

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

В.М.Аульченко, А.П.Онучин, Ю.А.Тихонов,
А.Г.Шамов

СПЕКТР И УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ФОТОНОВ В ПРОЦЕССЕ $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma\gamma$

ПРЕПРИНТ 82-133



Новосибирск

СПЕКТР И УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОТОНОВ В
ПРОЦЕССЕ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$

В.М.Аульченко, А.П.Онучин, Ю.А.Тихонов,
А.Г.Шамов

А Н Н О Т А Ц И Я

Эксперимент выполнен на накопителе ВЭПП-4 при энергии пучков $E = 1840$ МэВ. Измерен спектр фотонов в диапазоне энергий $\omega = (2 \cdot 10^{-4} + 1)E$. Проведено измерение углового распределения фотонов. Экспериментальные результаты согласуются с данными теоретических расчетов.

1. Введение

Процесс двойного тормозного излучения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ широко используется в экспериментах на встречных пучках. Большое эффективное сечение, наличие двух фотонов и их резкая угловая направленность позволяют быстро и с большой точностью проводить измерение светимости. Впервые двойное тормозное излучение экспериментально наблюдалось на установке ВЭП-1 /1/. При энергии пучка $E = 160$ МэВ был измерен спектр фотонов в диапазоне энергий $\omega = (0,06+1)E$. В работе /2/ измерен спектр фотонов при $E=475$ МэВ в диапазоне $\omega = (0,2+1)E$. Результаты работ /1,2/ хорошо согласуются с данными теоретических расчетов /3-6/.

В данной работе проведено измерение спектра фотонов в диапазоне энергий $\omega = (2 \cdot 10^{-4} + 1)E$ при $E = 1840$ МэВ. При таких условиях необходимо учитывать радиационные поправки /7/, величина которых составляет около 10%. В условиях эксперимента /1/ они составляли 3%, в условиях эксперимента /2/ 1%.

Угловое распределение фотонов двойного тормозного излучения до настоящего времени не было измерено. Поскольку этот процесс широко используется как мониторирующий, измерение его угловых характеристик представляется важным.

Конкретным поводом для более детальной проверки свойств двойного тормозного излучения послужил эксперимент по изучению процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ /8/, в котором было обнаружено существенное уменьшение вероятности излучения по сравнению со стандартным квантово-электродинамическим расчетом. Этот эффект обусловлен тем, что характерные в процессе $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ прицельные параметры намного превышают поперечные размеры сталкивающихся пучков. Двойное тормозное излучение в этом эксперименте использовалось в качестве нормировочного процесса.

2. Сечение двойного тормозного излучения

Диаграмма процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ показана на рис.1. Основной интерес представляет случай, когда фотоны излучаются в противоположные стороны по направлению движения пучков. С точностью лучше 1% форма энергетического спектра для одного фотона не зависит от энергии другого фотона. Сечение, проинтегрированное по углам вылета фотонов, имеет вид (см., например /9/):

$$d\sigma_0 = \frac{8\alpha^2 r_0^2}{\pi} \frac{d\omega_1}{\omega_1} \frac{d\omega_2}{\omega_2} R(\omega_1) R(\omega_2), \quad (1)$$

где $R(\omega) = \sqrt{\eta_1} \left(1 - \frac{\omega}{E}\right) + \sqrt{\eta_3} \frac{\omega^2}{E^2}$, L - постоянная тонкой структуры, r_0 - классический радиус электрона, E - энергия пучков, $\omega_{1,2}$ - энергия излученных фотонов. Коэффициенты η_1 и η_3 /6/ зависят только от $\theta_0 \gamma$, где θ_0 - угловая апертура счетчиков, γ - релятивистский фактор. При $\theta_0 \gamma \gg 1$ $\eta_1 = \frac{5}{4} + \frac{7}{8} \zeta(3)$, $\eta_3 = \frac{7}{8} \zeta(3) = 1.052$. Формула (1) справедлива при любых энергиях фотонов, за исключением узкой области $E - \omega_{1,2} \sim m$ /10/.

