

ФИЗИКА

С. М. Дарбинян

Внутренняя конверсия с образованием пар
на поляризованном ядре

После установления несохранения четности в β -распаде появилось несколько работ [1], [2], [3], посвященных корреляции поляризаций частиц внутренней конверсии с направлением вылета электронов, предшествующего β -распада. В силу несохранения четности в β -распаде, ядро, получающееся после β -распада, остается поляризованным по направлению вылета β -электрона. Поэтому и будут поляризованы частицы внутренней конверсии, следующей за β -распадом.

В настоящей работе рассматривается процесс внутренней конверсии с образованием электронно-позитронной пары на поляризованном ядре. Предполагается, что состояние поляризации начального ядра определяется средним моментом $\langle \vec{J} \rangle$. Вычисляются средние значения поляризаций электронов и позитронов конверсии и коэффициент конверсии с образованием пар на поляризованном ядре. Влияние кулоновского поля не учитывается. Однако до появления данной статьи вышла работа Лобова [3], где вычислены средние значения частиц пары внутренней конверсии, следующей за β -распадом. Поэтому мы здесь не приводим явные выражения для средних значений поляризаций.

Ядро из состояния с квантовыми числами I_1, m_1 переходит в состояние с квантовыми числами I_2, m_2 . Если состояние поляризации начального ядра определяется средним моментом $\langle \vec{J} \rangle$, то матрица плотности, определяющая распределение проекции момента m_1 , будет [1]:

$$\rho_{m_1 m_1'} = \frac{1}{2I_1 + 1} \left(\delta_{m_1 m_1'} + \sum_{\mu=-1}^1 \frac{3 \langle J^\mu \rangle}{\sqrt{I_1(I_1 + 1)}} C_{I_1 m_1' I_1}^{I_1 m_1} \right), \quad (1)$$

где C — коэффициенты Клебша-Гордана, а $\langle J^\mu \rangle$ — сферические составляющие вектора $\langle \vec{J} \rangle$ [4].

Пользуясь результатами § 27 и § 40 [4], напишем матричный элемент конверсии в виде

$$M_{m_1 m_2} = -i \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi}} \sqrt{\frac{L+1}{L(2L+1)}} \frac{\omega^{L+1}}{(2L+1)!!} (I_1 m_1 | Q_{LM}^{(\lambda)} | I_2 m_2)^* (B_{LM}^{(\lambda)})_{21} \quad (2)$$

где α — постоянная тонкой структуры, L, M — квантовые числа момента и проекции момента фотона, $Q_{LM}^{(\lambda)}$ — оператор мультипольного момента ядра, $B_{LM}^{(\lambda)}$ — оператор взаимодействия электрона и позитрона с полем мультиполя, а $(B_{LM}^{(\lambda)})_{21}$ — матричный элемент этого оператора.

Вероятность конверсии будет [1]

$$W_{\text{конв.}} = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{L+1}{L(2L+1)} \frac{\omega^{2(L+1)}}{[(2L+1)!!]^2} \sum_{\substack{m_1 m_1' \\ M M'}} \rho_{m_1 m_1'} \times \\ \times (I_1 m_1 | Q_{LM}^{(\lambda)} | I_2 m_2)^* (I_1 m_1' | Q_{LM}^{(\lambda)} | I_2 m_2') (B_{LM}^{(\lambda)})_{21} (B_{LM}^{(\lambda)})_{21}^* \quad (3)$$

Матричные элементы мультипольного момента ядра можно написать в виде [1]

$$(I_1 m_1 | Q^{(\lambda)} | I_2 m_2) = Q^{(\lambda)} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1}, \quad (4)$$

где $Q^{(\lambda)}$ — не зависят от m -индексов.

Если пренебречь кулоновским полем ядра, то волновые функции электрона и позитрона можно написать в виде

$$\psi_{\text{эл.}} = N_- \left(\frac{U}{\frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_-}{\varepsilon_- + m} U} \right) e^{-i \vec{p}_- \cdot \vec{r}}, \quad (5)$$

$$\psi_{\text{поз.}} = N_+ \left(\frac{\frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_+}{\varepsilon_+ + m} V}{V} \right) e^{i \vec{p}_+ \cdot \vec{r}}, \quad (6)$$

где $N_{\pm} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\pm} + m}{2\varepsilon_{\pm}}}$ — нормирующий коэффициент, $\varepsilon_{\pm}, \vec{p}_{\pm}$ — энергии

и импульс позитрона и электрона, $\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$ — матрицы Дирака, U, V — спиноры.

