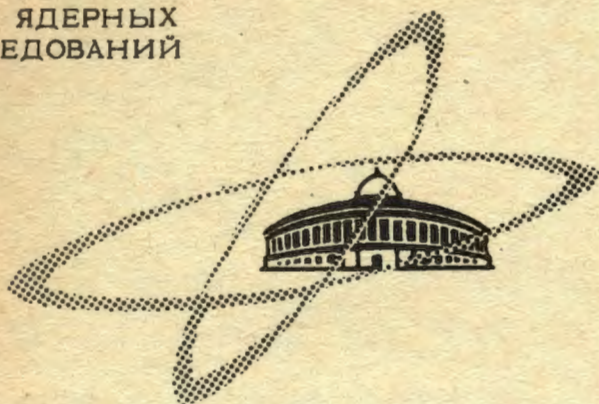


D-705

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10 - 3829



Т.Д.Блохинцева, А.В.Кравцов, В.И.Медведев,  
В.И.Поромов, Г.Л.Соколов, И.И.Тулиани,  
С.Г.Шерман

ОБРАБОТКА ТРЕКОВ ЧАСТИЦ МАЛОЙ ЭНЕРГИИ,  
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ВОДОРОДНОЙ  
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

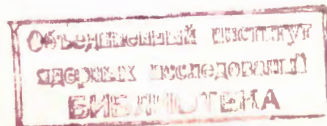
1968

10 - 3829

7332/3 ч.

Т.Д.Блохинцева, А.В.Кравцов, В.И.Медведев,  
В.И.Поромов, Г.Л.Соколов, И.И.Тулиани,  
С.Г.Шерман

ОБРАБОТКА ТРЕКОВ ЧАСТИЦ МАЛОЙ ЭНЕРГИИ,  
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ВОДОРОДНОЙ  
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ



Настоящая работа посвящена определению кинематических параметров частиц, наблюдаемых в пузырьковой камере. Пространственная картина события в камере, наполненной рабочей жидкостью, фотографируется стереофотоаппаратом, а затем воспроизводится с помощью стереорепроектора на экране в воздухе. Цель работы - учесть систематические ошибки в определении углов и импульсов частиц, которые возникают из-за усадки фотопленки, преломления лучей на границе рабочей жидкости, конического репроецирования спирали на плоскость, перпендикулярную магнитному полю, а также за счёт торможения частиц в рабочем веществе камеры. При выводе формул предполагалось, что фотографирование и проецирование производится одним и тем же фотоаппаратом, а также что используются объективы, хорошо исправленные на дисторсию.

Кроме того, считалось, что фотоаппарат и камера установлены так, что оптические оси объективов параллельны магнитному полю и перпендикулярны поверхности смотрового стекла камеры.

Расчёты проводились в приближении малых углов, т.е. предполагалось, что фотоаппарат удален от камеры достаточно далеко, так что синусы и тангенсы углов можно заменять самими углами.

В процессе работы использовалась следующая система координат (рис. 1): а) плоскость  $XOY$  совпадает с границей раздела смотровое стекло - рабочая жидкость (горизонтальная плоскость); б) ось  $OZ$  направлена вглубь камеры; в) начало координат расположено в середине отрезка, лежащего в плоскости  $XOY$  и соединяющего оптические оси объективов; г) ось  $OX$  перпендикулярна этому отрезку и направление ее образует угол  $< \frac{\pi}{2}$  с направлением первичного пучка; д) ось  $OY$  образует



с осями  $OX$  и  $OZ$  правую систему, т.е. направлена от левого объектива к правому, если первичный пучок направлен от оператора.

Опишем измерения на репроекторе, к которым привязаны наши формулы. Задавая направление отсчёта углов, будем иметь в виду, что оператор смотрит на экран со стороны отрицательных значений  $z$ .

1.  $z'_0$  - высота изображения крестов, нанесенных на смотровое стекло на границе стекло - водород, в системе репроектора.
2.  $z'_1$  - глубина погружения точки взаимодействия в рабочую жидкость.
3.  $\alpha'_0$  - угол между начальным треком и горизонтальной плоскостью отсчитывается от горизонтальной плоскости вверх, т.е. положителен, когда частица летит к фотоаппарату.
4.  $\beta$  - угол между осью  $OX$  и проекцией первоначального трека на горизонтальную плоскость;  $\beta$  отсчитывается от оси  $OX$  по часовой стрелке.
5.  $\phi'$  - угол между плоскостью рассеяния и плоскостью, которая содержит первоначальный трек и линия пересечения которой с горизонтальной плоскостью перпендикулярна направлению первичной частицы.
6.  $\theta'$  - угол рассеяния.
7.  $\alpha'$  - угол между отрицательным направлением оси  $OZ$  и импульсом вторичной частицы ( $0 \leq \alpha' \leq 180$ ).
8.  $R'$  - средний косоугольный радиус вторичной частицы, измеренный шаблоном в горизонтальной плоскости, проходящей через точку взаимодействия.
9.  $l'$  - длина трека в камере.
10.  $r'$  - расстояние от точки взаимодействия до оси камеры.
11.  $\Phi$  - азимутальный угол точки взаимодействия, отсчитываемый от положительного направления оси  $OY$  по часовой стрелке.

