

*ЗР*  
*15-90*  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P - 403

Ю.А. Будагов, С. Виктор, В.П. Желепов, П.Ф. Ермолов,  
В.И. Москалев

ПАРЫ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ  
ПРИ РАСПАДЕ НЕЙТРАЛЬНОГО П-МЕЗОНА  
*ЖЭТФ, 1960, т38, в.4, с.1047-1052.*

Дубна 1959 год

P-403

Ю.А. Будагов, С. Виктор, В.П. Джелелов, П.Ф. Ермолов,  
В.И. Москалев

ПАРЫ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ  
ПРИ РАСПАДЕ НЕЙТРАЛЬНОГО П-МЕЗОНА<sup>x/</sup>

462/10

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

---

<sup>x/</sup> Работа доложена на У1 сессии Ученого Совета ОИЯИ /май 1959г./  
и на конференции по физике частиц высоких энергий в г.Киеве  
/июль 1959г./.

### А н н о т а ц и я

В водородной диффузионной камере, помещенной в магнитное поле и работающей в пучках отрицательных  $\pi^-$ -мезонов с энергиями 128 и 162 Мэв, зарегистрировано 27 случаев зарядово-обменного рассеяния с последующим распадом  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ . Найдена вероятность этого распада по отношению к обычному распаду  $2\rho_0 = \frac{W(\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma)}{W(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)} = 0,0117 \pm 0,0015$ . Результаты измерений импульсов и углов электронно-позитронных пар сведены в таблицу. Экспериментально найденные энергетические характеристики пар и угловые распределения находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими.

## В в е д е н и е

Впервые распад нейтрального  $\pi^0$ -мезона на электронно-позитронную пару и  $\gamma$ -квант



был теоретически рассмотрен Далитцем<sup>/1/</sup>. Этот альтернативный способ распада можно интерпретировать как внутреннюю конверсию одного из  $\gamma$ -квантов в электромагнитном поле другого. Далитцем, а позднее Кроллом и Вада<sup>/2/</sup>, на основе квантовой электродинамики были рассчитаны коэффициент внутренней конверсии и основные энергетические и угловые характеристики этого распада. Результаты этих вычислений слабо зависят от вида мезонной теории. Недавно Керимов и др.<sup>/3/</sup> рассчитали вероятность распада /1/ с учетом спиновых состояний /продольных поляризаций/ электронно-позитронной пары и  $\gamma$ -кванта. Экспериментально распад  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$  изучался в нескольких работах<sup>/4,5,6,7/</sup>, однако результаты их имеют сравнительно невысокую точность. Поэтому представлялось важным дальнейшее изучение распада /1/ с целью уточнения этих результатов.

В настоящей работе приводятся данные, полученные на основе изучения 27 случаев распада  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ , найденных в диффузионной камере, работавшей в пучках  $\pi^-$ -мезонов с энергиями 128 и 162 Мэв. Данные предварительной обработки 14 таких распадов были опубликованы нами ранее<sup>/8/</sup>.

Камера была наполнена водородом до давления 25 атм. и помещена в постоянное магнитное поле 9000 гс. Экспериментальная установка, условия работы в пучках  $\pi^-$ -мезонов и метод обработки более подробно описаны в работах<sup>/9,11/</sup>.  $\pi^0$ -мезоны возникали в результате зарядово-обменного рассеяния. Указанные 27 случаев распада /1/ были найдены при двукратном просмотре около 90 000 стереофотографий и идентифицировались по окончаниям треков  $\pi^-$ -мезонов в газе камеры, сопровождавшимся вылетом электронно-позитронной пары. Фотографии двух таких случаев приведены на рис. 1. Следует отметить, что все найденные пары были отнесены к парам внутренней конверсии, так как вследствие малой тормозной способности газообразного водорода вероятность появления в настоящем эксперименте одной пары, образованной  $\gamma$ -квантом от рас-

пада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ , на расстоянии меньше 1 мм от точки распада /внешняя конверсия/ составляет  $7 \cdot 10^{-5}$ .

Определение коэффициента внутренней конверсии

Относительная вероятность распада  $\pi^0$ -мезона по схеме /1/ определяется выражением<sup>/1,2/</sup>:

$$2\rho_0 = \frac{W(\pi^0 \rightarrow e^+e^- + \gamma)}{W(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)} = \frac{2\alpha}{3\beta} \left( \ln \frac{m_{\pi^0}^2}{m_e^2} - \frac{7}{2} \right) = 0,0118, \quad /2/$$

где  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры.

