

3973

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 3973

Ян Бэм

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ОБРАЗОВАНИЯ (e^+e^-)-ПАР ЭЛЕКТРОНАМИ
И γ -КВАНТАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность

№ 40 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

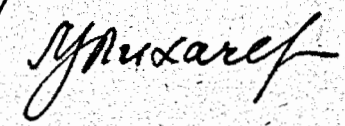
Дубна 1968

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ
 Научный руководитель:
 кандидат физико-математических наук В.Г.Гришин
 Официальные оппоненты:
 доктор физико-математических наук В.А.Копылов-Свирилов,
 кандидат физико-математических наук А.А.Кузнецов.
 Ведущее предприятие: Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан 1968 г.
 Защита диссертации состоится 1968 г. на заседании
 Ученого совета Лаборатории высоких энергий ОИЯИ г.Дубна,
 Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь ЛВЭ



А.А.Кузнецов

Ян Бэм

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
 ОБРАЗОВАНИЯ (e^+e^-)-ПАР ЭЛЕКТРОНАМИ
 И γ -КВАНТАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность

№ 40 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

В настоящее время электромагнитные взаимодействия электронов и γ -квантов привлекают к себе интерес как экспериментаторов, так и теоретиков. Выполнены отдельные эксперименты по проверке квантовой электродинамики в процессах фоторождения электронных и μ -мезонных пар при больших энергиях.

Хорошо изучены процессы рассеяния электронов на нуклонах и ядрах и реакции фоторождения сильновзаимодействующих частиц при $E \gtrsim 1$ Гэв.

Однако экспериментальные данные в области энергий $E \gtrsim 1$ Гэв по исследованию прямого образования (e^+e^-) -пар электронами и по изучению радиационных поправок в фоторождении (e^+e^-) -пар фактически отсутствуют. Эти данные представляют интерес с теоретической точки зрения, так как для вычисления сечений необходимо рассматривать диаграммы высшего порядка.

С другой стороны, эти данные полезны для многих других экспериментов, в частности, например, при исследовании рассеяния электронов на электронах и позитронах, при изучении образования γ -квантами (e^+e^-) -пар с большим углом раствора, в изучении космических лучей и т.д.

Первые две главы диссертации посвящены исследованию процесса образования (e^+e^-) -пар электронами

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

с энергией $E = 1,25-4$ Гэв.

В первой главе дается обзор теоретических и экспериментальных результатов, полученных другими авторами, а также описывается методика эксперимента. Реакция (1) исследовалась в ряде теоретических работ (см., например, /1-4/). Однако полностью проинтегрированные сечения по углам были получены в разных приближениях, так что в настоящее время нет точных выражений для сечений при энергии $E \leq 10$ Гэв. Процесс образования (e^+e^-) -пар электронами в поле атомных электронов вообще не изучался. Несмотря на это, результаты экспериментов для всех энергий электронов сравнивались с теорией Баба /1/. Для энергий $E \geq 1$ Гэв существуют данные, полученные с помощью ядерных эмульсий, облученных космическими лучами. Измеренные сечения в области энергий $E = 1-10$ Гэв в 3-4 раза выше, чем предсказывает теория Баба /1/.

Реакция (1) исследовалась нами с помощью 24-литровой пузырьковой пропановой камеры ЛВЭ ОИЯИ, помещенной в магнитное поле напряженностью 14,3 кгс. Основные результаты работы опубликованы в /5/. Камера облучалась пучком π^- -мезонов ($\approx 90\%$), μ^- -мезонов ($\approx 8\%$) и электронов ($\approx 2\%$) /6,7/. Правила просмотра были подобраны так, чтобы исключить события, связанные с π^- -мезонами. Окончательно отбирались события, для которых энергия первичных электронов внутри камеры $E \geq 1,25$ Гэв, энергия (e^+e^-) -пар $E_{\gamma} \geq 10$ Мэв, энергии электрона и позитрона $E_+, E_- \geq 2$ Мэв и угол между осью (e^+e^-) -пары и первичным электроном $\theta_{1,\gamma} \leq 5^\circ$.