Все перечисленные величины отмечены штрихом в знак того, что измеренные значения отличны от истинных.

# 1. Поправка углов и радиусов на усадку фотопленки и репроеекцию в воздухе

На рис. 2 представлен ход лучей через объектив. Точка А, находящаяся в водороде с координатами  $x, y, z$ , дает изображение на левом и правом кадрах с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  соответственно. Начала координат систем  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  лежат в точках пересечения оптических осей объективов с плоскостью пленки.

Введем следующие обозначения:

- $f_1$  - передний фокус объектива,
- $f_2$  - задний фокус объектива,
- $V$  - расстояние от заднего фокуса до пленки,
- $H_0$  - расстояние от переднего фокуса до стекла камеры,
- $H_1$  - расстояние от стекла до точки пересечения центрального луча пучка с оптической осью,
- $d$  - толщина стекла,
- $z_1$  - глубина точки А,
- $R_1$  - расстояние от А до оси левого объектива,
- $R_2$  - расстояние от А до оси правого объектива,
- $r_1$  - расстояние от изображения точки А на левом негативе до оси левого объектива,
- $r_2$  - то же для правого фотоаппарата,
- $\kappa_1$  - угол между проекцией левого луча на плоскость  $XOY$  и осью  $OY$ ;
- $\kappa_2$  - угол между проекцией правого луча на плоскость  $XOY$  и осью  $OY$ ,
- $2B$  - база стереофотоаппарата.

При сформулированных во введении предположениях между  $r$  и  $R$  имеет место соотношение

$$R = r \frac{L_0}{f}, \quad (1)$$

где

$$L_0 = H_1 + \frac{d}{n_1} + \frac{x_1}{n}, \quad (2)$$

$$f = \frac{f_1 f_2 + V(H_1 - H_0)}{f_2},$$

$n_1$  - показатель преломления стекла,

$n$  - показатель преломления рабочей жидкости.

После усадки пленки все её точки, вообще говоря, сдвигаются. Будем считать, что продольная ось пленки своего положения не меняет. Тогда всегда найдется одна такая точка, которая при проецировании будет расположена относительно осей объективов точно так же, как и при съемке. Назовем эту точку центром усадки и пусть она удалена от оси камеры на расстояние  $\ell_0$ .

При проецировании плоскости, содержащие центральные лучи, идущие от левого и правого объективов, и оптическую ось соответствующего объектива, пересекутся по вертикальной линии, координаты которой  $x'_1$  и  $y'_1$  найдем из условия:

$$x'_1 = (B + y'_1) \operatorname{tg} \kappa'_1 = (B - y'_1) \operatorname{tg} \kappa'_2$$

При этом левый и правый центральные лучи пересекутся в точке с координатами  $x'_1, y'_1, z'_1$ .

Таким образом, точка, имевшая в водороде координаты  $x_1, y_1, z_1$ , при репроецировании будет иметь координаты  $x'_1, y'_1, z'_1$ :

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x(1-\epsilon)}{D} \\ y' &= \frac{y(1-\epsilon) - \epsilon \frac{L_0}{f} \ell_0}{D} \\ z' &= \frac{\frac{z}{n} + \epsilon \left( H_1 + \frac{d}{n_1} \right) \left( 1 + \frac{L_0}{f} \right)}{D} \end{aligned} \quad D = 1 - \epsilon \left( 1 + \frac{L_0}{f} \right) \quad (3)$$

Напомним здесь, что  $L_0$  и  $f$  определены формулами (2),  $\epsilon$ -коэффициент усадки, а штрих возле буквы означает, что соответствующая величина относится к моменту проецирования.

Исследование системы (3) показывает, что прямые линии в пространстве  $x y z$  переходят в пространстве  $x' y' z'$  в прямые линии с другим наклоном. Цилиндры, ось которых проходит через центр усадки, преобразуются в конусы, общая вершина которых лежит на той же оси при  $z' = -\left(\frac{f}{\epsilon} + H_1 + \frac{d}{n_1}\right)$ , а горизонтальные плоскости преобразуются подобно с центром подобия на оси усадки и коэффициентом подобия, зависящим от  $z$ .

С помощью уравнений (3) можно определить все поправки, связанные с усадкой пленки и преломлением лучей на границе двух сред. Для определения коэффициента усадки  $\epsilon$  на репроекторе измеряют высоту крестов  $z'_0$ , тогда

$$\epsilon = \frac{f z'_0}{\left(f + H_1 + \frac{d}{n_1}\right) \left(z'_0 + H_1 + \frac{d}{n_1}\right)} \quad (4)$$

Теперь найдем истинную глубину точки взаимодействия:

$$z_1 = \frac{f z'_1 - \epsilon \left(f + H_1 + \frac{d}{n_1}\right) \left(z'_1 + H_1 + \frac{d}{n_1}\right)}{f + \epsilon \left(z'_1 + H_1 + \frac{d}{n_1}\right)} \quad (5)$$

и исправим радиусы:

$$R = R' \cdot \frac{1 - \epsilon \left(1 + \frac{L_0}{f}\right)}{1 - \epsilon} \quad (6)$$

Сделаем несколько замечаний относительно поправок в  $r'$  и  $\Phi'$ .

