+

Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао
Кладницкая Е.Н., Соловьев, М.И.

Обработка результатов, полученных при облучении пузырьковой пропановой камеры ЛВЭ в π^+-мезонном пучке синхроциклотрона Об"единенного института ядерных исследований.

Обработка результатов, полученных при облучении пузырьковой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий в π^+ мезонном пучке синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований.

Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, Кладницкая Е.Н., Соловьев М.И.

Приводятся методы обработки результатов реакций при $\pi^+ + p$ и $\pi^+ + c$ взаимодействиях. Построены угловые распределения продуктов реакций в СЦМ. Область энергий первичного пучка 250-270 Mev.

(I) Порядок и методы просмотра плёнки, измерений, обсчёта и статистика результатов.

I. Просмотр пленки.

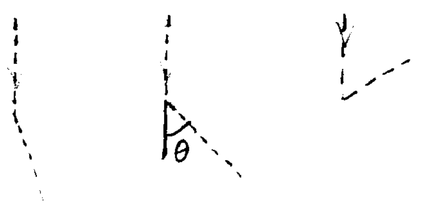
Просмотр полученных фотографий производился на стереоскопе. При просмотре пленки с помощью стереоскопа прежде всего надо отличать π^+ мезоны от протонов. Это делалось путем сравнения относительных плотностей и ширин следов (точнее плотностей и размеров пузырьков). π^+ следы тонкие (0.03 x II мм), плотность пузырьков маленькая (8-I0 на II мм.). P следы толстые (0.05 x II мм), плотность пузырьков большая (I8-20 на II мм).
Все случаи взаимодействия π^+ мезонов с водородом и углеродом выделялись и зарисовывались (штриховой линией мезоны, сплошной - протоны). Далее они разделялись на три группы - однолучевые звезды, двухлучевые звезды и звезды с числом лучей, большим 2. Учитывались только взаимодействия,

вызванные π^+ мезонами с отклонением от направления пучка, не превышающим 10^0, т.к. по-видимому следы с наклоном к направлению пучка $> 10^0$, до входа в камеру уже потеряли неизвестную часть энергии, благодаря рассеянию в стенке камеры. Не учитывались взаимодействия, вызванные π^+, проходящими по краям поля зрения. Ширина моноэнергетического пучка 40мм, она определялась диаметром отверстия в стенке камеры.

При взаимодействии π^+ мезонов с водородом и углеродом возможны следующие реакции:

а) Однолучевые звезды:

Вид случая | Возможная реакция



$$\pi^+ + (n) \to \pi^+ + n \qquad (1)$$

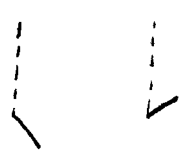
$$\pi^+ + p \to \pi^+ + p \qquad (2)$$

$$\pi^+ + C \to \pi^+ + C \qquad (3)$$

При $\theta < 15^0$ все вышенаписанные реакции не отличимы.
При $\theta > 15^0$ реакция (2) $\pi^+ + p \to \pi^+ + p$ выглядит в пропановой камере как двухлучевая звезда.

При $\theta > 70^0$ большой вклад в однолучевые звезды вносит реакция (1). Реакция (3) выглядит как однолучевая звезда, так как пробег ядра отдачи C не видим в пропане при возможных энергиях.

Вид случая | Возможная реакция



$$\pi^+ + (n) \to p + \pi^0 \qquad (4)$$

$$\pi^+ + (nn) \to p + n \qquad (5)$$

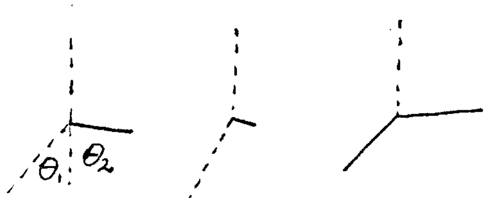
Если $\theta >$ 75^0, то имеет место реакция (5)

При 75 $< \theta$ реакция (5) выглядит как остановка.

Если $\theta <$ 75^0, то нужно знать пробег протона, чтобы определить реакцию. (По пробегу протона определяется его энергия и далее по T и θ делается выбор реакции).

