



$ep \rightarrow \tau \Lambda_c$ 极化散射过程与新物理唯象研究

汇报人员：张亮辉
指导老师：严鑫帅

2023-10-22





报告内容

- 研究目的
- 研究方法
- 数值结果
- 分析总结



研究目的

在标准模型中，树图阶的味改变中性流是不存在的，且粲物理的味改变中性流过程受到GIM机制的压低。这意味着粲物理中的味改变中性流的过程是检验标准模型和寻找新物理的重要场所。 $c \rightarrow u\tau^-e^+$ 引导的D介子全轻衰变，目前在实验上没有测量，且在理论上无法避免长矩贡献影响。因此我们首次考虑 $ep \rightarrow \tau\Lambda_c$ 低能极化散射过程可以避开这些影响，并且可以与高能对撞机的直接探索形成很好的互补关系。具体的，我们选取低能电子束与质子靶散射产生 Λ_c 重子和 τ 轻子的散射过程，通过对散射过程进行运动学分析，并考虑到末态粒子极化，运用极化观测量来寻找和鉴别LQ模型，然后对可观测量进行分析和事例数估计。



研究方法

能产生树图阶 $eu \rightarrow ec$ 过程的最为普适的有效拉氏量可写为

$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{eff}^{SM} + \mathcal{L}_{eff}^{LQ}$$

由于GIM机制，标准模型的贡献被严重压低，因此这里只讨论由树图阶LQ交换导出的有效拉氏量

$\mathcal{L}_{eff}^{LQ}$ 的具体形式为：



$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{eff}}^{\text{LQ}} = \sum_{i,j,m,n} \bigg\{ & [g_V^{LL}]^{ij,mn} (\bar{\ell}_L^i \gamma_\mu \ell_L^j) (\bar{q}_L^m \gamma^\mu q_L^n) + [g_V^{LR}]^{ij,mn} (\bar{\ell}_L^i \gamma_\mu \ell_L^j) (\bar{q}_R^m \gamma^\mu q_R^n) \\ & + [g_V^{RL}]^{ij,mn} (\bar{\ell}_R^i \gamma_\mu \ell_R^j) (\bar{q}_L^m \gamma^\mu q_L^n) + [g_V^{RR}]^{ij,mn} (\bar{\ell}_R^i \gamma_\mu \ell_R^j) (\bar{q}_R^m \gamma^\mu q_R^n) \\ & + [g_T^L]^{ij,mn} (\bar{\ell}_R^i \sigma^{\mu\nu} \ell_L^j) (\bar{q}_R^m \sigma_{\mu\nu} q_L^n) + [g_T^R]^{ij,mn} (\bar{\ell}_L^i \sigma^{\mu\nu} \ell_R^j) (\bar{q}_L^m \sigma_{\mu\nu} q_R^n) \\ & + [g_S^L]^{ij,mn} (\bar{\ell}_R^i \ell_L^j) (\bar{q}_R^m q_L^n) + [g_S^R]^{ij,mn} (\bar{\ell}_L^i \ell_R^j) (\bar{q}_L^m q_R^n) \bigg\},\end{aligned}$$

i, j 和 m, n 分别表示轻子和夸克的味指标，由不同LQ得到的有效威尔逊系数 g 来具体决定



公式中每一个四费米子算符由一个轻子流(j)和一个强子流(J)组成, 将其重新定义为 $\mathcal{L}_{eff}^{LQ} = \sum g_{\alpha\beta} j_{\alpha} J_{\beta}$, 其中,

$$\begin{aligned} j_S^{R,L} &= \bar{\ell} P_{R,L} \ell, & J_S^{R,L} &= \bar{q} P_{R,L} q, \\ (j_V^{R,L})^{\mu} &= \bar{\ell} \gamma^{\mu} P_{R,L} \ell, & (J_V^{R,L})^{\mu} &= \bar{q} \gamma^{\mu} P_{R,L} q, \\ (j_T^{R,L})^{\mu\nu} &= \bar{\ell} \sigma^{\mu\nu} P_{R,L} \ell, & (J_T^{R,L})^{\mu\nu} &= \bar{q} \sigma^{\mu\nu} P_{R,L} q. \end{aligned}$$