Если бы центр усадки попал на ось  $OZ$ , то поправка для  $r'$  давалась бы формулой (6), а угол  $\Phi$  не менялся бы. То же самое мы имели бы, если бы могли найти на экране репроектора изображение точки пересечения оси  $OZ$  с горизонтальной плоскостью точки взаимодействия. Однако на самом деле с помощью крестов мы находим изображение точки пересечения оси  $OZ$  с плоскостью  $z = 0$ , а затем проектируем его на плоскость точки взаимодействия. Таким образом, на репроекторе мы измеряем  $r'$  и  $\Phi$  не относительно точки  $x'(x=0, z=z_1)$ ,  $y'(y=0, z=z_1)$ , а относительно точки с координатами  $x'(y=0, z=0)$ ,  $y'(y=0, z=0)$ . В связи с этим возникают следующие поправки в  $r'$  и  $\Phi'$

$$\operatorname{ctg} \Phi' = \operatorname{ctg} \Phi + \frac{\epsilon \ell_0 K}{r \sin \Phi}$$

$$r'^2 = \left( \frac{1-\epsilon}{D} \right)^2 [r^2 - 2\epsilon \ell_0 K r \cos \Phi + \epsilon^2 \ell_0^2 K^2] \quad (7)$$

$$K = \frac{z_1}{n} \left[ f(1-\epsilon) - \epsilon \left( H_1 + \frac{d}{n_1} \right) \right]^{-1}$$

Для оценки этих поправок заметим, что если пленка в репроекторе сдвинется относительно симметричного положения на отрезок  $\Delta \ell$ , то расстояние до центра усадки  $\ell_0$  будет равно  $\frac{\Delta \ell}{\epsilon}$ . Тогда произведение  $\epsilon \ell_0$  в формуле (7) следует заменить на  $\Delta \ell$ . Если  $\Delta \ell$  мало ( $\approx 1$  мм), то поправками, зависящими от  $\Delta \ell$ , можно пренебречь. Как будет показано далее, случайные ошибки в определении других углов, возникающие от того, что расстояние от точки взаимодействия до оси усадки неизвестно, также будут тем меньше, чем меньше  $\Delta \ell$ . Поэтому при установке пленки в репроектор следует иметь в виду, что середина куска пленки, заключенного между левым и правым кадрами, должна попасть на ось  $OZ$ . Тогда угол  $\Phi' = \Phi$ , а поправка для  $r'$  дается формулой (6).

Поправку в глубинный угол  $\alpha$  вычислим с учётом того, что из-за усадки пленки вертикальные линии превращаются в наклонные, а на репроекторе угол  $\alpha'$  измеряется между треком и вертикалью в простран-



стве репроектора. На рис. 3 показано, как преобразуется маленький треугольник с вершиной в точке взаимодействия. Координаты точки А :

$$x_1 = x \quad , \quad z_1 = z ;$$

координаты точки В :  $x_2 = x + \mu \operatorname{tg} \alpha \Delta z$  ,  $z_2 = z - \Delta z$  .

Здесь  $x$  -расстояние до оси усадки,  $\mu$  - синус угла, определяющего ориентацию плоскости треугольника. Тогда  $\operatorname{tg} \alpha' = \frac{x_2' - x_1'}{z_1' - z_2'}$  . Подставляя сюда с помощью (3) соответствующие значения, после преобразований получим:

$$\operatorname{tg} \alpha' = n D \operatorname{tg} \alpha + \mu \epsilon \frac{x}{f} \quad (8)$$

Обычно величина  $x$  нам не известна, однако среднее значение последнего члена по углу  $\mu$  равно нулю; случайная же ошибка от пренебрежения этим членом также мала, вследствие незначительности  $\epsilon x$  . Поэтому, опуская последний член, имеем, вместо (8),

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{n D} \quad (9)$$

Угол  $\phi$  лежит в плоскости, перпендикулярной первичному треку. Поэтому, если ограничиться случаями, когда первичный трек лежит в горизонтальной плоскости, то поправка в угол  $\phi$  будет вводиться по формуле, аналогичной (9):

$$\operatorname{tg} \phi = n D \operatorname{tg} \phi' \quad (10)$$

Поправку в угол рассеяния  $\theta$  можно получить, принимая во внимание, что углы  $\alpha_0, \alpha, \theta$  и  $\phi$  связаны следующей формулой:

$$\cos \alpha = \sin \alpha_0 \cos \theta + \cos \alpha_0 \sin \theta \sin \phi. \quad (11)$$

Если известны поправки для 3 углов, то поправку для 4 угла можно получить с помощью формулы (11).

