

P10-2007-43

С. А. Бунятов, А. С. Вовенко¹, И. М. Иванченко²,
Н. Н. Карпенко, Б. А. Попов

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ В «НЕЙТРИННОМ ДЕТЕКТОРЕ ИФВЭ–ОИЯИ»

¹Институт физики высоких энергий, Протвино

²E-mail: ivanko@cv.jinr.ru

Бунятов С. А. и др.

P10-2007-43

Реконструкция траекторий заряженных частиц
в «Нейтринном детекторе ИФВЭ–ОИЯИ»

Представлены методы и средства распознавания и определения параметров траекторий заряженных частиц, зарегистрированных модернизированным экспериментальным комплексом «Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ». В рамках регрессионного анализа разработаны алгоритмы определения кинематических параметров частиц. Исследованы точностные характеристики методов определения импульса мюонов в интервале 0,5–3,0 ГэВ/с. Относительная погрешность импульса в этом интервале составляет $(14,6 \pm 0,2) \%$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова и в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ в сотрудничестве с ИФВЭ (Протвино).

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Bunyatov S. A. et al.

P10-2007-43

Reconstruction of Trajectories in the «IHEP–JINR Neutrino Detector»

Methods and tools for recognition of trajectories and determination of their parameters for particles registered by the upgraded experimental complex «IHEP–JINR Neutrino Detector» are presented. Based on the regression analysis algorithms of definition of kinematic parameters are developed. Quantitative characteristics of muon momentum estimation in the region 0.5–3.0 GeV/c are studied. The relative error on the momentum in this range is $(14.6 \pm 0.2) \%$.

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems and at the Laboratory of Information Technologies, JINR, in collaboration with IHEP (Protvino).

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены алгоритмы и средства распознавания и определения параметров траекторий заряженных частиц, зарегистрированных модернизированной установкой «Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ» [1] (рис. 1).

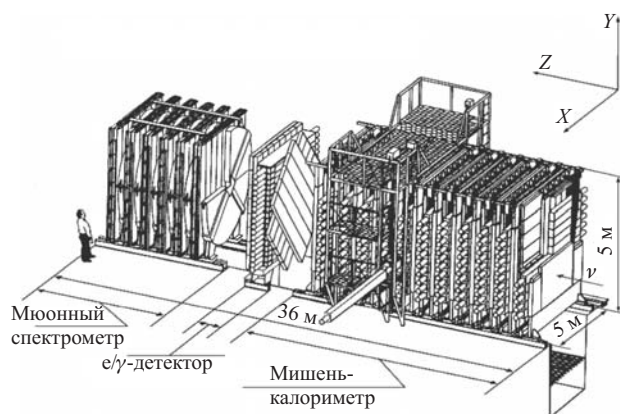


Рис. 1. Общий вид экспериментального комплекса «Нейтринный детектор»

Установка была создана для экспериментов в нейтринных пучках, генерируемых на протонном ускорителе У-70 (Протвино). Конструкция установки позволяла использовать ее в двух вариантах. В первоначальном варианте детектор использовался для изучения глубоконеупругих взаимодействий нейтрино при высоких энергиях (3–30 ГэВ). В новом варианте детектор ориентирован на исследование малочастичных квазиупругих и упругих процессов при меньших энергиях нейтрино (1–3 ГэВ). Для реализации нового направления исследований весь экспериментальный комплекс, включая нейтринный канал, был существенно модифицирован. В ИФВЭ был создан новый вариант нейтринного пучка со средней энергией 1,5 ГэВ. В процессе модернизации детектора учитывалось требование существенного повышения точностных характеристик регистрирующей аппаратуры. Полностью была заменена электроника для сцинтилляционных счетчиков на более быстродействующую. Временное разрешение счетчиков было улучшено более чем на порядок и составило 1,2 нс [2]. Мишенная часть нейтринного детектора состоит из 36 модулей.

Каждый модуль включает в себя плоскость сцинтилляционных счетчиков, две плоскости дрейфовых камер (XZ , YZ) и рамный магнит. Расстояние между плоскостями счетчиков составляет 75 см.