Если подставить (4), (5), (6) в (3) и пользоваться следующими соотношениями

$$U_{\alpha} U_{\beta}^* = \frac{1}{2} (1 + \vec{\xi}^{(-)} \cdot \vec{\sigma})_{\alpha\beta}, \\ V_{\gamma} V_{\delta}^* = \frac{1}{2} (1 + \vec{\xi}^{(+)} \cdot \vec{\sigma})_{\gamma\delta}, \quad (7)$$

то для вероятности конверсии получим выражение следующего вида

$$W_{\text{конв.}} = \frac{\alpha(L+1)}{8\pi\epsilon_+\epsilon_-L(2L+1)} \frac{\omega^{2(L+1)} |Q^{(\lambda)}|^2 |R_L|^2}{|(2L+1)!!|^2} [A^{(\lambda)} + \vec{B}^{(\lambda)} \vec{\xi}^{(-)} + \\ + \vec{C}^{(\lambda)} \vec{\xi}^{(+)} + D_{ij}^{(\lambda)} \xi_i^{(-)} \xi_j^{(+)}]. \quad (8)$$

Значения $A^{(\lambda)}$, $\vec{B}^{(\lambda)}$, $\vec{C}^{(\lambda)}$ и $D^{(\lambda)}$ приводятся ниже.

Отсюда можно получить выражения для средних значений поляризации электрона и позитрона следующим образом

$$\langle \sigma_{\text{эл.}} \rangle = \frac{\vec{B}^{(\lambda)}}{A^{(\lambda)}}, \quad \langle \sigma_{\text{поз.}} \rangle = \frac{\vec{C}^{(\lambda)}}{A^{(\lambda)}}, \quad (9)$$

которые совпадают с приведенными в работе [3] значениями.

Коэффициент конверсии есть отношение вероятности конверсии к вероятности излучения. Пользуясь данными § 27 [4], напомним вероятность излучения в виде

$$W_{\text{излуч.}} = \frac{2(L+1)}{L(2L+1)} \frac{\omega^{2L+1}}{|(2L+1)!!|^2} |Q^{(\lambda)}|^2. \quad (10)$$

Из (8) и (10) дифференциальный коэффициент конверсии электрического или магнитного мультиполя с образованием электрона в интервале импульсов $d\vec{p}_+$ с поляризацией $\vec{\xi}^{(-)}$, и позитрона в интервале импульсов $d\vec{p}_-$ с поляризацией $\vec{\xi}^{(+)}$, будет

$$d\beta_L^{(\lambda)} = \frac{\alpha\omega}{16\pi\epsilon_+\epsilon_-} |R_L|^2 [A^{(\lambda)} + \vec{B}^{(\lambda)} \vec{\xi}^{(-)} + \vec{C}^{(\lambda)} \vec{\xi}^{(+)} + D_{ij}^{(\lambda)} \xi_i^{(-)} \xi_j^{(+)}] \times \\ \times \frac{d\vec{p}_+ d\vec{p}_-}{(2\pi)^6} \delta(\omega - \epsilon_+ - \epsilon_-). \quad (11)$$

Магнитные переходы ($\lambda=0$). Матричный элемент оператора взаимодействия электрона и позитрона с полем мультиполя будет (4)

$$(B_{LM}^{(0)})_{21} = -N_+ N_- U^* \left(\vec{\sigma} + \frac{\vec{\sigma} \vec{p}_-}{\epsilon_- + m} \vec{\sigma} \frac{\vec{\sigma} \vec{p}_+}{\epsilon_+ + m} \right) V \vec{Y}_{LLM} \left(\frac{\vec{q}}{q} \right) R_L, \quad (12)$$

где $\vec{Y}_{LLM} \left(\frac{\vec{q}}{q} \right)$ — шаровой вектор, $R_L = (-1)^L \frac{(4\pi)^2 i}{\omega^2 (\omega^2 - q^2)} \left(\frac{q}{\omega} \right)^L$.

$\vec{q} = \vec{p}_+ + \vec{p}_-$, $\omega = \epsilon_+ + \epsilon_-$.

Подставляя (4), (7) и (12) в (3) и учитывая следующие соотношения для шаровых функций

$$\sum_{\text{по всем } m} \rho_{m_1 m_2} C_{l_1 m_1 L M}^{l_1 m_1} C_{l_2 m_2 L M}^{l_2 m_2} (\vec{Y}_{LLM}(\vec{n}) \vec{Y}_{LLM}^*(\vec{n}')) = \frac{1}{4\pi}, \\ i \sum \rho_{m_1 m_2} C_{l_1 m_1 L M}^{l_1 m_1} C_{l_2 m_2 L M}^{l_2 m_2} |\vec{Y}_{LLM}(\vec{n}) \vec{Y}_{LLM}^*(\vec{n}')| = \frac{3}{8\pi} \frac{r}{L(L+1)} (\langle \vec{J} \rangle \vec{n}) \vec{n}.$$

$$\sum_{p, m_1, m_2} C_{I_1 m_1, L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2, L M}^{I_2 m_2} \{ (\vec{a} \vec{Y}_{LLM}(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LLM}(\vec{n})) + \\ + (\vec{a} \vec{Y}_{LLM}^*(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LLM}^*(\vec{n})) \} = \frac{1}{4\pi} [(\vec{a} \vec{b}) - (\vec{a} \vec{n})(\vec{b} \vec{n})], \quad (13)$$

