

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В РАССЕЯНИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭЛЕКТРОНАХ ПРИ ЭНЕРГИИ 2×160 Мэв

П. И. ГОЛУБНИЧИЙ, Е. А. КУШНИРЕНКО, А. П. ОНУЧИН, В. А. СИДОРОВ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

(Поступила в редакцию 29 декабря 1967 г.)

На новосибирской установке со встречными пучками ВЭП-1 изучался процесс тормозного излучения в рассеянии электронов на электронах при энергии 2×160 Мэв. Измерялось интегральное сечение образования γ -квантов и вероятности излучения при рассеянии электронов на малый ($\sim 1,5^\circ$) и большой ($40 \div 90^\circ$) углы. Экспериментальные данные согласуются с результатами квантовоэлектродинамических расчетов.

Введение

Понятие упругого рассеяния заряженных частиц является в известной мере идеализацией, так как всякое изменение импульса заряженной частицы должно сопровождаться излучением. В экспериментах по рас-

сеянию ультрарелятивистских электронов процесс тормозного излучения заметно искажает энергетический спектр и угловое распределение. Теоретическое рассмотрение этого вопроса сводится к учету так называемых радиационных поправок к однофотонному приближению. Корректный учет радиационных поправок необходим в экспериментах по рассеянию электронов на электронах, проводимых для проверки применимости квантовой электродинамики на малых расстояниях [1]. В виде, наиболее адекватном современной технике эксперимента, этот вопрос теоретически рассмотрен Байером и др. [2]. Несмотря на то что для наших экспериментов по рассеянию электронов на электронах с энергией до 2×160 Мэв величина радиационных поправок должна быть невелика, решено было провести прямое изучение процесса тормозного излучения.

Работа выполнена на новосибирской установке ВЭП-1 со встречными электронными пучками [3, 4] при энергии 2×160 Мэв. Проведены измерения интегрального сечения образования γ -квантов тормозного излучения и вероятности их

образования при рассеянии электронов на малый ($\sim 1,5^\circ$) и большой ($> 40^\circ$) углы.

Удобной для эксперимента особенностью процесса тормозного излучения являются резко выраженные максимумы углового распределения

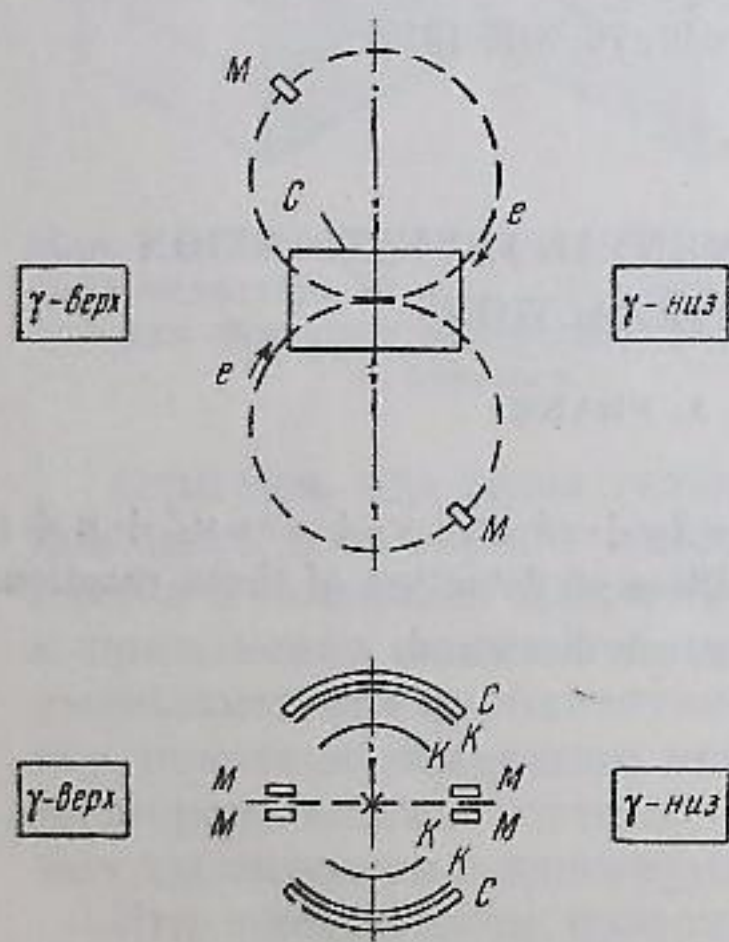


Рис. 1. Геометрическая схема эксперимента: К — искровые камеры; С — счетчики для запуска искровых камер; М — счетчики электронов, рассеянных на малый угол; γ -верх и γ -низ — счетчики γ -квантов. Апертура γ -счетчика равна $2\theta = 3,2^\circ$

