

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

10-95-298

На правах рукописи
УДК 51—72: 539.12

КЕТИКЯН
Армен Жирайрович

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ДАНЫХ УСТАНОВКИ ИСТРА—М**

Специальность: 05.13.16 — применение вычислительной
техники, математического моделирования
и математических методов в научных исследованиях

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1995

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, с.п.с.

В. С. Курбатов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук, с.п.с.

И. М. Иващенко,
М. И. Гуревич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований, г. Троицк

Защита диссертации состоится "13" сентября 1995 года в 10³⁰ часов
на заседании Диссертационного совета Д047.01.04 при Лаборатории вычислитель-
ной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "11" сентября 1995 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д047.01.04
кандидат физико-математических наук

Ивац

З.М. Иващенко

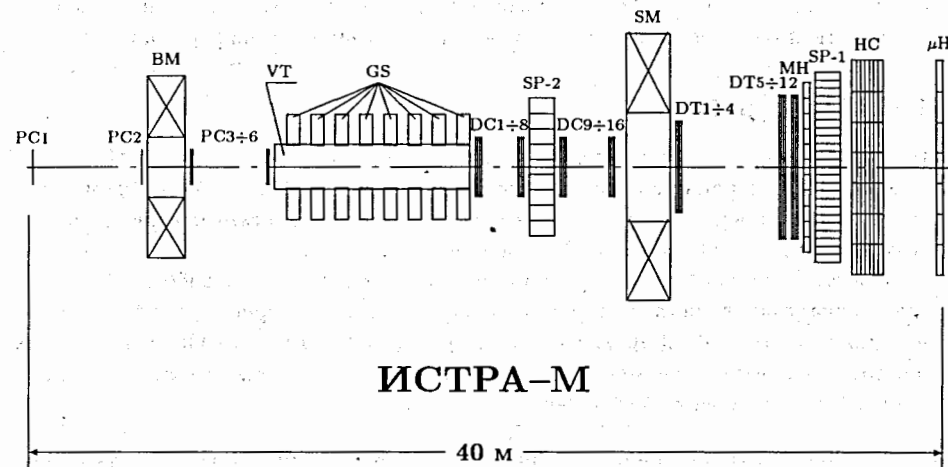


Рис. 1: Конфигурация модернизированной установки ИСТРА-М.
PC — пропорциональные камеры; BM — пучковый магнит; VT — распадный
объем; GS — охранная система; DC — дрейфовые камеры; SP-2 — черенковский
спектрометр; SM — спектрометрический магнит; DT — дрейфовые трубки; MH
— матричный годоскоп; SP-1 — черенковский спектрометр; HC — адронный
калориметр; μ H — мюонный годоскоп.

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность работы

В 1975 году Институтом Ядерных Исследований АН СССР была инициирована программа исследования редких распадов π - и K -мезонов на ускорителе $У-70$ в ИФВЭ (г. Протвино). Установка ИСТРА, адекватная решению этой задачи, была создана и успешно запущена на канале адронов с энергией ≈ 25 ГэВ на $У-70$. К середине восьмидесятых годов на этой установке была получена серия интересных результатов по распадам K -мезонов, большая часть из которых была представлена на международных конференциях и вошла в таблицы элементарных частиц.

В конце восьмидесятых годов установка была существенно модернизирована. Окончательная конфигурация установки ИСТРА-М, созданной в результате такой модернизации, показана на рис.1.

В 1992 и 1994 годах на установке было проведено три сеанса, в течение которых набрано ≈ 850 магнитных лент экспериментальной информации ($\approx 3.4 \cdot 10^7$ триггеров).

В связи с тем, что вся "off-line" обработка экспериментальных данных проводилась на персональных компьютерах, возникла необходимость создания быстрой

И. М. Иващенко
З. М. Иващенко
Библиотека

и экономной системы обработки, способной эффективно решать задачи, связанные с обработкой большого количества накопленной физической информации.

1.2 Цель работы

Целью настоящей работы является создание системы "off-line" обработки экспериментальных данных, полученных на установке ИСТРА-М. Общая схема этой системы представлена на рис.2, где выделены основные её стадии: калибровка детекторов, реконструкция событий и кинематический анализ.

Пространственной реконструкции событий предшествует обработка результатов специализированных экспозиций (калибровочных измерений), предназначенных для геометрической привязки детекторов, координатной калибровки трековых детекторов и энергетической калибровки спектрометрических детекторов. Задачи процедуры калибровки следующие:

- определить геометрическую привязку всех детекторов установки к выбранной общей системе координат, т.е. определить набор констант, характеризующих пространственное расположение детекторов;
- определить калибровочные константы трековых детекторов, т.е. определить параметры функции преобразования амплитуд сигналов, поступающих из каналов детекторов, в координаты;
- определить калибровочные константы ливневых детекторов, т.е. определить коэффициенты перевода амплитуд сигналов, поступающих из спектрометрических каналов, в энергии;
- определить передаточную функцию спектрометрического магнита, т.е. определить параметры функции, которая описывает зависимость угла отклонения заряженной частицы при её прохождении через магнитное поле от величины импульса частицы.

