

소립자의 렙톤반응 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 에서 전기-약한호상작용을 고려한 스핀편극효과

원석현, 김광일, 고영해

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《소립자론과 마당론에 대한 연구에도 힘을 넣어야 합니다. 소립자론과 마당론은 물질세계의 본질을 해명하기 위한 기초원리적인 과학분야이므로 리론물리학부문에서는 마땅히 여기에 힘을 넣어야 합니다.》(《김정일전집》 제4권 410~411페이지)

소립자반응에서 스핀편극을 고려하여 산란자름면적을 계산하는것은 짝홀성과괴, 스핀상관을 비롯한 중요한 문제들을 리론적으로 해석하는데서 매우 중요한 의의를 가진다.[1] 특히 전자기호상작용뿐만아니라 약한호상작용까지 고려하는것은 고에너지 영역에서 일어나는 소립자반응들을 정확히 리해하고 표준모형을 검증하는데서 필수적인 문제로 나선다.

선행연구[2]에서는 전기-약한호상작용을 적용하면서 주로 렙톤질량들을 무시하고 계산을 진행하였다. 실험기술의 발전으로 산란자름면적에 대한 측정이 보다 엄밀해지는데 맞게 그것에 미치는 고차도표에 의한 기여를 정확히 고려하자면 렙톤질량까지 고려하여 산란자름면적을 계산하여야 한다.

논문에서는 전기-약한호상작용의 통일리론을 적용하여 비교적 질량이 큰 렙톤이 발생하는 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 반응에 대해 산란자름면적을 계산하고 거기에 미치는 스핀편극효과를 밝혔다.

전자-양전자산란과정에 중성립자인 Z^0 이 발생하는 반응과 대전된 W^\pm 립자가 발생하는 반응이 다 가능하게 된다. W^\pm 립자는 Z^0 립자가 발생하는 반응에 비해 보다 높은 고차도표에서 나타난다. 다시말하여 Z^0 립자는 W^\pm 립자보다 훨씬 높은 확률을 가지고 발생한다. 논문에서는 전자-양전자산란의 산란행렬에서 2차섭동항까지 고려하여 포톤을 매개하는 반응과 Z^0 을 매개하는 반응의 두가지 경우를 고려하여 논의를 진행하였다.

$$M_\gamma = e^2 \bar{u}^{(s_{1f})}(p_{1f}) \gamma^\mu v^{(s_{2f})}(p_{2f}) \frac{g_{\mu\nu}}{k^2} \bar{v}^{(s_{2i})}(p_{2i}) \gamma^\nu u^{(s_{1i})}(p_{1i})$$

$$M_Z = -\frac{g^2}{4\cos^2\theta_W} [\bar{u}^{(s_{1f})}(p_{1f}) \gamma^\mu (c_V^e - c_A^e \gamma^5) v^{(s_{2f})}(p_{2f})] \left(\frac{g_{\mu\nu} - k_\mu k_\nu / M_Z^2}{k^2 - M_Z^2} \right) \cdot [\bar{v}^{(s_{2i})}(p_{2i}) \gamma^\nu (c_V^l - c_A^l \gamma^5) u^{(s_{1i})}(p_{1i})]$$

여기서 s_i, s_f 는 각각 초기상태와 마감상태의 스핀, p_i, p_f 는 초기상태와 마감상태의 운동량, u, v 는 각각 렙톤립자와 그 반립자의 파동함수이며 $k = p_{1i} + p_{2i}$ 이다. l 은 렙톤립자를 나타낸다. 표준모형에 의하면

$$c_V = T_3 - 2Q\sin^2\theta_W, \quad c_A = T_3, \quad g = \frac{e}{\sin\theta_W}$$

이며 T_3 과 Q 는 각각 페르미온의 동위스핀의 세번째 성분과 전하로서 전자, 타우립자에

대해 모두 $Q=-1$, $T_3=-1/2$ 이다. 실험적으로 측정되어 리용되는 값은 중성벡토르보존의 질량 $M_Z(=91.16\text{GeV})$ 와 와인버그각 θ_W ($\sin^2 \theta_W = 0.23$)이다.

