Вишинеску М. и Дубовик В.
Б1-2-8446.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-2-8446

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1975г.

О [redacted] РЕАКЦИИ $\pi^- p \to n\gamma\gamma'$

I. Расчет простейших полюсных диаграмм

М.Вишинеску, В.Дубовик

Объединенный институт ядерных исследований

Произведен расчет низших диаграмм теории возмущений, описывающих реакцию $\pi^- p \to n\gamma\gamma'$, с учетом вкладов Δ (1232) в промежуточных состояниях доминирующих диаграмм.

Реакция $\pi^- p \to n\gamma\gamma'$ может идти за счет нескольких процессов, каждый из которых несет важную информацию о структуре и динамике взаимодействия участвующих в них частиц.

Изучение этих процессов может дать новую информацию для дисперсионного подхода, правил сумм и низкоэнергетических теорем и т.д. Наиболее интересен, по-видимому, процесс распада, образовавшегося в результате перезарядки пиона $\pi^0 \to \gamma\gamma'$, когда масса пиона не лежит на массовой поверхности $q_\gamma'^2 \neq \mu_0^2$. Данные о поведении вершинной функции $\pi^0\gamma\gamma'$ позволили бы проверить такие капитальные предположения, как гипотеза PCAC и ее модификации, а также моделей, позволяющих вычислять структурные параметры, вводимые при модификации PCAC. Изучение этого процесса помогло бы выяснить и аналитические свойства амплитуды перезарядки в области $0 < q_\gamma'^2 < \mu_0^2$.

Поэтому, чтобы выяснить общую картину реакции, оценить порядки сечений и возможность выделения информации об отдельных процессах, в данной работе рассчитываются полюсные диаграммы с простейшими лагранжианами взаимодействий для всех вершин (по книге Швебера[3]).

§ I. Обозначения, кинематика

Кинематические обозначения введем с помощью диаграммы

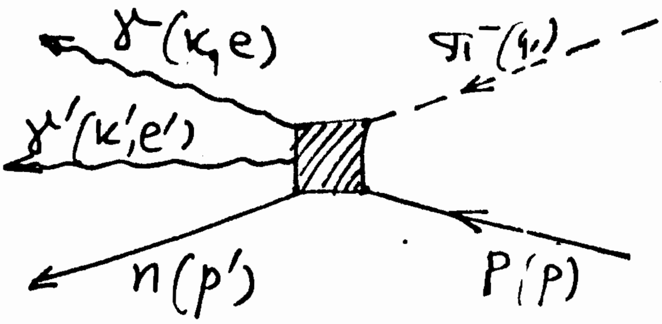


Рис. 0

Используется метрика $(ab)=a_0b_0-\vec{a}\vec{b}$ и следующие обозначения и численные значения физических величин (все энергии в Мэв)[4]:

m (938,28) – масса нуклона (протона);

m_n (939,57) – масса нейтрона;

μ (I39,57) – масса π^- -мезона;

μ_0 (I34,96) и Γ_0 ($7{,}8\cdot 10^{-6}$) – масса и ширина π^0 -мезона;

M (I232) и Γ_Δ (II0) – масса и ширина Δ -резонанса;

$\frac{G^2}{4\pi}=14{,}64$ [5]; $\alpha=\frac{e^2}{4\pi}=\frac{1}{137}$; $F=\frac{1}{4\cdot 10^4}$ (Мэв) – константа распада $\pi^0\to\gamma\gamma'$; $\frac{f^2_{\Delta^{++}p\pi^+}}{4\pi}=0{,}36$ [6a]; $\mu_p=\frac{1{,}79}{m}$; $\mu_n=\frac{-1{,}91}{m_n}$.

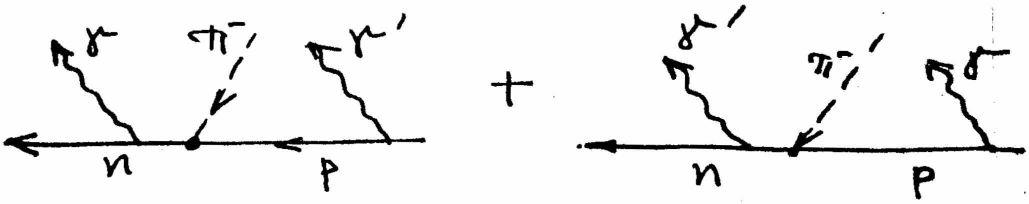
Амплитуду процесса запишем в виде[3]:

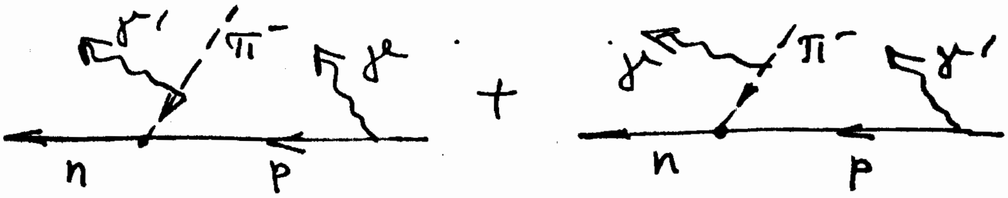
$$T_{\pi p\to n\gamma\gamma'}=-i\frac{e^2}{(2\pi)^{7/2}}\sqrt{\frac{m^2}{8kk'\omega_q p_0 p_0'}}\,\delta(p+q-p'-k-k')M,$$

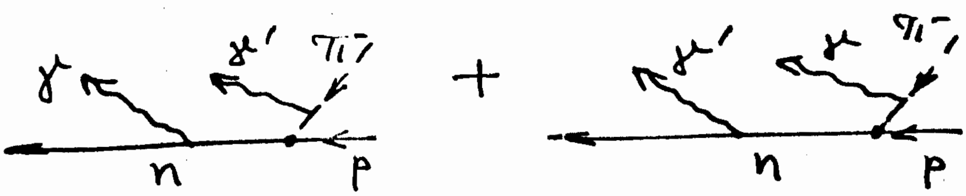
а сечение

$$d\sigma=\frac{\alpha^2 m^2}{16\pi^3}\frac{m^2}{[(pq)-\mu m]^{1/2}}|M|^2\frac{\delta(m+\omega_q-k-k'-p_0')}{p_0'}\frac{d^3k\,d^3k'}{k\,k'}.$$

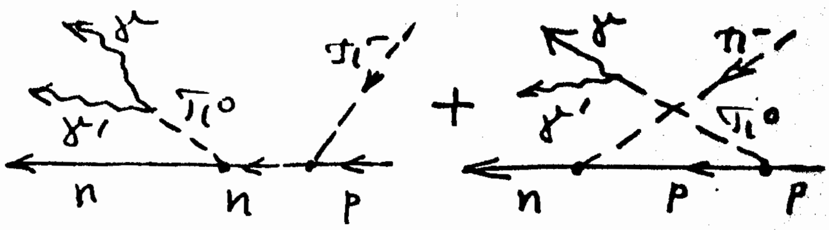
Далее перечислим промежуточные варианты:

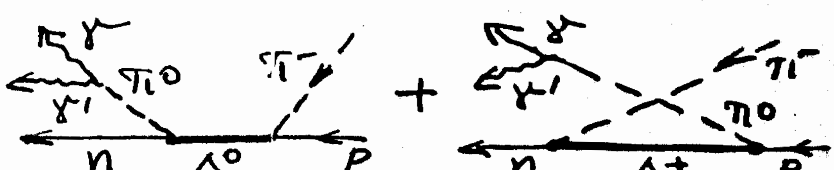
$M_4 =$ 

$M_5 =$ 

$M_6 =$ 

Заметим, что на диаграммах 2–4 имеются два нулонных промежуточных состояния, так что $M_{2,3,4} \sim \frac{1}{vn^2}$, а потому для наших энергий (§ 1) вкладами $(M_2 + M_3 + M_4)^2$ и $(M_2 + M_3 + M_4)\cdot(M_5^* + M_6^*) +$ + комп. сопр. пренебрежем. Тем более пренебрежем для этих процессов каналом с промежуточным состоянием Δ (1232). Для наиболее же интересующего нас процесса с распадом $\pi^0 \to \gamma\gamma'$ учтем оба канала:

$M_7 + M_8 \equiv M_{78} =$ 

$M_9 + M_{10} \equiv M_{910} =$ 

Отметим, что поскольку для частиц со спином 3/2 не решен вопрос о виде пропагатора вне массовой оболочки, мы используем общий

	M_1^*	M_2^*	M_3^*	M_4^*	M_5^*	M_6^*	M_7^*	M_8^*	M_9^*	M_{10}^*
M_1	x	x	x	x	x	0	0	0	0	0
M_2	x						x	x	x	x
M_3	x		не считались				x	x	x	x
M_4	x						x	x	x	x
M_5	x				x	x	x	x	x	x
M_6	0				x	x	x	x	x	x
M_7	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M_8	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M_9	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M_{10}	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Табл. 1

его вид, приведенны в работе /6а/. При этом M_9, например, выглядит так:

$$M_9 = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} e_\mu e'_\nu K_\rho K'_\sigma \frac{F(2kk')}{2kk' - \mu_0^2 + i\mu_0\Gamma_\mu} \frac{\sqrt{2}}{3}\left(\frac{f}{\mu}\right)^2 \cdot$$

$$\cdot \bar{u}(p')\left[(k+k')_\alpha + \varkappa\gamma_\alpha(\hat{k}+\hat{k}')\right]\cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{\hat{p}+\hat{q}+M}{(p+q)^2 - M^2 - iM\Gamma_\Delta} \left[-g_{\alpha\beta} + \frac{1}{3}\gamma_\alpha\gamma_\beta + \frac{2}{3M^2}(p+q)_\alpha (p+q)_\beta - \right.\right.$$

$$\left. - \frac{1}{3M}\left(p_\alpha\gamma_\beta + q_\alpha\gamma_\beta - \gamma_\alpha p_\beta - \gamma_\alpha q_\beta\right)\right] + \frac{1}{3M^2}\frac{A+1}{2A+1}\left[\gamma_\alpha\left(\frac{1}{2}\cdot\right.\right.$$

$$\left.\left. \cdot\frac{A+1}{2A+1}(\hat{p}+\hat{q}) + \frac{A}{2A+1}M\right)\gamma_\beta - \left(\gamma_\alpha p_\beta - \gamma_\alpha q_\beta + p_\alpha\gamma_\beta + q_\alpha\gamma_\beta\right)\right]\right\} \cdot$$

$$\cdot (q_\beta + x\gamma_\beta \hat{q})\, u(p);$$

$$M_{910} = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} e_\mu e'_\nu K_\rho K'_\sigma \frac{F(2kk')}{(2kk' - \mu_0^2 + i\mu_0\Gamma_\mu)} \frac{\sqrt{2}}{3}\left(\frac{f}{\mu}\right)^2 \cdot$$

$$\cdot \bar{u}(p')\left[B + \hat{q}C\right] u(p),$$

где $\varkappa$ и A - некоторые постоянные величины (о выборе их см. /6а/, а также /6в/).

Произведем расчет вероятностей перечисленных процессов (с суммированием или с усреднением по спиновым состояниям частиц). Структура полученного выражения воспроизводится таблице I с очевидными обозначениями. Результаты расчета приведены в приложениях I и 2.

§ 3. Обсуждение результатов

Прежде всего отметим, что имеется согласие между нашими результатами и результатами Балдина /I/, оценивавшего только M_I, и Лапидуса и Мусаханова /2/, рассматривавших двойной радиационный захват протонами остановившихся π^--мезонов. При подстановке в наши выражения $q=(\mu,0)$ удается выделить члены, совпадающие с формулами (I3)-(I5) работы /2/. Приведем несколько оценок, сделанных для случая, рассмотренного в /2/.

При облучении π^--мезонами протонов кроме реакции $\pi^- p \to n\gamma\gamma'$ идут и более изученные реакции $\pi^- p \to n\pi^0$ и $\pi^- p \to n\gamma$. При захвате остановившихся пионов кинетические энергии нейтронов ограничены в последних двух реакциях интервалами W = (0,42÷8,9) Мэв и W = (0÷8,9) Мэв соответственно. Укажем различие зависимостей от W вероятностей излучения двух фотонов в интервале W =(0÷8,9) Мэв отрицательным пионом $\left(|M_1|^2\right)$ и нейтральным пионом $\left(|M_7+M_8|^2\right)$. Для простоты рассмотрим случай разлета фотонов в противоположных направлениях $\vec{k}=-\vec{k}'$, $\varphi_{kk'}=\pi$.

Если при W_{max} = 8,9 Мэв отношение $R=\frac{|M_1|^2}{|M_7+M_8|^2}=\frac{0,8\cdot 10^{-10}}{0,4\cdot 10^{-13}}=2\cdot 10^3$, то на пороге перезарядки R уже равно $R=\frac{0,15\cdot 10^{-10}}{0,25\cdot 10^{-10}}=3/5$. Поэтому именно вблизи этой энергии Лапидус и Мусаханов /2/ и предлагают определять знак амплитуды $\pi^0\to\gamma\gamma'$ по интерференционному члену $(M_7+M_8)(M_I^*+\ldots)$ + к.с. Заметим, что ниже порога перезарядки при $W\to 0$ вклад $|M_1|^2\sim W\to 0$, вклады в вероятность испускания фотонов нуклонами остаются на предыдущем уровне $\approx 0,1\,|M_7+M_8|^2_{W=0,42}$, а матричные элементы $|M_7+M_8|^2$ возрастают еще в I6 раз, так как пропагатор π^0 -мезона превращается в $(a_\mu \gamma)^{-1}$. т.о. для выделения процесса излучения двух фотонов за счет распада выгодны большие углы разлета протонов и отсутствие отдачи у нейтрона.

Полный анализ хода вероятностей в интервале передач $q'^2 = (0 \div 7{,}1)\mu_0^2$ предполагается сделать с помощью ЭВМ.

§ 4. О формфакторе распада $\pi^0 \to \gamma\gamma'$

Здесь мы приведем результаты, полученные с помощью моделей, в которых вводятся только известные частицы. Прежде всего приведем результаты (см., например, /7/), следующий из расчета треугольной диаграммы с промежуточными нуклонами, впервые рассмотренной Стейнбергером:

$$F(q'^2, k^2=0, k'^2=0) = 1 + \frac{1}{12}\frac{q'^2}{m^2} + \frac{1}{90}\left(\frac{q'^2}{m^2}\right)^2 + \ldots \quad (q^2 < 4m^2).$$

Формула предсказывает рост формфактора в интервале $(0 \div 7{,}1)\mu_0^2$ на 1,3%.

Бо́льшие численные предсказания, очевидно, можно ожидать от моделей, использующих идею векторной доминантности. Епифанов и Филиппов рассмотрели в лестничном приближении уравнение Эдвардса для вершинной функции неперенормируемого PVV-взаимодействия. Их результат для нашего случая дает

$$F(q'^2, k^2=0, k'^2=0) = 1 + 0{,}33\frac{q'^2}{m_\rho^2}\left(1 + \frac{1}{6}\frac{q'^2}{m_\rho^2}\right) + \ldots \quad (q'^2 < m_\rho^2).$$

В этой модели в точке $q'^2 = 7{,}1\mu_0^2$ формфактор возрастает уже на 7,54%.

Из этих оценок следует, что в некой модели, объединяющей эти два механизма и учитывающей более высокие резонансы, мы получим рост порядка 10%.

Авторы благодарны С.Б.Герасимову, А.Б.Говоркову, Б.Б.Говоркову, В.Г.Замиралову, Л.И.Лапидусу, А.Т.Филиппову и особенно Л.Л.Неменову за полезные обсуждения вопросов, связанных с этой работой.

