

P1-2017-26

В. В. Ленивенко*, В. В. Пальчик

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В СИСТЕМЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР
ЭКСПЕРИМЕНТА **BM@N**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

* E-mail: vasilisa.lenivenko@mail.ru

Ленивенко В. В., Пальчик В. В.

P1-2017-26

Реконструкция траекторий заряженных частиц
в системе многопроволочных пропорциональных камер
эксперимента BM@N

В работе описывается алгоритм реконструкции треков в системе многопроволочных пропорциональных камер в эксперименте BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на нуклотроне. С его помощью на экспериментальных данных с бомбардировкой дейтронными и углеродными пучками углеродной и медной мишени реконструировались пучковые треки до мишени и траектории заряженных частиц после мишени. Получена оценка эффективности работы многопроволочных камер. Измерены параметры пучка (поперечные размеры, угловой разброс).

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Lenivenko V. V., Palichik V. V.

P1-2017-26

Reconstruction of Charged Particle Trajectories
in Multiwire Proportional Chambers at the BM@N Experiment

The algorithm for track reconstruction in the multiwire proportional chambers (MWPC) of the BM@N experiment is described. Beam tracks before the interaction with the target and trajectories of charged particles after the interaction are reconstructed using Nuclotron experimental data with deuteron and carbon beams colliding with the carbon and copper targets. Trajectories are extrapolated to the interaction point and to the drift chambers. Efficiencies of MWPCs have been obtained. Beam parameters (transverse dimensions, the angular spread) have been measured.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В начале 2015 г. на нуклотроне ОИЯИ были проведены стартовые технические сеансы эксперимента VM@N. Во втором (Run2) и третьем (Run3) сеансах использовались три шестислойные многопроволочные пропорциональные камеры (MWPC) [2]. В каждой из камер строились пространственные треки-сегменты, с помощью которых реконструировались прямолинейные траектории заряженных частиц. Пропорциональные камеры выравнивались относительно оси пучка, геометрические параметры прямолинейных треков до и после магнита оценивались методом наименьших квадратов.

1. ГЕОМЕТРИЯ MWPC В СЕАНСАХ ЭКСПЕРИМЕНТА

В Run2 (без мишени) две камеры располагались по оси Z до магнита, третья после него, с координатами относительно переднего края полюса магнита для MWPC1 $z = -317$, для MWPC2 $z = -180$ и для MWPC3 $z = 436$ см соответственно (рис. 1). В Run3 (с углеродной и медной мишенями) камеры располагались вдоль оси Z с координатами относительно мишени для MWPC1 $z = -150$, MWPC2 $z = 453$ и MWPC3 $z = 486$ см соответственно (рис. 2).

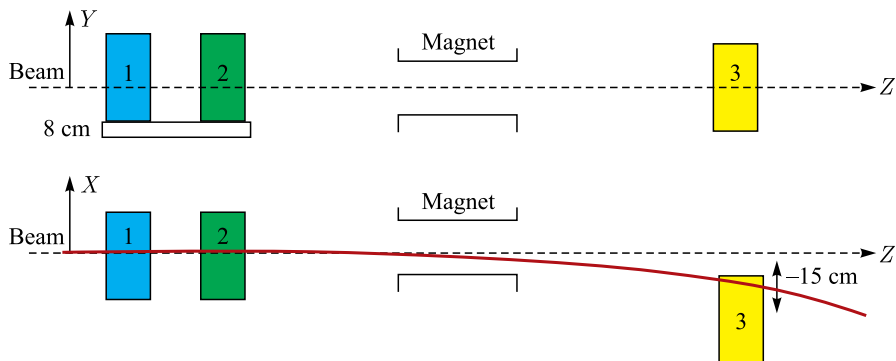


Рис. 1. Геометрия системы детекторов MWPC в Run2

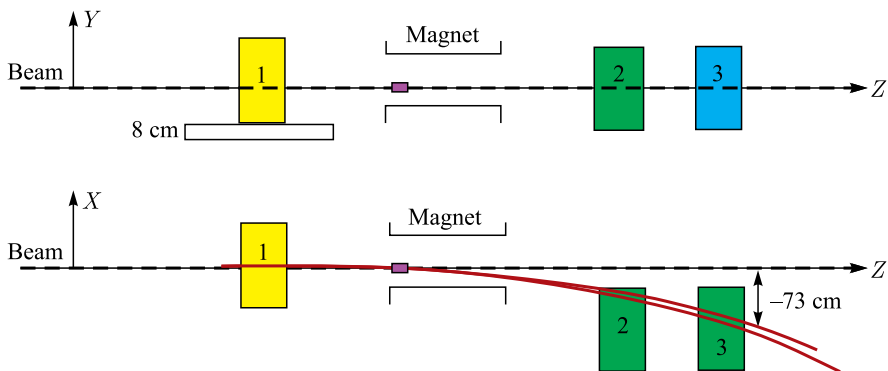


Рис. 2. Геометрия системы детекторов MWPC в Run3

По горизонтальной оси X камеры, стоящие после магнита в Run3, были сдвинуты на 73 см, а в Run2 — на 15 см для наилучшего совмещения MWPC-треков с рабочей областью дрейфовых камер (DCH).

