ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Э.А. Кураев, А.Н. Перышкин, А. Красулин

ОБ АННИГИЛЯЦИИ e^+e^- В ПЯТЬ ФОТОНОВ

ПРЕПРИНТ 90-61

НОВОСИБИРСК

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Э.А. Кураев, А.Н. Перышкин, А. Красулин

ОБ АННИГИЛЯЦИИ e^+e^- В ПЯТЬ ФОТОНОВ

ПРЕПРИНТ 90-61

НОВОСИБИРСК
1990

Об аннигиляции e^+e^- в пять фотонов

Э.А. Кураев, А.Н. Перышкин, А. Красулин

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

С использованием метода спиральных амплитуд вычислено сечение процесса аннигиляции электрона и позитрона при высокой энергии в пять фотонов. Рассмотрена кинематика, отвечающая событиям, когда в с.ц.и. пучков углы между импульсами фотонов и осью пучков не малы. Приводятся оценки полных сечений многофотонной аннигиляции пары при высоких энергиях. Рассмотрены каналы аннигиляции ортопозитрония в три и пять фотонов. Приведено явное выражение для спиральных амплитуд.

Эта работа состоит из двух различных частей. В первой части мы вычисляем матричный элемент и сечение аннигиляции высокоэнергетической пары e^+e^- в пять фотонов. В ближайшем будущем по мере улучшения параметров e^+e^--накопителей и усовершенствования детекторов может появиться возможность наблюдать процесс квантовой электродинамики $e^+e^- \to 5\gamma$. Кроме самостоятельного интереса как процесс высших порядков теории возмущений в квантовой электродинамике, он представляет существенный фон при изучении процесса $e^+e^- \to \pi^0\pi^0\gamma \to 5\gamma$. Мы оцениваем полные сечения 2-, 3-, 4-, 5-фотонной аннигиляции (определяемые, в основном, кинематикой, когда фотоны в с.ц.и. летят вдоль направления начальных e^+e^--пучков [1, 2]), а также приводим сечение в кинематике, когда все фотоны летят на большой угол. Расчет проводится методом спиральных амплитуд [3].

Несколько модифицировав этот метод [4], мы применяем его для вычисления 2^5 спиральных амплитуд процесса 3γ-аннигиляции ортопозитрония и 2^7 для 5γ-канала. Мы надеемся, что этим способом может быть получена лучшая нижняя граница для отношения 3γ- и 5γ-ширин распада ортопозитрония, чем имеющаяся в литературе [5], использующая прямую свертку сумм 120 амплитуд борновского приближения для 5γ-канала. Вопрос этот актуален в связи с имеющимся на сегодняшний день расхождением теоретических оценок и результатов измерения ширины ортопозитрония [6].

1. Мы приведем сначала известные полные сечения при высоких энергиях аннигиляции e^+e^- в два фотона с учетом радиационных поправок и в три фотона [1]:

$$\sigma^{(2)}+\sigma^{(3)}=\frac{2\pi\alpha^2}{s}(\rho-1)+$$

$$+\frac{2\alpha^3}{s}\left[\frac{1}{6}\rho^3-\frac{1}{4}\rho^2+\left(\frac{\pi^2}{3}-1\right)\rho+2-\frac{\pi^2}{12}\right]+O\left(\frac{m_e^2}{s^2}\right), \qquad (1.1)$$

где $s=(p_+ + p_-)^2=4E^2$, $2E$ — полная энергия в с.ц.и. пучков; $\rho=\ln(s/m_e^2)$. Это сечение велико: для $2E=1$ ГэВ оно составляет $\approx 2\cdot 10^{-30}$ см^2. Причем второе слагаемое в (1.1) составляет $\sim 10\%$ от первого. Кинематика, отвечающая этому сечению, — оба фотона (или все три) летят в узком конусе углов вдоль оси начальных пучков e^+ и e^-. Доля событий с вылетом фотонов на большие углы составляет $\sim 5-3\%$ от полного сечения. Эти события могут быть надежно идентифицированы на эксперименте. Мы приведем также сечение процесса аннигиляции в n фотонов, полученное в дваждылогарифмическом приближении [2]:

$$\sigma_n=\frac{2\alpha^2\pi\rho}{s}\left(\frac{\alpha\rho^2}{\pi}\right)^n\frac{2^{3-n}}{n!(n-2)!}. \qquad (1.2)$$

Сечение 5γ-аннигиляции имеет порядок $\sigma_5=1{,}2\cdot 10^{-35}$ см^2 при $2E=2$ ГэВ. Несколько событий образования 5 фотонов на большие углы в час можно ожидать для установок со светимостью $L\simeq 10^{33}$ см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$.