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

В 80% событий (e^+e^-) -пары были идентифицированы по ионизации, сбросу энергий, δ -электронам и по соотношению пробег-энергия /8/.

Энергии частиц от (e^+e^-) -пары и также первичных электронов определялись с учётом ионизационных и радиационных потерь.

Основным фоновым процессом в реакции (1) является тормозное излучение электронов, сопровождаемое конверсией γ -квантов в (e^+e^-) -пары:

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

$$\gamma + Z' \rightarrow e^+ + e^- + Z', \quad (3)$$

Смещение оси (e^+e^-) -пары из реакции (3) относительно оси следа первичного электрона (ξ) имеет широкое распределение $\xi \geq 0$, в то время как для реакции (1) $\xi = 0$ (если не рассматривать ошибок измерений ξ).

Была разработана специальная методика для измерений осей одиночных следов и (e^+e^-) -пар в пузырьковых камерах. Измерения проводились на микроскопе МБИ-9 с окулярным микрометром (15x8,3). Одно деление соответствует 1,82 мк на кадре. Для реакций (1), (3) величина ξ определялась с ошибкой $\sigma_\xi = (2,1 \pm 0,2)$ дел., что соответствует примерно 1/10 диаметра пузырьков. Методика измерений ξ проверялась на следах одиночных электронов, а также на (e^+e^-) -парах. Полученные результаты показывают, что оси следов в пузырьковых камерах можно определять с такой же относительной точностью, как и в ядерных эмульсиях.

В нашем материале присутствуют события случайных наложений (e^+e^-) -пар, в основном, на треках π^- -мезонов. Эти события были отброшены по критерию $|\Delta| = |\xi_\lambda - \xi_\mu| \geq 10$ дел., где ξ_λ, ξ_μ - измерения величины ξ на левом и правом стереокадрах (см. рис. 1). Было получено $\bar{\Delta}_{\text{эксп.}} = (0,2 \pm 0,2)$ дел. и $\sigma_{\Delta_{\text{эксп.}}} = 3,1$ дел, что находится в согласии с экспериментально определенной ошибкой σ_ξ . С другой стороны, величина $\Delta = \xi_\lambda - \xi_\mu$

$$\pi^-(\mu^-) + Z \rightarrow \pi^-(\mu^-) + Z + e^+ + e^- . \quad (4)$$

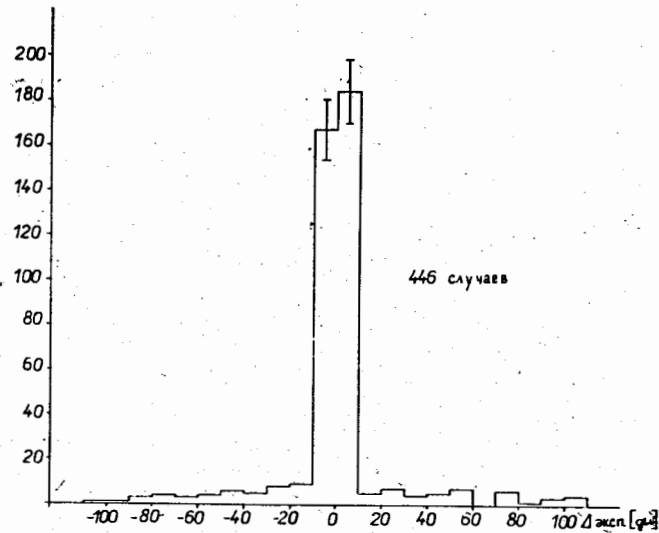


Рис. 1. Гистограмма распределения отобранных событий по величине $\Delta_{\text{эксп}} = \xi_{\lambda} - \xi_{\text{п}}$, где $\xi_{\lambda}, \xi_{\text{п}}$ - измеренные значения величины ξ на левом и правом стереокадрах.