Приложение 1

Выражения для произведений матричных элементов, перечисленных в таблице 1.

$$|M_1|^2 = \frac{pp'-m^2}{m^2}\;\frac{G'^2(\mu^2-2kq-2k'q+2kk')\,E(0)}{(qk)^2(qk')^2(qk+qk'-kk')^2};$$

$$M_1M_2^* + M_1^*M_2 = -\frac{G(\mu^2-2kq-2k'q+2kk')\,G(\mu^2)}{2m^2(qk)(qk')(qk+qk'-kk')(kk'-pk-pk'}$$

$$\cdot\frac{1}{pk}\Big\{-(p'q)(pk)E(e,e') + (kp)E(q,p') + (p'k)(pq)E(e,e') -$$

$$-(pq)E(p',k) - (pk)E(p',q) + (pp')E(q,k) - (pp')(qk)E(e,e'$$

$$-2\mu_p^2m^2\big[(p'q)(kk')E(e,e') - (p'q)E(k',k) - (kk')E(q,p')$$

$$+(qk)E(k',p') + (p'k')(qk)E(e,e') - (p'k)E(k',q) +$$

$$+(p'k')E(q,k) +$$

$$+(p'k)(qk')E(e,e') + (kk')E(p',q) - (qk')E(p',k) -$$

$$-(pk)E(k',q) + (pk)(qk')E(e,e') + (pk)E(k',q) -$$

$$-(pk)(qk')E(ee') + (qk)(pk')E(e,e') - (pk')E(q,k) -$$

$$-(pq)(kk')E(e,e') + (pq)E(k',k)\big] + m^2(qk)E(e,e') -$$

$$-m^2E(q,k) - 2\mu_p^2(pk)\big[-(p'q)(pk')E(e,e') +$$

$$+(pk')E(q,p') - (pq)E(k',p') + (p'k')(pq)E(e,e') -$$

$$-(pk')E(p',q) + 2(pp')E(k',q) - (pp')E(k',q) -$$

$$-(pp')(qk')E(e,e')\big]\Big\} + (k\leftrightarrow k');$$

$$M_1 M_3^* + M_1 M_3^* =$$

$$= - \frac{4\,G(\mu^2 - 2qk - 2qk' + 2kk')\,G(\mu^2)\,\mu_n^2}{m^2 (qk)(qk')(qk + qk' - kk')(2pq + \mu^2)(2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)} \cdot$$

$$\Big\{ (p'k')\big[-(pq)E(p',k) + (pk)E(p',q) + (p'k)(pq)E(e,e') -$$

$$-(p'q)(pk)E(e,e') + (pp')(qk)E(e,e') - (pp')E(q,k)\big] +$$

$$+(kk')(pq)E(p',p') - (qk')(p'k)E(p',p') +$$

$$+(pk')(qk)E(p,p') - (p'k)(pq)E(k',p') -$$

$$-(p'k)(pk')E(q,p') + (p'q)(pk)E(k',p') -$$

$$-(pp')(qk)E(k',p') + (pp')(kk')E(q,p') +$$

$$+ m^2\big[-(pq)(kk')E(e,e') + (pq)E(k',k) -$$

$$-(pk)E(k',q) + (pk)(qk')E(e,e') - (qk)(pk')E(e,e') +$$

$$+(pk')E(q,k) - (kk')E(p',q) + (qk')E(p',k) +$$

$$+(p'k)E(k',q) - (p'k)(qk')E(e,e') - (p'q)E(k',k) -$$

$$-(p'q)(kk')E(e,e')\big]\Big\} + (k \leftrightarrow k');$$

$$M_1M_4^* + M_1^*M_4 =$$

$$= \frac{4\,G(\mu^2 - 2kq - 2k'q + 2kk')\,G(\mu^2)\,\mu_p\mu_n}{m^2(qk)(qk')(qk+qk'-kk')(2pq-2pk-2qk+\mu^2)(pk)} \cdot$$

$$\Big[(p'k')(pp')(pk)\,E(e,e') - (pk)(pp')\,E(k',p') + (pk)(pk')\,E(p',p') +$$

$$+ m^4(kk')E(e,e') - m^4 E(k',k) - m^2(p'k')(p'k)\,E(e,e') +$$

$$+ m^2(p'k')\,E(p',k) + m^2(p'k)\,E(k',p') - m^2(kk')\,E(p',p') -$$

$$- m^2(pk)(pk')\,E(e,e') - m^2(pk')\,E(p',k) + m^2(p'k)(pk')\,E(e,e') +$$

$$+ m^2(pp')\,E(k',k) - m^2(pp')(kk')\,E(e,e') + m^2(pk)\,E(k',p') -$$

$$- m^2(pk)\,E(k',p')\Big] + (k \leftrightarrow k');$$

$$M_1M_5^* + M_1^*M_5 =$$

$$= \frac{G(\mu^2 - 2qk - 2qk' + 2kk')\,G(\mu^2 - 2qk')(pk)\,E(p',q)}{m^2(qk)(qk')(qk+qk'-kk')(qk')(pk)} + (k \leftrightarrow k');$$

$$|M_5|^2 =$$

$$= \frac{G^2(\mu^2 - 2qk')}{m^2(qk')^2(pk)}\Big[(p'k) - 2\mu_p^2 m^2(pk) + 2\mu_p^2(pk)(pp')\Big]\,E(e',q,q) +$$

$$+ \frac{G^2(\mu^2 - 2qk)}{m^2(qk)^2(pk')}\Big[(p'k') - 2\mu_p^2 m^2(pk') + 2\mu_p^2(pk')(pp')\Big]\,E(e,q,q) +$$

$$+ \frac{G(\mu^2 - 2qk')\,G(\mu^2 - 2qk)}{2m^2(qk)(qk')(pk)(pk')}\Big\{(1 + 4\mu_p^2 m^2)\Big[-(pp')\,E(e,q,k')\,E(e',q,k) +$$

$$+ (kk')(pp')E(ee',q,q) - m^2(kk')E(ee',q,q) + m^2E(e,q,k')\cdot$$

$$\cdot E(e',q,k)\Big] - (p'k)(pk')E(ee',q,q) + (pk')E(e,q,p')\cdot$$

$$\cdot E(e',q,k) + (pk)E(e,q,k')E(e',q,p') - (pk)(p'k')\cdot$$

$$\cdot E(ee',q,q) + 4\mu_p^2(pk)(pk')E(ee',q,q)\,[m^2 - pp']\Big\};$$

$$|M_6|^2 =$$

$$= \frac{8G^2(\mu^2 - 2qk)\mu_n^2(p'k')^2(-m^2+pp')}{m^2(2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)^2(qk)^2}E(e,q,q) +$$

$$+ \frac{8G^2(\mu^2 - 2qk')\mu_n^2(p'k)^2(pp' - m^2)}{m^2(2pq - 2pk' - 2qk' + \mu^2)^2(qk')^2}E(e',q,q) +$$

$$+ \frac{8G(\mu^2 - 2qk)G(\mu^2 - 2qk')\mu_n^2}{m^2(2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)(2pq - 2pk' - 2qk' + \mu^2)(qk)(qk')}\cdot$$

$$\cdot\Big\{m^2\Big[(p'k')(p'k)E(ee',q,q) - (p'k)E(e,q,k')E(e',q,p') -$$

$$- (pp')E(e,q,k')E(e',q,k) + (kk')(pp')E(ee',q,q) +$$

$$+ (kk')E(e,q,p')E(e',q,p') - (p'k')E(e,q,p')E(e',q,k)\Big] -$$

$$- m^4\Big[(kk')E(ee',q,q) - E(e,q,k')E(e',q,k)\Big] -$$

$$- (p'k')(p'k)(pp')E(ee',q,q) + (p'k')(pp')E(e,q,p')E(e',q,k) +$$

$$+ (p'k)(pp')E(e,q,k')E(e',q,p') - (kk')(pp')E(e,q,p')E(e',q,p')\Big\};$$

$$M_5 M_6^* + M_5^* M_6 =$$

$$= - \frac{4\,G(\mu^2 - 2qk')\,G'(\mu - 2qk)\,\mu_n \mu_p}{(qk')(qk)(pk)(2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)} \cdot$$