Ограничиваясь случаем  $\alpha_0 = 0$ , имеем

$$\operatorname{tg} \theta = n D \operatorname{tg} \theta' \frac{\sin \phi'}{\sin \phi}. \quad (12)$$

## 2. Поправка, связанная с косоугольным репроецированием и торможением частицы в водороде

Поправка на косоугольное репроецирование проводилась одновременно с учётом торможения частицы средой способом, предложенным в<sup>1/</sup>. Необходимое для осуществления этой программы соотношение между импульсом частицы и ее пробегом в водороде бралось из таблиц<sup>2/</sup>. Для удобства вычислений табличное соотношение было аппроксимировано аналитической функцией. В интервале  $0 \leq \frac{p}{m} \leq 3$  аппроксимация проводилась по формуле:

$$\frac{1}{p} = b_1 L^{b_2} + b_3 L^{b_4} + \frac{b_5 L}{\sqrt{L^2 + b_6}} + \frac{b_7 L}{(L^2 + b_8)} \quad (14)$$

При плотности водорода  $\rho = 0,057 \text{ г/см}^3$  параметры  $b_1$  имеют следующие значения:  $b_1 = 1,024394$ ;  $b_2 = 0,2749836$ ;  $b_3 = -0,07183454$ ;

$b_4 = 0,3398591$ ;  $b_5 = -0,1142913$ ;  $b_6 = 0,3963756$ ;  $b_7 = 0,3991329$ ;  
 $b_8 = 3,171563$ . Максимальное расхождение между расчётными и табличными значениями не превышало 0,5%.

### 3. Результаты

Рабочая программа была написана на языке "АЛГОЛ", а также на "АКИ Минск-22" и приспособлена для анализа реакций:



при кинетической энергии налетающих  $\pi^-$ -мезонов, равной 340 Мэв. События регистрировались 25-сантиметровой водородной пузырьковой камерой ЛЯП ОИЯИ/3,4/. Для оценки результатов действия программы по ней было обчислено  $\approx 160$  событий типа (а),  $\approx 300$  событий реакций (б) и (в), а также несколько тысяч упругих событий.

Для упругих событий программа используется не полностью, а лишь в той своей части, где она вносит в углы поправки, связанные с усадкой пленки и репроецированием в воздухе. Эти поправки оказываются существенными в величине

$$\Delta\theta = \theta_{12 \text{ эксп.}} - f(\theta_{12 \text{ эксп.}})$$

( $f$  - функция связи углов рассеяния для упругой реакции). Иллюстрацией тому служит рисунок 4, на котором представлено распределение упругих событий по величине  $\Delta\theta$  с учётом (4б) и без учёта (4а) поправок. Уменьшение дисперсии  $\Delta\theta$  в 2 раза весьма существенно, ввиду того, что эта величина служит одним из критериев выделения неупругих событий.

При обчёте событий реакции (а) в качестве критерия точности рассматривалось распределение случаев по нейтронной массе. На рис. 5б

представлено распределение событий, обчисленных по описанной выше программе. Для сравнения рядом приведена аналогичная гистограмма тех же событий, обчисленных по старой программе, где отсутствовали поправки на торможение и водород, а косоугольное репроецирование и усадка пленки учитывались менее точно. Дисперсия в нейтронной массе, определенная на основании гистограммы 5б, оказывается равной  $(13 \text{ Мэв})^2$ , тогда как дисперсия распределения 5а составляет  $(22 \text{ Мэв})^2$ . Для событий реакций (б) и (в) было построено распределение по квадрату недостающей массы (рис. 6). Как видно из рисунка, использованная программа позволяет достаточно хорошо разделять реакции (б) и (в).

Настоящая работа стимулировалась стремлением улучшить точность определения кинематических параметров при изучении реакций (а), (б), (в).

Приведенные выше результаты показывают, что предлагаемая программа обсчёта событий дала заметное повышение точности.

Была рассмотрена и другая возможность улучшения качества экспериментальных данных - измерение событий на полуавтоматах.

Часть статистики была обработана на ПУОС и обчислена по программе 1-4 (ВЦ ОИЯИ). Оказалось, что в подавляющем большинстве случаев переход на методику измерения на полуавтомате не дает повышения точности для нашего эксперимента (см. Приложение).

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.И.Мороза, Л.Л.Неменова, Г.Н.Тентюкову за полезные обсуждения, Н.А.Полтавскую за помощь, оказанную при отладке описанной программы, и О.В.Благодирнову за помощь при эксплуатации программы 1-4.

### Приложение

Чтобы выявить возможности методики обработки треков на полуавтоматах, часть событий и первичных треков (без взаимодействия) была измерена на ПУОСе и обчислена по программе 1-4 (ВЦ ОИЯИ).

Распределение первичных частиц по импульсу практически совпадало с аналогичным распределением, построенным на основе репроекторных измерений. Среднее значение импульса  $\bar{p}$  оказалось равным  $(454 \pm 2,5) \text{ Мэв/с}$ ,



а дисперсия  $\sigma^2 = (27 \pm 2)^2$  Мэв/с<sup>2</sup>. Соответствующие величины, полученные по репроекторным измерениям, имеют значения:  $\bar{p} = 454$  Мэв/с и  $\sigma^2 = (26 \text{ Мэв/с})^2$ .