б) Двухлучевые звезды:

Вид случая | Возможная реакция



$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ (6)

$\pi^+ + (p) \rightarrow \pi^+ + p$ (7)

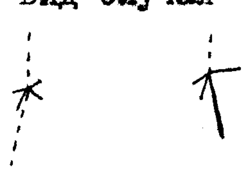
$\pi^+ + (pn) \rightarrow p + p$ (8)

Последняя реакция легко определяется.

Первые две реакции разделяются по компланарности и соотношению углов θ_1 и θ_2.

в) Звезды с числом лучей > 2.

Вид случая | Реакция



$\pi^+ + C \rightarrow \pi^+ +$ звезда (9)

$\pi^+ + C \rightarrow$ звезда (без π^+) (10)

Считалось полное число π^+, входящих в камеру (отклонение от направления пучка не > 10^0) π^+, проходящие по краям поля зрения не учитывались.

Следует иметь в виду:

1. При просмотре на стереоскопе нужно не только зарисовывать случай, но и отмечать положение вторичной частицы (вверх, вниз).

2. Особенно внимательно нужно смотреть нет ли отклонений на малые углы (однолучевые звезды).

3. Каждый кадр нужно смотреть стереоскопически ! Будет меньше ошибок.

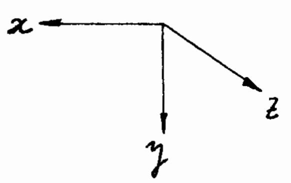
4. Нужно фиксировать взаимодействия, по виду похожие на остановку π^+ . Эти взаимодействия можно отнести к реакции

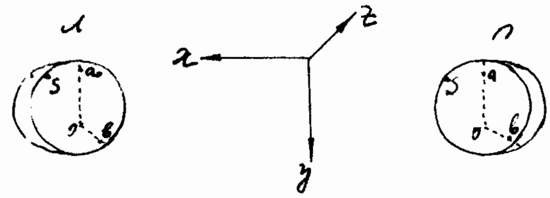
$$\pi^+ + (n) \to \pi^0 + p \quad . \ \theta > 75^\circ .$$

(П). Методы измерений и обсчёт.

I. Определение углов рассеяния с помощью микроскопа.

Выбираем координаты





Перед измерением координат x, y точек $a, o, в, s$ нужно установить $y_{ол} = y_{оп}$ или $y_{sл} = y_{sп}$.

л - левый
п - правый

Далее отсчитываются координаты

$x_{ол}$ $x_{ал}$ $x_{вл}$ $x_{sл}$ $y_{ол} = y_{оп}$ $y_{вл} = y_{вп}$

$x_{оп}$ $x_{ап}$ $x_{вп}$ $x_{sп}$ $y_{ал} = y_{ап}$ $y_{sл} = y_{sп}$

Отсчёты записываются в таблицу.

	$x_л$	$x_п$	$y_{лп}$	p	X	Y	Z	L_x	L_y	L_z	L^2	$\cos\theta$	θ	$\sin\varphi$	φ
o															
a															
в															
s															

Точки S' и O', постоянные, а точки "а" и "b" могут быть в различных частях первичного и вторичного следов, соответственно. Но чем дальше "а" и "b" от "о", тем меньше ошибка. Для случая l (вторичный протон) точку "b" нужно брать на конце следа, т.к. координата конца нужна при определении пробега протона. Все выше упомянутое относится к однолучевым звездам, для других звезд, кроме точек o, a, b, s берутся дополнительные точки $c, d \ldots$

Вычисление углов ведется по формулам:

(I) Основные формулы для определения координат в пространстве из координат соответствующих точек на стерео-фотокартине.

Предполагаем, что в пространстве имеется только единственная среда, например, воздух, коэффициент преломления которого равен единице.

SS_o, $S'S_o'$ оптические оси объективов, которые перпендикулярны к плоскости Π, расстояние между ними $SS' = B$ (рис I)

S, S' главные точки объективов. v фокусное расстояние объектива.