Для расчета углового распределения удобно воспользоваться результатами работы /6/. Основная часть фотонов сосредоточена в углах $\theta \ll \frac{5}{\gamma}$. При фиксированной энергии пучков угловое распределение фотонов слабо зависит от их энергии.

Радиационные поправки к формуле (1) вычислены в работе /7/. Сечение с учетом радиационных поправок может быть записано в следующем виде:

$$d\sigma = d\sigma_0 (1 - \delta), \quad (2)$$

где $\delta = 0.011 \left(\ln \frac{E}{\omega_1} + \ln \frac{E}{\omega_2} \right)$.

3. Схема эксперимента

Эксперимент проведен на установке ВЭП-4 /11/ в месте встречи, предназначенном для магнитного детектора МД-1 /12/. Геометрическая схема эксперимента показана на рис.2. Угол поворота траектории частиц 16° . Расстояние от места встречи до счетчиков 4.8 м. Расположение места встречи в магнитном поле, перпендикулярном к плоскости орбиты, создает удобства для регистрации фотонов и обеспечивает низкий уровень фона от тормозного излучения на остаточном газе. Последнее обстоятельство связано с тем, что тормозные фотоны от излучения на остаточном газе попадают в счетчик с небольшого участка орбиты.

Для регистрации фотонов использовались два кристалла $NaI(Tl)$ (счетчики 1 и 2 на рис.2) размерами $12 \times 12 \times 47$ см³ /13/. С помощью счетчика 1 измерялся спектр фотонов в интервале энергий 0,43-1840 МэВ. Порог по энергии второго фотона, который регистрировался счетчиком 2, составлял 11 МэВ. Свет в счетчике 1 соби-

рался на два фотоумножителя: в диапазоне энергий 0,4-21 МэВ на ФЭУ-110, в диапазоне 21-1840 МэВ на ФЭУ-84. Нелинейность амплитудной характеристики не превышала 1%, что проверялось при помощи светодиодов. Калибровка энергетической шкалы осуществлялась с помощью изотопов $Cs\ 137$, $Zn\ 65$, космических частиц и по краю спектра однократного тормозного излучения. Точность калибровки не хуже 10%.

Исследование стабильности коэффициентов усиления ФЭУ показало, что существующие в эксперименте изменения нагрузок приводят к изменению коэффициентов усиления до 20%. Поэтому была создана система стабилизации, использующая следующий принцип. На ФЭУ с помощью светодиода, работающего в режиме синхронизации с фазой обращения частиц в накопителе, задавался средний ток на порядок больший, чем ток при максимальной рабочей нагрузке. Контроль за стабильностью велся непрерывно в течение всего эксперимента и показал, что уход коэффициентов усиления не превышали 3%, что может привести к искажению формы спектра на величину не более 1%.

Фон в эксперименте в основном являются случайные совпадения от однократного тормозного излучения. Отношение эффект/фон составляло около 1. Фон случайных совпадений измерялся одновременно с измерением эффекта, для чего использовался второй канал электроники, в котором в схему совпадений была введена задержка на время оборота частиц в накопителе (1,22 мксек).

Амплитуды с ФЭУ измерялись с помощью аналого-цифрового преобразователя с 2000 каналов. Информация о числе событий поступала на счетчики импульсов.

Угловое распределение фотонов измерялось пропорциональной камерой с конвертором. Съём информации с камеры осуществлялся с помощью линии задержки, являющейся катодом камеры. Пространственное разрешение камеры составляло 1 мм.

4. Результаты эксперимента

Экспериментальные результаты по измерению спектра поправлялись на эффективность регистрации. Эффективность рассчитывалась методом Монте-Карло. Результат расчета представлен на рис.3. Потеря эффективности обусловлена в основном поглощением фотонов в приемнике синхротронного излучения (2 мм Cu).

На рис.4 представлен измеренный спектр фотонов. Сплошная

кривая расчет по формуле (2). Кривая нормирована на число событий. Расчет согласуется с экспериментом: $P(\chi^2) = 0.70$.