была вычислена для событий типа (2), (3) с учётом оптической системы камеры. Было получено, что события типа (2), (3) с $\xi < 100$ дел. должны иметь $|\Delta| \leq 2,8$ дел.

Детальный анализ возможных фоновых процессов показал, что примесь событий от тормозного излучения π^- - и μ^- -мезонов, от неупругих ядерных взаимодействий π^- -мезонов и от случайных наложений (e^+e^-) - пар составляет $\approx 3\%$ событий типа (1), (2), (3) с $|\Delta|_{\text{эксп.}} < 10$ дел. Кроме того, среди событий типа (1) - (3) в области $|\xi| < 3\sigma_{\xi}$ находится $\approx 10\%$ (e^+e^-)- пар, образованных π^- - и μ^- -мезонами:

Примесь вторичных электронов с $E > 1,25$ Гэв оказалась несущественной и составляет $(1,1 \pm 0,6)\%$.

Во второй главе полученные экспериментальные результаты сравниваются с данными других работ и сечениями, рассчитанными теоретически.

Для количественного выделения процесса (1) были вычислены распределения $dN/d\xi$ и dN/dE_{γ} для фоновых процессов (2), (3). В расчётах использовались сечения Бете-Гайтлера^{/9/} с учётом экранирования ядра атомными электронами. Процессы тормозного излучения электронов и фотообразования (e^+e^-)-пар в поле атомных электронов вычислялись с помощью сечений Уиллера и Лэмба^{/10/}. Распределения $dN/d\xi$ и dN/dE_{γ} усреднялись в соответствии с теоретическим спектром энергий электронов внутри камеры^{/11/} и имели размытия, соответствующие неточностям измерений ξ . Все вычисления проводились на ЭВМ; суммарная ошибка в определении фоновых кривых составляет $\approx 5\%$.

Распределение $dN/d\xi$ было нормировано на число экспериментально отобранных событий в области $6 \leq \xi \leq 30$ дел. (см. рис. 2). Отсюда было определено содержание электронов в пучке $N_e = (1,8 \pm 0,3)\%$. Этот результат согласуется с данным из других экспериментов^{/6,7/}.

Теоретические распределения $dN/d\xi$ и dN/dE_{γ} находятся в хорошем согласии с экспериментальными распределениями фоновых процессов (2), (3) в области $3\sigma_{\xi} \approx 6 \leq \xi \leq 30$ дел. (см. рис. 2,3).

Согласие фоновых кривых в области $6 \leq \xi \leq 30$ дел. с экспериментальными данными позволило вычислить примесь событий типа (2), (3) в области $|\xi| \leq 6$ дел. (рис.2).

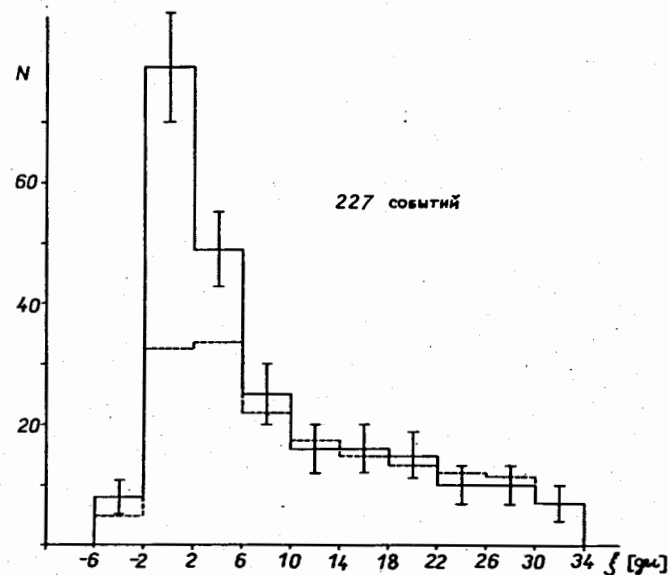


Рис. 2. Гистограмма распределения отобранных событий по величине ξ . Пунктиром показано теоретическое распределение $dN/d\xi$ для процессов (2), (3).