Пусть изображение точки M на кадрах будет m (лев.) и m' (прав.) с координатами на плоскости кадров x, y и x', y', а в пространстве точка M имеет координаты $X\,Y\,Z$

$$Z = SS' \frac{\cos\alpha_m \cos\alpha'_m}{\sin(\alpha_m - \alpha'_m)} = B \frac{1}{tg\,\alpha_m - tg\,\alpha'_m} = \frac{Bv}{x - x'} \quad (1)$$

(рис. I)

обозначим $p = x - x'$

$$X = Z\, tg\,\alpha_m = Z \frac{x}{v} = B \frac{x}{p} \quad (2)$$

$$Y = Z\, tg\,\omega_m \sec\alpha_m = Z \frac{y}{v} = B \frac{y}{p} \quad (3)$$

Наконец, мы получили формулы для определения координат точки в пространстве из двух стереокартин:

$$X = \frac{B}{p}x, \qquad Y = \frac{B}{p}y \qquad Z = \frac{B}{p}v$$

(2) Определение координат изображения точки, находящейся в пузырьковой камере.

Точки m, m' (рис.2) соответствуют точкам M_1, M_2, которые являются изображениями точки M в камере.

n_2 коэффициент преломления переднего стекла.

n_3 коэффициент преломления жидкости.

H_0 расстояние между главной точкой и стеклом.

Согласно с методом, изложенным в предыдущем параграфе, можно определить непосредственно координаты M_1 (или M_2) из положений точек m, m' относительно оптической оси.

На плоскости Φ ($mOSS_0M_1M_2$), m_2 соответствует точке изображения M_2 на левом кадре.

$$\frac{a}{b} = \frac{v-\Delta v}{z_1-\Delta z}, \quad \frac{\Delta v}{\Delta z} = \frac{a}{b} = \frac{v-\Delta v}{z_1-\Delta z}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta z} = \frac{v}{z_1}, \quad \frac{\Delta\gamma}{\Delta v} = \frac{\gamma+\Delta\gamma}{v}, \quad \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta v}{v-\Delta v}$$

$$\Delta\gamma = \gamma\frac{\Delta v}{v} : \left(1-\frac{\Delta v}{v}\right) = \gamma\frac{\Delta z}{z_1-\Delta z} = \gamma\frac{\Delta z}{z_2}$$

$$z_1 = \frac{R_1}{\gamma}v \qquad z_2 = \frac{R_2}{\gamma'}v; \quad (R_1 = pM_1;\ R_2 = p'M_2)$$

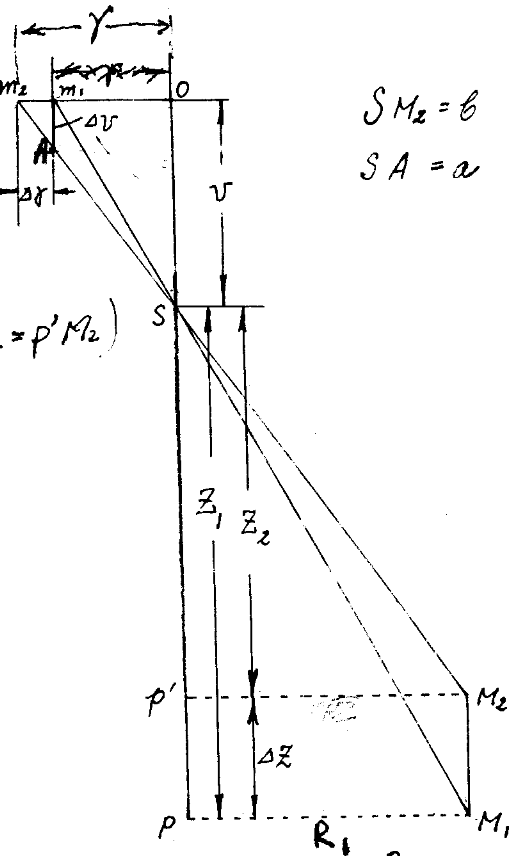
$$\Delta z = z_1 - z_2 = v\left(\frac{R_1}{\gamma} - \frac{R_2}{\gamma'}\right); \quad \frac{\Delta z}{z_2} = \frac{R_1\gamma'}{R_2\gamma} - 1$$

положение m_2 от оптической оси на левом кадре

$$\gamma+\Delta\gamma = \left(1+\frac{\Delta z}{z_2}\right)\gamma = \frac{R_1}{R_2}\gamma' = \frac{R_1}{R_2}\sqrt{x'^2+y'^2}$$

$$R_1 = \sqrt{X^2+Y^2} \qquad R_2 = \sqrt{\eta^2+Y^2} \qquad \frac{X}{Y} = \frac{x}{y}$$

$$\frac{\eta}{Y} = \frac{x'}{y'} \qquad \gamma+\Delta\gamma = \sqrt{x^2\left(\frac{y'}{y}\right)^2 + y'^2}$$



$SM_2 = b$

$SA = a$

рис. 3

Координаты изображения, соответствующего точке изображения M_2 на левом кадре $x\frac{y'}{y}$ и y' и этим же путем можно получить на правом кадре для точки M_1 изображение m_1 с координатами $x'\frac{y}{y'}$ и y.

