

4. Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены результаты измерения спектра ВТИ уникального однократно запрещенного β -перехода Cs^{137} при $\theta = 90^\circ$. Кривая 1 изображает результаты теоретических расчетов по формулам (1) — (3) с учетом обходных переходов, а кривые 2 и 3 получены без учета обходных переходов. При расчете кривой 2 кулоновская функция Ферми вычислялась по точным формулам, а при вычислении кривой 3 использовалось приближение (2).

Как видно из рисунка, экспериментальный спектр укладывается между теоретическими кривыми 1 и 3, причем трудно сказать, какая из них лучше описывает экспериментальные данные. Полный учет кулоновских поправок в промежуточном состоянии может поднять кривые 2 и 3, особенно в области высоких энергий фотонов. Поэтому для окончательного выявления влияния обходных переходов необходимо провести расчет спектра ВТИ с точным учетом кулоновского поля ядра в промежуточном и конечном состояниях.

Авторы приносят благодарность В. Б. Бруданину и А. С. Чернигину за помощь в измерениях.

Литература

- [1] B. Persson. Nucl. Phys., 55, 49, 1964. A. Roland, B. Persson. Nucl. Phys., A138, 631, 1969.
- [2] D. Berényi, T. Sharbert, E. Vatai. Acta Phys. ac. sci. Hung., 28, 337, 1970.
- [3] D. Berényi, T. Sharbert, E. Vatai, D. Brüchner. Nucl. Phys., A137, 80, 1969.
- [4] J. K. Knipp, G. E. Uhlenbeck. Physika, 3, 425, 1936. F. Bloch. Phys. Rev., 50, 272, 1936.
- [5] H. R. Lewis, G. W. Ford, A. Nielson. Phys. Rev., 107, 756, 1957.
- [6] G. W. Ford, C. F. Martin. Nucl. Phys., A134, 457, 1969.
- [7] R. J. D. Beattie, J. Byrne. Nucl. Phys., A161, 650, 1971.
- [8] A. Lybičić, B. Hrastnik, K. Ilakovac, M. Jurčević, I. Basar. Phys. Rev., C3, 824, 1971.

INTERNAL BREMSSTRAHLUNG ACCOMPANYING UNIQUE β -TRANSITION OF Cs^{137}

I. S. BATKIN, Yu. G. SMIRNOV

The internal bremsstrahlung spectrum of once forbidden unique β -transition of Cs^{137} has been measured at 90° angle between the direction of the leaving electron and γ -quantum. A comparison with theoretical calculations with account of «roundabout» transitions has been carried out.

НАБЛЮДЕНИЕ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ e^+e^- -ПАРЫ

В. Е. БАЛАКИН, А. Д. БУКИН, Л. М. КУРДАДЗЕ,
А. П. ОНУЧИН, Е. В. ПАХТУСОВА, С. И. СЕРЕДНЯКОВ,
В. А. СИДОРОВ, А. Г. ХАБАХПАШЕВ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

(Поступила в редакцию 19 мая 1972 г.)

Приводятся результаты первых экспериментов по наблюдению процесса двойного электророжения $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$. Работа проведена на установке со встречными пучками ВЭПП-2. Измерено сечение процесса для больших углов вылета образующихся частиц. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическими расчетами Байера и Фаина.

На позитрон-электронном накопителе ВЭПП-2 в 1969 году проведен эксперимент по изучению ϕ -мезонного резонанса в области энергии $2E = 1020 \text{ Мэв}$ [1]. При обработке результатов этого эксперимента было обнаружено около 100 двухчастичных неколлинеарных событий, не связанных с ϕ -мезонным резонансом. Экспериментальные данные по соотношению между пробегом частиц и углом многократного рассеяния указывали на то, что эти частицы могли быть идентифицированы как

