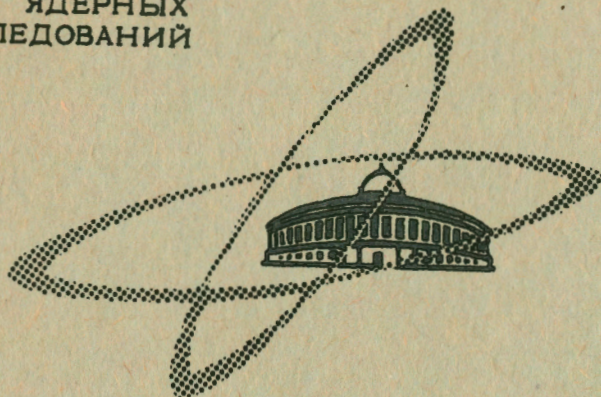


ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Экз. чит. зала



P1 - 4023

Я.Бэм, В.Г.Гришин, М.М.Муминов, В.Н.Стрельцов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ $(e^+ e^-)$ -ПАР
ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЯМИ 1,25-4 ГЭВ

1968

P1 - 4023

Я.Бэм, В.Г.Гришин, М.М.Муминов, В.Н.Стрельцов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ($e^+ e^-$)-ПАР
ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЯМИ 1,25-4 ГЭВ

Направлено в "Ядерную физику"

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

§1. Введение

Процесс образования электрон-позитронных пар заряженными частицами изучался в ряде теоретических работ ^{/1-8/}. Впервые сечение процесса

$$e^{-} + Z \rightarrow e^{-} + e^{+} + e^{-} + Z \quad (1)$$

было вычислено Баба в приближении Вайцзекера-Вильямса ^{/1/}. Более детально реакция (1) была рассмотрена в ^{/3/}. Процесс образования $(e^{+}e^{-})$ -пар электронами в поле атомных электронов не вычислялся.

Реакция (1) исследовалась экспериментально в нескольких десятках работ (обзор дан в ^{/9/}). Почти всегда результаты опытов сравнивались с теорией Баба ^{/1/}. Основной экспериментальной трудностью при определении сечения (1) является выделение фоновых событий, возникших в результате конверсии тормозных γ -квантов в веществе (псевдотриденты):

$$e^{-} + Z \rightarrow e^{-} + \gamma + Z, \quad (2)$$

$$\gamma + Z' \rightarrow e^{-} + e^{+} + Z'. \quad (3)$$

Сечение тормозного излучения примерно в 100 раз больше сечения прямого образования (e^+e^-) -пар электронами. Имеется несколько экспериментов, выполненных с помощью электронной методики в области энергий электронов ниже 1 Гэв, результаты которых согласуются с теорией /10,11/.

В области энергий электронов $E_0 \geq 1$ Гэв существуют только данные, полученные с помощью методики ядерных эмульсий, облученных космическими лучами (например, /12/). Полученные значения сечений в 3-4 раза выше, чем предсказывает теория Баба /1/.

Авторы работы /13/ проанализировали методику измерений сечения реакции (1) в ядерных эмульсиях и пришли к заключению, что имеется расхождение между теорией и экспериментальными результатами. С другой стороны, в работе /14/ обращается внимание на то, что во всех этих работах статистика очень мала (60 событий типа (1), (2), (3)), уровень фона высок ($\approx 80\%$), и неточности в измерении энергии первичных электронов велики. В связи с этим экспериментальные результаты ставятся под сомнение.

Таким образом, в настоящее время процесс образования (e^+e^-) -пар электронами плохо изучен как экспериментально, так и теоретически. Поэтому представляет интерес дальнейшее исследование этого процесса.

§2. Методика эксперимента

Образование (e^+e^-) -пар электронами изучалось с помощью 24-литровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, помещенной в магнитное поле напряженностью 14,3 кгаусс. Камера облучалась пучком π^- -мезонов ($\approx 90\%$), μ^- -мезонов ($\approx 8\%$) и электронов ($\approx 2\%$) с $p_s = 4,00 \pm 0,06$ Гэв /15-17/.