Дифференциальное сечение 5γ-аннигиляции на большие углы описывается 30 спиральными амплитудами и имеет вид

$$d\sigma^{e^+e^-\to 5\gamma}=\frac{\alpha^5\cdot 2^{-13}}{5!\,\pi^6 s}\prod_1^5\frac{d^3k}{sk_ip_+\cdot k_ip_-\cdot\omega_i}\,\delta^{(4)}\Big(p_+ + p_- - \sum_1^5 k_i\Big)\times$$

$$\times\{(1+P_{45}+P_{35}+P_{25}+P_{15})\,(|m^{++++-}(12345)|^2+$$

$$+|m^{----+}(12345)|^2)+(1+P_{34}+P_{24}+P_{35}+P_{14}$$

$$+P_{25}+P_{15}+P_{24}P_{53}+P_{14}P_{53}+P_{14}P_{25})\times$$

$$\times(|m^{+++--}(12345)|^2+|m^{---++}(12345)|^2)\}, \qquad (1.3)$$

где P_{ik} — операторы перестановки: $P_{12}f(k_1k_2k_3k_4k_5)\simeq f(k_2k_1k_3k_4k_5)$. Спиральные амплитуды, входящие в (1.3), мы определим таким образом:

$$m^{\{\lambda\}}\equiv m^{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5}_{\lambda_+\lambda_-}(12345)\,|_{\lambda_+=+1,\lambda_-=-1}=$$

$$=\bar{V}_{+}(p_{+})\, O^{\mu_1\mu_2\mu_3\mu_4\mu_5}\, U_{-}(p_{-}) \prod_{1}^{5} n(k_i)\, e^{*\lambda_i}_{\mu_i}(k_i)\,, \tag{1.4}$$

где тензорная матрица $O^{\mu_1\mu_2\mu_3\mu_4\mu_5}$ отвечает сумме 5! выражений вида

$$\gamma^{\mu_5}\frac{\hat{S}_5}{S_5^2}\gamma^{\mu_4}\frac{\hat{S}_{45}}{S_{45}^2}\gamma^{\mu_3}\frac{\hat{r}_{12}}{r_{12}^2}\gamma^{\mu_2}\frac{\hat{r}_1}{r_1^2}\gamma^{\mu_1}, \qquad r_1=p_{-}-k_1\,,$$

$$S_5=-p_{+}+k_5\,, \qquad r_{12}=p_{-}-k_1-k_2\,, \qquad S_{45}=-p_{+}+k_4+k_5\,, \tag{1.5}$$

соответствующих определенным диаграммам Фейнмана. Спиральные состояния позитрона и электрона описываются спинорами [4]:

$$U_{-}(p_{-})=\omega_{-}U(p_{-})\,, \qquad \bar{V}_{+}(p_{+}) = \bar{V}(p_{+})\,\omega_{+}\,, \qquad \omega_{\pm}=\frac{1}{2}(1\pm\gamma_5)\,. \tag{1.6}$$

Спиральные состояния фотонов описываются 4-векторами $e^{*(\lambda)}_{\mu}$:

$$\hat{e}^{*(\lambda)}_{k}=\gamma^{\mu}e^{*(\lambda)}_{\mu}(k)=n^{-1}(k)\,[\,\hat{p}_{+}\hat{p}_{-}\hat{k}\omega_{-\lambda}-\hat{k}\hat{p}_{+}\hat{p}_{-}\omega_{\lambda}]\,, \tag{1.7}$$

$$\lambda=\pm\,; \qquad n(k)=(s\cdot p_{+}k\cdot p_{-}k)^{1/2}.$$

Опуская простые промежуточные вычисления, мы приведем окончательное выражение для четырех типов амплитуд, входящих в (1.3):

$$m^{++++-}(12345)=S^{9/2}k_{5\perp}\sum_{S(1234)} S_{45}^{-2}\,r_{12}^{-2}\,Z(k_4,S_{45})\,Z(k_3,r_{12})\,Z(k_2,r_1)\,;$$