Результаты экспериментального определения коэффициента  $2\rho_0$  собраны в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

$2\rho_0$	Автор
$0,020 \pm 0,006$	Даниэль и др. <sup>/4/</sup>
$0,013 \pm 0,004$	Ананд <sup>/5/</sup>
$0,0145^{+0,0080}_{-0,0045}$	Линденфельд и др. <sup>/6/</sup>
$0,0106 \pm 0,0017$	Сарджент и др. <sup>/7/</sup>
$0,0117 \pm 0,0015$	Эта работа.

Даниэлем и др.<sup>/4/</sup> и Анандом<sup>/5/</sup> данные о  $2\rho_0$  были получены в результате просмотра облученных в космических лучах ядерных фотоэмульсий, когда число образованных в звездах  $\pi^0$ -мезонов не могло быть определено с достаточной точностью. Величина  $2\rho_0$ , найденная в работе Линденфельда и др.<sup>/6/</sup>, выполненной при помощи счетчиков, также имеет сравнительно малую точность. Сарджентом и др.<sup>/7/</sup> коэффициент внутренней конверсии был получен при работе с медленными  $\pi^-$ -мезонами, которые останавливались в водородной диффузионной камере. Основная трудность в определении величины  $2\rho_0$  этим методом заключалась в идентификации пар от распада  $\pi^0$ -мезона и пар внутрен-

ней конверсии от реакции  $\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$ . Кроме того, величина  $2\rho_0$  была получена в этой работе при условии, что отношение Панофского  $P$  равно 0,94. Если же для  $P$  принять величину 1,5-1,8, найденную в более поздних работах<sup>/10/</sup>, то значение коэффициента  $2\rho_0$ , рассчитанное по данным работы Сарджента и др., не будет согласовываться с теоретическим значением этого коэффициента и другими экспериментальными данными.

Метод определения внутренней конверсии, примененной в настоящей работе, основан на использовании быстрых  $\pi^-$ -мезонов, когда число пар от внутренней конверсии  $\gamma$ -квантов в реакции  $\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$  составляет лишь 1% от числа распадов  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ . Поэтому при вычислении коэффициента  $2\rho_0$  вкладом от этих пар можно пренебречь. Кроме того число  $\pi^0$ -мезонов, распавшихся обычным путем /на два  $\gamma$ -кванта/ может быть точно определено по количеству случаев упругого рассеяния и известному отношению сечений упругого и зарядово-обменного рассеяния. Непосредственный подсчет числа случаев перезарядки в диффузионной камере крайне затруднителен из-за локальных нечувствительных областей и краевых эффектов.

Коэффициент  $2\rho_0$  определялся по формуле

$$2\rho_0 = \frac{N_{\text{пар}}}{N_{\text{упр}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{упр}}}{\sigma_{\text{полн}} - \sigma_{\text{упр}}} \cdot \frac{\eta_{\text{упр}}}{\eta_{\text{пар}}}, \quad /3/$$

где  $N_{\text{пар}}$  и  $N_{\text{упр}}$  - числа случаев распада  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$  и упругого рассеяния, соответственно;  $\sigma_{\text{полн}}$  - полное сечение  $\pi^- - p$  - взаимодействия;  $\sigma_{\text{упр}}$  - полное сечение упругого  $\pi^- - p$  - рассеяния;  $\eta_{\text{пар}}$  и  $\eta_{\text{упр}}$  - эффективности наблюдения случаев распада  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$  и случаев упругого рассеяния.

К парам от распада  $\pi^0$ -мезонов были применены те же критерии отбора, которые использовались в работе<sup>/11/</sup> для случаев упругого  $\pi^- - p$  - рассеяния. Этим критериям удовлетворяли 26 пар и 1285 случаев упругого рассеяния. В число случаев упругого рассеяния была внесена поправка, связанная с кулоновским рассеянием и интерференцией кулоновского и ядерного рассеяния. В качестве  $\sigma_{\text{полн}}$  и  $\sigma_{\text{упр}}$ , входящих в выражение /3/, были использованы средние значения полных сечений  $\pi^- - p$  - взаимодействия<sup>/12/</sup> и полных сечений упругого рассеяния<sup>/11/</sup>, взвешенных по числу случаев упругого рассеяния

при энергиях 128 и 162 Мэв.

