

Распознавание и определение параметров траекторий, регистрируемых установкой с распределённой мишенью

«Нейтринная физика на ускорителях»

Рабочее совещание, Дубна, 24-26/01/2007

С.А. Бунятов, А.С. Вовенко, И.М. Иванченко, Н.Н. Карпенко, Б.А. Попов

Рассматриваются алгоритмы и средства анализа траекторной информации, зарегистрированной установкой, включающей систему дрейфовых камер в распределённой мишени. Установка представляет собой регулярный набор из 36 модулей, каждый из которых имеет неоднородную структуру.

Эта установка была создана в составе экспериментального комплекса «Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ» /рис.1/.

НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР

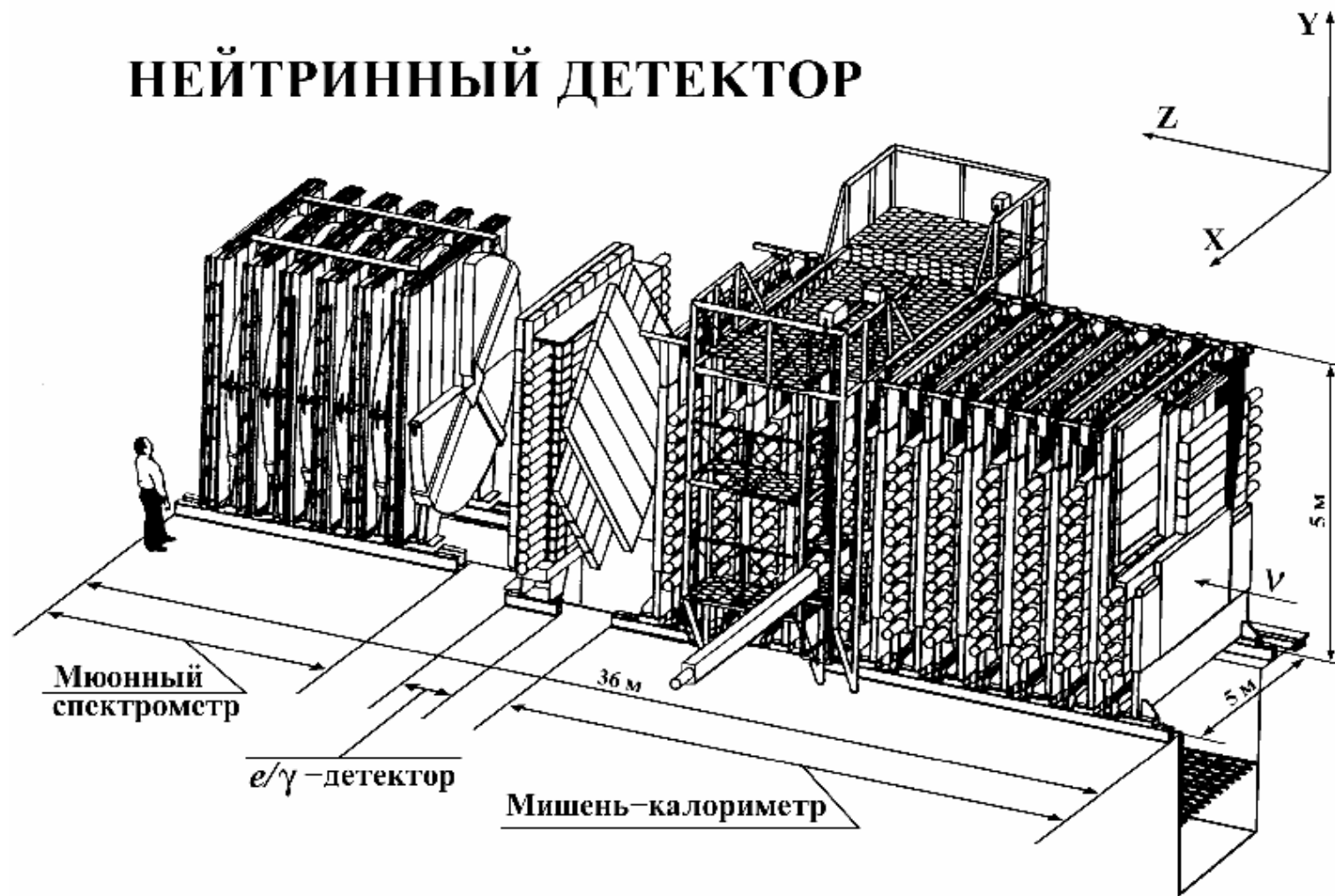


