

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P1-86-67

Л.В.Сильвестров, Г.Г.Тахтамышев

РАСЧЕТ ЧИСЛА
ФОНОВЫХ e^+e^- -ПАР В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО РЕГЕНЕРАЦИИ $K_L - K_S$ -МЕЗОНОВ
НА ДЕЙТЕРИИ

1986

Данная работа является частью анализа образования e^+e^- -пар, зарегистрированных на установке БИС в ходе проведения экспериментов по регенерации $K_L - K_S$ -мезонов на дейтерии^{1/}. Анализ показал, что имеется избыток таких пар по отношению к ожидаемому фону от $K_{\text{вз}}$ распадов. Ниже приводятся результаты моделирования и расчета числа e^+e^- -пар (далее будем писать просто $e-e$ пар), которые могли образоваться в этих экспериментах от других известных процессов.

Моделирование проводилось на основе программы, описанной в работах /2,3/ (программа ТВИСТ). Основное назначение программы - вычисление эффективности и разрешающей способности проволочных магнитных спектрометров. Программа позволяет моделировать физические процессы с образованием и последующим каскадным распадом заряженных и нейтральных частиц. Заряженные частицы трассируются через установку с учетом отклонения в магнитном поле и эффектов многократного рассеяния. В данном случае моделировался поток $K_{S,L}$ -мезонов с энергетическим спектром, соответствующим экспериментальному^{4/}, и затем их распад по одной из схем, перечисленных ниже.

Моделированные события проходили те же критерии отбора, что и экспериментальные. Требовалось, чтобы через установку прошли две заряженные частицы, выходящие из одной точки распадного объема. Накладывались ограничения на геометрические размеры элементов установки и на импульсы частиц (от 7 до 15 ГэВ/с). Рассматривались следующие возможные процессы образования $e-e$ пар.

I. Распады нейтральных каонов с образованием по крайней мере одного P^0 - мезона, который может создать $e-e$ пару либо за счет внутренней конверсии фотона (пара Далитца), либо за счет внешней конверсии в веществе установки от конца распадного объема до второго блока искровых камер (ИК). Количество и состав вещества на этом участке приведено в таблице I. Здесь обозначено: D - количество вещества в $г/см^2$, t - в радиационных единицах.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Таблица I

Вещество	Формула	d	t
Майлар	C ₅ H ₄ O ₂	0,07	1,75 · 10 ⁻³
Сцинтиллятор	СН	0,5	1,2 · 10 ⁻²
Медь	Сu	0,054	4,2 · 10 ⁻³

Угол раствора частиц в конверсионной паре в л.с. определяется выражением /5/

$$\theta_k = 4 (M_e c^2 / E_0) F (E / E_0),$$

где E_0 - полная энергия пары, E - энергия одной частицы, F - функция, зависящая от соотношения энергий частиц в паре. Принимая минимальную и максимальную энергии частиц в паре, указанные выше, получим, что наибольшая величина $\theta_k = 0,6$ мрад. Углы раствора e-e пар, регистрируемых установкой, лежат в пределах от 10 до 50 мрад. Таким образом, конверсионная пара не будет зарегистрирована, за исключением случаев, когда одна из частиц пары рассеивается в веществе до второго блока ИК.

Распады Π^0 -мезонов с образованием пары Далицца моделировались, исходя из двумерной плотности вероятности (см. /6/)

$$G(x, y) dx dy = x^{-1} (1 - x^2 / M_{\Pi}^2)^3 (1 + y^2 + 4M_e / x^2) dx dy;$$

здесь X - эффективная масса электрона и позитрона, $Y = |E_+ - E_-| / (P_+ + P_-)$, E_+ , E_- , P_+ , P_- - энергии и импульсы позитрона и электрона в системе покоя Π^0 -мезона, M_{Π} и M_e - массы Π^0 -мезона и электрона.

Моделирование показало, что угол раствора частиц в паре Далицца в нашем случае не превышает 12 мрад, и эффективность регистрации таких пар не превышает 10^{-8} . Так же, как и для внешней конверсии, одна из частиц пары может рассеяться в веществе установки до второго блока ИК, имитируя пару с большим углом раствора. Этот процесс может происходить либо за счет многократного рассеяния на небольшие углы, либо за счет однократного (резерфордовского) рассеяния на большой угол. Для многократного рассеяния расчеты по известным формулам с использованием данных, приведенных в таблице I, дают величину среднеквадратичного угла $\theta_{\text{мн}} = 0,8$ мрад. Следовательно, отклонение на угол > 10 мрад может происходить только за счет однократного рассеяния.