получим следующие значения для коэффициентов $A^{(2)}$, $\vec{B}^{(0)}$, $\vec{C}^{(0)}$, $D_{ij}^{(0)}$

$$A^{(0)} = \varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2 - \frac{1}{q^2} (\vec{p}_+ \vec{q}) (\vec{p}_- \vec{q}), \\ \vec{B}^{(0)} = \frac{3r}{2L(L+1)} \frac{(\langle \vec{J} \rangle \vec{q})}{q^2} \left\{ m\omega \vec{q} - \left[(\vec{p}_+ \vec{q}) - \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} (\vec{p}_- \vec{q}) \right] \vec{p}_- \right\}, \\ \vec{C}^{(0)} = -\frac{3r}{2L(L+1)} \frac{(\langle \vec{J} \rangle \vec{q})}{q^2} \left\{ m\omega \vec{q} - \left[(\vec{p}_- \vec{q}) - \frac{\varepsilon_- - m}{\varepsilon_+ + m} (\vec{p}_+ \vec{q}) \right] \vec{p}_+ \right\}, \\ D_{ij}^{(0)} = \left[1 - \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2 - \vec{p}_+ \vec{p}_-}{q^2} - \frac{\vec{p}_+ \vec{p}_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right] p_{+i} p_{-j} - \\ - \frac{1}{q^2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2 - \vec{p}_+ \vec{p}_-) p_{+i} p_{-j} + \frac{1}{q^2} \left[-\varepsilon_- \omega + \frac{\varepsilon_- - m}{\varepsilon_+ + m} (\vec{p}_+ \vec{q}) \right] p_{+i} p_{+j} + \\ + \frac{1}{q^2} \left[-\varepsilon_+ \omega + \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} (\vec{p}_- \vec{q}) \right] p_{-i} p_{-j} + \frac{p_+^2 p_-^2 - (\vec{p}_+ \vec{p}_-)^2}{q^2} \delta_{ij}, \quad (14)$$

где $\vec{n} = \frac{\vec{q}}{q}$, $\vec{a}$, $\vec{b}$ — векторы, которые составляют постоянный угол с $\vec{n}$, а $r = \frac{I_1(I_1+1) + L(L+1) - I_2(I_2+1)}{I_1(I_1+1)}$.

Запишем произведение дифференциалов в виде

$$d\vec{p}_+ d\vec{p}_- = d\vec{p}_+ d\vec{q} = q^2 d\Omega d\Omega_q p_+^2 dp_+ d\Omega_+,$$

Если выбрать ось z вдоль $\vec{q}$, то $d\Omega = d\cos\vartheta d\varphi$, где ϑ угол между $\vec{p}_+$ и $\vec{q}$, тогда при интегрировании δ функцию можно заменить следующим образом (4)

$$\delta(\omega - \varepsilon_+ - \varepsilon_-) d\cos\vartheta \rightarrow \frac{\varepsilon_-}{p_+ q}$$

Таким образом, подставив (14) в (11) и проинтегрировав последнюю по $d\varphi_+$ и $d\Omega_q$, получим

$$d_{pL}^{(0)}(\varepsilon_+, q) = \frac{2x}{\pi} \frac{q^{2L+1}}{\omega^{2L+1} (\omega^2 - q^2)^2} \left\{ \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{q^2} \left[-\frac{1}{4} + \frac{\omega^2 m^2}{(\omega^2 - q^2)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{p_+^2 + p_-^2}{2(\omega^2 - q^2)} \right] + \frac{r}{L(L+1)} (\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(-)}) \left[m\omega + \frac{\varepsilon_- - m}{\varepsilon_+ + m} q^2 - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\varepsilon_+ + \omega - m}{\varepsilon_- + m} p_+ q \cos \vartheta + \frac{\omega}{\varepsilon_- + m} p_+^2 \cos^2 \vartheta \Big] - \\
& - \frac{r}{L(L+1)} (\langle \vec{J} \rangle \cdot \vec{\xi}^{(+)}) \left[m\omega - p_+ q \cos \vartheta + \frac{mp_+^2}{\varepsilon_+ + m} \cos^2 \vartheta \right] + \quad (15) \\
& + \frac{1}{3} (\vec{\xi}^{(+)} \cdot \vec{\xi}^{(-)}) \left[\left(1 - \frac{\omega^2 - q^2}{q^2} + 2 \frac{\varepsilon_+ \omega}{q^2} - \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} \frac{\varepsilon_-^2 + \varepsilon_+^2}{q^2} \right) p_+ q \cos \vartheta - m^2 - \varepsilon_+ \varepsilon_- + \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} q^2 + \right. \\
& \left. + \left(-\frac{3}{q^2} + 2 \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} \frac{1}{q^2} - \frac{1}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) p_+^2 q^2 \cos^2 \vartheta \right] dq d\varepsilon_+,
\end{aligned}$$

