



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2019– 1

М.Ю. Боголюбский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов,
А.А. Иванилов, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын,
В.И. Крышкин, Н.В. Кулагин, Д.И. Паталаха, К.А. Романишин,
В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович

**Определение импульса заряженных частиц по таблице
решений с полиномиальной аппроксимацией
на установке ФОДС**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2019

Аннотация

Боголюбский М.Ю. и др. Определение импульса заряженных частиц по таблице решений с полиномиальной аппроксимацией на установке ФОДС: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019–1. – Протвино, 2019. – 13 с., 7 рис., библиогр.: 18.

В данной работе обсуждаются вопросы определения импульса заряженных частиц на установке ФОДС. Координатные детекторы располагаются на выходе анализирующего магнита, на его входе установлен профилометр положения центра тяжести пучка на мишени за цикл ускорителя. Для получения регулярной сетки значений вектора магнитного поля, измеренного датчиком Холла в его части, применена программа конечно-элементного анализа ANSYS. Определение импульса заряженных частиц сделано на основе алгоритма таблиц решений с полиномиальной аппроксимацией. Получение таблиц проводится в рамках метода Монте-Карло и сводится к трассировке движения частицы заранее заданного импульса через магнитное поле. Приведены точности определения импульса частицы и углов её рождения с учетом вкладов многократного рассеяния, ошибок измерений и погрешности аппроксимации. Показаны распределения восстановленных траекторий в мишень и импульсный спектр частиц.

Abstract

Bogolyubsky M.Yu. et al. Determination of momentum of charged particles according to the solution table with polynomial approximation at the FODS facility: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019–1. – Protvino, 2019. – p. 13, figs. 7, refs.: 18.

This paper discusses the issues of determining momentum of charged particles at the FODS facility. Coordinate detectors are located at the output of the analyzing magnet, at its entrance there is a profilometer of the center of gravity of the beam on the target during an accelerator cycle. To obtain a regular grid of magnetic field the vector values of field measured with the Hall sensor in a part of the magnet we use the program of the finite element analysis ANSYS. The determination of momentum of charged particles is made on the basis of an algorithm of solution tables with polynomial approximation. The obtaining of tables is carried out in the framework of the Monte Carlo method reduced to tracing of particles with a predetermined impulse through magnetic field. The accuracy of determining momentum of particles and angles of its birth are given taking into account the contributions from multiple scattering, measurement errors and approximation uncertainties. We show the distribution of recovered trajectories in the target and the momentum spectrum of particles.

Введение

Для изучения процессов одиночного и парного рождения адронов в жестких процессах на ускорительном комплексе У-70 в Институте создан двухплечевой поворотный спектрометр ФОДС [1]. В настоящее время с целью исследования редких процессов [2] на спектрометре ФОДС проведена глубокая модернизация. В частности, трековая система, построенная ранее из дрейфовых камер (ДК) [3], дополнена модулями из дрейфовых трубок (ДТ). Используемые нами ДТ были разработаны и изготовлены в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (Протвино) [4], [5] для экспериментов на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН, Швейцария) [6]. Оборудование установки ФОДС также задействовано в эксперименте по изучению рождения вперед адронов и ядерных фрагментов (в том числе в коммулятивной области) в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях. Канал 22 ускорительного комплекса У-70 работает в этом случае спектрометром вторичных частиц и ядер [7].

Импульс заряженной частицы на установке ФОДС определяется по величине поля в спектрометрическом магните СП12М и значениям её координат в трековых детекторах [8] и ионизационных профилометрах [9]. Поле измерялось при помощи датчиков Холла только в части магнита. Значения поля в узлах сетки измерений аппроксимировались на весь объём магнита на основе свойств симметрии.

Данная работа посвящена процедуре определения импульса заряженной частицы на установке ФОДС.

1. Установка ФОДС

Анализирующий магнит установки ФОДС является переработкой магнита СП-12А. Размеры его входного окна в горизонтальной плоскости увеличены в 2 раза, а центральная часть заложена вставкой из вольфрама длиной 75 см и железа длиной 3.5 м. В результате модернизации более чем в 3.5 раза увеличена апертура установки, которая достигает сейчас для каждого плеча 7.4 мстерад.