При прохождении слоя вещества толщиной D г/см², содержащего N ядер с атомным номером Z , вероятность однократного резерфордовского рассеяния для частицы с энергией E на угол $\geq \theta_1$ дается формулой /7/:

$$\Phi_0 (\geq \theta_1) = (NZ/E^2) \text{ctg}^2(\theta_1/2) 1,6 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2.$$

Более подробное рассмотрение процесса рассеяния частиц в веществе Мольер /8/ привело ее к выводу, что реальная вероятность однократного рассеяния примерно в 40 раз больше. Следует также учесть вероятность того, что после рассеяния частица останется в плоскости пары, что приблизительно определяется соотношением $\Delta \theta / \theta_1$, где $\Delta \theta$ - угловая точность определения плоскости пары установкой (≈ 2 мрад). Отсюда вероятность того, что однократное рассеяние будет имитировать e-e пару с углом раствора $\geq \theta_1$:

$$\Phi_1 (\geq \theta_1) = 40 \Phi_0 (\Delta \theta / \theta_1).$$

Используя данные из таблицы I, получим, что для случая однократного рассеяния электрона из пары Далицца на угол $\theta_1 \geq 10$ мрад $\Phi_I (\geq \theta_1) = 10^{-4}$. Для случая однократного рассеяния электрона из конверсионной пары, считая, что на половине толщины вещества, указанного в таблице I, происходит конверсия фотона, а на второй половине - рассеяние, получим $\Phi_I (\geq \theta_1) = 5 \cdot 10^{-5}$.

2. Моделировались распады нейтральных каонов с образованием не менее двух Π^0 -мезонов, каждый из которых создает e-e пару либо за счет внешней, либо за счет внутренней конверсии фотона, при этом установка регистрирует электрон и позитрон из разных пар.

Вероятность образования M e-e пар от N фотонов при вероятности конверсии одного фотона P описывается распределением

$$P_{m,n} = C_n^m P^m (1 - P)^{n-m}.$$

В таблице 2 приведены вероятности P внутренней и внешней конверсии для случаев рождения фотонов от одного или от нескольких Π^0 -мезонов и эффективности регистрации N электрона и позитрона из одной пары (с учетом вероятности рассеяния в веществе установки) или из разных конверсионных пар. Кроме распадов $K_{S,L}$ -мезонов рассматривались случаи рождения Π^0 -мезонов в неупругих взаимодействиях нейтронов с газообразным гелием в распадном объеме. Подробно об этом будет сказано ниже.

Таблица 2

Процесс	Источник e^+e^- пар	Внутренняя конверсия		Внешняя конверсия	
		P	η	P	η
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	Конверсионная пара с рассеянием одной частицы	0,036	10^{-8}	0,11	$5 \cdot 10^{-9}$
$K_{S,L} \rightarrow \pi^0 \pi^0$		0,024	$8 \cdot 10^{-8}$	0,037	$4 \cdot 10^{-8}$
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$		0,012	10^{-8}	0,0186	$5 \cdot 10^{-9}$
$\eta + \text{He} \rightarrow \pi^0 \dots$		0,012	10^{-4}	0,0186	$5 \cdot 10^{-5}$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	e^+e^- из разных пар	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
$K_{S,L} \rightarrow \pi^0 \pi^0$		$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$
$\eta + \text{He} \rightarrow \pi^0 \pi^0 \dots$		"	$7,7 \cdot 10^{-4}$	"	$5 \cdot 10^{-4}$

Пары $e-e$ могут также образоваться в распадах $K_{S,L}$ -мезонов, содержащих фотоны в конечном состоянии, если фотон конвертировался в вещество до второго блока ИК, а электрон или позитрон конверсионной пары был зарегистрирован в комбинации с какой-либо из заряженных частиц - продуктов распада, при этом пион может быть ошибочно идентифицирован как электрон. Рассматривались также процессы, когда электрон возникает за счет распада на лету мюона, либо когда в конечном состоянии имеются два заряженных пиона, каждый из которых ошибочно идентифицируется как электрон.

При анализе экспериментальных $e-e$ пар применялись два критерия идентификации электронов: более мягкий ($e1$) и более жесткий ($e2$). Для этих критериев вероятность ошибочной идентификации пиона как электрона составляет $\epsilon_1 = 0,016$ и $\epsilon_2 = 0,006$.

