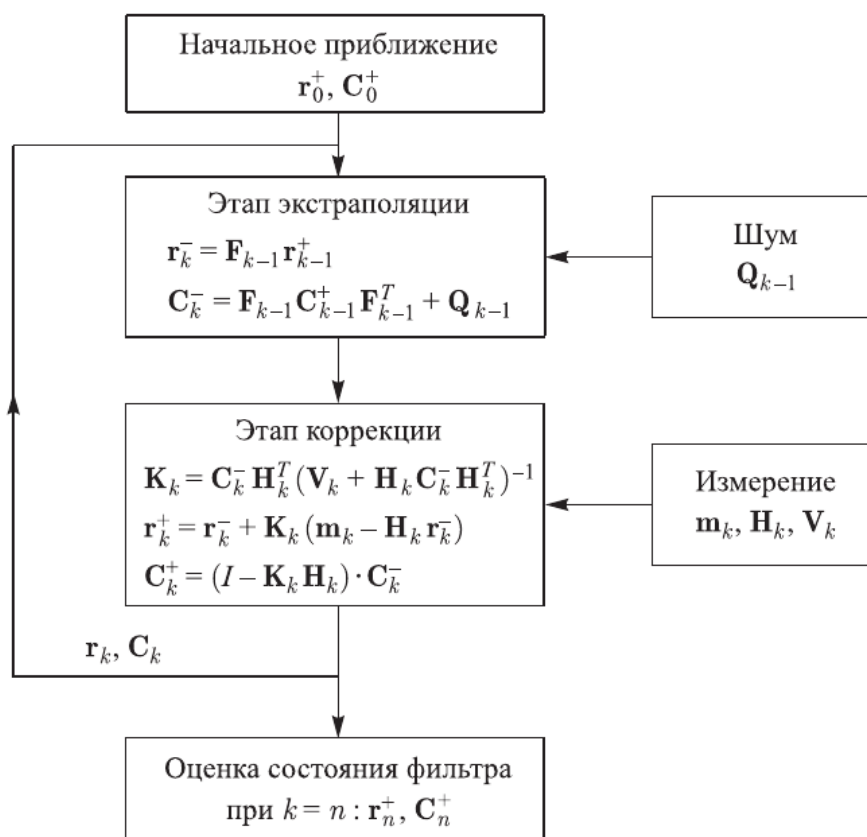


Рис. 7: Блок-схема работы классического фильтра Калмана

На рис. 7 используются следующие обозначения:

- \mathbf{r}_k – оценка вектора состояния системы в момент k , полученная по результатам наблюдений до момента k включительно;
- \mathbf{C}_k – ковариационная матрица ошибок, содержащая дисперсии ошибок вычисленного вектора и ковариации параметров состояния системы;
- \mathbf{F}_k – матрица эволюции процесса;
- \mathbf{Q}_k – ковариационная матрица гауссовского случайного процесса;
- \mathbf{m}_k – результат измерения на k -м шаге;
- \mathbf{H}_k – матрица измерений, связывающая вектор состояния с измерением;
- \mathbf{V}_k – ковариационная матрица белого гауссовского шума;

- \mathbf{K}_k – оптимальная матрица коэффициентов усиления (определяет вклад измерения в корректировку оценки, полученной на этапе экстраполяции).

Описанный выше алгоритм реализован в программном комплексе `Вn-pRoot` и используется в частности для связывания GEM-треков и TOF-хитов.

Реконструкция треков и идентификация частиц

3.1 Реконструкция глобальных треков

В эксперименте $BM@N$ частицы (например, ядра золота) ускоряются в Нуклотроне до энергий порядка нескольких ГэВ/нуклон. Далее они посылаются на фиксированную мишень, на которой происходит взаимодействие, порождение вторичных частиц и другие явления. За мишенью расположены GEM детекторы.

После первого этапа реконструкции данных GEM-хиты объединяются в треки. Используя экстраполяцию при помощи фильтра Калмана находятся ожидаемые точки пересечения треков с детектором TOF-400. Далее, ищутся ближайшие к этим точкам TOF-хиты (согласно минимальному расстоянию). Ближайший TOF-хит связывается с рассматриваемым GEM-треком. Затем вычисляется длина трека от мишени до TOF-плоскости.