Стремление реализовать потенциальные возможности нового канала, модернизированной установки, радикально изменившейся операционной среды программирования и компьютерного обеспечения, с одной стороны, и опыт применения разработанной ранее методики моделирования и обработки данных, с другой, предопределили создание нового варианта математического и программного обеспечения.

Реконструкция зарегистрированных событий имеет существенную специфику в связи с бестриггерным режимом работы экспериментального комплекса. Совокупность данных, зарегистрированных в течение одного сброса пучка ускоренных протонов на мишень, может содержать несколько перекрывающихся событий. Поэтому в задачи анализа экспериментальной информации входит распознавание и классификация сигнальных событий не только в пространстве, но и во времени. Для декомпозиции событий, регистрируемых дрейфовыми камерами в течение одного сброса пучка, используется информация, зарегистрированная сцинтилляционными счетчиками — детекторами с высоким временным разрешением. Для визуализации событий на этапе разработки и тестирования алгоритмов распознавания и анализа информации о траекториях использовалось программное обеспечение, созданное на базе системы ROOT.

РАСПОЗНАВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ

На рис. 2 представлен результат распознавания типичного события, зарегистрированного экспериментальным комплексом. Показаны отсчеты в дрейфовых камерах и сцинтилляционных счетчиках, а также восстановленные траектории частиц.

С учетом предыдущего опыта [3, 4] реализован метод слежения по траектории отдельно для каждой проекции (XZ , YZ). Слежение ведется в направлении, обратном направлению движения частиц: при удалении от вершины плотность траекторий многолучевых событий снижается, таким образом уменьшается вероятность статистической ошибки второго рода. В качестве базового элемента траектории используется стринг, описываемый линейной и угловой координатами, вычисленными методом наименьших квадратов. В процессе распознавания прогноз-экстраполяция проводится по параболе, реализуется кусочная аппроксимация найденных точек. Параметризация опорной функции выбрана на основе обработки моделированных и экспериментальных данных. Если в камере стринг на траектории отсутствует или прогнозируемая точка попадает в магнитную оболочку установки, то границы

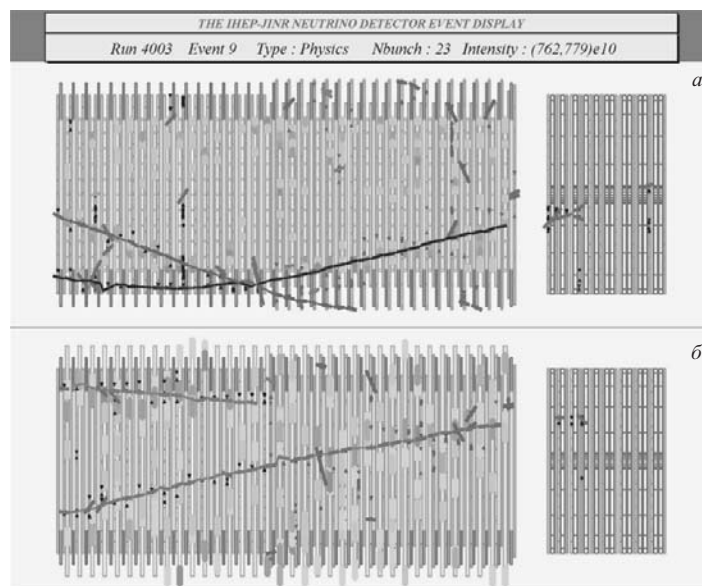


Рис. 2. Проекция события: а) YZ ; б) XZ

области поиска расширяются. Процесс распознавания фрагмента прекращается, если более чем в трех камерах подряд не найдены стринги или прогноз выходит за пределы рабочей области детектора.

Найденный фрагмент должен удовлетворять ряду критериев. Эти критерии учитывают длину фрагмента и относительное количество пропусков. Если фрагмент удовлетворяет всем критериям, то найденные стринги в дальнейшем в распознавании не участвуют.