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ КАМЕР MWPC

Камера заполнена газовой смесью ($\text{Ar} — 70\%$, $\text{CO}_2 — 30\%$) таким образом, чтобы заряженная частица, проходящая через рабочую область, вызывала ионизацию атомов газа. Координатная информация в камерах MWPC считывается с эквидистантных анодных проволок высокого напряжения, разделенных потенциальными сетками. Между считывающими плоскостями располагаются катодные плоскости, на которые приходят положительно заряженные ионы газа [3] (рис. 3).

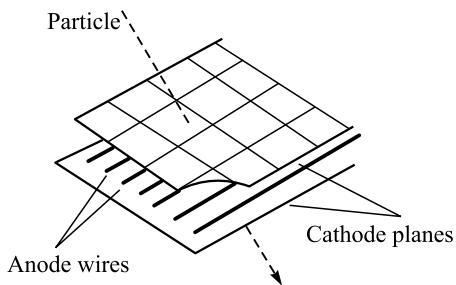


Рис. 3. Устройство многопроволочной камеры

Каждая камера MWPC состоит из шести плоскостей, располагающихся последовательно друг за другом на расстоянии 1 см вдоль оси Z перпендикулярно к ней [4]. Координатные оси X , U , V расположены под углом 60° друг относительно друга (рис. 4).

Рожденные электроны ускоряются в электрическом поле камеры, в результате чего вокруг проволок возникает каскад ионизации. Это приводит к срабатыванию проволоки, ближайшей к траектории пролетевшей заряженной частицы.

Каждая камера MWPC состоит из шести плоскостей, располагающихся последовательно друг за другом на расстоянии 1 см вдоль оси Z перпендикулярно к ней [4]. Координатные оси X , U , V расположены под углом 60° друг относительно друга (рис. 4).

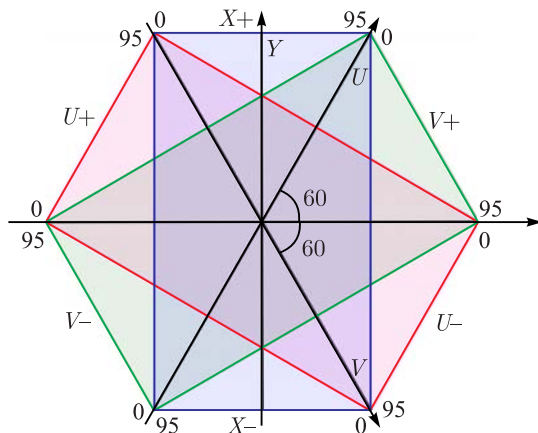


Рис. 4. Расположение координатных осей камер MWPC и порядок считывания проволочек

В зависимости от порядка считывания проволочек плоскости имеют знак «+» (возрастание номеров проволочек идет вдоль оси координат) или «-» (возрастание в противоположном направлении). Каждая плоскость содержит 96 проволочек (от 0-й до 95-й) с шагом $dw = 0,25$ см [5]. Координаты связаны между собой следующими соотношениями

$$u = \frac{x + \sqrt{3}y}{2}, \quad (1)$$

$$v = \frac{x - \sqrt{3}y}{2},$$

откуда следует

$$x = u + v. \quad (2)$$

3. ПОСТРОЕНИЕ ТРЕК-СЕГМЕНТОВ В MWPC

По совокупности сработавших проволочек (измерений) в камере ищутся сегменты треков прошедших через нее заряженных частиц. Для построения сегмента вначале ищется пространственная точка, где необходимым условием является срабатывание трех координат (x_1, u_1, v_1) в трех из шести плоскостей, удовлетворяющих условию (2) — возможный кандидат в сегмент (рис. 5).

Для того чтобы отсеять «ложные» трехкоординатные комбинации и выбрать подходящие кандидаты в точечные сегменты, необходимо, чтобы в соответствии с соотношением (2) выполнялись условия

$$|u_1 + v_1 - x_1| < 3 dw \quad (3)$$

— для камер до магнита,

$$|u_1 + v_1 - x_1| < 5 dw \quad (4)$$

— для камер после магнита, где треки отклоняются на большие углы магнитным полем.

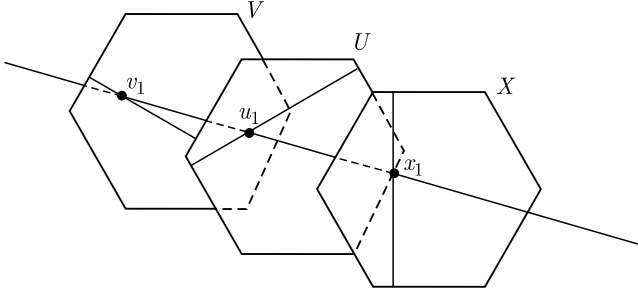


Рис. 5. Пример срабатывания проволок с координатами x_1, u_1, v_1 , составляющих пространственную точку в MWPC