γ -квантов в направлении движения начальных электронов. Это позволяет использовать счетчики γ -квантов со сравнительно небольшой апертурой. На рис. 1 показана геометрическая схема эксперимента. Регистрация γ -квантов производится счетчиками полного поглощения на кристаллах NaJ(Tl) цилиндрической формы диаметром и высотой 15 см [5]. Регистрация электронов, рассеянных на малый угол, производится сцинтилляционными счетчиками, помещенными на магнитной дорожке накопителя [6]. Электроны, рассеянные на большой угол, регистрируются двумя парами цилиндрических искровых камер, запускаемых системой сцинтилляционных счетчиков [3].

1. Интегральное сечение тормозного излучения

Из-за своего большого сечения тормозное излучение оказалось первым процессом взаимодействия элементарных частиц, зарегистрированным на установках со встречными пучками [7]. По той же причине этот процесс представляет интерес в качестве мониторирующего при изучении более редких событий.

Скорость счета γ -квантов удобно записать в виде

$$n_\gamma = \frac{I_1 I_2}{e^2 f S_{эфф}} \sigma_p \quad (1)$$

где I_1, I_2 — токи на дорожках, e — заряд электрона, f — частота ускоряющего напряжения на резонаторе, $S_{эфф}$ — эффективная площадь взаимодействия пучков, σ_p — сечение регистрации, равное

$$\sigma_p = \sigma_\gamma \delta \epsilon \quad (2)$$

где σ_γ — сечение [8-10], проинтегрированное по телесному углу счетчиков для центра области взаимодействия, δ — коэффициент усреднения сечения по области взаимодействия пучков, ϵ — эффективность регистрации. Точный расчет δ в данном случае осложнен тем, что электроны в месте встречи движутся по круговым орбитам [6]. Грубые оценки показывают, что $\delta = 0,5$. Возможная систематическая ошибка величины δ , по нашим оценкам, не должна превышать 30%. Эффективность регистрации γ -квантов, обусловленная главным образом их ослаблением на пути до сцинтиллятора, составляет $\sim 0,7$. Расчетное значение сечения регистрации для рабочего порога дискриминации 3 Мэв равно $\sigma_p = 50$ мбн. Определение абсолютного сечения по измерению скорости счета (1) можно сделать лишь грубо, так как размеры пучков известны с плохой точностью и к тому же меняются из-за эффектов встречи и в зависимости сечений процессов однократного тормозного излучения и рассеяния электронов на малый угол. В свою очередь, для исключения ошибок в определении сечения регистрации рассеянных электронов на малый угол, связанных с неточным знанием геометрического положения счетчиков, были использованы результаты одновременного измерения рассеянных электронов на малые и большие углы [4].

Основным фоновым процессом является однократное тормозное излучение на остаточном газе в камере. Загрузка счетчика фоновыми γ -квантами составляет

$$n_{фон} = \frac{I N d}{e} \sigma_{фон} \quad (3)$$

где I — ток на дорожке; N — число атомов воздуха в 1 см^3 ; d — средняя длина участка орбиты, с которого попадают γ -кванты в счетчик; $\sigma_{фон}$ — се-

чение регистрации фонового процесса. Отношение эффект — фон определяется соотношением

$$\frac{n_{\gamma}}{n_{\text{фон}}} = \frac{1}{S_{\text{эфф}} N_{\text{эфф}}} \frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma_{\text{фон}}} \delta I_2, \quad (4)$$

где I_2 — ток второго пучка, если первым считать тот, который движется по направлению на счетчик. Отметим, что отношение $\sigma_{\gamma} / \sigma_{\text{фон}}$ практически не зависит от порога дискриминации и составляет примерно $1/30$.

