

P10-2010-3

А. А. Лебедев^{1,2,*}, Г. А. Ососков¹

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЧАСТИЦ
В ДЕТЕКТОРАХ TRD И MICH ЭКСПЕРИМЕНТА CBM**

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, Germany

* E-mail: andrey.lebedev@gsi.de

Лебедев А. А., Ососков Г. А.

P10-2010-3

Реконструкция траекторий частиц
в детекторах TRD и MUCH эксперимента CBM

В работе рассматривается алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц и его применение в трековых детекторах TRD и MUCH эксперимента CBM. Основными компонентами программы реконструкции являются поиск, оценка параметров и экстраполяция треков. Алгоритм поиска траекторий основан на методе слежения с использованием процедуры ветвления. Экстраполяция трека в детекторе происходит с учетом магнитного поля и вычисления эффектов от прохождения через вещество, таких как многократное рассеяние и энергетические потери. При оценке параметров треков применяется фильтр Калмана. Разработанное программное обеспечение включено в матобеспечение эксперимента CBM. Приведены результаты работы алгоритма, показана его эффективность.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Lebedev A. A., Ososkov G. A.

P10-2010-3

Track Reconstruction in the TRD and MUCH Detectors
of the CBM Experiment

Track reconstruction algorithm and its applications to the TRD and MUCH tracking detectors of the CBM experiment are described. The main components of the reconstruction package include track finding, fitting and propagation in the detector. The track finding algorithm is based on the track following method with branches. Track propagation algorithm takes into account inhomogeneous magnetic field and includes accurate calculation of multiple scattering and energy losses in the detector material. Track parameters and covariance matrices are estimated using the Kalman filter method. Developed software was included into the experiment software framework. Performance of the algorithm which shows its efficiency is presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

На строящемся в Дармштадте (Германия) ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) создается установка СВМ (Compressed Baryonic Matter), предназначенная для изучения новых состояний ядерной материи, образующихся в ядро-ядерных соударениях при энергиях пучка $8 \div 45$ АГэВ [1].

В каждом из таких соударений детекторами СВМ будут регистрироваться до 1000 вторичных заряженных частиц. Для реконструкции траекторий этих частиц в эксперименте СВМ используется система детекторов, которая включает: 1) вершинный детектор на основе MVD (Micro-Vertex Detector) и STS (Silicon Tracking System), 2) детектор переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector) и 3) мюонный детектор MUCH (MUon Chamber). В детекторах TRD и MUCH координатные плоскости чередуются с абсорберами — слоями вещества, предназначенными для получения переходного излучения от пролетающих через них электронов (в детекторе TRD) или поглощения адронов (в детекторе MUCH).

Задача распознавания и реконструкции траекторий частиц в эксперименте СВМ серьезно затруднена большой множественностью частиц, летящих в небольшом телесном угле, что приводит к высокой плотности отсчетов на единицу площади в координатных плоскостях (в вершинном детекторе), значительными отклонениями частиц от направления первоначального движения вследствие сильного кулоновского рассеяния (в абсорберах детекторов TRD и MUCH), а также большими потерями энергии частиц (особенно в абсорберах MUCH). Отмеченные условия накладывают жесткие требования как к надежности, так и к скорости вычислений алгоритмов распознавания и реконструкции траекторий регистрируемых частиц.

Алгоритм поиска и реконструкции треков в вершинном детекторе СВМ был реализован на основе клеточных автоматов [11]. Он обеспечил высокую эффективность распознавания треков и скорость обработки данных. Попытка применить аналогичный подход в TRD оказалась не столь успешной. Из-за сильного многократного рассеяния и больших потерь энергии заряженными

частицами в абсорберах TRD процедура распознавания треков на основе клеточных автоматов становилась затруднительной.

В работе [2] был применен другой подход для поиска и реконструкции треков в детекторе TRD, а именно метод слежения по треку с возможностью ветвления. В этом подходе процесс слежения по треку реализован на основе фильтра Калмана [3], который предоставляет удобный математический аппарат для организации поиска и реконструкции траекторий заряженных частиц с учетом многократного рассеяния и потерь энергии в абсорберах TRD [2]. С помощью этого подхода были реализованы два алгоритма: 1) автономный, в котором используется информация только с координатных плоскостей TRD, 2) полный, в котором дополнительно учитывается информация о треках, найденных в вершинном детекторе. Оба алгоритма обеспечили высокую эффективность распознавания треков за приемлемое счетное время [2].

Проведенный нами анализ показал, что указанный подход можно адаптировать под детектор MUCH. Для этого необходимо:

- обобщить процедуру экстраполяции треков;
- ввести критерий качества кандидатов в треки для исключения ложных треков;
- включить в алгоритм слежения параметры настройки, обеспечивающие возможность адаптации алгоритма под конкретный детектор — TRD или MUCH.

Результаты осуществления этого плана, описанные в настоящей работе, существенно упростили применение и сопровождение программы, реализующей алгоритм восстановления треков вообще, и, в частности, обеспечили надежную реконструкцию треков в детекторе MUCH. Программное обеспечение, реализующее предложенные обобщенные алгоритмы, было организовано с учетом следующих требований: удобство для пользователей, выполняющих различный физический анализ и оптимизацию структуры детектора; простота расширения и сопровождения; сокращение дублирования кода.

Работа имеет следующую структуру: введение, четыре раздела и заключение. В первом разделе дается краткий обзор эксперимента CBM и обсуждается структура детекторов TRD и MUCH. Во втором разделе формулируется постановка решаемой задачи. В третьем — излагается процедура реконструкции треков, которая включает адаптацию фильтра Калмана к решаемой задаче, алгоритмы распознавания треков в TRD и MUCH, а также процедуру связывания треков, найденных в указанных детекторах. В разд. 4 обсуждаются результаты работы алгоритмов реконструкции треков в детекторах TRD и MUCH. В заключении подводятся итоги выполненной работы и формулируются задачи на будущее.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР УСТАНОВКИ СВМ

Разрабатываются два альтернативных варианта установки СВМ: один — для идентификации электронов, второй — для идентификации мюонов. Экспериментальная установка СВМ содержит следующие детекторы (см. рис. 1): STS (Silicon Tracking System) и MVD (Micro-Vertex Detector), которые располагаются внутри магнита и будут использоваться для реконструкции траекторий частиц, вершин и импульса; детектор черенковского излучения RICH (Ring Image Cherenkov) и детектор переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector), составляющие систему идентификации электронов; детектор TOF (Time Of Flight), предназначенный для измерения времени пролета частицы и идентификации адронов; электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic Calorimeter), детектирующий фотоны. Для идентификации мюонов детектор RICH заменен на мюонную детектирующую систему MUCH.

1.1. Детектор переходного излучения TRD. Детектор TRD будет использоваться для реконструкции траекторий заряженных частиц и их идентификации. Он должен совместно с RICH-детектором и детектором TOF обеспечить эффективную идентификацию электронов. TRD располагается между RICH- и TOF-детекторами (рис. 2). Стандартная модель детектора TRD состоит из последовательности 12 идентичных детектирующих слоев, сгруппированных в три станции. Каждый детектирующий слой состоит из радиатора и многопроволочных камер для считывания информации, имея общую толщину 6 см. Станции расположены в 5, 7 и 9 м от мишени. Детектирующие слои имеют мелкоячеистую структуру с ячейками прямоугольной формы. Ориентация ячеек меняется на 90° от слоя к слою. Таким образом, удается

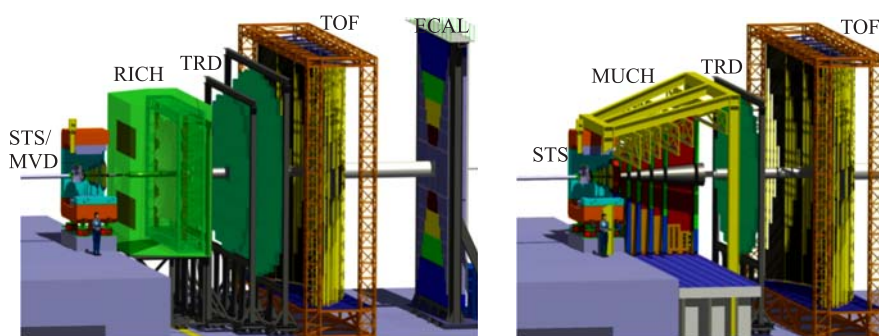


Рис. 1. Схема установки СВМ: для идентификации электронов (слева) и для идентификации мюонов (справа)

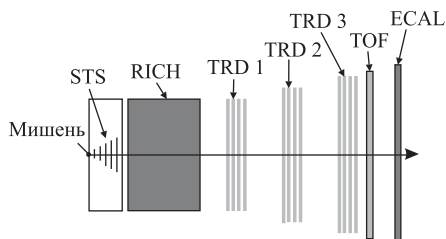


Рис. 2. Схематическое изображение установки СВМ, где между RICH- и TOF-детекторами расположены три станции TRD

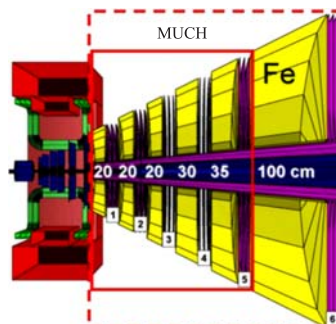


Рис. 3. MUCH-детектор. Сплошной линией показана геометрия детектора для детектирования легких векторных мезонов, штриховой — чармония. Между железными абсорберами находится 2 или 3 координатных детектора

достичь высокого пространственного разрешения детектора, которое составляет $0,03 \div 0,05$ см поперек ячейки и $0,27 \div 3,3$ см вдоль ячейки.

