

С 344. 122

К-903

117/1-91

СООБЩЕНИЕ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10 - 5386



А. В. Куликов, Г. И. Смирнов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ
ДВУМЯ ИСКРОВЫМИ КАМЕРАМИ

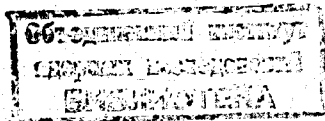
1970

344.1и

10 - 5386

А.В. Куликов*, Г.И. Смирнов*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ
ДУВМЯ ИСКРОВЫМИ КАМЕРАМИ



* Московский государственный университет.

Использование трековых детекторов позволяет в принципе восстанавливать пространственную картину взаимодействий. Информация о событии, однако, искажается ошибками, возникающими из-за многократного рассеяния, тормозного излучения и неточности измерений. В настоящей работе описывается программа пространственного восстановления таких взаимодействий, когда в каждой из двух фоновых искровых камер регистрируется по одной заряженной частице, а также программа моделирования этих взаимодействий, учитывающая многократное рассеяние и ошибки измерения. Программы были написаны в целях исследования реакции /1/

$$\pi^{-} + p \rightarrow p + e^{+} + e^{-}, \quad (1)$$

однако они могут применяться и в других работах, если детектирующая аппаратура расположена так, как на рис. 1. Углы между направлением пучка первичных частиц и осями регистрирующих систем, а также расстояния от мишени до детекторов могут быть произвольными. Для получения полной пространственной картины каждая из искровых камер фотографируется в двух проекциях вместе с реперными сетками, положение которых относительно мишени известно.

Программа восстановления написана на языке "Алгол" для ЭВМ "БЭСМ-4" на основе программы, описанной в /2/.

Снимки с искровых камер (типичный снимок показан на рис. 2) обмерялись на полуавтоматах ПУОС с записью информации на перфоленту. Данные с перфоленты переписывались на магнитную ленту ЭВМ "Минск-22" и затем по каналу связи - на магнитную ленту БЭСМ-4.

На каждой проекции измеряется трек, ближайшая к нему реперная линия и центр проекции, образованный пересечением центральных реперных линий. На треке и на реперной линии измерялось по 6-7 точек. Кроме того, для каждого события на перфоленте записывается служебная информация: номер кадра и значения энергий обеих частиц.

Блок-схема программы приведена на рис. 3.

После считывания с магнитной ленты данных о событии производится контроль служебной информации и последовательности измерений. В случае явных ошибок печатается признак, и программа переходит к обработке следующего события.

Прямые по точкам на реперных линиях и треках строятся методом наименьших квадратов. Точки, далеко отстоящие от прямой, отбрасываются, и по оставшимся вновь проводится прямая. Критерий, по которому производится отбрасывание точек, вводится так же, как предложено в /3/. Если число оставшихся точек меньше трех, измерение бракуется.

Угловые коэффициенты треков и реперных линий определены на этом этапе в системе координат измерительного микроскопа полуавтомата. Вычисляя углы между треками и реперными линиями, можно перейти в систему координат, связанную с мишенью. Ошибки, обусловленные искажениями углов на пленке, учитываются введением поправочных коэффициентов.

Первая измеренная точка на треке принимается за точку входа частицы в искровую камеру. После определения координат этих точек положение треков в пространстве полностью известно.

Из-за многократного рассеяния в веществе, находящемся на пути частицы перед искровой камерой, и из-за ошибок измерения оба трека не пересекаются в одной точке. За точку взаимодействия в этом случае принимается точка, делящая кратчайший отрезок между треками пропорционально весам этих треков. Вес p определяется по формуле

$$p = \frac{1}{(r_0 \theta_0)^2 + \sum_i (r_i \theta_i)^2}, \quad (2)$$

где θ_0 - средняя ошибка в измерении угла, r_0 - расстояние от места входа в искровую камеру до точки взаимодействия, θ_i - средний угол многократного рассеяния в i -том рассеивающем слое вещества, r_i - расстояние от этого рассеивателя до точки взаимодействия. Значение θ_0 - величина постоянная, определяемая из многократных измерений треков. Углы θ_i вычисляются в программе с учетом зависимости от энергии частицы. Расстояния r_0 и r_i в первом приближении отсчитываются до центра мишени. После определения координат точки взаимодействия веса уточняются и координаты вычисляются вновь.