Эксперимент проводился при вакууме около $3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст., $S_{\text{эфф}} = 10^{-2}$ см², $d = 3$ см. При этих условиях для $I_2 = 30$ ма отношение эффекта к фону (4) должно составлять 0,5. Следует заметить, что это предельное отношение эффекта к фону. На самом деле фон больше, так

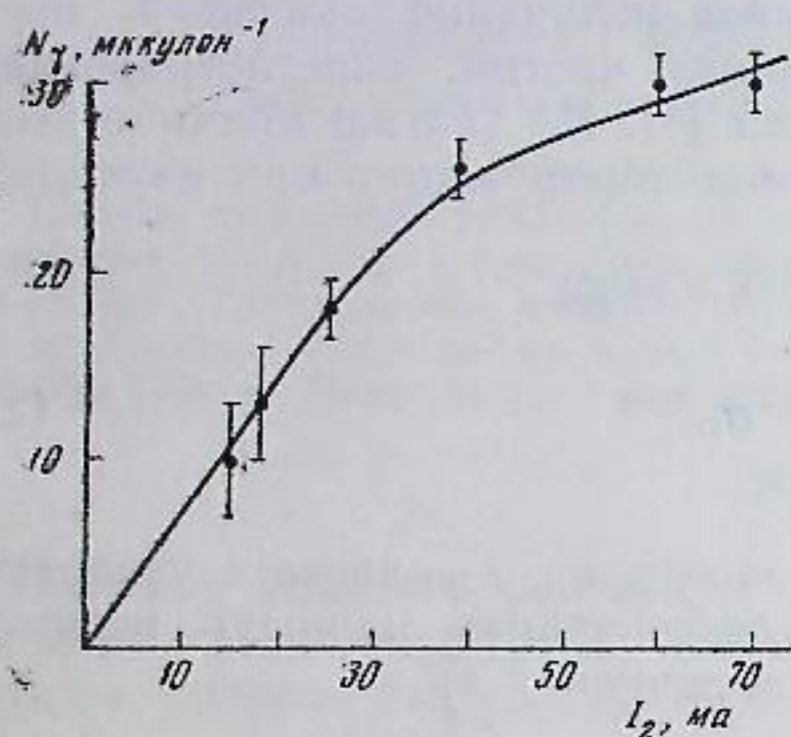


Рис. 2

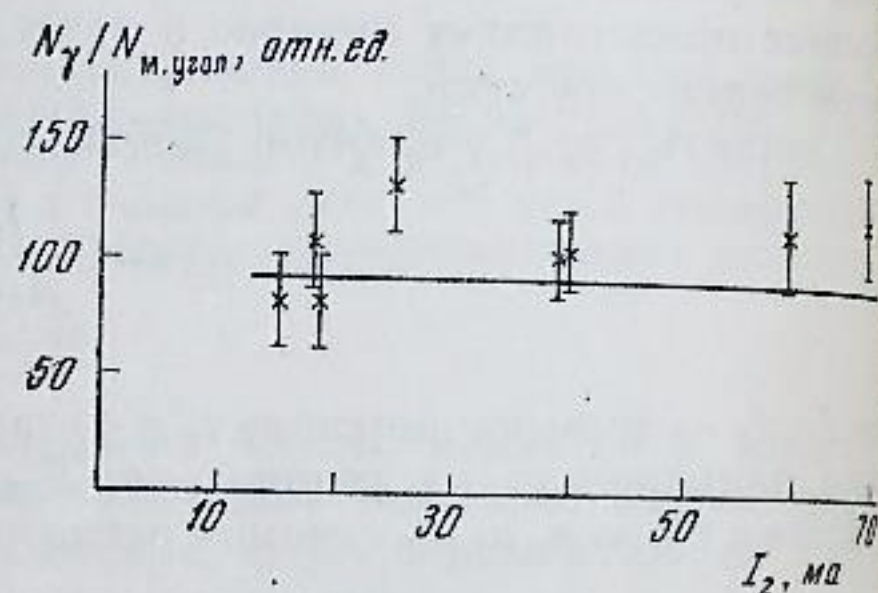


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость числа зарегистрированных γ -квантов от тока второго пучка. Нормировка сделана на 1 мккулон первого пучка

Рис. 3. Отношение числа γ -квантов к числу событий рассеяния электронов на малый угол в зависимости от тока второго пучка

как в счетчики попадают γ -кванты не только из места встречи. Измерение однократного тормозного излучения производилось счетчиком, в который попадают γ -кванты от пучка с верхней дорожки. Измерения при встречающихся пучках чередовались с измерениями при разведенных по фазе пучках. Отношение эффекта к фону составляло около 0,3 при токе второго пучка 40 ма. Зависимость числа отсчетов от тока второго пучка представлена на рис. 2, нормировка сделана на 1 мккулон первого пучка. Отклонение от линейной зависимости при больших токах обусловлено эффектами встречи. На рис. 3 представлена аналогичная зависимость отношений числа γ -квантов к числу событий рассеяния электронов на малый угол. Сплошная линия — расчетное значение этого отношения. Как видно, экспериментальные результаты согласуются с расчетом.