где

$$\cos \vartheta = \frac{2\omega\varepsilon_+ - (\omega^2 - q^2)}{2p_+ q}.$$

Подставив это значение и проинтегрировав (15) по dq в пределах от $q_{\min} = |p_+ - p_-|$ до $q_{\max} = p_+ + p_-$, напомним коэффициент конверсии в следующем виде

$$\begin{aligned}
d\beta_L^{(0)}(\varepsilon_+) &= \frac{\alpha}{\pi\omega^{2L+1}} \left[a^{(0)} + \frac{r}{2L(L+1)} \frac{(\langle \vec{J} \rangle \cdot \vec{\xi}^{(-)})}{\varepsilon_- + m} b^{(0)} - \right. \\
& - \frac{r}{2L(L+1)} \frac{(\langle \vec{J} \rangle \cdot \vec{\xi}^{(+)})}{\varepsilon_+ + m} c^{(0)} + \frac{1}{3} (\vec{\xi}^{(+)} \cdot \vec{\xi}^{(-)}) a^{(0)} \Big] d\varepsilon_+, \quad (16)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
a^{(0)} &= \omega^{2(L-1)} [p_+^2 + p_-^2 - 2(L-1)m^2] \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \\
& - \frac{1}{4L} [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] + \frac{1}{2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2) \times \\
& \times (p_+ + p_-)^{2(L-1)} - \frac{1}{2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- - p_+ p_- - m^2) (p_+ - p_-)^{2(L-1)} - \\
& - \frac{1}{2} [p_+^2 + p_-^2 - 2(L-1)m^2] \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{2(L-n-1)}}{n} \times \\
& \times [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}], \\
b^{(0)} &= \omega^{2L-1} [2(\varepsilon_-^2 - Lm^2) - \omega(\varepsilon_- - m)] \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} + \\
& + \frac{1}{4L} (\omega - 2\varepsilon_- - 2m) [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] + \\
& + \frac{\omega}{2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2) (p_+ + p_-)^{2(L-1)} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\omega}{2}(\varepsilon_+\varepsilon_- - p_+p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-1)} - \frac{\omega}{2}[2(\varepsilon_-^2 - Lm^2) - \\
& - \omega(\varepsilon_- - m)] \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{2(L-n-1)}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}], \\
c^{(0)} &= \omega^{2L-1} [2(\varepsilon_+^2 - Lm^2) - \omega(\varepsilon_+ - m)] \ln \frac{\varepsilon_+\varepsilon_- + p_+p_- + m^2}{m\omega} + \\
& + \frac{1}{4L}(\omega - 2\varepsilon_+ - 2m) [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] + \\
& + \frac{\omega}{2}(\varepsilon_+\varepsilon_- + p_+p_- - m^2)(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - \\
& - \frac{\omega}{2}(\varepsilon_+\varepsilon_- - p_+p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-1)} - \frac{\omega}{2}[2(\varepsilon_+^2 - Lm^2) - \\
& - \omega(\varepsilon_+ - m)] \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{2(L-n-1)}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}], \quad (17) \\
a^{(0)} &= 2\omega^{2(L-1)} \left[\frac{\omega^2}{2} + \varepsilon_+\varepsilon_- + Lm^2 + m\omega^2 \frac{Lm - \omega}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right] \times \\
& \times \ln \frac{\varepsilon_+\varepsilon_- + p_+p_- + m^2}{m\omega} + \frac{1}{4L} \left(1 - 4 \frac{\varepsilon_+\varepsilon_- + m^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) \times \\
& \times [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] - \frac{(p_+ + p_-)^{2(L+1)} - (p_+ - p_-)^{2(L+1)}}{4(L+1)(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} - \\
& - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) [(\varepsilon_+\varepsilon_- + p_+p_- - m^2)(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - \\
& - (\varepsilon_+\varepsilon_- - p_+p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-1)}] - \\
& - \left[\frac{\omega^2}{2} + \varepsilon_+\varepsilon_- + Lm^2 + m\omega^2 \frac{Lm - \omega}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right] \times \\
& \times \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{2(L-n-1)}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}].
\end{aligned}$$

Электрические переходы ($\lambda = 1$). Матричный элемент оператора $B_{LM}^{(1)}$ в этом случае имеет вид (4)

$$\begin{aligned}
(B_{LM}^{(1)})_{21} &= -N_+N_- \sqrt{\frac{L}{L+1}} U^* \left(\frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_+}{\varepsilon_+ + m} + \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_-}{\varepsilon_- + m} \right) V Y_{LM}(\vec{n}) R_L - \\
& - N_+N_- \sqrt{\frac{2L+1}{L+1}} U^* \left(\vec{\sigma} \cdot \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}) + \right. \\
& \left. + \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_-}{\varepsilon_- + m} \vec{\sigma} \cdot \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}) \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}_+}{\varepsilon_+ + m} \right) V R_{L-1}. \quad (18)
\end{aligned}$$