Координаты точки взаимодействия определяются из условия минимума функционала

$$X^2 = p_1 \delta_1^2 + p_2 \delta_2^2 = \min, \quad (3)$$

где δ_1 и δ_2 - расстояния от точки взаимодействия до треков, p_1 и p_2 - веса треков.

Значение χ^2 для конкретного события определяет лишь вероятность того, что обе зарегистрированные частицы вылетели из одной точки, но эта точка может оказаться лежащей и вне мишени. Во-первых, причиной этого может быть влияние многократного рассеяния и ошибок измерения; число таких событий зависит от геометрии установки и может быть определено в программе моделирования. Во-вторых, к таким случаям относятся взаимодействия, действительно происшедшие не в мишени.

В программе осуществляется вычисление величины ϵ^2 , учитывающей как вероятность вылета частиц из одной точки, так и удаленность этой точки от мишени:

$$\epsilon^2 = \frac{d^2}{s_1^2 + s_2^2}, \quad (4)$$

где d - кратчайшее расстояние между треками в пределах мишени, $s_i^2 = r_{oi}^2 \theta_{oi}^2 + \sum_j r_{ij}^2 \theta_{ij}^2$ ($i = 1, 2$), а r_{oi} , θ_{oi} , r_{ij} , θ_{ij} определяются так же, как r_0 , θ_0 , r_1 , θ_1 в формуле (2), но r_{oi} , r_{ij} отсчитываются не до точки взаимодействия, а до отрезка d .

Другими словами, величина ϵ^2 есть отношение квадрата измеренного кратчайшего расстояния между треками в пределах мишени к среднему значению квадрата этого расстояния, определенному с учетом ошибок восстановления положения треков. В случаях, когда точка взаимодействия лежит внутри мишени, ϵ^2 равно χ^2 . Если же точка взаимодействия значительно удалена от мишени, значение ϵ^2 будет велико даже при малых χ^2 .

Вычисление ϵ^2 производится после проверки пересечения обоими треками мишени, увеличенной с учетом многократного рассеяния и ошибок измерения. Проверяется также и попадание частиц в спектрометры, и вычисляются координаты точек попадания.

Таким образом, программа позволяет определить положение треков в пространстве, проверить, пересекают ли они мишень и детекторы, и вычислить значение ϵ^2 , характеризующее вероятность генерирования события внутри мишени.

Для изучения ошибок, вносимых многократным рассеянием и ошибками измерения, была составлена программа моделирования реакции $\pi^- p \rightarrow p e^+ e^-$. Разыгранные по методу Монте-Карло треки электрона и позитрона в искровой камере использовались затем для восстановления пространственной картины взаимодействия по программе, аналогичной описанной выше. Это позволило получить распределения событий реакции по минимальному расстоянию между треками, по углу, под которым разлетаются e^+ и e^- . Программа позволяет также определить долю событий, для которых точка взаимодействия (при восстановлении) выходит за пределы мишени, и долю событий, треки которых не пересекают проекции мишени. Для розыгрыша точки взаимодействия и векторов-импульсов электрона и позитрона, которые служили "входной" информацией для программы, использовался вариант общей программы моделирования фазового пространства "FOWL" /4/.

Задача моделирования многократного рассеяния сводится к выбору для каждой частицы, прошедшей слой вещества t , полярного угла θ и азимутального угла ϕ . Для розыгрыша азимутального угла использовалось равномерное распределение, а для полярного — распределение Мольера. Как известно, теория Мольера справедлива при следующих ограничениях:

1. Углы рассеяния малы.
2. Число столкновений достаточно велико, чтобы был справедлив статистический подход.
3. Потери энергии в слое вещества малы.

В программе производилось разделение рассеивателей на тонкие слои, такие, что число актов рассеяния в каждом из них примерно равно 2000. Легко видеть, что такое количество вещества удовлетворяет приведенным выше требованиям. Углы рассеивания разыгрывались при входе частицы в слой вещества. Точка выхода частицы из слоя определялась простым продолжением вектора-импульса до пересечения со следующим слоем вещества. Такая процедура фактически моделировала движение частицы в толстом слое вещества, что позволило достаточно точно учесть боковое смещение многократного рассеяния. При моделировании не учитывалось тормозное излучение электронов, поскольку в условиях работы /1/ преобладают ошибки, вносимые многократным рассеянием.