1.2. Мюонный детектор MUCH. Мюонная детектирующая система MUCH будет использоваться для реконструкции векторных мезонов ($\rho, \omega, \varphi, J/\psi$) через их распад на пару мюонов — μ^+ и μ^- . Мюонная система располагается за STS-детектором (рис. 3). Используется стандартный метод идентификации мюонов с помощью абсорберов, в которых поглощаются адроны, но не μ^+ и μ^- . В текущей концепции MUCH-детектор состоит из 5–6 адронных абсорберов, сделанных из железа, и 2–3 координатных детекторов в каждом зазоре между абсорберами. Для реконструкции легких векторных мезонов (ρ, ω, φ) общая толщина железных абсорберов составляет 125 см (7,5 длин взаимодействия λ_I), в то время как для чармония добавляется дополнительно 1 м железа (общая толщина составляет 13,5 длин взаимодействия λ_I).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Трековые детекторы СВМ TRD и MUCH имеют схожую структуру, поэтому при разработке алгоритма реконструкции треков использовалась типовая структура детектора, показанная на рис. 4. В этой структуре детектор рассматривается как набор станций, каждая из которых представляет собой группу детектирующих слоев. Детектирующие слои производят пространственные координаты измерений (отсчеты) от пролетевшей частицы. Между станциями могут находиться толстые слои материала, особенно это характерно для MUCH-детектора, в котором между станциями расположены

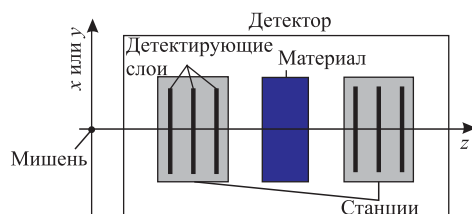


Рис. 4. Схема типового трекового детектора и система координат

железные абсорберы. СВМ является экспериментом с фиксированной мишенью, для которого характерно расположение детектирующих станций перпендикулярно к направлению пучка. Принятая система координат показана на рис. 4. Ось z направлена вдоль пучка. Детектирующие слои перпендикулярны оси z .

Задача данной работы состоит в разработке алгоритма и программного обеспечения для реконструкции траекторий заряженных частиц. Таким образом, следовало разработать три базовых алгоритма: распознавания, экстраполяции и оценки параметров (фитирования) треков.

1) *Алгоритм распознавания* выполняет поиск отсчетов, принадлежащих отдельному треку.

2) При распознавании и фитировании используется *алгоритм экстраполяции треков*, который обеспечивает перенос (транспорт) параметров трека и ковариационной матрицы на следующую координатную плоскость, принимая во внимание информацию о структуре и материалах детектора, магнитном поле и др.

3) *Алгоритм оценки параметров трека* выполняет вычисление как можно более точной и полной информации о треке по его отсчетам на основе применения фильтра Калмана.

В качестве входной информации используется массив с отсчетами из детектора и массив с треками, задающими начальные целеуказания для поиска (инициирующими треками).

Требования к этим алгоритмам и реализующему их программному обеспечению следующие: они должны быть адаптируемы и устойчивы в отношении возможных изменений геометрии детектора, так как эксперимент СВМ находится на стадии проектирования и окончательные геометрии детекторов не определены. Кроме того, программы должны быть удобны для пользователя и легко настраиваемы с помощью небольшого числа параметров для последующей оптимизации работы алгоритма по критериям эффективности и точности распознавания.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ

Реконструкция треков включает распознавание траекторий частиц и оценку параметров треков.

Компоненты программы реконструкции треков и их зависимости показаны на рис. 5.

Программа для реконструкции треков включает следующие основные модули:

- экстраполяцию треков;
- оценку параметров треков;
- распознавание треков;
- фильтр Калмана;
- глобальный поиск треков.

Фильтр Калмана используется как в алгоритме распознавания треков, так и при оценке параметров траектории. Ниже дается детальное описание методов оценки параметров, экстраполяции и распознавания треков.

3.1. Оценка параметров трека с помощью фильтра Калмана. Фильтр Калмана является одним из самых распространенных методов оценки параметров трека в физике [3]. Дадим описание метода и его адаптации для нашей задачи. Для использования фильтра Калмана в качестве метода фитирования трека необходимо рассмотреть трек как динамическую систему. Это можно сделать естественным образом, определив вектор состояния динамической системы как вектор \vec{x} , состоящий из пяти параметров, однозначно определяющих трек в каждой точке его траектории. В большинстве работ, относящихся к коллайдерным экспериментам, удобна параметризация вектора состояния как функция длины дуги траектории, так что соответствующий статусный вектор включает азимутальный и полярный углы, две поперечные координаты и импульс. В нашем случае для эксперимента с фиксированной

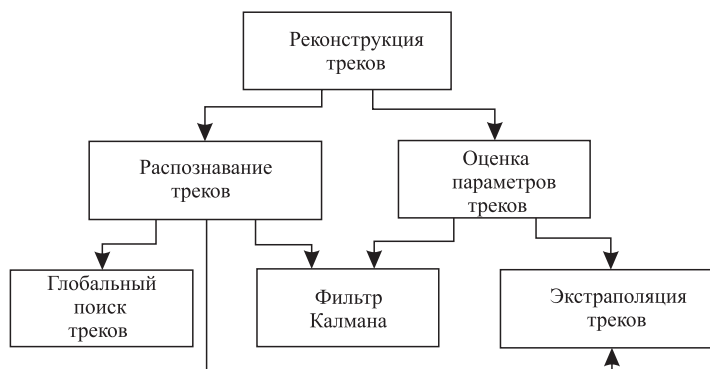


Рис. 5. Компоненты программы реконструкции треков и их зависимости

мишенью целесообразно определить вектор \vec{x} как функцию координаты z : $\vec{x} = \vec{x}(z)$. Таким образом, вектор состояния имеет следующий вид:

$$\vec{x} = (x, y, t_x, t_y, q/p)^T,$$

где x и y — координаты трека, $t_x = \partial x / \partial z$ и $t_y = \partial y / \partial z$ — направляющие косинусы, q — заряд, равный $+1$ для положительно заряженных частиц и -1 для отрицательно заряженных, и p — импульс частицы. Вектору \vec{x} соответствует ковариационная 5×5 матрица $C = \text{cov}\{\vec{x}\}$ [3]. Достаточно рассмотреть вектор состояния на дискретном множестве точек \vec{x}_k , в которых трек пересекает детектирующие плоскости: $\vec{x}_k = \vec{x}(z_k)$. Таким образом, мы получили дискретную динамическую систему, развитие которой может быть описано следующим уравнением:

$$x(z_k) \equiv \vec{x}_k = f_{k-1}(\vec{x}_{k-1}) + \vec{w}_{k-1},$$

где f_{k-1} — это функция экстраполяции трека от детектора $k-1$ к детектору k , случайная переменная w_{k-1} — это шум, порожденный, в частности, многократным рассеянием частицы в неоднородной среде детектора. Функция f_{k-1} может быть записана как

$$f_{k-1}(\vec{x}_{k-1}) = F_{k-1}\vec{x}_{k-1},$$

где F_{k-1} называют транспортной матрицей.

Обычно детектор напрямую не измеряет вектор состояния. В сущности, измерение k -го детектора m_k является функцией вектора состояния, искаженное измерительными ошибками e_k :

$$m_k = h_k(\vec{x}_k) + e_k,$$

где h_k — это проектирующая функция, определенная следующим образом:

$$h_k(\vec{x}_k) = H_k\vec{x}_k,$$

где H_k — это измерительная матрица. В нашем случае, когда детекторы напрямую измеряют x - и y -координаты, H_k будет следующей матрицей 2×5 :

$$H_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Шум \vec{w}_k и измерительные ошибки e_k рассматриваются как неизвестные случайные помехи, имеющие нормальное распределение со средним, равным 0. В этом случае, как известно, фильтр Калмана является оптимальным [3]. Ковариационные матрицы для \vec{w}_k и e_k соответственно равны Q_k и V_k . В случае, если детектор измеряет две координаты x и y , V_k будет 2×2 матрицей:

$$V_k = \begin{pmatrix} d_{xx}^2 & d_{xy} \\ d_{xy} & d_{yy}^2 \end{pmatrix},$$

где d_{xx} , d_{yy} и d_{xy} — измерительные ошибки детектора, корреляция d_{xy} возникает в случае поворота станции.