Одной из характеристик связывания TOF-хитов и GEM-треков является невязка R - расстояние между TOF-хитами и точками на плоскости детектора, через которые проходит экстраполированный трек.

На рис. 8 можно видеть гистограмму невязок между TOF-400 хитами и точками на плоскости детектора, через которые проходит экстраполированный трек. Из графика видно, что наиболее вероятное значение невязки – порядка 3 см.

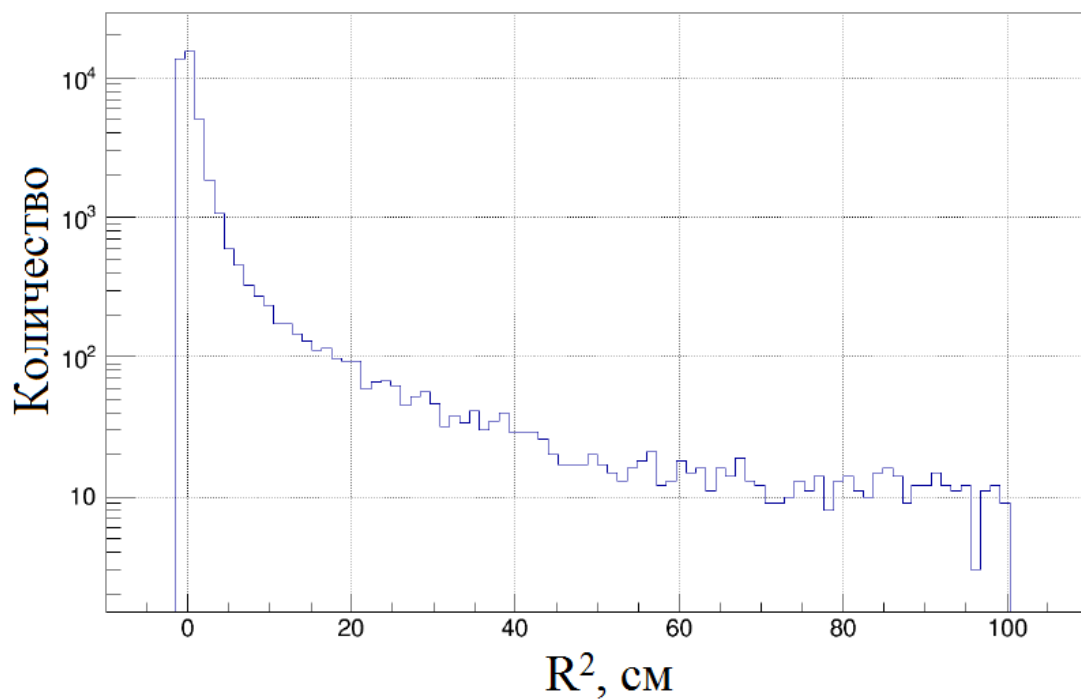


Рис. 8: Гистограмма невязок, полученная в результате моделирования 50.000 столкновений Au-Au

В качестве эффективности связывания GEM-треков и TOF-хитов используется доля верно связанных пар от общего их числа. На рис. 9 показана гистограмма эффективности связывания. Общая эффективность связывания – 71%.

