

УДК 539.12, 539.1.08

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ SPD ЭКСПЕРИМЕНТА

В. Ф. Андреев, С. Г. Герасимов

В статье приводятся результаты работы программного обеспечения, предназначенного для определения параметров заряженных треков проектируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА, строящемся в Дубне. Использование данной программы позволяет оперативно моделировать различные конфигурации как магнитного поля, так и трековой системы SPD эксперимента и, таким образом, определить оптимальную структуру для лучшей реконструкции треков.

Ключевые слова: реконструкция треков, фильтр Калмана, фитирование треков, Монте-Карло моделирование, НИКА.

Введение. Основной целью планируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА является изучение спин-зависимых структурных функций нуклонов и других спиновых эффектов в протон-протонных и дейтрон-дейтронных взаимодействиях с поляризованными и неполяризованными пучками частиц [1]. При этом полная энергия взаимодействия в системе центра масс будет достигать $\sqrt{s} = 27$ ГэВ, а максимальная светимость будет равна $L = 10^{32}$ см⁻²с⁻¹. Следующие физические процессы предлагается использовать для изучения данных эффектов: рождение лептонных пар в процессах Дрелл-Яна, рождение J/Ψ мезонов и других состояний чармония, рождение прямых фотонов, а также рождение нейтральных пионов (π^0) и заряженных адронов с большими поперечными импульсами. Как показывает опыт существующих и планируемых экспериментов в данной области исследований, например COMPASS [2], достижение высокой точности в измерении характеристик вторичных частиц (импульс, углы вылета), а также разрешение по эффективной массе являются важнейшими характеристиками эксперимента.

Реконструкция треков заряженных частиц является важной частью большинства экспериментов в физике высоких энергий и, в общем виде, эту задачу можно под-

разделить на две основные части: нахождение кандидатов в треки (track finding) и определение параметров треков с помощью программ фитирования (track fitting). В существующих экспериментах используются различные алгоритмы для определения параметров треков, но наиболее распространенным из них является метод фильтра Калмана и различные его модификации [3, 4]. Данный метод является эффективным рекурсивным алгоритмом, оценивающим вектор состояния динамической системы, используя при этом ряд последовательных измерений и их матрицы ошибок. Мы также предлагаем использовать метод фильтра Калмана для определения параметров треков в SPD эксперименте.

Процедура нахождения параметров треков. Для разработки и создания полноценной программы реконструкции треков для конкретного эксперимента требуется большое количество времени и усилий, и поэтому на начальном этапе проектирования и исследования потенциальных возможностей эксперимента, а также для оптимизации геометрии трековых детекторов, можно использовать существующие пакеты фитирования треков. Одной из таких программ, созданной на основе открытого программного обеспечения (open-source framework), является программа Genfit (Generic Track-Fitting Toolkit) [5], элементы которой были адаптированы и использованы в нашей работе.

Для реализации данного подхода были созданы специализированные программы (standalone) для определения параметров треков на основе алгоритма фильтра Калмана как для различных конфигураций магнитного поля [6], так и самой трековой системы SPD эксперимента, также был написан интерфейс для чтения входных данных. В качестве входных данных программа фитирования использует результаты Монте-Карло моделирования трековой системы SPD эксперимента, полученных с помощью пакета программ SPDroot [7]. Пакет SPDroot создан на основе программы моделирования GEANT4 [8] и используется для описания геометрии и моделирования отклика различных детекторов SPD эксперимента. Дополнительно были созданы программные средства визуализации карты магнитного поля, материалов и траекторий заряженных частиц внутри SPD эксперимента.