Для шаровых функций в этом случае встречаются выражения следующего вида* (по всем m индексам производится суммирование)

$$\begin{aligned} \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} Y_{LM}(\vec{n}) Y_{LM'}^*(\vec{n}) &= \frac{1}{4\pi}, \\ \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} (\vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}) \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})) &= \frac{1}{4\pi}, \\ \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} (Y_{LM}(\vec{n}) \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n}) + Y_{LM'}^*(\vec{n}) \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n})) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{2L+1}} \vec{n}, \\ i \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} (Y_{LM}(\vec{n}) \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n}) - Y_{LM'}^*(\vec{n}) \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n})) &= \\ &= -\frac{3}{8\pi} \frac{r}{\sqrt{L(2L+1)}} [\vec{n} \times \langle \vec{J} \rangle], \\ i \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} [\vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}) \times \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})] &= \\ &= \frac{3}{8\pi} \frac{r}{2L+1} \left(\langle \vec{J} \rangle - \frac{L-1}{L} (\langle \vec{J} \rangle \vec{n}) \vec{n} \right), \\ \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} [(\vec{a} \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})) + \\ &+ (\vec{a} \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}))] = \\ &= \frac{1}{4\pi(2L+1)} [(L+1) (\vec{a} \vec{b}) + (L-1) (\vec{a} \vec{n}) (\vec{b} \vec{n})], \\ i \sum \rho_{m_1 m_1'} C_{I_2 m_2 L M}^{I_1 m_1} C_{I_2 m_2 L M'}^{I_1 m_1'} [(\vec{a} \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})) - \\ &- (\vec{a} \vec{Y}_{LL-1M'}^*(\vec{n})) (\vec{b} \vec{Y}_{LL-1M}(\vec{n}))] = \\ &= \frac{3r}{16\pi L(2L+1)} \left[(L+1) (\langle \vec{J} \rangle [\vec{a} \vec{b}]) - (L-1) (\langle \vec{J} \rangle \vec{n}) (\vec{n} [\vec{a} \vec{b}]) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя (4), (7) и (18) в (3) и учитывая (19) получим следующие значения для $A^{(1)}$, $\vec{B}^{(1)}$, $\vec{C}^{(1)}$ и $D_{ij}^{(1)}$

$$\begin{aligned} A^{(1)} &= \frac{L}{L+1} \left\{ \varepsilon_+ \varepsilon_- - m^2 + \frac{2L+1}{L} \frac{\omega^2}{q^2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \right. \\ &+ \left(1 - \frac{\omega^2}{q^2} \right) (\vec{p}_+ \vec{p}_-) - 2 \frac{\omega}{q^2} [\varepsilon_- (\vec{p}_+ \vec{q}) + \varepsilon_+ (\vec{p}_- \vec{q})] + \\ &+ \left. \frac{L-1}{L} \frac{\omega^2}{q^4} (\vec{p}_+ \vec{q}) (\vec{p}_- \vec{q}) \right\}, \end{aligned}$$

$$\vec{B}^{(1)} = \frac{3}{2} \frac{r}{(L+1)} \frac{\omega}{q^2} \left\{ m (\omega^2 - q^2) \langle \vec{J} \rangle + \left(2\omega + \frac{\vec{p}_- \vec{q}}{\varepsilon_+ + m} \right) (\vec{p}_+ \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_- + \right.$$

* Значения этих выражений определяются непосредственным вычислением.