2. Вероятность излучения при рассеянии электронов на малый угол

Эффективное сечение процесса равно (формула (7) работы [1])

$$d\sigma = d\sigma_0 dW(\omega),$$

где $d\sigma_0$ — меллеровское сечение; $dW = k(d\omega/\omega)$, k — коэффициент, зависящий от геометрии счетчиков электронов и γ -квантов, ω — энергии γ -кванта. В нашем случае путь рассеянного электрона до счетчика проходит в основном магнитном поле накопителя. Поэтому эффективный размер электронных счетчиков зависит от энергии регистрируемых γ -кван-

тов. Геометрические размеры счетчиков в радиальном направлении таковы, что не регистрируются события с энергией γ -кванта, большей 3,8 Мэв. Расчетная форма спектра γ -квантов с учетом действия магнитного поля приведена на рис. 4. Сечение регистрации процесса запишем в виде

$$\sigma_p = \sigma_{\text{м. угол}} W \delta \epsilon,$$

где $\sigma_{\text{м. угол}}$ — эффективное сечение для счетчиков под малыми углами; δ и ϵ имеют тот же смысл, что и в предыдущем разделе, а W — вероятность излучения γ -квантов, регистрируемых в условиях эксперимента. Для порога регистрации γ -квантов 1 Мэв расчетное значение $W = 5 \cdot 10^{-3}$. Замечания предыдущего раздела по отношению к величине δ полностью относятся и к этому эксперименту. Усредненное по спектру значение эффективности $\epsilon = 0,65$. Сечение регистрации процесса $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-30}$ см².

Выделение событий проводилось по совпадениям импульсов с выхода системы регистрации рассеянных электронов на малый угол [6] и импульсов с γ -счетчика. При наличии совпадений проводился амплитудный анализ импульсов с γ -счетчика. Разрешающее время схемы совпадений составляло $2\tau = 0,4$ мксек. Поскольку фон при регистрации электронов под малыми углами составляет $\sim 5\%$ эффекта, то основным фоновым процессом являются случайные совпадения импульсов от γ -счетчика с событиями рассеяния электронов на малый угол. Измерение фона проводилось методом введения задержки в схему совпадений. Отношение эффект — фон составляло около единицы. За весь цикл измерений зарегистрировано около 1000 событий.

На рис. 4 приведены экспериментальные результаты распределения γ -квантов по энергии. Сплошная кривая — расчетная форма спектра с привязкой по оси ординат в области энергий 1 Мэв. Видно, что экспериментальные результаты согласуются с расчетом. Некоторое расхождение в конце спектра может быть связано с ошибками в определении геометрического положения счетчиков под малыми углами.

Экспериментальное значение вероятности излучения

$$W = (4,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$$

хорошо согласуется с расчетом. Указанная здесь ошибка является статистической.

3. Вероятность излучения при рассеянии электронов на большой угол

Регистрация событий проводилась по совпадениям импульсов с выхода системы регистрации электронов, рассеянных на большие углы, с импульсами от γ -счетчиков. При наличии совпадений проводился амплитудный анализ импульса с γ -счетчика. Регистрация случаев рассеяния электронов осуществлялась системой искровых камер с фотографической регистрацией [3]. Данные амплитудного анализа выводились на этот же кадр. Для увеличения статистической точности в данном эксперименте