Предполагается, что трековая система SPD эксперимента будет состоять из следующих основных элементов:

- вершинный кремниевый детектор будет содержать 5 цилиндрических слоев, расположенных вдоль z оси, в центральной части (barrel) и 5-ти дисков в каждой из торцевых (передней и задней) частях установки. Толщина каждого слоя кремниевого детектора, как предполагается, будет составлять 300 мкм;

- трековая система в центральной части установки может состоять из различного числа слоев так называемых соломенных трубочек (straw-tube) детекторов, расположенных вокруг центральной части вершинного детектора. Предполагается, что диаметр каждого “строу” детектора будет равен 10 мм. Необходимое количество слоев в центральной части трековой системы будет оптимизировано на основе Монте-Карло моделирования и требования наилучшей реконструкции заряженных треков;

- трековая система в торцевой части установки будет состоять из 3-х станций, каждая из которых, как предполагается, будет содержать 8 слоев “строу” детекторов в передней и задней частях SPD установки.

Для определения параметров треков с использованием фильтра Калмана и специального программного обеспечения использовалась следующая последовательная процедура:

- моделирование отклика и получение Монте-Карло (МС) хитов в трековом и вершинном детекторах SPD эксперимента при помощи программы SPDroot;
- использование этих МС хитов в качестве входных данных в программе фитирования треков после преобразования посредством программного интерфейса;
- фитирование треков при помощи вышеупомянутой программы на основе фильтра Калмана и определение параметров заряженных треков для различных конфигураций магнитного поля и геометрии трековых детекторов.

Дополнительно к параметрам МС хитов, полученных при моделировании в программе SPDroot, было добавлено пространственное разрешение в 150 мкм для трекового и 50 мкм для вершинного детекторов, соответственно. Таким образом, данная процедура позволяет учитывать как влияние вещества, из которого состоят различные детекторы, так и влияние пространственного разрешения трековых детекторов при определении параметров реконструированных треков.

Исследование различных конфигураций магнитного поля SPD эксперимента. На этапе проектирования и оптимизации трековой системы SPD эксперимента следующие общие требования могут быть сформулированы при рассмотрении различных конфигураций: трековая система должна обеспечить реконструкцию параметров треков с хорошей точностью и в широком диапазоне энергий частиц, а также обеспечить высокую точность реконструкции как первичной, так и вторичных вершин взаимодействий. В то же время трековая система должна быть достаточно прозрачна для фотонов из области первичного взаимодействия.

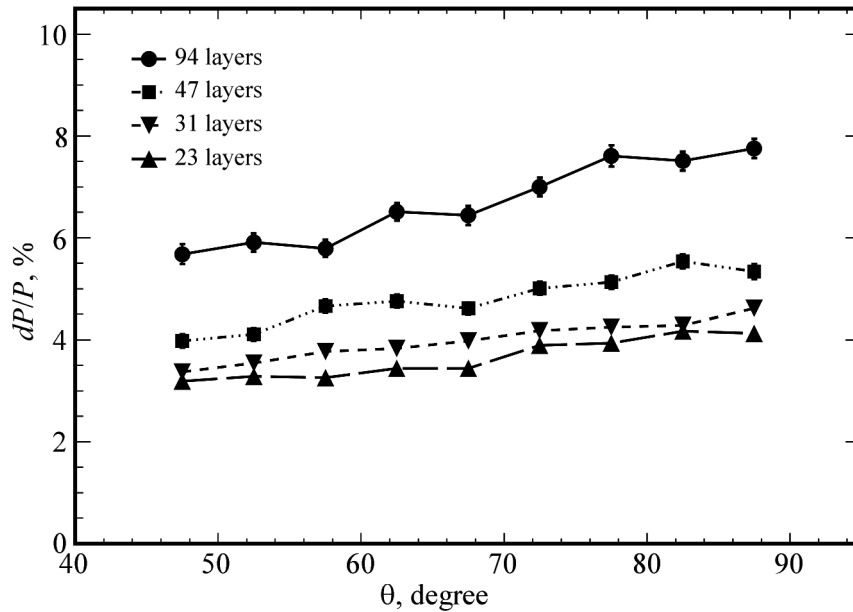


Рис. 1: Зависимость импульсного разрешения в центральной части трековой системы SPD эксперимента для мюонов с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла θ и различного числа чувствительных “строу” слоев: ● – 94 слоя; ■ – 47 слоев; ▼ – 31 слой; ▲ – 23 слоя.