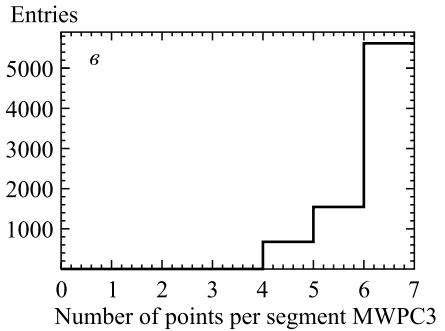
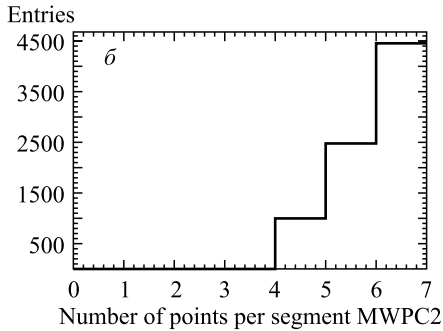
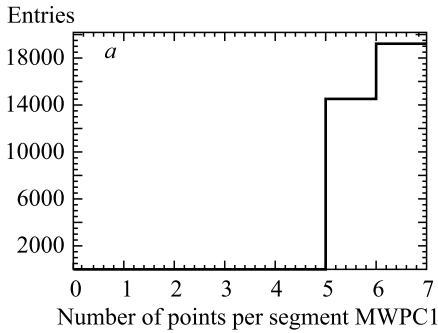


Рис. 6. Число точек на сегменте в MWPC на данных Run3 с магнитным полем (для камеры до мишени строились пяти- и шеститочечными сегментами)

Далее, к каждой из найденных трех комбинаций координат (x_1, u_1, v_1) подбирается сопряженное измерение по координате в других плоскостях.

В соответствии с рис. 5 сумма номеров сработавших проволок w_i в сопряженных плоскостях одной координаты проверяется на выполнение условия:

$$93 < w_+ + w_- < 97. \quad (5)$$

При этом для камер после магнита проверка по x -координате производится в более широких пределах с учетом отклонения треков частиц в магнитном поле ($B \neq 0$):

$$93 < w_{x+} + w_{x-} < 99. \quad (6)$$

Таким образом собираются максимально возможные шеститочечные сегменты, после чего из оставшихся кандидатов собираются пяти-, затем и четырехточечные сегменты (рис. 6).

Если на этапе построения, например, шеститочечных сегментов, имеются общие точки, то отбирается лучший из них по критерию χ^2 (см. ниже). Принадлежащие сегменту точки исключаются из дальнейшего рассмотрения.

4. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ГРУПП СМЕЖНЫХ СИГНАЛОВ

При прохождении заряженной частицы через камеру свободные электроны, образовавшиеся вдоль следа частицы, дают начало лавинам, приходящим на анодные проволоки, ближайšie к пролетевшей частице. Электроника регистрирует сигнал с каждой проволоки. Таким образом, приходящие сигналы указывают положение (координату) частицы в камере. Но лавины могут приходить не только на ближайшую, но и на соседние проволоки. Для более точного определения координаты трека в алгоритме заложена возможность кластеризации групп смежных сигналов с проволок.

Рассмотрим каждую из шести плоскостей по отдельности.

Лавина электронов может вызвать срабатывание в плоскости одной или двух соседних проволок (рис. 7). В алгоритме учитываются даже маловероятные процессы срабатывания трех проволок подряд для треков с большим наклоном.

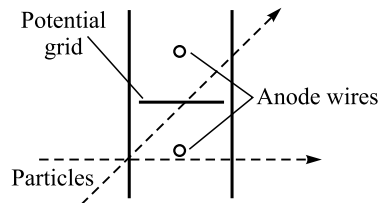


Рис. 7. Пример прохождения заряженных частиц (Particles) через газовый объем MWPC. Анодные проволоки (Anode wires) направлены перпендикулярно плоскости рисунка и разделены между собой потенциальной сеткой (Potential grid)

Наличие кластеров в камере до мишени объясняется присутствием гало вокруг пучка. Ширина кластеров различна в зависимости от сеанса и качества работы камеры, она составила в среднем величину, указанную на рис. 8.

Наличие кластеров в собираемом кандидате трек-сегмента увеличивает время работы алгоритма и требует специальных условий проверки. Если в какой-то из плоскостей в кандидаты трек-сегмента собралось две проволоки, рассматривается три возможные комбинации: с первой или со второй из проволок или с кластером из двух проволок; в последнем случае используется координата между ними. Лучший сегмент отбирается по критерию χ^2 .