Результат измерения углового распределения представлен на рис.5. По оси ординат отложен проекционный угол в вертикальной плоскости $\theta_z \gamma$. Порог по энергии фотона составлял 100 МэВ. Порог по энергии фотона, излученного в противоположную сторону составлял 0,43 МэВ. Сплошная кривая - расчет по данным работы /6/ с учетом многократного рассеяния в конверторе (2 мм Pb). Кривая нормирована на число событий. Экспериментальные данные согласуются с расчетом: $P(\chi^2) = 0,2$.

В заключение авторы выражают благодарность коллективу комплекса ВЭШ-4 и детектора МД-1 за помощь в работе, Е.Л.Шамовой за проведение численных расчетов эффективности регистрации, В.Н.Байеру, Э.А.Кураеву, В.А.Сидорову и В.С.Фадину за полезные обсуждения

Л и т е р а т у р а

1. П.И.Голубничий и др. Атомная энергия, 22, 168, 1966.
2. I.Augustin et al. Preprint LAL, 1249, 1971.
3. V.N.Baier, V.M.Galitsky. Phys. Lett., 13, 355, 1964.
4. В.Н.Байер, В.М.Галицкий. ЖЭТФ, 49, 661, 1965.
5. В.Н.Байер, В.М.Галицкий. Письма в ЖЭТФ, 2, 259, 1966.
6. В.Н.Байер, В.С.Фадин, В.А.Хозе. ЖЭТФ, 50, 1611, 1966.
7. В.Н.Байер, В.В.Гейдт. ЯФ, 13, 350, 1971.
8. А.Е.Blinov et al. Phys. Lett., 113B, 423, 1982.
9. В.Н.Байер, В.М.Катков, В.С.Фадин "Излучение релятивистских электронов", стр.307, Москва, Атомиздат, 1973.
10. В.Н.Байер и др. ЯФ, 8, 1174, 1968.
11. I.Ya.Protopopov et al. Proc. Xth Intern. Conf. on High Energy Accelerators, p. 421, Protvino, 1977.
12. S.B.Varu et al. Препринт ИИФ 77-75, Новосибирск, 1977.
13. М.Д.Минаков и др. ИТЭ 4, 58, 1980.

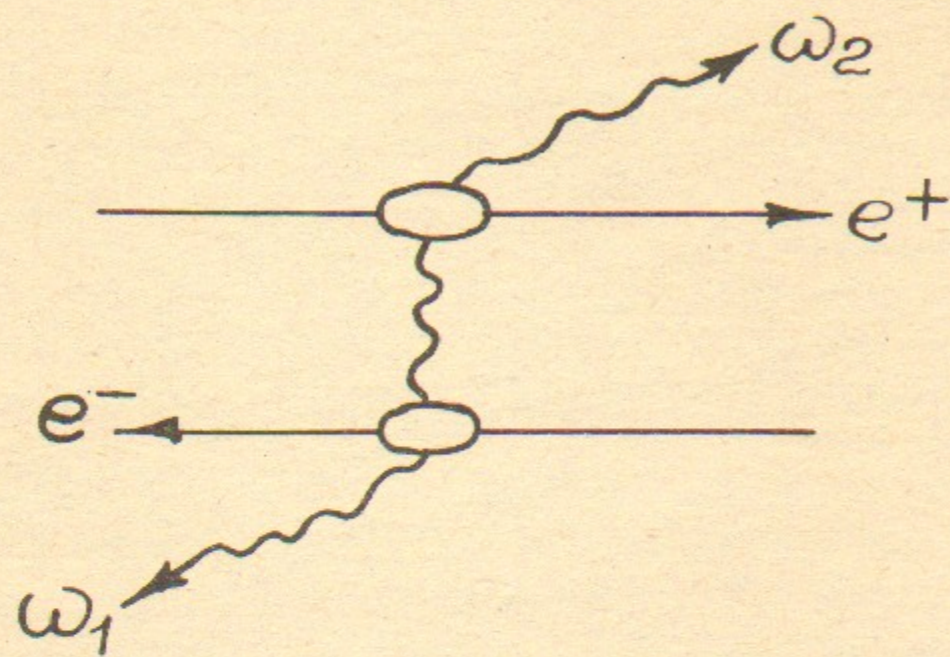


Рис.1. Диаграмма процесса двойного тормозного излучения.