$$\Big\{ m^2 \Big[-(p'k)(pk')E(ee',q,q) + (pk')E(e,q,p')E(e',q,k) -$$

$$-(pp')E(e,q,k')E(e',q,k) + (kk')(pp')E(ee',q,q) -$$

$$-(p'k')E(e,q,p')E(e',q,k) + (p'k')(p'k)E(ee',q,q) +$$

$$E(e',q,p')(kk')E(e,q,p') - (p'k)E(e,q,k')E(e',q,p') +$$

$$+(pk)(pk')E(ee',q,q)\Big] + m^4\Big[E(e,q,k')E(e',q,k) -$$

$$-(kk')E(ee',q,q)\Big] - (pk)(p'k')(pp')E(ee',q,q) -$$

$$E(e',q,p')(pk)(pk')E(e,q,p') + (pk)(pp')E(e,q,k')E(e',q,p')\Big\} -$$

$$- \frac{4\,G'^2(\mu^2 - 2qk')\,\mu_n \mu_p\,E(e',q,q)}{m^2 (qk')^2 (pk)(2pq - 2pk' - 2qk' + \mu^2)} \cdot$$

$$\cdot \Big\{ 2m^2\big[(pk)(p'k) - (p'k)^2 - (pk)^2\big] + 2(pk)(p'k)(pp') -$$

$$-(pk)^2 E(e,p',p') \Big\} \quad + \quad (k,e \leftrightarrow k',e');$$

$$M_2 M_{78}^* + M_2^* M_{78} =$$

$$= \frac{G^2(\mu^2)\,G'(2kk')\,F(2kk')\,(qk + qk')}{2m^2\,(2pq+\mu^2)(-2p'q+\mu^2)(kk'-pk-pk')} \cdot$$

$$\cdot \frac{2kk' - \mu_0^2 + i\mu_0\Gamma_\mu}{(pk)\left[(2kk'-\mu_0^2)^2 + \mu_0^2\Gamma_\mu^2\right]} \cdot \Big\{ -m\mu^2(2i\mu_p m+1)E(2) -$$

$$-2m\mu_p^2(pk)\mu^2 E(1) + m(2i\mu_p m+1)\left[2(p'q)E(3) + \mu^2 E(2) -\right.$$

$$\left. -\mu^2 E(3) + \mu^2 E(17)\right] - 2m\mu_p^2(pk)\left[-2(p'q)E(4) -\right.$$

$$\left. -\mu^2 E(1) + \mu^2 E(4) - \mu^2 E(17)\right] - (-2\mu_p^2 m + i\mu_p) \cdot$$

$$\cdot \left[2(p'q)(qk')E(2) + 2(p'q)(pk')E(3) - 2(p'q)E(13,q) -\right.$$

$$- 2(p'q)(pq)E(17) - \mu^2(p'k')E(2) + \mu^2(pk')E(2) -$$

$$\left. -\mu^2(pk')E(3) + \mu^2(pk')E(17) + \mu^2 E(13,p') + \mu^2(pp')E(17)\right] -$$

$$-2i\mu_p(pk)\left[2(p'q)E(7) - \mu^2 E(7) + \mu^2 E(2) - \mu^2 E(1)\right] +$$

$$+ \mu^2 m^2(-2\mu_p^2 m + i\mu_p)E(17) \Big\} + (\text{c.c.}) +$$

$$+ \left[k,e \Leftrightarrow k',e';\ E(1) \Leftrightarrow E(2);\ E(3) \Leftrightarrow E(4);\ \ldots\right] +$$

$$+ \left[\text{c.c. and } k,e \Leftrightarrow k',e';\ E(1) \Leftrightarrow E(2);\ \ldots\right];$$

$$M_3 M_{78}^* + M_3^* M_{78} =$$

$$= \frac{8\,G^2(\mu^2)G(2kk')F(2kk')(qk+qk')\mu_n^2}{m^2(2pq+\mu^2)^2(-2p'q+\mu^2)^2\left[(2kk'-\mu_0^2)^2+\mu_0^2\Gamma_\mu^2\right]}\cdot$$

$$\cdot\frac{2kk'-\mu_0^2}{2pq-2pk-2qk+\mu^2}\Big\{m(p'k')\left[(qk)E(7)+E(12,q)-\right.$$

$$\left.-E(9,q)+(pq)E(3)\right]-m\left[(qk)E(11,p')-E(15,q,p')-\right.$$

$$\left.-(qk')E(9,p')-(pq)E(6,p')\right]+m(p'k')\left[-\mu^2E(2)+\right.$$

$$\left.+\mu^2E(3)-\mu^2E(17)\right]+m\left[\mu^2E(13,p')+\mu^2E(6,p')\right]+$$

$$+2m(pq)\left[(qk)E(1)-(qk)E(4)+(qk)E(17)-E(12,k')-\right.$$

$$\left.-E(5,k')-E(15,e,e')-E(5,p')-(p'k')E(3)-E(6,p')\right]+$$

$$+m\mu^2\left[-(p'k')E(2)+(pk')E(2)-(pk')E(3)+(pk')E(17)+\right.$$

$$\left.+E(13,p')+(pp')E(17)\right]-m^3\mu^2E(17)\Big\}+$$

$$+\left[k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ E(3)\leftrightarrow E(4);\ldots\right];$$

$$M_4M_{78}^*+M_4^*M_{78}=$$

$$=-\frac{2G^2(\mu^2)G(2kk')F(2kk')(qk+qk')\mu_n(2kk'-\mu_0^2+i\mu_0\Gamma_\mu)}{m^2(pk)(2pq+\mu^2)(-2p'q+\mu^2)\left[(2kk'-\mu_0^2)^2+\mu_0^2\Gamma_\mu^2\right](2pq-2pk-2qk+\mu^2)}\cdot$$

$$\cdot\Big\{m^2(2\mu_pm-i)\left[-(qk')E(2)-(pk')E(3)+E(13,q)+(pq)E(17)\right]+$$

$$+2m\mu_p(pk)(p'k')E(7)-2m\mu_p(pk)E(11,p')+m^2(2\mu_pm-i)\cdot$$

$$[(p'k')E(3)+(qk')E(2)-(qk')E(3)+(qk')E(17)+E(6,p')-E(13,q)-$$

$$-E(6,q)+(p'q)E(17)]+2m\mu_p(pk)(p'k')[E(3)-E(7)-E(4)]+$$

$$+2m\mu_p(pk)[E(11,p')+E(6,p')]+(p'k')(2\mu_p m-i)[E(9,q)-$$

$$-E(9,p')+E(13,q)+(p'q)E(2)+(pp')E(3)+(pq)E(2)-$$

$$-(pq)E(3)+(pq)E(17)]-(2\mu_p m-i)[(qk')E(9,p')-$$

$$-(p'k')E(9,p')+(qk')E(13,p')+(pk')E(9,p')-(pk')E(6,p')+$$

$$+(p'q)E(13,p')-(pp')E(6,p')+(pq)E(13,p')+(pq)E(6,p')]+$$

$$+2m(pk)[-E(12,k')-E(10,k')+E(11,p')-E(11,q)+E(13,q)+$$

$$+(p'q)E(1)+(pp')E(4)+(pq)E(1)-(pq)E(4)+(pq)E(17)]-$$

$$-m^2(p'k')(2\mu_p m-i)E(3)-m^2(2\mu_p-i)E(6,p')-$$

$$-2\mu_p m^3(pk)E(4)\}+\quad(\text{c.c.})+$$

$$+[k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ E(3)\leftrightarrow E(4);\ldots]+$$

$$+[\text{c.c and }\ k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ldots];$$

$$M_5 M_{78}^* + M_5^* M_{78} =$$

$$= - \frac{(qk + qk')\, G(\mu^2)\, G(2kk')\, F(2kk')\, G(\mu^2 - 2qk')}{m^2 (2pq + \mu^2)(-2p'q + \mu^2)(qk')(pk)} \cdot$$

$$\frac{2kk' - \mu_0^2 + i\mu_0\Gamma_\mu}{(2kk' - \mu_0^2)^2 + \mu_0^2 \Gamma_\mu^2} \Big\{ -m\,(1 + 2i\mu_p m)\, E(6,q) -$$