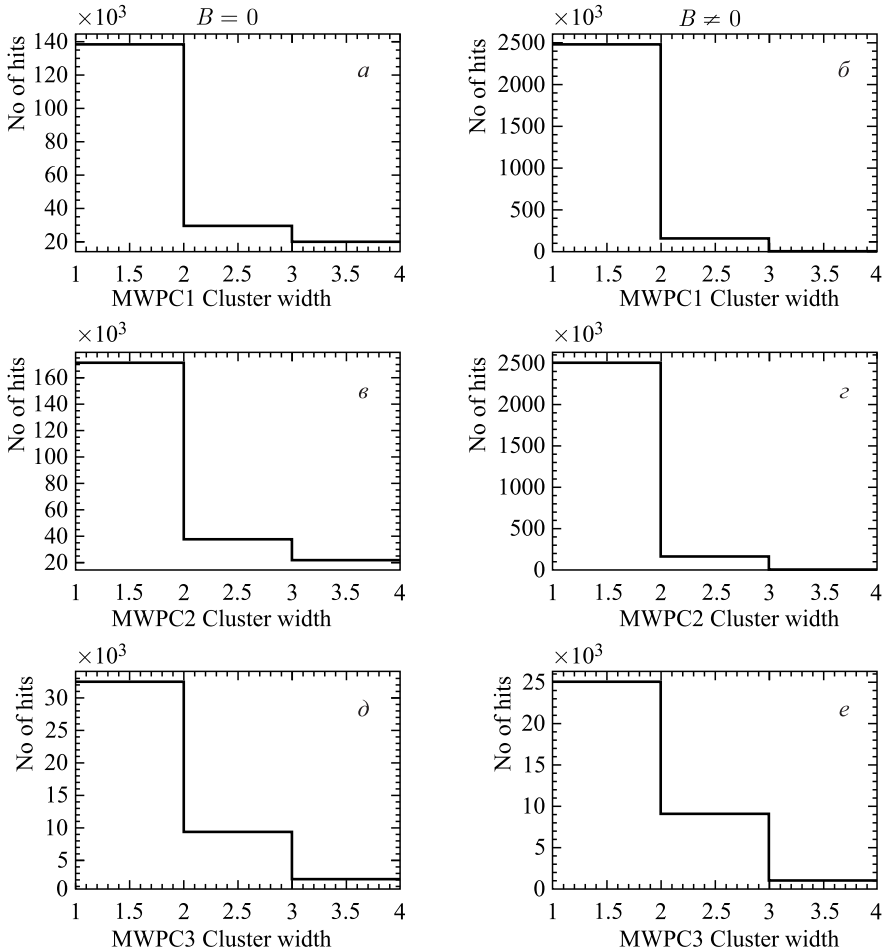


Рис. 8. Ширина кластеров в MWPC1, 2, 3 на данных Run3: слева — без магнитного поля, справа — в поле

5. ОТБОР ТРЕК-СЕГМЕНТОВ ПО КРИТЕРИЮ χ^2

Множество собранных кандидатов в сегменты может содержать различное число измерений (от шести до четырех), причем допускается возможность их пересечения по общим точкам. Поэтому выделяется подмножество сегментов с максимальным числом точек, которые фитируются прямой линией методом наименьших квадратов (МНК), а затем отбирается «лучший» сегмент по критерию χ^2 [6]. После этого общие точки в остальных сегментах вычеркиваются. В МНК параметры положения (b_x , b_y) и наклона (a_x , a_y)

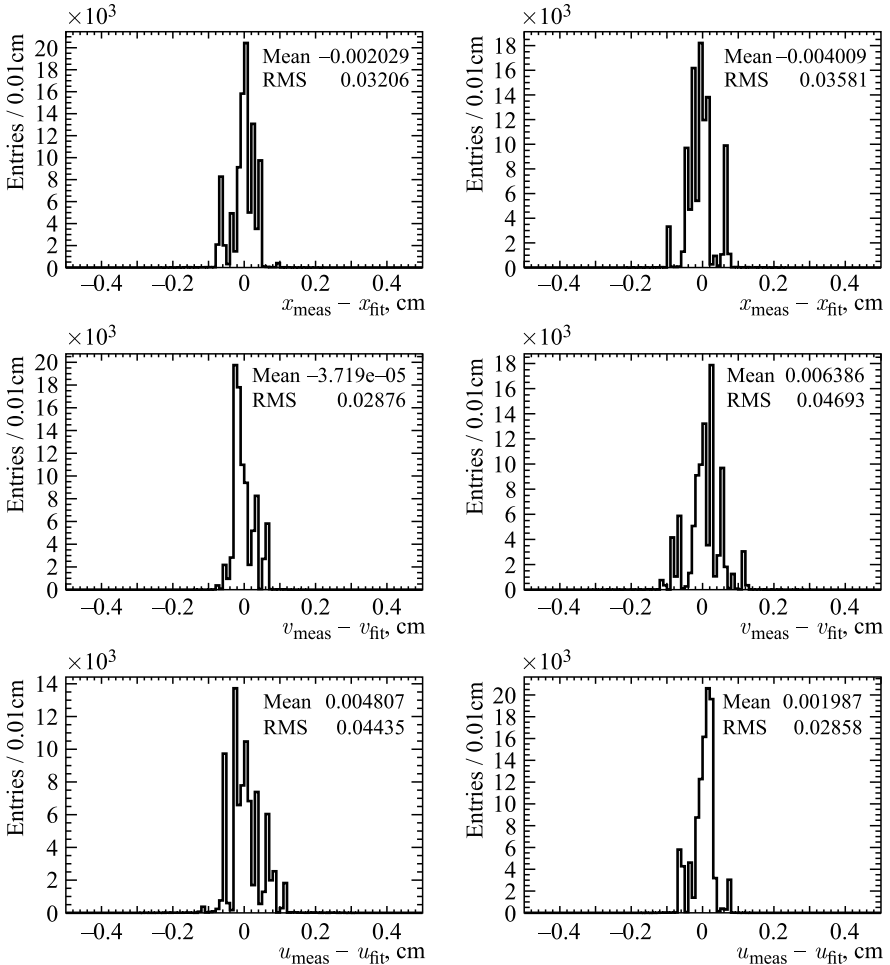


Рис. 9. Распределения разницы между измеренными и фитированными координатами в каждой плоскости камеры MWPC2 на данных Run2

сегмента в пространстве вычисляются минимизацией функционала

$$\Sigma \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где d_i — разность между измерениями (x_i, u_i, v_i) и фитированными по МНК координатами в i -й плоскости:

$$\begin{aligned} d_i &= x_i - a_x z_x - b_x, \\ d_i &= u_i - \frac{(a_x + \sqrt{3}a_y)}{2} z_u - \frac{(b_x + \sqrt{3}b_y)}{2}, \\ d_i &= v_i - \frac{(a_x - \sqrt{3}a_y)}{2} z_v - \frac{(b_x - \sqrt{3}b_y)}{2}, \end{aligned} \quad (7')$$

$$\sigma_i = \frac{dw}{\sqrt{12}} = 0,072 \text{ см} — \text{стандартные отклонения.}$$

Результаты определения разницы между реальными измерениями и фитированными координатами представлены на рис. 9 для каждой плоскости.