Правила просмотра стереоснимков выбраны так, чтобы исключить фон событий, связанный с π^- -мезонами. Окончательно отбирались случаи, удовлетворяющие следующим требованиям:

1. Расстояние (e^+e^-) -пары от первичного следа на левом и правом стереокадрах должно быть меньше, чем 200 мк (ширина следа составляет ≈ 70 мк).

2. Энергия первичной частицы $E \geq 1250$ Мэв. В точке образования (e^+e^-) -пары нет излома на первичном треке ($\theta \leq 1^\circ$).

3. Энергия (e^+e^-) -пары $E_{\gamma} \geq 10$ Мэв и энергия электрона и позитрона E_+ и $E_- \geq 2$ Мэв.

4. Углы между осью (e^+e^-) -пары и первичным следом $\theta_{1,\gamma} < 5^\circ$.

Всего просмотрено около 25 тысяч кадров и отобрано 451 событие. Весь материал просмотрен дважды и эффективность двойного просмотра оказалась равной $\epsilon = 96\%$.

В 80% событий (e^+e^-) -пары были идентифицированы по ионизации, сбросу энергии, δ -электронам и по соотношению пробег-энергия /18/. Энергии частиц определялись с учетом ионизационных и радиационных потерь /19/. Ошибки в определении энергии e^+ и e^- составляют (10-20)%.

Основным фоновым процессом является тормозное излучение электронов, сопровождаемое конверсией γ -квантов в (e^+e^-) -пары вблизи первичного трека. При небольших длинах конверсии ($l \leq 9$ см) можно пренебречь угловым распределением тормозных γ -квантов ($\bar{\alpha} \approx \frac{mc^2}{E} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ рад.) /20/, многократным рассеянием электронов в пропане ($\sigma_s^2 \approx 10^{-7} \ell^3 \text{ см}^2$) /21/ и их энергетическими потерями. В этом приближении электрон после излучения γ -кванта движется по окружности с радиусом $R = K(E - E_{\gamma})$, где $K = 0,23$ см/Мэв для $H = 14,3$ кгаусс.

Расстояние между осью (e^+e^-)-пары и осью первичного следа обозначим через ξ . Положим $\xi > 0$, если вершина (e^+e^-)-пары лежит вне окружности (R) и $\xi < 0$, если она находится внутри (R). Учитывая сделанные выше приближения, получим

$$\xi = \frac{\rho^2}{2R}. \quad (4)$$

Очевидно, что для фоновых процессов (2), (3) величина ξ имеет широкое распределение ($\xi \geq 0$), в то время как для процесса (1) $\xi = 0$, если не рассматривать ошибок измерений. Сечения тормозного излучения электронов и фотообразования (e^+e^-)-пар в веществе хорошо известны [22-27]. Это обстоятельство позволяет количественно выделить процесс прямого образования (e^+e^-)-пар в области $\xi = 0$.

Была разработана специальная методика измерений осей одиночных следов и осей (e^+e^-)-пар в пузырьковых камерах [9]. Измерения проводились на микроскопе МБИ-9 с окулярным микрометром (15x6,3). Одно деление микрометра соответствует 1,83 мк на кадре. Увеличение оптической системы камеры равно $z = 10 \pm 0,4$. Для каждого отобранного события измерялась величина ξ на левом (ξ_L) и правом (ξ_P) стереокадрах. С помощью двух независимых измерений на разных участках следов частиц из (e^+e^-)-пары и первичного электрона определена ошибка $\sigma_\xi = (2,1 \pm 0,2)$ дел. Используемые длины участков следов соответствовали 2-5 пузырькам. Высокая точность определения величины связана с малым разбросом центров пузырьков вокруг истинной траектории частицы [28] и тем обстоятельством, что рост пузырьков в небольшом объеме камеры происходит при одних и тех же условиях (σ_ξ составляет $\approx \frac{1}{15}$ от ширины трека).