Было получено, что в этой области $\approx 50\%$ событий связано с процессом прямого образования (e^+e^-) - пар.

Экспериментальные результаты сравнивались с теорией Баба/1/ и Мурота и др./2/ (для электронов) и Кельнера/12/ (для π^- - и μ^- - мезонов). В расчётах соответствующих теоретических величин σ пренебрегалось экранированием и процесс образования прямых (e^+e^-) - пар в поле атомных электронов учитывался с помощью замены $Z^2 \rightarrow Z(Z+1)$ (Z - атомный номер ядра).

Для интервала энергий $E = 1,25-4$ Гэв и $10 \leq E_\gamma \leq 810$ Мэв отношение $R_1 = (\sigma_{\text{эксп.}} - \sigma^{\pi+\mu}) / \sigma^0$ (Баба) равно:

$$R_1 = 1,3 \pm 0,5,$$

где $\sigma^{\pi+\mu}$ вычислено с помощью сечений Кельнера/12/ и с учётом содержания π^- - и μ^- - мезонов и электронов в пучке.

С другой стороны, в области энергий $1,25 \leq E \leq 3,2$ Гэв π^- - и μ^- - мезоны отсутствуют, так как их энергия внутри камеры равна $E_0 = 4$ Гэв. Для этой области энергий имеем ($10 \leq E_\gamma \leq 810$ Мэв):

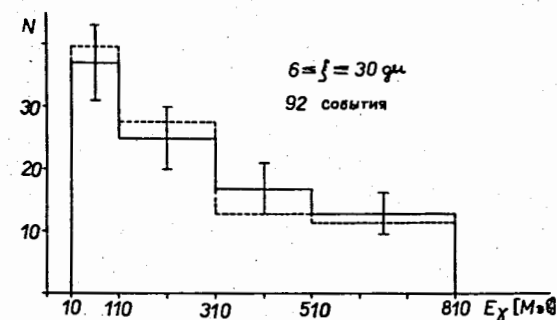


Рис. 3. Гистограмма распределения событий из области $6 \leq \xi \leq 30$ дел. по энергиям (e^+e^-) - пар. Пунктиром приведено теоретическое распределение dN/dE_γ для процессов (2), (3).

$$R_2 = \sigma_{\text{экс.}} / \sigma^{\circ} \text{ (Баба)} = 1,15 \pm 0,66.$$

Таким образом, результаты настоящей работы в пределах однократной ошибки находятся в согласии с теорией Баба/1/.

Экспериментальные дифференциальные сечения относительно энергий (e^+e^-) - пар для процессов (1), (4) находятся в хорошем согласии с теорией Баба/1/ и Кельнера/12/ (рис. 4).

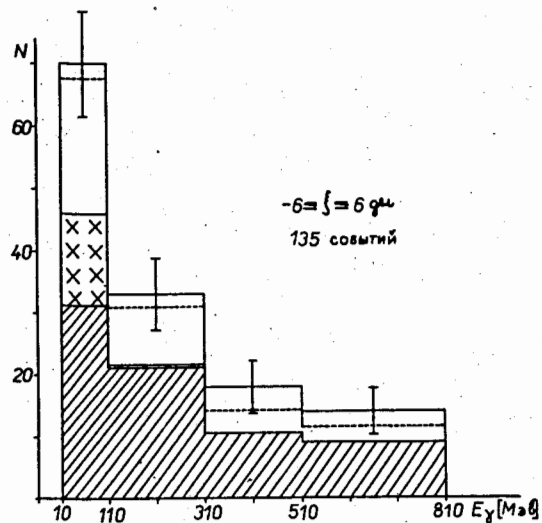


Рис. 4. Гистограмма распределения событий из области $|\xi| \leq 6$ дел. по энергии (e^+e^-) - пар. Пунктиром обозначен суммарный теоретический спектр dN/dE_γ для процессов (1)-(4). Вклад от реакции (4) обозначен крестами, вклад от реакций (2), (3) заштрихован.

