

К-616

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И АВТОМАТИЗАЦИИ**

11 - 6686

**И.А.Колтунов**

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ,  
РЕГИСТРИРУЕМЫХ В КАМЕРАХ**

**Специальность 01-008 - вычислительная математика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

**Дубна 1972**

11 - 6686

Работа выполнена в Физико-техническом институте АН УССР

Научные руководители - доктор физико-математических наук,  
профессор Г.Я. ЛЮБАРСКИЙ  
- кандидат физико-математических наук П.И. ВАЦЕТ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Н.Н. ГОВОРУН  
кандидат физико-математических наук В.П. ХИГУНОВ

Ведущее предприятие: Институт теоретической и экспериментальной физики,  
г. Москва.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 1972 г.

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 1972 г.  
на заседании Ученого совета Лаборатории вычислительной техники и  
автоматизации.  
г. Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

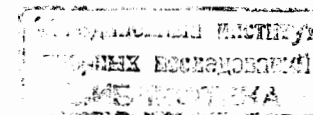
Ученый секретарь Совета Е.А. ЛОГИНОВА

И.А. Колтунов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ,  
РЕГИСТРИРУЕМЫХ В КАМЕРАХ

Специальность 01-008 - вычислительная математика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
(Диссертация написана на русском языке)



## ВВЕДЕНИЕ

Использование камерной методики для исследований в физике элементарных частиц требует создания специальных систем обработки информации, поступающей с фотопленок камерных стереообъективов. Обработка фильмовой информации представляет собой сложный, многоступенчатый процесс. Для решения этой громоздкой в вычислительном отношении задачи необходима мощная вычислительная техника с математическим обеспечением, включающим систему программ обработки. Каждый крупный физический центр имеет свою систему программ для обработки данных с камер.

При этом некоторые из созданных программ и систем предназначены для обработки результатов эксперимента только с одной камеры<sup>/1,2,3/</sup>. Привлекательная сторона этих программ - относительная простота алгоритма - несколько омрачается из-за трудности их преемствования, что объясняется специфичностью этих программ.

В силу этого в физических центрах стали создавать менее специализированные системы, допускающие настройку на различные камеры<sup>/4-11/</sup>. Особые трудности вызывает математическая обработка для камер с тяжелым наполнением, прежде всего, на уровне геометрического восстановления. Это объясняется сложностью оптической системы камер, необходимостью учета ионизационных потерь, кулоновского рассеяния, неоднородности магнитного поля<sup>/12-15/</sup>. На основе программы<sup>/14,15/</sup> (вариант I-6) в Дубне создана система обработки фильмовой информации с больших пучковых камер ОИЯИ на базе ЭВМ Минск-22 и БЭСМ-4<sup>/16/</sup>. В настоящее время в ЛВТА (Дубна) создается аналогичная система на базе ЭВМ БЭСМ-4, БЭСМ-6. Геометрической программой этой системы будет "Вариант I-7", который является дальнейшим усовершенствованием программы "I-6".

Обе названные программы "I-6" и "I-7" универсальны, небольшая предварительная настройка их обеспечивает работу на любую из существующих камер. Однако в некоторых случаях эти программы являются **вовсе** дорогим инструментом исследований, так как они не используют в полной мере малости параметров, характеризующих отличие камеры от "идеальной", слабую неоднородность магнитного поля камеры, сравнительно небольшие искажения оптики, вызванные наличием преломляющих сред, малое отличие реальной траектории от расчетной вследствие многократно кулоновского рассеяния. Небольшая стрела прогиба траектории и малость ионизационных потерь энергии на единице пути также позволяют

упростить решение задачи и оправдывают широкое применение итерационных методов.

Использование подобных особенностей камерного эксперимента в предлагаемой вниманию работе позволяет существенно упростить задачу определения кинематических параметров камерной частицы, сделать доступной ее для счета на ЭВМ с небольшой памятью и относительно малым быстродействием (как, например, ЭВМ М-220 с одним кубом МОЗУ).

В диссертации рассмотрен ряд вопросов, относящихся к нахождению импульсов камерных частиц; изложен алгоритм определения этих параметров по данным стереоснимка и уточнения их на основе учета законов сохранения. Созданная во ФТИ АН УССР (Харьков) программа СПК реализует этот алгоритм на языке ЭВМ "М-220" и представляет собой серию стандартных программ в системе ИС-2. Проверка программы СПК на трех тысячах смоделированных треков позволяет сделать два основных вывода:

а) ошибка в определении начальных параметров при отключении случайных факторов (многократное кулоновское рассеяние, ошибки операторов в измерениях координат точек трека и реперных точек) практически отсутствует (менее 0,5%);