$$- 2i\mu_p (pk)\, E(9,q) - 2i\mu_p (pk)\, E(11,q) \Big\} +$$

$$+ (c.c.) + \big[k,e \leftrightarrow k',e';\ E(6,q) \to E(5,q);$$

$$E(9,q) \to E(10,q);\ E(11,q) \to E(12,q) \big] +$$

$$+ \big[c.c.\ \text{and}\ k,e \leftrightarrow k',e';\ E(6,q) \to E(5,q); \ldots \big];$$

$$M_6 M_{78}^* + M_6^* M_{78} =$$

$$= \frac{8\, G(\mu^2)\, G(2kk')\, F(2kk')\, G(\mu^2 - 2kk')\, \mu_n (qk + qk')}{m^2 (2pq + \mu^2)(-2p'q + \mu^2)(2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)(qk)} \cdot$$

$$\cdot \frac{\mu_0 \Gamma_\mu \big[m^2 E(5,q) + (p'k')\, E(12,q) + (p'k')\, E(10,q) + E(15,q,p') \big]}{(2kk' - \mu_0^2)^2 + \mu_0^2 \Gamma_\mu^2} +$$

$$\cancel{+ + (c.c.) + \big[k,e \leftrightarrow k',e';\ E(5,q) \to E(6,q);\ E(12,q) \to}$$

$$\cancel{\rightarrow E(11,q);\ E(10,q) \rightarrow E(9,q);\ E(15,q,p') \rightarrow -E(15,p',q) \Big] +}$$

$$+ \cancel{\left[q.q'\ \text{and}\right.} \left[k, e \leftrightarrow k', e';\ E(5,q) \rightarrow E(6,q);\ \ldots \right];$$

$$|M_{78}|^2 =$$

$$= \frac{4}{m^2} \frac{G^2(\mu^2) G^2(2kk') F^2(2kk')}{(2kk' - \mu_0^2)^2 + \mu_0^2 \Gamma_\mu^2} \cdot \frac{(qk + qk')^2}{(2pq + \mu^2)^2 (-2p'q + \mu^2)^2} \cdot$$

$$\cdot \left[2(pq)(p'q) + \mu^2 m^2 - \mu^2 (pp') \right] E(78);$$

$$M_{78} M_{910}^* + M_{78}^* M_{910} =$$

$$= -\frac{2}{3m^2} \left(\frac{f}{\mu}\right)^2 \frac{G(\mu^2) G(2kk') F^2(2kk') (qk + qk') E(78)}{(2pq + \mu^2)(-2p'q + \mu^2) \left[(2kk' - \mu_0^2)^2 + \mu_0^2 \Gamma_\mu^2 \right]} \cdot$$

$$\left\{ m(qp + qp')(B + B^*) + \left[\mu^2 m^2 + 2(pq)(p'q) - \mu^2 (pp') \right] (C + C^*) \right\};$$

$$|M_{910}|^2 =$$

$$= \frac{1}{9m^2} F^2(2kk') \left(\frac{f}{\mu}\right)^4 E(78) \frac{1}{(2kk' - \mu_0^2)^2 + \mu_0^2 \Gamma_\mu^2} \cdot$$

$$\cdot \Big[|B|^2 (pp' + m^2) + m(B^* C + B C^*)(p'q + pq) +$$

$$+ |C|^2 (\mu^2 m^2 + 2(pq)(p'q) - \mu^2 (pp') \Big].$$

$$M_2 M_{910}^* + M_2^* M_{910} =$$

$$= \frac{F(2kk')\, G(\mu^2)\, f^2}{12\mu^2 m^2 (pk + pk' - kk')} \cdot \frac{1}{(pk)(2kk' - \mu_0^2 - i\mu_0\Gamma_\mu)} \cdot$$

$$B^*(2i\mu_p m + 1)\left[E(9,q) + E(13,q) - E(9,p') - \right.$$

$$-(p'q)E(2) + (pq)E(2) - (pq)E(3) + (pq)E(17) +$$

$$\left. + (pp')E(3)\right] - 2B^*\mu_p^2(pk)\left[E(11,q) - E(13,q) + \right.$$

$$+ E(12,k') + E(10,k') - E(11,p') + (p'q)E(1) -$$

$$\left. -(pq)E(1) + (pq)E(4) - (pq)E(17) - (pp')E(4)\right] -$$

$$- mC^*\mu^2(2i\mu_p m + 1)E(2) - 2mC^*\mu_p^2(pk)\mu^2 E(1) +$$

$$+ m^2 B^*(2i\mu_p m + 1)E(3) + 2m^2 B^*\mu_p^2(pk)E(4) +$$

$$+ md^*(2i\mu_p m + 1)\left[2(p'q)E(3) + \mu^2 E(2) - \mu^2 E(3) + \right.$$

$$\left. + \mu^2 E(17)\right] - 2mC^*\mu_p^2(pk)\left[-2(p'q)E(4) - \mu^2 E(1) + \right.$$

$$\left. + \mu^2 E(4) - \mu^2 E(17)\right] - mB^*(-2\mu_p^2 m + i\mu_p)\left[(qk')\cdot\right.$$

$$\left. \cdot E(2) + (pk')E(3) - E(13,q) - (pq)E(17)\right] - 2mB^*\cdot$$

$$\cdot i\mu_p(pk)E(7) + C^*\mu_p(2\mu_p m - i)\left[2(p'q)(qk')E(2) + \right.$$

$$+ 2(p'q)(pk')E(3) - 2(p'q)E(13,q) - 2(p'q)(pq)E(17) -$$

$$- \mu^2(p'k')E(2) + \mu^2(pk')E(2) - \mu^2(pk')E(3) + \mu^2(pk')E(17) +$$

$$\left. + \mu^2 E(13,p') + \mu^2(pp')E(17)\right] - 2i\mu_p C^*(pk)\left[2(p'q)E(7) - \right.$$

$$-\mu^2 E(7) + \mu^2 E(2) - \mu^2 E(1) \Big] + m B \mu_p (2\mu_p m - i) \cdot$$
$$\cdot \Big[-2(p'q) E(17) + (p'k') E(3) + (qk') E(2) - (qk') E(3) +$$
$$+ (qk') E(17) + E(6,p') - E(13,q) - E(9,q) + (p'q) E(17) \Big] -$$
$$- 2 m B^* i \mu_p (pk) \big[E(7) - E(3) + E(4) \big] + m^2 C^* \mu^2 \mu_p (-2\mu_p m -$$
$$+ i) E(17) \Big\} + (c.c.) + \Big[k, e \leftrightarrow k', e';$$
$$E(1) \leftrightarrow E(2);\ E(3) \leftrightarrow E(4); \ldots \Big] +$$
$$+ \Big[k, e \leftrightarrow k', e';\ E(1) \leftrightarrow E(2);\ \text{and } c.c. \Big];$$

$$M_3 M_{910}^* + M_3^* M_{910} =$$

$$= \frac{2 F(2kk') f^2 G(\mu^2) \mu_n^2}{3\mu^2 m^2 (2pk + 2qk - 2pq - \mu^2)(2pq + \mu^2)(2kk' - \mu_0^2 - i\mu_0 \Gamma_\mu)} \cdot$$

$$\Big\{ B^* (p'k') \big[(qk) E(7) - (qk) E(2) + (qk) E(1) - E(15, e, e') +$$
$$+ E(12, p') - E(9, p') + (pp') E(3) \big] - B^* \big[(qk) E(11, p') -$$
$$- (qk) E(13, p') - E(15, k', p') - E(15, p, p') - (p'k') E(9, p') +$$
$$+ (pk') E(9, p') - (pk') E(6, p') - (pp') E(6, p') \big] + m C^* \cdot$$
$$\cdot (p'k') \big[(qk) E(7) + E(12, q) - E(9, q) + (pq) E(3) \big] - m C^* \cdot$$
$$\big[(qk) E(11, p') - E(15, q, p') - (qk') E(9, p') - (pq) E(6, p') \big] +$$
$$+ m^2 B^* (p'k') E(3) + m^2 B^* E(6, p') + m C^* (p'k') \big[\mu^2 E(3) -$$

$$- \mu^2 E(2) - \mu^2 E(17)\Big] + mC^* \Big[\mu^2 E(13,p') + \mu^2 E(6,p')\Big] +$$