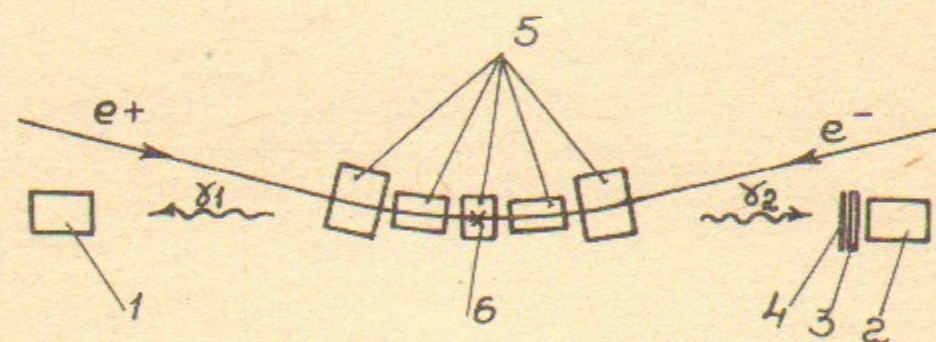


Рис.2. Схема эксперимента.
 1, 2 - счетчики для регистрации фотонов, 3 - пропорциональная камера, 4 - свинцовый конвертор толщиной 2 мм, 5 - магниты, 6 - место встречи.