б) ошибки же в параметрах, являющиеся следствием этих факторов, всегда находятся в пределах, допускаемых корреляционной матрицей ошибок; при этом средняя ошибка импульса для водородной камеры порядка 2-4% при ошибке оператора 10 мкм на фотопленке.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. В первой главе рассмотрены основные вопросы построения минимизируемой квадратичной формы /17/: отбраковка "плохо измеренных" точек /18,19/, построение уравнения следа траектории заряженной камерной частицы на стереоснимке /17/; учет многократного кулоновского рассеяния /20/. Во второй главе излагается методика определения кинематических параметров частицы /21,22/: а) алгоритмы минимизации формы  $\Phi$  в случае определения импульса по кривизне (блок начального приближения и блок уточнения параметров /21/); б) алгоритм пространственного восстановления траектории в случае нахождения импульса по пробегу для частиц, остановившихся в камере /21/; в) алгоритм уточнения кинематических параметров на основе учета законов сохранения /22/. В третьей главе говорится об организации проверки и приводятся данные результатов проверок программы СПК /23/.

Рассмотрение основных вопросов математической обработки फिल्मовой информации, связанных с построением минимизируемой квадратичной формы

Традиционным методом сравнения экспериментальных данных с теоретической кривой, зависящей от искомым параметров частицы, является отыскание минимума по этим параметрам некоторой квадратичной формы. Заметим, что так как матрица квадратичной формы зависит от начального импульса, такая методика отыскания нужных параметров не является непосредственным следствием принципа максимума правдоподобия. Однако, если эффект многократного кулоновского рассеяния невелик, то оба метода приводят к близким результатам.

Учитывая это замечание, в первой главе рассматриваем вопросы построения квадратичной формы:

$$\Phi = \sum_{i,k=1}^n y_{ik}^2(\vec{P}) [y_i - f_i(x_i, \vec{P})][y_k - f_k(x_k, \vec{P})].$$

Здесь  $x_i, y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) - координаты точек, измеренных оператором на следе трека;  $n$  - общее количество точек на стереоснимке (в предположении, что плохие измерения отбракованы);  $\vec{P}$  - начальный импульс частицы; функция  $y = f_k(x, \vec{P})$  представляет собой уравнение следа траектории на кадре с номером  $k$ ; матрица  $y_{ik}(\vec{P})$  есть матрица ошибок эксперимента.

В первом параграфе идет речь об отбраковке плохих измерений, то есть о получении только тех точек  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), координаты которых входят в квадратичную форму  $\Phi$ . Предлагаемый способ отбраковки основан на принципе максимума правдоподобия. В вычислительном плане такой метод представляет собой итерационный процесс, где найденные в результате предыдущего шага веса экспериментальных точек используются для проведения расчетной кривой, дающей наилучшую аппроксимацию, и по удаленности точек от этой кривой определяются веса точек в следующем приближении.

Решение задачи имеет два этапа. Первый состоит в том, что по точкам  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), представляющим собой измерения на наблюдаемой кривой, нужно восстановить параметры  $C_k$  некоторой вспомогательной кривой, принадлежащей семейству:

$$y = \Phi(x, C) = \sum_{k=0}^m C_k \Phi_k(x)$$

( $\Phi_k(x)$  - заданные функции), принимая во внимание ошибки в измерениях данных точек. Второй этап состоит в том, что по удаленности точек от построенной таким образом кривой делается заключение о качестве каждого измерения. Отличительными чертами предлагаемого алгоритма являются отсутствие большого перебора возможных вариантов для выявления пло-

хого измерения; сведение к минимуму волевых решений в выборе эталонных констант для отбраковки.

По изложенному в работе<sup>/18/</sup> алгоритму составлена в ИС-2 стандартная программа "Фильтр" на языке ЭВМ "М-220", вошедшая в библиотеку стандартных программ фильмовой методики ФТИ АН УССР. С целью проверки программы и метода была создана программа, моделирующая свои электроники методом статистических испытаний, которая является звеном в цепи программ, моделирующих камерный эксперимент. Проверка программы на треках смоделированных треках позволяет сделать следующие заключения: для случая двух уровней точности измерений программа "Фильтр" работает надежно при условии, что  $P_2 \leq 0,2$  и  $\frac{G_1}{G_2} \geq 3 \cdot 10^{-3}$ . Предельная величина отношения  $\frac{G_1}{G_2}$  определяется разрядностью и быстродействием ЭВМ.

Второй, третий и четвертый параграфы посвящены нахождению функций  $f_k(x, \vec{p})$ , представляющих собой формулу следа трека на стереокадре. Успешное решение задачи определения кинематических параметров камерных частиц на ЭВМ с небольшой памятью и быстродействием во многом зависит от того, насколько удобно и компактно задана форма следа трека на стереокадре.