Лучший трек-сегмент отбирается по критерию χ^2 с учетом числа степеней свободы $(N - 4)$ для шести- и пятиточечных сегментов:

$$\chi^2 = \frac{1}{N - 4} \Sigma \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}, \quad (8)$$

где N — число измерений в сегменте.

Для четырехточечных сегментов используется выражение

$$\chi_4^2 = \Sigma \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}. \quad (9)$$

6. СШИВКА ТРЕК-СЕГМЕНТОВ В СИСТЕМЕ КАМЕР MWPC

После того как сегменты реконструированы в каждой из камер, необходимо соединить их между собой. Для этого лучшие трек-сегменты стоящих близко камер экстраполируются в среднюю плоскость $z_{\text{mid}} = \frac{z_{\text{ch1}} + z_{\text{ch2}}}{2}$ между этими камерами. Оценкой сшивки трек-сегментов между камерами может служить разница между координатами их проекций в средней плоскости и между параметрами наклона соединяемых сегментов (рис. 10).

Лучшие сшивки пар трек-сегментов отбираются с помощью критерия χ_{match}^2 (рис. 11):

$$\chi_{\text{match}}^2 = \frac{\min \text{Dist } x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\min \text{Dist } y^2}{\sigma_y^2} + \frac{da_x^2}{\sigma_{da_x}^2} + \frac{da_y^2}{\sigma_{da_y}^2}, \quad (10)$$

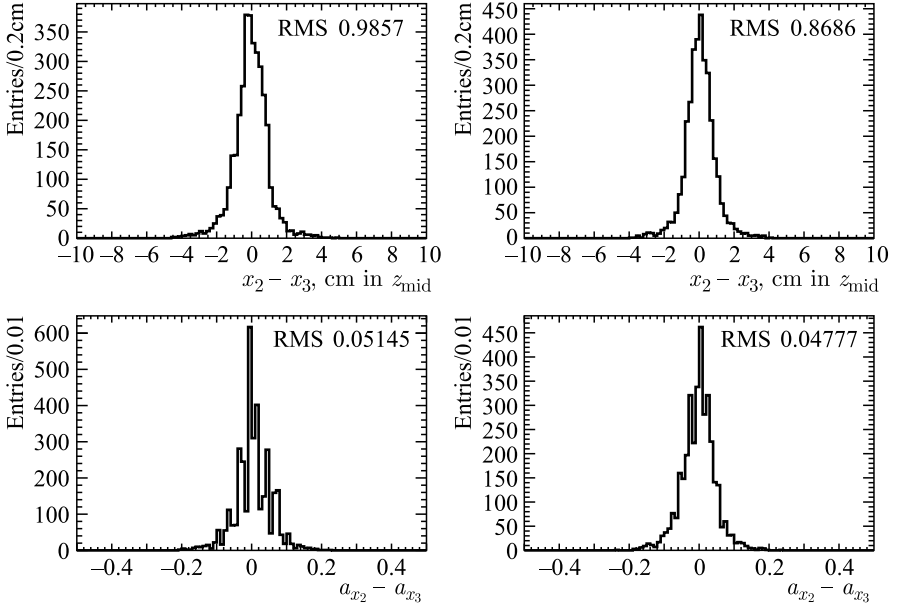


Рис. 10. Разница между координатами экстраполированных в среднюю плоскость z_{mid} сегментов (вверху) и параметрами углов сегментов (внизу) для камер MWPC2 и MWPC3 на данных Run3 с магнитным полем

где $\min \text{Dist } x$ — минимальное расстояние между треками по координате x , $\min \text{Dist } y$ — минимальное расстояние между треками по координате y , da_x — минимальная разница наклонов между треками в плоскости XOZ , da_y — минимальная разница наклонов между треками в плоскости YOZ , σ — среднеквадратичные отклонения (RMS) этих величин, взятые из распределений на рис. 10.

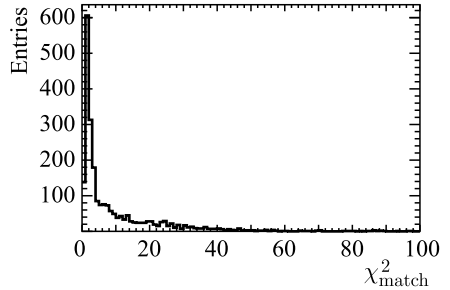


Рис. 11. Распределение χ^2_{match} на данных Run3 с магнитным полем ($B = 0$)

7. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МВРС-ТРЕКОВ В МИШЕНЬ ($z_{\text{Glob}} = 0$)

Еще одной оценкой качества реконструкции трека может быть его экстраполяция в мишень (начало координат). В этом случае необходимо учитывать влияние наклона трека на большом расстоянии от мишени до камеры.