在质子靶静止系中，散射过程的微分截面为

$$\begin{aligned} d\sigma &= \frac{1}{4(P \cdot k)} \frac{d^3\mathbf{k}'}{(2\pi)^3} \frac{1}{2E'} \frac{d^3\mathbf{p}'}{(2\pi)^3} \frac{1}{2E_{\Lambda_c}} |\overline{\mathcal{M}}|^2 (2\pi)^4 \delta^{(4)}(P + k - P' - k') \\ &= \frac{1}{4(P \cdot k)} \frac{d^3\mathbf{k}'}{(2\pi)^2} \frac{1}{2E'} |\overline{\mathcal{M}}|^2 \delta(P'^2 - m_{\Lambda_c}^2), \end{aligned}$$

通过定义 $q = k - k' = p' - p$ ，并利用狄拉克 δ 函数，散射过程的总截面化简为

$$\sigma = \frac{1}{64\pi m_p^2 E^2} \int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 |\overline{\mathcal{M}}|^2,$$



低能散射过程的振幅可以写为轻子矩阵元和强子矩阵元乘积的形式，即有：

$$\mathcal{M} = \sum g_{\alpha\beta} \langle \ell(k', r') | j_\alpha | \ell(k, r) \rangle \langle \Lambda_c(P', s') | J_\beta | p(P, s) \rangle ,$$

因此，散射过程的振幅模方可以写为

$$|\overline{\mathcal{M}}|^2 = |g_S^R|^2 L^R W^R + |g_S^L|^2 L^L W^L ,$$

$$L^L = \sum (\bar{u}(k') P_L u(k)) (\bar{u}(k') P_L u(k))^* = \text{Tr}[\not{k}' P_L \not{k} P_R] ,$$

$$\begin{aligned} W^L &= \sum \langle \Lambda_c(P', s') | \bar{c} P_L u | p(P, s) \rangle \langle \Lambda_c(P', s') | \bar{c} P_L u | p(P, s) \rangle^* \\ &= \sum \langle p(P, s) | \bar{u} P_R c | \Lambda_c(P', s') \rangle^* \langle p(P, s) | \bar{u} P_R c | \Lambda_c(P', s') \rangle . \end{aligned}$$



$$\langle N^+(p, s) | \bar{u}c | \Lambda_c(p', s') \rangle = \frac{(m_{\Lambda_c} - m_p)}{m_c - m_u} f_0(q^2) \bar{u}_N(p, s) u_{\Lambda_c}(p', s'),$$

$$\langle N^+(p, s) | \bar{u}\gamma^5 c | \Lambda_c(p', s') \rangle = \frac{(m_{\Lambda_c} + m_p)}{m_c + m_u} g_0(q^2) \bar{u}_N(p, s) \gamma^5 u_{\Lambda_c}(p', s'),$$

$\Lambda_c \rightarrow p$ 跃迁形状因子的参数化形式为

$$f(q^2) = \frac{1}{1 - q^2/(m_{\text{pole}}^f)^2} \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} a_n^f [z(q^2)]^n,$$

m_{pole}^f 为不同形状因子对应的D介子的极点质量。任意一个形状因子的常规阶拟合和高阶拟合都可以约化为上式中 $n_{\text{max}} = 2$ 和 $n_{\text{max}} = 3$ 的形式

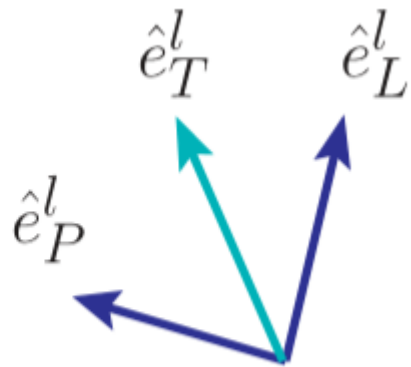
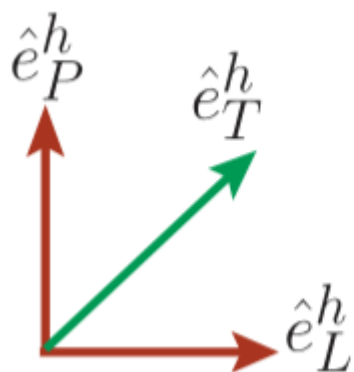


利用自旋密度矩阵，可以得到末态粒子的极化四矢量

$$\xi^\tau = \frac{\text{Tr}[\gamma^\tau \gamma_5 \rho_f(p')]}{\text{Tr}[\rho_f(p')]} ,$$

$$\rho_f(k') = \mathcal{J}^{\alpha\beta} \text{Tr}[\Lambda(k') \gamma_\alpha (1 \pm \gamma_5) \Lambda(k) \tilde{\gamma}_\beta (1 \pm \tilde{\gamma}_5) \Lambda(k')],$$