Стадия пространственной реконструкции (или распознавания образа) события состоит из анализа измерений с целью определения наиболее вероятных значений различных величин — таких как координаты, пространственные углы, кривизна или импульс, энергия или скорость — которые должны быть назначены каждой частице до и после взаимодействия. Реконструкция событий производится за два прохода рабочей ленты. Во время первого прохода происходит поправка калибровочных констант, связанная с изменениями параметров электроники во времени. Основными задачами второго прохода программы пространственной реконструкции событий являются:

- геометрическая реконструкция событий — восстановление треков заряженных частиц и определение вершин распадов;

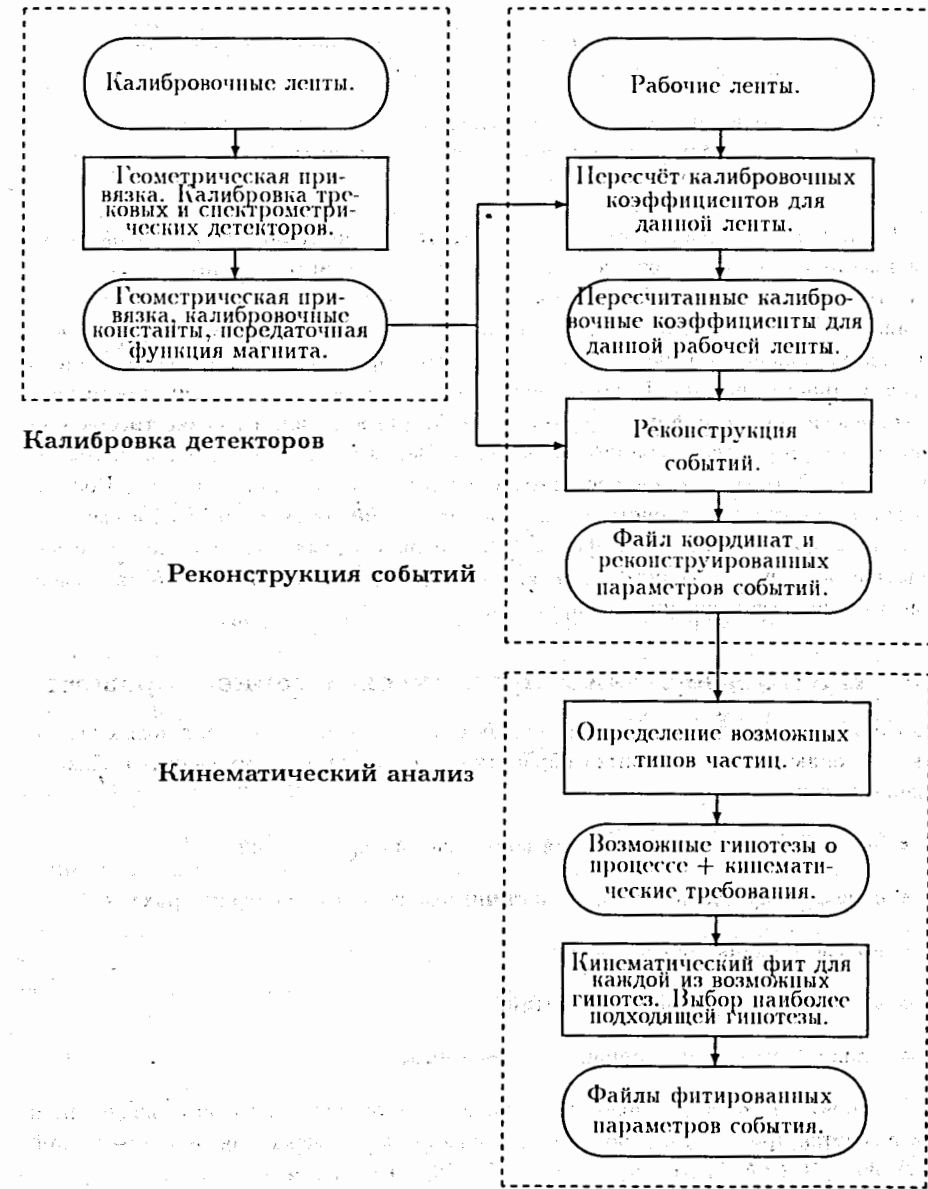


Рис. 2: Общая схема системы обработки экспериментальных данных установки ИСТРА-М.

- вычисление импульсов заряженных частиц;
- реконструкция ливней в электромагнитных и адронном калориметрах — распознавание ливней и вычисление их характеристик;
- установка реакций детекторов идентификации типов частиц на прохождение частицы (электромагнитного и адронного калориметров и мюонного детектора).