$$m^{----+}(12345)=-S^{9/2}\sum_{S(1234)} k_{1\perp}r_{45}^{-2}\,S_{12}^{-2}\,Z(k_4,r_5)\,Z(k_3,r_{45})\,Z(k_2,S_{12})\,;$$

$$m^{+++--}(12345)=S^{9/2}\sum_{S(123)S(45)} \{r_{12}^{-2}\,S_{45}^{-2}\,Z^{*}(S_5,k_4)\,Z(k_3,r_{12})\,Z(k_2,r_1)\,S_{45\perp}+$$

$$+r_{12}^{-2}\,S_{35}^{-2}\,Z^{*}(k_3,S_{35},k_4)\,Z(k_2,r_1)\,r_{12\perp}\,S_{5\perp}+$$

$$+r_{14}^{-2}\,S_{35}^{-2}\,Z^{*}(k_2,r_{14},k_4)\,Z(k_3,S_{35})\,S_{5\perp}\,r_{1\perp}\}\,;$$

$$m^{---++}(12345)=-S^{9/2}\times$$

$$\times\sum_{S(45)S(123)} \{r_{43}^{-2}\,S_{12}^{-2}\,Z^{*}(S_1,k_2)\,Z^{*}(S_{12},k_3)\,Z(k_4,r_5)\,r_{45\perp}+$$

$$+r_{53}^{-2}\,S_{12}^{-2}\,Z^{*}(S_1,k_2)\,Z^{*}(k_4,r_{53},k_3)\,S_{12\perp}\,r_{5\perp}+$$

$$+r_{53}^{-2}\,S_{14}^{-2}\,Z^{*}(k_4,S_{14},k_2)\,Z^{*}(r_{53},k_3)\,S_{1\perp}\,r_{5\perp}\}\,. \tag{1.8}$$

Входящие в (1.8) величины определены так

$$a=(a_0, a_z, a_x, a_y)\,, \quad a_\perp=a_x+ia_y\,, \quad a^*_\perp=a_x-ia_y\,; \quad a_\pm=a_0\pm a_z\,;$$
$$Z(a,b)=a_-b_+-a^*_\perp b_\perp\,; \qquad Y(a,b)=a_-b_\perp-a_\perp b_-\,;$$
$$Z(a,b,c)=C_+Y(a,b)-C_\perp Z^*(a,b)\,. \tag{1.9}$$

Знак $S(123)$ в (1.8) означает суммирование по перестановкам (123).

2. При оценке 5γ-ширины ортопозитрония можно считать электрон и позитрон покоящимися:

$$\hat{p}_+=\hat{p}_-=\gamma^0\,, \qquad m=1\,. \tag{2.1}$$

Будем полагать, что спин позитрония в системе его покоя направлен по оси z. Воспользуемся соотношением [7]:

$$\bar{V}\hat{O}U\to\mathrm{Sp}\,\hat{O}(U\bar{V})\to\mathrm{Sp}\,O\frac{1}{2}(1+\gamma_0)\,\gamma_3; \qquad (U\bar{V})_{\alpha\beta}=\begin{pmatrix}0 & \sigma_3\\ 0 & 0\end{pmatrix}_{\alpha\beta}. \tag{2.2}$$

В отличие от случая высоких энергий, отличными от нуля будут амплитуды как с одинаковыми, так и с обратными спиральностями электрона и позитрона. Таким образом, процесс $O_{Ps}\to3\gamma$ описывается 32, а $O_{Ps}\to5\gamma$ 128 спиральными амплитудами. Надо рассматривать половину из них, поскольку, в силу сохранения четности, амплитуды инвариантны относительно замены $\{\lambda\}\to\{-\lambda\}$. Благодаря Бозе-статистике фотонов количество независимых амплитуд, которые надо вычислить оказывается равным 8 и 12, соответственно.

Для описания векторов поляризации фотонов введем два вспомогательных вектора:

$$n_1=\frac{1}{\sqrt{2}}\,(1,1,0\,0)\,, \qquad n_2=\frac{1}{\sqrt{2}}\,(1,-1,0\,0)\,,$$
$$n_1^2=n_2^2=0\,, \qquad n_1n_2=1\,. \tag{2.3}$$

Следуя [3], получим:

$$\hat{e}^{*(\lambda)}(k_i)=\frac{1}{2\omega_i\sin\theta_i}(\hat{k}_i\mu\omega_\lambda-\mu\hat{k}_i\omega_{-\lambda})\,,$$

$$\omega_\lambda=\frac{1}{2}(1+\lambda\gamma_5), \quad \lambda=\pm1, \quad \mu=\hat{n}_1\hat{n}_2=1+\gamma_0\gamma_3, \quad \theta_i=(\widehat{\vec{k}_i,z})\,. \tag{2.4}$$

Мы искусственно ввели сингулярность $\sin\theta_i=0$, которая, разумеется, исчезнет в полном выражении для любой из спиральных амплитуд.