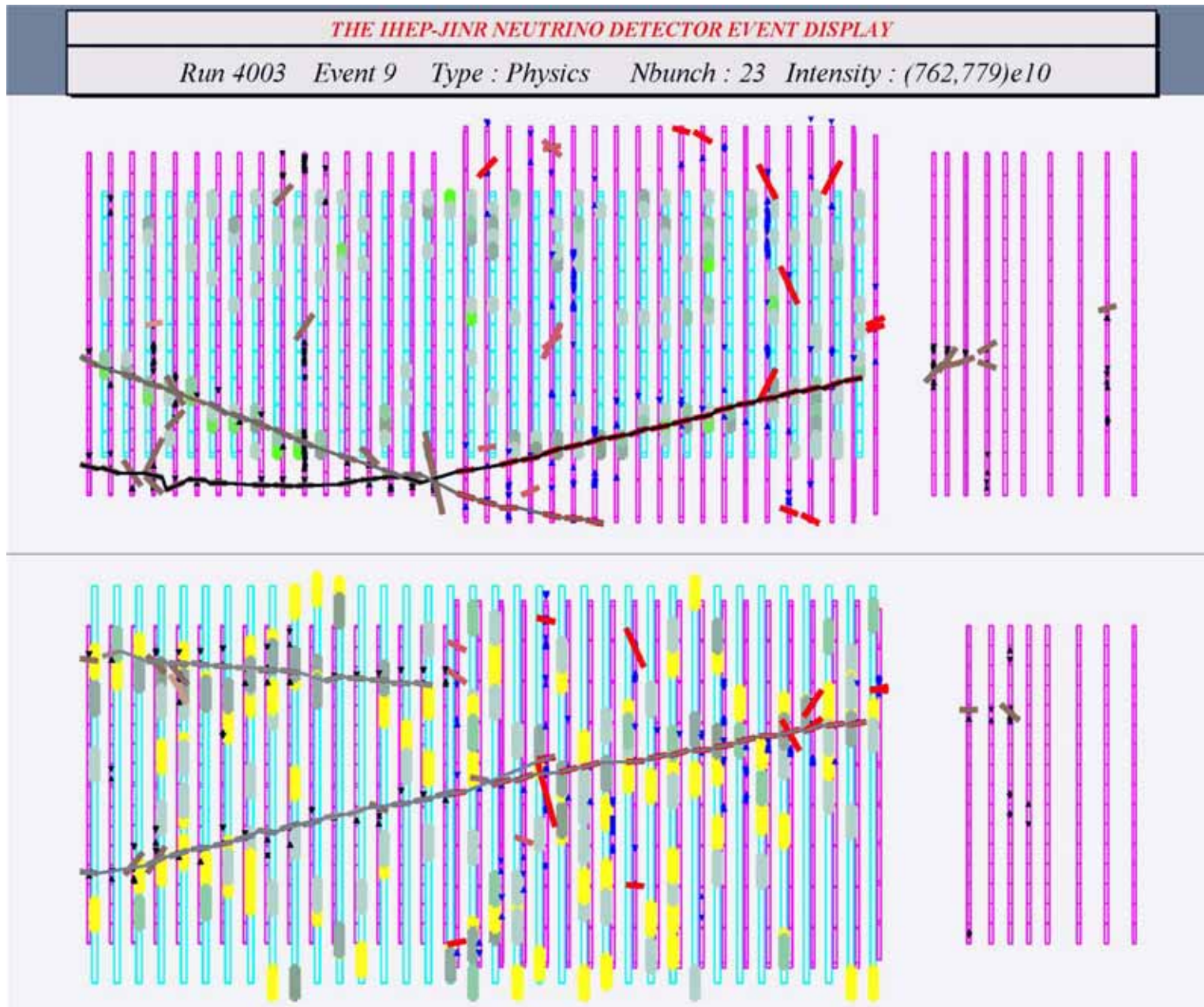
Рис.1: Общий вид экспериментального комплекса «Нейтринный детектор»

Для проведения методических разработок и нового направления исследований экспериментальный комплекс был существенно модифицирован [1]. Стремление реализовать потенциальные возможности нового канала, нового варианта 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 т.н. бестриггерным режимом работы: в задачи анализа траекторной информации входит распознавание и классификация сигнальных событий не только в пространстве, но и во времени. Для декомпозиции данных, регистрируемых дрейфовыми камерами в течение одного сброса пучка, используется информация, зарегистрированная сцинтилляционными счётчиками - детекторами высокого временного разрешения.