На стадии кинематического анализа результаты пространственной реконструкции вместе с законами сохранения используются для интерпретации рассматриваемого взаимодействия. Кинематический анализ необходим для идентификации каналов распада, а также для уточнения кинематических переменных, соответствующих каждой частице. По откликам детекторов делается предположение о типах вторичных частиц. Исходя из этого выдвигается возможная гипотеза о процессе, вследствие чего формулируются определённые кинематические требования в виде соответствующих законов сохранения. Затем проводится фит с использованием этих требований и непосредственно измеренных координат события. Восстановленные на стадии реконструкции параметры события используются в качестве начальных значений во время фита. Параметры события, полученные после кинематического фита, хранятся для их последующего статистического анализа с целью изучения интересующего процесса.

1.3 Научная новизна и практическая ценность работы

В ходе работ над созданием системы обработки было разработано ряд новых подходов к решению задач, связанных с обработкой экспериментальных данных в области физики высоких энергий:

- аналитического представления компонент магнитного поля;
- оценки импульса заряженной частицы в магнитных спектрометрах;
- прослеживания треков частиц;
- кинематического анализа событий;
- минимизации χ^2 функционалов со связями.

В основу диссертации положены разработанные методы, которые внедрены и используются при "off-line" обработке данных с действующей экспериментальной установки ИСТРА-М на ускорителе У-70 ИФВЭ в г.Протвино.

Разработанные алгоритмы и программы имеют самостоятельное значение, носят универсальный характер и могут быть использованы на других аналогичных установках.

1.4 Апробация работы и публикации

Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1987 по 1995 гг. Работы [1, 2, 3, 4, 5], на которых основана диссертация, опубликованы в виде статей в журналах "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research", в материалах международной конференции "Computing in High Energy Physics'92", в виде препринтов ОИЯИ. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах ЛЯП ОИЯИ, ЛВТА ОИЯИ, ЕрФИ, ИФВЭ (г.Протвино), на международной конференции "Computing in High Energy Physics'92". Работы [6, 7, 8] также выполнены в рамках работ на установке ИСТРА-М.

1.5 Объём работы

Диссертация состоит из пяти глав и изложена на 80 страницах, включая 30 рисунков и список цитируемой литературы из 66 наименований.

2 Содержание работы

2.1 Первая глава

Первая глава — введение. Здесь обосновывается актуальность проведённых работ. Описывается модернизированная установка ИСТРА-М, излагаются основные задачи и особенности создания системы обработки экспериментальных данных с установки. Формулируются цели работы и описывается структура диссертации.

2.2 Вторая глава

Во второй главе описаны отдельные узлы установки ИСТРА-М, выбор общей системы координат и геометрическая привязка к ней каждого из детекторов установки. Приведены результаты энергетической калибровки одного из черенковских спектрометров полного поглощения SP-2. Описаны автоматизированная система измерений магнитного поля спектрометрического магнита установки и метод аналитического представления компонент магнитного поля [5].

Геометрическая привязка трековых детекторов определяется вместе с их калибровочными константами.

При определении геометрической привязки годоскопических детекторов (детекторов с ячеистой структурой) находят такие геометрические константы, при которых достигается максимальная эффективность регистрации частицы ячейками детектора.

Калибровка спектрометра SP-2 выполняется стандартным способом [9] с помощью расфокусированного пучка электронов с энергией 10 ГэВ. Статистика для "off-line" калибровки набиралась для каждого модуля отдельно при направленном в центр этого модуля пучке.

С целью повышения точности нахождения калибровочных коэффициентов делается предварительный отбор калибровочных событий. Это связано с примесью в пучке электронов другой энергии, с возможными утечками электромагнитного ливня на краях спектрометра и т.д.

Калибровочные коэффициенты определяются на множестве отобранных событий путём минимизации функционала

$$\chi^2 \equiv \sum_j \left(\sum_i \alpha_i A_i^j - E_0 \right)^2$$

Здесь: j — номер отобранного события; i — номер счётчика; A_i^j — амплитуда в соответствующем счётчике; $E_0 = 10$ ГэВ — энергия калибровочного пучка; α_i — искомые калибровочные коэффициенты.

При энергии 10 ГэВ энергетическое разрешение спектрометра составляет 4.4%.

Для аналитического представления компонент магнитного поля применяется известная полиномиальная модель [10, 11]. При этом для достижения необходимой точности весь измеренный объём подразделяется на кубические объёмы, количество и размеры которых выбираются в зависимости от требуемой точности. Таким образом достигается необходимая точность представления компонент магнитного поля без применения сложных моделей, требующих большого количества компьютерного времени и оперативной памяти (см., например., [12, 13, 14]).

2.3 Третья глава

Третья глава посвящена методам распознавания образа события, применяемым в процессе обработки экспериментальных данных, полученных с установки ИСТРА-М. Описана процедура восстановления трека и импульса пучковой частицы. Предложен более быстрый и простой, по сравнению с ранее известными, метод вычисления импульса заряженной частицы в магнитных спектрометрах [1]. Приводится алгоритм восстановления проекций прямолинейных треков вторичных заряженных частиц до спектрометрического магнита. Описан алгоритм восстановления полного пространственного трека вторичной частицы, основанный на процедуре прослеживания после спектрометрического магнита пространственного трека частицы. Приведено описание процедуры восстановления вершины распада первичной частицы. В этой главе изложены также алгоритмы реконструкции ливней в электромагнитном калориметре SP-2 и адронном калориметре ИС. В конце приведены гистограммы некоторых распределений, иллюстрирующие результаты реконструкции событий.