Следует отметить, что теория Мольера не учитывает различий, возникающих при рассеянии электронов и позитронов. Но в интересующей нас области импульсов электронов p_0 ($p_0 > 20$ Мэв/с) указанные различия пренебрежимо малы (см., например, /5/).

Функция распределения частиц в теории Мольера представлена в виде разложения в ряд по степеням B (параметр ширины распределения):

$$f(\theta) \theta d\theta = \eta d\eta \left[f^{(0)}(\eta) + \frac{f^{(1)}(\eta)}{B} + \frac{f^{(2)}(\eta)}{B^2} + \dots \right], \quad (5)$$

где

$$f^{(0)} = 2e^{-x}; \quad x = \eta^2; \quad \eta = \frac{\theta}{\chi_0 B^{1/2}}. \quad (6)$$

Функции $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ протабулированы в работе Бете /6/ и показаны на рис. 4.

Параметр ширины B связан с числом столкновений Ω_0 частицы в веществе приближенным соотношением (7), справедливым с точностью не хуже 0,5% для величины Ω_0 от 10^2 до 10^5 /7/:

$$B = 1,153 + 2,583 \lg \Omega_0, \quad (7)$$

$$\Omega_0 = \frac{\chi_0^2}{\chi_a'^2} = 7573 \frac{t(Z+1)Z^{\frac{1}{3}}}{A a_s} \quad (8)$$

Здесь (а также и в (6)) χ_0 - "угол достоверности" в градусах:

$$\chi_0 = 22,7 \sqrt{\frac{t Z (Z+1)}{A (\rho c)^2 \beta^2}}, \quad (9)$$

где t - толщина слоя рассеивателя в г/см^2 , Z - заряд ядра рассеивателя, A - атомный вес, ρ - импульс частицы в Мэв/с ,

$$\chi_a'^2 = 1,167 \chi_a^2, \quad (10)$$

$$\chi_a^2 = \chi_0^2 a_s, \quad (11)$$

$$\chi_0 = \frac{\lambda}{a} = \frac{\lambda}{0,885 a_0 Z^{-\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

(a_0 - борковский радиус, a - фермиевский радиус атома).

При вычислении (8) имелось в виду, что $v/c=1$, $\rho\lambda = \frac{1}{h}$, $a_0 = \frac{1}{2} \frac{h^2}{m_e^2}$, v - скорость частицы.

Параметр a_s может быть представлен в виде:

$$a_s = \gamma + \delta a^2, \quad (13)$$

где

$$a = \frac{z Z e^2}{\hbar v}, \quad (14)$$

z - заряд частицы.

Константы γ и δ для водорода вычисляются точно, а для остальных атомов - приближенно. Мы пользовались значениями γ и δ , вычисленными в модели атома Хартри-Фока для углерода /8/ и в модели Томаса-Ферми для тяжелых веществ /8/ (см. табл. 1).

Таблица 1

Вещество	Водород	Углерод	Алюминий, железо, медь, свинец
γ	0,45	0,26	1,13
δ	1,30	0,71	3,76

Для учета рассеяния на атомных электронах в формуле (9) величина Z^2 заменяется на $Z(Z+1)$. Кроме того, параметр B должен быть увеличен на величину B' /9/:

$$B' = (Z+1)^{-1} [\ln [0,160 Z^{-2/3} (1 + 3,33 Z e^2 / \hbar v)] + U] \quad (15)$$

в случае, когда рассеивающаяся частица электрон, и

$$B' = Z^{-1} \left[\log \left(1130 Z^{-4/3} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) + U - \frac{\beta^2}{2} \right], \quad (16)$$

когда рассеивается тяжелая частица.

Значения величины U в зависимости от заряда ядра Z приведены на рис. 5.

Экспоненциальный член в выражении (5) является доминирующим членом в распределении и имеет форму, удобную для быстрого определения случайного угла θ . Поэтому процедура розыгрыша построена так: сначала выбирается случайный угол η в соответствии с экспоненциальным распределением. Часть случаев, в которых η попадает в область, где сумма 2-го и 3-го членов выражения (5) отрицательна, затем перераспределяется в область η , где эта сумма положительна. Доля перераспределенных случаев такова, что конечное распределение подчиняется распределению Мольера (5).