После нахождения всех фрагментов они объединяются в проекции траекторий по следующим правилам.

1. Координаты и угловые наклоны фрагментов в точках объединения должны быть достаточно близкими: требование непрерывности аппроксимирующих функций и их производных.
2. Количество отсутствующих стрингов между концом одного фрагмента и началом другого не превышает заданной величины.

Если фрагмент не объединяется с другими, то он рассматривается в качестве проекции траектории. На заключительном шаге этого этапа применяется критерий количества найденных и потерянных стрингов. Такая многоступенчатая многопараметрическая процедура, требующая тщательной оценки пороговых констант, обусловлена движением частиц в тормозящей среде и в магнит-

ной оболочке, предназначенной для обеспечения эффективной регистрации частиц и определения их импульса.

Для распознавания пространственных траекторий использовались два метода, основанные на анализе информации от двух взаимодополняющих типов детекторов. Один тип детекторов (дрейфовые камеры) обеспечивает высокое пространственное разрешение и эффективность регистрации, а второй (сцинтилляционные счетчики) — высокое временное разрешение.

Для нахождения соответствующих пар проекций, образующих пространственные траектории, используется информация со сцинтилляционных счетчиков (критерий согласованности во времени) и данные с дрейфовых камер — прецизионных координатных детекторов (критерий согласованности в пространстве относительного перекрытия и множественности). Две проекции (X -проекция и Y -проекция) образуют пространственный трек, если они одновременно зарегистрированы достаточным числом сцинтилляционных счетчиков. Для самых коротких траекторий (три стринга) требуется срабатывание хотя бы одного счетчика. Для более длинных число сработавших сцинтилляционных счётчиков должно быть не менее половины числа стрингов, образующих данную траекторию. Эффективность распознавания траекторий оценивалась по результатам обработки моделированной информации и в рассматриваемых условиях составила 95–97 %.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ

Исходной информацией для определения кинематических параметров частиц служат зарегистрированные дрейфовыми камерами координаты точек траекторий и физические характеристики рабочей среды.

Основные особенности данной задачи состоят в наличии неоднородного магнитного поля, в существенных рассеивающих свойствах рабочей среды и сравнительно невысокой энергии регистрируемых частиц.

Введем правую декартову систему координат XYZ такую, что ось OZ направлена по пучку и проходит через центр установки, ось OX направлена горизонтально, а ось OY — вверх (рис. 1).

Рассмотрим вектор параметров $\mathbf{P}(x_0, y_0, a_x, a_y, p)$ в точке $z = z_0$, где x_0 — x -координата траектории; y_0 — y -координата траектории; a_x — угловой коэффициент в плоскости XOZ ; a_y — угловой коэффициент в плоскости YOZ ; p — значение импульса в точке (x_0, y_0, z_0) .

Для решения задачи используется метод, модификации которого широко применяются при обработке информации [5–8].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая движение частицы в магнитном поле, решалась методом последовательных приближений. Для построения итерационного процесса исполь-

зудается система уравнений

$$\begin{aligned}x &= x_0 + a_x z + \frac{1}{p} A_1(z), \\y &= y_0 + a_y z + \frac{1}{p} A_2(z),\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}A_1(z) &= \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} F(v) dv du, \\A_2(z) &= \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} G(v) dv du, \\F(z) &= \frac{f(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/p}, \\G(z) &= \frac{g(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/p},\end{aligned}\tag{2}$$

($E(p, z)$ — функция энергетических потерь, B_x, B_y, B_z — компоненты магнитного поля),

$$f(x', y', B_x, B_y, B_z) = \frac{e}{c} (1 + x'^2 + y'^2)^{1/2} [y' B_z - (1 + x'^2) B_y + x' y' B_x],$$

$$g(x', y', B_x, B_y, B_z) = \frac{e}{c} (1 + x'^2 + y'^2)^{1/2} [(1 + y'^2) B_x - x' B_z - x' y' B_y]$$

(e — заряд частицы, c — скорость света).