Берем точку S_0 как начальную точку координатной системы, тогда координаты точки изображения M_1 в пространстве определяются следующими выражениями

$$p = x - x'\frac{y}{y'} \qquad (4)$$

$$X = \frac{Bxy'}{xy' - x'y} \qquad Y = \frac{Byy'}{xy' - x'y} \qquad Z_1 = \frac{Bvy'}{xy' - x'y} \qquad (\underline{II})$$

(3) Определение координат точки, находящейся в пузырьковой камере.

Мы уже получили координаты точки M_1. С учетом коэффициента преломления стекла и жидкости можно получить окончательную формулу, определяющую координаты точки $\underline{M}$ в пространстве.

а) На плоскости Φ (рис.4).

$$R = H_0 \, tg\, \varphi_1 + d \, tg\, \varphi_2 + h \, tg\, \varphi_3 = z_1 \, tg\, \varphi_1$$
$$= (h' + H_0 + d)\, tg\, \varphi_1 \qquad tg\, \varphi_1 = \frac{r}{v} = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{v} \qquad (5)$$

где d - толщина стекла

h - глубина точки M под поверхностью жидкости.

h' - глубина точки изображения M_1 под поверхностью жидкости.

$$h' + H_0 + d = H_0 + d\,\frac{tg\,\varphi_2}{tg\,\varphi_1} + h\,\frac{tg\,\varphi_3}{tg\,\varphi_1}$$

$$h' + d\left(1 - \frac{tg\,\varphi_2}{tg\,\varphi_1}\right) = h\,\frac{tg\,\varphi_3}{tg\,\varphi_1}$$

$$h = h'\frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_3} + d\left(\frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_3} - \frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_3}\cdot\frac{tg\varphi_2}{tg\varphi_1}\right)$$

$$\frac{tg\varphi}{tg\varphi'} = \sqrt{n^2+(n^2-1)\,tg^2\varphi} \qquad\qquad n = \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi'}$$

$$h = h'\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1} + d\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1}\left(1-\frac{1}{\sqrt{n_2^2+(n_2^2-1)\,tg^2\varphi_1}}\right)$$

$$= \left[Z_1-(H_0+d)\right]\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1} +$$

$$+ d\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1}\left(1-\frac{1}{\sqrt{n_2^2+(n_2^2-1)\,tg^2\varphi_1}}\right) \qquad (6)$$

Наконец, мы получили формулы для определения положения точки M в пространстве из координат соответствующей точки на обеих кадрах (x,y) ; (x',y')

$$X = \frac{By'}{xy'-x'y}\,x \qquad\qquad Y = \frac{By'}{xy'-x'y}\,y \qquad\qquad (III)$$

$$h = \left[\frac{By'v}{xy'-x'y}-(H_0+d)\right]\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1} +$$

$$+ d\sqrt{n_3^2+(n_3^2-1)\,tg^2\varphi_1}\left(1-\frac{1}{\sqrt{n_2^2+(n_2^2-1)\,tg^2\varphi_1}}\right)$$

б) Приближенные формулы.

Если φ_1 и φ_2 очень малы $tg^2\varphi_1 \approx tg^2\varphi_2 \ll 1$,

то $\Delta Z \to 0 \qquad y' = y$

$$(n^2-1)\,tg^2\varphi_1 \ll n^2 \qquad (7)$$

формулы (Ш) упрощаются в вид такой

$$X = \frac{B}{x-x'}\,x \qquad Y = \frac{B}{x-x'}\,y \qquad (IV)$$

$$h = n_3\left[\frac{Bv}{x-x'} - (H_0+d)\right] + n_3 d\left(1-\frac{1}{r_2}\right)$$

(4) Определение направления прямой и угла между двумя прямыми и определение компланарности.