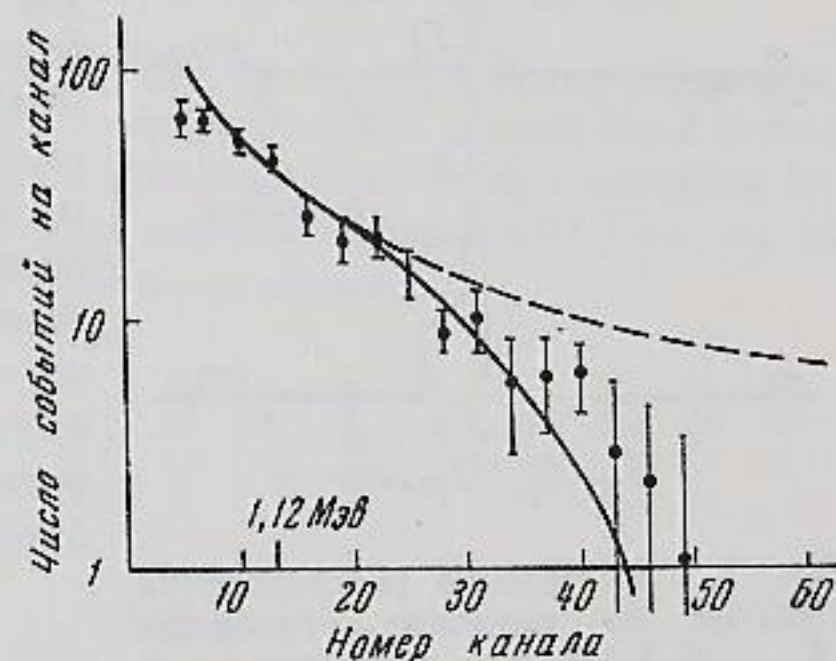


Рис. 4. Энергетический спектр γ -квантов при рассеянии электронов на малый угол. Сплошная кривая — расчетная форма спектра с учетом действия магнитного поля; пунктирная — без учета магнитного поля

использовались два счетчика γ -квантов, регистрирующих излучение электронов с верхней и нижней дорожки, которые дальше для удобства будут называться соответственно «верхним» и «нижним». Диапазон энергии

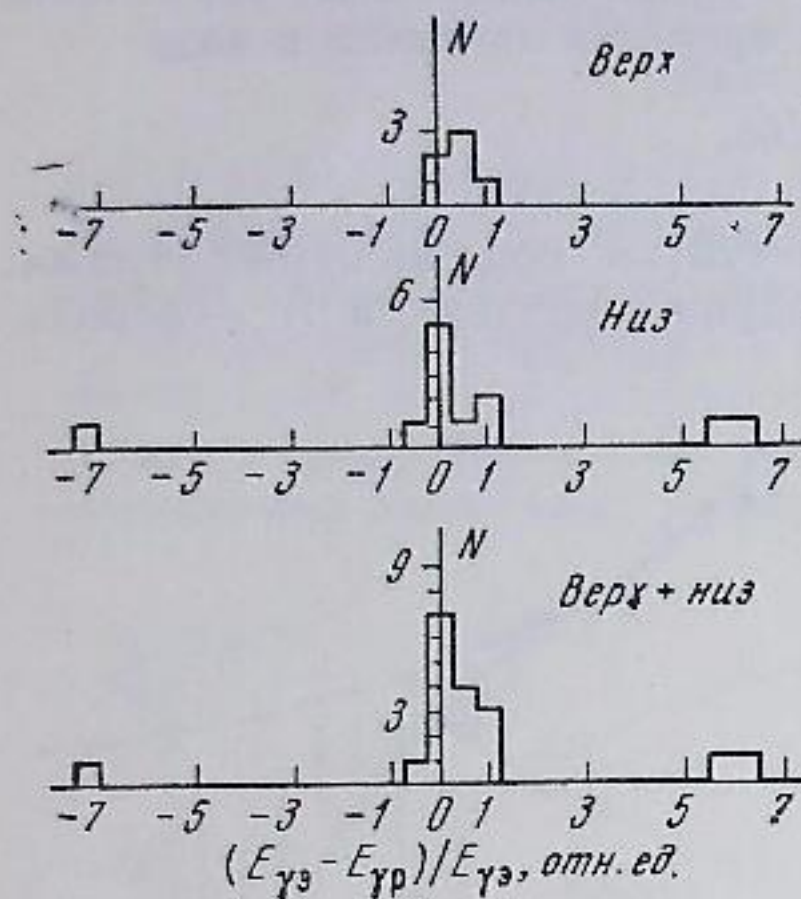


Рис. 5. Гистограммы распределения событий по величине отношения $(E_{\gamma\alpha} - E_{\gamma p}) / E_{\gamma\alpha}$ при рассеянии электронов на большой угол