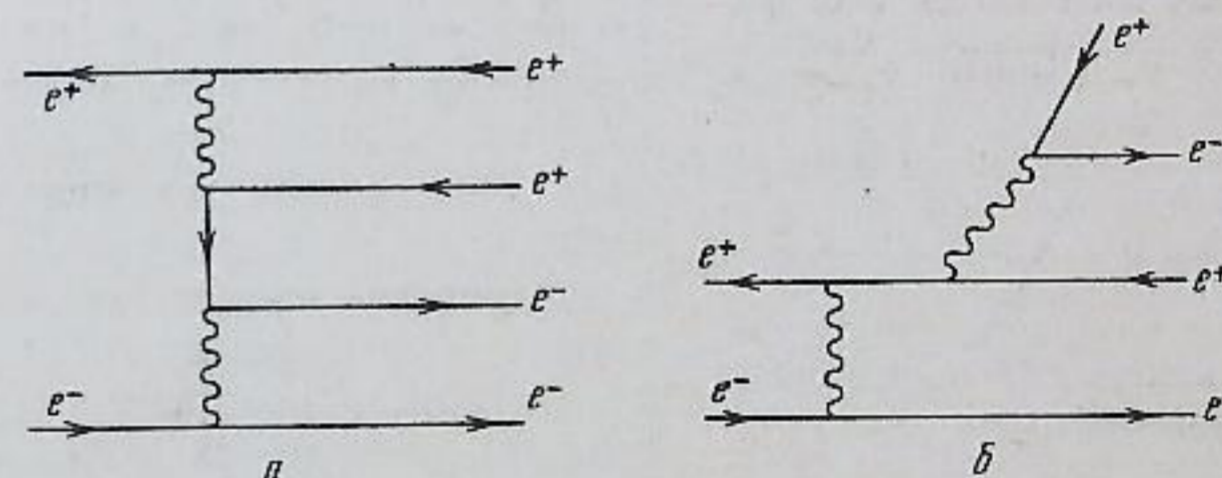


Рис. 1

электроны. На Киевской конференции доложены предварительные результаты этой работы [2], где высказано предположение, что наблюдаемые события могут быть отнесены к процессу двойного электророжения электрон-позитронных пар $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$, до сих пор экспериментально не наблюдавшемуся. Это предположение подтвердилось при дальнейшем анализе экспериментального материала и сравнении с теоретическими расчетами. Результаты работы опубликованы в 1971 году [3].

В 1970 году на той же установке ВЭПП-2 проводился эксперимент по изучению адронных формфакторов при трех значениях энергии $2E = 1180, 1260$ и 1340 Мэв [4, 5]. При обработке эксперимента были обнаружены события того же процесса. Наличие черенковских счетчиков в этом эксперименте позволило более надежно произвести идентификацию событий электрон-позитронных пар.

В данной статье приводятся результаты обоих экспериментов. Эти работы были доложены в 1971 году на международных конференциях в

Амстердаме и Корнеле [5]. На конференцию в Корнеле были представлены также предварительные результаты эксперимента по наблюдению этого процесса во Фраскати [6].

Полное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$ в трижды логарифмическом приближении было получено Ландау и Лифшицем еще в 1934 году [7]. При энергии наших экспериментов это сечение составляет $5 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$,