а) Направление прямой и угол между прямыми.

Получив координаты любых двух точек на одной прямой (a, b) можем определить направление этой прямой по следующим формулам:

$$\cos\alpha = \frac{X_{ab}}{L_{ab}} \qquad \cos\beta = \frac{Y_{ab}}{L_{ab}} \qquad \cos\gamma = \frac{Z_{ab}}{L_{ab}} = \frac{h_{ab}}{L_{ab}} \qquad (V)$$

$$X_{ab} \equiv L_X \qquad Y_{ab} \equiv L_y \qquad Z_{ab} \equiv L_z$$

L_{ab} - расстояние между a и b.

Если известно направление двух прямых, то угол между ними будет

$$\cos\theta = \cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' \qquad (8)$$

б) Контроль компланарности.

Если три прямых I. 2. 3 лежат на одной плоскости, то должно удовлетворяться следующее:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cos\alpha_3 \\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cos\beta_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{vmatrix} = 0 \qquad (9)$$

Из-за ошибок измерения и аппаратуры, даже при компланарности, это условие не соблюдается. Поэтому более подходящим методом является метод сравнения углов между горизонтальной плоскостью H и плоскостями, на которых лежат две прямые из трех, скажем " I.2" , "2,3" (или "3.I"). Если разница этих углов $\Delta\varphi$ не больше ошибки, определяемой измерением и аппаратурой, то можно считать, что I.2.3 компланарны.

В случае нашего эксперимента контроль компланарности требуется для того, чтобы выяснить, есть ли в составе вторичных частиц реакции невидимые частицы.

Если падающая плоскость совпадает с горизонтальной (X, Y), то угол между ней и плоскостью рассеяния (a, o, b) определится следующей простой формулой

$$\sin\varphi = \frac{Z_{ob}}{L_{ob}\sin\theta} = \frac{h_{ob}}{L_{ob}\sin\theta} \qquad (10)$$

где θ - угол между ao и ob

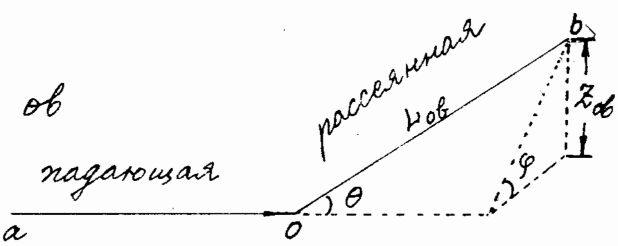


рис. 5.

Если падающая плоскость наклоняется на угол δ $\left(tg\,\delta = \frac{Z_{ao}}{Y_{ao}}\right)$, то вращаем координатную систему по оси X на угол δ , тогда φ определится следующей формулой

$$\sin\varphi = \frac{-Y_{ob}\sin\delta + Z_{ob}\cos\delta}{L_{ob}\sin\theta} \qquad (11)$$

Если $\delta \to 0$, то (11) упрощается, и получим (10)

При определении координат точек О,а,в s ..... в пропановой камере по координатам соответствующих точек на стереокадрах мы пользовались приближенными формулами (IУ).

Абсолютная ошибка для Х и У при этом около I мм, а для Z – 2 мм. П

При вычислении углов берется разность координат, поэтому ошибка мала (меньше ошибок измерений).

Углы θ и φ определялись по формулам:

$$\cos\theta = \frac{L_{ab}^2 - L_{ao}^2 - L_{ob}^2}{2L_{ao}L_{ob}}$$

$$\sin\varphi = \frac{-Y_{ob}\sin\delta + Z_{ob}\cos\delta}{L_{ob}\sin\theta},$$

Соответственно.

Полученная ~~точность~~ ошибка определения угла θ меньше 5 %, а угла $\varphi <$ IO %.

2. Определение углов рассеяния с помощью репроектора. ЛЯП[1]

На репроекторе непосредственно можно измерить θ_1', θ_2', φ_1', φ_2', α, L_1, L_2, но это ненастоящие значения. Поправка на пропан вводится по следующим формулами ($\alpha < 5^0$)

$$tg\,\varphi = n\,tg\,\varphi' \qquad (12)$$

$$\sin\theta = \sqrt{\frac{1+(n^2-1)\sin^2\varphi'}{cosec^2\theta'+(n^2-)\sin^2\varphi'}} \qquad (13)$$

φ и θ - истинные углы (рис.6)

n - показатель преломления пропана, мы взяли n =I.233

Формула для φ и θ получена следующим образом предположения:

направление π^+ совпадает с направлением пучка π^+.