Зная параметры восстановленного трека в каждой i -й камере MWPC, трек экстраполируют в его начало, т. е. в мишень при $z_{\text{Glob}} = 0$:

$$x_{i0} = a_{xi}(z_{\text{Glob}} - z_i) + b_{xi}, \quad y_{i0} = a_{yi}(z_{\text{Glob}} - z_i) + b_{yi}, \quad (11)$$

где x_{i0} и y_{i0} — координаты трека в мишени, z_i — координата i -й камеры вдоль оси Z , a_{xi} , a_{yi} — параметры наклона трека в i -й камере, b_{xi} , b_{yi} — параметры координаты трека в i -й камере, $i = 1, 2, 3$.

Данная экстраполяция используется для выравнивания камер относительно пучка и мишени на данных без магнитного поля.

8. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫРАВНИВАНИЕ КАМЕР MWPC В ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Так как экспериментальная установка является системой многих детекторов, их взаимное расположение может быть нарушено при сборке и установке, что может приводить к систематическому сдвигу регистрируемых данных. Определение и компенсация этих сдвигов математическим путем («выравнивание») — обязательное условие качественной реконструкции трека. При реконструкции трека необходимо учесть возможные сдвиги по координатам и углам каждой камеры из системы детекторов.

Для Run3 каждую камеру необходимо сдвинуть по координатам x и y и повернуть в плоскостях XOZ и YOZ в глобальной системе координат на величины, указанные в табл. 1.

Аналогично для Run2 данные представлены в табл. 2.

Таблица 1. Сдвиг камер MWPC в Run3

MWPC	x_{sh} , см	y_{sh} , см	$x_{\text{slopes h}}$	$y_{\text{slopes h}}$
Ch1	0	8,5	0,04	0
Ch2	73,9	0	-0,1055	-0,01
Ch3	-75,15	0,1	-0,097	-0,01

Таблица 2. Сдвиг камер MWPC в Run2

MWPC	x_{sh} , см	y_{sh} , см	$x_{\text{slopes h}}$	$y_{\text{slopes h}}$
Ch1	-0,6	8,0	0	0
Ch2	0	7,9	0	0
Ch3	-15,0	0,2	0	0

Сдвиг камер MWPC2 и MWPC3 после магнита на 73 см в Run3 необходим для повышения эффективности работы камер, так как частицы, вылетевшие после взаимодействия пучка с мишенью, отклоняются магнитным полем противоположно направлению оси x . В проведенных технических экспериментах рабочая область DCH, стоящих после камер MWPC, была подключена не полностью, и сдвиги необходимы для лучшей сшивки треков между детекторами.

9. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КАМЕР MWPC

Выбирались лучшие сегменты по критерию χ^2 в каждой камере, для них оценивалась эффективность для плоскости. Для этого использовался простой алгоритм. Присутствие или отсутствие срабатывания в плоскости дает вклад в эффективность или неэффективность этой плоскости. При этом для получения несмещенных оценок для треков-сегментов с минимальным числом точек (четыре) учитывался только вклад в неэффективность.

Пусть вероятность срабатывания плоскости p — одинаковая для всех плоскостей камеры. Тогда справедлива статистическая биномиальная формула расчета эффективности реконструкции сегмента в камере с минимум четырьмя точками [6]:

$$\varepsilon_{\text{ch}}(4/6) = p^6 + C_6^1 p^5 (1-p) + C_6^2 p^4 (1-p)^2, \quad (12)$$

где p^6 — вероятность собранных шеститочечных сегментов; $C_6^1 p^5 (1-p)$ — пятиточечных сегментов; $C_6^2 p^4 (1-p)^2$ — четырехточечных сегментов.

Оценки эффективности работы каждой камеры в техническом сеансе-2015 представлены на рис. 12. В Run2 камера MWPC3 имела плохо работающие («шумящие») плоскости $V+$, $U-$, $V-$. Поэтому в этой камере при реконструкции требовали условие минимум пяти точек в сегменте, а в следующем сеансе Run3 эта камера была переставлена в другую область для исследования свойств пучка до мишени.

10. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

Как сказано выше, две камеры MWPC в Run2 располагались до магнита. Поэтому с их помощью были измерены параметры пучка — поперечные размеры и его угловой разброс.

Для выполнения поставленной задачи из сегментов в каждой из двух камер были выбраны лучшие пары с минимальной сшивкой (10), включающей условие на минимальное расстояние и разброс по углам между сегментами. После чего производилось фитирование прямой линией по всем измерениям