При фитировании трека с помощью фильтра Калмана выполняются три основных типа операций: *предсказание*, *фильтрация* и *сглаживание*. Предсказание — это оценка вектора состояния в «будущем» с использованием информации о предыдущем векторе состояния. Фильтрация — это оценка текущего состояния на основе всех предыдущих измерений. Сглаживание — это оценка вектора состояния в «прошлом», основанная на информации от всех измерений [3]. Опишем подробнее формализм этих операций.

Предсказание.

Экстраполяция вектора состояния и его ковариационной матрицы:

$$\begin{aligned}\vec{x}_k^{k-1} &= F_{k-1}\vec{x}_{k-1}, \\ C_k^{k-1} &= F_{k-1}C_{k-1}F_{k-1}^T + Q_{k-1}.\end{aligned}\quad (1)$$

Ошибка предсказания и ее ковариационная матрица:

$$\begin{aligned}r_k^{k-1} &= m_k - H_k\vec{x}_k^{k-1}, \\ R_k^{k-1} &= V_k + H_kC_k^{k-1}H_k^T.\end{aligned}$$

Фильтрация.

Обновление вектора состояния и его ковариационной матрицы:

$$\begin{aligned}\vec{x}_k &= \vec{x}_k^{k-1} + K_k r_k^{k-1}, \\ C_k &= (1 - K_k H_k) C_k^{k-1},\end{aligned}$$

где K_k называется *усилительной матрицей* [3]:

$$K_k = C_k^{k-1} H_k^T (V_k + H_k C_k^{k-1} H_k^T)^{-1} = C_k^{k-1} H_k^T (R_k^{k-1})^{-1}.$$

Обновленные ошибка предсказания и ее ковариационная матрица:

$$\begin{aligned}r_k &= m_k - H_k \vec{x}_k = (1 - H_k K_k) r_k^{k-1}, \\ R_k &= (1 - H_k K_k) V_k = V_k - H_k C_k H_k^T.\end{aligned}$$

Статистический критерий χ^2 для k -го измерения вычисляется по формуле

$$\chi_+^2 = r_k^T R_k^{-1} r_k.$$

Обновление χ^2 для трека:

$$\chi_k^2 = \chi_{k-1}^2 + \chi_+^2.$$

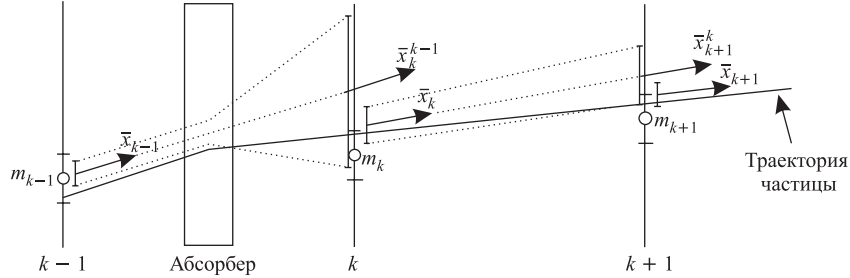


Рис. 6. Схематическое представление операций предсказания и фильтрации

Операции предсказания и фильтрации повторяются до тех пор, пока в трек не будут добавлены все измерения (прямое фитирование трека). Последний вектор состояния дает наилучшую оценку параметров трека, которая собрала в себе информацию всех измерений.

Чередование операций предсказания и обновления графически приведено на рис. 6. Показано отклонение частицы в слое материала между детектором $k - 1$ и k . Фильтр Калмана учитывает этот эффект, увеличивая ошибку для вектора состояния \vec{x}_k^{k-1} на величину Q_{k-1} . Во время фильтрации вектор состояния \vec{x}_k^{k-1} притягивается к траектории частицы, учитывая информацию из k -го измерения m_k .

Сглаживание.

«Сглаженный» вектор состояния и его ковариационная матрица:

$$\vec{x}_k^n = \vec{x}_k + A_k (x_{k+1}^n - x_{k+1}^k),$$

$$C_k^n = C_k + A_k (C_{k+1}^n - C_{k+1}^k) A_k^T,$$

где A_k — это усилительная матрица при сглаживании:

$$A_k = C_k F_k^T (C_{k+1}^k)^{-1}.$$

Соответствующие ошибка предсказания и ее ковариационная матрица:

$$r_k^n = m_k - H_k \vec{x}_k^n,$$

$$R_k^n = V_k - H_k C_k^n H_k^T.$$

Процедура сглаживания выполняется в противоположном направлении (обратное фитирование трека), после того как все измерения добавлены в трек. В ней учитывается информация от всех измерений и вычисляется наилучшая оценка вектора состояния на всех детектирующих слоях.

Помимо рассмотренных подходов прямого и обратного фитирования, которые не позволяют определять шумовые отсчеты, возникают ситуации, когда

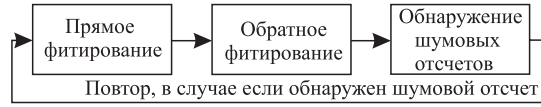


Рис. 7. Итерационная процедура фитирования

трек содержит шумовые отсчеты. В этом случае применяется итерационное фитирование с обнаружением шумовых отсчетов. Схема процедуры показана на рис. 7. Шумовой отсчет находится по «плохому» χ^2 , т. е. превосходящему заданное пороговое значение, которое вычисляется во время обратной оценки параметров трека.

3.2. Экстраполяция трека. Алгоритм экстраполяции трека используется для вычисления средней траектории частицы и соответствующих ошибок. Экстраполяция трека может быть разбита на два этапа [4, 30]:

1) геометрическая экстраполяция, обусловленная уравнениями движения, с учетом неоднородности магнитного поля;

2) учет физических эффектов от прохождения частицы через материалы детектора, таких как многократное кулоновское рассеяние и потери энергии.

Базовым элементом при экстраполяции трека является транспортная матрица [4]

$$F = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \vec{x}_0}, \quad (2)$$

где \vec{x}_0 — это начальный вектор состояния.

Экстраполяция ковариационной матрицы осуществляется при помощи формулы (1) с использованием транспортной матрицы. При разбиении процедуры экстраполяции трека на n шагов, транспортная матрица от z_0 в z определяется как повторяющиеся умножения:

$$F = \prod_{k=1}^n F_k, \quad (3)$$

где F_k — это транспортная матрица на k -м шаге.

Основными компонентами алгоритма экстраполяции треков являются: геометрическая экстраполяция, вычисление эффектов от прохождения материалов и навигация в геометрии детектора. Алгоритм экстраполяции управляет этими тремя компонентами и выполняет транспорт параметров трека и соответствующих ошибок.

3.2.1. Геометрическая экстраполяция. Геометрическая экстраполяция состоит в вычислении средней траектории [4, 19] и транспортной матрицы, необходимой для экстраполяции ковариационной матрицы.

Реализовано две модели для вычисления средней траектории и транспортной матрицы:

- 1) прямая линия в случае отсутствия магнитного поля;
- 2) решение уравнения движения заряженной частицы в магнитном поле с помощью метода Рунге–Кутты.

Прямая линия. В случае отсутствия магнитного поля траектория заряженной частицы представляет собой прямую линию. Следовательно, только элементы x и y вектора состояния будут меняться:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + t_x \Delta z, \\y &= y_0 + t_y \Delta z.\end{aligned}$$

Транспортная матрица F в этом случае определяется как

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta z & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta z & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $\Delta z = z - z_0$.

Уравнение движения в магнитном поле. Траектория заряженной частицы в статическом магнитном поле \vec{B} удовлетворяет уравнению движения под действием силы Лоренца. В отсутствие электрического поля и пренебрежении потерями энергии и многократным рассеянием уравнение движения в вакууме выглядит следующим образом [4]:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = c^2 k q \vec{v}(t) \times \vec{B}(\vec{y}(t)),$$

где \vec{p} — импульс частицы, q — заряд, v — скорость, \vec{B} — статическое магнитное поле, k — коэффициент пропорциональности, \vec{y} — положение частицы (пространственная координата), c — скорость света и t — время в лабораторной системе. Уравнение может быть записано относительно длины траектории s [4]:

$$d^2 \vec{y} / ds^2 = (kq/p)(d\vec{y}/ds) \times \vec{B}(\vec{y}(s)), \quad (4)$$

где $ds/dt = v$ и $p = |\vec{p}|$ — модуль импульса частицы в лабораторной системе.