Значения со штрихом относится к воздуху, без штриха к пропану.

h_1 - глубина под поверхностью стекла.

$h_i = n h_i'$ пусть $\Delta h' = h_2' - h_1' = \overline{AB}$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \overline{AC} = n(h_2' - h_1') = n\Delta h' = n\overline{AB}$$

$$tg\,\varphi' = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}} \qquad tg\,\varphi = \frac{\overline{AC}}{\overline{AC}} = \frac{n\overline{AB}}{\overline{AO}} = n\,tg\,\varphi'$$

$$\sin\varphi' = \frac{\overline{AB}}{\overline{OB}} \qquad \overline{OB} = L'\sin\theta'$$

$$\Delta h' \equiv \overline{AB} = L'\sin\varphi'\sin\theta'$$

в $\Delta\, CDO$ $\quad \sin\theta = \frac{\overline{OC}}{\overline{CD}} \qquad \overline{OC} = \sqrt{(\overline{AC})^2+(\overline{AO})^2} = \sqrt{(\overline{AC})^2+(\overline{BO})^2-(\overline{AB})^2}$

$$\overline{OC} = \sqrt{L'^2\sin^2\theta' + L'^2\sin^2\varphi'\sin^2\theta'(n^2-1)}$$

$$\overline{CD} = \sqrt{(\overline{OD})^2+(\overline{OC})^2} = \sqrt{L'^2\cos^2\theta' + L'^2\sin^2\theta' + L'^2(n^2-1)\sin^2\varphi'\sin^2\theta'}$$

$$= \sqrt{L'^2 + L'^2(n^2-1)\sin^2\varphi'\sin^2\theta'};$$

$$\sin\theta=\sqrt{\frac{\sin^2\theta'+(n^2-1)\sin^2\theta'\sin^2\varphi'}{1+(n^2-1)\sin^2\theta'\sin^2\varphi'}}=\sqrt{\frac{1+(n^2-1)\sin^2\varphi'}{\operatorname{cosec}^2\theta'+(n^2-1)\sin^2\varphi'}}$$

Репроектор позволяет определять угол θ с точностью I0$'$, а угол φ с точностью ~~20'~~ 1° .

В среднем время, затрачиваемое на определение одного угла θ и соответствующего угла φ на репроекторе Лаборатории ядерных проблем I) в два раза меньше, чем на микроскопе УИМ-2I.

Значение угла θ , определенное с помощью репроектора, совпадает со значением того же угла, определенного с помощью микроскопа, в пределах менее одного градуса.

Ш. Статистика результатов.

Составляется таблица, в которой обозначено число тех или других реакций. Зная полное число π^+, вошедших в камеру, и число реакций, можно для каждой из них определить сечение.

$$\sigma=\frac{1}{n\ell}$$

n – число атомов в одном см^3

для пропана $n_c = 1.77\cdot 10^{22}/\text{см}^3$

$d = 0,43$ г/см^3 $n_p = 8/3\cdot 1\cdot 77\cdot 10^{22}/\text{см}^3$

$$\ell=\frac{N\ell}{A}$$

N – число π^+

A – число реакций

ℓ – длина камеры (в данном случае δ)

Строится распределение по φ и θ СЦМ.

В заключение автор приносит благодарность сотрудникам Лаборатории ядерных проблем Р.М.Суляеву, А.И.Филиппову, Ю.А.Щербакову за любезно предоставленные в их распоряжение стереофотоаппараты, стереоскоп, и репроектор, а также Т.А.Харьковой, выполнившей большую часть измерений.

I) А.Т.Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Щербаков (ЛЯП ОИЯИ) "Репроекционная техника измерений, используемая при обработке стереофотографий" - сообщение на совещании по камерам Вильсона, диффузионной и пузырьковой камерам.