Для отыскания следа трека на стереокадре нужно решить три задачи:

- а) найти решение уравнения движения камерной частицы (§ 2);
- б) получить формулы проектирования произвольной точки пространства камеры на плоскость фотоснимка (§ 3);
- в) построить проекцию частицы на стереоснимке (§ 4).

Решение уравнения движения тяжелой заряженной частицы с учетом торможения (ионизационных потерь энергии) ищем в предположении слабой неоднородности магнитного поля камеры. При неоднородности поля порядка 3-5% решение получено в виде квадратур и найдены первые четыре члена степенного разложения решения. Проверка программы определения начальных параметров трека, включающей предложенный метод приближенного расчета на смоделированных треках при выключенных статистических помехах, показала, что ошибка в импульсе не превышает 0,5-0,7%. Однако этот алгоритм не был реализован в системе СПК ввиду неоправданной громоздкости вычислений при увеличении неоднородности поля.

При большой неоднородности магнитного поля камеры предлагается методика поиска аналитического решения уравнения Лоренца при некотором дополнительном предположении относительно ионизационных потерь, а именно: функция  $P^{-1}(S)$  почти линейна на большей части траектории от параметра  $S$ . Проверка программы СПК на большом количестве смоделированных треков (около трех тысяч) показала, что предположение о линейности этой функции для водородной камеры вполне оправдано.

Учет неоднородности магнитного поля производился так, как это предлагается в работе<sup>/24/</sup>.

Проецирование точки в пространстве камеры на стереоснимок производится как в предположении плоскопараллельности разделов оптических сред и перпендикулярности их оптической оси объективов, так и в предположении, что могут быть клины и перекосы стекол. В программе СПК используются формулы проецирования только в первом предположении. Уточнение параметров, входящих в формулы проецирования и зависящих от геометрических данных оптической системы камеры, а также от коэффициентов преломления сред, предполагается производить на основании тестовых проверок по методу наименьших квадратов.

След траектории частицы на стереоснимке ищем в виде степенного разложения  $y = \sum_k A_k x^k$ , где коэффициенты  $A_k$  являются известными функциями от координат точки взаимодействия и от импульса частицы. Существенным шагом в отыскании коэффициентов  $A_k$  является переход в трековую<sup>/17/</sup> систему координат на кадре: система уравнений для определения коэффициентов разложения  $A_k$  становится замкнутой.

В последнем, пятом параграфе первой главы речь идет об учете многократного кулоновского рассеяния при обработке камерных треков, точнее, о построении и обращении матрицы  $G_{ik}$ , входящей в формулу  $\Phi$ , для треков с небольшой стрелой прогиба. Рассматривается при этом случай восстановления координат точек траектории в рабочем объеме камеры и случай проецирования трека частицы на фотоснимок. В работе<sup>/25/</sup> выведена формула для расчета матрицы кулоновского рассеяния  $F_{ij}$  в предположении, что торможением в среде камеры можно пренебречь. Используя формулу Ферми<sup>/26/</sup> для плотности распределения пространственного и углового смещения, вызванного многократным рассеянием, можно обобщить полученный в<sup>/25/</sup> результат, предполагая импульс частицы не сильно меняющимся:

$$F_{ij} = \frac{1}{2} \int_0^t (y-l)(l_i-l) \theta(l) dl, \quad t = \min(j, i),$$
 где  $l_j$  - пробег частицы до  $j$ -ой точки, а функция  $\theta(l)$  определяется соотношением:

$$\theta(l) = \frac{E_s^2}{\chi_0} \cdot \frac{1 + (\frac{m}{2})^2}{\rho^2}.$$

Здесь  $E_s^2 = 2I,2$  Мэв (коэффициент многократного рассеяния, см.<sup>/26/</sup>),  $\chi_0$  - радиационная длина среды,  $m$  - масса частицы,  $\rho = \rho(l)$  - ее импульс.

В случае проецирования траектории на кадры для матрицы многократного рассеяния справедливо соотношение:

$$F_{ij} = \frac{1}{2} (A_i A_j + B_i B_j) \int_0^t (y-l)(l_i-l) \theta(l) dl.$$

Если объективы оптической системы камеры имеют небольшие углы обзора, то для определения  $F_{ij}$  получаем соотношение:

$$F_{ij} = \frac{1}{2} a_i a_j \int_{l_1}^{l_2} (y-l)(l_i-l)\theta(l) dl$$

(Коэффициенты  $a_i, b_i, a_i$  определяются оптической системой пузырьковой камеры).

Обращение матрицы ошибок, являющейся суммой матрицы кулоновского рассеяния и диагональной матрицы ошибок измерений (измерения считаем статистически независимыми), сводится к решению систем разностных линейных уравнений.