После того, как η выбрано, угол θ определяется согласно

$$\theta = \eta \chi_0 V^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Процедура точного розыгрыша мольеровского распределения, однако, отнимает много времени. Чтобы сократить время вычислений, в работе /10/ предложен метод розыгрыша приближенного распределения Мольера. На рис. 6 для сравнения показаны результаты розыгрыша многократного рассеяния электронов в железе в соответствии с точным и приближенным распределениями Мольера. При разыгрывании реакции (1) мы пользовались приближенным методом.

Программа, написанная на языке Фортран-Цери для ЭВМ БЭСМ-6, составлена в виде блоков (23 подпрограммы), позволяющих легко изменять геометрию установки при моделировании. Упрощенная блок-схема программы приведена на рис. 7.

Каждому рассеивателю соответствует подпрограмма "Рассеиватель", в которой содержатся данные о физических свойствах и геометрии рассеивателя. Эта подпрограмма осуществляет управление подпрограммами пространственных преобразований ("RAY"), розыгрыша случайного угла η ("RANGLE" и "DRIVE"), вычисления полярного θ и азимутального ϕ углов рассеяния ("MOLIER").

Разыгрыш углов θ и ϕ происходит в системе координат, ось которой направлена вдоль импульса электрона. В подпрограмме "ROT" производится переход в лабораторную систему координат, связанную с мишенью.

Выходными данными подпрограммы "Рассеиватель" являются координаты точки выхода частицы из рассеивателя и измененный вследствие многократного рассеяния вектор-импульс.

После розыгрыша рассеяния частицы в последнем рассеивателе - электроде искровой камеры - разыгрывался случайный угол θ в соответствии с гауссовым распределением ошибок измерения угла на микроскопе ПУОС.

Координаты точки взаимодействия, полученные при реконструкции событий по смоделированным трекам в искровых камерах, определялись так же, как и в программе геометрической реконструкции.

В табл. 2 приведены некоторые из результатов моделирования реакции (1).

Таблица 2

Доля событий, точка взаимодействия которых лежит внутри	истинной мишени радиуса R	86,3 %
	увеличенной мишени радиуса $1,5 R$	96,6 %
	$2,0 R$	99,3 %
Доля событий, треки которых пересекают мишень	истинного размера $12 \times 25 \text{ см}^2$	94,1 %
	увеличенного размера $15 \times 28 \text{ см}^2$	98,7 %

Рис. 8 дает возможность сравнить распределение событий по минимальному расстоянию между треками, полученное моделированием, с экспериментальным распределением, полученным при обработке событий реакции (1).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Л.Л. Неменову за поддержку и полезные обсуждения и М.С. Хвастунову за большую помощь в работе. Авторы также благодарны В.И. Морозу за полезные замечания.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.К. Акимов, Л.С. Вертоградов, А.В. Демьянов и др. Доклад на XV Международной конференции по физике высоких энергий, г. Киев, 1970; Препринт ОИЯИ, P1-5398, Дубна (1970).
2. М.С. Хвастунов. Автореферат диссертации 1-5220, Дубна, 1970.
3. Ю.В. Линник. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. Москва, 1958.
4. F. James. CERN Computer 6000 Seires, Program Library W505.
5. S.D. Drell. Electromagnetic Interactions. Proc. XIII Int. Conf. on High Energy Physics.
6. H.A. Bethe. Phys.Rev., 89, 1256 (1953).
7. W.T. Scott. Rev.Mod.Phys., 35, 231 (1963).
8. А.А. Бедняков и др. Вестник Моск. университета, №1, серия III, 55 (1965).
9. U. Fano. Phys.Rev., 93, 117 (1954).
10. R. Biancastelli and P. Stein. ISS 66/26, Roma, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел

29 сентября 1970 года.