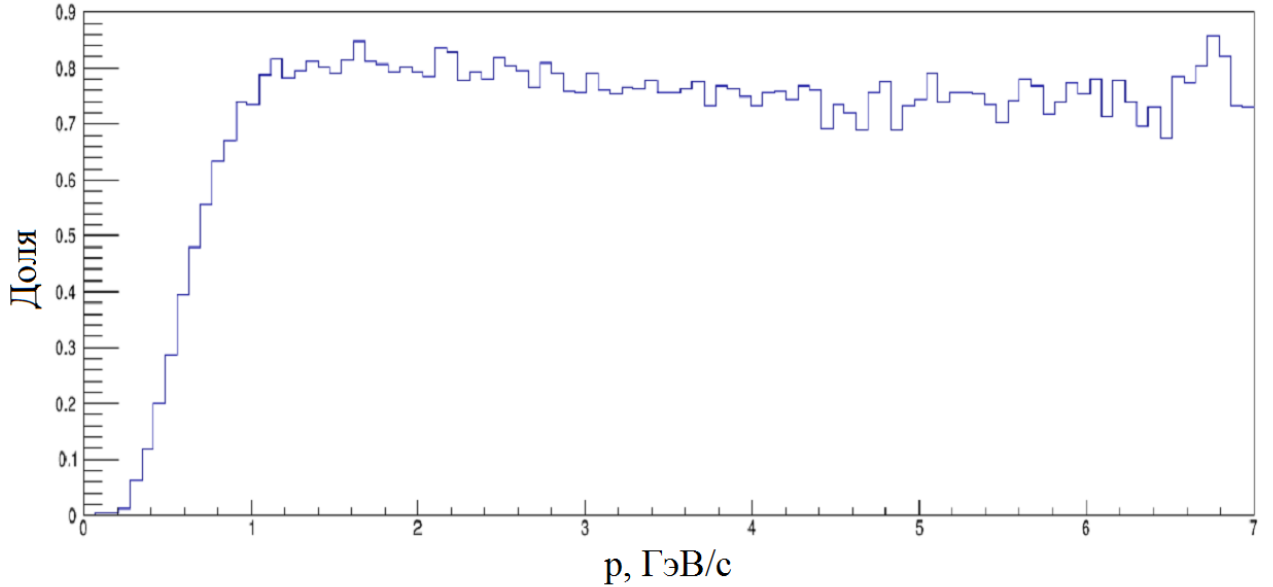


Рис. 9: Эффективность связывания GEM-треков и TOF-хитов в зависимости от импульса

Из рисунка видно, что для частиц с импульсом более 1 ГэВ/с эффективность связывания порядка 80%.

3.2 Идентификация частиц

Детектор TOF-400 способен измерять время от старта события до достижения частицей детектора. Согласно этому времени и длине трека мы можем вычислить две величины: массу m и $\beta (= v/c)$.

Используемые методы идентификации основаны на уравнении:

$$mc^2 = pc \sqrt{\frac{t^2 c^2}{l^2} - 1}$$

Согласно этому мы получаем выражения для m^2 и $1/\beta$:

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \left(\frac{t^2 c^2}{l^2} - 1 \right)$$

$$1/\beta = \frac{ct}{l} = \frac{m^2}{p^2} + 1$$

Как можно видеть, для каждого типа заряженных частиц зависимость $1/\beta$ от p – обратно пропорциональна квадрату импульса. Для частиц с разными массами ожидаются разные кривые. Так, зная длину трека и время пролета можно вычислить массу и скорость частицы. Это позволяет разделить частицы.

На рис. 10 и рис. 11 показаны гистограммы $1/\beta$ и m^2 в зависимости от импульса частицы соответственно. Черными линиями показаны теоретические ожидания. Видно, что на некоторых интервалах импульса можно с высокой вероятностью верно определить тип частицы. Но иногда точка может лежать между ожидаемыми линиями. В этом случае предполагается, что частица относится к ближайшей по ординате линии.