Для вычисления \mathbf{P} на каждом шаге итерационного процесса применяется метод наименьших квадратов. Начальные оценки x', y', B_x, B_y, B_z, p для вычисления повторных интегралов $A_1(z)$ и $A_2(z)$ получаем, применяя аппроксимацию траектории на плоскости XOZ, YOZ полиномами не выше третьего порядка. Текущее значение \mathbf{P} вычисляется в результате решения системы нормальных уравнений $[E^T \cdot D^{-1}(\mathbf{V}) \cdot E] \cdot \mathbf{P} = E^T \cdot D^{-1}(\mathbf{V}) \cdot \mathbf{V}^T$, где E — структурная матрица, соответствующая системе (1); $D(\mathbf{V})$ — весовая матрица измерений \mathbf{V} ; $\mathbf{V} = \mathbf{X} \cup \mathbf{Y}$.

Найденное значение \mathbf{P} используется для уточнения $A_1(z)$ и $A_2(z)$, после чего выполняется следующая итерация и т.д. до достижения необходимой точности.

Исследуемые частицы могут полностью терять энергию в рабочей области установки. Для учета таких случаев выражение $1 - E(p, z)/p$ в формулах (2) заменяется на $1 + E(p, z)/p$ с ограничением на p снизу и выполняется численное интегрирование для вычисления $A_1(z), A_2(z)$ от последнего модуля

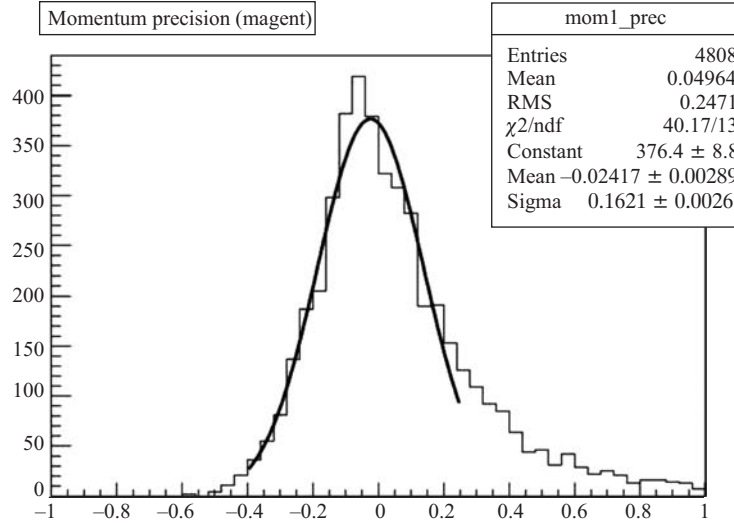


Рис. 3. Распределение относительной погрешности оценки импульса, полученной с использованием решения уравнений движения частиц в магнитном поле

к первому. Для упрощения вычислительной процедуры в качестве варьируемого параметра выбирается величина, обратная импульсу. Это обеспечивает линейную зависимость функционального аргумента от искомым параметров.

Точностные характеристики полученной оценки представлены на рис. 3.

Для частиц, не выходящих за пределы рабочей области, импульс определялся по пробегу в веществе. При этом применялся традиционный алгоритм. Для определения потерь энергии на каждом однородном участке использовались табулированные функции, применяемые в программе моделирования GEANT 3. Двигаясь вдоль траектории, вычисляем длины пробегов в каждом веществе. Искомое значение импульса находилось с использованием значений потерь энергии, соответствующих найденным длинам пробегов.

Характеристики алгоритмов оценки импульса определялись на выборке моделированных мюонных траекторий с импульсом в интервале 0,5–3 ГэВ/с. Исследования точностных характеристик вышеприведенного алгоритма определения импульса по пробегу показали значительное систематическое отклонение найденных значений импульса от ожидаемых:

$$\langle dP/P \rangle = \langle (P_{\text{rec}} - P_{\text{mc}})/P_{\text{mc}} \rangle = 14\%$$

(P_{mc} — исходный импульс, P_{rec} — восстановленный импульс). Кроме этого, распределение относительной погрешности существенно отличалось от нормального. Это стимулировало поиск других подходов для определения импульса. Мы остановились на разработке алгоритмов в рамках регрессион-