Поскольку распределения строились для одних и тех же треков, то совпадение дисперсий говорит о равенстве ошибок в определении импульса  $\approx 450$  Мэв/с на полуавтомате и на репроекторе, а совпадение средних величин позволило убедиться в том, что использованная геометрическая программа не дает систематической ошибки.

Далее было проведено сравнение измерительных ошибок в импульсах  $(220 + 620)$  Мэв/с при измерении треков различной длины на полуавтомате и репроекторе. На полуавтомате ошибка определялась путем многократного измерения одного и того же трека, а на репроекторе ошибки усреднялись для группы треков приблизительно одинакового импульса. Результаты приведены в таблице 1.

Оценки ошибок в углах рассеяния показали, что полуавтомат допускает более точное измерение углов. А именно: ошибка в определении угла рассеяния на полуавтомате составляет  $10' - 15'$ , тогда как на репроекторе этот угол измеряется с точностью  $\approx 50'$ .

Поскольку дисперсия в недостающей массе является хорошим критерием точности, то естественно было сравнить распределения по нейтральной массе событий, измеренных на репроекторе и на полуавтомате. Такое сравнение было проведено для 100 событий реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ d$  и оказалось, что дисперсии обоих распределений совпадают.

### Л и т е р а т у р а

1. В.В.Кротов, С.Г.Шерман. ПТЭ № 3, 31 (1966).
2. *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*. Washington, 1964.
3. Т.Д.Блохинцева, В.Г.Гребинник, Г.Либман, В.А.Жуков, Л.Л.Неменов, Г.И.Селиванов, Юань Жун-фан. Препринт ОИЯИ, Р-2255, Дубна 1965.
4. Т.Д.Блохинцева и др. Препринт ОИЯИ, Р-2320, Дубна 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел

19 апреля 1968 года.

ТАБЛИЦА I

$\bar{P}$ [МэВ/с]	$L$ (см)	$\overline{\Delta P}$ [МэВ/с]
	полуавтомат	
220	II	I2
220	6	40
340 - 450	I4 - I9	I2
425	9	40,5
60I	I7	I9
	репроектор	
2I0 - 220	8 - I5	9
2I0 - 220	3 - 8	I8
380 - 480	I4 - I8	I4
380 - 480	9 - I0	I7
620 - 690	I3 - I5	I7
620 - 690	6 - I2	5I

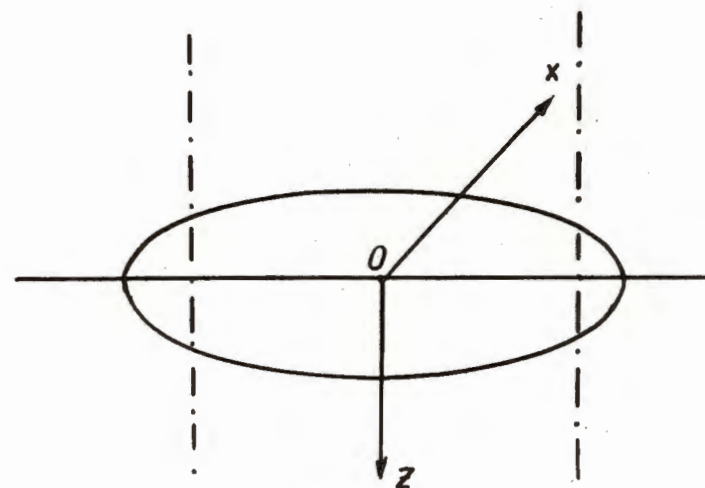


Рис. 1. Система координат репроектора.

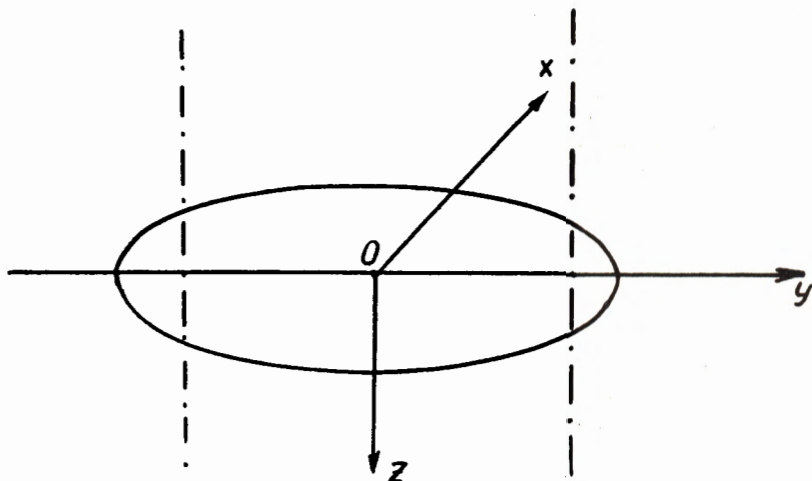


Рис. 1. Система координат ретрофлектора.