Импульс пучковой частицы оценивается по параметрам трека частицы после пучкового магнита и по хотя бы одной точке трека до магнита из соотношения

$$Y_R - Y_P = C \cdot \lambda.$$

где: Y_R — Y координата точки трека, зарегистрированной на некоторой плоскости до магнита; Y_P — Y координата точки трека, продолженного по его параметрам после магнита до этой плоскости по прямой; $\lambda = \pm 1/P$ — обратный импульс частицы со знаком заряда частицы; C — константа для данной плоскости, которая предварительно определяется по этой же формуле из специально набранных событий с известным значением импульсов.

При этом получены следующие ошибки определения импульса (включая ошибки геометрической привязки камер и ошибки определения координат): $\delta P/P = 0.1$ при импульсах 25 ГэВ/с и $\delta P/P = 0.06$ при импульсах 10 ГэВ/с.

При вычислении импульса вторичных частиц используется соотношение

$$\theta_{yz} = \lambda f(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \lambda),$$

где θ_{yz} — угол отклонения частицы в плоскости, перпендикулярной "главной" компоненте магнитного поля, $\lambda = P^{-1}$, а f — непрерывно дифференцируемая функция переменных в скобках.

Для функции f отыскивается разложение в ряд Тейлора по пяти переменным $x_0, y_0, x'_0, y'_0, \lambda$.

Для нахождения коэффициентов этого разложения генерируется файл событий физического процесса с учётом всех деталей установки. Траектории частиц рассчитываются по методу Рунге-Кутты с использованием аналитического представления компонент магнитного поля [15]. Имея значения θ_{yz} , соответствующие каждому из наборов $x_0, y_0, x'_0, y'_0, \lambda$, определяются коэффициенты разложения фитированием МНК.

Количество удерживаемых членов разложения и сами члены определяются эмпирически, судя по тому, как они влияют на точность оценки импульса.

В итоге расчётов мы остановились на аппроксимации с шестью коэффициентами (в разложении f входят степени λ не выше первой).

Разработанный метод вычисления импульса заряженной частицы в магнитных спектрометрах более экономичен по сравнению с широко используемым в настоящее время методом разложения в ряд по полиномам Чебышева [16]. В сравнении с ним описанный здесь метод даёт выигрыш в числе коэффициентов более чем на порядок, в числе машинных операций — приблизительно на два порядка (см., например, [16, 17, 18, 19]). К тому же он обладает большой простотой.

Кроме этого метод позволяет вычислить импульс частицы не только по углу отклонения в магнитном поле (т.е. по параметрам трека до и после магнита), но и по параметрам трека до магнита и только по одной точке трека после магнита. Метод проверен на двух магнитных спектрометрах.

Метод восстановления проекций кандидатов треков вторичных заряженных частиц до спектрометрического магнита аналогичен методу шпуров.

При поиске треков учитывается то, что треки вторичных частиц представляют собой прямые линии, которые расходятся по мере удаления от вершины распада. Следовательно, плотность точек, образующих треки, в случае нескольких треков уменьшается по мере удаления от вершины, поэтому поиск треков начинается с последних плоскостей трековых детекторов.

Кроме этого треки вторичных частиц выходят из конца распадного объёма, поэтому поиск точек треков происходит в некотором конусе поиска, вершиной которого является первая выбранная точка трека, а основанием — конец распадной трубы.

По мере добавления точек в трек либо сужается конус поиска (при поиске третьей точки), либо предсказывается точка (при поиске четвёртой, пятой и т.д. точек) на следующей плоскости путём проведения прямой по уже отображенным в трек (трём, четырём и т.д.) точкам. Такой предварительный отбор позволяет резко сократить число кандидатов в трек и ускорить процесс поиска.

Ввиду большого количества кандидатов в треки процесс их отбора проводится динамически, по мере накопления кандидатов.

Тестирование алгоритма восстановления проекций кандидатов треков вторичных частиц проводилось на смоделированном физическом процессе. При моделировании была введена возможность регулировки уровня фона, эффективности регистрации плоскостей трековых детекторов и размазывания истинных точек треков на случайную величину, распределённую по нормальному закону с заданной ошибкой.

Для проверки качества работы алгоритма в жёстких условиях, моделирование было проведено с уровнем фона 100%, 200% и 300%, что во много раз превышает расчётный уровень, который меньше, чем 24%.

Для событий с одной вторичной частицей при 100% уровне фона и ошибке регистрации точек 0.06 см эффективность восстановления истинных треков составило почти 100%.

Кроме этого в 12% событий выделяются ложные треки (которые, однако, исключаются после процедуры прослеживания треков).