Полученные результаты также не противоречат теории Мурота и др./2/, если параметр интегрирования равен $\alpha \approx 1,7$.

Измеренные в настоящей работе сечения расходятся со значениями, полученными с помощью ядерных эмульсий и значительно (в 3-4 раза) превышающими предсказываемые теорией Баба/1/. Расхождение результатов нельзя объяснить разностью средних атомных номеров ядерных эмульсий и пропана C_3H_8 .

Использованная в настоящем эксперименте методика позволяет успешно исследовать процесс образования (e^+e^-) - пар электронами с помощью водородной пузырьковой камеры, так как фон от процессов (2), (3) в этом случае уменьшается примерно в 10 раз ($L_{\text{рад}}(H) = 10 \text{ м}$, $L_{\text{рад}}(C_3H_8) = 1 \text{ м}$).

В третьей главе исследуется процесс образования (e^+e^-) - пар γ -квантами. Дается детальный обзор теоретических сечений с учетом радиационных поправок, а также экспериментальных результатов по изучению дифференциальных сечений $d\sigma/du$ ($u = E_+/E_\gamma$).

Вычислены таблицы полных сечений образования (e^+e^-) - пар γ -квантами с $E_\gamma = 10-10000$ Мэв в поле экранированного ядра и атомных электронов для водорода, углерода, фтора, хлора, брома и ксенона. Эти таблицы полезны для других экспериментов, выполняемых с помощью пузырьковых камер.

С помощью 24-литровой пропановой камеры ЛВЭ ОИЯИ исследовалось образование (e^+e^-) - пар γ -квантами с энергией $E_\gamma = 10-5000$ Мэв. Результаты опубликованы в работе/14/. Источником γ -квантов служили π^-p - соударения при $p = 4$ и 7 Гэв/с. Было отобрано 5279 (e^+e^-) - пар, для которых E_+ и $E_- \geq 10$ Мэв. Эффективность просмотра оказалась не зависящей от значений величины u с точностью лучшей, чем 1% ($u = E_+/E_\gamma$).

Экспериментальные данные по распределению $d\sigma/du$ находятся в хорошем согласии с теорией/9,10/ в пределах 10-15% (рис.5).

На рис. 5 также отчетливо видно качественное изменение распределений с увеличением энергии γ -квантов.

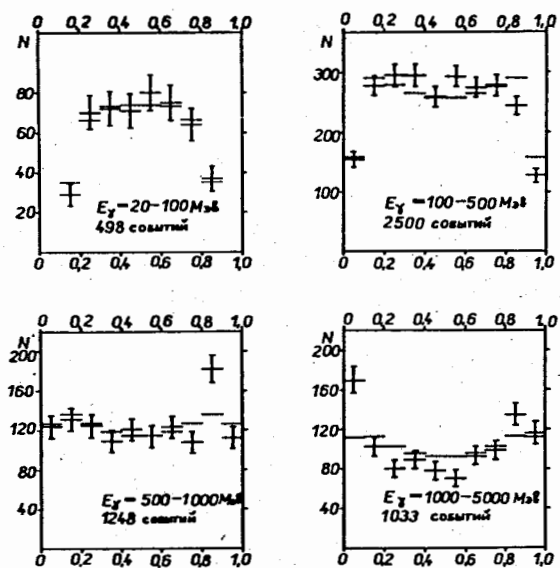


Рис. 5. Гистограммы распределения (e^+e^-) - пар по величине $u = E_2/E_1$. Пунктиром показано теоретическое распределение $d\sigma/du$.