[1] Барабаш Л.С. и др., Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ на нейтринных пучках ускорителя У-70 (Протвино) // ПТЭ, 2003, Т.46. В.3. с.20.

Распознавание траекторий.



С учётом предыдущего опыта [2,3], реализован метод слежения по траектории отдельно для каждой проекции XZ и YZ. Слежение ведётся в направлении обратном направлению движения частиц: при удалении от вершины плотность траекторий снижается, т.о. уменьшается вероятность статистической ошибки второго рода. В качестве базового элемента траектории используется стринг, описываемый линейной и угловой координатой, вычисленных по методу наименьших квадратов. При слежении прогноз-экстраполяция проводится по параболе по трём стрингам, реализуется кусочная аппроксимация найденных точек. Параметризация опорной функции выбрана на основе обработки моделированных и экспериментальных данных. Если в текущей камере стринг на траектории отсутствует или прогнозируемая точка попадает в магнитную оболочку, то границы области поиска расширяются.

[2] Жигунов В.П. и др., Распознавание траекторий в мишенной части нейтринного детектора // ОИЯИ, Дубна, Материалы V рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ», 1984, Д1,2,13-84-332, с.157.

[3] Иванченко И.М. и др., Распознавание траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ», 1988, Д1,2,13-88-90, с.192.

Поиск прекращается, если более чем в трёх камерах подряд не найдены стринги или прогноз выходит за пределы рабочей области. Стринг может принадлежать только одному фрагменту.

Найденный фрагмент должен удовлетворять ряду критериев. Они учитывают длину фрагмента, 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, вызвана прохождением частиц в тормозящей среде и в магнитной оболочке, предназначенной для обеспечения эффективной регистрации частиц и определения их импульса.

Для распознавания пространственных траекторий используются два метода, основанные на анализе информации из двух взаимодополняющих типов детекторов. Один из них обеспечивает высокое пространственное разрешение и эффективность регистрации, а второй – высокое временное разрешение.

Для нахождения соответствующих пар проекций, образующих пространственные траектории, используется информация со сцинтилляционных счётчиков (критерий согласованности во времени), а также 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 счётчиков. Для самых коротких треков (три стринга) требуется срабатывание хотя бы одного счётчика. Для более длинных треков число сработавших сцинтилляционных счётчиков на треке должно быть не менее половины числа стрингов, образующий данный трек.

Эффективность распознавания траекторий в рассматриваемых условиях 95-97%.

Оценка параметров траекторий

Исходной информацией для определения кинематических параметров частиц служат зарегистрированные дрейфовыми камерами координаты 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 частиц.

Введём 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.

Рассмотрим вектор параметров $\vec{P}(x_0, y_0, a_x, a_y, p)$ 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 отличаются алгоритмами учёта различных возмущающих факторов и аппроксимантами траекторий и широко применяются при обработке траекторной информации [4-7].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая движение частицы в магнитном поле, решалась методом последовательных приближений.

[4] Иванченко И.М. и др., Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора обобщённым методом наименьших квадратов // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ», 1988, Д1,2,13-88-90, с.197.

[5] Иванченко И.М. и др., Алгоритмы определения эффективной массы \mathbf{V}_d^0 в исследованиях CP-несохранения // ОИЯИ, Дубна, 1991, Р11-91-357.

[6] Бонюшкина А.Ю. и др., Алгоритм определения эффективной массы \mathbf{K}_s^0 и Λ^0 , регистрируемых спектрометром ЭКСЧАРМ // ОИЯИ, Дубна, 1993, Р1-93-168.

[7] Нефёдов Ю.А., Программа восстановления импульса мюона в нейтринном детекторе ИФВЭ-ОИЯИ // ОИЯИ, Дубна, Материалы XVII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ», 1995, Д1-95-305, с.94.