Эффективность наблюдения случаев упругого  $\pi^-p$ -рассеяния определяется пропусками случаев, следы которых расположены в плоскости близкой к вертикальной, и равна 80%; эффективность для наблюдения пар принята такой же. С учетом приведенных выше замечаний, вычисленная по формуле /3/ относительная вероятность распада  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ , равна  $2\rho_0 = 0,0117 \pm 0,0015$ , а коэффициент внутренней конверсии фотонов при распаде  $\pi^0$ -мезона  $\rho_0 = 0,0059 \pm 0,0008$ , где указанные ошибки являются статистическими вероятными ошибками. Полученное значение  $2\rho_0$  хорошо согласуется с теоретическим /2/.

Угловые и энергетические характеристики пар.

Результаты обработки 27 электронно-позитронных пар, найденных в нашей работе, приведены в таблице 2. В трех первых столбцах таблицы приведены полные энергии электрона и позитрона и полная энергия пары. В следующих столбцах приведены соответственно углы корреляции  $\alpha_{(м.с.)}$  /т.е. углы между позитроном и электроном/, а также углы между направлением суммарного импульса пары и направлением движения  $\pi^-$ -мезона  $\theta_{(м.с.)}$  и  $\theta$  /с.д.м./. Точность измерения импульсов /энергии/ составляла  $\sim 10\%$ , точность измерения углов  $1^\circ$ . В случае очень коротких треков в таблице приведены только нижние пределы для соответствующих энергий. Случаи № 1 и № 9 найдены на пленках, экспонированных без магнитного поля.

Представляет интерес сравнить полученные опытные данные с результатами расчетов Далитца и Кролла и Вада.

1. Экспериментальное распределение пар  $n(\alpha)$  по углам корреляции представлено на рис. 2. На том же рисунке приведен полученный Далитцем /13/ теоретический вид этого распределения в системе покоя  $\pi^0$ -мезона /сплошная кривая/. Для углов  $\alpha > 2^\circ$  это распределение имеет вид  $n(\alpha)d\alpha \sim \frac{d\alpha}{\alpha}$ . Так как учет скорости  $\pi^0$ -мезона привел бы лишь к незначительному смещению этого распределения в сторону меньших углов, то из рис. 2 видно, что полученное экспериментальное распределение не противоречит теоретическому.

В системе покоя  $\pi^0$ -мезона половина пар должна испускаться в пределах угла корреляции  $\alpha_{\frac{1}{2}} = 18,1^\circ /13/$ ; в настоящей работе для  $\alpha_{\frac{1}{2}}$  получено

Т а б л и ц а 2

№ пары	$E^-$	$E^+$	$E = E^- + E^+$	$\alpha$ /град./	$\theta$ /град./	$\theta^*$ /град./
	/МэВ/	/МэВ/	/МэВ/	/л.с./	/л.с./	/с.ц.м./
I	-	-	-	2,5	118	128
2	>192	46	>238	16	50	60
3	19	41	60	36	95	107
4	148	>74	>222	7	91	103
5	20	111	131	8	145	151
6	27	6	33	122	117	127
7	89	67	156	6	50	60
8	>14	>96	>110	5	100	111,5
9	-	-	-	2	110	121
10	75	105	180	53	140	147
11	39	>152	>191	3	99	111
12	10	24	34	38	86	98
13	166	20	186	28	65	75
14	22	27	49	46	118,5	128,5
15	33	40	73	25	76	88
16	25	>51	>76	20	101	112,5
17	7,3	52	59,3	5	119	129
18,	23	>122	>145	2	89	101
19	79	27	106	29	44	53
20	42	14	56	17,5	97	108
21	-	32	>32	25	90	102
22	16	187	203	13	92	104
23	45	47	92	32,5	62	73
24	>67	79	>146	5	91	103
25	21	65	86	74	93	105
26	39	29	68	10,5	54	64
27	63	41	104	8	141	148



значение  $16^\circ$ .