$$\begin{aligned}
& + \left(m + \omega \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} - \frac{\vec{p}_+ \vec{q}}{\varepsilon_+ + m} \right) (\vec{p}_- \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_- + m (\vec{q} \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_+ + \\
& + \frac{L-1}{L} \frac{\omega}{q^2} \left[-m\omega + (\vec{p}_+ \vec{q}) - \frac{\varepsilon_+ - m}{\varepsilon_- + m} (\vec{p}_- \vec{q}) \right] (\vec{q} \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_- - \\
& - \frac{L-1}{L} \frac{m\omega^2}{q^2} (\vec{q} \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_+ \Big\}, \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{C}^{(1)} = & - \frac{3}{2} \frac{r}{(L+1)} \frac{\omega}{q^2} \left\{ m(\omega^2 - q^2) \langle \vec{J} \rangle + \right. \\
& + \left(2\omega + \frac{\vec{p}_+ \vec{q}}{\varepsilon_- + m} \right) (\vec{p}_- \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_+ + \left(m - \frac{\vec{p}_- \vec{q}}{\varepsilon_- + m} + \omega \frac{\varepsilon_- - m}{\varepsilon_+ + m} \right) \times \\
& \times (\vec{p}_+ \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_+ + m \left(1 - \frac{L-1}{L} \frac{\omega^2}{q^2} \right) (\vec{q} \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_- + \\
& + \frac{L-1}{L} \frac{\omega}{q^2} \left[-m\omega + (\vec{p}_- \vec{q}) - \frac{\varepsilon_- - m}{\varepsilon_+ + m} (\vec{p}_+ \vec{q}) \right] (\vec{q} \langle \vec{J} \rangle) \vec{p}_+ \Big\}, \\
D_{ij}^{(1)} = & \frac{L}{L+1} \left\{ \left[\varepsilon_- + m - (\varepsilon_- + 3m) \frac{\omega^2}{q^2} + \frac{L-1}{2L} \frac{\omega^2}{q^4} (m(\omega^2 + q^2) + \right. \right. \\
& + \left. \varepsilon_- (\omega^2 - q^2)) \right] \frac{p_{+i} p_{+j}}{\varepsilon_+ + m} + \left[\varepsilon_+ + m - (\varepsilon_+ + 3m) \frac{\omega^2}{q^2} + \right. \\
& + \left. \frac{L-1}{2L} \frac{\omega^2}{q^4} (m(\omega^2 + q^2) + \varepsilon_+ (\omega^2 - q^2)) \right] \frac{p_{-i} p_{-j}}{\varepsilon_- + m} + \\
& + \left[1 + \frac{\omega^2}{L q^2} + \frac{L-1}{2L} \frac{\omega^2 (\omega^2 - q^2)}{q^4} + \frac{L+1}{L} \frac{\omega^2}{q^2} \frac{(\vec{p}_+ \vec{p}_-)}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right] p_{-i} p_{+j} + \\
& + \left(1 - \frac{L-1}{2L} \frac{\omega^2}{q^2} \right) \frac{q^2 - \omega^2}{q^2} p_{+i} p_{-j} + \left[2\varepsilon_+ \varepsilon_- \frac{\omega^2 - q^2}{q^2} - \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{2q^2} - \right. \\
& - \left. 2m^2 \frac{\omega^2}{q^2} + \frac{L-1}{L} \left((\vec{p}_+ \vec{p}_-)^2 - p_{+i}^2 p_{-i}^2 \right) \frac{\omega^2}{q^4} \right] \delta_{ij} \Big\}.
\end{aligned}$$

Поступая далее также, как и в случае магнитных переходов, получим следующее выражение для дифференциального коэффициента конверсии

$$\begin{aligned}
d\sigma_L^{(1)}(\varepsilon_+, q) = & \frac{2\alpha}{\pi(L+1)} \frac{q^{2L-1}}{\omega^2(\omega^2 - q^2)^2} \left\{ \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{\omega} \left[\frac{L}{2} - \frac{L-1}{4} \frac{\omega^2}{q^2} + \right. \right. \\
& + \frac{L+1}{2} \frac{\omega^2}{\omega^2 - q^2} - 2L \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_-}{\omega^2 - q^2} + (L+1) \frac{m^2 \omega^2}{(\omega^2 - q^2)^2} + \\
& + (L-1) \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- \omega^2}{q^2 (\omega^2 - q^2)} \Big] + r(\langle \vec{J} \rangle) \vec{\xi}^{(-1)} \left[(3\omega - m)(\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{m^2 \omega^2 (\varepsilon_+ - \varepsilon_-)}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2 \omega^2}{\varepsilon_+ + m} + \left(\frac{5}{2} m - \frac{3L-1}{2L} \omega - \right. \\
& \left. - \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\varepsilon_+ + m} \right) (\omega^2 - q^2) + \frac{L-1}{L} \frac{\omega^2 \varepsilon_+ \varepsilon_-}{\varepsilon_+ + m} \frac{\omega^2 - q^2}{q^2} + \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{4(\varepsilon_+ + m)} - \\
& - \frac{L-1}{4L} \frac{\omega^2}{\varepsilon_- + m} \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{q^2} \left] - r (\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(+)}) \left[(3\omega - m) (\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \right. \right. \\
& + \frac{m^2 \omega^2 (\varepsilon_+ - \varepsilon_-)}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2 \omega^2}{\varepsilon_+ + m} + \left(\frac{5}{2} m - \frac{3L-1}{2L} \omega - \right. \\
& \left. - \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\varepsilon_- + m} \right) (\omega^2 - q^2) + \frac{L-1}{L} \frac{\omega^2 \varepsilon_+ \varepsilon_-}{\varepsilon_+ + m} \frac{\omega^2 - q^2}{q^2} + \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{4(\varepsilon_- + m)} - \\
& - \frac{L-1}{4L} \frac{\omega^2}{\varepsilon_+ + m} \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{q^2} \left] + \frac{2}{3} (\vec{\xi}^{(+)} \vec{\xi}^{(-)}) \frac{L}{\omega} \left[\frac{L+1}{L} m^2 \omega^2 \times \right. \\
& \times \frac{m\omega + m^2 + \varepsilon_+ \varepsilon_- - \omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \left(m^2 - \varepsilon_+ \varepsilon_- + \frac{L+1}{2L} \omega^2 \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- - m\omega + m^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) \times \\
& \times (\omega^2 - q^2) - \frac{L-1}{L} m^2 \omega^2 \frac{\omega^2 - q^2}{q^2} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{L+1}{2L} \frac{\omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) \times \\
& \times (\omega^2 - q^2)^2 + \left(\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2 - \frac{L+1}{4L} \omega^2 \right) \frac{(\omega^2 - q^2)^2}{q^2} \left] \right] dq d\varepsilon_+. \quad (21)
\end{aligned}$$