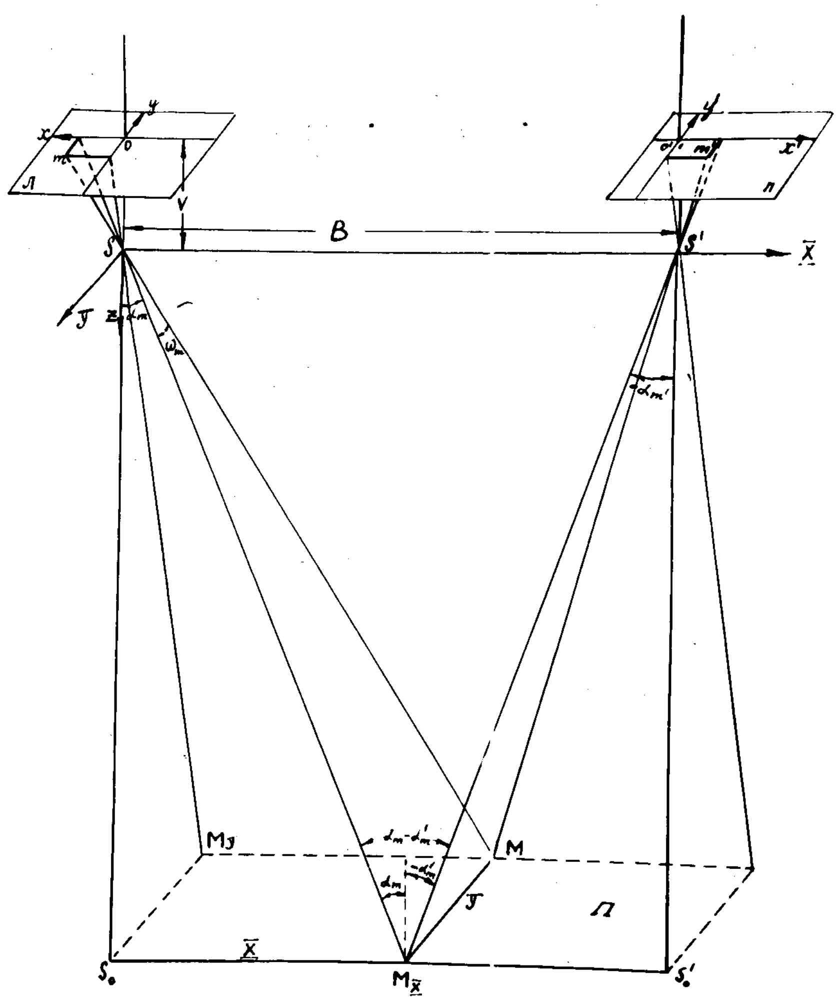


Рис. 1

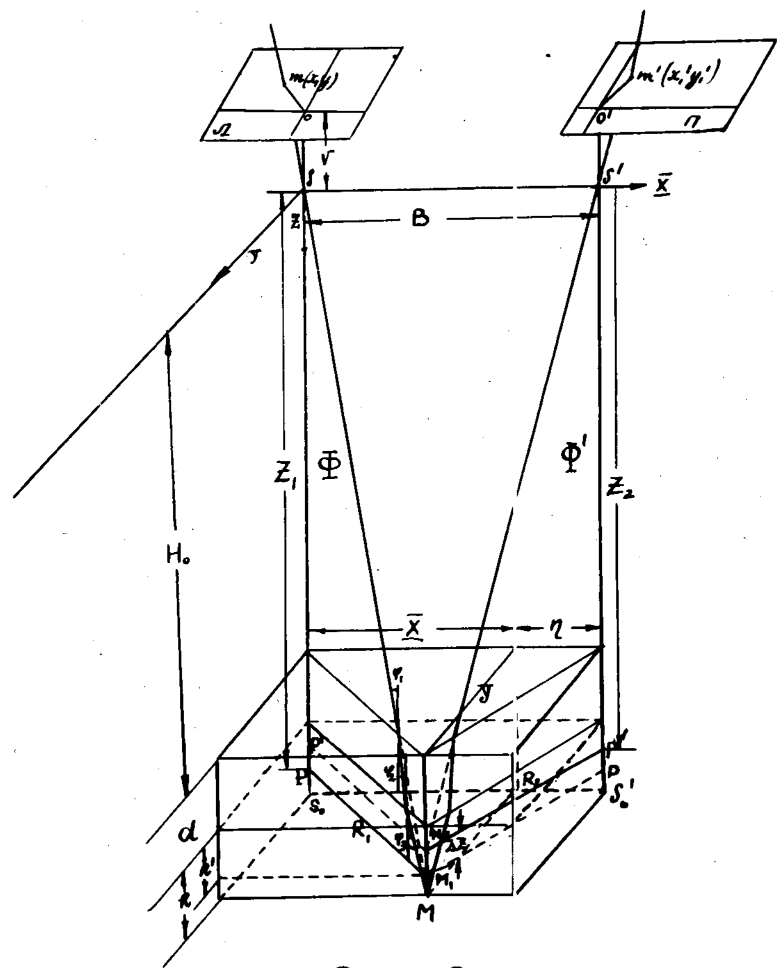


Рис. 2