Новая трековая система ФОДС состоит из 20 плоскостей дрейфовых камер [3] размером 0.5 м х 0.5 м, число каналов 320, и модулей из 30 плоскостей дрейфовых алюминиевых трубок диаметром 30 мм [4], [5]. Общее количество трубок – 1200, длина их 1 м и 1.3 м, толщина стенок – 0.4 мм, диаметр анодной проволоки – 50 мкм. Трубки сгруппированы в дрейфовые станции, каждая из которых состоит из трех плоскостей, образующих сотовую структуру. Характеристики трубок ФОДС подробно изучались в работе [10]. ДК – камеры с распределённым потенциалом. Они состоят из двух идентичных плоскостей толщиной 8 мм, смещенных для устранения право-левой неопределенности на 15 мм, полуширину дрейфового промежутка, диаметр сигнальных проволок равен 20 мкм.

Трековые детекторы установлены после магнита на базе 3 м. В нашей работе [8] детально описана процедура получения координат в трековых детекторах и проведения траекторий на модифицированном спектрометре ФОДС, разработана также процедура определения поправок к его геодезии. Точность измерения траектории частицы на установке ФОДС составила 500 мкм.

Координата центра тяжести пучка за цикл ускорителя на установке определяется ионизационными профилометрами, расположенными перед мишенью.

В каждом плече ФОДС установлены по две плоскости сделанных из полос сцинтиллятора годоскопических счётчиков, спектрометр колец черенковского излучения (СКОЧ) [11], адронный калориметр [12] и мюонный фильтр.

2. Системы координат

На установке ФОДС используются глобальная система координат, ось Z которой направлена по пучку, а также локальные, связанные с её плечами (южным и северным). Оси Z последних проходят по центру плеча в направлении от мишени. Все системы координат – правые, и во всех ось Y направлена вертикально вверх. В глобальной системе задается положение центра мишени и центра профилометра. Оси Z локальных систем координат повернуты относительно оси Z глобальной (в горизонтальной плоскости XZ) на углы ϕ_0 (южное плечо) и ϕ_1 (северное плечо).

3. Магнитное поле установки ФОДС

Как сказано выше, поле, измеренное в части магнита, на основе свойств симметрии распространено на весь его объём. Для этого данные измерений анализировались в рамках программы конечно-элементного анализа ANSYS [13] для статических решений уравнения Максвелла с учетом граничных условий на разделе сред. Интерполяция значений компонент поля производилась по формуле для 3-мерного пространства [14]. Величина поля $f(x,y,z)$ в объёме куба единичных размеров находилась по значениям f_{ijk} в его вершинах. На рис. 1 показаны картины полученной аппроксимации компонент поля B_x , B_y , B_z магнита ФОДС (южное плечо) в системе координат плеча как функции расстояния R от начала координат при фиксированной вертикальной координате $y=0$ см для трёх лучей с углом ϕ относительно глобальной оси OZ в глобальной системе координат 13.5° (а,б,в), 11.5° (г,д,е) и 9.0° (ж,з,и). Ось плеча магнита повернута в горизонтальной плоскости относительно глобальной оси OZ на угол 11.4° .