ного анализа [9]. При таком подходе решение прямой задачи моделирования, которое обычно используется как средство тестирования, применяется непосредственно для высокоавтоматизированного конструирования алгоритмов определения параметров траекторий. Такой подход успешно применялся, например, в [10] при решении аналогичной, но более сложной задачи. В рассматриваемой области обработки экспериментальных данных эти методы получили названия: метод обучающей выборки, метод табулированных траекторий и т. п. Для численного и графического представления функции регрессии можно использовать соответствующие статистические объекты пакетов NBOOK/ROOT. На одном из этапов разработки была выбрана регрессия, позволяющая получить оценку импульса в виде

$$P_2 = P_1 \cdot Q_n(P_1), \quad (3)$$

где P_1 — восстановленная традиционным методом оценка импульса, Q_n — алгебраический полином степени n . Графическая интерпретация выбранной функции одномерной многопараметрической ($n = 8$) регрессии представлена на рис. 4. Значения предиктора отложены с шагом 0,1 ГэВ/с по оси аб-

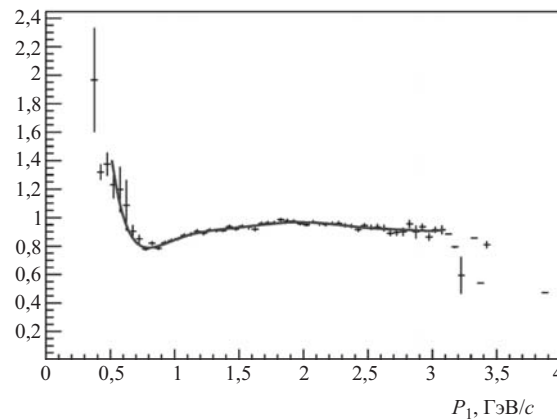


Рис. 4. Регрессия $P_{мс}/P_1$ vs P_1 на обучающей статистической выборке

сцисс, отклика — по оси ординат. Значение отклика — это математическое ожидание функции на множестве значений, соответствующих дискретности предиктора. В качестве ошибки функции при графической интерпретации и аппроксимации выбирается стандартное отклонение математического ожидания. Значение предиктора в процессе аппроксимации соответствует центру канала.

Полученная формула определяет оценку импульса, свободную от указанных ранее недостатков. Найденная функция регрессии представляет одномерную функцию, что обеспечивает ее графическое представление стандартными

средствами, созданными для статистического анализа данных в области физики частиц.

Целью дальнейших разработок было редуцирование размерности пространства параметров. Была построена регрессия P_{mc}/P_1 vs N_{mod} . В результате была найдена оценка импульса в виде $P_2 = P_1 \cdot Q_n(N_{mod})$, где $n = 1$, N_{mod} — длина проекции траектории. Значения коэффициентов определены методом наименьших квадратов, а величина оценки импульса определяется выражением

$$P_2 = P_1 \cdot (0,732 + 0,01 \cdot N_{mod}).$$

Точностные характеристики полученной оценки представлены на рис. 5. Интегральные параметры распределения относительной погрешности импульса совпадают с соответствующими параметрами нормального распределения. Оценка математического ожидания является состоятельной. Относительная погрешность импульса мюонов в интервале 0,5–3 ГэВ/с составляет $(14,6 \pm 0,2)\%$. Исследования альтернативной функции регрессии, не зависящей от