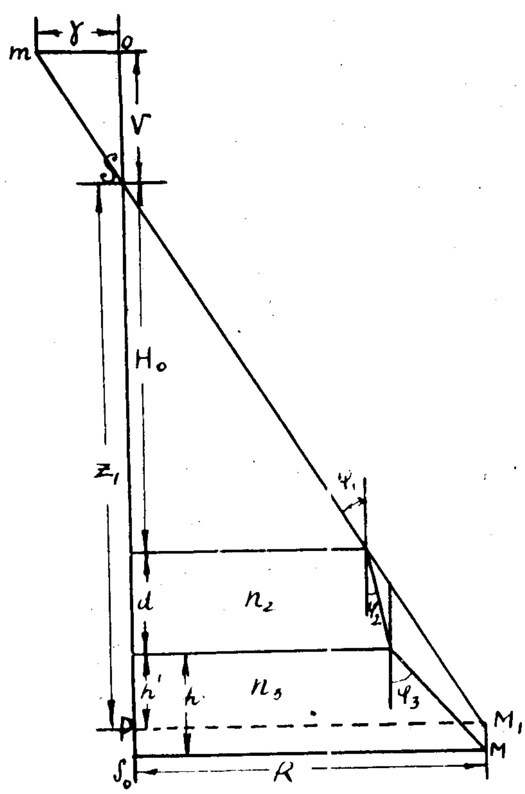


Рис. 4

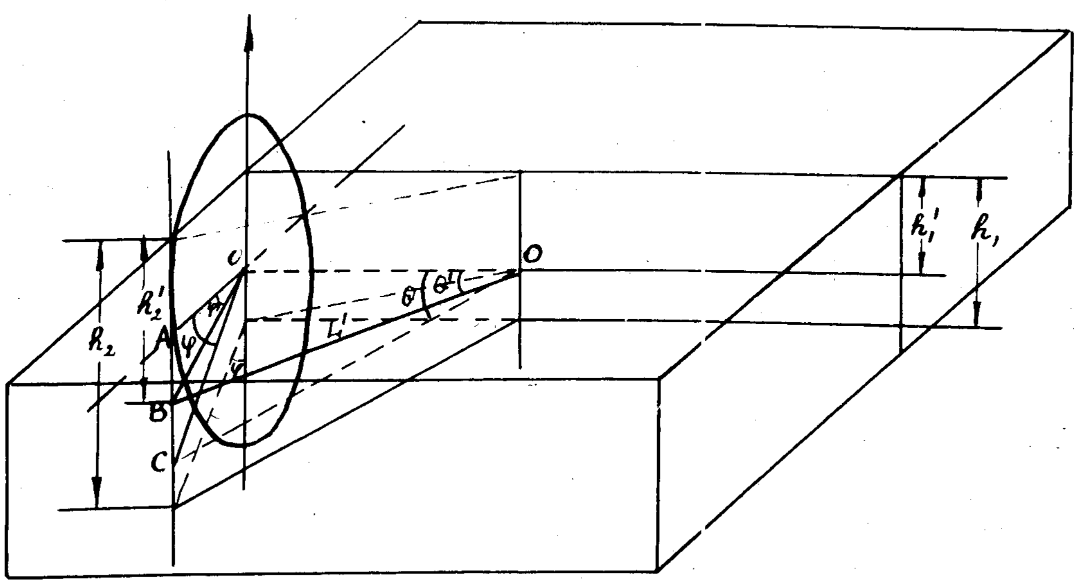


Рис. 6