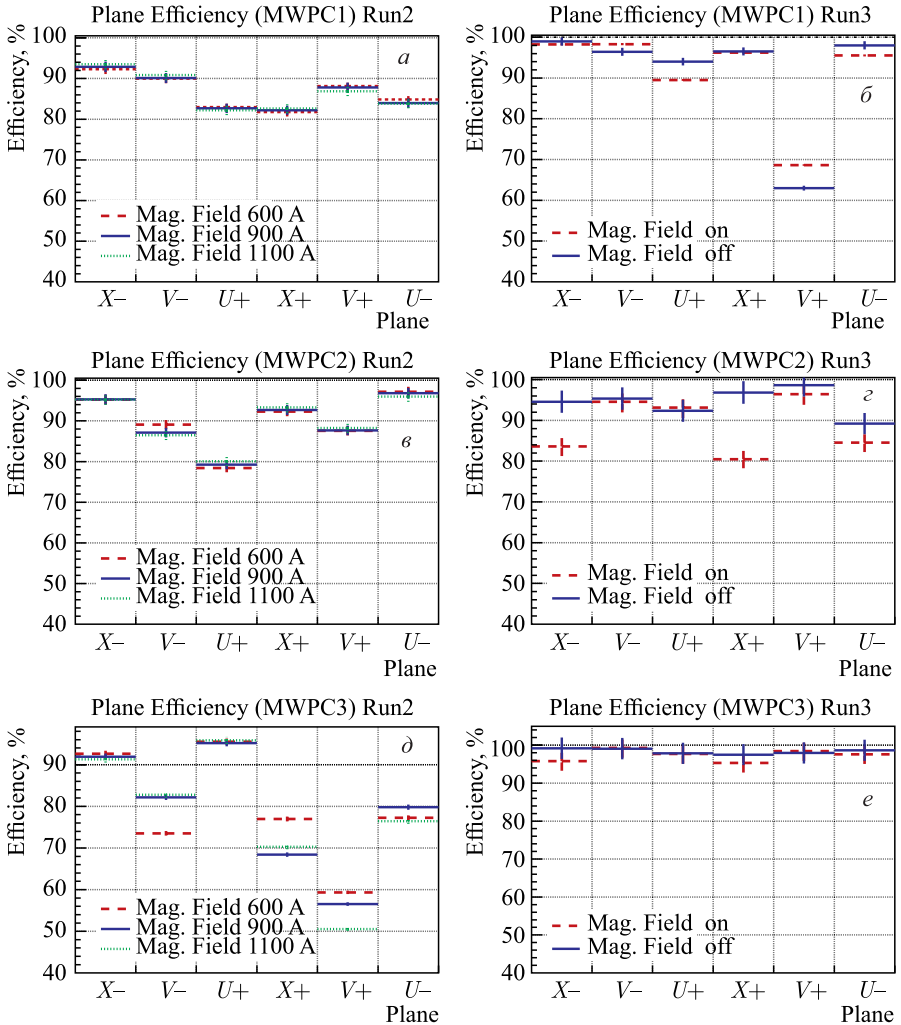


Рис. 12. Оценка эффективности работы для каждой плоскости и для каждой камеры MWPC в технических сеансах Run2 и Run3 с различным магнитным полем и без него

(минимум 8 из 12 возможных точек на трек) по двум камерам. Лучший трек был отобран по распределению χ^2 (8), представленному на рис. 13.

Для этого была выбрана новая локальная система координат с геометрическим центром между камерами — новый локальный ноль системы ка-

Рис. 13. Распределение χ^2 на данных Run2 без магнитного поля ($B = 0$) для фитированных треков локальной системы по камерам до магнита

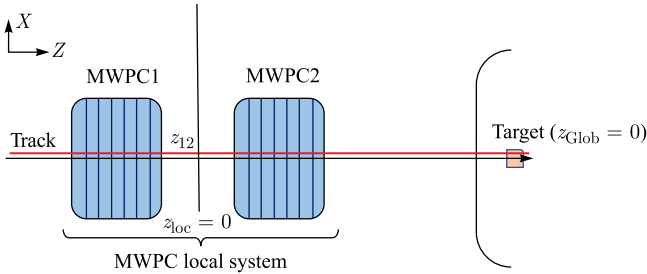
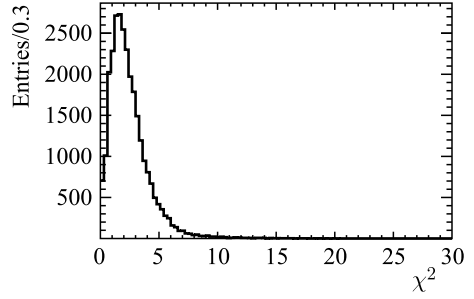


Рис. 14. Положение глобальной системы координат с z_{Glob} и локальной системы координат камер MWPC с $z_{\text{loc}} = 0$

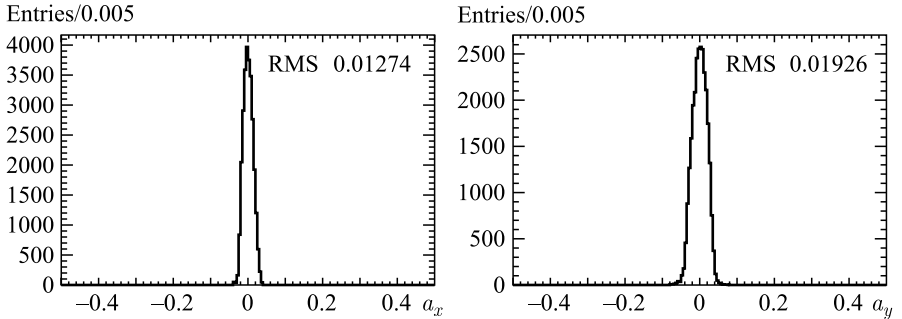


Рис. 15. Угловые параметры пучка в плоскостях XOZ и YOZ на данных MWPC

мер ($z_{\text{loc}} = 0$). Эта координата, в глобальной системе координат с центром $z_{\text{Glob}} = 0$ в мишени, обозначена z_{12} (см. рис. 14).