## Глава II

### Определение параметров камерных частиц в программе СПК

Глава вторая посвящена вопросам отыскания кинематических параметров камерной частицы. Учет различных эффектов камерного эксперимента проводится на основании результатов, полученных в работах<sup>17,20/</sup>

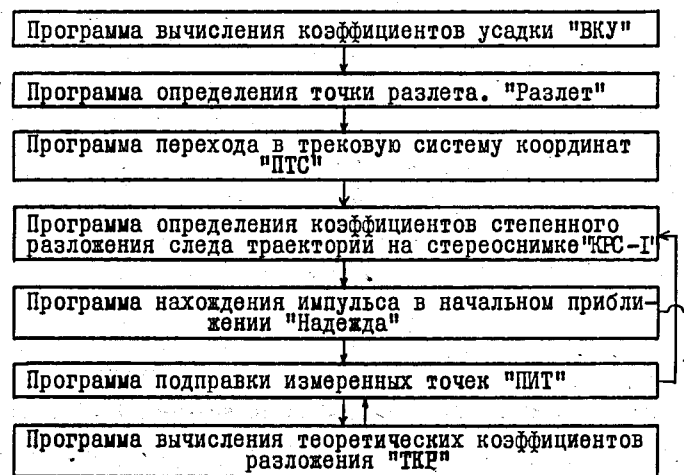
Первые два параграфа представляют собой два этапа в решении задачи минимизации квадратичной формы  $\Phi$  по искомым параметрам  $\vec{P}$ , что равносильно отысканию импульса заряженной частицы по кривизне ее траектории в магнитном поле камеры. Разбиение этой задачи на два этапа во всех существующих методиках: блок начального приближения и блок уточнения параметров, связано с тремя обстоятельствами:

- а) необходимостью знать магнитное поле в камере (которое предполагается неоднородным) вдоль траектории частицы;
- б) необходимостью иметь хотя бы приближенное значение начального импульса, от которого зависит матрица многократного кулоновского рассеяния;
- в) необходимостью иметь достаточно близкую к минимуму начальную точку спуска, так как функции  $f_k(x_i, \vec{P})$  от аргументов  $\vec{P}$  нелинейны.

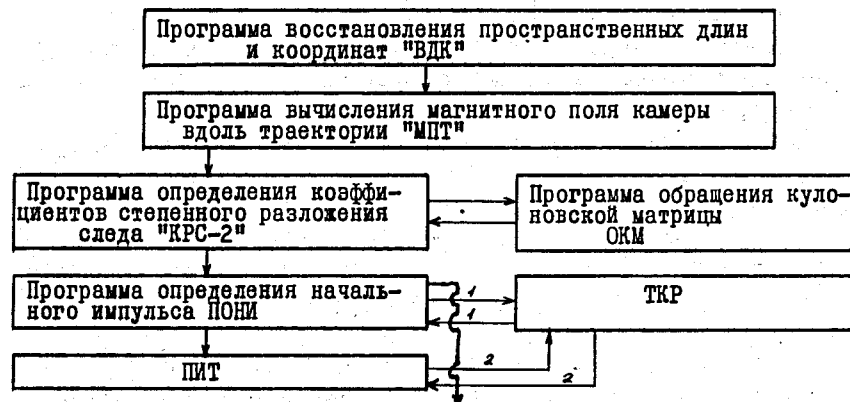
При вычислении импульса частицы в начальном приближении предполагается, что можно пренебречь следующими эффектами:

- а) неоднородностью магнитного поля камеры;
- б) многократным кулоновским рассеянием;
- в) дисторсией оптической системы камеры.

Алгоритм определения точки разлета и импульса в начальном приближении реализован в кодах ЭВМ "М-220" в виде семи стандартных программ в ИС-2, которые в совокупности названы "блок начального приближения". Принципиальная схема этого блока выглядит следующим образом:



Блок уточнения начального импульса заряженной частицы представляет собой семь стандартных программ, выполненных в ИС-2. Принципиальная схема блока уточнения выглядит следующим образом;



В третьем параграфе предлагается методика пространственного восстановления траектории для определения начального импульса по пробегу частиц, остановившихся в камере. Восстановление траектории частицы сведено к численному интегрированию системы  $m+3$  дифференциальных уравнений ( $m$  - число проекций стереокадра). Из-за неточности измерений каждая проекция стереоснимка даст свое значение длине траектории; далее все эти значения усредняются. Может случиться, что на некотором кадре последняя точка трека видна нечетко, в этом случае проверка на окончание траектории для такого кадра не производится.