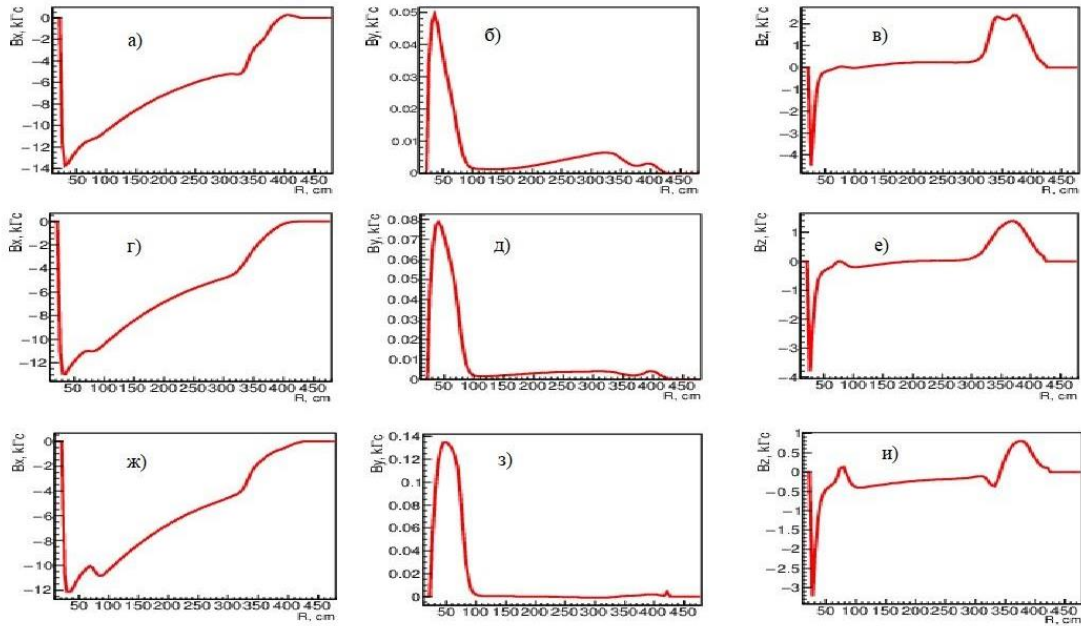


Рис. 1. Аппроксимации компонент B_x , B_y , B_z поля анализирующего магнита ФОДС (южное плечо) как функции расстояния от начала координат R при фиксированной вертикальной координате $y=0$ для трёх углов ϕ .

Таблицы поля заданы только в северном плече ФОДС для части магнита при $y > 0$. Из симметрии поля по y координате, компоненты его (B_x, B_y, B_z) для всего магнита записываются в виде:

$$\begin{cases} B_x(y) = B_x(-y) \\ B_y(y) = -B_y(-y) \\ B_z(y) = B_z(-y) \end{cases} \quad (1)$$

Из свойства этой же симметрии компоненты поля $(B_x^{(i)}, B_y^{(i)}, B_z^{(i)})$ в системе координат своего плеча в точке (x, y, z) , где индекс $i = 0, 1$ – номер плеча (южное, северное), соотносятся как:

$$\begin{cases} B_x^{(0)}(x, y, z) = B_x^{(1)}(-x, y, z) \\ B_y^{(0)}(x, y, z) = -B_y^{(1)}(-x, y, z) \\ B_z^{(0)}(x, y, z) = -B_z^{(1)}(-x, y, z) \end{cases} \quad (2)$$

В результате работы программы ANSIS была получена регулярная трехмерная сетка компонент поля в анализирующем магните установки.

Трассировка частиц через магнитное поле осуществлялась программой из пакета GEANT [15]. По ней также был рассчитан аксептанс установки ФОДС.

4. Определение импульса заряженной частицы

Обычно импульс заряженной частицы определяется по измерению кривизны ее траектории в магнитном поле. На установке ФОДС координатные детекторы расположены перед входом в анализирующий магнит и на его выходе. В этом случае может быть использован метод работы [16], в котором задаётся импульс частицы и некоторый набор измеряемых исходных её параметров. Затем рассчитывается движение частицы через магнит и выдаются соответствующие её параметры на выходе из магнита. Далее ищется функция решения, которая связывает импульс частицы с измеряемыми параметрами траектории. В качестве такой функции предлагается использовать полиномы Чебышева [16], [17] или полилинейную интерполяцию [17].

Другой подход, применяемый нами, состоит в том, что искомая функция решения представляется в виде таблиц от значений наблюдаемых величин. Для их аппроксимации используется полиномиальное разложение по этим величинам, коэффициенты которого находятся методом наименьших квадратов [18]. Процедуру определения коэффициентов, проводимую в рамках моделирования методом Монте-Карло, можно рассматривать как обучение алгоритма. Проверка его проводится на независимо сгенерированных событиях. Функция решения – векторная величина, т.к. определяются все компоненты импульса.

Кратко остановимся на процедуре определения исходных параметров частицы на установке ФОДС. Для возможности выделения фоновых событий розыгрыш продольной координаты точки взаимодействия производился равномерно на интервале значительно превышающим толщину мишени. Поперечные координаты центра пучка разыгрывались равномерно по площади мишени диаметром 4 см, среднеквадратичная ширина пучка принималась равной 4 мм. Углы рожденной частицы Θ_x и Θ_y

разыгрывались равномерно в интервалах $|\Theta_x| < \Theta_x^{max}$ и $|\Theta_y| < \Theta_y^{max}$, где $\tan \Theta_x = P_x/P_z$ и $\Theta_y = P_y/P_z$, а P_x, P_y, P_z – компоненты импульса частицы в глобальной системе координат, Θ_x^{max} и Θ_y^{max} – величины максимальной угловой апертуры магнита. Количество событий N разыгрывалось в зависимости от импульса P в соответствии с распределением $dN/dP \sim \exp(-\alpha P)$ на интервале (1.5-70) ГэВ/с при $\alpha = 0.05$.