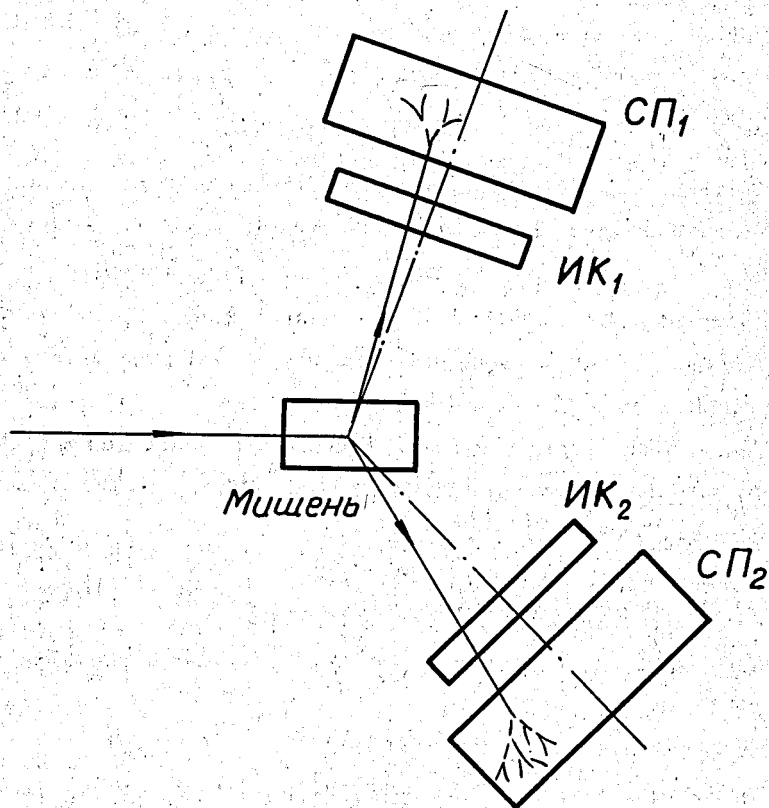


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. ИК - искровая камера, СП - спектрометр.

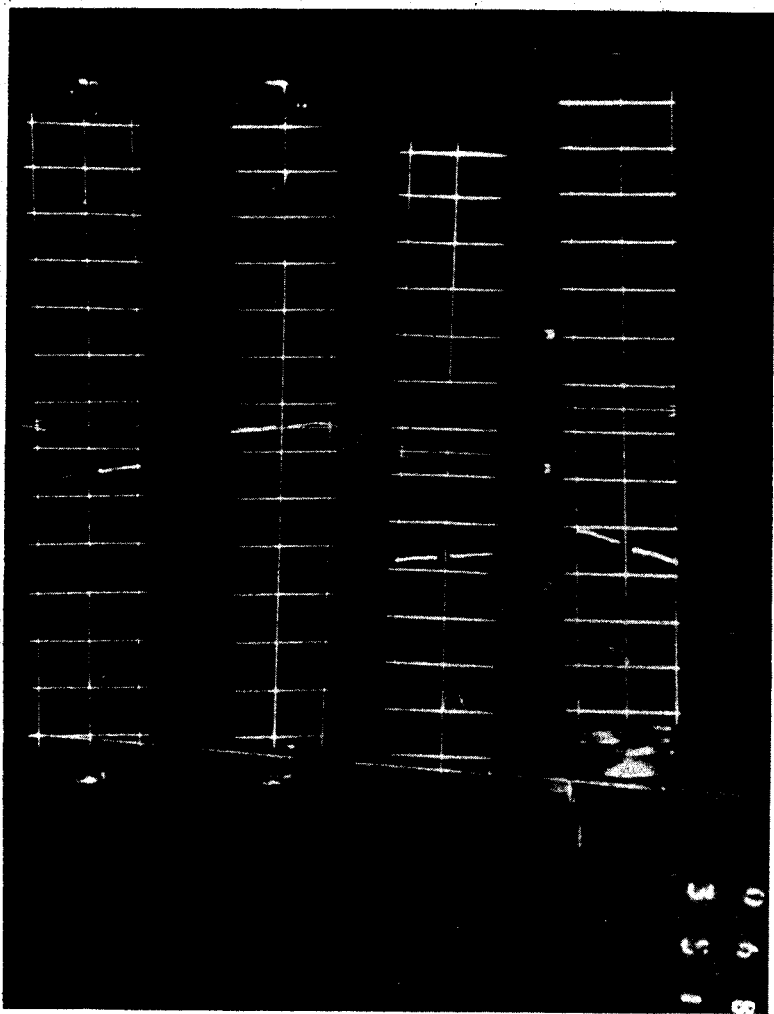


Рис. 2. Фотография события, зарегистрированного искровыми камерами.