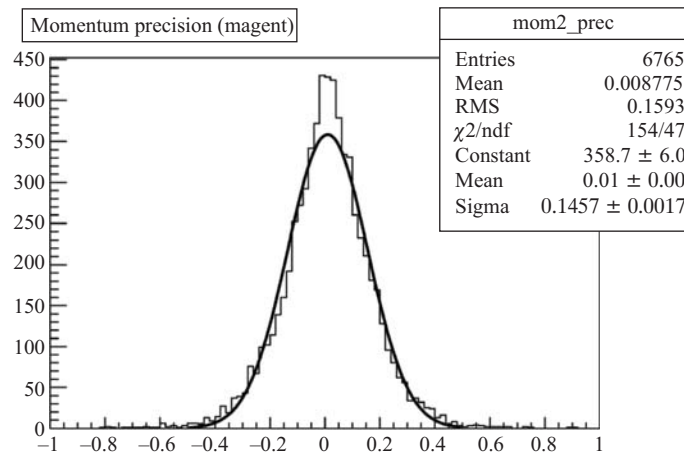


Рис. 5. Распределение относительной погрешности оценки импульса на тестовой статистической выборке. Аппроксимирующая кривая — график нормального распределения

P_1 (начального приближения оценки импульса), позволяют сделать вывод, что погрешность оценки импульса определяется главным образом погрешностью методов измерения и распознавания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано математическое обеспечение, создан комплекс программ для анализа информации о траекториях, зарегистрированных установкой, включающей систему координатных детекторов в распределенной мишени.

Программный комплекс реализован на платформе, структурными звеньями которой являются OS Scientific Linux, среда программирования на C++, система ROOT. Созданы программы моделирования на основе универсального пакета GEANT, дополненного программной оболочкой AGI (Advanced GEANT Interface), обеспечивающей диалоговый режим и расширенные графические возможности. Роль средств сопровождения многовариантных программ в условиях коллективных разработок выполняет CVS (Concurrent Versions System).

В рамках регрессионного анализа для реальной конфигурации установки разработаны алгоритмы, найдена параметризация и определены значения параметров функции для определения импульса. Получены количественные точностные характеристики разработанных алгоритмов. Относительная погрешность импульса мюонов в интервале 0,5–3 ГэВ/с составляет $(14,6 \pm 0,2) \%$.

Для создания программного обеспечения, обработки и хранения данных используются компьютерные средства Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ.

Авторы благодарны С.П. Денисову за поддержку работы, П.В. Мойсензу и Ю.А. Нефедову — за плодотворное сотрудничество при создании программного обеспечения, З.М. Иванченко и А.В. Красноперову — за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 06-07-89035.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барабаш Л. С. и др.* Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ на нейтринных пучках ускорителя У-70 (Протвино) // ПТЭ. 2003. Т. 46, вып. 3. С. 20.
2. *Бунятов С. А. и др.* Калибровка сцинтилляционных счетчиков модернизированного калориметра установки «Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ» для идентификации частиц по времени пролета. Препринт ОИЯИ Р13-2006-104. Дубна, 2006; Письма в ЭЧАЯ. 2007. Т. 4, № 6 (в печати).
3. *Жигунов В. П. и др.* Распознавание траекторий в мишенной части нейтринного детектора // Материалы V рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ–ОИЯИ». Дубна, 1984. С. 157.
4. *Иванченко И. М. и др.* Распознавание траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора // Материалы VIII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ–ОИЯИ». Дубна, 1988. С. 192.

5. *Иванченко И. М. и др.* Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора обобщенным методом наименьших квадратов // Там же. С. 197.
6. *Иванченко И. М. и др.* Алгоритмы определения эффективной массы B_d^0 в исследованиях CP -несохранения. Сообщение ОИЯИ Р11-91-357. Дубна, 1991.
7. *Бонюшкина А. Ю. и др.* Алгоритм определения эффективной массы K_S^0 и Λ^0 , регистрируемых спектрометром ЭКСЧАРМ. Сообщение ОИЯИ Р1-93-168. Дубна, 1993.
8. *Нефедов Ю. А.* Программа восстановления импульса мюона в «Нейтринном детекторе ИФВЭ–ОИЯИ» // Материалы XVII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ–ОИЯИ». Дубна, 1995. С. 94.
9. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1984.
10. *Иванченко И. М., Мойсенз П. В.* Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора методом обучающей статистической выборки // Материалы VIII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ–ОИЯИ». Дубна, 1988. С. 187.

Получено 21 марта 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 18.04.2007.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 290 экз. Заказ № 55751.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/