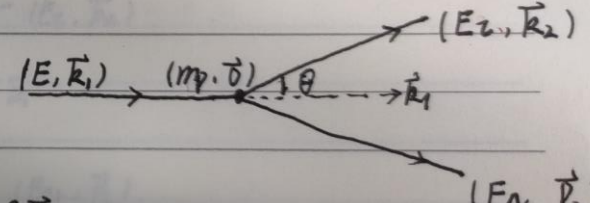
$$\rho_f(p') = \mathcal{L}^{\alpha\beta} \text{Tr}[\Lambda(p') \Gamma_\alpha \Lambda(p) \tilde{\Gamma}_\beta \Lambda(p')].$$



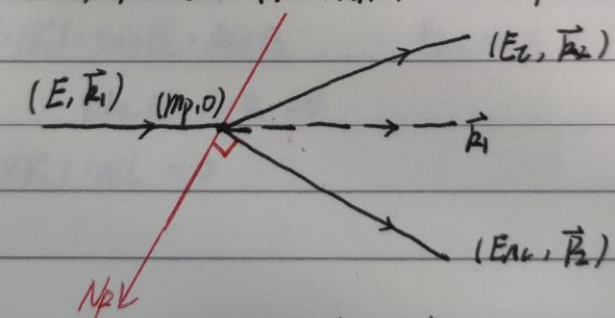
$$\hat{e}_L^h = \frac{\vec{p}'}{|\vec{p}'|}, \quad \hat{e}_P^h = \hat{e}_L^h \times \hat{e}_T^h, \quad \text{where} \quad \hat{e}_T^h = \frac{\vec{p}' \times \vec{k}}{|\vec{p}' \times \vec{k}|},$$

$$\hat{e}_L^l = \frac{\vec{k}'}{|\vec{k}'|}, \quad \hat{e}_P^l = \hat{e}_L^l \times \hat{e}_T^l, \quad \text{where} \quad \hat{e}_T^l = \frac{\vec{k} \times \vec{k}'}{|\vec{k} \times \vec{k}'|},$$



$$N_L^u = \left(\frac{|\vec{k}_2|}{m_L}, \frac{\vec{k}_2 \cdot \vec{k}_2}{m_L |\vec{k}_2|} \right) \quad N_T^u = \left(0, \frac{\vec{k}_1 \times \vec{k}_2}{|\vec{k}_1 \times \vec{k}_2|} \right) \quad N_P^u = \left(0, \frac{\vec{k}_2 \times (\vec{k}_1 \times \vec{k}_2)}{|\vec{k}_2 \times (\vec{k}_1 \times \vec{k}_2)|} \right)$$