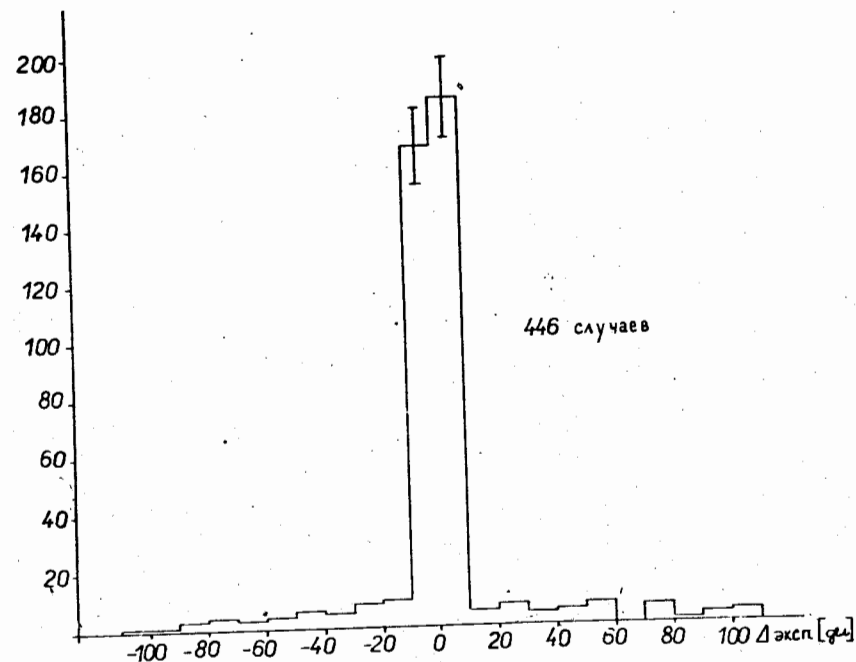


Рис.1. Гистограмма распределения отобранных событий по величине $\Delta = \xi_L - \xi_P$.

Гистограмма распределения отобранных событий по величине $\Delta = \xi_L - \xi_P$ показана на рис.1. В основном, события находятся в интервале $|\Delta| < 10$ дел (358 случаев) с $\bar{\Delta} = (0,2 \pm 0,2)$ дел. и $\sigma_\Delta = 3,1$ дел. С другой стороны, для фоновых событий (2), (3) величина Δ вычислена с учетом углового распределения тормозных γ -квантов и оптической системы камеры. Получено, что события с $\xi \leq 100$ дел. должны иметь $|\Delta| \leq 2,8$ дел. Поэтому случаи с $|\Delta| \geq 10$ дел. можно считать случайными наложениями (e^+e^-)-пар на треки первичных частиц, в основном, π^- -

мезонов. Такие (e^+e^-) -пары возникают в результате конверсии γ -квантов, образованных во входном окне камеры, которое составляет $\approx 0,3$ рад. единицы длины. При просмотре найдено 8(10) вторичных ядерных взаимодействий на первичном треке за вершиной (e^+e^-) -пары для событий с $|\Delta| > 10$ дел. и 3(40) взаимодействий для случаев с $|\Delta| \leq 10$ дел. (в скобках указано ожидаемое число ядерных взаимодействий, если первичными частицами являются π^- -мезоны).

Гистограммы распределения отобранных событий по величине ξ_{π} и ξ_{π} показаны на рис.2. Из рис. видно, что события с $|\Delta| \geq 10$ дел. имеют равномерное распределение по ξ (случаи с $|\Delta| \geq 10$ дел. на рис. заштрихованы).

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением событий с $\xi \leq 30$ дел., так как в области $\xi > 30$ дел. имеются случаи, когда γ -квант образовался во входном окне камеры, что значительно усложняет анализ экспериментального материала.

Анализ возможных фоновых событий показал, что примесь случайных наложений (e^+e^-) -пар, тормозного излучения π^- , μ^- -мезонов и неупругих ядерных взаимодействий π^- -мезонов составляет $\approx 3\%$ событий типа (1), (2), (3) с $|\Delta| \leq 10$ дел. и $\xi \leq 30$ дел.

Примесь вторичных электронов с $E \geq 1,25$ Гэв составляет $(1,1 \pm 0,6)\%$ числа электронов в пучке.