이제 각이한 라선도상태들에 대한 $|M_\gamma + M_Z|^2$ 을 해석적으로 계산함으로써 산란자름면적을 구할수 있다. 계산결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow l_L^- l_R^+)}{d\Omega} &= \sqrt{\frac{4m_l^2 - s}{4m_e^2 - s}} \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos\theta)^2 \cdot \left| 1 + \frac{\gamma}{s} \left(C_V^e \sqrt{s} + C_A^e \sqrt{-4m_e^2 + s} \right) \left(C_V^l \sqrt{s} + C_A^l \sqrt{-4m_l^2 + s} \right) \right|^2 \\ \frac{d\sigma(e_R^- e_L^+ \rightarrow l_R^- l_L^+)}{d\Omega} &= \sqrt{\frac{4m_l^2 - s}{4m_e^2 - s}} \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos\theta)^2 \cdot \left| 1 + \frac{\gamma}{s} \left(C_V^e \sqrt{s} - C_A^e \sqrt{-4m_e^2 + s} \right) \left(C_V^l \sqrt{s} - C_A^l \sqrt{-4m_l^2 + s} \right) \right|^2 \\ \frac{d\sigma(e_L^- e_L^+ \rightarrow l_L^- l_L^+)}{d\Omega} &= \frac{m_e^2 m_l^2}{s^2} \sqrt{\frac{4m_l^2 - s}{4m_e^2 - s}} \frac{4\alpha^2}{s} \left| \cos\theta + \gamma \left[C_A^e C_A^l \left(1 - \frac{s}{M_Z^2} \right) - C_V^e C_V^l \cos\theta \right] \right|^2 \\ \frac{d\sigma(e_L^- e_L^+ \rightarrow l_L^- l_R^+)}{d\Omega} &= \frac{m_e^2}{s} \sqrt{\frac{4m_l^2 - s}{4m_e^2 - s}} \frac{\alpha^2}{s} \sin^2 \theta \left| 1 + \frac{\gamma}{s} C_V^e \left[C_V^l s + C_A^l \sqrt{s(-4m_l^2 + s)} \right] \right|^2 \end{aligned}$$

여기서 $\gamma = \frac{\sqrt{2}GM_Z^2}{s - M_Z^2 + iM_Z\Gamma_Z} \left(\frac{s}{e^2} \right)$, $G = \frac{\sqrt{2}g^2}{8M_Z^2 \cos^2 \theta_W}$ 이다.

고에너지영역에서는 $m_l^2 \ll s$, $m_e^2 \ll s$ 이므로 초기 및 마감상태립자들의 각이한 라선도상태들가운데서 반응에서 기본적인 몫을 차지하는것은 전자기호상작용에서처럼 초기립자들의 라선도가 서로 다르고 또 마감상태립자들의 라선도가 서로 다르게 되는 경우이다. 이것은 벡토르와 축성벡토르호상작용에 대해서 고에너지극한에서 라선도보존법칙이 성립한다는 사실에 부합된다. 위의 결과는 렙톤들의 질량을 무시하고 계산한 선행연구[3]의 결과식과 잘 일치한다. 즉 렙톤들의 질량을 무시하면 산란자름면적은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow l_L^- l_R^+)}{d\Omega} &= \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos\theta)^2 |1 + \gamma C_L^e C_L^l|^2 \\ \frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow l_R^- l_L^+)}{d\Omega} &= \frac{\alpha^2}{4s} (1 - \cos\theta)^2 |1 + \gamma C_L^e C_R^l|^2 \\ \frac{d\sigma(e_R^- e_L^+ \rightarrow l_R^- l_L^+)}{d\Omega} &= \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos\theta)^2 |1 + \gamma C_R^e C_R^l|^2 \\ \frac{d\sigma(e_R^- e_L^+ \rightarrow l_L^- l_R^+)}{d\Omega} &= \frac{\alpha^2}{4s} (1 - \cos\theta)^2 |1 + \gamma C_R^e C_L^l|^2 \end{aligned}$$

여기서 $C_R^l \equiv C_V^l - C_A^l$, $C_L^l \equiv C_V^l + C_A^l$ 이다.