Рассмотрим сначала канал трехфотонной аннигиляции. Просуммированный по поляризациям фотонов квадрат модуля матричного элемента имеет вид

$$M_3 \equiv \sum_{\{\lambda\}} |M^{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}_{\lambda_+\lambda_-}|^2 = 2^{-7}\left(\left(\prod_1^3 x_i \sin\theta_i\right)^2\right)^{-1}\{|m^{+++}_{++}|^2 + |m^{+++}_{+-}|^2 +$$
$$+|m^{---}_{++}|^2 + |m^{---}_{+-}|^2 + (1+P_{32}+P_{31})(|m^{++-}_{++}|^2 +$$
$$+|m^{++-}_{+-}|^2 + |m^{--+}_{++}|^2 + |m^{--+}_{+-}|^2)\};$$

$$m^{+++}_{\alpha\beta} = \sum_{S(123)}\sum_{i,j=\pm}(x_1x_3)^{-1}\frac{1}{4}\,\mathrm{Sp}\,\Pi_\beta T^+_{\alpha i}\,Q^+_{ij}\,R^+_{j\beta};$$

$$m^{---}_{\alpha\beta} = \sum_{S(123)}\sum_{ij=\pm}(x_1x_3)^{-1}\frac{1}{4}\,\mathrm{Sp}\,\Pi_\beta T^-_{\alpha i}\,Q^-_{ij}\,R^-_{j\beta};$$

$$m^{++-}_{\alpha\beta} = \sum_{S(12)}\sum_{ij}(1+P_{23}+P_{13})(x_1x_3)^{-1}\frac{1}{4}\,\mathrm{Sp}\,\Pi_\beta T^-_{\alpha i}\,Q^+_{ij}\,R^+_{j\beta};$$

$$m^{--+}_{\alpha\beta} = \sum_{S(12)}\sum_{ij}(1+P_{23}+P_{13})(x_1x_3)^{-1}\frac{1}{4}\,\mathrm{Sp}\,\Pi_\beta T^+_{\alpha i}\,Q^-_{ij}\,R^-_{j\beta}, \qquad (2.5)$$

где

$$\alpha,\beta,i,j=\pm; \qquad \Pi_+ = \omega_+(1+\gamma_0)\gamma_3\omega_+ = \gamma_0\gamma_3\omega_+;$$
$$\Pi_- = \omega_-(1+\gamma_0)\gamma_3\omega_- = \gamma_3\omega_-;$$

а величины R, Q, T имеют вид:

$$T^i_{lm} = \omega_l(\hat{k}_3\mu\omega_i - \mu\hat{k}_3\omega_{-i})\,\omega_m, \qquad R^i_{lm} = T^i_{lm}\,(k_3 \to k_1),$$
$$Q^i_{lm} = \omega_l(-N_3+1)(k_2\mu\omega_i - \mu k_2\omega_{-i})(N_1+1)\omega_m, \qquad N_i = \gamma_0 - \hat{k}_i. \qquad (2.6)$$

Простое вычисление дает:

$$T^-_{+-} = k_3\mu\omega_-; \quad T^+_{+-} = -\mu k_3\omega_-; \quad T^+_{-+} = k_3\mu\omega_+, \quad T^-_{-+} = -\mu k_3\omega_+;$$
$$Q^+_{++} = -(N_3k_2\mu + \mu k_2N_1)\omega_+; \quad Q^-_{++} = (N_3\mu k_2 + k_2\mu N_1)\omega_+;$$
$$Q^+_{+-} = -(N_3k_2\mu N_1 + \mu k_2)\omega_-; \quad Q^-_{+-} = (N_3\mu k_2 N_1 + k_2\mu)\omega_-;$$
$$Q^+_{-+} = (N_3\mu k_2 N_1 + k_2\mu)\omega_+; \quad Q^-_{-+} = -(N_3k_2\mu N_1 + \mu k_2)\omega_+;$$
$$Q^+_{--} = (N_3\mu k_2 + k_2\mu N_1)\omega_-; \quad Q^-_{--} = -(N_3k_2\mu + \mu k_2 N_1)\omega_-. \qquad (2.7)$$