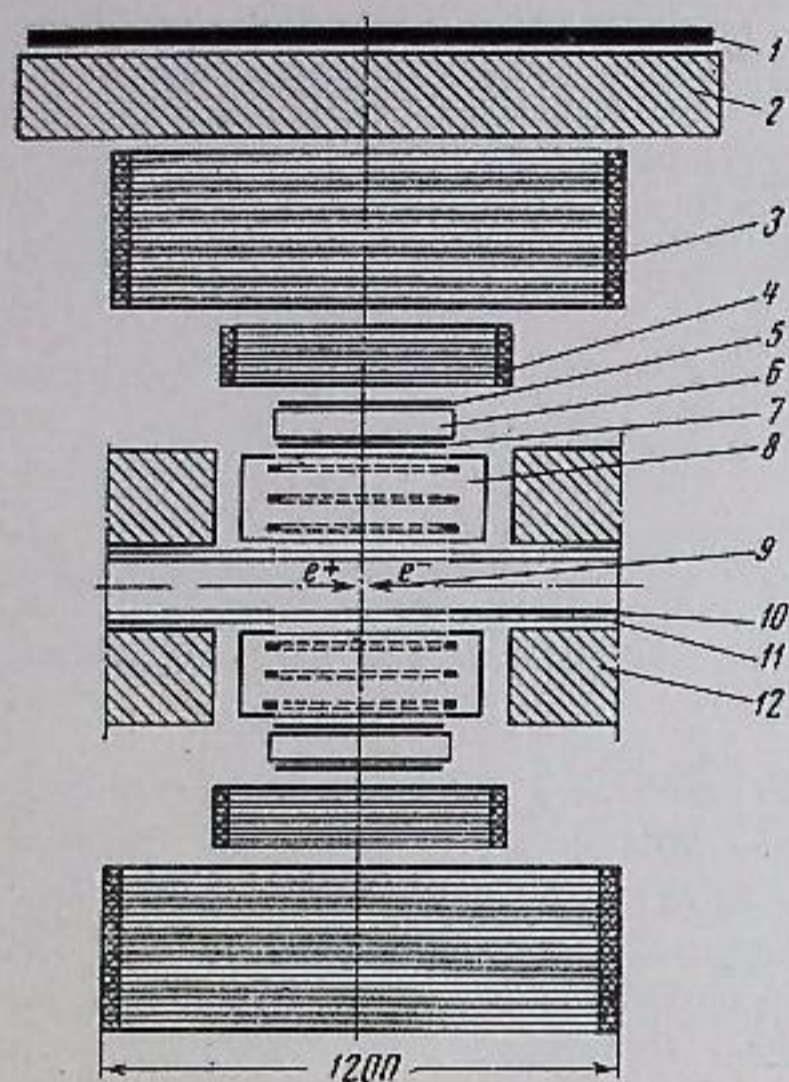


Рис. 2. Геометрическая схема эксперимента: 1 — сцинтилляционный счетчик антисовпадений; 2 — свинец; 3 — оптическая пробегная искровая камера; 4 — оптическая ливневая искровая камера; 5, 7 — сцинтилляционные счетчики; 6 — водяной черенковский счетчик; 8 — проволочные искровые камеры; 9 — область встречи; 10, 11 — внутренняя и наружная вакуумные камеры; 12 — магнит накопителя

ными счетчиками ставятся толстые пластины вещества, чтобы исключить большой фон мягких частиц, а это приводит к тому, что вероятность регистрации электророждения электрон-позитронных пар становится пренебрежимо малой. Лишь в описываемых экспериментах энергетический порог регистрации был достаточно низким.

Система регистрации, использованная в ϕ -мезонном эксперименте, описана в работе [1]. Она состояла из двух одинаковых групп оптических искровых камер, охватывающих телесный угол $2 \times 0,9 \text{ стерад}$ вблизи вертикального направления. Каждая группа состояла из координатной, ливневой и пробегной камер. Запуск искровых камер производился четырьмя сцинтилляционными счетчиками, включенными на совпадения. Порог регистрации составлял 15 Мэв для электронов и 35 Мэв для пионов.

Геометрическая схема аппаратуры, использованной в эксперименте 1970 года, показана на рис. 2. От аппаратуры первого эксперимента она отличается тем, что координатные оптические искровые камеры заменены проволочными искровыми камерами, а между сцинтилляционными счетчиками вместо алюминиевых фильтров установлены пороговые водяные черенковские счетчики [10]. Постановка черенковских счетчиков привела к тому, что телесный угол системы уменьшился на 10%, а порог регистра-

ции частиц увеличился до 25 Мэв для электронов и до 50 Мэв для пионов. С каждой стороны от места встречи было установлено по три двухкоординатные камеры с памятью на ферритах [11]. Проволочные камеры работали в режиме непосредственной связи с ЭВМ [12, 13], параллельно вся информация записывалась на магнитную ленту. Для событий, отобранных с помощью проволочных камер, просматривались фотографии с ливневых и пробегных искровых камер.