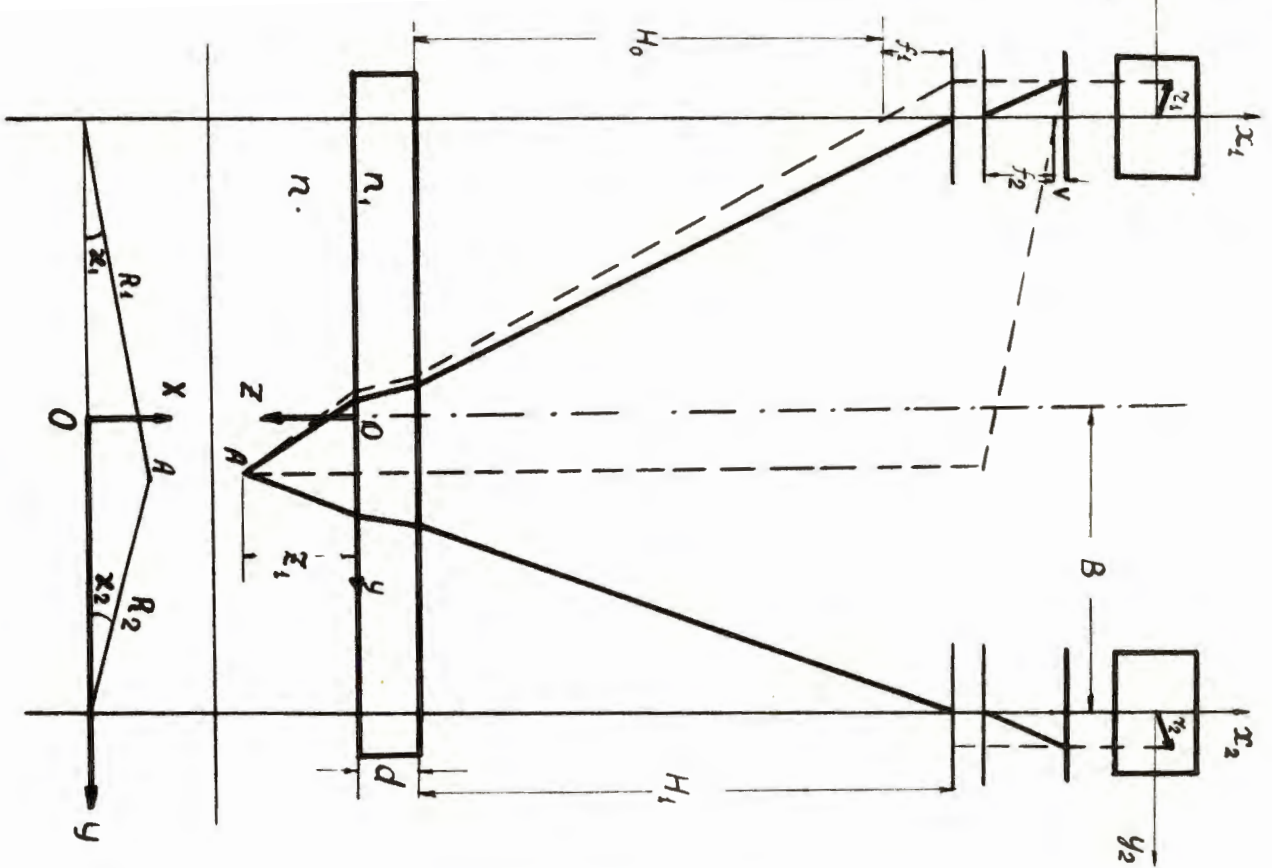


Рис. 2. Ход лучей при ретрофокусировке.