В алгоритме аппроксимации функции решений используется полином 4-й степени от шести измеренных переменных:

$$(K_x, B_x, K_y, B_y, X_p, Y_p), \quad (3)$$

где X_p и Y_p – поперечная координата центра тяжести пучка по данным профилометра в глобальной системе, K_x, B_x, K_y, B_y – параметры прямолинейной траектории частицы в системе плеча, определяемые трековой системой установки за магнитом:

$$\begin{cases} x = B_x + K_x \cdot z \\ y = B_y + K_y \cdot z \end{cases} \quad (4)$$

Вектор-функция решения f_k выбрана состоящей из 4-х компонент:

$$(1/P_{yz}, k_x, k_y, z - z_0), \quad (5)$$

где P_{yz} – импульс частицы в вертикальной плоскости YZ в системе плеча, k_x, k_y – тангенсы углов наклона трека в точке рождения в системе плеча в плоскостях XZ и YZ , z – продольная координата точки рождения в глобальной системе, z_0 – фиксированный параметр, задающий центр мишени.

Реализация алгоритма обучения проводилась методом Монте-Карло с розыгрышем параметров рожденной частицы с известным зарядом как указано выше с последующей ее трассировкой через магнит и определением параметров траектории на выходе магнита. Таким образом, при обучении являются заданными как вектор решений так и вектор исходных данных. Методом наименьших квадратов находятся коэффициенты полиномиальной аппроксимации компонент вектора решения (5) по компонентам вектора исходных данных (3) из требования минимальности отклонения полинома от известного решения.

Полная ошибка ΔP определения импульса частицы состоит из вкладов от многократного рассеяния, неопределенностей задания магнитного поля, положения

пучка по данным профилометров, ошибок определения параметров траектории частицы в трековой системе и погрешности аппроксимации.

Соответствующие оценки ΔP , полученные методом Монте-Карло на независимо сгенерированных событиях, не участвующих в обучении, при варьировании поперечной ширины пучка от 0 до 4 мм представлены на рис. 2. Видно, что основной вклад в ошибку вносит неопределённость в размерах пучка.

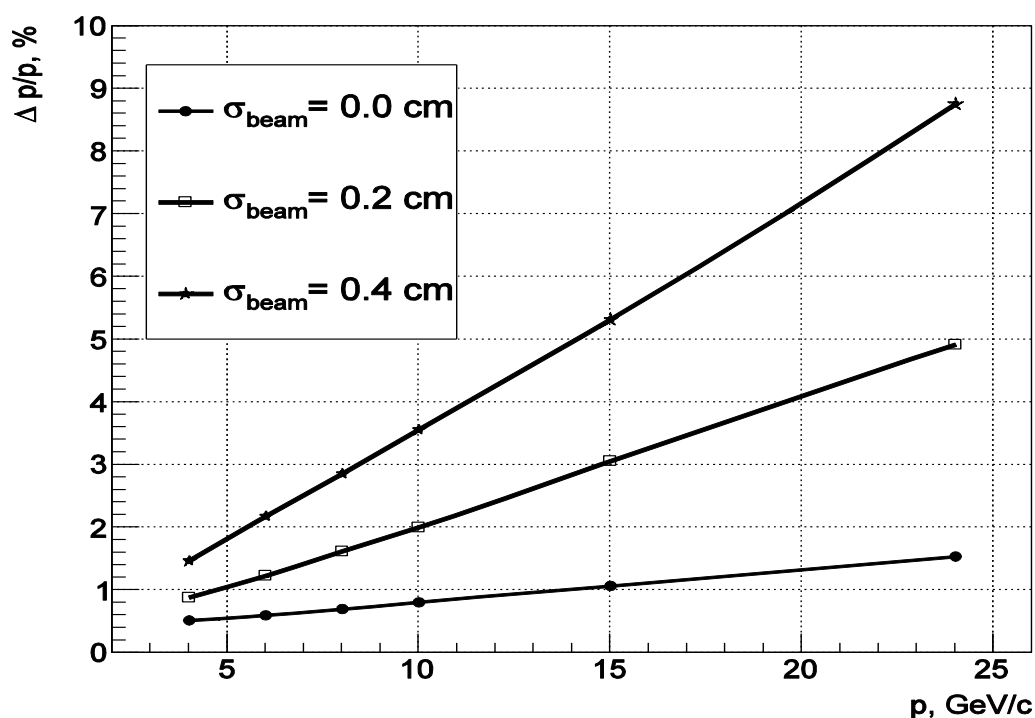


Рис. 2. Полная относительная ошибка $\Delta p/p$ определения импульса частицы P в зависимости от P при пространственной точности трекового детектора 500 мкм и поперечной ширине пучка от 0 до 4 мм (моделирование методом Монте-Карло).

Аналогичные оценки ошибок определения полярного и азимутального углов трека в точке рождения в зависимости от импульса P показаны на рис. 3 и 4.