Уравнение (4) можно переписать в следующем виде относительно координаты z :

$$x'' = (kq/p)(ds/dz) [x'y'B_x - (1 + x'^2)B_y + y'B_z],$$

$$y'' = (kq/p)(ds/dz) [(1 + y'^2)B_x - x'y'B_y - x'B_z],$$

где $ds/dz = \sqrt{1 + x'^2 + y'^2}$.

Следовательно, уравнение движения может быть записано через вектор параметров трека следующим образом:

$$\frac{d\vec{x}}{dz} = \frac{d}{dz} \begin{pmatrix} x \\ y \\ t_x \\ t_y \\ q/p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ (kq/p) A_x \\ (kq/p) A_y \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где A_x и A_y определяются как

$$A_x = \sqrt{1 + t_x^2 + t_y^2} (t_x t_y B_x - (1 + t_x^2) B_y + t_y B_z), \quad (6)$$

$$A_y = \sqrt{1 + t_x^2 + t_y^2} ((1 + t_y^2) B_x - t_x t_y B_y - t_x B_z). \quad (7)$$

В уравнениях (5)–(7) используется следующая система единиц: p [ГэВ/с], q — безразмерная, \vec{B} [кГс], k [(ГэВ/с) · кГс⁻¹ · см⁻¹] = 2,99792458 · 10⁻⁴, x [см], y [см], z [см].

Необходимо решить задачу Коши с начальным условием \vec{x}_0 . Это было сделано с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка [9].

Интегрирование уравнений для производных. Оценка производных для компонент вектора состояния по отношению к их начальным значениям необходима для просчета транспортной матрицы $F = \partial\vec{x}/\partial\vec{x}_0$. Эта задача может быть решена или численным дифференцированием [4, 9], или интегрированием уравнений производных вместе с «нулевой траекторией» [4]. Нами был применен второй метод, так как он в два раза экономичнее в случае, если поперечным градиентом магнитного поля можно пренебречь. Если предположить, что влиянием поперечного градиента поля на траекторию на одном шаге интегрирования производных можно пренебречь, то получаем, что производные по первым двум компонентам x_0 и y_0 вектора параметров равны

$$\begin{aligned} \partial\vec{x}/\partial x_0 &= (1, 0, 0, 0, 0)^T, \\ \partial\vec{x}/\partial y_0 &= (0, 1, 0, 0, 0)^T. \end{aligned}$$

Уравнения для $\partial\vec{x}/\partial t_{x0}$ и $\partial\vec{x}/\partial t_{y0}$ получим, продифференцировав уравнение (5) по t_{x0} и t_{y0} соответственно. Уравнения $\partial\vec{x}/\partial t_{x0}$ имеют следующий вид:

$$\frac{(\partial\vec{x}/\partial t_{x0})}{dz} = \frac{d}{dz} \begin{pmatrix} \partial x/\partial t_{x0} \\ \partial y/\partial t_{x0} \\ \partial t_x/\partial t_{x0} \\ \partial t_y/\partial t_{x0} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial t_x/\partial t_{x0} \\ \partial t_y/\partial t_{x0} \\ (kq_0/p_0) \left[\frac{\partial A_x}{\partial t_x} \frac{\partial t_x}{\partial t_{x0}} + \frac{\partial A_x}{\partial t_y} \frac{\partial t_y}{\partial t_{x0}} \right] \\ (kq_0/p_0) \left[\frac{\partial A_y}{\partial t_x} \frac{\partial t_x}{\partial t_{x0}} + \frac{\partial A_y}{\partial t_y} \frac{\partial t_y}{\partial t_{x0}} \right] \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}\partial A_x / \partial t_x &= A_x t_x / (1 + t_x^2 + t_y^2) + \sqrt{(1 + t_x^2 + t_y^2)}(t_y B_x - 2t_x B_y), \\ \partial A_x / \partial t_y &= A_x t_y / (1 + t_x^2 + t_y^2) + \sqrt{(1 + t_x^2 + t_y^2)}(t_x B_x + B_z), \\ \partial A_y / \partial t_x &= A_y t_x / (1 + t_x^2 + t_y^2) + \sqrt{(1 + t_x^2 + t_y^2)}(-t_y B_y - B_z), \\ \partial A_y / \partial t_y &= A_y t_y / (1 + t_x^2 + t_y^2) + \sqrt{(1 + t_x^2 + t_y^2)}(-t_x B_y + 2t_y B_x).\end{aligned}$$

Уравнения для $\partial \vec{x} / \partial t_{y0}$ подобны уравнениям (8). Начальные значения соответственно равны $\partial \vec{x} / \partial t_{x0} = (0, 0, 1, 0, 0)$ и $\partial \vec{x} / \partial t_{y0} = (0, 0, 0, 1, 0)$.

Чтобы определить уравнения для $\partial \vec{x} / \partial (q_0/p_0)$, возьмем частные производные по q_0/p_0 от (5):

$$\begin{aligned}\frac{(\partial \vec{x} / \partial (q_0/p_0))}{dz} &= \frac{d}{dz} \begin{pmatrix} \partial x / \partial (q_0/p_0) \\ \partial y / \partial (q_0/p_0) \\ \partial t_x / \partial (q_0/p_0) \\ \partial t_y / \partial (q_0/p_0) \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \partial t_x / \partial (q_0/p_0) \\ \partial t_y / \partial (q_0/p_0) \\ k A_x + (k q_0/p_0) \left[\frac{\partial A_x}{\partial t_x} \frac{\partial t_x}{\partial (q_0/p_0)} + \frac{\partial A_x}{\partial t_y} \frac{\partial t_y}{\partial (q_0/p_0)} \right] \\ k A_y + (k q_0/p_0) \left[\frac{\partial A_y}{\partial t_x} \frac{\partial t_x}{\partial (q_0/p_0)} + \frac{\partial A_y}{\partial t_y} \frac{\partial t_y}{\partial (q_0/p_0)} \right] \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (9)\end{aligned}$$

Начальные значения для решения уравнения (9) равны $\partial \vec{x} / \partial (q_0/p_0) = (0, 0, 0, 0, 1)$.

Мы получили набор уравнений, которые были также решены с помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка.

3.2.2. Прохождение трека через вещество. Во время экстраполяции параметров трека от одной станции детектора к другой необходимо учитывать физические эффекты от прохождения частицей слоев материала (энергетические потери и многократное рассеяние). Это делается с помощью корректировки импульса частицы из-за энергетических потерь и добавления ковариационной матрицы шума Q к ковариационной матрице параметров трека. Далее дадим описание вычисления оценки влияния материала на вектор состояния и его ковариационную матрицу.

3.2.2.1. Энергетические потери. Энергетические потери уменьшают энергию частицы, возможно, останавливая ее, и влияют на многократное рассеяние, а в присутствии магнитного поля — и на траекторию частицы, так как

ведут к уменьшению импульса. Релятивистские заряженные частицы теряют энергию в веществе в результате электромагнитных процессов главным образом за счет ионизации (порядок α^2), переходного излучения (порядок α^3). Мюоны теряют энергию за счет рождения электронно-позитронных пар (порядок α^4) и фотоядерного взаимодействия [13], где величина $\alpha \sim 1/137$ — это постоянная тонкой структуры. Функция плотности вероятностей энергетических потерь $\rho(\Delta)$ может в некоторых случаях значительно отличаться от нормального распределения Гаусса. Тем не менее для большинства приложений подгонка трека с большой степенью достоверности может быть выполнена с помощью аппроксимации $\rho(\Delta)$ нормальным распределением.

Энергетические потери за счет ионизации, формула Бете–Блоха. Средняя величина энергетических потерь за счет ионизации определяется по формуле Бете–Блоха [14]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз}} = -Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\lambda)}{2} \right], \quad (10)$$

где константа $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0,307075 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$, z — заряд частицы, Z и A — атомное число и атомная масса абсорбера соответственно, $m_e c^2$ — масса электрона, умноженная на c^2 , I — средняя энергия возбуждения, T_{max} — максимальная кинетическая энергия, которая может быть передана свободному электрону в однократном столкновении, $\delta(\beta\lambda)$ — эффект плотности.