В качестве контроля вычислений можно использовать

$$\sum_{\{\lambda\}} |M_{\lambda_+\lambda_-}^{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}|^2 = \frac{64}{(x_1x_2x_3)^2}\left(x_1^2(1-x_1)^2 + x_2^2(1-x_2)^2 + x_3^2(1-x_3)^2\right), \tag{2.8}$$

$$x_i = \frac{\omega_i}{m}; \qquad \sum x_i = 2.$$

Рассмотрим матричный элемент 5γ-аннигиляции ортопозитрония. По аналогии с (2.5) получим

$$\begin{aligned} M_5 \equiv \sum_{\{\lambda\}} |M_{\lambda_+\lambda_-}^{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_5}|^2 = 2^{-7}\prod_1^5 (x_i \sin\theta_i)^{-2}\{ &|m_{++}^{+++++}|^2 + |m_{+-}^{+++++}|^2 + \\ + |m_{++}^{-----}|^2 + |m_{+-}^{-----}|^2 + &(1 + P_{15} + P_{25} + P_{35} + P_{45}) \times \\ \times (|m_{++}^{++++-}|^2 + |m_{+-}^{++++-}|^2 + &|m_{++}^{----+}|^2 + |m_{+-}^{----+}|^2) + \\ + (1 + P_{43} + P_{42} + P_{41} + P_{35} + P_{25} + &P_{15} + P_{24}P_{53} + P_{14}P_{53} + P_{14}P_{25}) \times \\ \times (|m_{++}^{+++--}|^2 + |m_{+-}^{+++--}|^2 + &|m_{++}^{---++}|^2 + |m_{+-}^{---++}|^2)\}. \end{aligned} \tag{2.9}$$

Спиральные амплитуды имеют вид:

$$m_{\alpha\beta}^{\lambda\lambda\lambda\lambda\lambda} = \sum_{S(12345)} \sum_{ij} \chi \frac{1}{4} \operatorname{Sp} \Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda}; \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned} m_{\alpha\beta}^{\lambda\lambda\lambda\lambda-\lambda} = \sum_{S(1234)} \sum_{ij} \frac{1}{4} \operatorname{Sp} \{ &\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{-\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + P_{45}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda-\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + \\ &+ P_{35}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{-\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + P_{25}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{-\lambda\lambda} + P_{15}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda-\lambda}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\alpha\beta}^{\lambda\lambda\lambda-\lambda-\lambda} = \sum_{S(123)\,S(45)} \sum_{ij} \frac{1}{4} \operatorname{Sp} \{ &\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{-\lambda-\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + P_{43}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{-\lambda\lambda} Q_{ij}^{-\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + \\ + P_{42}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{-\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{-\lambda\lambda} + &P_{14}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{-\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda-\lambda} + P_{15}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda-\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{\lambda-\lambda} + \\ &+ P_{25}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda-\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{-\lambda\lambda} + P_{35}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda-\lambda} Q_{ij}^{-\lambda} R_{j\beta}^{\lambda\lambda} + \\ &+ P_{15}P_{34}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{-\lambda} R_{j\beta}^{\lambda-\lambda} + \\ &+ P_{15}P_{24}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{\lambda} R_{j\beta}^{-\lambda-\lambda} + P_{34}P_{25}\chi\Pi_\beta T_{\alpha i}^{\lambda\lambda} Q_{ij}^{-\lambda} R_{j\beta}^{\lambda-\lambda}\}, \end{aligned}$$

где

$$\lambda = \pm; \quad \alpha = +; \quad \beta = \pm; \quad \chi = |(N_1^2 - 1)(N_5^2 - 1)(N_{12}^2 - 1)(N_{45}^2 - 1)|^{-1};$$

$$N_i = p - k_i; \qquad N_{ij} = p - k_i - k_j.$$

Величины $Q^i_{\alpha\beta}$ получатся из аналогичных величин (2.7) заменой

$$N_3 \to N_{45}, \quad N_1 \to N_{12}, \quad k_2 \to k_3. \tag{2.11}$$

Величины

$$R^{\lambda_2\lambda_1}_{ij} = \omega_i e^{*\lambda_2}(k_2)(N_1+1)\, e^{*\lambda_1}(k_1)\omega_j \quad (2x_2 \sin\theta_2)(2x_1 \sin\theta_1)$$