При прослеживании пространственного трека после магнита исходили из того, что параметры пространственного трека частицы до магнита и точка этого трека после магнита однозначно задают импульс этой частицы. Следовательно, после магнита должны быть выделены те точки, которым соответствует одинаковое (в пределах выбранной ошибки) значение импульса при заданных параметрах трека до магнита.

Прослеживание трека после спектрометрического магнита проводится методом предсказания. Для предсказания точки трека на некоторой плоскости после магнита используется передаточная функция магнита — функция, описывающая зависимость между параметрами трека до магнита, импульсом частицы и точкой

трека на плоскости после магнита.

Такой подход позволяет определить параметры трека после магнита даже по одной единственной точке (для этого вычисляется импульс по этой точке, а затем определяется ещё одна точка трека по вычисленному импульсу с использованием передаточной функции магнита).

Одновременно, при прослеживании трека происходит идентификация X и Y проекций пространственного трека, вычисляется импульс частицы и устанавливается признак, определяющий возможный тип частицы.

Тестирование алгоритма прослеживания проводилось на смоделированном физическом процессе. При моделировании была введена возможность регулировки уровня фона, эффективности регистрации плоскостей трековых детекторов и размазывания истинных точек треков на случайную величину, распределённую по нормальному закону с заданной ошибкой.

Для проверки качества работы алгоритма в жёстких условиях, моделирование было проведено с уровнем фона 100%, 200% и 300%, что во много раз превышает расчётный уровень, который меньше, чем 24%.

Для событий с одной вторичной частицей при 100% уровне фона и ошибке регистрации точек 0.065 см эффективность распознавания треков составило почти 100%.

После того, как выделены трек первичной частицы и все кандидаты в треки вторичных частиц, необходимо определить координаты вершины распада первичной частицы и параметры треков частиц, выходящих из этой вершины.

Все трековые детекторы установки установлены вне воздействия магнитного поля, поэтому трек первичной частицы и все кандидаты в треки вторичных частиц являются прямолинейными и представляются в виде:

$$x = A_X + B_X \cdot z, \text{ в } X \text{ проекции,}$$

$$y = A_Y + B_Y \cdot z, \text{ в } Y \text{ проекции.}$$

и задача заключается в следующем: надо определить координаты X_v , Y_v , Z_v вершины и углы наклона каждого трека так, чтобы сумма расстояний между точками треков при $Z = Z_v$ было бы минимальным.

Эта задача решается с помощью минимизации функционала

$$\chi^2 \equiv \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{M_k^X} \left(\frac{X_v + B_X^k (Z_i^k - Z_v) - X_i^k}{\sigma_{X_i^k}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{M_k^Y} \left(\frac{Y_v + B_Y^k (Z_j^k - Z_v) - Y_j^k}{\sigma_{Y_j^k}} \right)^2 \right),$$

где:

X_i^k, Z_i^k — X и Z координаты i -ой измеренной точки k -го трека по X проекции;

Y_j^k, Z_j^k — Y и Z координаты j -ой измеренной точки k -го трека по Y проекции;

$\sigma_{X_i^k}, \sigma_{Y_j^k}$ — ошибки измерения координат X_i^k и Y_j^k , соответственно (0.06 см для всех точек, измеренных по РС и 0.1 см для всех точек, измеренных по DC камерам);

M_X^k, M_Y^k — количество измеренных точек на k -ом треке по X и Y проекции, соответственно;

N — количество треков, выходящих из вершины распада;

и $3 + 2N$ фитируемых параметров:

X_v, Y_v, Z_v — координаты вершины;

B_X^k, B_Y^k — уточнённые параметры k -го трека в представлении:

$x = X_v + B_X^k(z - Z_v)$, в X проекции k -го трека,

$y = Y_v + B_Y^k(z - Z_v)$, в Y проекции k -го трека.

Если после минимизации функционала значение нормализованного χ^2 больше некоторого порогового значения, то это означает, что среди выделенных кандидатов во вторичные треки есть "ложный" трек, т.е. трек, который не выходит из вершины распада. В этом случае из всех кандидатов во вторичные треки исключается из дальнейшего рассмотрения тот трек, который даёт максимальный вклад в χ^2 и проводится повторное фитирование искомым параметров без точек этого "ложного" трека.

Алгоритм реконструкции ливней в спектрометре SP-2 основывается на некоторых предположениях о структуре электромагнитного ливня (сигнала от электрона и γ -кванта) в спектрометре, таких как количество ячеек, занимаемых кластером электромагнитного ливня, соотношение между величинами энерговыделений в разных ячейках кластера и др.

При поиске каждого нового ливня среди всех счётчиков спектрометра определяется счётчик с максимальным энерговыделением — центр ливня. Затем ищется центр другого ливня, перекрывающегося с данным.

Если такого ливня нет, то первый ливень считается изолированным и проверяются условия, которым должен удовлетворять электромагнитный ливень.

Если имеет место перекрытие двух ливней, то происходит разделение этих двух ливней. Алгоритмом реконструкции ливней предусмотрено разделение четырёх видов перекрытия электромагнитных ливней в зависимости от количества счётчиков в перекрытии.