Из двух типов диаграмм четвертого порядка, описывающих данный процесс (рис. 1), основной вклад в сечение дает диаграмма 1, а. Процессы, соответствующие таким диаграммам, мы предлагаем называть двойным электророждением.

На встречных пучках этот процесс до сих пор не наблюдался по двум причинам. Во-первых, угловое распределение рождающихся частиц имеет резкий пик в направлении движения начальных частиц, а все системы регистрации были расположены под большими углами. И, во-вторых, энергетический спектр рождающихся частиц весьма мягок — сечение регистрации обратно пропорционально квадрату порога регистрации электронов. Обычно в экспериментах перед сцинтилляцион-

ными счетчиками ставятся толстые пластины вещества, чтобы исключить большой фон мягких частиц, а это приводит к тому, что вероятность регистрации электророждения электрон-позитронных пар становится пренебрежимо малой. Лишь в описываемых экспериментах энергетический порог регистрации был достаточно низким.

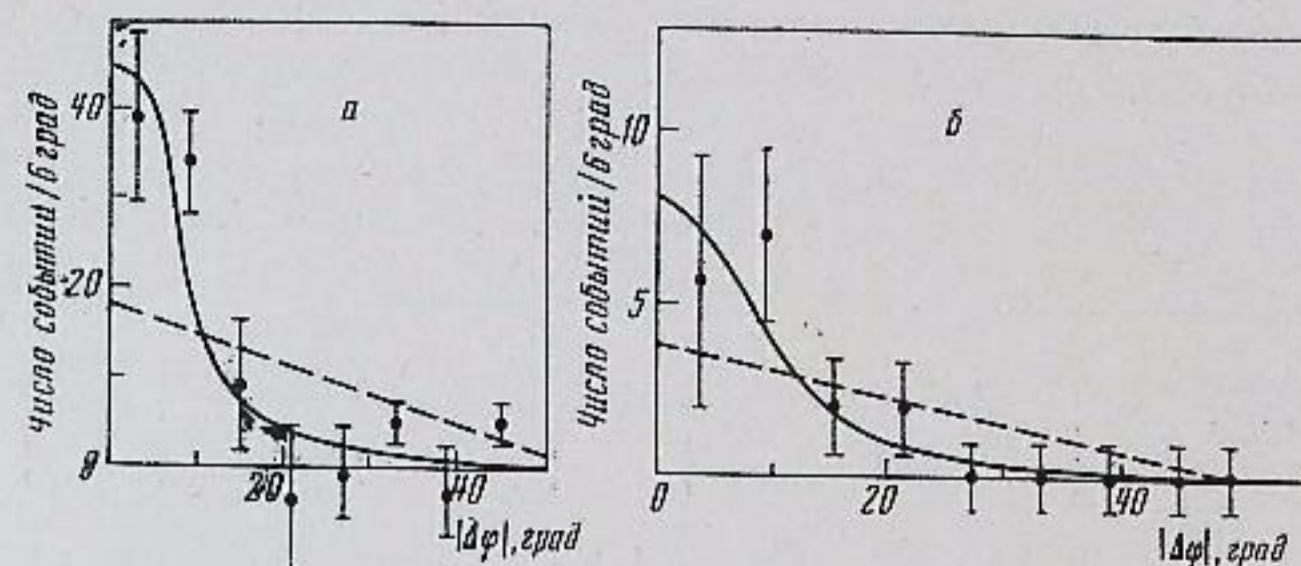


Рис. 3. Распределение событий первого эксперимента (а) и второго эксперимента (б) по углу $|\Delta\phi|$. Сплошная кривая получена по формулам Байера и Фадины, пунктирная — расчетное распределение для процесса с независимым изотропным распределением частиц

Выделение событий электророждения электрон-позитронных пар в обоих экспериментах проводилось по длине пробега частиц. В первом эксперименте отбирались события, у которых обе частицы имели пробег от $6,4$ до 16 г/см^2 . Во втором эксперименте соответствующий интервал пробегов составлял $10,5$ — 20 г/см^2 .