В параграфе четвертом идет речь об использовании законов сохранения в реакции  $\gamma p$  для определения импульса нейтральной вторичной частицы, а если таковая отсутствует — для уточнения кинематических параметров заряженных частиц. Массы частиц полагаются известными. Не обладая универсальностью таких известных программ фитирования как *YRIND* [27] в ЦЕРНе, *KICK* в Беркли, а также дубненских [28, 29], излагаемая в диссертации программа за счет более экономного алгоритма поиска условного экстремума позволяет существенно уменьшить время работы ЭВМ для указанного типа реакций.

### Глава III

#### Методика и результаты проверок программы СПК

Глава III посвящена описанию методики автоматизированной проверки программы СПК на моделях камерного эксперимента и описанию результатов проверки ее основных блоков: блока начального приближения и блока уточнения параметров.

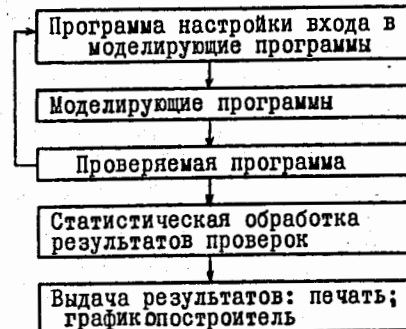
Моделирование камерного эксперимента преследовало различные цели: ускорить и упростить отладку различных программ и блоков программы СПК;

добиться отсутствия систематических ошибок в параметрах; проверить устойчивость метода по отношению к стохастическим эффектам (многократное кулоновское рассеяние и измерительная ошибка оператора);

выяснить влияние различных физических эффектов на ошибки в нахождении параметров частицы и убедиться в необходимости учета тех или иных эффектов при отыскании этих параметров.

Алгоритмы моделирования различных сторон камерного эксперимента (генерация фиктивного трека [30], учет оптических искажений, моделирование усадки фотопленки, моделирование "плохих" измерений) приведены в первых двух параграфах этой главы.

В третьем параграфе говорится о программе аттестации программы СПК, позволившей ускорить проверку предложенной методики определения кинематических параметров трека. Принципиальная блок-схема программы аттестации ПДФ приведена ниже.



Результаты проверок программы СПК (§ 4, § 5) демонстрируются для случая, когда в модель камерного эксперимента внесены следующие данные:

камера водородная (это учитывается константами, характеризующими ионизационные потери и многократное кулоновское рассеяние); оптическая система камеры трехобъективная;

константы оптики следующие:

$d_1^{(1)} = 6,4391$ ;	$d_1^{(2)} = 6,4391$ ;	$d_1^{(3)} = 6,4391$ ;
$d_2^{(1)} = 0,1846$ ;	$d_2^{(2)} = 0,1846$ ;	$d_2^{(3)} = 0,1846$ ;
$d_3^{(1)} = 35,2506$ ;	$d_3^{(2)} = -35,2506$ ;	$d_3^{(3)} = -35,2506$ ;
$d_4^{(1)} = 0,55145$ ;	$d_4^{(2)} = 0,55145$ ;	$d_4^{(3)} = 0,55145$ ;
$d_5^{(1)} = -12$ ;	$d_5^{(2)} = 6$ ;	$d_5^{(3)} = 6$ ;
$d_6^{(1)} = 0$ ;	$d_6^{(2)} = -10,3923$ ;	$d_6^{(3)} = 10,3923$ ;

поверхности раздела оптических сред считаются плоскопараллельными; магнитное поле камеры  $H$  ;  $H = 14$  кгаус; матрица магнитного поля задает неоднородность поля в камере порядка 7%.

а). Проверка программы начального приближения с целью выяснения систематических ошибок алгоритма.

Генерировались протоны и мезоны с начальными импульсами  $350 \frac{\text{МэВ}}{c}$  ;  $500 \frac{\text{МэВ}}{c}$  ;  $800 \frac{\text{МэВ}}{c}$  , точка вылета выбиралась в различных частях камеры (камера предполагалась 40-сантиметровой); выбирались различные углы погружения  $\alpha$  в интервале  $(-1,2 < \alpha < 1,2)$  и различные азимутальные углы  $\beta$  . Не моделировались случайные факторы (ошибка оператора и кулоновское рассеяние). Не моделировались также неоднородность магнитного поля и искажения оптики, вызванные наличием преломляющих сред, так как эти эффекты не учитываются блоком "начального приближения".

Результаты проверки: систематическая ошибка в параметрах при четырехкратном прохождении через программу ПИТ практически отсутствует — при "выключенных" ионизационных потерях и неучете их в блоке начального приближения в импульсе менее 1 Мэв/с; в углах  $\alpha$  и  $\beta$  в четвертом десятичном знаке после запятой; при моделировании ионизационных потерь и учете их в импульсе менее трех Мэв, в углах  $\alpha$  и  $\beta$  в четвертом десятичном знаке после запятой.