Для каждого восстановленного ливня по энерговыделениям в счётчиках вычисляется его энергия, X и Y координаты (по центру тяжести) [20], а также слово, содержащее информацию о ливне (об утечках энергии за границы спектрометра, о степени перекрытия ливней и т.д.)

Структура адронного калориметра позволяет рассмотреть его как семь секций — плоскостей ячеистой структуры, расположенных вдоль направления пучка и состоящих из 7×7 ячеек размером 20×20 см² [21, 22].

Из-за больших размеров ячеек калориметра и большого поперечного размера развивающихся в нём адронных ливней, точность определения координат ливней недостаточна для того, чтобы установить соответствие между пространственным треком вторичной частицы и адронным ливнем в калориметре. Мюоны же, проходящие через адронный калориметр, оставляют сигналы только в ячейках, через которые они прошли, вследствие чего мюон в калориметре выделяется с высокой надёжностью, а координаты мюона на входе в калориметр определяются с точностью до размера одной ячейки.

Поэтому при реконструкции ливней в адронном калориметре сначала выделяются сигналы от мюона, а остальное энерговыделение в калориметре присваивается адрону.

При этом учитывается также то, что траектория мюона, входящего в апертуру калориметра под углом, может перейти из одной ячейки на соседнюю по мере прохождения вдоль калориметра и что сигнал от проникающего мюона в среднем соответствует энергии адрона около 1.7 ГэВ.

В результате реконструкции событий создаётся файл координат и реконструированных параметров событий (параметров треков, импульсов частиц, вершин распадов, энергий и координат ливней и т.д.), который используется для кинематического анализа событий.

Кроме этого создаются также некоторые вспомогательные файлы: протокольный файл, файл распределений и др.

В файл распределений записываются массивы некоторых распределений, которые набираются в процессе реконструкции событий. Такие распределения помогают следить за ходом реконструкции, а также за качеством работы различных узлов установки в процессе набора экспериментальной информации.

В конце третьей главы приведены гистограммы некоторых из таких распределений.

Для графического вывода необходимой информации для персональных компьютеров адаптирован известный графический пакет ГРАФОР [23]. В пакет добавлено несколько новых подпрограмм для наиболее полного использования возможностей персональных компьютеров.

2.4 Четвёртая глава

Четвёртая глава посвящена задаче кинематического анализа событий — последней стадии в процессе распознавания физического события. Описан новый подход к проблеме кинематического фита, когда фит с применением метода множителей Лагранжа проводится с использованием непосредственно измеренных координат, а не восстановленных по ним параметров события (вершин, углов, импульсов и т.п.),

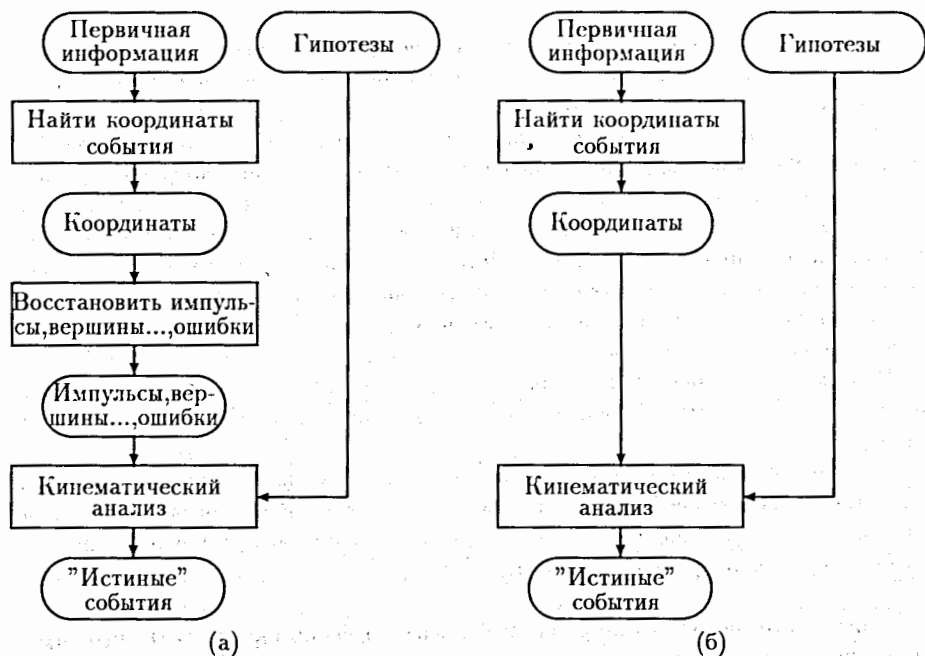


Рис. 3: Традиционная (а) и предлагаемая (б) схемы обработки данных.

как это делается традиционно [2]. Одновременно изложен новый, более экономный метод решения задач подобного типа, который приводит к уменьшению вычислительных затрат и применим к более широкому классу задач по сравнению с методом множителей Лагранжа [3, 4].