2. На рис. 3 в виде гистограммы представлено распределение пар по параметру

$$y = \frac{|\vec{p}_e^- - \vec{p}_e^+|}{|\vec{p}_e^- + \vec{p}_e^+|},$$

где  $\vec{p}_e^-$  и  $\vec{p}_e^+$  импульсы электрона и позитрона в лабораторной системе. Этот параметр характеризует деление энергии между частицами пары. Плавная кривая представляет теоретическое распределение пар по параметру  $y$  в системе покоя  $\pi^0$ -мезона, полученное в работе Кролла и Вада<sup>/2/</sup>. Величина  $y$  слабо зависит от скорости  $\pi^0$ -мезона. Распределение пар по параметру  $y$ , как видно из рис. 1, согласуется с теоретическим, и не наблюдается тенденции к делению энергии поровну между частицами пары, которая проявилась в работе Сарджента и др.<sup>/7/</sup> и особенно резко в работе Ананда<sup>/5/</sup>.

3. Важной энергетической характеристикой пар от распада /1/ является распределение их по параметру  $X = (E^- + E^+)^2 - (\vec{p}_e^- + \vec{p}_e^+)^2$ , где  $E^-, E^+, \vec{p}_e^-$  и  $\vec{p}_e^+$  полные энергии и импульсы электронов и позитронов. Параметр  $X$  является инвариантом, и его можно интерпретировать как степень виртуальности промежуточного фотона, превращающегося в пару или как квадрат "массы покоя" виртуального фотона. Далитцем<sup>/1/</sup> в предположении, что линейный размер токов, образующих электромагнитное излучение при распаде  $\pi^0$ -мезона, мал по сравнению с величиной  $2\frac{\hbar}{m_\pi c}$ , получено следующее распределение:

$$f(X) = \frac{X + 2m_e^2}{X^2} \left( \frac{X - 4m_e^2}{X} \right)^{1/2} (m_\pi^2 - X)^3. \quad /3/$$

Это распределение представлено на рис. 4 сплошной кривой; там же в виде гистограммы приведено распределение пар по параметру  $X$ , полученное на основе результатов настоящей работы. Можно видеть, что большинство пар имеет малые значения  $X$ . Это свидетельствует о низкой степени виртуальности промежуточного фотона, т.е. характеристики пар внутренней конверсии при распаде  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$  должны быть близки к характеристикам пар, образованных реальными фотонами /внешняя конверсия/. Ввиду этого угловое распределение пар должно практически совпадать с угловым распределением  $\gamma$ -кван-

тов от распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ . На рис. 5 в виде гистограммы представлено полученное угловое распределение пар по углу  $\theta^*$  в системе центра инерции  $\pi^-p$ . Оно не противоречит угловому распределению  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов, получающихся в реакции  $\pi^-p \rightarrow \pi^0+n$  при энергии  $\pi^-$ -мезонов 150 Мэв<sup>/14/</sup>, изображенному на том же рисунке в виде кривой  $\frac{dG}{d\Omega} \sin\theta^*$  /в произвольном масштабе/.

Что касается полных энергий пар  $E = E^- + E^+$ , то они, как и следует ожидать, заключены для всех пар в интервале 17-270 Мэв, соответствующем границам рассчитанного энергетического спектра  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов, получающихся в процессе перезарядки.

В заключение следует отметить, что при просмотре фотографий был обнаружен один случай распада  $\pi^0$ -мезона по схеме  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+ /9/$ . Кинематика ни одной из 27 пар не удовлетворяет распаду  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+$ , относительная вероятность которого по оценкам Дрелла<sup>/15/</sup> порядка  $10^{-7}$ .

Авторы благодарны профессору Р. Далитцу, сообщившему нам некоторые результаты неопубликованных теоретических расчетов.

Рукопись поступила в издательский отдел 8 сентября 1959 года.