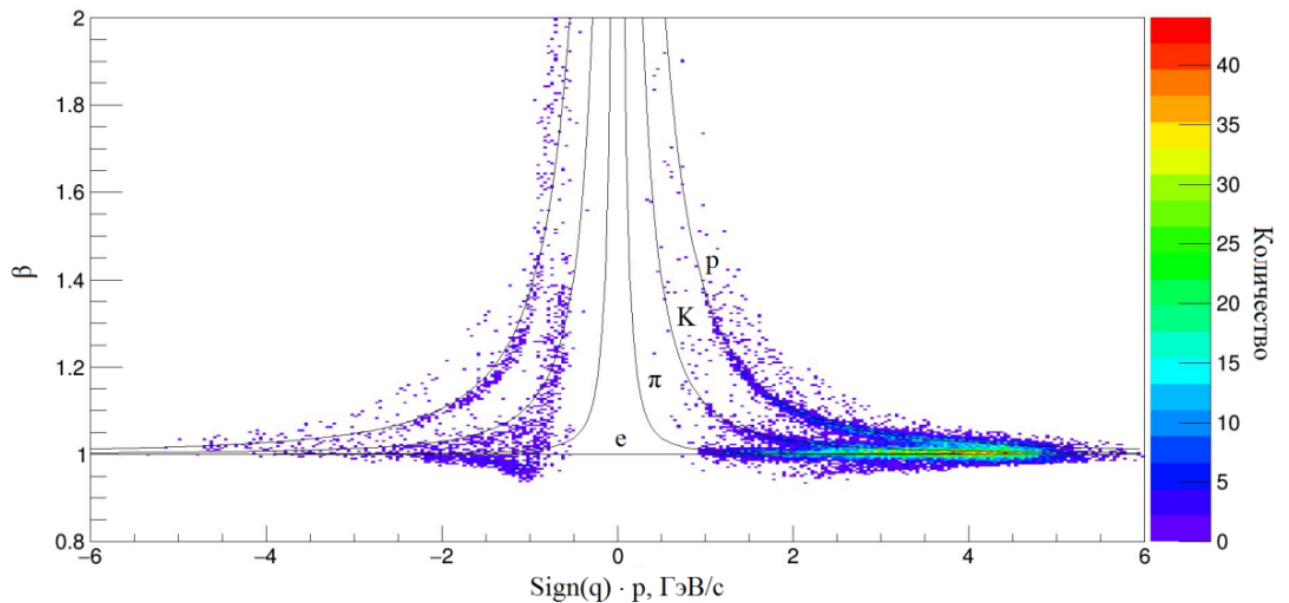


Рис. 10: $1/\beta$ ($p, \text{ ГэВ/с}$)

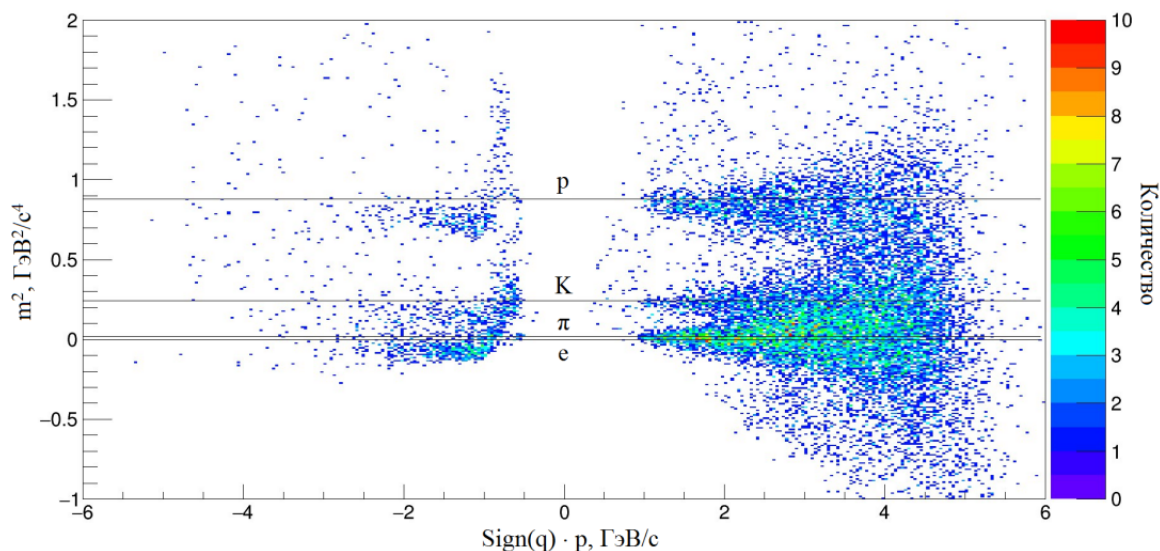


Рис. 11: m^2 (p , ГэВ/с)

3.3 Реализация алгоритма

Рассмотренный выше алгоритм идентификации частиц для эксперимента VM@N был реализован на языке C++, имеет объем около 1200 строк программного кода.