В таблице 3 приведены перечисленные процессы, эффективность регистрации заряженных продуктов их распадов установкой η_1 (при этом накладывались ограничения на геометрические размеры детекторов элек-

Таблица 3

№	Процесс	η_1	η_2	η_3
1	$K_{S,L} \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
2	$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$
3	$K_L \rightarrow \pi^+ e^- \nu \gamma$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
4	$K_L \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
5	$K_L \rightarrow \gamma \gamma$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$

тронов и мюонов), а также вероятность их регистрации с учетом идентификации пиона как электрона: η_2 (соответствует критерию идентификации $e1$) и η_3 (соответствует критерию $e2$).

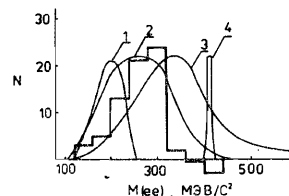
В таблицах 4 и 5 даны известные моды распада K_S - и K_L -мезонов, их относительные вероятности Γ , расчетное число распадов в данном эксперименте N (в скобках указано число распадов, зарегистрированных установкой), и число фоновых $e-e$ пар $N(ee)_1$ и $N(ee)_2$. Первая величина относится к критерию идентификации $e1$, вторая - к критерию $e2$.

Таблица 4

Вклад фоновых $e-e$ пар от известных распадов K_S -мезонов

Мода	Γ	N	$N(ee)_1$	$N(ee)_2$
$\pi^+ \pi^-$	68,6%	$1,6 \cdot 10^5$ (3700)	1,3	0,2
$\pi^0 \pi^0$	34,4%	$4,2 \cdot 10^4$	0,005	0,005
$\pi^+ \pi^- \gamma$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^2$	0,0013	0,0013
$\mu^+ \mu^-$	$< 3,2 \cdot 10^{-7}$			
$e^+ e^-$	$< 3,4 \cdot 10^{-4}$			
$\gamma \gamma$	$< 4 \cdot 10^{-4}$			
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$< 8,5 \cdot 10^{-5}$			
$\pi^0 \pi^0 \pi^0$	$< 3,7 \cdot 10^{-5}$			

Для $e-e$ пар, образованных в процессах (1)-(3) в таблице 3, были построены распределения по инвариантным массам (для (3) путем моделирования, для остальных - из экспериментальных данных). Они показаны на рисунке вместе с распределением $M(ee)$ для избыточных $e-e$ пар. Видно, что в распаде (3) распределение $M(ee)$ близко по форме к распределению избыточных пар, в распаде (2) совпадает с ним частично, в распаде (1) находится вне его. Исключая последний распад, получим суммарную величину фоновых $e-e$ пар в распадах $K_{S,L}$ -мезонов $N(ee) \leq 9,2$ для критерия $e1$ и $N(ee) \leq 3,3$ для критерия $e2$.



Гистограмма - распределение инвариантных масс для избыточных e^+e^- пар. Кривые 1, 2, 4 показывают аналогичное распределение для фоновых процессов (2), (3), (1) в таблице 3. Кривая 3 относится к зарегистрированным установкой адронным парам, в предположении, что обе частицы в паре имеют массы электронов. Все кривые нормированы на максимум гистограммы.

Таблица 5

Вклад фоновых e-e пар от известных распадов K_L -мезонов

Мода	Γ	N	$N(ee)_1$	$N(ee)_2$
$\pi^0\pi^0$	21,5 %	$1,2 \cdot 10^6$	0,4	0,4
$\pi^+\pi^0$	12,4 %	$7,0 \cdot 10^5$ ($7,6 \cdot 10^3$)	2,0	0,3
$\pi^+ \mu^- \nu$	27,1 %	$1,5 \cdot 10^6$ ($3,9 \cdot 10^4$)	0,02	0,01
$\pi^+ e^- \nu$	37,5 %	$2,1 \cdot 10^6$ ($2,7 \cdot 10^4$)		
$\pi^+ e^- \nu \gamma$	1,3 %	$7,3 \cdot 10^4$	6,7	2,6
$\pi^+\pi^-$	0,2 %	$1,1 \cdot 10^4$ (550)	0,09	0,02
$\pi^0\pi^0$	0,1 %	$5,6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+\pi^- \gamma$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	336	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$\gamma\gamma$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^3$	0,06	0,06
$\pi^0\gamma\gamma$	$< 2,4 \cdot 10^{-4}$			
$\mu^+ \mu^-$	$9,1 \cdot 10^{-9}$			
$e^+ \mu^-$	$< 6 \cdot 10^{-6}$			
$\mu^+ \mu^- \gamma$	$2,8 \cdot 10^{-7}$			
$\mu^+ \mu^- \pi^0$	$< 1,2 \cdot 10^{-6}$			
$e^+ e^-$	$< 2 \cdot 10^{-7}$			
$e^+ e^- \gamma$	$1,7 \cdot 10^{-5}$			
$e^+ e^- \pi^0$	$< 2,3 \cdot 10^{-6}$			
$\pi^+\pi^- e^+ e^-$	$< 8,8 \cdot 10^{-6}$			
$\pi^0\pi^+ e^- \nu$	$6,2 \cdot 10^{-5}$			