Л и т е р а т у р а

1. R.H. Dalitz, Proc.Phys.Soc. A, 64, 667 (1951)
2. N.M. Kroll, W. Wada, Phys.Rev. 98, 1355 (1955)
3. Б.К. Керимов, А.И. Мухтаров, С.А. Гаджиев. ЖЭТФ, 37, 575 /1959/.
4. R.R. Daniel, J.H. Davies, J.H. Mulvey, D.H. Perkins, Phil. Mag. 43, 753 (1952)
5. B.M. Anand, Proc. Roy. Soc. 220A, 183 (1953)
6. P. Lindenfeld; A. Sach, J. Steinberger, Phys.Rev. 89, 531 (1953)
7. C. P. Sargent, R. Cornelius, M. Rinehart, L. Lederman, K. Rogers , Phys. Rev. 98 , 1349//1955/ .
8. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев. ЖЭТФ, 35, 1575 /1958/.
9. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 36, 1080 /1959/.
10. J. Fischer, R. March, L. Marshall, Phys.Rev. 109, 533 (1958); E.L. Koller, A.M. Sachs., Bull.Am.Phys.Soc. 4, 24(1959)
11. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев. Материалы Киевской конференции по физике высоких энергий /июль 1959/ доклад Б.М. Понтекорво; ЖЭТФ /в печати/.
12. Н.П. Клепиков, В.А. Мещеряков, С.Н. Соколов. Материалы Киевской конференции по физике высоких энергий /июль 1959/.
13. R.H. Dalitz /частное сообщение/.
14. J. Ashkin, J.P. Blaser, F. Feiner, M.O. Stern, Phys.Rev. 101, 1149 (1956)
15. S.D. Drell, Nuovo Cimento, 11, 693 /1959/.

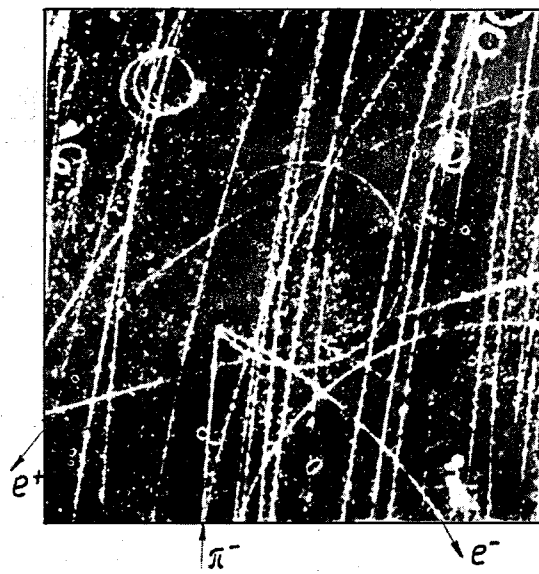
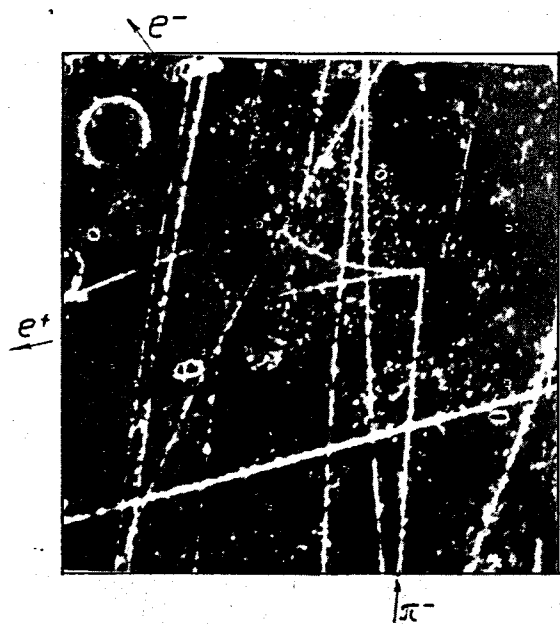


Рис. 1. Фотографии случаев  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  с последующим распадом  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ , полученные в водородной диффузионной камере;  
 а - пара № 3, б - пара № 6.