На первом этапе нами было рассмотрено влияние количества “строу” слоев в центральной части трековой системы на разрешение по импульсу реконструированной частицы для так называемой гибридной конфигурации магнитного поля, когда поле в центральной части установки является тороидальным, а поле в ее торцевых частях – соленоидальным, формируемое двумя дополнительными катушками с каждой стороны. В программе SPDroot моделировалось разное число чувствительных слоев в трековой системе (94, 47, 31 и 23 слоя, соответственно) и определялось влияние количества слоев на импульсное разрешение заряженных частиц в зависимости от полярного угла θ . Результаты, представленные на рис. 1 (усредненные по азимутальному углу φ) для заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с, ясно показывают, что с уменьшением числа слоев в трековой системе наблюдается улучшение в импульсном разрешении, что связывается с уменьшением количества пассивного вещества и, следовательно, с уменьшением влияния многократного рассеяния на разрешение. Также наблюдается слабая зависимость импульсного разрешения от полярного угла θ , что является также важной характеристикой данной гибридной конфигурации магнитной системы. Здесь необходимо отметить следующее – наблюдаемое ухудшение импульсного разрешения

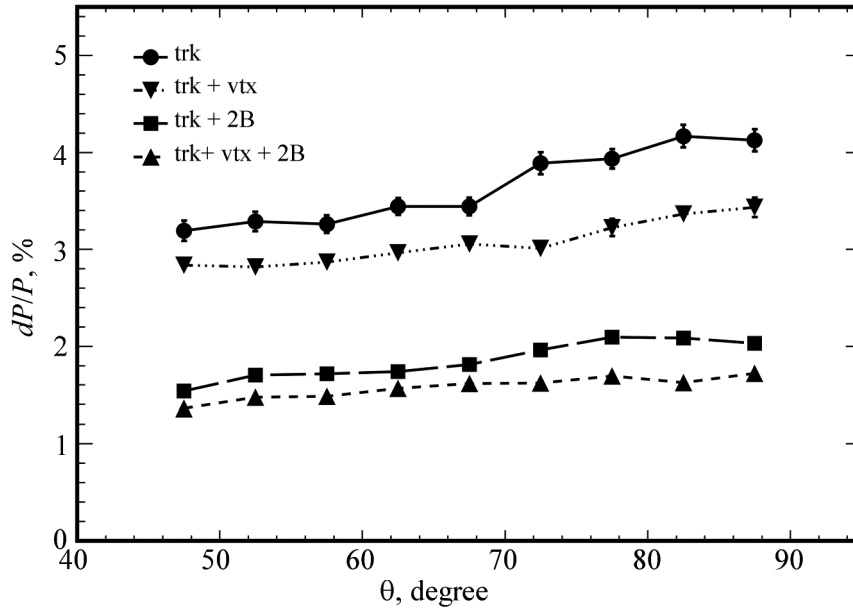


Рис. 2: Импульсное разрешение для заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла θ : ● – конфигурация трековой системы 1); ▼ – конфигурация трековой системы 2); ■ – конфигурация трековой системы 3); ▲ – конфигурация трековой системы 4).

с увеличением количества слоев трековой системы объясняется тем, что учет многократного рассеяния не был включен в фильтр Калмана в данном варианте программы ввиду отсутствия достоверной карты вещества на момент проведения исследований. В идеальном случае, когда нет многократного рассеяния в веществе, импульсное разрешение улучшается с увеличением числа измеренных точек на треке, а при наличии же многократного рассеяния и корректном учете данного процесса в фильтре Калмана необходимо найти определенный компромисс между улучшением точности с увеличением количества слоев и усилением многократного рассеяния. Это связано также со стоимостью трековой системы и требуемой точностью реконструкции треков.