имеют вид

$$\begin{aligned}
&R^{++}_{++} = -\mu k_2 k_1 \mu; \quad R^{+-}_{++} = \mu k_2 \mu k_1;\\
&R^{-+}_{++} = k_2 \mu k_1 \mu; \quad R^{--}_{++} = -k_2 \mu\mu k_1;\\
&R^{++}_{--} = -k_2 \mu\mu k_1; \quad R^{+-}_{--} = k_2 \mu k_1 \mu;\\
&R^{-+}_{--} = \mu k_2 \mu k_1; \quad R^{--}_{--} = -\mu k_2 k_1 \mu;\\
&R^{++}_{+-} = \mu k_2 N_1 \mu k_1; \quad R^{+-}_{+-} = -\mu k_2 N_1 k_1 \mu;\\
&R^{-+}_{+-} = -k_2 \mu N_1 \mu k_1; \quad R^{--}_{+-} = k_2 \mu N_1 k_1 \mu;\\
&R^{++}_{-+} = k_2 \mu N_1 k_1 \mu; \quad R^{+-}_{-+} = -k_2 \mu N_1 \mu k_1;\\
&R^{-+}_{-+} = -\mu k_2 N_1 k_1 \mu; \quad R^{--}_{-+} = \mu k_2 N_1 \mu k_1.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

И, наконец, величины

$$T^{\lambda_5\lambda_4}_{+j} = \omega_+ e^{*\lambda_5}(k_5)(-N_5+1)\, e^{*\lambda_4}(k_4)\omega_j(2x_4 \sin\theta_4)(2x_5 \sin\theta_5);$$

$$\begin{aligned}
&T^{++}_{++} = -\mu k_5 k_4 \mu; \quad T^{+-}_{++} = \mu k_5 \mu k_4;\\
&T^{-+}_{++} = k_5 \mu k_4 \mu; \quad T^{--}_{++} = -k_5 \mu\mu k_4;\\
&T^{++}_{+-} = -\mu k_5 N_5 \mu k_4; \quad T^{+-}_{+-} = \mu k_5 N_5 k_4 \mu;\\
&T^{-+}_{+-} = k_5 \mu N_5 \mu k_4; \quad T^{--}_{+-} = -k_5 \mu N_5 k_4 \mu.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Пользуясь приведенными величинами, мы вычисляем величину (в [5] для нее получено $R \approx 1 \cdot 10^{-6}$):

$$R = \frac{\Gamma_5}{\Gamma_3} = \frac{(4\pi\alpha)^2}{20} \frac{\int M_5\, d\Gamma_5}{\int M_3\, d\Gamma_3},$$

где величины $M_{3,5}$ даны в (2.5) и (2.9);

$$d\Gamma_3 = \prod_{i=1}^{3} \frac{d^3 k_i}{2\omega_i (2\pi)^3} \delta^{(4)}(2p - k_1 - k_2 - k_3), \quad p = (1, 0, 0, 0),$$

$$d\Gamma_5 = \prod_{0=1}^{5} \frac{d^3 k_i}{2\omega_i (2\pi)^3} \delta^{(4)} (2p - k_1 - k_2 - k_3 - k_4 - k_5) \, .$$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Eidelman S.I., Kuraev E.A.* Nucl. Phys., 1978, v.B143, p.353.
   Berends F.A., Kleiss R. DESY, 1980, 803/122.
2. *Горшков В.Г., Липатов Л.Н.* ЯФ, 1969, т.9, с.818.
3. *De Cansmaecker P. et al.* Phys. Lett., 1981, v.105B, p.215.
4. *Кураев Э.А., Перышкин А.Н.* Препринт ИЯФ 85-69; ЯФ, 1985, т.42, с.1195.
5. *Adkins G. et al.* Phys. Rev., v.A28, p.1164;
   Lepage P. Phys. Rev., 1984, v.A28, p.3090.
6. *Wesfbrook C.I. et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, v.58, p.1328, 2153.
7. *Adkins G.* Phys. Rev., 1984, v.A31, p.1250.

Э.А. Кураев, А.Н. Перышкин, А. Красулин

Об аннигиляции e^+e^- в пять фотонов

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 11 мая 1990 г.
Подписано в печать 17.05 1990 г. МН 08627.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.
Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 61.

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапринте Института ядерной физики СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.