Т.к. данный алгоритм реализован в качестве модуля для VmnRoot, в случае улучшения GEM-трекинга также будет повышена эффективность идентификации.

У данного метода есть некоторые перспективы развития. Так, аналогичную работу следует совершить для идентификации частиц, пролетающих между плоскостями TOF-400 и регистрируемых детектором TOF-700 (частиц с большими энергиями). Также, можно изменить подход к выбору типа частицы согласно величинам $1/\beta$, m^2 и p – выбирать не ближайшую теоретическую линию (см. рис. 10 и рис. 11), а использовать более тонкую процедуру, например классифицировать полученные точки при помощи алгоритмов машинного обучения.

3.4 Анализ эффективности идентификации

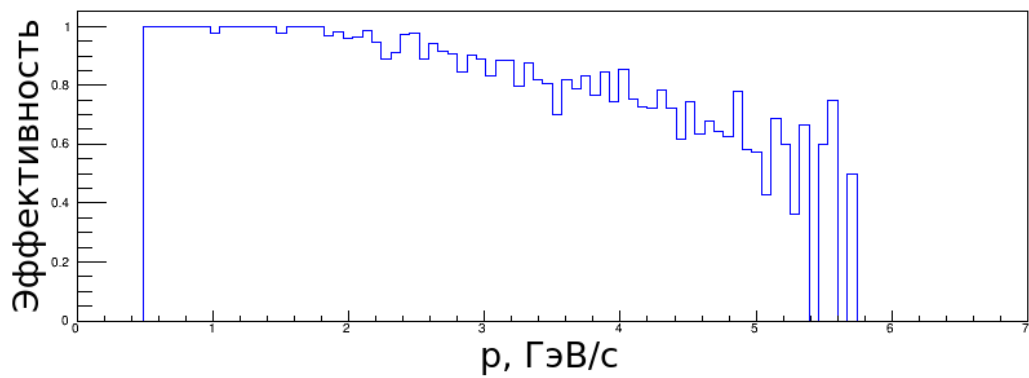
Для оценки качества идентификации были использованы две величины для каждого типа частиц: эффективность и примеси:

$$\begin{aligned} \text{Эффективность} &= \frac{N_{\text{хороших}}}{N_{\text{МК}}} \\ \text{Примеси} &= \frac{N_{\text{плохих}}}{N_{\text{рек}}} \end{aligned}$$

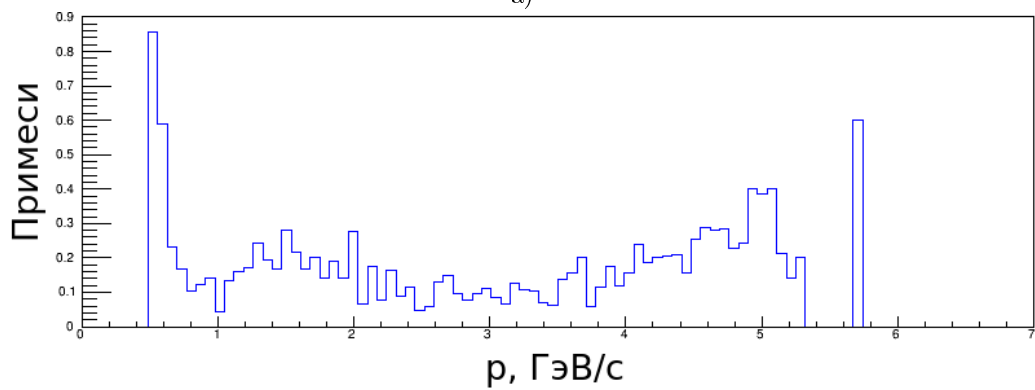
где:

- $N_{\text{хороших}}$ – количество верно идентифицированных частиц данного типа;
- $N_{\text{МК}}$ – количество смоделированных частиц данного типа;
- $N_{\text{плохих}}$ – количество неверно идентифицированных частиц данного типа;
- $N_{\text{рек}}$ – количество частиц, идентифицированных как данный тип.