Традиционная схема обработки данных выглядит примерно так (рис.3(а)): вначале проводится геометрическая реконструкция событий, т.е. при помощи координат треков находят углы, импульсы, координаты вершин событий и т.д. Затем (и это является функцией кинематического фита) при определенных предположениях о типе процесса проводится его идентификация с привлечением законов сохранения. Технически это выглядит так: записывается χ^2 функционал, в котором фигурируют в явном виде оценки параметров, найденных в процессе геометрической реконструкции и их матрица ошибок и затем проводится его минимизация с паложением уравнений связи, выражающих законы сохранения. Минимизация проводится различными способами: методом множителей Лагранжа [24, 25] или методом с использованием дополнительного квадратичного члена [26].

Наряду с таким подходом к системе обработки данных, возможен и другой подход: на первой стадии проводить распознавание события, т.е. ассоциацию измеренных координат в событие, а на второй проводить кинематическую идентификацию

события, используя непосредственно измеренные координаты (рис.3(б)). Второй подход иногда предпочтительнее в связи с меньшим риском искажения информации. Кроме того, такая постановка задачи представляет самостоятельный интерес для общего случая минимизации функционала со связями.

При использовании методики минимизации с применением множителей Лагранжа в традиционном подходе функционал записывается в виде:

$$M = \sum_{i,j} (X_i - X_i^m) S_{ij} (X_j - X_j^m) + 2 \sum_{\lambda} \alpha_{\lambda} f_{\lambda}(\mathbf{X}),$$

где: X_i^m — найденные на стадии реконструкции значения параметров: углов, импульсов и т.д.; S_{ij}^{-1} — их весовая матрица; X_i — "истинные", т.е. искомые значения тех же параметров; $f_{\lambda}(\mathbf{X})$ — уравнения связи; \mathbf{X} — вектор "истинных" параметров.

В предлагаемом подходе функционал имеет вид:

$$M = \sum_{i,j} [C_i(\mathbf{X}) - C_i^m] G_{ij}^{-1} [C_j(\mathbf{X}) - C_j^m] + 2 \sum_{\lambda} \alpha_{\lambda} f_{\lambda}(\mathbf{X}),$$

Здесь: C_i^m — найденные на стадии распознавания координаты, G_{ij}^{-1} — их ковариационная матрица, \mathbf{X} — вектор искомых параметров (углы, импульсы, координаты вершин, ...), $C_i(\mathbf{X})$ — "истинные" значения координат, которые являются известными функциями параметров.

В четвертой главе изложена методика минимизации функционалов такого типа, даются необходимые формулы, матрицы ошибок и т.д.

Даются также результаты использования этой методики.

В этой главе также описан новый алгоритм минимизации χ^2 функционалов со связями, основанный на линейзации связей и последующим выражением части переменных через другие. По сравнению с методом множителей Лагранжа этот алгоритм приводит к уменьшению вычислительных затрат. Кроме этого алгоритм легко обобщается и на случай минимизации функционалов со связями типа неравенств, что является трудноразрешимой задачей в методе множителей Лагранжа.

2.5 Пятая глава

Пятая глава — заключение. Здесь кратко сформулированы основные результаты диссертации.

3 Заключение

В диссертации описана полная система "off-line" обработки экспериментальных данных (от калибровки детекторов до кинематического анализа реконструированных физических событий), которая была создана для обработки данных с установки

ИСТРА-М. Описанная система была применена для обработки данных, полученных в течение двух сеансов на ускорителе У-70 в г.Протвино в 1992г. Обработано $\approx 10^7$ триггеров (≈ 250 магнитных лент). Обработка магнитных лент проводилась на персональных компьютерах. Полная обработка одной ленты, состоящая из двух этапов (калибровочного прохода ленты и реконструкции событий), требует до 1 часа компьютерного времени на IBM PC/486.

Получены первые физические результаты по измерению формфакторов распада $K_{\mu 3}^-$. Обнаружено ≈ 3000 таких распадов, что на уровне наиболее статистически обеспеченных работ.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, можно кратко сформулировать в виде следующих выводов.

1. Создано необходимое математическое обеспечение для измерений и обработки магнитного поля спектрометрического магнита установки.
2. Создан новый метод оценки импульса заряженной частицы в магнитных спектрометрах, более экономный по сравнению с широко используемым в настоящее время методом разложения в ряд по полиномам Чебышева. В сравнении с ним описанный здесь метод даёт выигрыш в числе коэффициентов более чем на порядок, в числе машинных операций — приблизительно на два порядка. К тому же он обладает большой простотой. Метод проверен на двух магнитных спектрометрах.
3. Создана программа распознавания образа событий, с помощью которой обработаны реальные экспериментальные данные и получены первые физические результаты.
4. Разработан новый подход к кинематическому анализу событий. В отличие от традиционного подхода, где кинематический фит проводится с использованием восстановленных параметров события (углов, импульсов и т.д.), в предложенном подходе фит проводится с использованием непосредственно измеренных координат события.
5. Предложен новый метод минимизации χ^2 функционалов со связями, основанный на линеаризации связей и последующим выражением части переменных через другие. По сравнению с методом множителей Лагранжа этот алгоритм приводит к уменьшению вычислительных затрат. Кроме этого алгоритм легко обобщается и на случай минимизации функционалов со связями типа неравенств, что является трудноразрешимой задачей в методе множителей Лагранжа.
6. Для работы с графикой на персональных компьютерах адаптирован известный графический пакет ГРАФОР. В пакет добавлено несколько новых подпрограмм для наиболее полного использования возможностей персональных компьютеров.