Дополнительным требованием во втором эксперименте было требование срабатывания черенковских счетчиков. При этом эффективность регистрации пары электронов, измеренная по событиям упругого электрон-позитронного рассеяния, составляет 72%. Расчетное значение эффективности регистрации пары пионов с указанным выше интервалом пробегов меньше 1%.

Подтверждением того, что выделенные частицы есть электроны, является согласие экспериментального и расчетного значений угла многократного рассеяния. В первом эксперименте угол многократного рассеяния в фольге ($0,1 \text{ г/см}^2$ железа и $0,05 \text{ г/см}^2$ алюминия) равен $5,5^\circ$, а во втором эксперименте ($0,5 \text{ г/см}^2$ железа) — 9° . Заметим, что указанные углы многократного рассеяния для пионов соответствуют энергии 8 Мэв в первом эксперименте и 13 Мэв во втором, что значительно меньше порога регистрации.

Данные двух экспериментов приведены в таблице. Интеграл светимости определялся по процессу упругого электрон-позитронного рассеяния, регистрируемого той же аппаратурой. Измерения фона производились с двумя пучками, разведенными по вертикали на 2 мм . Фоновые измерения занимали около 30% полного времени эксперимента. Для второго эксперимента из-за малой статистики приведены лишь суммарные результаты измерений при трех значениях энергии.

В первом эксперименте из-за различных фоновых условий оказалось удобным разделить всю область наблюдения на две по углу отклонения от коллинеарности между треками частиц $|\Delta\theta|$, где θ — полярный угол в сферической системе координат с полярной осью, направленной вдоль движения пучков.

Использование информации с черенковских счетчиков во втором эксперименте позволяет свести примесь от других многочастичных событий [4] до пренебрежимо малой величины. Расчет примеси в первом эксперименте

проведен для известных каналов распада φ -мезона и процесса рождения пар пионов [1].

Расчет ожидаемого числа событий проведен с учетом конечных размеров области взаимодействия пучков, многократного рассеяния частиц в фольге и зависимости эффективности регистрации электронов от энергии. Расчет эффективности регистрации был проведен методом Монте-Карло с учетом развития ливней, при этом рассматривались для электронов ионизационные и тормозные потери и многократное рассеяние, а для γ -квантов — процессы рождения пар и комптон-эффект. Внесена поправка на изменение эффективной толщины материала на пути частиц для разных углов наклона трека частиц к плоскости камер.

Одной из характерных особенностей рассматриваемого процесса является пиковость в распределении по величине азимутального угла отклонения от коллинеарности $\Delta\varphi$ рождающихся частиц. На рис. 3 соответственно для первого и второго экспериментов показаны распределения

Энергия $2E$, Мэв	Интеграл светимости, 10^{28} см ²	Интеграл пробегов, г/см ²	Область угла $ \Delta\theta $	Эффект	Фон (нормированный)	Примесь других изучаемых процессов	Чистый эффект	Расчет по Байеру и Фадину [%]
1020	$8,5 \pm 0,4$	6,4—16	0—40° 40—90°	150 71	53 70	13 ± 5 0,2	84 ± 19 1 ± 18	65 ± 13 22 ± 5
1180— —1340	$13,5 \pm 0,6$	10,5—20	0—90°	19	2	0,1	17 ± 5	15 ± 3

событий по величине угла $|\Delta\varphi|$. Сплошная кривая соответствует расчету Байера и Фадина [8] с учетом геометрических условий эксперимента и многократного рассеяния. Для сравнения на этом же рисунке пунктиром показано расчетное распределение, полученное для процесса с независимым и изотропным распределением частиц.