$$+ m^2 B^* \Big[(qk)E(1) - E(12,k') - E(15,e,e') - (pk')E(3)\Big] +$$

$$+ m^2 B^* \Big[(qk)E(1) - (qk)E(4) + (qk)E(17) - E(12,k') -$$

$$- E(5,k') - E(15,e,e') - E(5,p') - (p'k')E(3) - E(6,p')\Big] +$$

$$+ m^2 C^*(pq)\Big[(qk)E(1) - (qk)E(4) + (qk)E(17) - E(12,k') -$$

$$- E(5,k') - E(15,e,e') - E(5,p') - (p'k')E(3) - E(6,p')\Big] +$$

$$+ m\mu^2 C^* \Big[-(p'k')E(2) + (pk')E(2) - (pk')E(3) + \cancel{(pk')\cdot E(3)} + (pk')E(17) + E(13,p') + (pp')E(17)\Big] - m^3\mu^2 \cdot$$

$$\cdot C^* E(17)\Big\} + (c.c.) + \Big[k,e \leftrightarrow k',e';\ E(1) \leftrightarrow E(2);\ E(3) \leftrightarrow E(4);\ \dots\Big] + \Big[c.c.\ \text{and}\ k,e \leftrightarrow k',e';\ E(1) \leftrightarrow E(2);\ \dots\Big];$$

$$M_4 M_{910}^* + M_4^* M_{910} =$$

$$= \frac{F(2kk') f^2\, G(\mu^2)\, \mu_n}{3\mu^2 m^2 (2pq - 2pk - 2qk + \mu^2)(pk)} \cdot \frac{1}{(2kk' - \mu_0^2 - i\mu_0\Gamma_\mu)} \cdot$$

$$\Big\{ mB^*(2\mu_p m - i)\Big[-(p'k')E(2) + (pk')E(2) - (pk')E(3) +$$

$$+ (pk')E(17) + E(13,p') + (pp')E(17)\Big] + 2\mu_p B^* \cdot$$

$$\cdot (pk)(p'k')\Big[E(7) - E(2) + E(1)\Big] - 2\mu_p B^*(pk)\Big[E(11,p') -$$

$$- E(13,p')\Big] + m^2 C^*(2\mu_p m - i)\Big[-(qk')E(2) - (pk')E(3) +$$

$$+ E(13,q) + (pq)E(17)\Big] + 2mC^*\mu_p(pk)(p'k')E(7) -$$

$$-2mC^*\mu_p(pk)E(11,p') + m^3 B^*(2\mu_p m - i)E(17) +$$

$$+ C^* m^2 (2\mu_p m - i)\Big[(p'k')E(3) + (qk')E(2) - (qk')\cdot$$

$$\cdot E(3) + (qk')E(17) + E(6,p') - E(13,q) - E(6,q) +$$

$$+ (p'q)E(17)\Big] + 2mC^*\mu_p(pk)(p'k')\Big[E(3) - E(7) - E(4)\Big] +$$

$$+ 2mC^*\mu_p(pk)\Big[E(11,p') + E(6,p')\Big] + mB^*(p'k')\cdot$$

$$\cdot(2\mu_p m - i)E(2) - mB^*(2\mu_p m - i)E(13,p') + 2m^2\mu_p\cdot$$

$$\cdot B^*(pk)E(1) + C^*(p'k')(2\mu_p m - i)\Big[E(9,q) - E(9,p') +$$

$$+ E(13,q) + (p'q)E(2) + (pp')E(3) + (pq)E(2) - (pq)E(3) +$$

$$+ (pq)E(17)\Big] - C^*(2\mu_p m - i)\Big[-(p'k')E(9,p') + (qk')\cdot$$

$$\cdot E(9,p') + (qk')E(13,p') + (pk')E(9,p') - (pk')E(6,p') +$$

$$+ (p'q)E(13,p') - (pp')E(6,p') + (pq)E(13,p') + (pq)E(6,p')\Big] +$$

$$+ (kp)2mC^*\mu_p\Big[E(11,p') - E(12,k') - E(10,k') - E(11,q) +$$

$$+ E(13,q) + (p'q)E(1) + (pp')E(4) + (pq)E(1) - (pq)E(4) +$$

$$+ (pq)E(17)\Big] + mB^*(p'k')(2\mu_p m - i)\Big[E(2) - E(3) + E(17)\Big] -$$

$$- mB^*(2\mu_p m - i)\Big[E(13,p') + E(6,p')\Big] + 2m^2 B^*\mu_p(pk)\cdot$$

$$\cdot\left[E(1)-E(4)+E(17)\right]-m^2C^*(p'k')(2\mu_p m-i)E(3)-$$

$$-m^2C^*(2\mu_p m-i)E(6,p')-2m^3C^*\mu_p(pk)E(4)\Big\}+$$

$$+(c.c.)+\left[k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ \dots\right]+$$

$$+\left[c.c.\ \text{and}\ k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ \dots\right];$$

$$M_5M_{910}^*+M_5^*M_{910}=$$

$$=\frac{-F(2kk')f^2G(\mu^2-2qk')}{6\mu^2m^2(qk')(pk)(2kk'-\mu_0^2-i\mu_0\Gamma_\mu)}\Big\{B^*(1+2i\mu_p m)\cdot$$

$$\cdot E(9,q)+B^*(1+2i\mu_p m)E(13,q)+mC^*(1+2i\mu_p m)\cdot$$

$$\cdot E(6,q)+2i\mu_p(pk)C^*E(9,q)+2i\mu_p(pk)C^*E(11,q)\Big\}+$$

$$+(c.c.)+\left[k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ \dots\right]+$$

$$+\left[c.c.\ \text{and}\ k,e\leftrightarrow k',e';\ E(1)\leftrightarrow E(2);\ \dots\right];$$

$$M_6M_{910}^*+M_6^*M_{910}=$$

$$=+i\,\frac{2F(2kk')f^2G(\mu^2-2qk)\mu_n}{3\mu^2m^2(2pq-2pk-2qk+\mu^2)(qk)(2kk'-\mu_0^2-i\mu_0\Gamma_\mu)}\cdot$$

$$\cdot\Big\{mB^*E(10,q)+B^*mE(14,q)+m^2C^*E(5,q)+(p'k')C^*\cdot$$

$$\cdot E(12,q)+C^*(p'k')E(10,q)+C^*E(15,q,p')\Big\}+$$

$$+ (\text{c.c.}) + [k, e \leftrightarrow k', e';\ E(1) \leftrightarrow E(2); \dots] +$$

$$+ [\text{c.c. and } k, e \leftrightarrow k', e';\ E(1) \leftrightarrow E(2); \dots].$$

Приложение 2

$$B = B(q, Q) - B(-Q, -q); \qquad Q = k + k'.$$

$$C = C(q, Q) - C(-Q, -q);$$

$$B(q, Q) = \frac{1}{m^2 + q^2 + 2pq - M^2 - iM\Gamma_\Delta} \cdot$$

$$\Big\{ \frac{2[(pq) + q^2 + xq^2 + 2x(pq)]}{3M^2} (mqQ + mpQ + 2mqQ +$$

$$+ 2MpQ - \tfrac{1}{2} Mq^2 - Mpq) +$$

$$+ \frac{M - 5xM - xm}{3M} (mq^2 + Mq^2 + 2mpq + 2Mpq) +$$

$$+ \frac{2xM - M - 2xm}{3M^2} (pQ + qQ)(2pq + q^2) - mqQ - MqQ \Big] +$$

$$+ \frac{A + 1}{3M^2(2A + 1)} (q^2 + 2pq) \frac{(6Ax + 4x - A - 1)m + 2AM - 4AMx}{2(2A + 1)} +$$

$$+ \frac{x}{m^2 + q^2 + 2pq - M^2 + iM\Gamma_\Delta} \Big[\frac{2[(pq) + q^2 + xq^2 + 2xpq]}{3M^2} (2mqQ +$$