Для частицы с массой M и импульсом $M\beta\gamma c T_{\text{max}}$ определяется как [14]

$$T_{\text{max}} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}.$$

Эффект плотности δ в общем случае зависит от материала, для более точного определения обычно используется параметризация Штернхаймера (Sternheimer) [14, 15]. При высоких энергиях для экстраполяции достаточно использовать следующее приближение [14]:

$$\delta/2 \rightarrow \ln \left(\frac{28,816 \sqrt{\rho \langle Z/A \rangle} \text{ эВ}}{I} \right) + \ln \beta\gamma - 1/2. \quad (11)$$

Средняя энергия возбуждения I сильно зависит от внутренней структуры атома (см. рис. 8). Нахождение хорошего приближения, верного для любого материала, представляется сложной задачей. Мы использовали оценку I с помощью простых уравнений:

$$\begin{aligned} I &= 10 \text{ эВ} \cdot Z, & Z > 16, \\ I &= 16 \text{ эВ} \cdot Z^{0,9}, & Z \leq 16. \end{aligned}$$

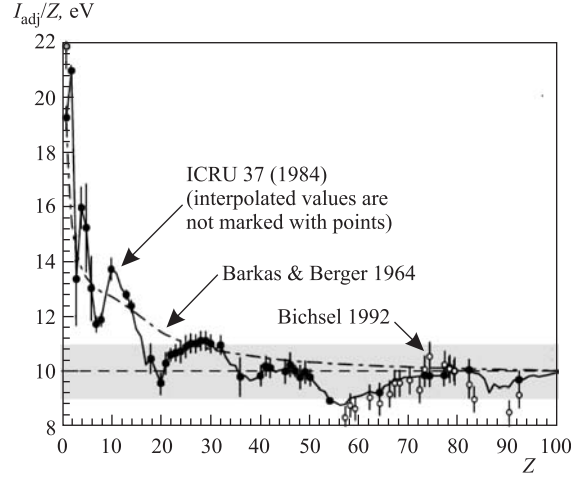


Рис. 8. Средняя энергия возбуждения I , деленная на Z . Рисунок взят из [14]

Для электронов и позитронов мы использовали несколько отличные уравнения для ионизационных потерь [16]:

для электронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ioniz}}^{\text{el}} = -K \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2m_e c^2}{I^2} + 1,5 \ln \gamma - 0,975 \right];$$

для позитронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ioniz}}^{\text{pos}} = -K \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2m_e c^2}{I^2} + 2 \ln \gamma - 1 \right].$$

Переходное излучение, формула Бете–Гайтлера. Средняя энергетическая потеря вследствие переходного излучения для релятивистских частиц определяется по формуле Бете–Гайтлера [17]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{bremsstrahlung}} = -\frac{E}{X_0 \rho} \left(\frac{m_e}{M}\right)^2,$$

где X_0 — это радиационная длина и ρ — плотность материала.

Рождение электронно-позитронных пар для мюонов. Мюоны — это единственные частицы, которые при значительной потере энергии не останавливаются в материале, поэтому необходима дополнительная осторожность при

подсчете потери энергии для них. Уравнение процесса рождения электронно-позитронных пар можно получить, используя таблицы для мюонов из [18]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{pair production}}^{\text{muon}} = -7 \cdot 10^{-5} \frac{E}{X_0 \rho}.$$

Таблицы из [18] детально описывают потери энергии для мюонов и учитывают все вышеизложенные процессы энергетических потерь. Для энергий меньше 10 ГэВ вклад от рождения электронно-позитронных пар незначительный и в таких случаях не учитывается.

Полная потеря энергии. Складывая средние энергетические потери от ионизации, переходного излучения и рождения электронно-позитронных пар, получим полную потерю энергии на единицу длины:

$$\Delta = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ioniz}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{bremsstrahlung}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{pair production}}^{\text{muon}}.$$

Таким образом, проинтегрировав Δ , получаем разницу энергии частицы до и после прохождения вещества:

$$\Delta E = \Delta \rho l,$$

где l — это длина пробега в материале и ρ — плотность вещества.

Поправка для параметра трека q/p будет иметь вид

$$q/p = q \sqrt{E - M^2},$$

где $E = E_0 + \Delta E = \sqrt{M^2 + p_0^2} + \Delta E$, E_0, p_0 — начальные значения энергии и импульса частицы, M — масса частицы.

Вычисление ошибки для параметра трека q/p . Ошибка параметра q/p для тяжелых и средних абсорберов в случае электронов считается следующим образом [16]:

$$Q_{55} = \left(\frac{q}{p}\right)^2 \left(e^{\frac{\ln 3}{\ln 2} \frac{l}{X_0}} - e^{-2 \frac{l}{X_0}}\right).$$

Для всех остальных частиц применяется другая формула вычисления ошибки параметра q/p [19]:

$$Q_{55} = \frac{E^2}{p^6} \sigma^2(E),$$

где

$$\sigma^2(E) = \xi T_{\max}(1 - \beta^2/2), \quad \xi = 153,4 \frac{z^2 Z}{\beta^2 A} \rho l \text{ (кэВ)}.$$

3.2.2.2. *Многokrатное рассеяние.* При прохождении через вещество заряженная частица отклоняется на много маленьких углов рассеяния. Для вычисления углов многократного рассеяния нами была использована формула Хайланда, которая является приближением 98 % центральной части распределения углов многократного рассеяния распределением Гаусса [4, 14]:

$$\Theta_0 = \frac{13,6 \text{ МэВ}}{\beta pc} z \sqrt{\frac{l}{X_0}} \left[1 + 0,038 \ln \frac{l}{X_0} \right]. \quad (12)$$

Многokrатное кулоновское рассеяние — это случайный процесс, поэтому коррекции вычисляются только для ковариационной матрицы шума Q . Поправки в матрицу Q для слоя вещества толщиной Δz определяются симметричной матрицей [4, 20]:

$$Q(\Delta z) = \begin{pmatrix} Q_{33} \frac{\Delta z^2}{3} & Q_{34} \frac{\Delta z^2}{3} & Q_{33} \frac{\Delta z}{2} & Q_{34} \frac{\Delta z}{2} & 0 \\ \dots & Q_{44} \frac{\Delta z^2}{3} & Q_{34} \frac{\Delta z}{2} & Q_{44} \frac{\Delta z}{2} & 0 \\ \dots & \dots & Q_{33} & Q_{34} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & Q_{44} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где

$$Q_{33} = (1 + t_x^2)(1 + t_x^2 + t_y^2)\Theta_0^2,$$

$$Q_{44} = (1 + t_y^2)(1 + t_x^2 + t_y^2)\Theta_0^2,$$

$$Q_{34} = t_x t_y (1 + t_x^2 + t_y^2)\Theta_0^2.$$

3.2.3. *Навигация в геометрии.* Для корректного добавления эффектов от прохождения треком вещества необходимо в сложной геометрии детектора определить, через какие именно материалы прошел трек, длину прохождения в конкретном материале, его свойства и другие необходимые параметры. Это делает алгоритм навигации. Он определяет точки пересечения с элементами детектора на определенном интервале (z_1, z_2) вдоль прямой линии.

Геометрия детекторов СВМ хранится в виде класса TGeoManager из пакета ROOT [21]. Реализация алгоритма навигации сделана на основе класса TGeoManager, что позволяет использовать одинаковую модель детектора для моделирования методом Монте-Карло и реконструкции треков.

3.2.4. *Экстраполяция трека.* Предположим, что необходимо экстраполировать трек из точки z_0 в точку z (см. рис. 9). Первоначально отрезок $[z_0, z]$ делится на несколько шагов. На каждом из шагов алгоритм навигации ищет точки пересечения с элементами детектора вдоль прямой линии (отмечены точками). Затем выполняется точная геометрическая экстраполяция

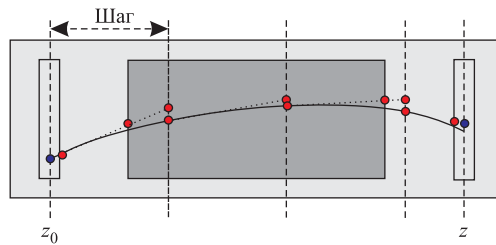


Рис. 9. Схема алгоритма экстраполяции трека

между точками пересечения внутри каждого шага. Эффекты от прохождения материалов добавляются в каждой точке пересечения. Обновление параметров прямой линии, используемой при навигации, делается в конце каждого шага.

Алгоритм экстраполяции треков подробно описан в работе [6], где также проводится детальное тестирование алгоритма и сравнение его с пакетом экстраполяции треков GEANE [19], используемой в общей программе моделирования прохождения частиц через систему детекторов GEANT3 [22]. Сравнение показало хорошее соответствие результатов разработанного нами алгоритма и подхода, использованного в GEANE.

3.3. Алгоритм распознавания треков. Алгоритм распознавания треков основан на методе слежения с использованием фильтра Калмана. В нем используется процедура ветвления, при которой для каждого отсчета, прошедшего проверку на присоединение к сегменту трека, создается отдельное ответвление трека. В алгоритм включен учет возможности пропуска отсчета из-за неэффективности детектора.



Рис. 10. Общая схема алгоритма распознавания треков

Общая схема алгоритма представлена на рис. 10. Видно, что процедура носит итерационный характер, т. е. после каждой итерации распознавание треков можно возобновить. Кроме того, отсчеты, которые включены в ранее найденные треки, удаляются: тем самым с каждой последующей итерацией количество свободных отсчетов уменьшается и распознавание можно проводить с более мягкими ограничениями. Алгоритм распознавания состоит из двух основных этапов: поиск треков-кандидатов и глобальный поиск треков. На первом этапе идет поиск всех возможных траекторий частиц, после чего на втором этапе из них отбираются лучшие треки, удовлетворяющие определенным критериям.