В таблице 1 приведены значения коэффициента асимметрии

$$[N(u < \alpha) - N(u > 1 - \alpha)] / [N(u < \alpha) + N(u > 1 - \alpha)].$$

Для всех энергий фотонов распределение $d\sigma/du$ является симметричным относительно $u = 0,5$ с точностью $\approx 2\%$.

Полученные результаты не противоречат малому нарушению симметрии сечений $d\sigma/du$ за счёт радиационных поправок/15/.

В четвертой главе изучается процесс тормозного излучения электронов с $E = 1,4-4 \text{ ГэВ}/16/$. Этот процесс исследовался с помощью 24-литровой пропановой камеры, облучавшейся пучком π^-, μ^- -мезонов и электронов с $pc = 4 \text{ ГэВ}$ (см. гл. 1). Изучение тормозного излучения в наших экспериментальных условиях являлось методической подготовкой для исследования процесса прямого образования (e^+e^-) -пар электронами.

Отбирались события, для которых энергия первичного электрона $E_1 \geq 1400 \text{ МэВ}$ и энергия электрона после излучения $E_2 \leq 500 \text{ МэВ}$. Область взаимодействия определялась с точностью лучшей, чем $5 \cdot 10^{-3}$ рад.единиц для $E_2/E_1 \geq 0,75$. Всего было просмотрено 67 тысяч кадров и найдено 179 событий; эффективность однократного просмотра оказалась равной $\epsilon \approx 90\%$.

Из 179 вторичных частиц 112 были идентифицированы как электроны с помощью соотношения импульс-пробег, δ -электронов и радиационных потерь/8/.

Детальный анализ возможных фоновых процессов показал, что их вклад является несущественным (не превышает 1-3%).

Экспериментальное распределение $d\sigma/dv$ ($v = E_2/E_1$) сравнивалось с теоретическим распределением/9,10/ для $v \geq 0,65$. Оба распределения находятся в удовлетворительном согласии.

С другой стороны, исследование тормозного излучения в области $E_\gamma = E$ позволяет определить содержание электронов в пучках частиц, которые используются для пузырьковых камер/6/. Значительная статистика случаев, а также простота их обнаружения являются преимуществами этого метода по сравнению с исследованием рассеяния пучковых частиц на электронах/17/. Было получено, что число электронов в пучке составляет $N_0 = (1,8 \pm 0,15)\%$, что находится в хорошем согласии с $N_0 = (1,8 \pm 0,3)\%$, определенным по тормозному излучению с $E_\gamma \ll E$ (см. гл. II).

В Приложении I рассматривается оптическая система 24-литровой камеры в связи с измерениями малых расстояний на стереопаре.

В Приложении II обсуждаются некоторые вопросы, связанные с вычислением фоновых кривых для процесса образования (e^+e^-) -пар электронами.

Основные результаты и выводы диссертации

1. Разработана специальная методика, которая позволяет успешно исследовать процесс образования (e^+e^-) -пар электронами с помощью пузырьковых камер. Достигнутая точность в определении смещения оси (e^+e^-) - пары относительно оси следа первичного электрона составляет $\approx 1/10$ диаметра пузырьков в камере.

2. Измерено сечение образования (e^+e^-) - пар электронами с $E = 1,25-4$ Гэв в пропане C_3H_8 . Полученное значение для энергий (e^+e^-) - пар $10 \leq E_\gamma \leq 810$ Мэв в рамках однократной ошибки согласуется с теорией Баба/1/: $\sigma_{\text{эксп}}/\sigma_{\text{Баба}} = 1,3 \pm 0,5$. Измеренное сечение не противоречит теории Мурота и др./2/, если параметр интегрирования равен $\alpha = 1,7$.

Результаты настоящей работы расходятся с результатами измерений сечений, полученными с помощью эмульсионной методики и в 3-4 раза превышающими предсказываемые теорией Баба/1/.