83. Результаты эксперимента

Распределения $\frac{dN}{d\xi}$ и $\frac{dN}{dE\gamma}$ для фоновых процессов (2), (3) вычислялись по формулам Бете-Гайтлера ^{/22/} с учетом экранирования ядра атомными электронами и поправок к борновскому приближению ^{/23/}. Сечения тормозного излучения электронов и фотообразования (e^+e^-) -пар

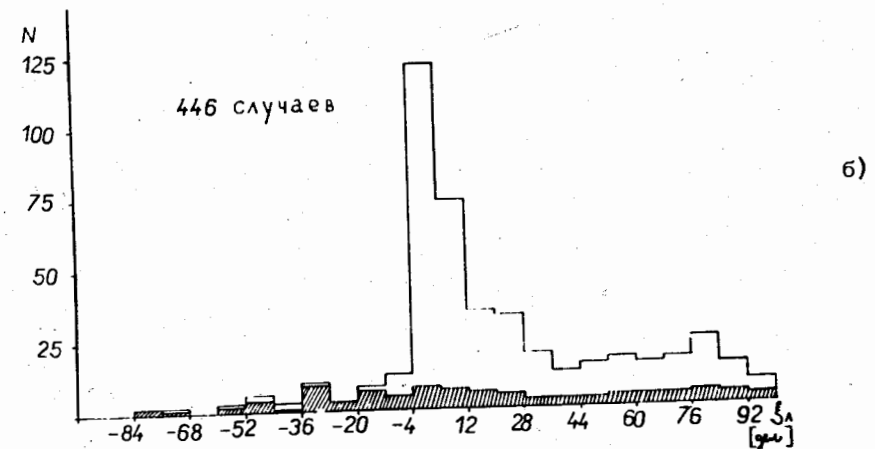
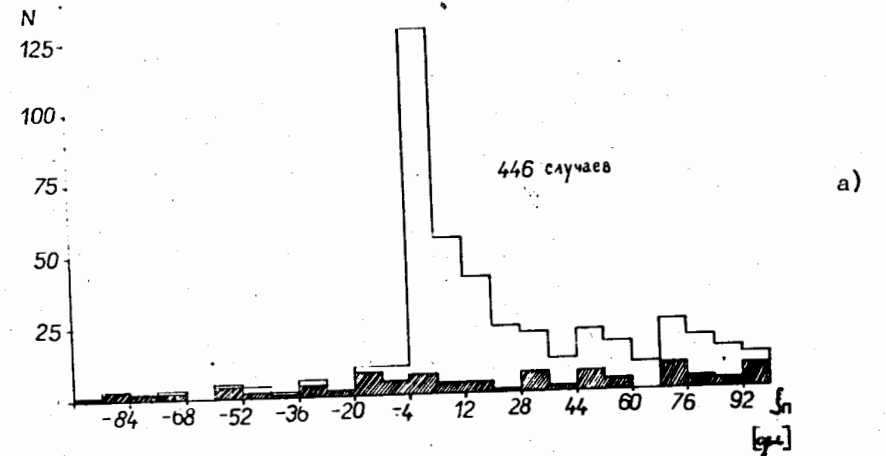


Рис.2. Гистограммы распределения отобранных событий по величине ξ_{π} а) и ξ_{π} б).

в поле атомных электронов были вычислены по теории Уиллера и Лэмба /24/ с введением поправок на разность распределений переданных импульсов электрону и протону /25/. Распределения $\frac{dN}{d\xi}$ и $\frac{dN}{dE_\gamma}$ усреднялись по теоретическому спектру энергий электронов в разных точках эффективного объема камеры /29/. Спектр энергий электронов вычислялся с учетом их энергетических потерь во входном окне камеры, мониторных счетчиках и т.д. (суммарная толщина вещества составляет $t \approx 0,4$ рад. единицы). Поправки, которые были введены в распределение $\frac{dN}{d\xi}$ и $\frac{dN}{dE_\gamma}$ в связи с различными приближениями и ошибкой измерения величины ξ , в области I ($|\xi| \leq 3\sigma_\xi = 6$ дел) составляют $\approx 3\%$, а в области II ($6 \leq \xi \leq 30$ дел) $\approx 1\%$. Все вычисления проводились на ЭВМ и суммарная ошибка в вычислении фоновых распределений $\frac{dN}{d\xi}$ и $\frac{dN}{dE_\gamma}$ обусловленная неточностью теоретических сечений (2), (3), не превышает 5%.