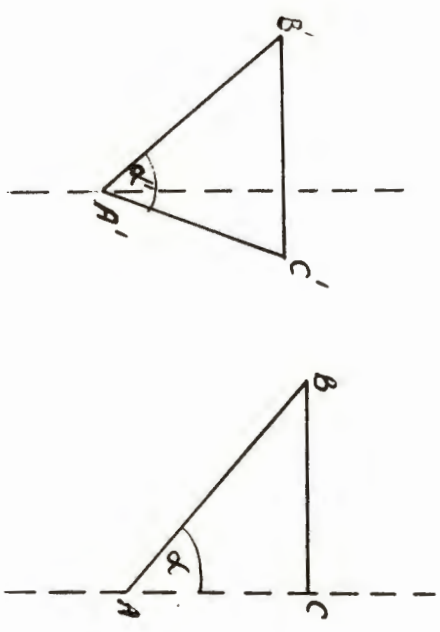
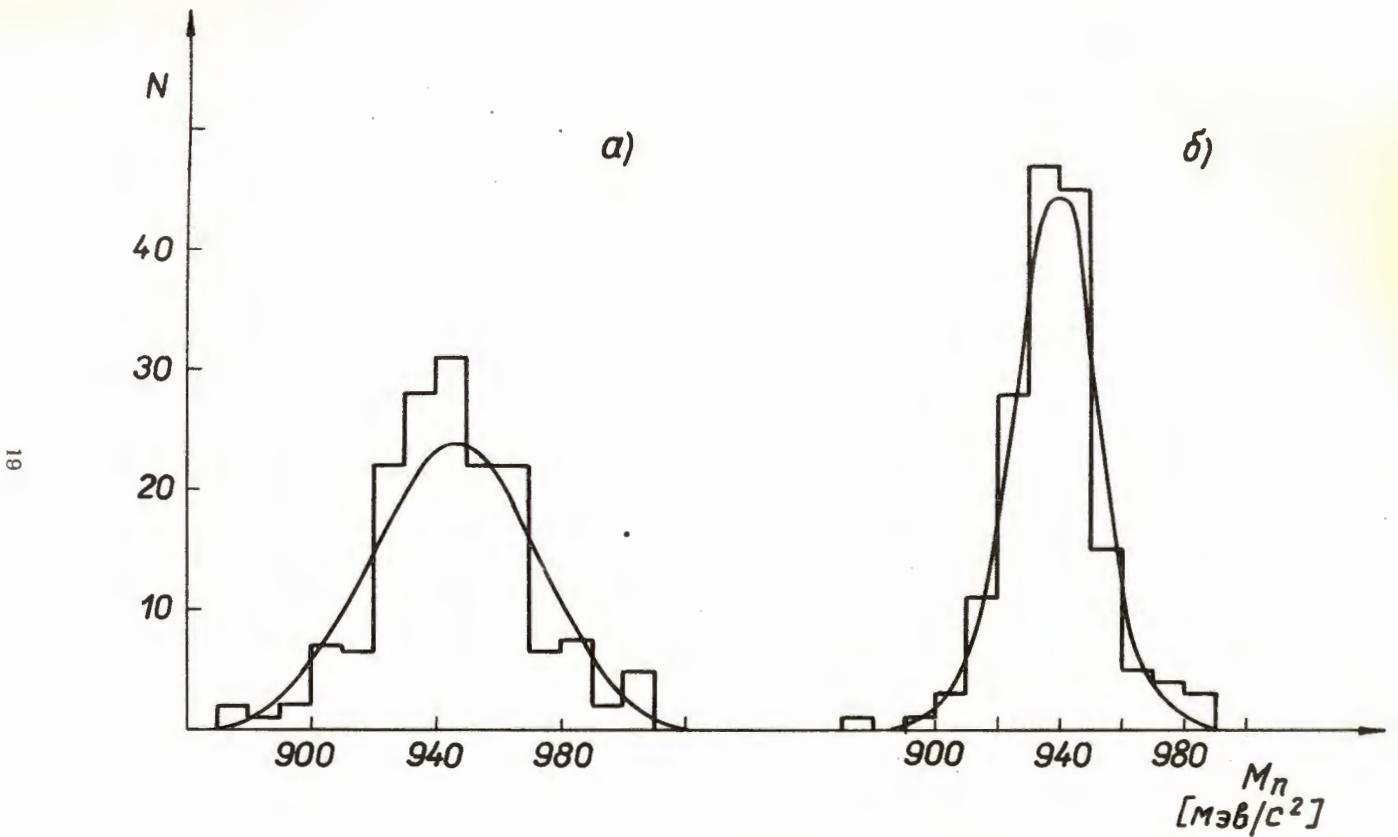
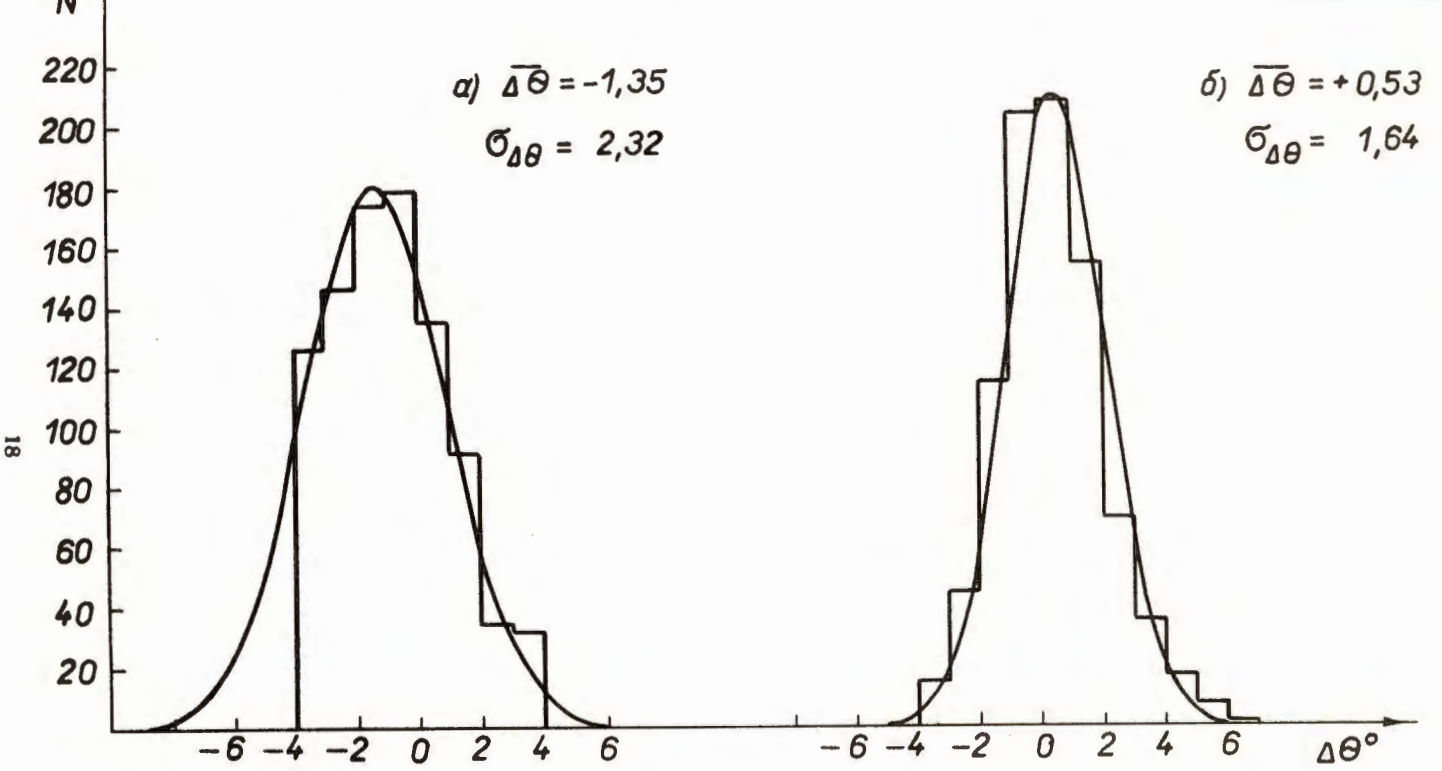