Для построения итерационного процесса используется система уравнений:

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

где

$$A_1(z) = \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} F(v) dv du,$$

$$A_2(z) = \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} G(v) dv du,$$

$$F(z) = \frac{f(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z) / p},$$

$$G(z) = \frac{g(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z) / p},$$

$E(p, z)$ - функция энергетических потерь,

B_x, B_y, B_z - компоненты магнитного поля,

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

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

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

Для вычисления \vec{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 \vec{P} вычисляется в результате решения системы нормальных уравнений $\left[E^T \cdot D^{-1}(\vec{V}) \cdot E \right] \cdot \vec{P} = E^T \cdot D^{-1}(\vec{V}) \cdot \vec{V}^T$, где

E – структурная матрица, соответствующая системе (1);

$D(\vec{V})$ – весовая матрица измерений \vec{V} ;

$\vec{V} = \vec{X} \cup \vec{Y}$.

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

Исследуемые частицы могут полностью терять энергию в рабочей области установки. Для учёта таких случаев $1 - E(p, z)/p$ заменяется на $1 + E(p, z)/p$, ограничив p снизу, и выполняется численное интегрирование для вычисления $A_1(z), A_2(z)$ от последнего модуля к первому. Для упрощения вычислительной

процедуры в качестве варьируемого параметра выбирается величина обратная импульсу. Это обеспечивает линейную зависимость функционального аргумента от всех искомым параметров.

Для частиц, не выходящих за пределы рабочей области, импульс определялся также по пробегу в веществе. Применялся традиционный алгоритм. Для определения потерь энергии на каждом однородном участке использовались табулированные функции, применяемые в программе моделирования GEANT. Двигаясь вдоль траектории, вычисляем длины пробегов в каждом веществе. Искомое значение импульса находим, используя соответствующие найденным длинам значения потерь энергии.

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

$\langle dP/P \rangle = \langle (P_{rec} - P_{mc}) / P_{mc} \rangle = 14\%$ (P_{mc} – импульс исходный, P_{rec} – импульс восстановленный). Кроме этого, распределение относительной погрешности существенно отличалось от нормального. Это стимулировало поиск других подходов для определения импульса.

Мы остановились на разработке алгоритмов в рамках регрессионного анализа [8].

При таком подходе решение прямой задачи моделирования, которое обычно позиционируется как средство контроля, носит креативный характер и играет определяющую роль. Такой подход успешно применялся, например, в [9] при решении аналогичной, более сложной задачи. В рассматриваемой области обработки экспериментальных данных эти методы получили название метод обучающей статистической выборки, метод табулированных траекторий и т.п. Для численного и графического представления функции регрессии можно использовать соответствующие статистические объекты NBOOK/ROOT. На одном из этапов разработки была выбрана регрессия, позволяющая получить оценку импульса в виде $P2=P1*Qn(P1)$, где $P1$ – восстановленная традиционным методом оценка импульса, Qn - алгебраический полином степени n . Графическая интерпретация выбранной функции одномерной многопараметрической регрессии, ($n=8$), представлена на Рис. 2.

[8] Regression analysis. Set of ideas, methods and the tools used for parameterization of regression function $y(x)$ - conditional expectation from random variable x .

[9] Иванченко И.М., Мойсенз П.В., Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора методом обучающей статистической выборки // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по «Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ», 1988, Д1,2,13-88-90, с.187.