На следующем этапе нами было изучено влияние вершинного детектора и величины магнитного поля трековой системы SPD эксперимента на импульсное разрешение реконструированных треков. В дальнейшем при моделировании, если это не будет оговорено отдельно, мы будем использовать 23 слоя “строу” детекторов в центральной части трековой системы. Для гибридной конфигурации магнитного поля были рассмотрены следующие конфигурации трековой системы, используемые для реконструкции треков:

- 1) только центральная часть трековой системы и стандартная величина магнитного поля (первая конфигурация);
- 2) центральная часть трековой системы и вершинный детектор, а также стандартная величина магнитного поля (вторая конфигурация);
- 3) только центральная часть трековой системы, а величина магнитного поля была увеличена в два раза (третья конфигурация);
- 4) центральная часть трековой системы и вершинный детектор, а величина магнитного поля была увеличена в два раза (четвертая конфигурация).

На рис. 2 приведена зависимость импульсного разрешения для заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла θ (результаты усреднены по азимутальному углу φ) для рассмотренных вариантов трековой системы SPD эксперимента и гибридной конфигурации магнитного поля. Как видно из представленных результатов, увеличение магнитного поля в области трекового детектора позволяет существенно улучшить импульсное разрешение, но максимальное значение магнитного поля будет определяться конструкцией и типом магнитной системы.

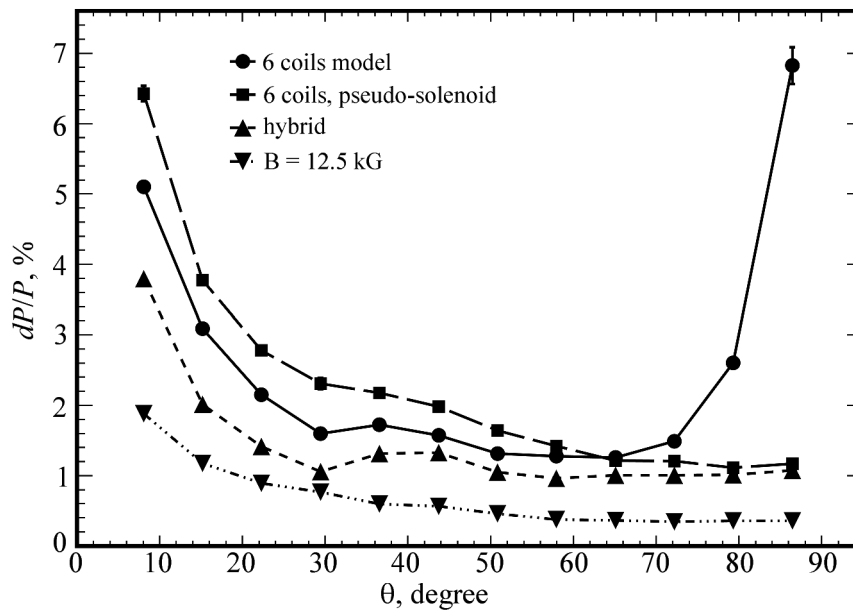


Рис. 3: Импульсное разрешение для заряженных частиц с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла и различных конфигураций магнитного поля: ● – специальный вариант магнитного поля с 6-ью катушками; ■ – псевдосоленоидальное поле с 6-ью катушками; ▲ – гибридная конфигурация магнитного поля; ▼ – постоянное магнитное поле вдоль z -оси величиной в 12.5 кГс.