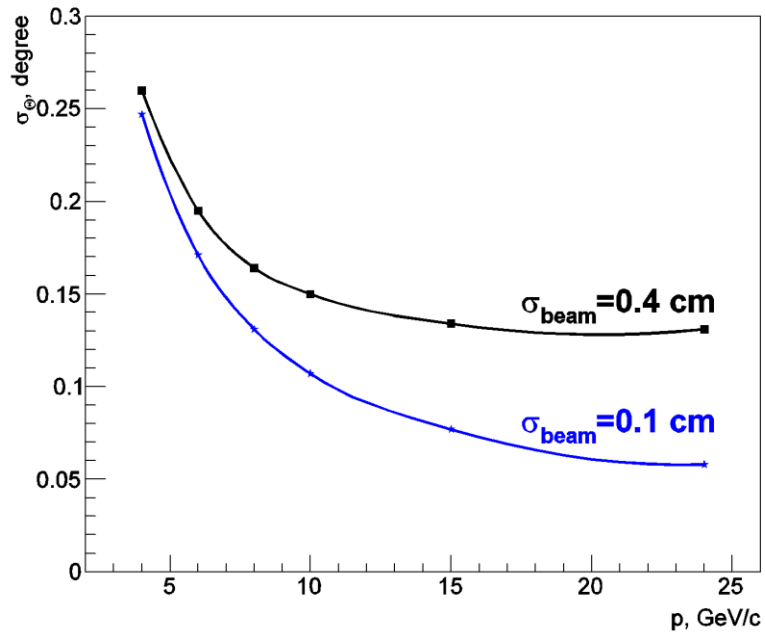


Рис. 3. Зависимость ошибки определения полярного угла трека в точке рождения от импульса P при пространственной точности детекторов 500 мкм, поперечной ширине пучка 1 и 4 мм (моделирование методом Монте-Карло).

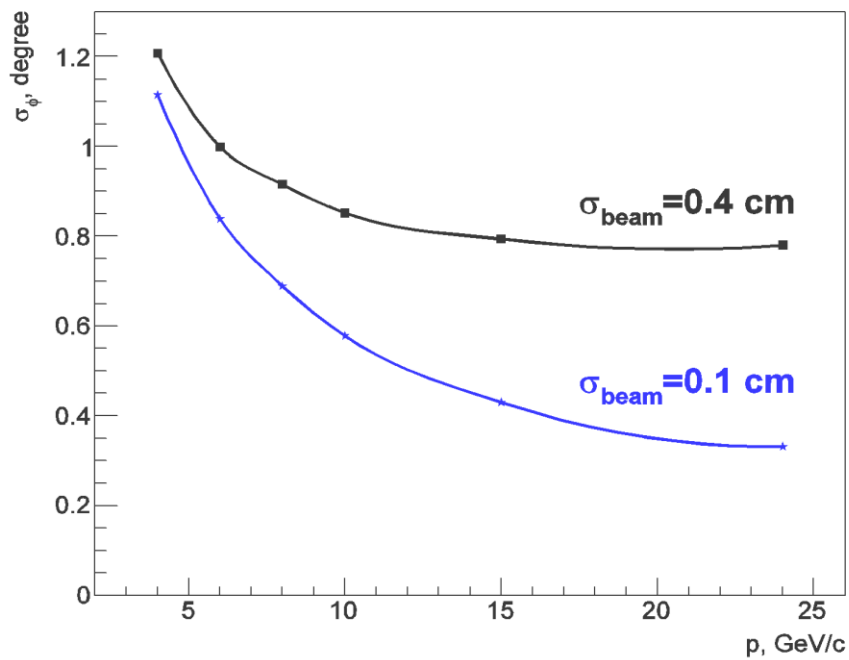


Рис. 4. Зависимость ошибки определения азимутального угла трека в точке рождения от импульса P при пространственной точности 500 мкм и поперечной ширине пучка 1 и 4 мм (моделирование методом Монте-Карло).

Для иллюстрации работы трековой системы ФОДС и программы реконструкции траекторий частиц в мишень на рис. 5 приведено распределение частиц вдоль оси Y в плоскости плеча YZ . Мишень W , толщина 0.1λ , магнитное поле включено. Видны два пика, больший из них относится к частицам с положительным зарядом (их всегда больше), меньший – к отрицательным. Небольшой прилив в центре связан с конверсией гамма-квантов в веществе спектрометра.