Рассчитанная кривая $\frac{dN}{d\xi}$ была нормирована на число экспериментально найденных событий в области II, где находятся только фоновые события. Гистограмма распределения отобранных случаев с $10 \leq E_\gamma \leq 810$ Мэв и $1,25 \leq E \leq 4$ Гэв приведена на рис.3. Пунктиром показана теоретическая гистограмма. Из рис.3 видно, что теоретическое распределение хорошо описывает экспериментальные данные в области II. С другой стороны, в области I ($|\xi| \leq 6$ дел.) над фоновой кривой имеется 64 события, которые связаны с процессом прямого образования (e^+e^- -пар.

Гистограмма распределения случаев из области II по энергиям (e^+e^-)-пар хорошо согласуется с вычисленным распределением $\frac{dN}{dE_\gamma}$ (см. рис.4).

Число первичных электронов определено из области II и составляет $N_0 = (1,8 \pm 0,3)\%$ всех частиц в пучке, что совпадает с данными других экспериментов: $N_0 = (2,3 \pm 0,4)\%$ /17/ и $N_0 = (2,2 \pm 0,6)\%$ /16/.

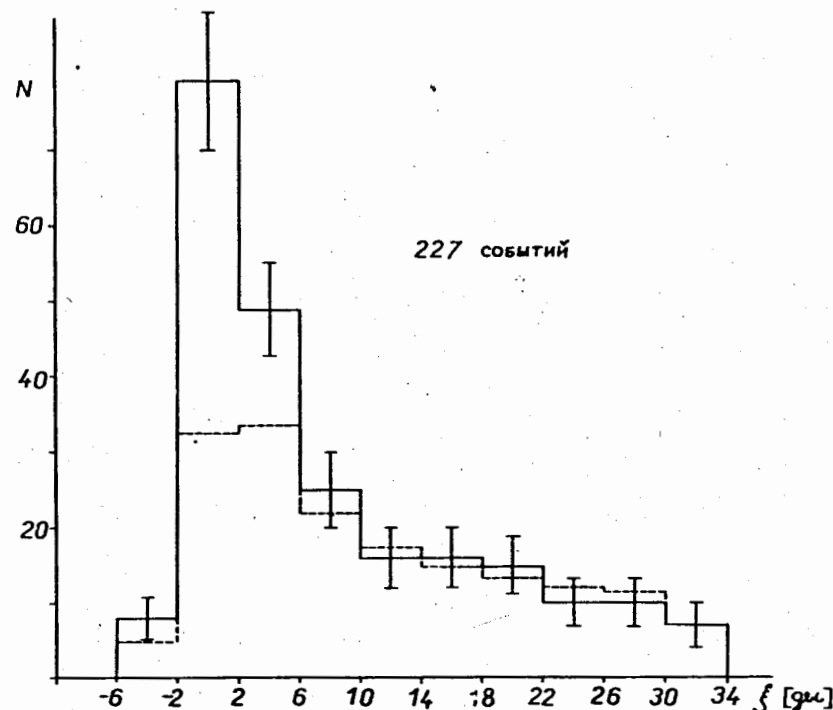


Рис.3. Гистограмма распределения отобранных событий по величине ξ . Пунктиром приведено теоретическое распределение $\frac{dN}{d\xi}$ для процессов (2), (3).

Величины N_0 для различных граничных значений E_γ и E согласуются между собой в рамках однократной ошибки.

Экспериментальный спектр энергий первичных электронов хорошо описывается теоретическим распределением (см. рис.5) /22,24,29/. В отобранных событиях имеются случаи, связанные с процессом:

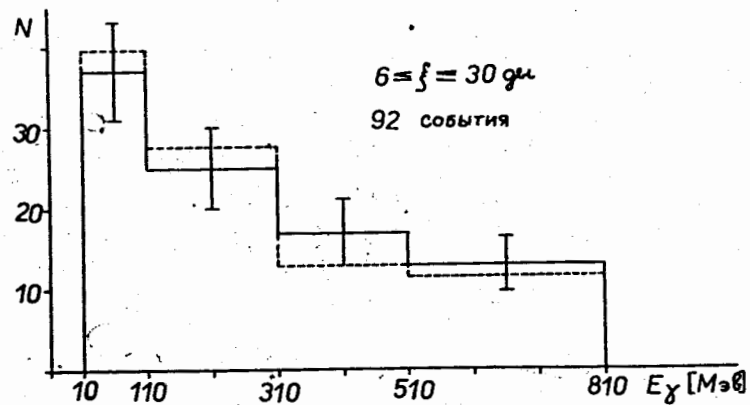
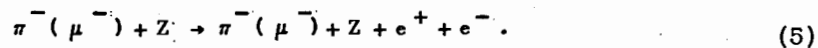


Рис.4. Гистограмма распределения событий из области $6 \leq \xi \leq 30$ дел по энергии (e^+e^-) -пар. Пунктиром показано теоретическое распределение $\frac{dN}{dE_\gamma}$ для процессов (2), (3).



В связи с этим нормировка теоретической гистограммы на рис.5. проведена для области $1,25 \leq E \leq 3,25$ Гэв.

Таким образом, согласие теоретических и экспериментальных распределений для фоновых процессов (2), (3) и N_0 с другими экспериментами служит дополнительной проверкой нашей методики.

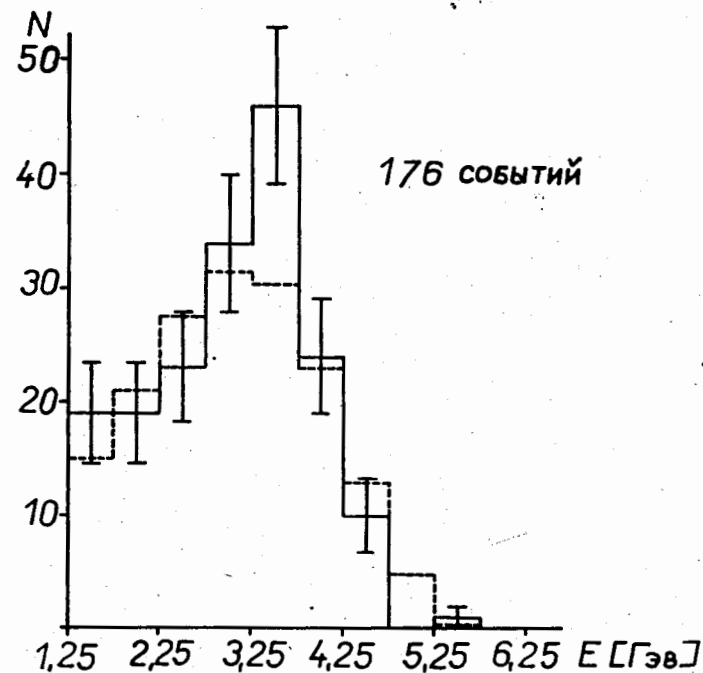


Рис.5. Гистограмма распределения отобранных событий по энергиям первичных электронов. Пунктиром показана теоретическая гистограмма, которая нормирована на число случаев из области $1,25 \leq E \leq 3,25$ Гэв.

Перейдем к определению сечения прямого образования (e^+e^-) -пар. Для сравнения экспериментальных результатов с теорией удобно использовать величину $\sigma_{\text{экс}}^T$, пропорциональную сумме сечений реакций (1) и (5). Значения $\sigma_{\text{экс}}^T$ для разных областей энергий $E_{\text{мин}} \leq E_\gamma \leq 810 \text{ Мэв}$ и $1,25 \leq E \leq E_{\text{max}}$ приведены в таблице 1.

Таблица I

		I, 25 ≤ E ≤ 4 ГэВ				I, 25 ≤ E ≤ 3,2 ГэВ			
E _{γ min}	/МэВ/	10	30	60	90	160	10		
$\sigma_{\text{ЭКС}}^T$	/мб/	22.7 ± 4	17.3 ± 5.7	11.8 ± 4.8	8.7 ± 4.2	4.9 ± 3.3	7.8 ± 5.4		
$\sigma_{\pi, \mu}^T$	/мб/	5.3 ± 0.8	1.7 ± 0.3	0.53 ± 0.08	0.25 ± 0.04	0.06 ± 0.01	-		
$\sigma_{\text{Баба}}^T$	/мб/ (Баба)	13.2	10.0	7.6	6.2	4.2	6.8		
$\sigma_{\text{Мурога}}^T$	/мб/ (Мурога)	14.8	12.5	10.2	8.7	6.4	-		