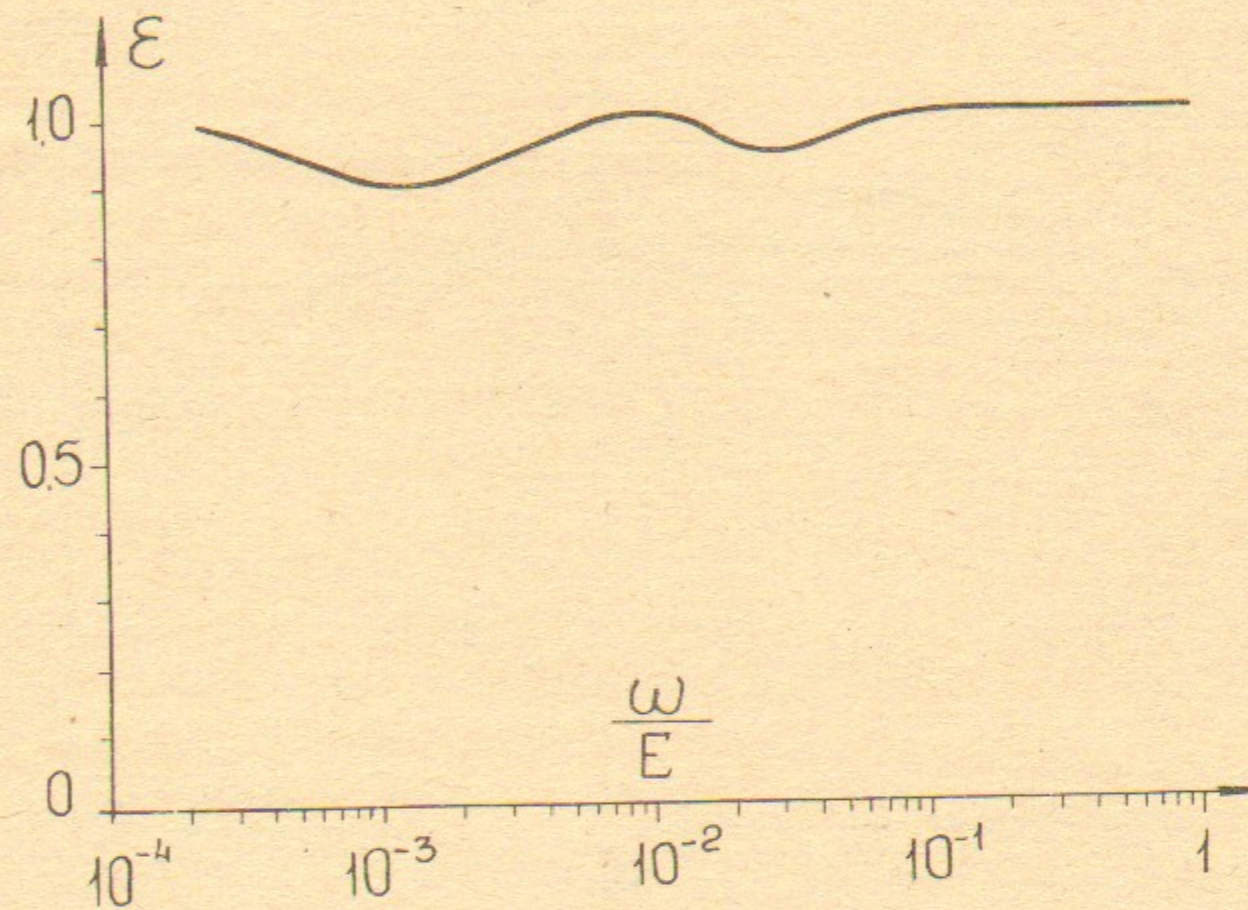


Рис.3. Эффективность регистрации фотонов.

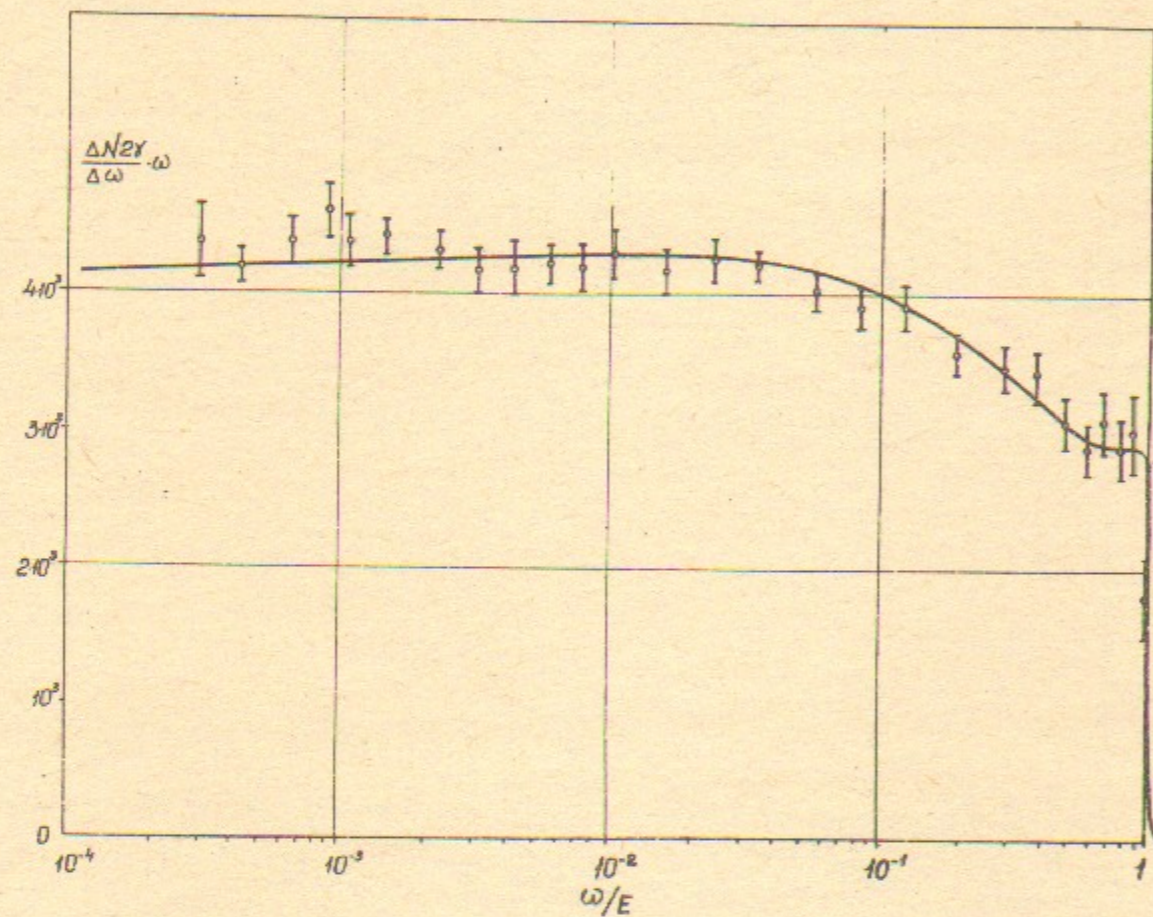


Рис.4. Спектр фотонов двойного тормозного излучения.