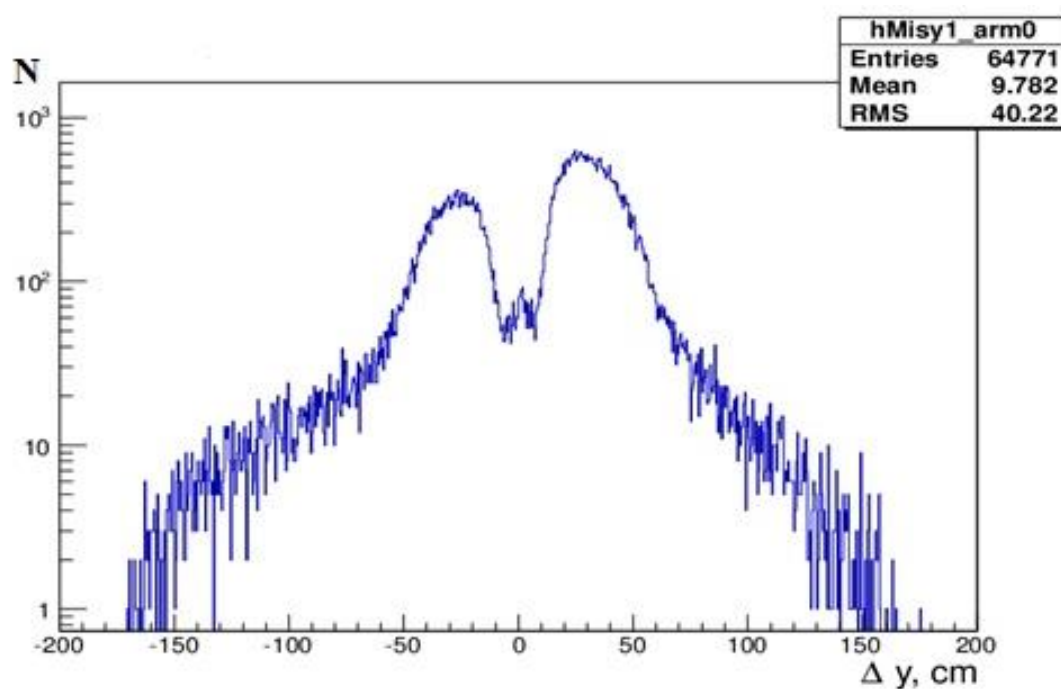


Рис. 5. Распределение траекторий частиц вдоль оси Y в системе плеча ФОДС в центре мишени с магнитное поле.

В тех же условиях распределение реконструированных траекторий частиц вдоль оси Z в глобальной системе координат приведено на рис. 6, а типичный импульсный спектр частиц на установке ФОДС показан на рис.7.

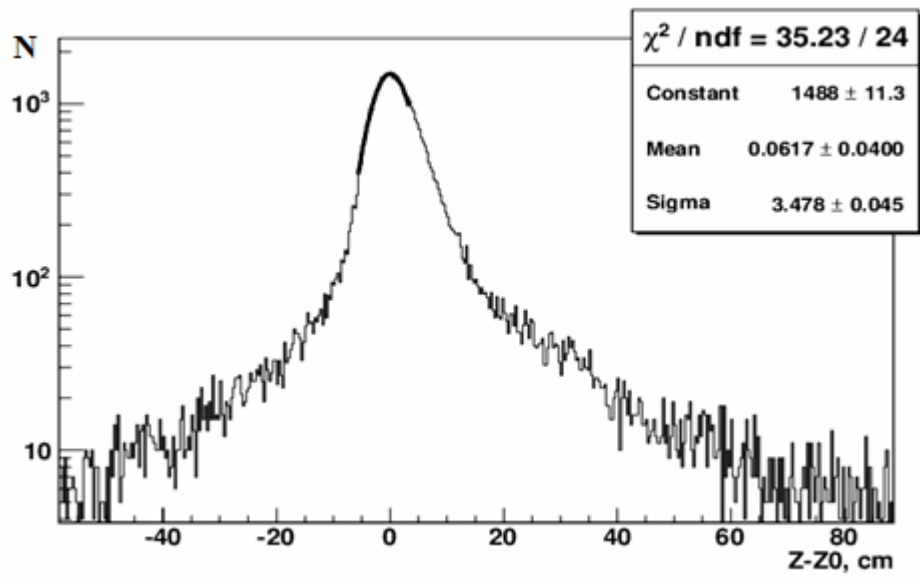


Рис. 6. Распределение траекторий частиц относительно мишени вдоль оси Z.