На рис. 12 – 15 показаны эффективность и примеси идентификации протонов и пи-мезонов.

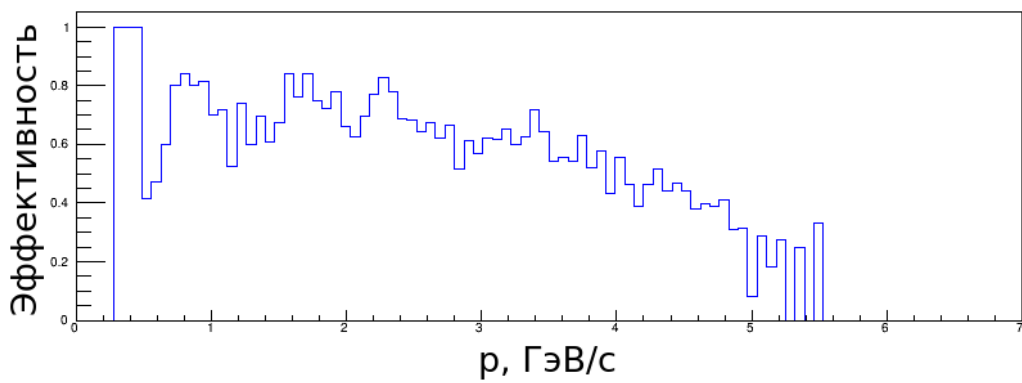


а)

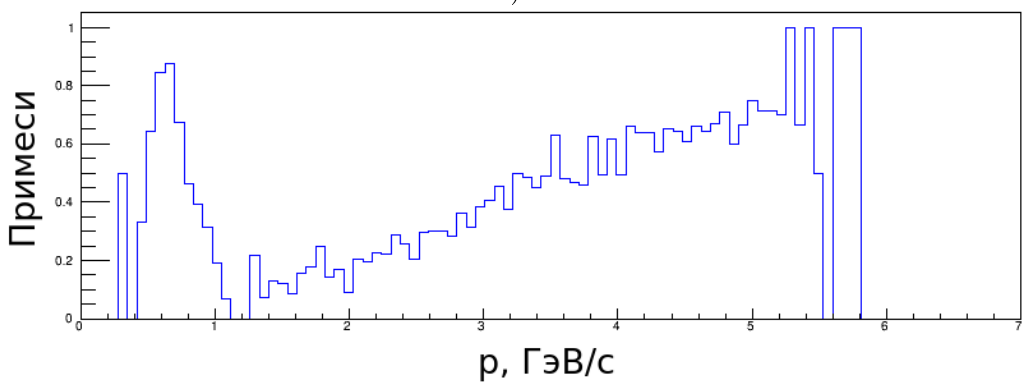


б)

Рис. 12: Эффективность (а) и примеси (б) идентификации протонов

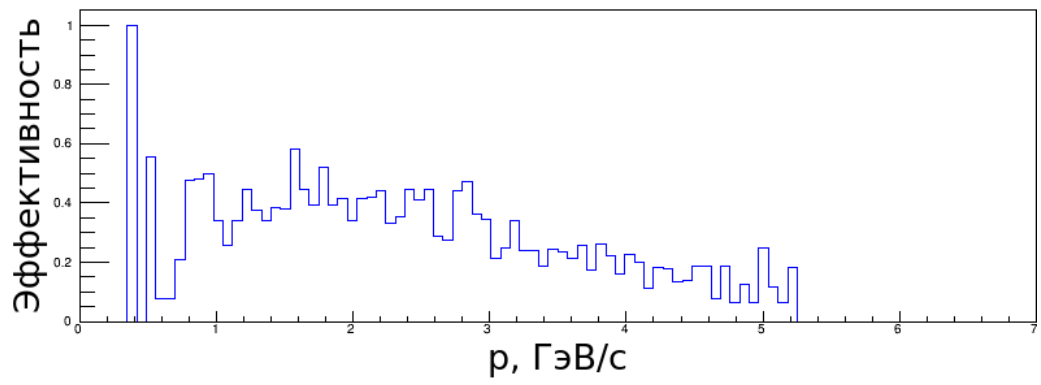


а)