После интегрирования по dq запишем коэффициент конверсии в следующем виде ($L \neq 1$)

$$\begin{aligned}
d^2 L^{(1)}(\varepsilon_+) = & \frac{\alpha}{\pi \omega^{2L+1}} \left[a^{(1)} + \frac{r}{2(L+1)} (\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(-)}) b^{(1)} - \right. \\
& \left. - \frac{r}{2(L+1)} (\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(+)}) c^{(1)} + \frac{L}{3(L+1)} (\vec{\xi}^{(+)} \vec{\xi}^{(-)}) d^{(1)} \right] d\varepsilon_+, \quad (22)
\end{aligned}$$

где $a^{(1)}$, $b^{(1)}$, $c^{(1)}$, $d^{(1)}$ имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
a^{(1)} = & \frac{1}{2(L+1)} [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] - \left(\frac{(\varepsilon_+ - \varepsilon_-)^2}{4(L+1)} + m^2 \right) \times \\
& \times [(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - (p_+ - p_-)^{2(L-1)}] + \frac{\omega^2}{2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2) \times \\
& \times (p_+ + p_-)^{2(L-2)} - \frac{\omega^2}{2} (\varepsilon_+ \varepsilon_- - p_+ p_- - m^2) (p_+ - p_-)^{2(L-2)} + \\
& + \omega^{2(L-1)} (\varepsilon_+^2 + \varepsilon_-^2 - 2(L-1)m^2) \left\{ \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{-2n}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}] \right\}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b^{(1)} = & \frac{\omega}{4L(\varepsilon_+ + m)} [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] + \\
& + \omega \left[(m - 3\omega) \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\omega^2} - m^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \right. \\
& + \frac{1}{L} \frac{m^2}{\varepsilon_+ + m} + \frac{1}{L} \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_-}{\varepsilon_- + m} - \frac{1}{4L} \frac{\omega^2}{\varepsilon_+ + m} \left. \right] [(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - \\
& - (p_+ - p_-)^{2(L-1)}] + \frac{\omega}{2m^2} \left[(3\omega - m)(\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \right. \\
& + m^2 \omega^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2 \omega^2}{\varepsilon_- + m} \left. \right] [(\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2) \times \\
& \times (p_+ + p_-)^{2(L-2)} - (\varepsilon_+ \varepsilon_- - p_+ p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-2)}] - \\
& - 2(L-1)\omega^{2L-1} \times \\
& \times \left[(3\omega - m) \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\omega^2} + m^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2}{\varepsilon_- + m} - \right. \\
& - \frac{5m}{2(L-1)} + \frac{3L-1}{2L(L-1)} \omega + \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{(L-1)(\varepsilon_- + m)} - \frac{1}{L} \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_-}{\varepsilon_- + m} \left. \right] \times \\
& \times \left\{ \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{-2n}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}] \right\}, \\
c^{(1)} = & \frac{\omega}{4L(\varepsilon_+ + m)} [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] + \\
& + \omega \left[(m - 3\omega) \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\omega^2} - m^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2}{\varepsilon_+ + m} + \right. \\
& + \frac{1}{L} \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_-}{\varepsilon_+ + m} - \frac{1}{4L} \frac{\omega^2}{\varepsilon_+ + m} \left. \right] [(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - (p_+ - p_-)^{2(L-1)}] + \\
& + \frac{\omega}{2m^2} \left[(3\omega - m)(\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + m^2 \omega^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \right. \\
& + \frac{1}{L} \frac{m^2 \omega^2}{\varepsilon_- + m} \left. \right] [(\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2)(p_+ + p_-)^{2(L-2)} - \\
& - (\varepsilon_+ \varepsilon_- - p_+ p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-2)}] - 2(L-1)\omega^{2L-1} \times \\
& \times \left[(3\omega - m) \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\omega^2} + m^2 \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} + \frac{1}{L} \frac{m^2}{\varepsilon_- + m} - \right. \\
& - \frac{5m}{2(L-1)} + \frac{3L-1}{2L(L-1)} \omega + \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{(L-1)(\varepsilon_- + m)} + \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_-}{L(\varepsilon_- + m)} \left. \right] \times \\
& \times \left\{ \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{-2n}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}] \right\}.
\end{aligned}
\tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 d^{(1)} = & \left[\frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- - (L-2)m^2}{L-1} + \frac{L+1}{L} \frac{m^2 \omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} - \right. \\
 & \left. - \frac{L+1}{4L(L-1)} \omega^2 \right] [(p_+ + p_-)^{2(L-1)} - (p_+ - p_-)^{2(L-1)}] + \\
 & + \frac{L+1}{L} \omega^2 \frac{m\omega + m^2 + \varepsilon_+ \varepsilon_- - \omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} [(\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- - m^2)(p_+ + p_-)^{2(L-2)} - \\
 & - (\varepsilon_+ \varepsilon_- - p_+ p_- - m^2)(p_+ - p_-)^{2(L-2)}] + \\
 & + \frac{1}{2L} \left(1 - \frac{L+1}{L} \frac{\omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) [(p_+ + p_-)^{2L} - (p_+ - p_-)^{2L}] - \\
 & - 2\omega^{2(L-1)} \frac{L+1}{L} \left[(L-1)m^2 - \frac{\omega^2}{2} - \frac{(L-1)m - \omega}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} m\omega^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{m^2 - L\varepsilon_+ \varepsilon_-}{L+1} \right] \left[\ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{L-1} \frac{\omega^{-2n}}{n} [(p_+ + p_-)^{2n} - (p_+ - p_-)^{2n}] \right].
 \end{aligned}$$