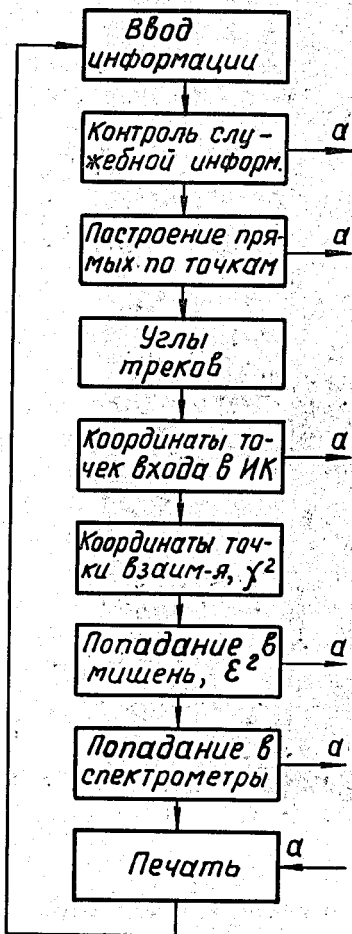
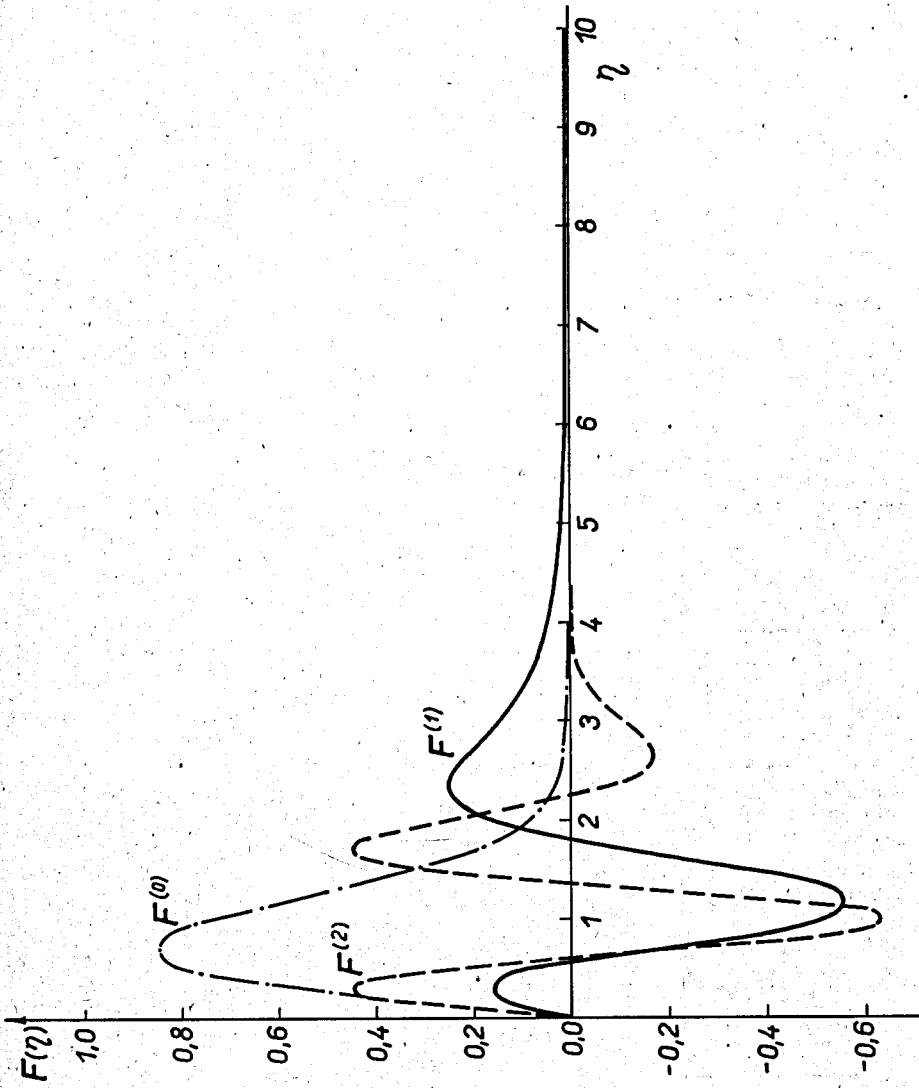


Рис. 3. Блок-схема программы геометрической реконструкции.

Рис. 4. Вид членов мольеровского распределения.