Рис. 3.





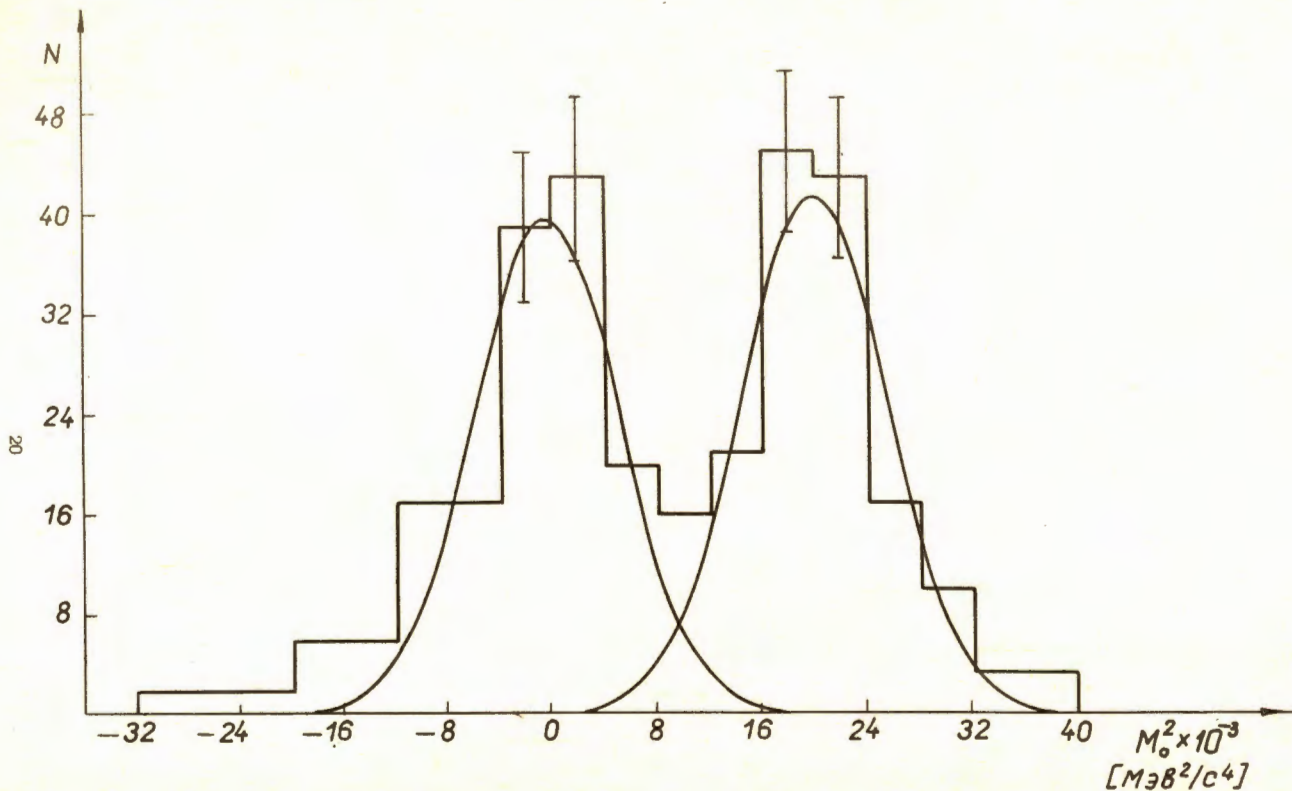


Рис. 6. Распределение событий  $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^0 p$  и  $\pi^- p \rightarrow \pi^- \gamma p$  по квадрату недостающей массы. Сплошные кривые - нормальные распределения.