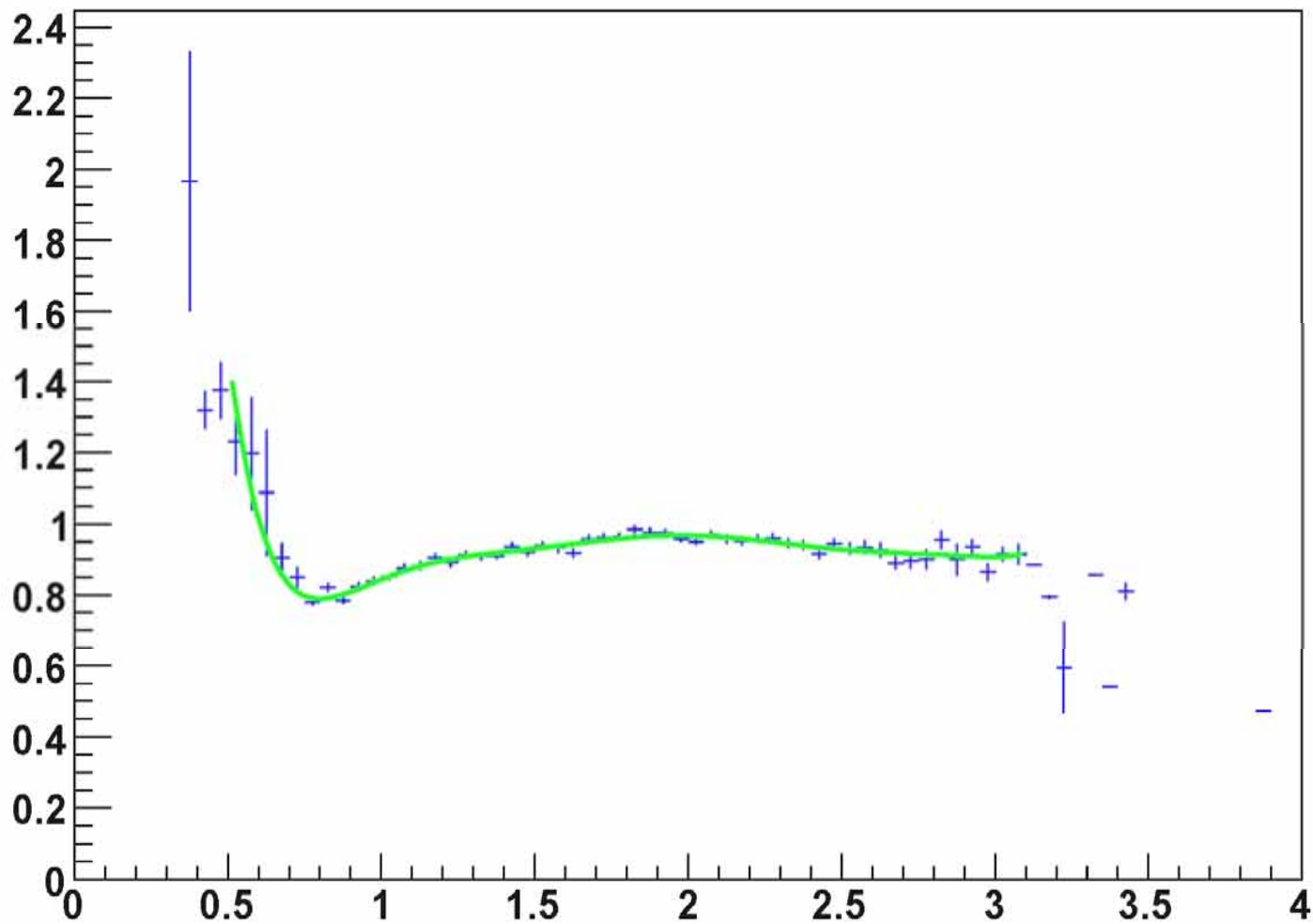


Рис. 2: Регрессия P_{mc}/P_1 vs P_1 на обучающей выборке.

Значения предиктора отложены с шагом 0.1 ГэВ/с по оси абсцисс, отклика – по оси ординат. Значение отклика – 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 – центр канала.

Полученная формула определяет оценку импульса, свободную от указанных ранее недостатков. Найденная функция регрессии представляет одномерную функцию, что обеспечивает, в частности, её 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 обработки и параметризации функции регрессии была найдена оценка импульса в виде $P_2 = P_1 * Q_n(N_{mod})$, где $n=1$, N_{mod} - длина проекции траектории. Значения коэффициентов определены по методу наименьших квадратов и величина оценки импульса определяется выражением:

$$P_2 = P_1 * (0.732 + 0.01 * N_{mod}).$$

Точностные характеристики полученной оценки представлены на [Рис. 3](#).

Интегральные характеристики распределения относительной погрешности импульса совпадают с соответствующими параметрами нормального распределения. Оценка математического ожидания – состоятельная, стандартное отклонение - менее 15%.