Литература

- [1] A. D. Volkov, A. V. Voskanian, O. G. Voskerchian, B. J. Zalikhhanov, G. Kalmar, A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, V. S. Serdyuk, V. V. Sidorkin. *Method for the calculation of charged particle momentum in magnetic spectrometers*. Nucl. Instr. and Meth. **A306** (1991) 278.
- [2] A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, I. N. Silin. *Generalised kinematical fit in event reconstruction*. Nucl. Instr. and Meth. **A314** (1992) 572.
- [3] A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, I. N. Silin, *New algorithm for minimizing χ^2 functionals with constraints*. Nucl. Instr. and Meth. **A314** (1992) 578.
- [4] A. J. Ketikian, V. S. Kurbatov, I. N. Silin, *New minimization algorithm with constraints*. Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics'92. Geneva, 1992, p.833.
- [5] А. Д. Волков, А. В. Восканян, Б. Ж. Залиханов, А. И. Иваненко, А. Ж. Кетикян, Е. В. Комиссаров, В. С. Курбатов, С. И. Мисютин, В. З. Сердюк, В. В. Сидоркин, В. И. Снятков, Ю. Р. Тер-Акопов, *Измерение магнитного поля спектрометрического электромагнита установки ИСТРА-М*. Сообщение ОИЯИ, P1-94-180, Дубна, 1994.
- [6] H. Kalmar, A. G. Ketikjan, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, V. Z. Serdiuk, V. V. Sidorkin, A. D. Volkov, A. V. Voskanjan, O. H. Voskerchjan, B. G. Zalikhhanov, *Development of Method of Multiwire Detectors Working in High Rate Environment*. Proceedings of the Third Workshop "Physics at UNK", Protvino. September, 1990. ИИЕР, Protvino, 1991, p.31.
- [7] G. Kalmar, A. J. Ketikian, E. V. Komissarov, V. S. Kurbatov, V. S. Serdyuk, V. V. Sidorkin, A. V. Voskanian and B. J. Zalikhhanov, *New methods for constructing multiwire chambers*. Nucl. Instr. and Meth. **A307** (1991) 279.
- [8] В. М. Артёмов, В. Н. Болотов, А. Д. Волков, Е. Н. Гуцин, Г. А. Емельяненко, Б. Ж. Залиханов, А. Ж. Кетикян, Е. В. Комиссаров, В. С. Курбатов, И. П. Семенов, В. З. Сердюк, В. В. Сидоркин, И. П. Силин, С. В. Ященко, *Калибровка спектрометрического магнита установки ИСТРА-М на физическом процессе*. Сообщение ОИЯИ, P10-94-521, Дубна, 1994.
- [9] Ф. Бион и др., ИФВЭ, 80-141, Серпухов, 1980.
- [10] H. Wind, DH/67-7, Journal of Computational Physics, vol.2, No.3, 1968, p.274.
- [11] H. Wind, DII/67-8, Journal of Computational Physics.

- [12] H. Wind, Nucl. Instr. and Meth. **84** (1970) 117.
- [13] Ю. Д. Алешин и др., ИТЭФ, 121-89, Москва-ЦНИИАтоминформ, 1989.
- [14] П. А. Калишченко, ИФВЭ, 76-65, Серпухов, 1976.
- [15] J. Myrheim, L. Bugge, Nucl. Instr. and Meth. **160** (1979) 43.
- [16] C. Lechanoine et al., Nucl. Instr. and Meth. **69** (1969) 122.
- [17] Ц. А. Амагуни и др., ИФВЭ, 82-142, Серпухов, 1982.
- [18] В. Б. Виноградов и др., ОИЯИ, P1-83-390, Дубна, 1983.
- [19] Л. С. Ажгирей и др., ОИЯИ, P10-12655, Дубна, 1979.
- [20] Ю. Б. Бушнин и др., ИФВЭ, 72-34, Серпухов, 1972.
- [21] В. Н. Болотов и др., ИЯИ АН СССР, 802/93, Москва, 1993.
- [22] С. А. Волков, В. К. Семёнов, ИЯИ АН СССР, 801/93, Москва, 1993.
- [23] Ю. М. Баяковский и др., Москва, Наука, 1985.
- [24] J. Peter Berge et al., The Review of Scientific Instruments, 32, No.5, 1961.
- [25] R. Bock, CERN 60-30 (1960).
- [26] В. И. Мороз, ОИЯИ, P-1958, Дубна, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1995 года.