α = 1,7

Полученные результаты сравнивались с теоретическими сечениями Баба ^{/1/} для электронов и Кельнера ^{/8/} для π⁻ - и μ⁻ - мезонов ^{x)}. В расчетах соответствующих величин $\sigma_{\pi, \mu}^T$ и $\sigma_{\text{Баба}}^T$ пренебрегалось экранированием, и процессы образования (e⁺e⁻)-пар в поле атомных электронов учитывались с помощью замены Z² → Z(Z + 1) в выражениях для сечений реакций (1) и (5) (Z - атомный номер ядра). Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Было получено, что отношение сечения образования (e⁺e⁻)-пар электронами и π⁻ -, μ⁻ - мезонами к теоретически вычисленному составляет

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКС}}^T}{\sigma_{\text{Баба}}^T + \sigma_{\pi, \mu}^T} = 1,2 \pm 0,3. \quad (6)$$

Дифференциальные сечения процессов (1) и (5) в зависимости от энергии (e⁺e⁻)-пар согласуются с теоретическими (см. рис.6).

Отношение полученного сечения образования (e⁺e⁻)-пар электронами к теоретически вычисленному для 1,25 ≤ E ≤ 4 ГэВ составляет

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКС}}^T - \sigma_{\pi, \mu}^T}{\sigma_{\text{Баба}}^T} = 1,3 \pm 0,5. \quad (7)$$

Полученные результаты также не противоречат теории Мурота и др. ^{/3/}, если параметр интегрирования (α), который используется при выводе формул, α ≈ 1,7.

Таким образом, полученные сечения прямого образования (e⁺e⁻)-пар

x) Формулы, полученные Баба ^{/1/}, зависят от двух постоянных, которые обычно полагаются равными единице.

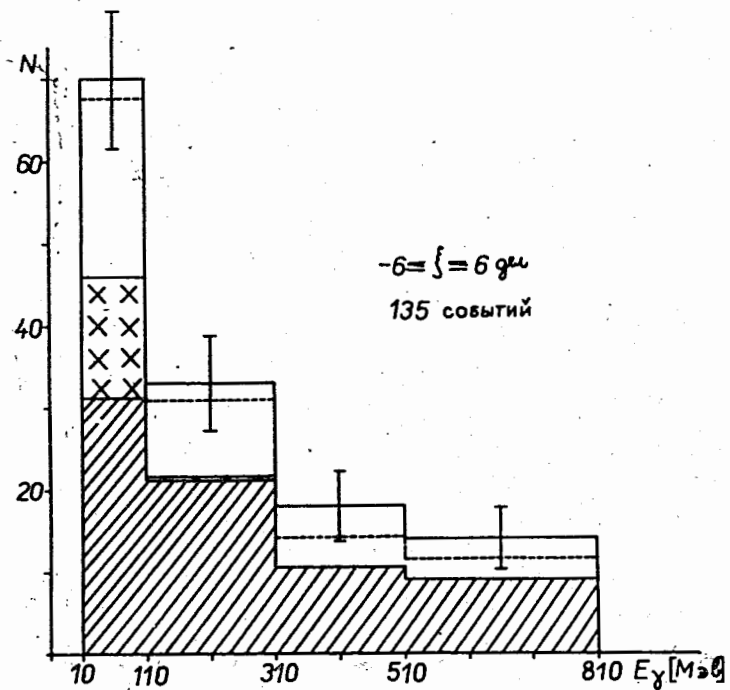


Рис.6. Гистограмма распределения событий из области $|\xi| \leq 6$ дел. по энергиям (e^+e^-) -пар. Пунктиром обозначен суммарный теоретический спектр $\frac{dN}{dE_\gamma}$ для процессов (1), (2), (3), (5). Вклад от реакции (5) обозначен крестами, вклад от реакций (2), (3) заштрихован.

электронами в рамках однократной ошибки согласуются с рассчитанными теоретически, что противоречит результатам, полученным с помощью ядерной эмульсии /12/.