б). Проверка блока начального приближения для выяснения ошибок в параметрах, вызванных статистическими потерями.

Генерировались протоны и мезоны с импульсами в интервале  $300 \text{ Мэв/с} < p < 1500 \text{ Мэв/с}$ . Для каждого значения начального импульса выбирались различные углы погружения  $-1,3 < \alpha < 1,3$  с шагом  $h\alpha = 0,2$ . Методом статистических испытаний моделировались ошибки оператора ( $\delta = 10 \text{ мкм}$ ) и многократное кулоновское рассеяние; генерировалось 25 случайных реализаций трека с одинаковыми начальными данными; затем вычислялись среднеквадратичные ошибки в параметрах по всем реализациям.

Результаты проверок: относительная среднеквадратичная ошибка в определении импульса протона не превышает 5% для углов погружения  $\alpha$  в интервале  $(-0,5; 0,5)$  при всех проверенных значениях начального импульса; не превышает 10% при  $\alpha$ , лежащих в интервале  $(-1,1; 1,1)$ ; не превышает 12% при  $|\alpha| = 1,3$ ; для мезонов соответствующие ошибки почти вдвое меньше.

в). Проверка блока начального приближения для выяснения необходимого числа измеренных точек на проекции трека.

Генерировались протоны с импульсами, лежащими в интервале  $(300 \text{ Мэв/с} < p < 1500 \text{ Мэв/с})$  и с углами погружения в интервале  $(-1,1 < \alpha < 1,1)$ ; ошибка оператора равнялась  $10 \text{ мкм}$ . На кадрах отбирались точки, измеренные оператором в количествах  $n : n = 5, 8, 11, 14$  для каждого трека. Число кадров равнялось трем.

Результаты проверок: при  $n \geq 8$  среднеквадратичные ошибки в кинематических параметрах практически одинаковы и равны ошибкам, полученным в пункте б).

Проверка блока уточнения параметров представляет собой, собственно, проверку всей основной вычислительной части программы СПК, так как входными данными для блока уточнения были данные, полученные в блоке начального приближения.

г). Проверка программы с целью выяснения систематических ошибок алгоритма.

Генерировались треки с различными начальными параметрами. При генерации были "отключены": ошибка оператора, многократное кулоновское рассеяние, неоднородность магнитного поля, оптические искажения, ионизационные потери энергии. В соответствии с этим все эти эффекты не учитывались и при работе программы СПК.

Результаты проверки: систематическая ошибка в определяемых параметрах при однократном прохождении через ПИТ в блоке начального приближения и однократном прохождении через ПИТ в блоке уточнения отсутствует (для импульса, например, менее половины Мэв/с).

д) Проверка правильности учета детерминированных эффектов и необходимости такого учета.

Моделировались треки с "подключением" лишь одного из следующих эффектов; ионизационные потери, оптические искажения, неоднородность магнитного поля.

Результаты проверки: при учете соответствующего эффекта в программе СПК ошибки в нахождении параметров трека отсутствовали (например, импульс находился с точностью до одного Мэв/с); если же не учитывается неоднородность магнитного поля, то ошибка в импульсе частицы может достигать 7% (для треков с точкой вылета у края камеры); если не учитываются ионизационные потери, то ошибка в импульсе протона с начальным импульсом 350 Мэв/с может достигать 10-11% (в зависимости от длины трека в камере); если не учитываются оптические искажения, то для протона с импульсом 1000 Мэв/с ошибка может достигать 5% (при указанных выше константах оптики).

е) Проверка программы для выяснения ошибок в параметрах, вызванных случайными факторами.

Проводился эксперимент, аналогичный описанному в пункте б).

Результаты проверок: относительная среднеквадратичная ошибка в определении импульса программой СПК 2% — 2,5% за счет учета многократного кулоновского рассеяния при начальных импульсах камерных частиц:  $400 \text{ Мэв/с} \leq p \leq 1500 \text{ Мэв/с}$  и углах  $\alpha$  в интервале  $(-1,1; 1,1)$ .

ж) Проверка программы СПК на возможность идентификации протона и  $L^+$ -мезона.

При изучении реакций фоторождения:

$$\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$$

$$\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^0$$

$$\gamma p \rightarrow n \pi^+$$

$$\gamma p \rightarrow p \pi^0$$



и так далее, идентифицировать частицы (например,  $\pi^+$  и  $\rho$ ) проверкой законов сохранения не представляется возможным, если присутствует нейтральная вторичная частица; визуальная идентификация частиц (по рисунку следа на стереофотографии) не всегда бывает бесспорной. Поэтому была произведена проверка возможностей программы СПК идентифицировать протон и  $\pi^+$ -мезон.