3. Рассматривались возможные источники образования e-e пар от неупругих взаимодействий нейтронов с ядрами гелия в распадном объеме.

Изучение событий, восстановленных программой геометрической реконструкции, показало, что приблизительно 40 % пар заряженных частиц не относятся ни к одной моде распада $K_{S,L}$ -мезонов. Естественно считать, что они являются результатом неупругих взаимодействий

$n - He$ (адронные пары). Их число в заданном интервале импульсов частиц равно $N(h\bar{h}) = 2,6 \cdot 10^4$. Это число оценивалось также исходя из известного потока нейтронов ($\approx 3 \cdot 10^6$ за цикл), длины пробега до взаимодействия в газообразном гелии ($\approx 3 \cdot 10^5$ см) и данных

по угловым и энергетическим распределениям вторичных частиц при энергиях пучка, близких к нашим. Полученная оценка согласуется с приведенной выше цифрой.

Если каждый адрон в такой паре будет ошибочно идентифицирован как электрон, это будет имитировать e-e пару. Используя приведенные выше значения \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , получим число таких пар $N(ee) = 6,6$ для критерия $e\Gamma^+$ и $N(ee) = 0,9$ для критерия $e\mathcal{E}_2$. На рисунке кривая 3 показывает распределение инвариантных масс $h\bar{h}$ -пар в предположении, что обе частицы в паре имеют массы электронов. Практически оно не отличается от аналогичного распределения для K_{e3} -распадов. В применявшейся процедуре вычитания фона K_{e3} -распадов из общего числа зарегистрированных e-e пар вклад $h\bar{h}$ -пар автоматически учитывался.

Пары e-e могут также возникать от π^0 -мезонов, рождающихся в неупругих взаимодействиях нейтронов с гелием. По данным работ, выполненных на пузырьковых камерах в области энергий 40-70 ГэВ /10/, средняя множественность π^0 -мезонов равна примерно 0,44 от средней множественности заряженных частиц и слабо зависит как от сорта налетающих частиц, так и от сорта мишени. Кинематические распределения нейтральных и заряженных пионов существенно не отличаются. В $\pi^+\pi^-$ и $\pi^0\pi^0$ -взаимодействиях при импульсе первичных частиц 40 ГэВ/с средняя множественность заряженных частиц равняется $\langle n_{\pm} \rangle = 5,4$, средняя множественность π^0 -мезонов $\langle n_{\pi^0} \rangle = 2,4$, а соотношение событий с одним, двумя и тремя π^0 -мезонами составляет 1 : 1,25 : 1.

Число зарегистрированных в эксперименте адронных пар с импульсами частиц больше 7 ГэВ/с равно $N(h\bar{h}) = 3,6 \cdot 10^4$. Пользуясь приведенными выше данными, получим, что в апертуру установки попадет $1,6 \cdot 10^4$ π^0 -мезонов, из них $5 \cdot 10^3$ событий будут содержать по одному π^0 -мезону, столько же по три π^0 -мезона и $6 \cdot 10^3$ по два π^0 -мезона.

Для оценки вклада e-e пар от двух или трех π^0 -мезонов в случае, когда два из них образуют конверсионные пары за счет внешней или внутренней конверсии и установка регистрирует электрон и позитрон из разных пар, эффективность их регистрации определялась по следующей методике. Моделировалось рождение пары $\pi^+\pi^-$ -мезонов в неупругих взаимодействиях, при этом параметры модели эмпирически подбирались так, чтобы геометрические и кинематические распределения пионных пар согласовывались с соответствующими распределениями зарегистрированных $h\bar{h}$ -пар. Далее при этих параметрах моделировалось рождение двух π^0 -мезонов и задавалось условие регистрации электрона и позитрона из разных конверсионных пар. Используя данные таблицы 2 и число событий с рождением двух и трех π^0 -мезонов, получим вклад таких пар $N(ee) \leq 0,15$. Для случая рождения одного π^0 -мезона эти же данные дадут вклад e-e пар $N(ee) \leq 0,03$.