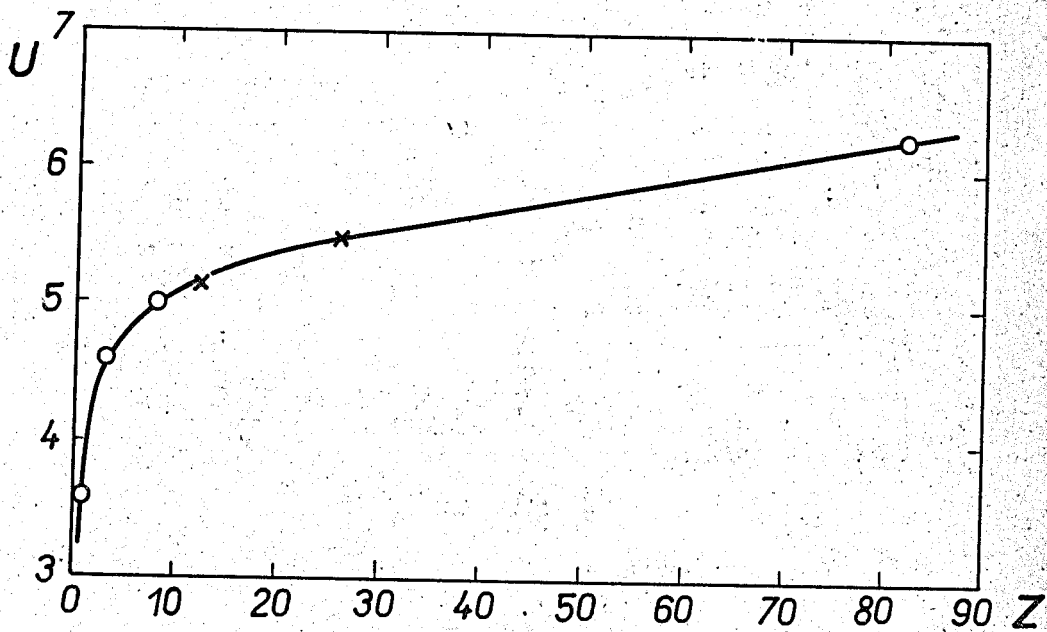


Рис. 5. Поправка Фано U для учета рассеяния на атомных электронах.

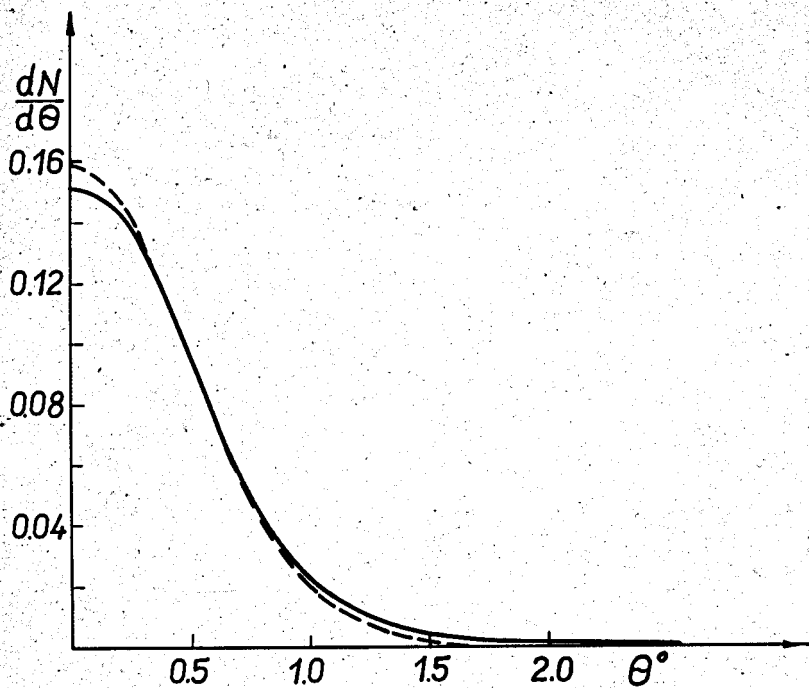


Рис. 6. Распределение по углу многократного рассеяния для электронов с энергией 174 Мэв, прошедших железную фольгу толщиной 0,25 мм. Сплошной кривой показан результат розыгрыша в соответствии с точным молевским распределением, пунктирной - с использованием приближенного метода.