Количественные критерии согласия экспериментальных данных с двумя типами расчетных распределений получены математическим моделированием статистического разброса точек, что является естественным обобщением общеизвестного критерия $P(\chi^2)$ на случай малой статистики [14]. Расчет проводился в предположении, что фон состоит из двух компонент — изотропной и пиковой с $\Delta\varphi = 0$.

Полученное таким образом значение в первом эксперименте составляет 35% для кривой Байера и Фадина и 0,1% для изотропного распределения.

Во втором эксперименте число событий недостаточно, чтобы исключить изотропное распределение. Для увеличения чувствительности к выбору варианта расчетного распределения было произведено объединение интервалов. Были объединены два первых интервала и все оставшиеся. Однако и в этом случае $P = 11\%$ для изотропного распределения. Для распределения Байера и Фадина $P = 62\%$.

В заключение авторы выражают благодарность всем участникам проведения и обработки экспериментов, а также В. Н. Байеру и В. С. Фадину за обсуждения.

Литература

- [1] V. E. Balakin, G. I. Budker, E. V. Pakhtusova et al. Phys. Lett., 34B, 328, 1971.
- [2] В. Е. Балакин, Г. И. Будкер, Е. В. Пахтусова и др. Докл. на XV Международной конф. по физике высоких энергий, Киев, 1970; препринт ИЯФ 59-70, Новосибирск, 1970.
- [3] V. E. Balakin, A. D. Bukin, E. V. Pakhtusova, V. A. Sidorov, A. G. Khabakhrashev. Phys. Lett., 34B, 663, 1971.
- [4] В. Е. Балакин, Г. И. Будкер, И. В. Вассерман и др. Докл. на XV Меж-

дунар. конф. по физике высоких энергий, Киев, 1970; препринт ИЯФ 62-70, Новосибирск, 1970.

- [5] V. A. Sidorov. Proc. 1971 Intern. Symp. on Electron and Photon Interactions at High Energies, Cornell, 1971.
- [6] C. Bernardini. Proc. 1971 Intern. Symp. on Electron and Photon Interactions at High Energies, Cornell, 1971.
- [7] L. D. Landau, E. M. Lifshits. Sov. Phys., 6, 244, 1934.
- [8] V. N. Baier, V. S. Fadin. Phys. Lett., 35B, 156, 1971.
- [9] Э. А. Кураев, Л. Н. Липатов. Письма ЖЭТФ, 15, 229, 1972.
- [10] А. П. Онучин, С. И. Середняков. ПТЭ, 6, 1972.
- [11] С. Е. Бару, Г. М. Колачев, Л. М. Курдадзе, Е. А. Кушпиренко, А. П. Онучин. Сочещ. по бесфильмовым искровым и стримерным камерам, Дубна, 1969, стр. 164.
- [12] С. Е. Бару, О. С. Койфман, В. М. Попов, А. В. Романов, В. А. Сидоров. Сочещ. по бесфильмовым искровым и стримерным камерам, Дубна, 1969, стр. 168.
- [13] В. М. Попов, А. В. Романов. Тр. X конф. по автоматическому контролю и методам электрических измерений, Новосибирск, Институт автоматизации и электрометрии СО АН СССР, 1971, стр. 27.
- [14] Е. В. Пахтусова. Кандидатская диссертация, ИЯФ, Новосибирск, 1971.

OBSERVATION OF DOUBLE e^+e^- -PAIR PRODUCTION

V. E. BALAKIN, A. D. BUKIN, L. M. KURDADZE, A. P. ONUCHIN,
E. V. PAKHTUSOVA, S. I. SEREDNYAKOV, V. A. SIDOROV,
A. G. KHABAKHRASHEV

The results of first experiments on observation of double e^+e^- pair production ($e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$) are presented. The experiment has been performed on an experimental installation with colliding beams VEPP-2. The cross-section for large angles of the produced particles has been measured. The experimental results are in accordance with the theoretical calculations of Baier and Fadin.