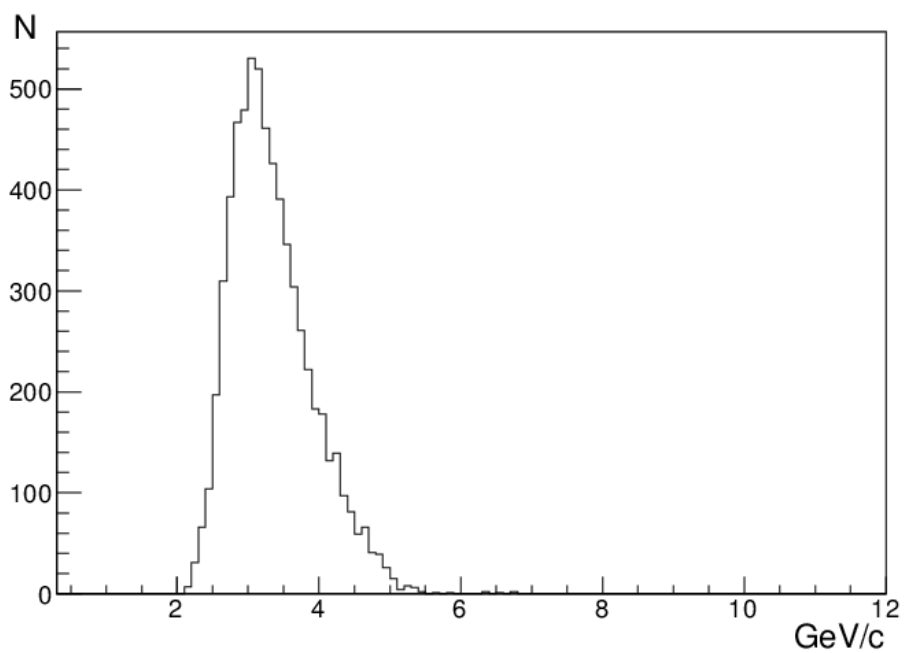


Рис. 7. Импульсный спектр частиц на установке ФОДС.

Заключение

Для модернизированной установки ФОДС (переделан анализирующий магнит, создана новая трековая система и регистрирующая электроника) разработан комплекс программ для определения импульса частиц. Траектория частицы измеряется по дрейфовым детекторам, расположенным на выходе магнита и профилометрам, определяющим координату центра тяжести пучка на мишени. Поле, изеренное датчиками Холла в части магнита, экстраполировано на весь его объем по программе конечно-элементного анализа ANSYS. Для уменьшения объема измерений использовались свойства симметрии поля.

Импульс заряженных частиц в магнитном поле установки ФОДС определяется на основе алгоритма таблицы решений с полиномиальной аппроксимацией. Для плучения таблиц в рамках метода Монте-Карло трассируется движение частиц заранее заданного импульса через магнитное поле. Проверка алгоритма производится на независимо сгенерированных событиях. Показаны точности определения импульса частицы и ее углов рождения с учетом вкладов погрешности алгоритма таблицы решений и ошибок измерений.

Приведены распределения реконструированных траекторий частиц в мишень и импульсный спектр.

Мы выражаем благодарность А.Д. Рябову и Т.Д. Рябовой за анализ результатов магнитных измерений в рамках программы конечно-элементного анализа ANSYS и получение регулярной сетки значений вектора магнитного поля.

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00215.

Список литературы

- [1] Абрамов В.В., Балдин Б.Ю., Бузулуцков А.Ф., Волков А.А., Глебов В.Ю., Гончаров П.И., Гуржиев А.Н., Дышкант А.С., Евдокимов В.Н., Ефимов А.О., Корнеев Ю.П., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Мутафян М.И., Подставков В.М., Ронжин А.И., Суляев Р.М., Турчанович Л.К. – Препринт ИФВЭ ОММС 91-144. Протвино, 1991; // ПТЭ, 1992, том 35, № 6, с. 75-88.