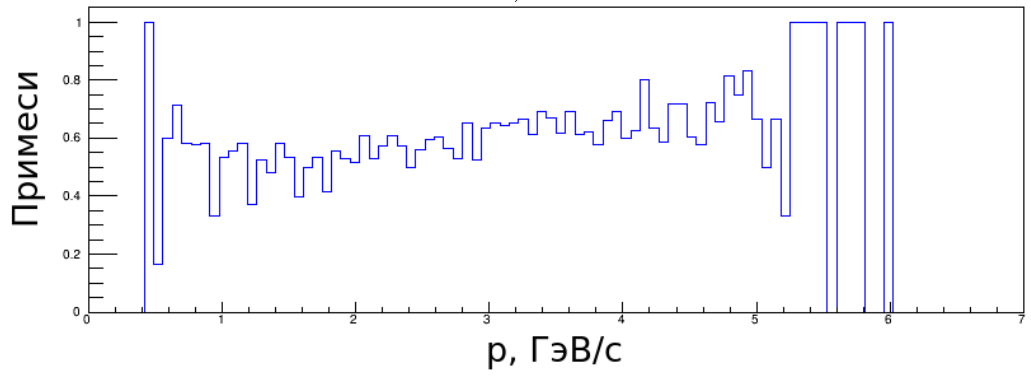


б)

Рис. 13: Эффективность (а) и примеси (б) идентификации К-мезонов

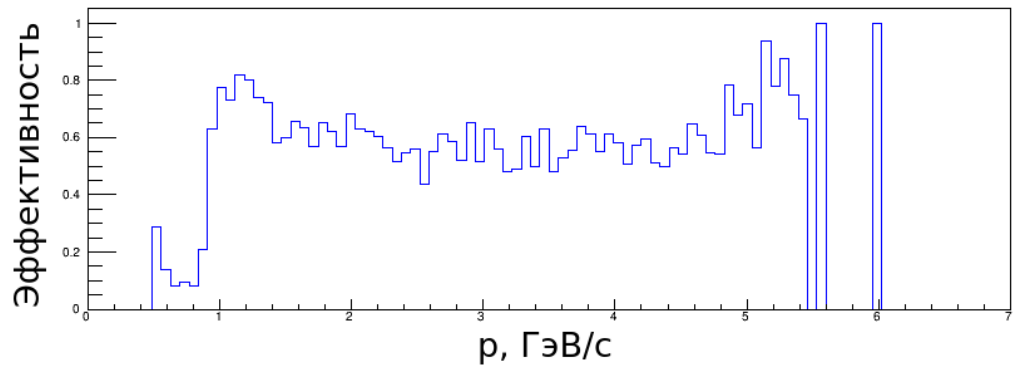


а)

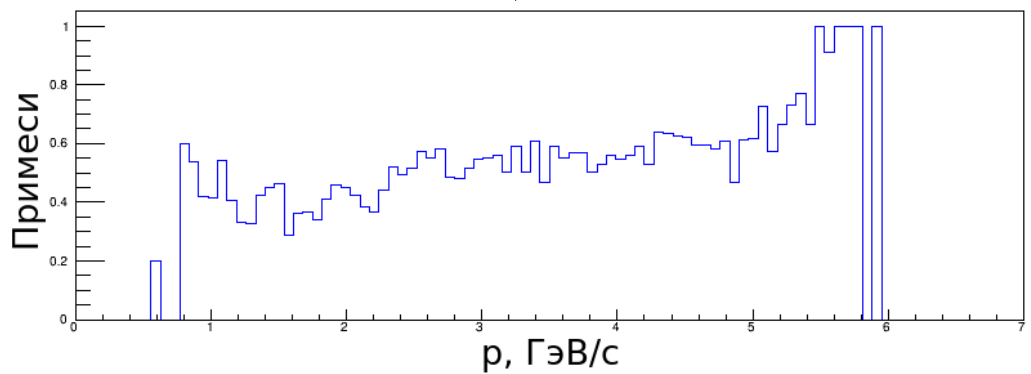


б)

Рис. 14: Эффективность (а) и примеси (б) идентификации π -мезонов



а)



б)

Рис. 15: Эффективность (а) и примеси (б) идентификации электронов

На представленных гистограммах представлены результаты оценки качества идентификации для двух способов – оценка по $m^2(p)$ и $1/\beta(p)$, т.к. оба способа дали почти идентичный результат.