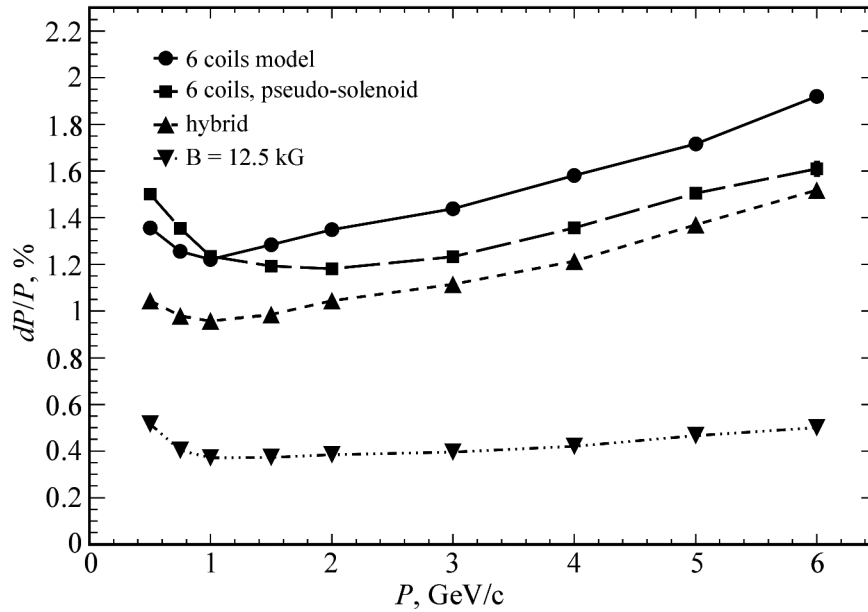


Рис. 4: Импульсное разрешение заряженных частиц как функция величины импульса для различных конфигураций магнитного поля и фиксированного полярного угла $\theta = 60^\circ$: ● – специальный вариант магнитного поля с 6-ью катушками; ■ – псевдосоленоидальное поле с 6-ью катушками; ▲ – гибридная конфигурация магнитного поля; ▼ – постоянное магнитное поле вдоль z -оси величиной в 12.5 кГс.

Нами также было исследовано влияние следующих конфигураций магнитного поля SPD эксперимента на точность определения параметров реконструированных треков:

- постоянное магнитное поле вдоль z -оси величиной 12.5 кГс (используется для сравнения);
- гибридная конфигурация с удвоенной величиной магнитного поля;
- псевдосоленоидальное поле, создаваемое 6-ью катушками;
- специальный вариант магнитного поля, когда 3 катушки создают поле в одном направлении, а другие 3 катушки – поле в противоположном направлении.

На рис. 3 приведена зависимость импульсного разрешения для заряженных частиц с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла θ и рассмотренных конфигураций магнитной системы SPD эксперимента. Такая же зависимость для фиксированного полярного угла вылета частиц $\theta = 60^\circ$ приведена на рис. 4 как функция величины импульса заряженных частиц. Полученные результаты позволяют понять влияние различных конфигураций магнитной системы на точность определения параметров заряженных частиц и учесть результаты данных исследований при выборе окончательной конфигу-

рации как магнитной системы, так и геометрии самой трековой системы планируемого SPD эксперимента.

На основе созданного программного обеспечения было произведено предварительное исследование точности определения параметров треков заряженных частиц в зависимости от конфигурации магнитного поля и характеристик трековой системы SPD эксперимента. В дальнейшем данные программы будут включены в систему программ для моделирования и реконструкции SPD эксперимента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта (Мегасайенс – NICA) № 18-02-40061.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. Savin, A. Efremov, D. Pshekhonov, et al., *Eur. Phys. J. A* **52**, 215 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16215-x>.
- [2] F. Gautheron et al., COMPASS Collaboration. COMPASS-II Proposal. CERN-SPSC-2010-014, SPSC-P-340, CERN, Geneva (May, 2010). <http://cds.cern.ch/record/1265628>.
- [3] R. E. Kalman, *Basic Eng.* **82**, D35 (1960).
- [4] R. Fruhwirth, *Nucl. Instrum. Meth. A* **262**, 444 (1987). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90887-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90887-4).
- [5] T. Bilka, N. Braun, T. Hauth, et al., Implementation of Genfit2 as an experiment independent track-fitting framework. arXiv:1902.04405v2 [physics.data-an] 13 February 2019.
- [6] E. E. Perepelkin, A. D. Kovalenko, A. A. Tarelkin, et al., *Phys. Part. Nuclei Lett.* **16**, 140 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477119020092>.
- [7] SPDroot program, <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
- [8] S. Agostinelli, J. Allisonas, K. Amako, et al. (126 authors), *Nucl. Instrum. Meth. A* **506**, 250 (2003). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).

Поступила в редакцию 8 июня 2020 г.

После доработки 13 октября 2020 г.

Принята к публикации 14 октября 2020 г.