Генерировался протон с импульсом 350 Мэв/с и вычислялась программой СПК величина  $\psi^2$  в предположении, что это протон ( $\psi_{pp}^2$ ) и в предположении, что это мезон ( $\psi_{p\pi}^2$ ). Было смоделировано 25 случайных реализаций. Затем генерировался мезон с тем же начальным импульсом и производился расчет величин  $\psi_{pp}^2$  и  $\psi_{p\pi}^2$ . Была смоделирована 31 случайная реализация. Если рассматривать полученные величины как точки на плоскости  $\psi_{pp}^2, \psi_{p\pi}^2$ , где  $z$  есть  $\rho$  или  $\pi$ , то оказывается, что мезонные точки располагаются в области, частота попадания в которую точки, соответствующей протону, мала.

В последнем параграфе диссертации собран иллюстративный материал проверок с пояснениями и выводами.

Анализ полученных результатов подтверждает необходимость учета ионизационных потерь энергии, многократного кулоновского рассеяния, оптических искажений, неоднородности магнитного поля камеры, законов сохранения при определении кинематических параметров частиц, регистрируемых в камере. Кроме того исследована зависимость ошибок в определяемых параметрах от положения точки разлета, начального импульса частицы, угла погружения трека, количества измерений на проекции и ошибки оператора при съеме координат точек на треке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты диссертации

Основной целью предлагаемой работы было создание методики определения кинематических параметров частиц на базе ЭЦВМ Днепр-2, М-220 применительно к малым камерам ФТИ АН УССР, имеющим несколько объективов, с относительно низкоэнергетическим первичным пучком фотонов. В процессе создания этой системы:

1) получены простые рекуррентные формулы для расчета траектории заряженной частицы в пузырьковой камере; найден вид функций проецирования на стереокадр с полным учетом оптических искажений; получено полиномиальное разложение проекции на стереоснимке траектории частицы;

2) предложена более экономная методика построения и обращения матрицы многократного кулоновского рассеяния; впервые проделан учет кулоновского рассеяния на стереоснимке;

3) приведен метод отбраковки "плохих" измерений, основанный на принципе максимума правдоподобия;

4) предложена методика восстановления пространственной траектории без поиска "соответствующих" точек;

5) разработан метод уточнения кинематических параметров частиц на основе учета законов сохранения, дающий значительную экономию машинного времени при обработке событий фоторождения;

6) создана цепь программ, моделирующая различные стороны камерного эксперимента; налажена автоматизация проверочных работ программы СПК путем создания программы аттестации (ПА); на этой основе выработан ряд практических рекомендаций при использовании СПК;

7) выяснена необходимость учета ионизационных потерь энергии, многократного кулоновского рассеяния, оптических искажений, неоднородности магнитного поля камеры, законов сохранения в реакциях фоторождения путем математического моделирования;

8) исследована зависимость точности в определяемых параметрах частиц от различных факторов камерного эксперимента: положения точки разлета, начального импульса частицы, угла погружения трека, количества измерений на проекции, среднеквадратичной ошибки оператора при съеме координат точек на треке. Первые 5 пунктов имели своей целью экономию машинного времени и оперативной памяти ЭЦВМ; пункты 6 и 7 имели целью проверку алгоритма до запуска камеры; последний 8 пункт характеризует точность всей экспериментальной методики в целом, включая систему обработки.