$$+ 4MqQ + 4MpQ + 2mpQ - 4Mq^2 - 8Mpq) +$$

$$+ \frac{M - 5xM - xm}{3M} (6mq^2 + 12mpq + 4Mq^2 + 8Mpq) +$$

$$+\frac{2xM-M-2xm}{3M^2}\Big[4(pQ)(pq)+4(qQ)(pq)+$$

$$+2q^2(pQ)+2q^2(qQ)-m^2q^2-2m^2pq+Mmq^2+$$

$$+2Mmpq-4q^2(pq)-q^4-4(pq)^2\Big]-2mqQ-$$

$$-2MqQ+mq^2+Mq^2+2mqp+2Mqp\Big\}+$$

$$+\frac{(A+1)x}{3M^2(2A+1)}\Big[3(q^2+2pq)\frac{(6Ax+4x-A-1)m+2AM-4AMx}{2A+1}+$$

$$+m(2x-1)(q^2+2qp)\Big];$$

$$C(q,Q)=\frac{1}{m^2+q^2+2pq-M^2+iM\Gamma_\Delta}\cdot$$

$$\cdot\Big\{\frac{2[(pq)+q^2+xq^2+2x(pq)]}{3M^2}\left(qQ+pQ+\tfrac{1}{2}mM+\tfrac{1}{2}M^2\right)+$$

$$+\frac{M-5xM-xM}{3M}\left(2qQ+2pQ-2pq-2m^2-q^2-2mM\right)+$$

$$+\frac{2xM-M-2xM}{3M^2}(pQ+qQ)(M-m)-qQ\Big\}+$$

$$+\frac{A+1}{3M^2(2A+1)}\Big[\frac{-q^2(1+3A+6Ax+4x)}{2(2A+1)}+$$

$$+\frac{2(pq)(-A-6Ax-4x)-2m^2(6Ax+4x-A-1)-4mAM(1-2x)}{2(2A+1)}+$$

$$+(qQ+pQ)(2x-1)\Big]+$$

$$+\frac{x}{m^2+q^2+2pq-M^2+iM\Gamma_\Delta}\left\{\frac{2\left[(pq)+q^2+xq^2+2x(pq)\right]}{3M^2}\cdot\right.$$

$$\cdot\left(2qQ+2pQ+4mM+2M^2-m^2-q^2-2pq\right)+$$

$$+\frac{M-5xM-xm}{3M}\left(4pQ+4qQ-12pq-12m^2-6q^2-8mM\right)+$$

$$+\frac{2xM-M-2xm}{3M^2}\left(-2mpQ-2mqQ+2MpQ+2MqQ+\right.$$

$$\left.+2m^3+4mpq-2Mpq+2mq^2-2m^2M-Mq^2\right)-2qQ-2m^2+$$

$$\left.+q^2-2mM\right\}+$$

$$+\frac{(A+1)x}{3M^2(2A+1)}\left[\frac{3q^2(-1-3A-6Ax-4x)+6pq(-A-6Ax-4x)}{2A+1}-\right.$$

$$-6m\,\frac{(6Ax+4x-A-1)m+2AM-4AMx}{2A+1}+$$

$$\left.+(2x-1)(2pQ+2qQ-q^2-2pq)-2m^2(2x-1)\right].$$

Приложение 3. Суммы по поляризациям фотонов.

$$p=(m,0)\;;\quad pe=pe'=0\;;$$

$$\sum_{\lambda,\lambda'}^{1,2} e^{\lambda}_{\mu}e^{\lambda'}_{\mu}=-\sum_{\lambda,\lambda'}e^{\lambda}_{r}e^{\lambda'}_{s}=-\sum_{\lambda,\lambda'}\delta_{\lambda\lambda'}=-2\;;$$

$$\sum_{\lambda=1}^{2}e^{\lambda}_{r}(k)\,e^{\lambda}_{s}(k)=\delta_{rs}-\frac{k_r k_s}{\vec{k}^2}\;;$$

$$\sum_{\lambda,\lambda'}\left[e^{\lambda}(k)\,e^{\lambda'}(k')\right]^2=1+\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\;;$$

$$\underline{\underline{E(0)}} = (1+\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'})(qk)^2(qk')^2 + \vec{q}^{\,4}(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{q}})\cdot$$

$$\cdot(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}'\vec{q}})(k'q+kq)^2 + \vec{q}^{\,2}\vec{k}^2(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{q}})\cdot(1-$$

$$-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'})(qk')^2 + \vec{q}^{\,2}\vec{k}'^2(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}'\vec{q}})(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'})\cdot$$

$$\cdot(qk)^2 - 2\left[\vec{q}^{\,2} - \frac{(\vec{q}\vec{k})^2}{\vec{k}^2} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')^2}{\vec{k}'^2} + \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\,\vec{k}'^2}\right]\cdot$$

$$\cdot(qk)(qk')(qk+qk') + 2(qk)(qk')^2\left[(\vec{q}\vec{k})\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} -\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] + 2(qk)^2(qk')\left[(\vec{q}\vec{k}')\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} -\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] - 2\vec{q}^{\,2}(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{q}})\left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]\cdot$$

$$\cdot(qk')(qk+qk') - 2\vec{q}^{\,2}(1-\cos^2\varphi_{\vec{q}\vec{k}'})\left[\vec{q}\vec{k}' -\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right](qk)(qk+qk') + 2\left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right](qk)(qk');$$

$$\underline{\underline{E(1)}} = \frac{-m}{|\vec{k}|}(kk')^2$$

$$\underline{\underline{E(2)}} = E(1)_{k\leftrightarrow k'}$$

$$\underline{\underline{E(3)}} = \left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) -$$

$$-(kk')\left[-(\vec{q}\vec{k})\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} + \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - (qk)(\vec{k}\vec{k}')\cdot$$

$$\cdot\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) + (qk)(kk')\left(1+\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) - 2(kk')\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - 4(qk)(kk') + 2(qk')\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right);$$

$$\underline{\underline{E(4)}} = E(3)_{k\leftrightarrow k'};$$

$$\underline{\underline{E(5,t)}} = 2(kk')^2\left[\vec{q}\vec{t} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right] - (kk')\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{k}'\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right]\left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] +$$

$$+(qk')\left[\vec{k}\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}'\vec{t})}{\vec{k}'^2}\right]\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) -$$

$$-2(qk)(kk')\left[\vec{k}'\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right] -$$

$$-(kk')(qk')\left[-\vec{t}\vec{k}\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} + \frac{(\vec{t}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] -$$

$$-(\vec{k}\vec{k}')^2\left[\vec{q}\vec{t} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} + \frac{(\vec{t}\vec{k})(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\,\vec{k}'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(6,t)}} = E(5,t)_{k\leftrightarrow k'};$$

$$\underline{\underline{E(7)}} = 2(pk)\left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] + (pk')\left[\vec{q}\vec{k}\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - (pk)\left[\vec{q}\vec{k}'\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] -$$

$$\underline{\underline{E(3)}} = \left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right]\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) -$$

$$-(kk')\left[-(\vec{q}\vec{k})\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} + \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - (qk)(\vec{k}\vec{k}')\cdot$$

$$\cdot\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) + (qk)(kk')\left(1+\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) - 2(kk')\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - 4(qk)(kk') + 2(qk')\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right);$$

$$\underline{\underline{E(4)}} = E(3)_{k\leftrightarrow k'};$$

$$\underline{\underline{E(5,t)}} = 2(kk')^2\left[\vec{q}\vec{t} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right] - (kk')\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{k}'\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right]\left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] +$$

$$+(qk')\left[\vec{k}\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}'\vec{t})}{\vec{k}'^2}\right]\vec{k}^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) -$$

$$-2(qk)(kk')\left[\vec{k}'\vec{t} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{k}\vec{t})}{\vec{k}^2}\right] -$$

$$-(kk')(qk')\left[-\vec{t}\vec{k}\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} + \frac{(\vec{t}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] -$$

$$-(\vec{k}\vec{k}')^2\left[\vec{q}\vec{t} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} + \frac{(\vec{t}\vec{k})(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\,\vec{k}'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(6,t)}} = E(5,t)_{k\leftrightarrow k'};$$

$$\underline{\underline{E(7)}} = 2(pk)\left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] + (pk')\left[\vec{q}\vec{k}\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] - (pk)\left[\vec{q}\vec{k}'\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] -$$