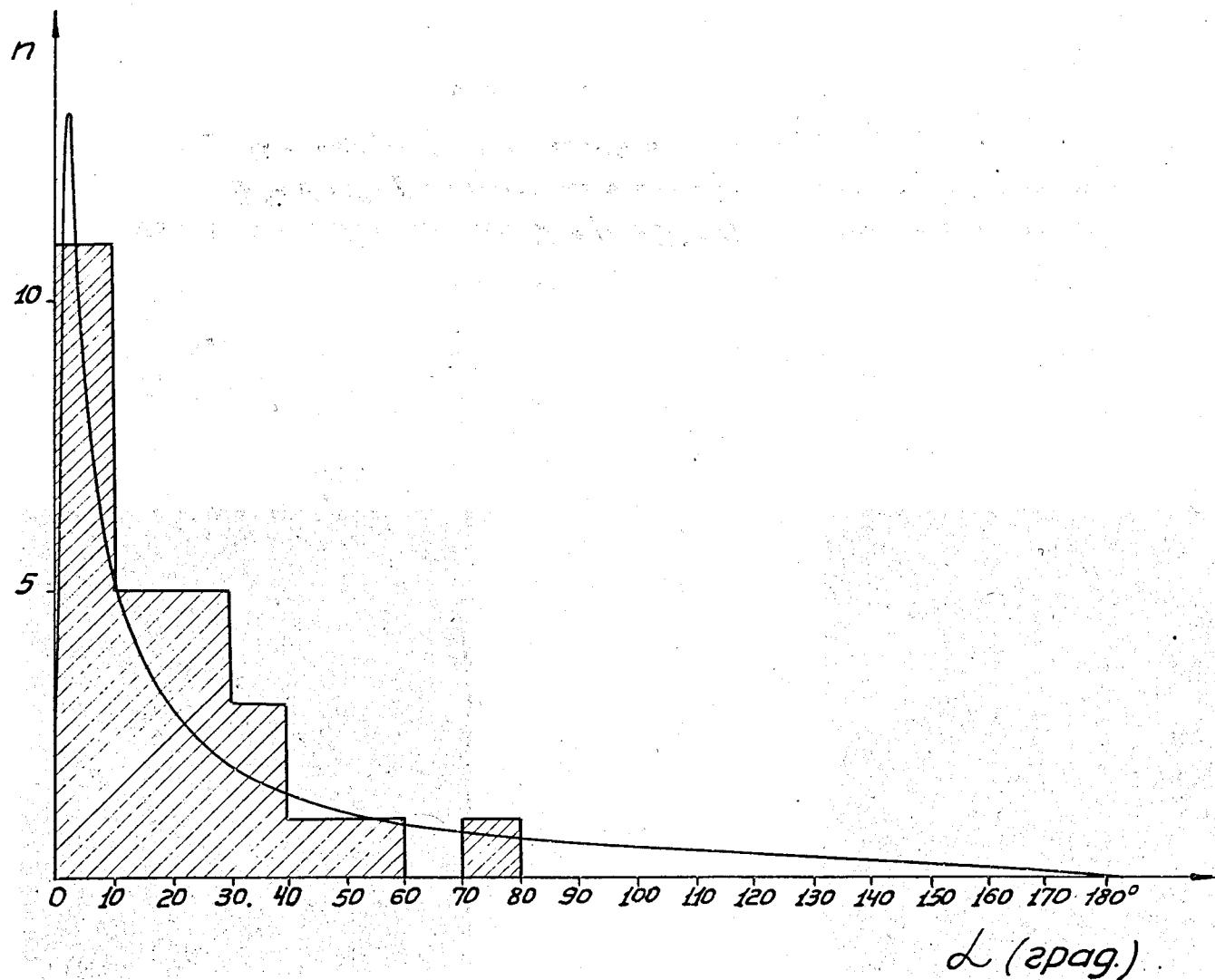


Рис. 2. Распределение пар от распада  $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$  по углам корреляции  $\alpha$  (л.с.). Сплошной кривой представлено теоретическое распределение в системе покоя  $\pi^0$ -мезона, полученное Далитцем<sup>[13]</sup>.