регистрируемых γ -квантов составлял от 3 до 80 Мэв. Сечение регистрации для этого эксперимента по аналогии с предыдущим разделом запишем в виде

$$\sigma_p = \sigma_{\text{б. угол}} W \delta \varepsilon,$$

где $\sigma_{\text{б. угол}}$ — сечение рассеяния на большие углы; W — вероятность излучения γ -кванта; δ и ε имеют прежний смысл. Расчет вероятности излучения произведен на основе формулы (3) работы [11], записанной в симметричном виде по углам рассеяния электронов так же, как в работе [2]. Расчетное значение вероятности излучения для двух γ -счетчиков в указанном диапазоне энергии равно

$$W = 5,7 \cdot 10^{-2}.$$

Сечение регистрации составляет $\sigma_p = 1,1 \cdot 10^{-32} \text{ см}^2$.

Среди 724 событий рассеяния электронов на большой угол было обнаружено 18 случаев с излучением γ -кванта. На рис. 5 даны гистограммы распределения этих событий по величине $(E_{\gamma\alpha} - E_{\gamma p}) / E_{\gamma\alpha}$ для верхнего и нижнего счетчиков и их сумма. Здесь $E_{\gamma\alpha}$ — энергия γ -квантов по данным амплитудного анализа, а $E_{\gamma p}$ — энергия кванта, вычисленная по данным искровых камер:

$$E_{\gamma p} = E \Delta \theta / \sin \theta,$$

где θ — средний угол рассеяния, $\Delta \theta$ — угол неколлинеарности между рассеянными электронами, E — начальная энергия электрона. Истинные события в таком представлении должны быть локализованы около нуля. Видно наличие резко выраженного пика около нуля. События, далеко расположенные от нуля, могут быть отнесены к фоновым. В суммарной гистограмме можно считать, что таких событий три. Это число фоновых событий находится в согласии с оценкой числа случайных совпадений по загрузкам γ -счетчиков. При таком отборе фона экспериментальное значение вероятности излучения $W = (5,5 \pm 1,7) \cdot 10^{-2}$. Указанная здесь ошибка является статистической.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность большому коллективу сотрудников, работающих на установке ВЭП-1, а также В. Н. Байеру, В. С. Фадину и В. А. Хозе за обсуждение теоретических вопросов работы.

Литература

- [1] V. N. Bayer, S. A. Kheifets. Nucl. Phys., 47, 313, 1963.
- [2] В. Н. Байер, В. С. Фадин, В. А. Хозе. ЯФ, 6, 560, 1967.
- [3] Г. И. Будкер, Е. А. Кушниренко, А. А. Наумов и др. Атомная энергия, 19, 498, 1965.
- [4] Г. И. Будкер, Е. А. Кушниренко, Р. Л. Лебедев и др. ЯФ, 6, 1221, 1967.
- [5] П. И. Голубничий, А. П. Онучин, С. Г. Попов, В. А. Сидоров. Атомная энергия, 22, 168, 1967.
- [6] В. Л. Ауслендер, С. И. Мишнев, А. П. Онучин и др. Атомная энергия, 22, 174, 1967.

- [7] C. Bernardini, G. F. Corazza, G. Di Ciugno et al. Nuovo Cim., 34, 1473, 1964.
- [8] V. N. Bayer, V. M. Galitsky. Phys. Lett., 13, 355, 1964.
- [9] G. A. Altarelli, F. Buccella. Nuovo Cim., 34, 1337, 1964.
- [10] В. Н. Байер, В. С. Фадин, В. А. Хозе. ЖЭТФ, 51, 1135, 1966.
- [11] В. Н. Байер, В. С. Фадин, В. А. Хозе. ДАН СССР, 174, 323, 1967.

BREMSSTRAHLUNG IN THE ELECTRON-ELECTRON SCATTERING AT 2×160 MeV

P. I. GOLUBNICHIIY, E. A. KUSHNIRENKO, A. P. ONUCHIN, V. A. SIDOROV

Using the Novosibirsk set-up VEP-1 with colliding beams, the bremsstrahlung from the electron-electron scattering at 2×160 MeV was studied. The integral cross section of γ quanta production and the probabilities of emission at the electron scattering for small ($\sim 1.5^\circ$) and large ($40-90^\circ$) angles was measured. Experimental data are in agreement with the results of quantumelectrodynamie calculations.