$\Delta N_{2\gamma}$ - число событий двойного тормозного излучения в интервале энергий $\Delta\omega$, сплошная кривая - расчет по формуле (2)

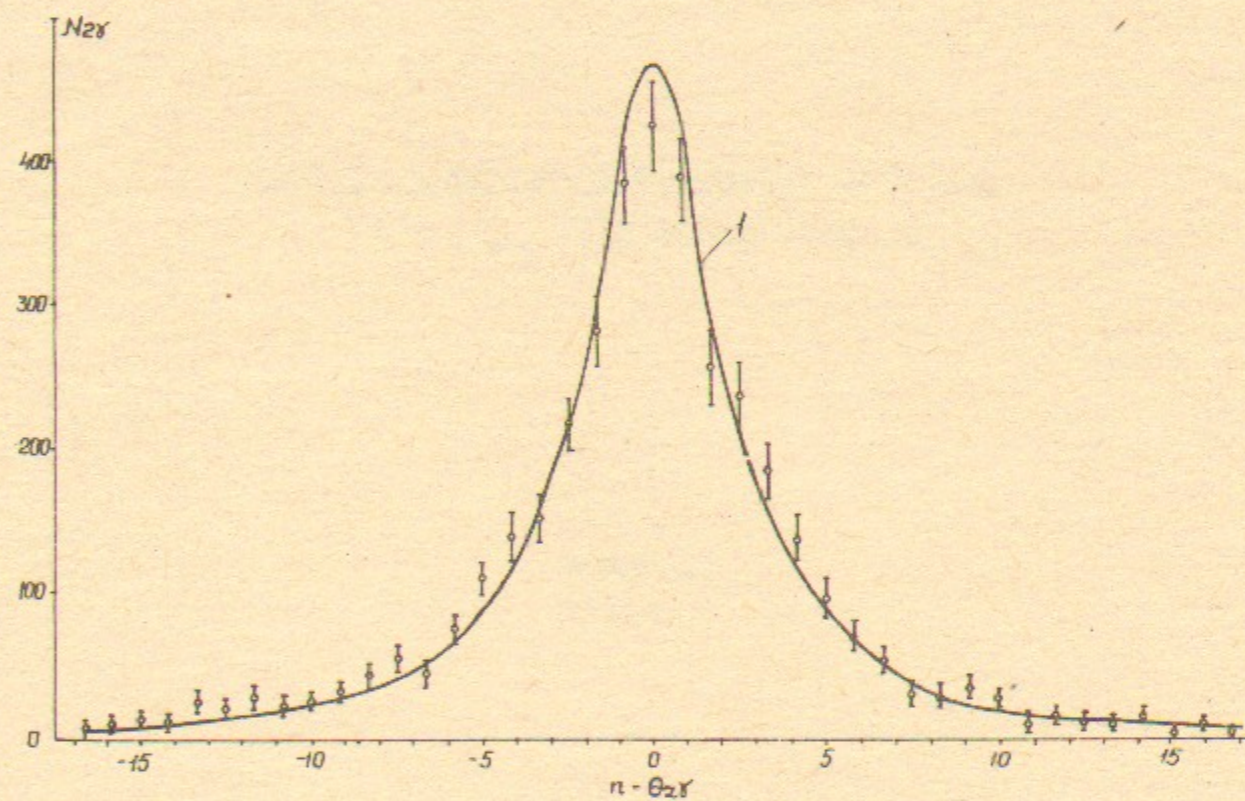


Рис.5. Угловое распределение фотонов двойного тормозного излучения.

$N_{2\gamma}$ - число событий в интервале $\Delta\theta_{2\gamma}=0.8$, $\theta_{2\gamma}$ - проекционный угол в вертикальной плоскости, сплошная кривая - расчет по данным работы /6/ с учетом многократного рассеяния в конверторе.