$(P, N_a^{L,H})$

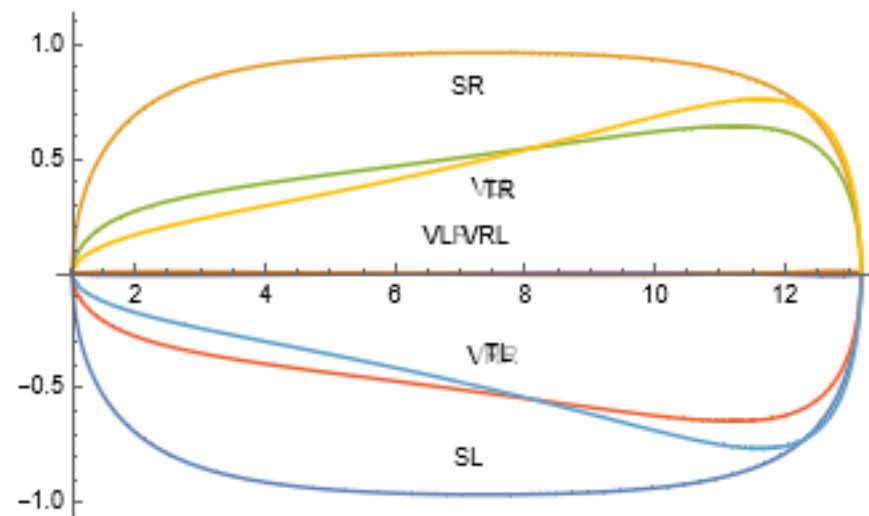
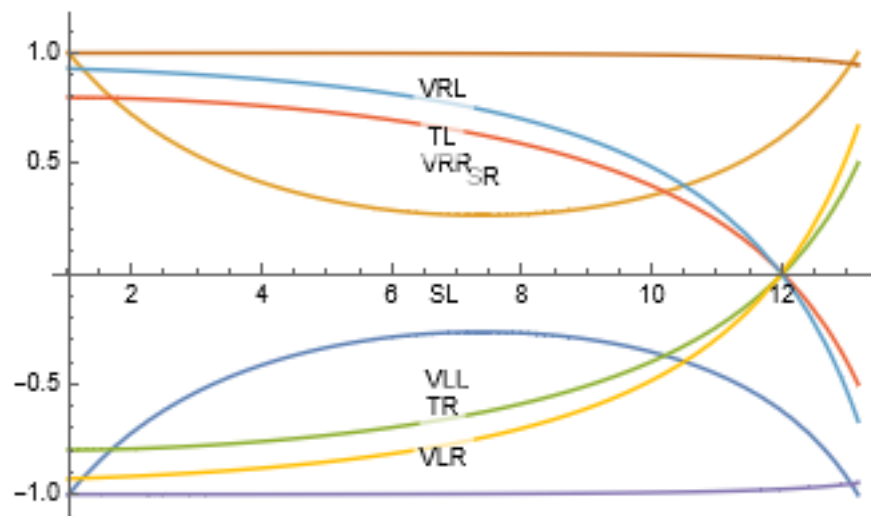
$$N_L^u = \left(\frac{|\vec{p}_2|}{m_L}, \frac{\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2}{m_L |\vec{p}_2|} \right) \quad N_T^u = \left(0, \frac{\vec{p}_2 \times \vec{k}_1}{|\vec{p}_2 \times \vec{k}_1|} \right) \quad N_P^u = \left(0, \frac{\vec{p}_2 \times (\vec{p}_2 \times \vec{k}_1)}{|\vec{p}_2 \times (\vec{p}_2 \times \vec{k}_1)|} \right)$$


得到极化矢量PL/PT/PP



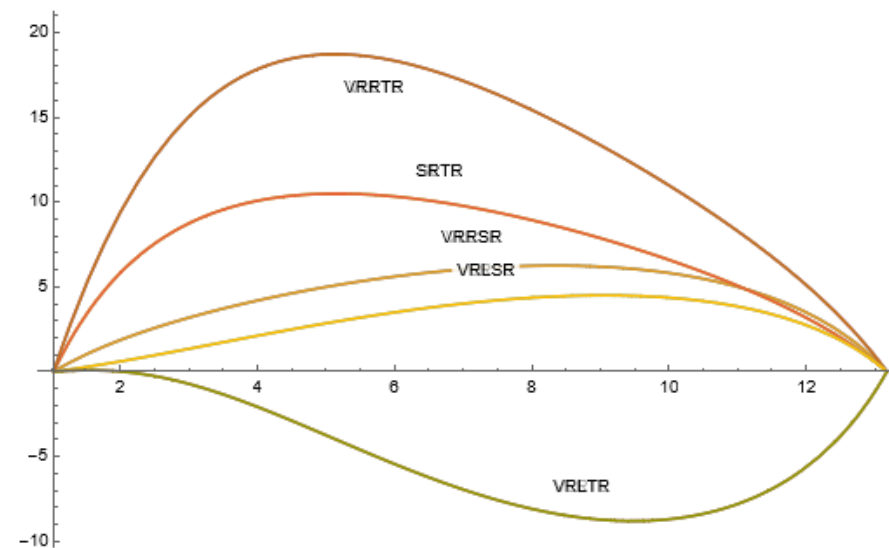
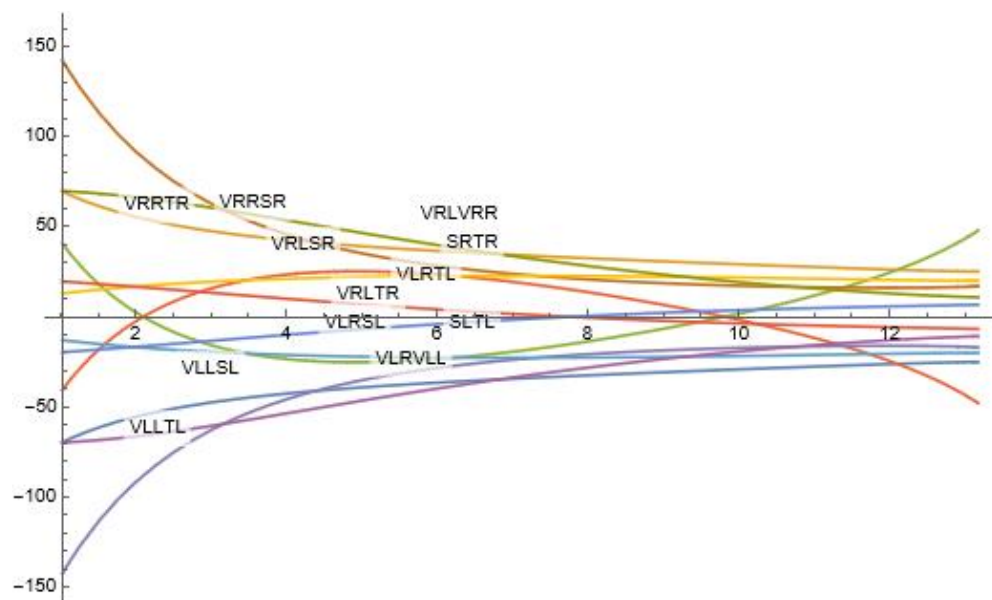
数值结果