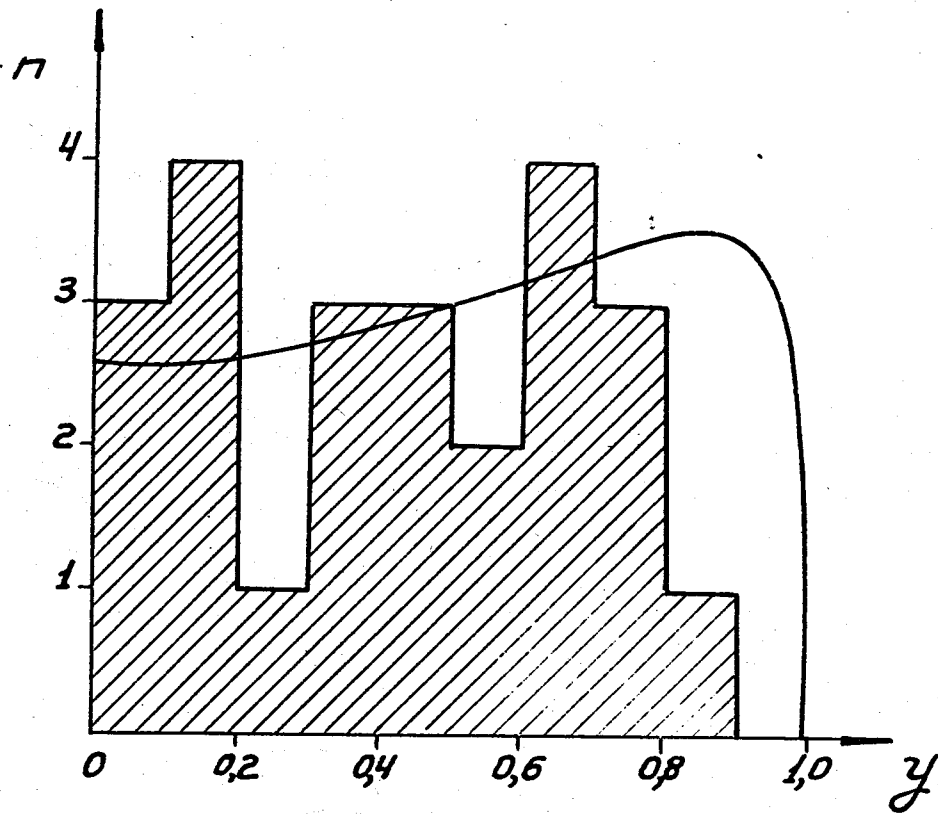


Рис. 3. Распределение пар по параметру  $y = |\vec{P}_e - \vec{P}_{e+1}| / |\vec{P}_e + \vec{P}_{e+1}|$   
 Сплошная кривая - теоретическое распределение<sup>121</sup>.