Материалы диссертации докладывались на 2-м Международном симпозиуме по ядерной радиозлектронике, г.Дубна, 1964 г.; на Международной конференции по математическим методам решения задач ядерной физики, г. Дубна, 1967 г.; на Международном симпозиуме по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер, г.Дубна, 1971 г.; на итоговых конференциях отдела Высоких энергий 1968 г.-1971 г. (ФТИ АН УССР, г.Харьков); на Молодежных конференциях ФТИ АН УССР памяти К.Д.Синельникова, 1968, 1969, 1971 г.г., г.Харьков; на семинарах в ОИЯИ, г.Дубна, 1968-1970 г.г.; на семинаре в ИФВЭ, г.Серпухов, 1969 г., а также опубликованы в работах /17-23/.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М.Граменицкий и др. Система программ для обработки данных с 40-см водородной камеры. Препринт ОИЯИ, IO-3772, 1968, Дубна.
2. Н.Н.Говорун и др. Методика обработки следов частиц малой энергии, получаемых в камере Вильсона. Препринт ОИЯИ, 2036, 1965, Дубна.
3. Ю.М.Аркатов и др. Метод обработки стереофотографий с диффузионной камеры. Препринт ФТИ АН УССР, ХФТИ 70-37, 1970, Харьков.
4. T.C.Program Library, CERN, V1,2,3.
5. W.G.Moorhead. Least Squares Fit of Bubble chamber tracks. Taking into Account Energy Loss and Magnetic field in homogeneity. CERN, DD/DP/67/6, October, 1967.
6. A.M.Chops. THRESH-Basic CERN Geometry Programme, CERN, 62-63, 1963.
7. Н.Н.Говорун, В.Г.Иванов, А.Ф.Лукьянцев и др. Препринт ОИЯИ, PII-4762, Дубна, 1969.
8. И.А.Буздавина, П.Бухгольц, В.Г.Иванов и др. Препринт ОИЯИ, II-4655, Дубна, 1969.
9. АСП-программа обработки наблюдений в водородной камере. ИТЭФ,ГК по атомной энергии СССР, препринт № 428, Москва, 1966.
10. F.T.Solmitz et al. Three View Geometry Program, P-117, UCRL, Berkeley, California, 1966.
11. О.В.Благодравова, В.И.Мороз, Г.Н.Тентюкова. Препринт ОИЯИ, 2005, Дубна, 1965.
12. J.Sporrow. The heavy liquid geometry programme in use of the Rutherford laboratory, CERN, 63-23, p. 93, 1963.
13. J.Hennessy. The geometry programme. "Bulle" of the Ecole Polytechnique and experience in use. CERN, 63-23, p.50, 1963.
14. Н.Н.Говорун и др. Препринт ОИЯИ, PII-3480, Дубна, 1967.
15. Н.Ф.Маркова и др. Препринт ОИЯИ P10-3768, Дубна, 1968.
16. Н.Н.Говорун, В.И.Мороз, Г.Н.Тентюкова, В.Н.Шигаев. Система обработки фимьмовой информации с пузырьковых камер ОИЯИ на ЭВМ. Препринт ОИЯИ, IO-3627, Дубна, 1967.
17. Р.И.Адушкина, А.М.Вайсфельд, П.И.Вацет, И.А.Колтунов, Г.Я.Любарский. О расчете следа траектории камерной частицы на стереоснимке. Препринт ФТИ АН УССР. ХФТИ 70/38, Харьков, 1970.
18. А.И.Безрук, И.А.Колтунов, Г.Я.Любарский, А.М.Ровинская. О выборе плохих измерений при обработке физического эксперимента. Препринт ФТИ АН УССР, ХФТИ 70/42, Харьков, 1970.
19. П.М.Зейдлиц, И.А.Колтунов, В.А.Ямницкий. Препринт ОИЯИ, 2205, Дубна, 1964.
20. Г.М.Любарский, И.А.Колтунов, Р.И.Адушкина. ПТЭ № 2, стр.256, 1970 г.
21. Р.И.Адушкина, И.А.Колтунов и др. К определению кинематических параметров камерной частицы. Препринт ФТИ АН УССР. ХФТИ 70/41, Харьков, 1970.
22. О.Г.Зиновьева, В.А.Золенко, И.А.Колтунов. Программа учета законов сохранения в камерном эксперименте. Препринт ФТИ АН УССР, ХФТИ 70/40, Харьков, 1970.
23. А.И.Безрук, А.М.Вайсфельд, И.А.Колтунов, Г.Я.Любарский. Моделирование камерного эксперимента. Препринт ФТИ АН УССР. ХФТИ 70/39, Харьков, 1970.
24. Г.И.Макаренко, В.И.Мороз, И.С.Саитов, А.П.Стельмах. Препринт ОИЯИ, 1967, P10-3575, Дубна.
25. Н.И.Граменицкий, Л.А.Тихонова, П.В.Шляпников. Препринт ОИЯИ, 1965, P-2146, Дубна.
26. Д.Росси, К.Грейзен. Взаимодействие космических лучей с веществом. И.Л. Москва, 1948.
27. А.Ф.Лукьянцев. Программа *GRIND*. Материалы лекций, прочитанных в школе ОИЯИ по применению электронных вычислительных машин в задачах экспериментальной физики. Т.2, Б-1-10-4398, ОИЯИ, Алушта, май, 1968.
28. Э.М.Иванченко, А.Ф.Лукьянцев, А.И.Мороз, А.Д.Макаренко, Г.Н.Тентюкова. Программа идентификации каналов реакций (варианты IO-10 и IO-20). Препринт ОИЯИ, P-2399, Дубна, 1965.
29. А.Ф.Лукьянцев, В.И.Мороз, Г.Н.Тентюкова. Программа идентификации каналов реакций (вариант IO-30). Препринт ОИЯИ, PII-3983, Дубна, 1966.
30. А.Д.Макаренко, В.И.Мороз, А.Н.Стельмах, Г.Н.Тентюкова. Программа генерации фиктивного трека. ПТЭ № 1, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 августа 1972 года.