Результаты

Описанный метод был протестирован на моделированных событиях столкновения Au-Au и дал следующие результаты:

Качество соотнесения TOF-хитов: 71%.

В таблице приведены значения эффективности и примесей идентификации частиц, усредненные по импульсу.

| | |
|----------------------------|------------------------------|
| Efficiency (p) = 84% | Contamination(p) = 15% |
| Efficiency (π) = 27% | Contamination(π) = 59% |
| Efficiency (K) = 57% | Contamination(K) = 46% |

Выводы

1. Были рассмотрены существующие методы идентификации частиц в экспериментах физики высоких энергий.
2. Разработан алгоритм связывания GEM-треков и TOF-хитов.
3. Разработанный алгоритм связывания был внедрен в VmnRoot.
4. Разработан алгоритм идентификации частиц.
5. Разработанный алгоритм идентификации был внедрен в VmnRoot в качестве модуля.

Благодарности

Выражаю признательность за помощь в проведении представленного исследования моему научному руководителю - Немнюгину Сергею Андреевичу. Благодаря ему я впервые ознакомился с данной областью науки, получал поддержку и помощь на протяжении всей работы.

Также хочется отметить дружелюбие и отзывчивость коллектива Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, политику администрации Института, направленную на привлечение студентов – Летние студенческие программы, возможность удаленной работы над задачами.

Литература

- [1] Review of particle physics / J. Beringer, J.-F. Arguin, R.M. Barnett et al. // *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*. — 2012. — Vol. 86, no. 1.
- [2] Мегапроект NICA. [Электронный ресурс] Режим доступа: — <http://nica.jinr.ru/>. — (дата обращения: 25.05.2017).
- [3] Upper D. The unsuccessful self-treatment of a case of „Writer’s block“ // *Journal of Applied Behavior Analysis*. — 1974. — Vol. 7, no. 3. — P. 497–497.
- [4] Программный пакет VmnRoot. [Электронный ресурс] Режим доступа: — <http://mpd.jinr.ru/>. — (дата обращения: 25.05.2017).
- [5] Rogachevsky O., Gertsenberger K., Merts S. VmnRoot start guide // *BM@N collaboration*. — 2016.
- [6] The STAR experiment. [Электронный ресурс] Режим доступа: — <https://www.star.bnl.gov/>. — (дата обращения: 25.05.2017).
- [7] Extensive particle identification with TPC and TOF at the STAR experiment / M. Shao, O. Barannikova, X. Dong et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2006. — Vol. 558, no. 2. — P. 419–429.
- [8] NA49 large acceptance hadron detector / S. Afanasiev, T. Alber, H. Appelshäuser et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec-*

tion A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1999. — Vol. 430, no. 2-3. — P. 210–244.

[9] Construction and tests of the MRPC detectors for TOF in ALICE / A. Akindinov, A. Alici, P. Antonioli et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 602, no. 3. — P. 658–664.

[10] The ALICE experiment at the CERN LHC / K. Aamodt, A.A. Quintana, R. Achenbach et al. // Journal of Instrumentation. — 2008. — Vol. 3, no. 8.

[11] Particle identification in TEC/TRD prototypes for the PHENIX detector at RHIC / B. Libby, A. Chikanian, S. Coe et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1995. — Vol. 367, no. 1-3. — P. 244–247.

[12] Kalman filter-based fast track reconstruction for charged particles in a compressed baryonic matter experiment using parallel computing on a multicore server at the laboratory of information technologies, joint institute for nuclear research / T.O. Ablyazimov, M.V. Zyzak, V.V. Ivanov, P.I. Kisel // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2015. — Vol. 12, no. 3. — P. 423–427.