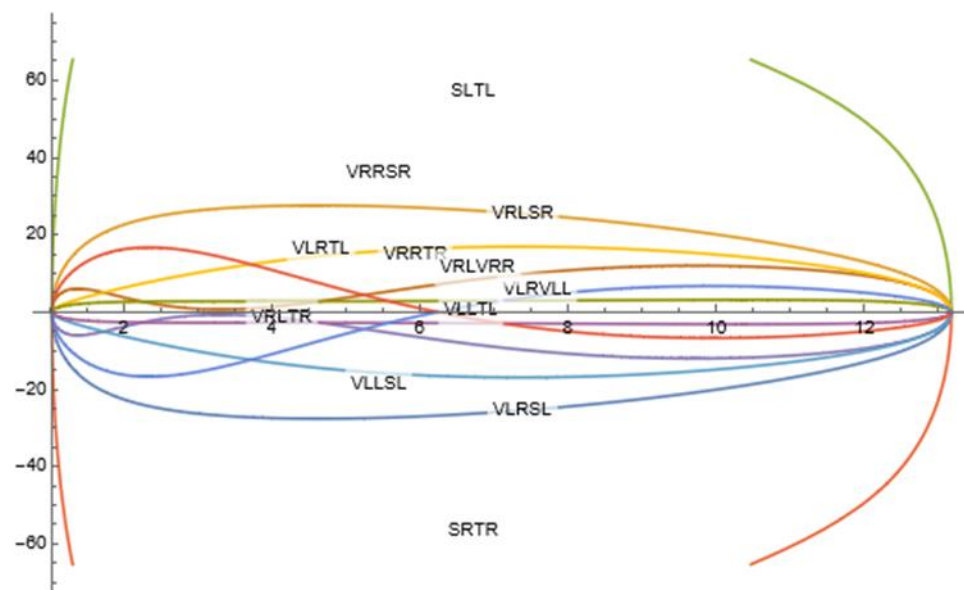
1. 非干涉项（已归一化）, PL/PP





2. 干涉项（未归一化）, PL/PT/PP

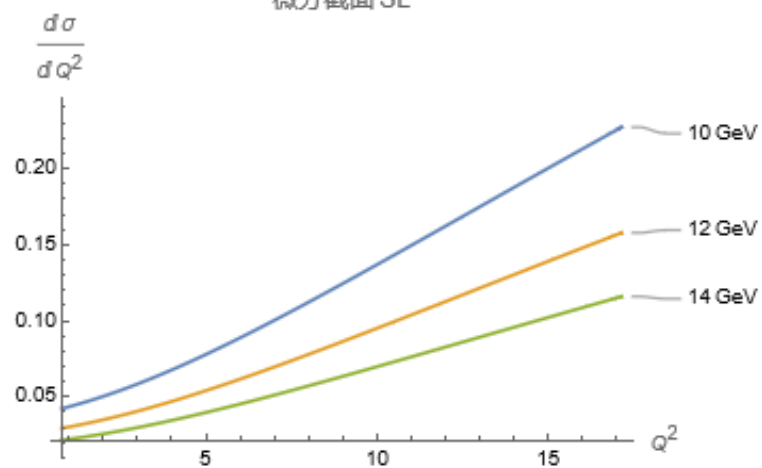




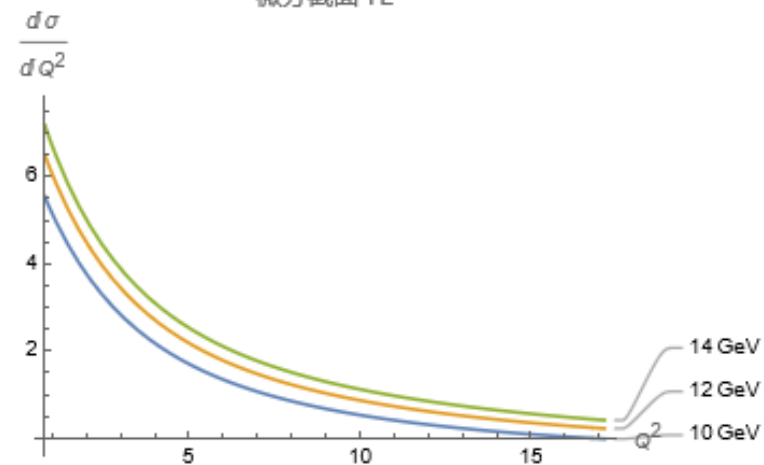


微分截面

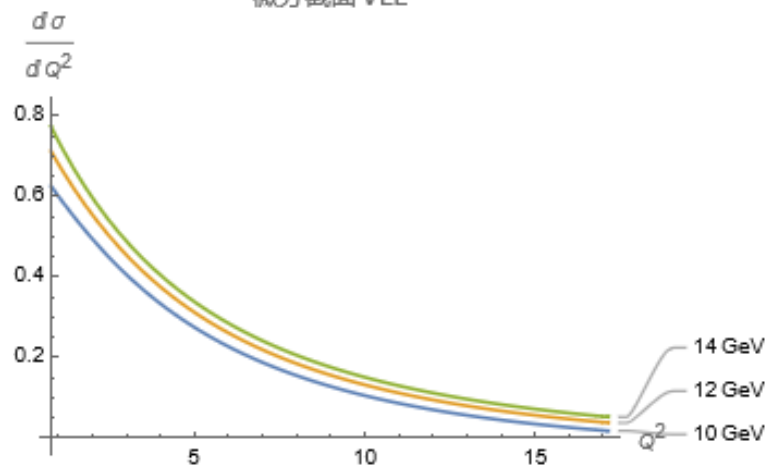
微分截面 SL



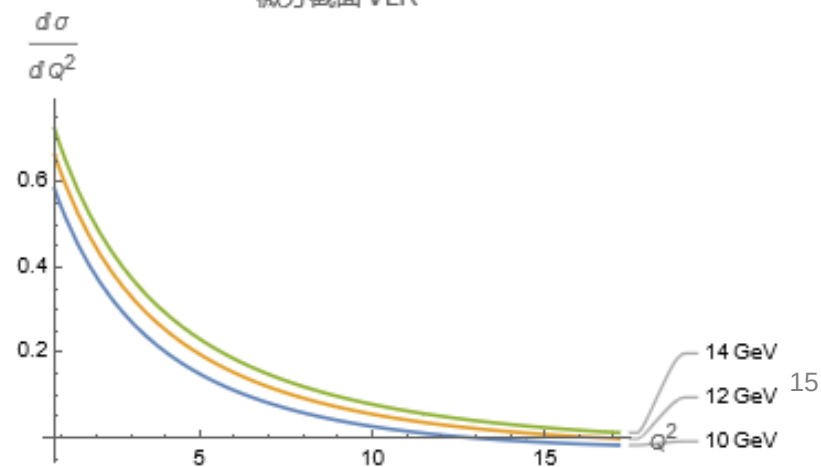
微分截面 TL



微分截面 VLL



微分截面 VLR





分析总结

表 4.1 在不同的 LQ 模型下，产生 $\ell u \rightarrow \ell c$ 过程的威尔逊系数矩阵。

	λ_I	λ_J	k_V^{LL}	k_V^{RR}	k_V^{LR}	k_V^{RL}	k_S^L	k_S^R	k_T^L	k_T^R
S_1	λ_1^S	$\lambda_1'^S$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$
S_3	λ_3^S	—	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0
R_2	λ_2^R	$\lambda_2'^R$	0	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$
U_3	λ_3^U	—	2	0	0	0	0	0	0	0
$\tilde{U}_1$	—	$\lambda_1^{\tilde{U}}$	0	1	0	0	0	0	0	0
V_2	λ_2^V	—	0	0	0	-1	0	0	0	0
$\tilde{V}_2$	—	$\lambda_2^{\tilde{V}}$	0	0	-1	0	0	0	0	0