3.3.1. Поиск треков-кандидатов. Алгоритм слежения треков выполняет поиск отсчетов, соответствующих одной траектории частицы. Схема работы процедуры слежения треков показана на рис. 11. На вход процедуры слежения подается массив с отсчетами и массив с иницирующими треками, который для первой станции будет входным массивом иницирующих треков, а для последующих станций — это массив треков, найденных в предыдущей станции. Каждый трек из массива иницирующих треков прослеживается независимо. Происходит это следующим образом. Трек экстраполируется к детектирующему слою. Затем выполняется *быстрый поиск отсчетов*, алгоритм которого описан ниже. Для каждого найденного отсчета определяется, попал ли он в область поиска или нет. Если попал, то создается ответвление трека, если нет, то проверяется количество уже пропущенных отсчетов. В случае, когда количество пропущенных отсчетов меньше определенного порога, то ответвление все равно создается. После этого каждая из созданных ветвей трека экстраполируется к следующему детектирующему слою, и это повторяется до тех пор, пока не достигается последний детектирующий слой в станции. Найденные после каждой станции треки являются иницирующими для слежения в следующей станции. Такая процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнута последняя станция. В результате поиска выходной массив содержит треки-кандидаты.

Применение процедуры предварительного *быстрого поиска отсчетов* необходимо для сокращения комбинаторики и, следовательно, временных затрат алгоритма, ибо в противном случае возникает необходимость в переборе *всех отсчетов* на детектирующем слое и проверке их принадлежности области поиска. Однако наличие большой множественности отсчетов (порядка 1000 отсчетов в каждом детектирующем слое) неизбежно делает такой алгоритм недопустимо медленным. Для решения этой проблемы был разработан алгоритм быстрого поиска отсчетов, суть которого состоит в определении максимального и минимального индексов отсчетов в массиве, входящих в область поиска. Соответственно, перебор делается не по всем отсчетам, а только по находящимся в найденном интервале индексов. Предложенный алгоритм поиска работает с отсортированными массивами отсчетов, что позво-

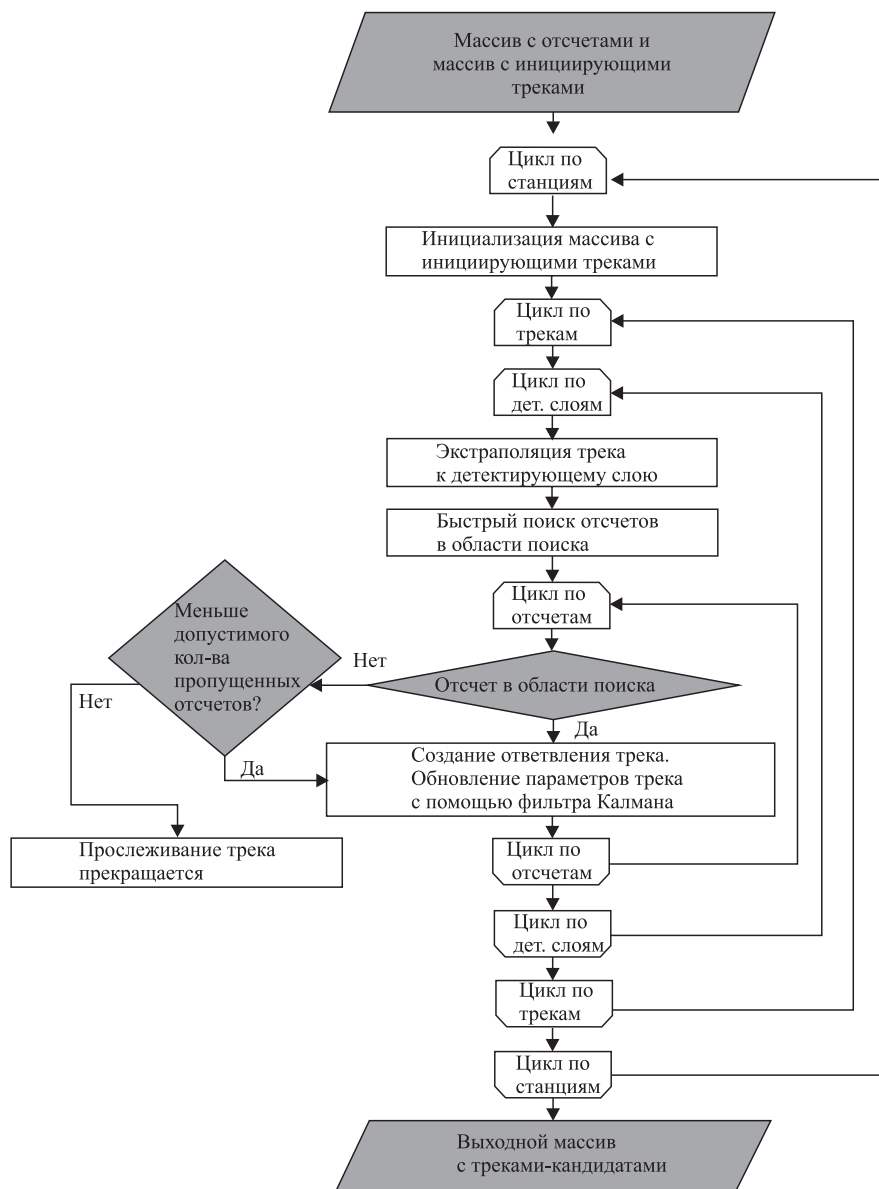


Рис. 11. Блок-схема алгоритма слежения

ляет ускорить его путем применения алгоритма бинарного поиска. Отсчеты сортируются на каждом из детектирующих слоев по одной из координат, x или y , в зависимости от максимальной ошибки измерения на детектирующем слое.

Схематически быстрый поиск отсчетов показан на рис. 12. В нем участвует только одна из координат отсчета. При определении области поиска отсчетов, которая откладывается в обе стороны от предсказанной позиции трека, предполагается, что ошибки измерения и ошибки из ковариационной матрицы независимы и распределены по нормальному закону, что позволяет вычислить область поиска отсчетов следующим образом:

$$\begin{aligned} dX &= k(\text{cov}_x + \text{err}_x), \\ dY &= k(\text{cov}_y + \text{err}_y), \end{aligned} \quad (13)$$

где cov_x и cov_y — значения σ из ковариационной матрицы, err_x и err_y — максимальные ошибки измерения на данном детектирующем слое, k — коэффициент, определяющий величину области.

Однако такого ускорения поиска оказывается недостаточно, так как проверяется только одна из координат, а из-за большой плотности отсчетов в область поиска попадает большое количество ложных отсчетов. Необходима дополнительная проверка, которая делается для каждого отсчета индивидуально. Геометрическая интерпретация этой проверки показана на рис. 13.

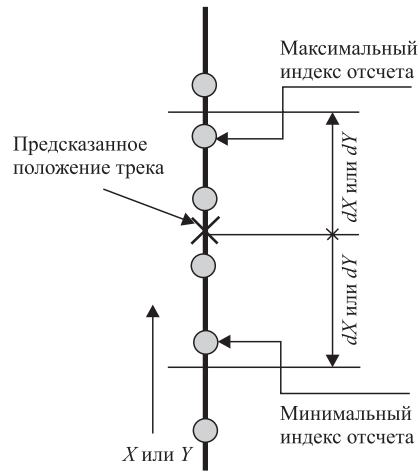


Рис. 12. Схема быстрого поиска отсчетов

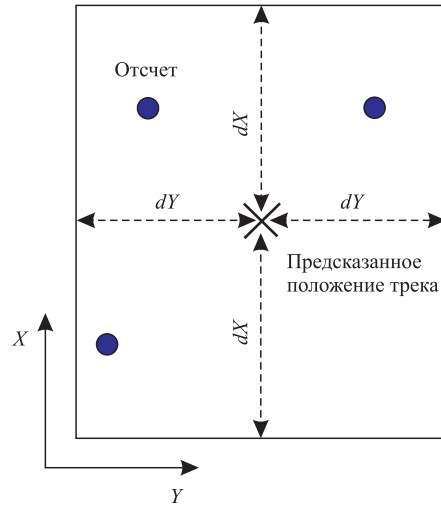


Рис. 13. Область поиска отсчетов

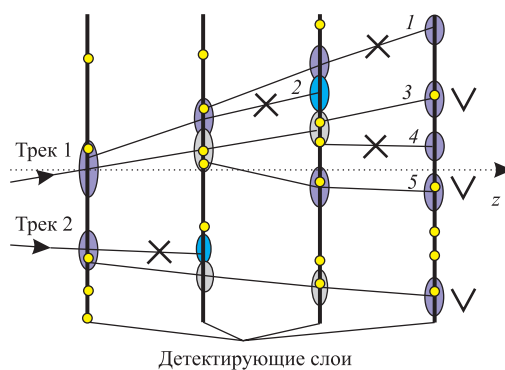


Рис. 14. Схема работы алгоритма слежения треков

Величины dX и dY вычисляются по формуле (13), однако ошибки измерения err_x и err_y вычисляются для каждого конкретного отсчета.