만델슈타인변수 s (질량중심계에서는 전체 에너지의 2제곱과 같은 량)에 따르는 총산란자름면적을 전자기호상작용만을 고려한 경우와(그림의 점선) 전기-약한호상작용을 고려

한 경우에(실선) 그래프로 보여주었다.

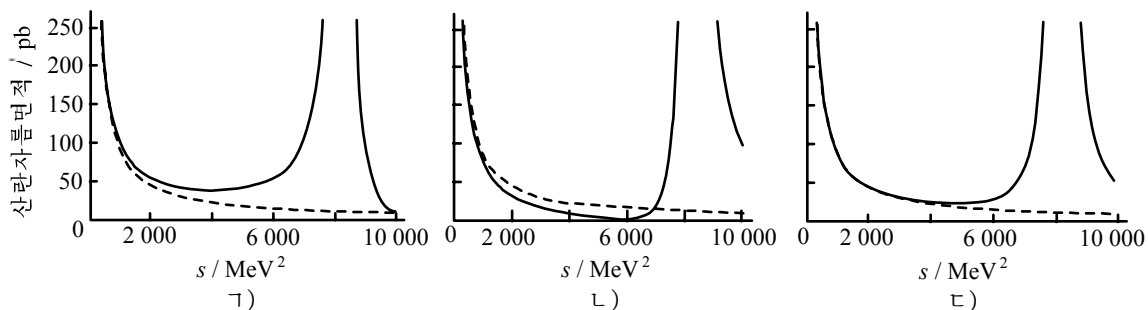


그림. s 에 따르는 총산란자름면적

ㄱ) $e_L^-e_R^+ \rightarrow \tau_R^-\tau_L^+$, ㄴ) $e_L^-e_R^+ \rightarrow \tau_L^-\tau_R^+$, ㄷ) 평균

$s = M_Z^2$ 근방에서 산란자름면적에서는 급격한 증가가 일어난다. 이것은 $e^-e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$ 반응에서 중간벡터보존 Z^0 이 공명립자로 거동한다는것을 말해준다. Z^0 보존은 붕괴되므로 고유한 붕괴폭 Γ_Z ($\Gamma_Z = 2.5\text{GeV}$) 를 가지는데 앞의 계산에서는 바로 이 붕괴폭을 고려하여 γ 의 분모에 허수항을 첨가해주었다.

맺 는 말

전기-약한호상작용을 고려하여 초기상태와 마감상태립자들이 각이한 스핀편극상태에 있을 때 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 반응에서의 산란자름면적을 계산하였다. 여기서 타우렙톤의 질량을 고려하여 계산을 진행함으로써 실험결과와 높은 정확도로 일치하는 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 63, 3, 64, 주체106(2017).
- [2] Yuee Luo et al.; Int. J. Theor. Phys., 54, 645, 2015.
- [3] W. Greiner et al.; Gauge Theory of Weak Interactions, Springer, 182~196, 2000.

주체106(2017)년 9월 5일 원고접수

Spin Polarization Effects in the Lepton Reaction $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ Taking Electroweak Interactions into Account

Won Sok Hyon, Kim Kwang Il and Ko Yong Hae

We presented analytic results to electron-positron annihilation processes into tau leptons under the aspect of polarized initial and final state particles. Since we took masses of tau leptons into account, this result is consistent with the experimental data with high accuracy.

Key words: polarization, cross section, electroweak interaction