Использованная в этом эксперименте методика позволяет успешно исследовать процесс образования (e^+e^-) -пар электронами с помощью водородной пузырьковой камеры, так как фон от процессов (2), (3) в

в этом случае будет примерно в 10 раз меньше ($L_{\text{рад}}^{(H)} = 10 \text{ м.}; L_{\text{рад.}}(C_8H_8) = 1 \text{ м.}$).

Авторы благодарны Б.Л.Любошиму, М.И.Подгорецкому, В.Б.Семикозу за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. H.J.Bhabra. Proc. Roy. Soc., (London) A152, 559 (1935).
2. G. Racah. Nuovo Cimento 14, 93 (1937); 4, 112 (1937).
3. T.Murota., A.Ueda, H.Tanaka. Prog. Theoret. Phys., 16, 482(1956).
4. T.Murota, A.Ueda. Prog. Theoret. Phys., 16, 497 (1956),
4. E.C.Johnson. Phys. Rev., 140, B1005 (1965).
5. J.Bjorken, S.Drell, S.Frautsche. Phys. Rev., 112, 1409 (1958).
6. D.C.Ehn, G.R.Henry. Phys. Rev., 162, 1722 (1967).
7. Ф.Ф.Гершовский. ЖЭТФ 37, 793 (1959).
8. С.Р.Кельнер. ЯФ 5, 1092 (1967). С.Р.Кельнер, Ю.Котов. ЯФ 7, 360 (1968).
9. Я.Бэм, В.Г.Гришин, М.М.Муминов, В.Д.Рябцев. Препринт ОИЯИ Р1-3143, Дубна, 1967.
10. L.Griegee, Z.Physik 158, 433 (1960).
11. V.Grossetete, R.Tchapoutian, D.J.Drickey, D.Yount. Phys. Rev., 168, 1475 (1968).
12. M.Koshiha, M.F.Kaplun. Phys. Rev., 100, 327 (1955).
M.Gailloud, R.Weill, Ph.Rosselet. Helv. Phys. Acta 30, 281(1957).
J.E.Nauble, P.S.Freier. Phys. Rev., 104, 804 (156).
13. R.Weill. Helv. Phys. Acta 31, 641 (1958).
14. P.K.Aditya. Nuovo Cimento 13, 1013 (1959).
15. Ким Хи Ин, А.А.Кузнецов, В.В.Миллер. Препринт ОИЯИ 2092, Дубна, 1965.
16. В.Г.Гришин, Э.П.Кистенев. Му Цзюнь ЯФ. 2, 886 (1965).
17. В.С.Пантуев, М.Н.Хачатурян. Препринт ОИЯИ 2100, Дубна, 1965.
18. Я.Бэм, В.Г.Гришин, А.Г.Кривенцова, М.М.Муминов, З.Трка. Препринт ОИЯИ Р-2842, Дубна, 1966.

19. В.Г.Гришин, Э.П.Костенев, Л.И.Лепилова, В.И.Мороз, Му Цзюнь. Препринт ОИЯИ Р-2277, Дубна, 1965.
20. H.W.Koch, J.W.Motz. Rev. Mod. Phys., 31, 920 (1959).
21. B.Rossi. High Energy Particles. New York, 1952.
22. H.A.Bethe, W.Heitler. Proc. Roy. Soc., (London) A146, 83(1934).
23. H.Davies, H.A.Bethe, L.C.Maximon. Phys. Rev., 93, 788 (1954).
24. J.A.Wheeler, W.E.Lamb. Phys. Rev., 55, 858 (1939).
Phys. Rev., 101, 1836 (1956).
25. K.J.Mork. Phys. Rev., 160, 1065 (1967).
26. K.J.Mork, H.Olsen. Phys. Rev., 140, B1661 (1965).
27. Я.Бэм, В.Г.Гришин. Препринт ОИЯИ Р-2838, Дубна, 1966.
28. R.W,Williams. Rev. Scient. Instrum., 32, 1378 (1961).
29. L.Eygs. Phys. Rev., 76, 264 (1949).

Рукопись поступила в издательский отдел
7 августа 1968 года.