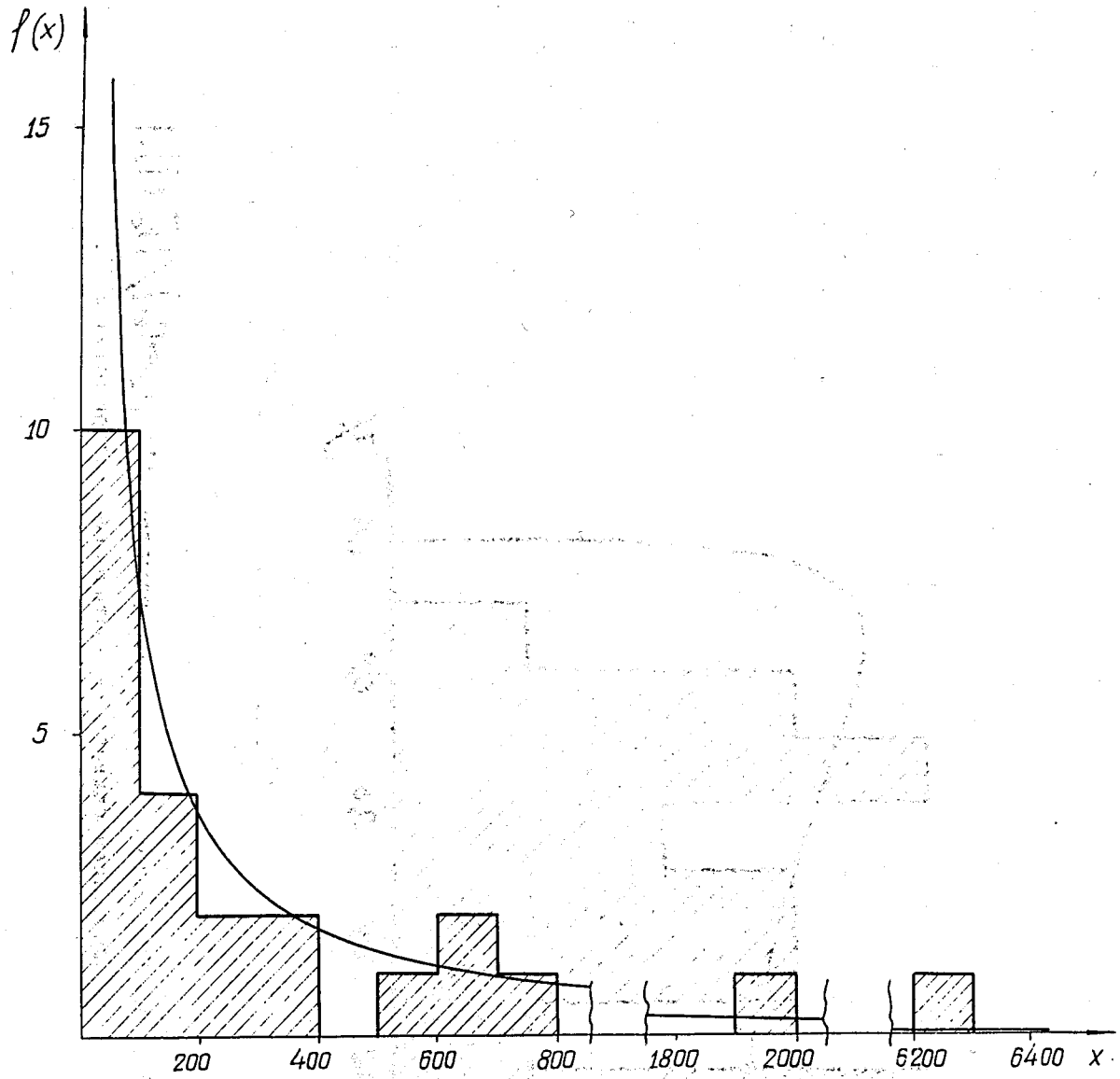


Рис. 4. Распределение пар по параметру  $\chi = (E^- + E^+)^2 - (\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+})^2$   
Сплошная кривая - теоретическое распределение [1,2].

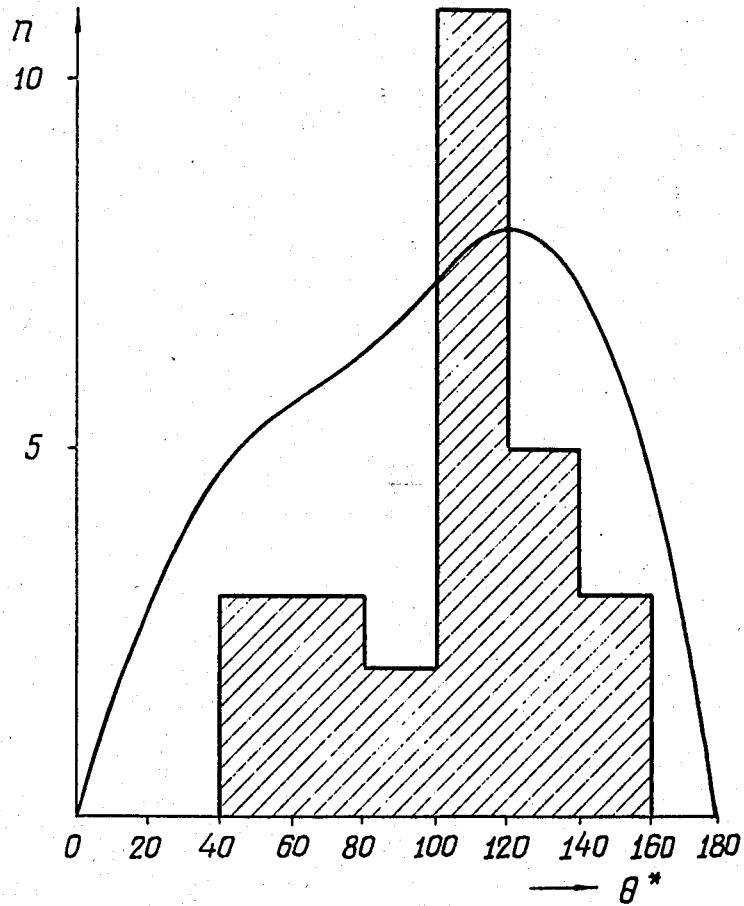


Рис. 5. Угловое распределение пар относительно направления  $\pi^-$ -мезонов в системе центра инерции  $\pi^-p$ . Сплошная кривая - угловое распределение  $\frac{dG}{d\Omega} \cdot \sin\theta^*$  /в произвольном масштабе/  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^-$ -мезонов, образующихся в реакции  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  при энергии  $\pi^-$ -мезонов 150 Мэв<sup>[14]</sup>.