寻找鉴别LQ模型

	e^L/e^R	P_L/P_R	IP_P
V_{LL}	✓	-0.8	0.5
V_{RR}		0.8	0.5
V_{LR}	✓	-1	∞
V_{RL}		1	∞
$V_{LL} + V_{RR}$	V_{LL}	V_{RR}	
$V_{LL} + V_{LR}$	✓		
$V_{LL} + V_{RL}$	V_{LL}	V_{RL}	
$V_{RR} + V_{LR}$	V_{LR}	V_{RR}	
$V_{RR} + V_{RL}$		✓	
$V_{LR} + V_{RL}$	V_{LR}	V_{RL}	
$V_{LL} + V_{RR} + V_{LR}$	$V_{LL} + V_{LR}$	V_{RR}	
$V_{LL} + V_{RR} + V_{RL}$	V_{LL}	$V_{RR} + V_{RL}$	
$V_{LL} + V_{LR} + V_{RL}$	$V_{LL} + V_{LR}$	V_{RL}	
$V_{RR} + V_{LR} + V_{RL}$	V_{LR}	$V_{RR} + V_{RL}$	
$V_{LL} + V_{RR} + V_{LR} + V_{RL}$	✓	✓	



在低能 $\mathcal{L}_{eff}$ 框架下，可以得到对有效威尔逊系数的限制

$$\begin{aligned} & \frac{1.4\pi^2}{G_F^2 \alpha_e^2} \left[18 (|g_V^{LL}|^2 + |g_V^{RR}|^2) + 7.7 (|g_V^{RL}|^2 + |g_V^{LR}|^2) + 0.28 \operatorname{Re} [g_V^{RL} g_V^{RR*} + g_V^{LL} g_V^{LR*}] \right. \\ & \quad + 3.9 (|g_S^R|^2 + |g_S^L|^2) + 4.4 \operatorname{Re} [g_S^R g_V^{RR*} + g_S^L g_V^{LL*}] + 0.63 \operatorname{Re} [g_S^R g_V^{RL*} + g_S^L g_V^{LR*}] \\ & \quad + 112 (|g_T^R|^2 + |g_T^L|^2) - 33 \operatorname{Re} [g_T^R g_V^{RR*} + g_T^L g_V^{LL*}] \\ & \quad \left. + 3.0 \operatorname{Re} [g_T^R g_V^{RL*} + g_T^L g_V^{LR*}] - 23 \operatorname{Re} [g_S^R g_T^{R*} + g_S^L g_T^{L*}] \right] \\ & \lesssim \left(\frac{N \text{ events}}{1 \text{ event}} \right) \left(\frac{2.1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}}{\rho_T} \right) \left(\frac{40 \text{ cm}}{L} \right) \left(\frac{1 \text{ yr}}{t} \right) \left(\frac{9.4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}}{\phi} \right) \left(\frac{100\%}{\epsilon_{\Lambda_c}} \right) \left(\frac{100\%}{\epsilon_{\mu}} \right), \end{aligned}$$

ϵ_{μ/Λ_c} 表示低能散射过程的末态粒子的探测率，
 $\mathcal{L} \sim 10^{37-39} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， (1.2×10^{37}) ，（液氢；液氘）



对于低能散射过程，我们考虑固定靶散射实验，对应的事例率定义为

$$\frac{dN}{dt} = \mathcal{L}\sigma = \phi\rho_T L\sigma$$

其中， $\mathcal{L}$ 表示亮度，单位为 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ， ϕ 表示入射电子流的通量，与电流的关系为 $\phi = \frac{I}{|e|}$ ， ρ_T 和 L 分别表示质子靶数密度和靶的长度。

假设在每一个LQ模型中，每次只有一个非零的有效威尔逊系数对散射过程有贡献，可以估算在不同的LQ模型下试验运行的事例率。



谢谢聆听!

请各位老师和同学批评指正!