$$-(pk)(qk')\left(1+\cos^2\varphi_{\vec k\vec k'}\right)+(pk')(qk)\left(1+\cos^2\varphi_{\vec k\vec k'}\right)-$$

$$-2(pk')\left[\vec q\vec k-\frac{(\vec q\vec k')(\vec k\vec k')}{\vec k'^2}\right]+4(pk)(qk')-4(pk')(qk);$$

$$\underline{\underline{E(8)}} = -E(7);$$

$$\underline{\underline{E(9,t)}} = -(pk)\cdot\left[\vec q\vec k'-\frac{(\vec q\vec k)(\vec k\vec k')}{\vec k^2}\right]\cdot\left[\vec t\vec k-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec t\vec k')(\vec k\vec k')}{\vec k'^2}\right]-(pk)(kk')\left[\vec q\vec t-\frac{(\vec q\vec k)(\vec t\vec k)}{\vec k^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec q\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}+\frac{(\vec q\vec k)(\vec t\vec k')(\vec k\vec k')}{\vec k^2\vec k'^2}\right]+2(pk)(kk')\cdot$$

$$\cdot\left[\vec q\vec t-\frac{(\vec q\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}\right]-2(pk)(qk')\left[\vec k\vec t-\frac{(\vec k\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}\right]+$$

$$+2(pk')(qk)\left[\vec k\vec t-\frac{(\vec k\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(10,t)}} = E(9,t)_{k\leftrightarrow k'}$$

$$\underline{\underline{E(11,t)}} = +(pk')(kk')\left[\vec q\vec t-\frac{(\vec q\vec k)(\vec t\vec k)}{\vec k^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec q\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}+\frac{(\vec q\vec k)(\vec t\vec k')(\vec k\vec k')}{\vec k^2\vec k'^2}\right]+(pk)\left[\vec q\vec t-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec q\vec k')(\vec t\vec k')}{\vec k'^2}\right]\vec k'^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec k\vec k'}\right)+(\vec p\vec k)(\vec q\vec k')\left[\vec k'\vec t\cos^2\varphi_{\vec k\vec k'}+\frac{(\vec t\vec k')(\vec k\vec k')}{\vec k^2}\right]+(pk')\cdot$$

$$(qk)\left[-\vec{t}\vec{k}'\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}+\frac{(\vec{t}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]-2(\vec{p}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')\left[\vec{q}\vec{t}-\frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(12,t)}} = E(11,t)_{k\leftrightarrow k'} \;;$$

$$\underline{\underline{E(13,t)}} = (pk)\,\vec{k}'^2\left(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right)\left[\vec{k}\vec{t}-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]+(pk)(kk')\left[\vec{t}\vec{k}'\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}-\right.$$

$$\left.-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2}\right]-2(kk')(pk')\left[\vec{t}\vec{k}-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(14,t)}} = E(13,t)_{k\leftrightarrow k'} \;;$$

$$\underline{\underline{E(15,t,t')}} = -(kk')(pk')\left[\vec{q}\vec{t}-\frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{t}'\vec{k}-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}'\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]+(kk')(pk)\left[\vec{t}\vec{k}'-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{q}\vec{t}'-\frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{t}'\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]-(pk)(qk')\left[\vec{t}\vec{k}'-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{t}'\vec{k}-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}'\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right]+(pk')(qk)\left[\vec{t}\vec{k}'-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}\vec{k})}{\vec{k}^2}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[\vec{t}'\vec{k}-\frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{t}'\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right];$$

$$\underline{\underline{E(16,t,t')}} = -E(15,t',t) \;;$$

$$\underline{\underline{E(15,ee')}} = (kk')(pk')\left[\vec{q}\vec{k}\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right] -$$

$$-(pk)(kk')\left[\vec{q}\vec{k}'\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right] - (pk)(qk')\cdot$$

$$\vec{k}\vec{k}'(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}) + (pk')(qk)\vec{k}\vec{k}'(1-\cos^2\varphi_{\vec{k}k'});$$

$$\underline{\underline{E(16,ee')}} = -E(15,ee');$$

$$\underline{\underline{E(17)}} = -(2+2\cos\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} + \cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'})(kk')^2;$$

$$\underline{\underline{E(78)}} = 2(kk')^2;$$

$$\underline{\underline{E(e,e')}} = (1+\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'})(qk)(qk') - \left[\vec{q}^2 -\right.$$

$$\left. - \frac{(\vec{q}\vec{k})^2}{\vec{k}^2} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')^2}{\vec{k}'^2} + \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\vec{k}'^2}\right](qk +$$

$$+ qk') + \left[(\vec{q}\vec{k})\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2}\right](qk') +$$

$$+\left[(\vec{q}\vec{k}')\cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2}\right](qk) \xrightarrow[\vec{k}'=-\vec{k}]{}$$

$$\rightarrow 2\vec{q}^2\vec{k}^2(1-\cos\varphi_{\vec{q}\vec{k}}) + 2\vec{q}^2 q_0 k(2\cos^2\varphi_{\vec{q}\vec{k}} - \cos\varphi_{\vec{q}\vec{k}} - 1);$$

$$\underline{\underline{E(a,b)}} = -(qk)(qk')\left[\vec{a}\vec{b} - \frac{(\vec{a}\vec{k})(\vec{b}\vec{k})}{\vec{k}^2} - \right.$$

$$- \frac{(\vec{a}\vec{k}')(\vec{b}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} + \frac{(\vec{a}\vec{k})(\vec{b}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\vec{k}'^2} \Big] + (qk +$$

$$+ qk') \left[\vec{a}\vec{q} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{a}\vec{k})}{\vec{k}^2} \right] \left[\vec{b}\vec{q} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{b}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} \right] -$$

$$-(qk') \left[\vec{a}\vec{q} - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{a}\vec{k})}{\vec{k}^2} \right] \left[\vec{b}\vec{k} - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{b}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} \right] -$$

$$-(\vec{q}\vec{k}) \left[\vec{a}\vec{k}' - \frac{(\vec{k}\vec{k}')(\vec{a}\vec{k})}{\vec{k}^2} \right] \left[\vec{b}\vec{q} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{b}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} \right];$$

$$\underline{\underline{\Xi(k,k')}} = (qk)(qk')\,\vec{k}\vec{k}'\left(1 - \cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'}\right) +$$

$$+ (qk + qk') \left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2} \right] \left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} \right] -$$

$$-(qk')\,\vec{k}^2 \left[\vec{q}\vec{k}' - \frac{(\vec{q}\vec{k})(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2} \right] \left[1 - \cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} \right] -$$

$$-(qk)\,\vec{k}'^2 \left[\vec{q}\vec{k} - \frac{(\vec{q}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} \right] \left[1 - \cos^2\varphi_{\vec{k}\vec{k}'} \right];$$

$$\underline{\underline{\Xi(ee', a, b)}} = \Big[-\vec{a}\vec{b} + \frac{(\vec{a}\vec{k})(\vec{b}\vec{k})}{\vec{k}^2} +$$

$$+ \frac{(\vec{a}\vec{k}')(\vec{b}\vec{k}')}{\vec{k}'^2} - \frac{(\vec{a}\vec{k})(\vec{b}\vec{k}')(\vec{k}\vec{k}')}{\vec{k}^2\vec{k}'^2} \Big].$$

Литература

I. P.M.Vasilevski et al. Nucl.Phys. B139, 673, 1969.

2. Л.И.Лапидус, М.М.Мусаханов, ЯФ, I5, I002 (I972).

3. С.Швебер, Введение в релятивистскую квантовую теорию поля, М, ИИЛ, I963.

4. Review of Particle Properties, Phys.Lett., 50B, 1 (1974).

5. G.Ebel et al. Nucl.Phys. B33, 317 (1971).

6. а) B.J.Read. Nucl.Phys.B52, 565 (1973),

в) M.G.Olsson et al. Phys.Rev., D7, 3444 (1973).

7. R.Ito, Preprint, Kyoto University (1974).

8. Ю.Н.Епифанов, А.Т.Филиппов, ЯФ, I286 (I972).