- [2] Балдин А.А., Бердников Я.А., Берлёв А.И., Бордановский А.Ю., Борзунов Ю.Т., Волков А.А., Ефремов В.П., Иванов А.Е., Ким В.Т., Константинов А.В., Калинин А.Ю., Кораблёв А.В., Корешев В.И., Криницын А.Н., Крышкин В.И., Кудашкин И.В., Кулагин Н.В., Логинов А.А., Мурзин В.А., Орешкин В.А., Плеханов Е.Б., Скворцов В.В., Талов В.В., Турчанович Л.К., Шиманский С.С., Программа корреляционных исследований при взаимодействии адронов и ядер при больших Хт. – Препринт ИФВЭ 2011-32 ОЭФ, Протвино, 2011.
- [3] Алексеев А.В., Балдин Б.Ю., Битюков С.И., Бушнин Ю.Б., Глебов В.Ю., Дунайцев А.Ф., Коноплянников А.К., Крышкин В.И., Кульман Н.Ю., Ланшиков Г.И., Мяслицин В.К., Рыбаков В.Г., Суляев Р.М., Сытин А.Н., Турчанович Л.К. Система дрейфовых камер спектрометра ФОДС. – Препринт ИФВЭ 78-70, Серпухов, 1978; // ПТЭ, 1980, №4, с.27.
- [4] J. Bensingher, N. Bojko, A. Borisov., R. Fachroutdinov, S. Goryatchev, V. Goryatchev, V. Guschin, K. Hashemi, A. Kojine, A. Kononov, A. Larionov, E. Paramoshkina, A. Pilaev, N. Skvorodnev, A. Tchougouev, H. Wellenstein. // Nucl. Instr. Meth. A494 (2002) 480-486.
- [5] A. Borisov, R. Fachroutdinov, A. Kojine, A. Larionov, A. Pilaev, V. Rybatchenko, Yu. Salomatin. // Nucl. Instr. Meth. A494 (202) 214-217.
- [6] ATLAS Muon collaboration, Technical Design Report, CERN/LHC 97-22, Geneva, 1997.
- [7] М.Ю. Боголюбский, А.Ю. Бордановский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, В.П. Ефремов, А.А. Иванилов, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, Н.В. Кулагин, Д.И. Паталаха, В.В. Скворцов, В.В.Талов, Л.К. Турчанович. // ЯФ 2017, Т.80, №3, с. 239-244; // Physics of Atomic Nuclei 2017, vol. 80. №3, pp. 455-460.
- [8] М.Ю. Боголюбский, А.А. Волков, Д.И. Елумахов, В.П. Ефремов, А.А. Иванилов, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, Н.В. Кулагин, Д.И. Паталаха, В.В. Скворцов, В.В.Талов, Л.К. Турчанович. Реконструкция треков в детекторе на дрейфовых камерах и трубках модифицированной установки ФОДС на ускорителе У – 70 ИФВЭ (направлено в ПТЭ).
- [9] А.А.Волков, В.П.Ефремов, Н.С.Иванова, А.Ю.Калинин, А.В.Кораблёв, А.В.Кошелев, А.Н.Криницын, В.И.Крышкин, Н.В.Кулагин, А.Ф.Лукьянцев, С.В.Маконин, А.А.Матюшин, В.П.Милюткин, Ю.А.Мишагин, В.С.Селезнев, В.В.Скворцов, А.Ю.Сотников, В.В.Талов, Л.К.Турчанович. Мониторы интенсивного пучка установки ФОДС. // ПТЭ, 2012, № 2.
- [10] М.Ю. Боголюбский, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын, А.А. Морщинов, В.В.Талов, Л.К. Турчанович. // Приборы и техника эксперимента, 2015, №6, с. 13-19; //Instruments and Experimental Techniques, V. 58, No 6, pp. 719-725.

- [11] V.V. Abramov, A.V. Alekseev, B.Yu. Baldin, V.G. Vasil'chenko, A.A. Volkov, Yu.N. Vrazhnov, A.O. Efimov, Yu.P. Korneev, V.I. Kryshkin, V.E. Rakhmatov, A.I. Ronzhin, V.I. Rykalin and R.M. Sylyayev. // Nucl. Instr. Meth. A235 (1985) 497-501.
- [12] А.А. Волков, А.Ю. Калинин, А.В. Кораблёв, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович. // ПТЭ, 2010, № 4, с. 37-42;
<http://naukarus.com/adronnye-kalorimetry-ustanovki-fods>
- [13] <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>
- [14] https://ru.wikipedia.org/wiki/Трилинейная_интерполяция
- [15] <https://geant4.web.cern.ch/geant4/support/download.shtml>
- [16] Lechanoine C., Martin M., Wind H. // Nucl. Instr. Meth. v. 69 (1969) 122-124.
- [17] А.М. Соколов. – Препринт КИЯ-04-4, Киев, 2004.
- [18] А. А. Волков, Докторская диссертация, ИФВЭ, Протвино, 2006.

Рукопись поступила 6 февраля 2019 г.

М.Ю. Боголюбский и др.

Определение импульса заряженных частиц по таблице решений с полиномиальной аппроксимацией на установке ФОДС.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 09.02.2019. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1, Уч.– изд.л. 1,44. Тираж 80. Заказ 1. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2019-1,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019