На рис. 14 схематически показано, как работает процедура слежения треков. В данном примере предполагается, что у каждого трека может быть не более одного пропущенного отсчета. Показано, как происходит разветвление трека на примере двух треков на входе. Для трека 1 на первом детектирующем слое в область поиска попал один отсчет, в результате создается два разветвления: одно — для отсчета, второе — для пропущенного отсчета. Каждая из ветвей трека дальше прослеживается независимо. На втором детектирующем слое от каждой ветви трека откладывается своя область поиска, происходит поиск отсчетов, создание новых ветвей трека. И так далее, пока не будет достигнут последний детектирующий слой в станции. На примере ветви 5 видно, что дополнительное ответвление трека для пропущенного отсчета на слоях 1, 2, 4 не создается, так как на первом детектирующем слое уже был пропущен отсчет. Таким образом, для трека 1 было создано пять ответвлений, два из которых дошли до последнего детектирующего слоя станции и будут участвовать в дальнейшем поиске; для трека 2 было создано два ответвления, одно из которых оказалось хорошим. Галочками отмечены три трека, прослеженные до конца.

3.3.2. Глобальный поиск треков. В выходном массиве треков-кандидатов после алгоритма слежения находится большое количество треков-клонов (т. е. треков, состоящих из схожего набора отсчетов), а также ложно найденных треков. Задача алгоритма глобального поиска треков — это поиск и отбор «хороших» (т. е. тех, которые не являются комбинациями случайных отсчетов или не состоят из частей других треков) треков и отсева клонов и ложных треков среди всех треков-кандидатов. На вход процедуры подается массив с найденными треками-кандидатами.

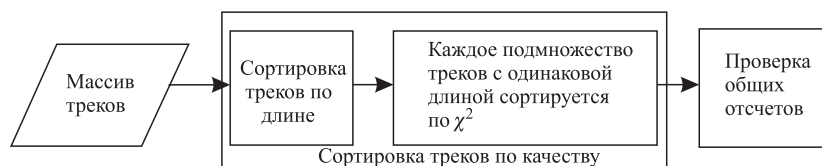


Рис. 15. Блок-схема отбора треков по критерию качества

В целях оптимизации сравнивалось несколько разработанных подходов выбора критерия качества треков. Были проанализированы пороговые критерии отбора треков согласно таким параметрам, как длина, количество отсчетов, импульс, χ^2 и др. На основе этого анализа в качестве критерия качества было предложено использовать значение χ^2 и длину трека. С учетом возможной неэффективности станций длина трека определяется как количество станций между первой и последней, в которых был зарегистрирован трек. Блок-схема процедуры отбора треков на основе этого критерия показана на рис. 15. Треки сортируются в порядке их качества. После этого выполняется алгоритм, проверяющий общие отсчеты для треков, что позволяет идентифицировать треки-клоны.

Проверка общих отсчетов для треков, отсортированных по качеству, выполняется следующим образом. Последовательно для каждого трека вычисляется количество отсчетов, принадлежащих трекам с более высоким качеством. Если количество отсчетов не более определенного порога, то такой трек считается «хорошим», в противном случае — «плохим».

Таким образом, окончательный алгоритм глобального поиска получен как результат последовательного применения нескольких простых алгоритмов сортировки и отбора.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе представлены результаты работы алгоритма реконструкции треков.

Так как эксперимент СВМ находится на стадии проектирования, данные были смоделированы с помощью программного обеспечения эксперимента [5].

Эффективность распознавания треков определялась с помощью известной информации Монте-Карло о модельных треках. Определим *правильно найденный* трек как трек, у которого более 70% отчетов принадлежат одному модельному треку, в противном случае трек определяется как *ложный*. Для

правильно найденных треков может возникнуть ситуация, когда два (или более) трека будут ассоциированы с одним и тем же модельным треком, в этом случае учитывается только один «хороший» трек с наибольшим количеством правильных отсчетов, а остальные считаются клонами.

В общем случае эффективность поиска треков определяется в процентах как

$$\text{eff} = \frac{N_{\text{rec}}}{N_{\text{ac}}} 100 \%,$$

где N_{rec} — количество правильно найденных треков, N_{ac} — количество принятых треков, т. е. треков, которые потенциально возможно реконструировать (в работе это количество треков определялось по минимально допустимому количеству отсчетов в смоделированном треке, которое принималось равным количеству детектирующих слоев в детекторе).

Эффективность поиска треков принято классифицировать для различных категорий треков:

- All — все треки;
- Reference — первичные треки с импульсом больше 1 ГэВ для TRD и 2 ГэВ для MUCH;
- Primary — первичные треки;
- Secondary — вторичные треки;
- Muon — первичные мюонные треки (только для MUCH);
- Ghost — ложно найденные треки;
- Clone — треки-клоны, сформированные из схожего набора отсчетов.

Для представленных результатов мы использовали следующие выборки событий, смоделированных в соответствии с требованиями физиков-экспериментаторов:

- TRD: 1000 центральных Au–Au-столкновений при 25 АГэВ;
- MUCH: 1000 центральных Au–Au-столкновений при 25 АГэВ для моделирования фона; дополнительно в каждое событие добавлено по пять μ^+ и μ^- .

4.1. Эффективность распознавания треков в TRD. В TRD были реализованы и протестированы два различных подхода для реконструкции: 1) с использованием треков, найденных в вершинном детекторе STS, в качестве иницирующих треков и 2) автономный поиск треков, где используются только отсчеты из TRD. Во втором случае массив иницирующих треков создается путем комбинаторного перебора отсчетов в первой станции.

Эффективность алгоритма распознавания треков для стандартной геометрии с 12 детектирующими слоями представлена ниже на рис. 16.

Средние значения эффективности распознавания для первого и второго вариантов поиска представлены в табл. 1.

Алгоритмы и программы для распознавания треков в TRD были использованы в исследовании [7] по оптимизации структуры этого детектора.

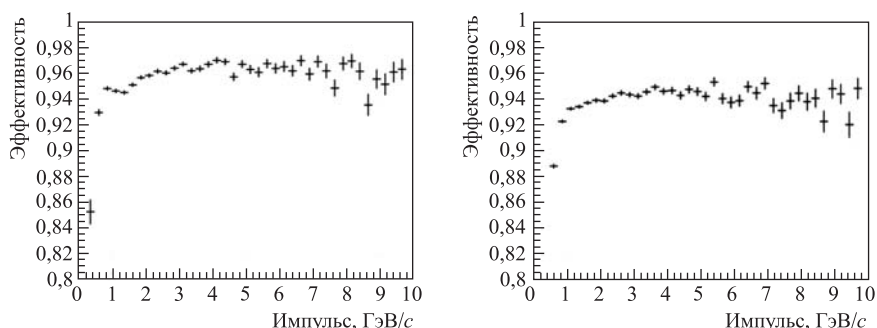


Рис. 16. Эффективность алгоритма распознавания траекторий частиц в зависимости от импульса частицы для поиска с инициирующими треками, реконструированными в STS (слева), автономного поиска треков (справа)

Таблица 1. Эффективность распознавания треков в TRD

| Тип трека | Поиск | |
|-----------|-------|------|
| | 1 | 2 |
| All | 95,5 | 89,1 |
| Reference | 95,8 | 94,4 |
| Primary | 95,6 | 94,3 |
| Secondary | 93,9 | 77,1 |
| Ghost | 3,7 | 6,2 |
| Clone | 0,0 | 0,0 |

4.2. Эффективность распознавания треков в MUCH-детекторе.

В MUCH-детекторе в качестве инициирующих треков были использованы треки, найденные в вершинном детекторе STS. Алгоритм поиска треков в MUCH должен как можно лучше искать мюонные треки и как можно меньше находить все остальные, которые составляют фон. Идеальный вариант — найти только первичные распадные пары μ^+ и μ^- . Для этого в каждое модельное событие было специально добавлено по пять μ^+ и μ^- . Эффективность распознавания мюонных треков в зависимости от импульса показана на рис. 17 для двух вариантов детектора MUCH — компактного и стандартного.

Эффективность распознавания для различных типов треков приведена в табл. 2.

Алгоритм распознавания треков включен в программную оболочку эксперимента и успешно используется физиками коллаборации CBM. В качестве примера приведем спектр инвариантных масс, полученный при обработке событий в MUCH-детекторе, для поиска ω -мезона (см. рис. 18) [8].