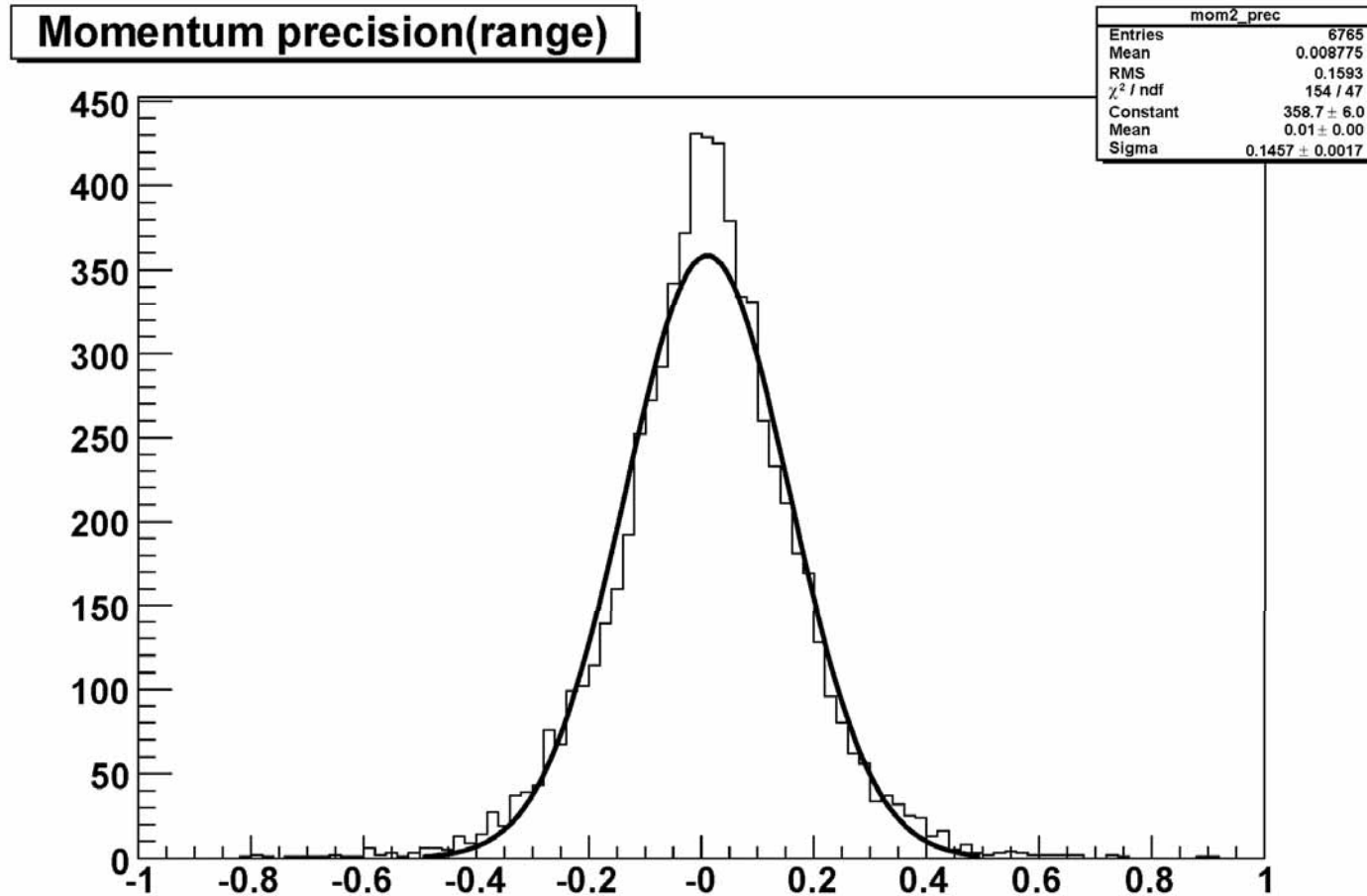


Рис.3: Распределение относительной погрешности оценки импульса на тестовой статистической выборке. Аппроксимирующая кривая соответствует нормальному распределению.

Исследования альтернативной функции регрессии, не зависящей от $P1$ - начального приближения оценки импульса, позволяют сделать вывод, что погрешность оценки импульса определяется погрешностью методов измерения и распознавания.

Заключение

Комплекс программ реализован на платформе, структурными звеньями которой являются OS Scientific Linux, среда программирования на C++, система ROOT. Программы моделирования созданы 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.

В рамках регрессионного анализа для реальной конфигурации установки найдена параметризация и определены значения коэффициентов функции для определения значения импульса. Получены количественные точностные характеристики алгоритма определения импульса по пробегу.

Авторы благодарны С.П. Денисову за поддержку работы, П.В. Мойсензу и Ю.А. Нефёдову за сотрудничество на всех этапах создания программного обеспечения, З.М. Иванченко за полезные обсуждения.