При $L=1$ получим:

$$\begin{aligned}
 d_{p1}^{(1)}(\varepsilon_+) = & \frac{\alpha}{\pi\omega^2} \left\{ (\varepsilon_+^2 + \varepsilon_-^2) \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} + 2p_+ p_- + \right. \\
 & + r(\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(-)}) \left[\left(\frac{3\omega - m}{m^2\omega} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \frac{\omega}{\varepsilon_+ + m} \right) p_+ p_- + \right. \\
 & + \omega \left(\frac{5}{2} m - \omega - \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\varepsilon_+ + m} \right) \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} \Big] - \\
 & - r(\langle \vec{J} \rangle \vec{\xi}^{(+)}) \left[\left(\frac{3\omega - m}{m^2\omega} (\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2) + \frac{\omega}{\varepsilon_- + m} \right) p_+ p_- + \right. \\
 & + \omega \left(\frac{5}{2} m - \omega - \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + m^2}{\varepsilon_- + m} \right) \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} \Big] + \\
 & + \frac{2}{3} (\vec{\xi}^{(-)} \vec{\xi}^{(+)}) \left[\frac{2\omega^2}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} p_+ p_- + \right. \\
 & + \left(m^2 - \varepsilon_+ \varepsilon_- + \omega^2 \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + \omega^2 - m\omega}{(\varepsilon_+ + m)(\varepsilon_- + m)} \right) \times \\
 & \times \ln \frac{\varepsilon_+ \varepsilon_- + p_+ p_- + m^2}{m\omega} - \frac{1}{2} (p_+^2 + p_-^2) \ln \left| \frac{p_+ + p_-}{p_+ - p_-} \right| \Big] \Big\} d\varepsilon_+.
 \end{aligned}$$

Результаты интегрирования по $d\varepsilon_+$ в общем случае не выражаются через элементарные функции.

В заключение выражаю благодарность профессору Берестецкому В. Б. за указание темы и за оказанную помощь.

Физический институт
АН Армянской ССР

Поступила 18 VIII 1960

Ս. Մ. Դարբինյան

ՉՈՒՅԳԻ ԱՌԱՋԱՑՈՒՄՈՎ ՆԵՐՔԻՆ ԿՈՆՎԵՐՍԻԱՆ ԲԵՎԵՌԱՑԱԾ ՄԻՋՈՒԿԻ ՎՐԱ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հաշվածում առաժնատրվում է էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգի առաջացումով ներքին կոնվերսիան բևեռացած միջուկի վրա: Միջուկի կալոնյան դաշտը անտեսվում է:

Եթե միջուկը բևեռացած է, ապա այդ միջուկի վրա առաջացած կոնվերսիոն էլեկտրոնի ու պոզիտրոնի միջին բևեռացումը տարբեր է զերոյից: Համապատասխան արտահայտությունները մաղնիսական ($\lambda=0$) և էլեկտրական ($\lambda=1$) տիպի անցումների համար բերված են (9) բանաձևերում:

Ստացված են արտահայտություններ ներքին կոնվերսիայի գիգերհերցիալ զործակցի համար (16), (22) (համապատասխանորեն մաղնիսական ու էլեկտրական անցումների դեպքերում), երբ միջուկը, էլեկտրոնն ու պոզիտրոնն ունեն միջին բևեռացում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берестецкий В. Б., Рудик А. П. Поляризация электронов внутренней конверсии следующей за β -распадом. „ЖЭТФ“, **35**, 1 (7), 1958.
2. Гейшенбейн Б. В. Поляризация электронов внутренней конверсии следующей за β -распадом. „ЖЭТФ“, **35**, 5 (11), 1958.
3. Лобов Г. А. Поляризация электронов и позитронов внутренней конверсии следующей за β -распадом ядра. „ЖЭТФ“, **39**, 3 (9), 1960.
4. Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. Физматгиз, М., 1959.