Еще одним источником $e-e$ пар является их прямое рождение в неупругих взаимодействиях $n - He$. По данным экспериментов /II/ этот процесс имеет следующие характеристики:

- распределение по инвариантным массам $M(ee)$ имеет вид спадающей кривой и находится в пределах (200-600) МэВ/с².

- распределение по продольным и поперечным импульсам $e-e$ пар совпадает с аналогичным распределением пар $\Pi^+\Pi^-$ -мезонов, рожденных в этих же взаимодействиях.

- отношение числа $e-e$ пар к числу $\Pi^+\Pi^-$ -пар $R = N(e^+e^-) / N(\Pi^+\Pi^-) = (5,5 \pm 1,7) \cdot 10^{-5}$. В это отношение входит вклад от распадов $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$ и $\omega \rightarrow e^+e^-\Pi^0$, который по оценкам составляет 30%.

Предполагая, что все зарегистрированные установкой h^+h^- -пары относятся к заряженным пионам и пользуясь приведенным соотношением R , получим вклад прямых $e-e$ пар $N(ee) = 1,4$. Оценка вклада прямых $e-e$ пар, сделанная на основании приведенных в упомянутых работах сечений их рождения, не превышает этой величины.

Таким образом, суммарный вклад фоновых $e-e$ пар от всех рассмотренных выше процессов не превосходит величины $N(ee) \leq 12$ для критерия идентификации $e1$ и $N(ee) \leq 5$ для критерия идентификации $e2$, что составляет соответственно 15% и 8% от числа наблюдаемых избыточных $e-e$ пар.

Авторы приносят благодарность М.Ф.Лихачеву за прочтение рукописи и ценные замечания и В.Е.Симонову за помощь в работе.

Литература

1. Сильвестров Л.В. В сб: Краткие сообщения ОИЯИ, №14-86, Дубна, 1986, с.9.
2. Альбрехт К.Ф. и др. ОИЯИ, I-7549, Дубна, 1973.
3. Тахтамышев Г.Г. ОИЯИ, I-80-640, Дубна, 1980.
4. Вестергомби Д. и др. ОИЯИ, I-7739, Дубна, 1974.
5. Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. ИЛ, М., 1962, с.127.
6. Kroll N.M., Wada W., Phys.Rev., 1955, 98, p.1355.
7. Экспериментальная ядерная физика (под ред. Э.Сегре), ИЛ, М., 1955, т.1, с.213.
8. Там же, с.237.
9. Гришин В.Г. и др. ЯФ, 1973, 17, с.1017; Абдурахманов А.У. и др. ЯФ, 1974, 20, с.954.
10. Ангелов Н. и др. ОИЯИ, PI-8187, Дубна, 1974.; Valea O. e.a. Nucl.Phys., 1973, B63, p.114.
11. Adams M.R. e.a. Phys.Rev., 1983, D27, p.1977.
Ballam J. e.a. Phys.Rev.Lett., 1978, 41, p.1207.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 февраля 1986 года.

Сильвестров Л.В., Тахтамышев Г.Г.

PI-86-67

Расчет числа фоновых e^+e^- -пар

в экспериментах по регенерации $K_L - K_S$ -мезонов на дейтерии

В рамках анализа образования e^+e^- -пар на установке БИС в ходе проведения экспериментов по регенерации $K_L - K_S$ -мезонов на дейтерии проведены расчеты и моделирование рождения таких пар от известных фоновых процессов с помощью программы ТВИСТ. В результате было найдено, что вклад фоновых пар не превышает 15% от числа наблюдаемых в этих экспериментах избыточных e^+e^- -пар.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовфй

Silvestrov L.V. Takhtamyshv G.G.

PI-86-67

Calculation of the Number of Background e^+e^- -Pairs
in the Experiments on $K_L - K_S$ Regeneration on Deuterium

The calculations and simulations of e^+e^- -pairs were made from the known background processes in connection with the analysis of the production of these pairs in the experiments performed on BIS installation on $K_L - K_S$ regeneration on deuterium. As a result, it has been found that the contribution of background pairs does not exceed 15% from the number of the observed excess e^+e^- -pairs.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986