Найдя лучший трек, можно оценить угловые параметры пучка (рис. 15).

С известными параметрами восстановленного трека в системе камер MWPC трек был экстраполирован в начало глобальной системы координат,

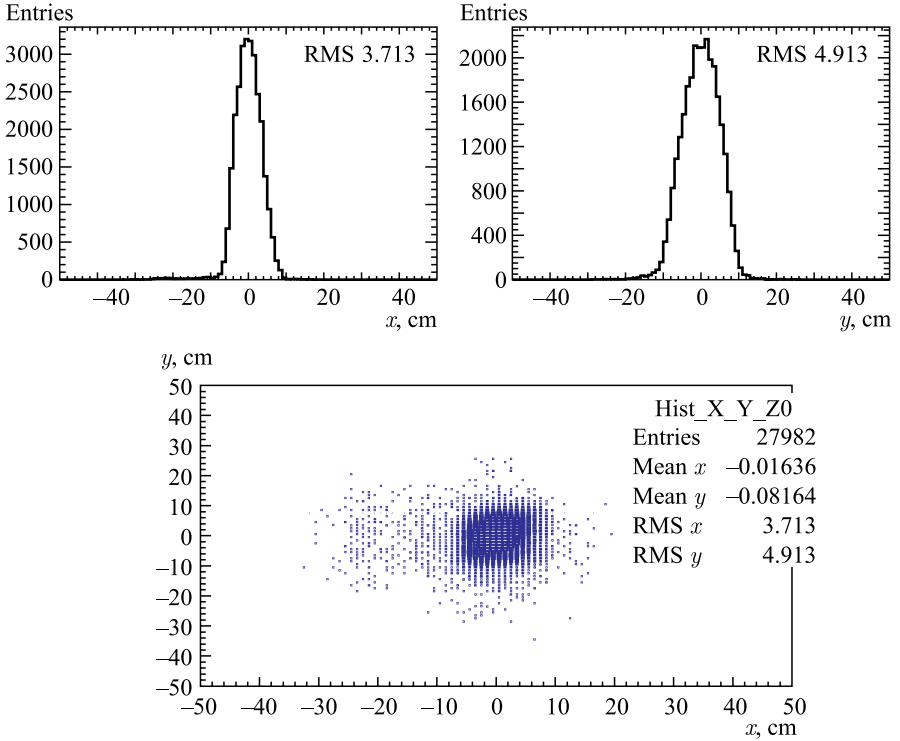


Рис. 16. Поперечные размеры пучка в области мишени при $z_{\text{Glob}} = 0$

т. е. в мишень при $z_{\text{Glob}} = 0$:

$$X_0 = a_x(z_{\text{Glob}} - z_{12}) + b_x, \quad Y_0 = a_y(z_{\text{Glob}} - z_{12}) + b_y, \quad (13)$$

где X_0 и Y_0 — координаты трека в мишени, a_x , a_y — параметры наклона трека, b_x , b_y — параметры положения трека в локальной системе координат ($z_{\text{loc}} = 0$).

Распределения поперечных размеров пучка в области мишени представлены на рис. 16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц в системе многопроволочных пропорциональных камер в эксперименте VM@N. С помощью реконструированных траекторий выполнено геометрическое выравнивание камер в глобальной системе координат. Рассчитана эффективность регистрации треков для каждой плоскости камер MWPC. С помощью

разработанного алгоритма на экспериментальных данных, полученных во взаимодействиях дейтронов и ионов углерода с углеродной и медной мишенями, реконструированы треки пучка до взаимодействия в мишени и траектории заряженных частиц после взаимодействия.

Измерены параметры пучка (поперечные размеры и угловой разброс).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЛФВЭ ОИЯИ М. Капишину, С. Мерцу и В. Бабкину за полезные обсуждения в процессе выполнения данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron, BM@N Project, JINR Internal Doc., 2016.
2. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers // *Experimental Techniques in High Energy Physics* 10.5170/CERN-1977-009. P. 79–188.
3. *Bouclier, R., Charpak, G., Chesi, E., Dumps, L., Fischer, H. G., Hilke, H. J., Innocenti, P. G., Maurin, G., Minten, A., Naumann, L., Piuze, F., Santiard, J. C., Ullaland, O.* Proportional Chambers for a 500 000-wire detector // *NIM*. 1974. P. 235–244.
4. *Бабкин В. А., Базылев С. Н., Буряков М. Г., Волгин С. В., Головатюк В. М., Дмитриев А. В., Дулов П. О., Егоров Д. С., Лобастов С. П., Петров В. А., Румянцев М. М., Слепнев В. М., Слепнев И. В., Терлецкий А. В., Филиппов И. А., Шутков А. В., Щитунев А. В., Юревич В. И.* Установка для испытания детекторов на пучках нуклотрона «Тестовый канал МРД». Препринт ОИЯИ Р13-2016-37. Дубна, 2016.
5. *Зубов К. А., Каржавин В. Ю., Мовчан С. А.* Математическое обеспечение многопроводочной пропорциональной камеры с катодным считыванием информации. Препринт ОИЯИ Р10-99-118. Дубна, 1999.
6. *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.

Получено 3 мая 2017 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 22.06.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 255 экз. Заказ № 59136.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/