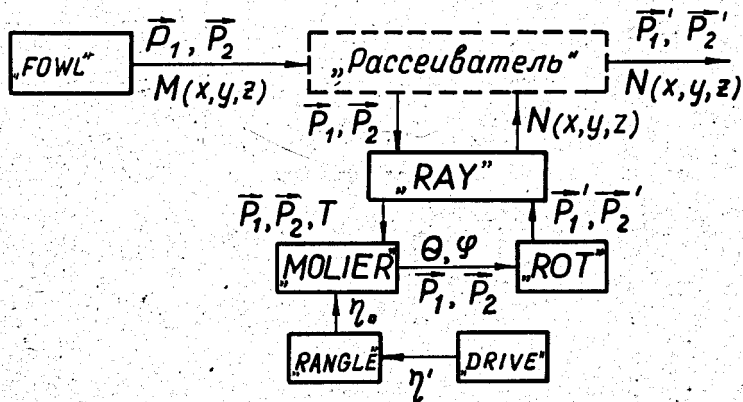


Рис. 7. Упрощенная блок-схема программы моделирования многократного рассеяния.

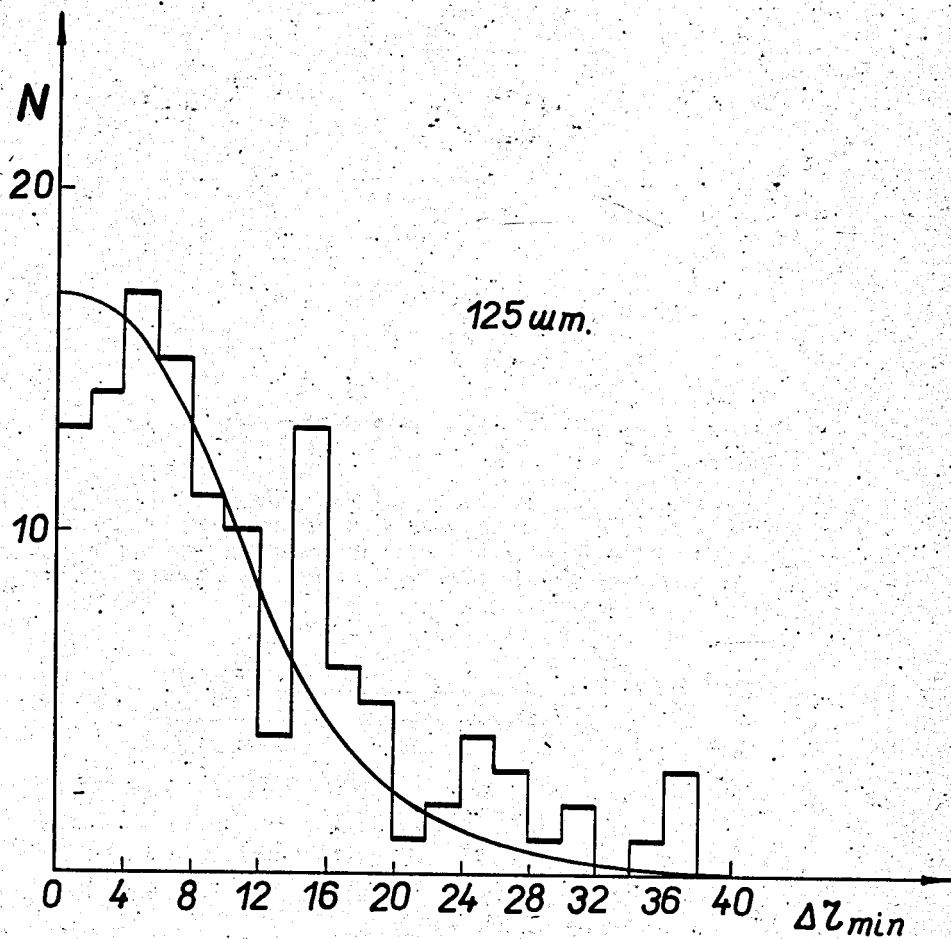


Рис. 8. Распределение событий реакции $\pi^- p \rightarrow n e^+ e^-$ по минимальному расстоянию между треками. Гистограмма получена при обработке событий реакции, сплошная кривая - при моделировании.