3. Изучено суммарное дифференциальное сечение образования (e^+e^-) - пар электронами ($1,25 \leq E \leq 4$ Гэв) и π^- , μ^- -мезонами ($E = 4$ Гэв) в пропане C_3H_8 для энергий (e^+e^-) - пар $10 \leq E_\gamma \leq 810$ Мэв. Экспериментальные данные находятся в согласии с теорией Баба/1/ (для электронов) и Кельнера/12/ (для π^- и μ^- -мезонов).

4. Изучен спектр энергий электронов и позитронов для процесса образования (e^+e^-) - пар γ -квантами в области энергий $E_\gamma = 10-5000$ Мэв в пропане C_3H_8 .

Распределение $d\sigma/du$ для ≈ 5 тысяч (e^+e^-) - пар находится в согласии с теорией в пределах (10-15)% ($u = E_+/E_\gamma$). Полученные распределения $d\sigma/du$ оказались симметричными относительно $u = 0,5$ в пределах $\pm 2\%$. Этот результат не противоречит малой асимметрии сечений $d\sigma/du$, возникающей за счёт радиационных поправок.

5. Изучен спектр энергий тормозных γ -квантов от электронов с $E = 1,4-4$ Гэв в пропане C_3H_8 в области $\nu > 0,65$ ($\nu = E_\gamma/E$). Измеренное распределение находится в удовлетворительном согласии с теорией. Получено, что доля электронов в использовавшемся пучке составляет $N_0 = (1,6 \pm 0,15)\%$.

6. Вычислены таблицы полных сечений образования (e^+e^-) -пар γ -квантами с энергиями $E_\gamma = 10-10000$ Мэв для водорода, углерода, фтора, хлора, брома и ксенона.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах/5,8,13,14,16/.

Л и т е р а т у р а

1. H.J.Bhabha, Proc. Roy. Soc. (London) A152, 559 (1935).
2. T.Murota, A.Ueda, H.Tanaka, Prog. Theoret. Phys., 16, 482 (1956).
3. Ф.Ф.Терновский. ЖЭТФ 37, 793 (1959).
4. E.G.Johnson. Phys. Rev., 140, 4B, B1005 (1965).
5. Я.Бэм, В.Г.Гришин, М.М.Муминов, В.Д.Рябцев. Препринт ОИЯИ Р1-3143, Дубна 1967.
6. В.Г.Гришин, Э.П.Кистенев. Му Цзюнь. ЯФ, 2, (886 (1965)).
7. В.С.Пантуев, М.Н.Хачатурян. Препринт ОИЯИ 2100, Дубна, 1965.
8. Я.Бэм, В.Г.Гришин, А.Г.Кривенцова, С.М.Муминов, З.Трка. Препринт ОИЯИ Р-2842, Дубна 1966.
9. H.A.Bethe, W.Heitler. Proc. Roy. Soc. (London) A146, 83 (1934).
10. J.A.Wheeler, W.E.Lamb. Phys. Rev., 55, 858 (1939). Phys. Rev., 101, 1836 (1956).

11. L.Eygs. Phys. Rev., 76, 264 (1949).
12. С.Р.Кельнер. ЯФ 5, 1092 (1967).
13. Я.Бэм, В.Г.Гришин, Препринт ОИЯИ Р-2636, Дубна 1966.
14. Я.Бэм, В.Г.Гришин, Э.П.Кистенев. Письма ЖЭТФ 1У, 36 (1966).
15. Kjell Mork, H.Olsen. Phys. Rev., 140, B1661 (1965).
16. Я.Бэм, В.Г.Гришин, В.Д.Рябцев. Письма в ЖЭТФ 1У, 108 (1966).
17. F.S.Crowford. Phys. Rev., 117, 1119 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
11 июля 1968 года.

Таблица 1

E_{γ}	α	0,5	0,2
10-500 МэВ	(0.6+1.4)%		(1.7+2.3)%
500-5000 МэВ	(-1.0+2.1)%		(-1.8+3.1)%