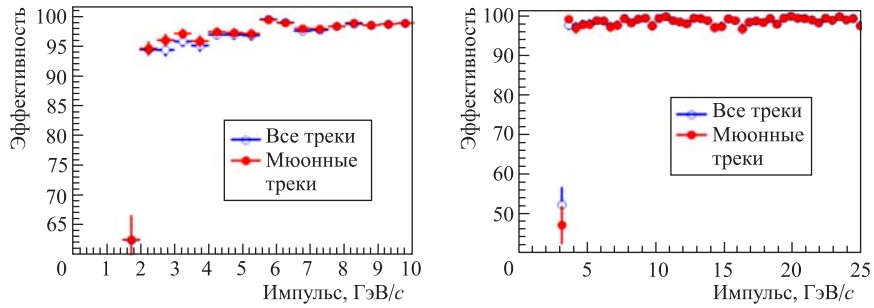


Рис. 17. Эффективность распознавания треков в MUCH-детекторе для компактного (слева) и стандартного (справа)

Таблица 2. Эффективность распознавания треков в MUCH-детекторе

| Тип трека | Компактный MUCH | Стандартный MUCH |
|-----------|-----------------|------------------|
| All | 96,2 % | 97,5 % |
| Reference | 97,1 % | 97,6 % |
| Primary | 96,4 % | 97,5 % |
| Secondary | 89,2 % | 89,0 % |
| Muons | 96,8 % | 97,5 % |
| Ghost | 1,5 % | 0,21 % |
| Clone | 0,0 % | 0,0 % |

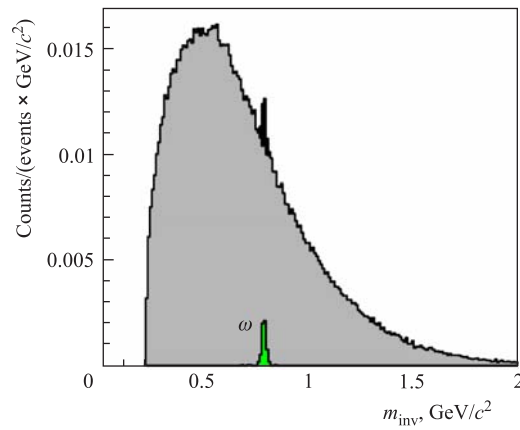


Рис. 18. Спектр инвариантных масс для событий с ω -мезоном

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный алгоритм и программное обеспечение для реконструкции треков в детекторах TRD и MUCH эксперимента CBM. Алгоритм распознавания траекторий основан на методе слежения с использованием процедуры ветвления. Был предложен алгоритм быстрого поиска отсчетов, принадлежащих треку в области предсказания, который позволил значительно ускорить процесс распознавания треков. Качество распознавания было существенно улучшено благодаря детальному учету неоднородностей магнитного поля и физических эффектов от прохождения частицы через вещество, таких как многократное рассеяние и энергетические потери при вычислениях для экстраполяции трека в детекторе. При оценке параметров треков применяется фильтр Калмана, адаптированный для исследуемых типов детекторов. Были введены критерии качества найденного трека, позволившие выполнить глобальный поиск треков.

Разработанные алгоритмы и программы устойчивы к различным вариантам входных данных, удобны в использовании и легко настраиваемы на различные варианты геометрий детекторов. Тестирование алгоритма реконструкции треков на большой статистике для различных вариантов геометрий детекторов показало его высокую эффективность. Все разработанные алгоритмы включены в программную оболочку эксперимента и широко используются участниками коллаборации CBM для физического анализа и оптимизации структуры детекторов TRD и MUCH.

Следует отметить попытки использования для реконструкции треков в MUCH-детекторе также программы L1, основанной на применении клеточных автоматов [25], однако сравнение результатов показывает преимущество нашего метода в эффективности и гибкости программного обеспечения [8].

О качестве предложенных в работе методов и программ свидетельствуют успешные результаты их сравнения с пакетом экстраполяции GEANE, приведенные в [6], а также обнадеживающие предварительные результаты их использования для новой конфигурации MUCH-детектора на основе технологии «straw tube» [31].

Что касается дальнейшего развития разработанных алгоритмов и программ, то в силу весьма жестких ограничений в проекте CBM по скорости их работы основное внимание уделяется существенному ускорению программ как за счет их тщательной оптимизации по скорости при сохранении точности и эффективности реконструкции треков, так и главным образом за счет введения параллелизма в их работу.

Авторы благодарят руководителя коллаборации CBM проф. П. Зенгера за постановку задачи и поддержку, директора ЛИТ ОИЯИ проф. В. В. Иванова за постоянное внимание и ценные указания по стилю и компоновке данной статьи, а также участников коллаборации CBM Ф. Фризе, К. Хене, И. В. Киселя

и С. А. Лебедева за многочисленные дискуссии и плодотворные обсуждения, способствовавшие выполнению данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. CBM Collab. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. GSI, Darmstadt, 2005.
2. *Lebedev A., Ososkov G.* Track Reconstruction in the CBM TRD. JINR Commun. E10-2008-3. Dubna, 2008.
3. *Fruehwirth R.* Application of Kalman Filtering to Track and Vertex Fitting // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 262. P. 444.
4. *Fruehwirth R. et al.* Data Analysis Techniques for High-Energy Physics. Second edition, Cambridge Univ. Press, 2000.
5. FairRoot Framework. <https://fairroot.gsi.de>
6. *Lebedev A., Ososkov G.* LIT Track Propagation for CBM, CBM note. GSI, Darmstadt, 2008; <http://www.gsi.de/documents/DOC-2008-Dec-182-1.pdf>
7. *Иванов В. В. и др.* К вопросу об оптимизации геометрии детектора переходного излучения для эксперимента CBM. Сообщение ОИЯИ P10-2008-152. Дубна, 2008.
8. *Kiseleva A.* Status of Muon Simulations. Доклад на 12-м совещании коллаборации CBM, 13–18 октября 2008 г., ОИЯИ, Дубна; <http://www.gsi.de/documents/DOC-2008-Oct-157-1.ppt>
9. *Press W. H. et al.* Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Third edition, Cambridge Univ. Press, 2007.
10. Распознавание образов при помощи цифровых вычислительных машин: Сб. ст. / под ред. Л. Хармона, пер. с англ. с предисл. Н. Н. Говоруна. М.: Мир, 1974. 163 с.
11. *Abt I., Emeliyanov D., Kisel I., Masciocchi S.* CATS: A Cellular Automaton for Tracking in Silicon for the HERA-B Vertex Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 489. P. 389.
12. *Gyulassy M., Harlander M.* High Resolution Multiparticle Tracking without Pre-processing via Elastic Tracking // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 316. P. 238–245.
13. *Lohmann W. et al.* Energy losses of muons in the energy range 1–10000 GeV. CERN 85-03. Experimental Physics Division. 1985.
14. *Amsler C. et al.* The Review of Particle Physics // Phys. Lett. B. 2008. V. 667. P. 1.
15. *Sternheimer R. M.* // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 851.

16. *Stampfel D. et al.* Track Fitting with Energy Loss // Computer Physics Communications. 1994. V. 79. P. 157–164.
17. *Bethe H.A., Heitler W.* // Proc. R. Soc. (London) A. 1934. V. 146. P. 83.
18. *Groom D.E., Mikhov N.V., Striganov S.I.* Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV // Atomic Data and Nuclear Tables. 2001. V. 78.
19. *Fontana A. et al.* Track Following in Dense Media and Inhomogeneous Magnetic Fields. PANDA Report PV/01-07.
20. *Wolin E.J., Ho L.L.* Covariance Matrices for Track Fitting with the Kalman Filter // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 329. P. 493.
21. ROOT — An Object-Oriented Data Analysis Framework. User's Guide, July 2008. V. 5.20.;
<http://root.cern.ch>
22. GEANT — Detector Description and Simulation Tool. CERN Program Library Long Writeup W5013.
23. *Dolgoshein B.* Transition Radiation Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 326. P. 434–469.
24. *Denisov D.* Detection of Muons. Academic Lecture Fermilab, 5 April 2000;
http://www-ppd.fnal.gov/EPPOffice-w/AcademicLectures/Denisov_%20Lecture.pdf
25. *Kiseleva A. et al.* The Muon Detection System for the CBM Experiment. CBM Progress Report. 2007. P. 26.
26. ATLAS TDR 14, CERN/LHCC 99-14.
27. *Aamodt K. et al. (ALICE Collab.).* The ALICE Experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. S08002.
28. *Chatrchyan S. et al. (ALICE Collab.).* The CMS experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. S08004.
29. The DØ Experiment. <http://www-d0.fnal.gov/>
30. *Strandlie A., Wittek W.* Propagation of Covariance Matrices of Track Parameters in Homogeneous Magnetic Fields in CMS. CMS NOTE 2006/001.
31. *Lebedev A., Ososkov G.* Track Reconstruction in MUCH // 13th CBM Collab. Meeting, March 9–13 2009, GSI, Darmstadt, Germany.

Получено 21 января 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 25.03.2010.

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

Усл. печ. л. 2,00. Уч.-изд. л. 2,41. Тираж 290 экз. Заказ № 56966.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/