B-LSSM和LRSM中的$0\nu2\beta$衰变

杨金磊

理论物理研究所

2021.05.20 中山大学

内容提要

一、引言

- 中微子振荡实验发现中微子有小质量之后，研究中微子获得质量的机制和相应的物理效应是最重要的研究方向之一。
- 1、Dirac粒子：通过像SM其他费米子一样引入Dirac质量项，但这种方式要求相应的Yukawa耦合非常小$\lesssim 10^{-12}$，且引入的中微子右手单态完全不参与弱相互作用。
  2、Majorana粒子：引入Majorana质量项后，通过see-saw机制自然的解释小中微子质量。
- 原子核$0\nu2\beta$衰变的探测是目前验证中微子性质最重要的方向之一。且本来用于寻找WIMP暗物质的实验，如PANDAX, CDEX等，也可能用来寻找$0\nu2\beta$衰变。

一、引言

- 实验对衰变的分宽度已经有了很严格的约束，其中最严格约束来自对原子核^{76}Ge(GERDA)和^{136}Xe(KamLAND-Zen)：

$$
\begin{aligned}
\text{Current Limit}: T_{0\nu}^{1/2}(^{76}\text{Ge}) &> 1.8\times 10^{26}\ \text{years}(90\%\text{C.L.}),\\
T_{0\nu}^{1/2}(^{136}\text{Xe}) &> 1.07\times 10^{26}\ \text{years}(90\%\text{C.L.}),\\
\text{Future Sensitivity}: T_{0\nu}^{1/2}(^{76}\text{Ge}) &\sim 10^{28}\ \text{years},\\
T_{0\nu}^{1/2}(^{76}\text{Xe}) &\sim 2.4\times 10^{27}\ \text{years}. \qquad (1.1)
\end{aligned}
$$

- 我们在两个典型的新物理模型B-LSSM和LRSM研究对该过程的理论预言。B-LSSM是典型的Type-I机制；而LRSM是Type-I+II机制，引入了右手W玻色子，除了右手流还有较大轻-重中性轻子混合的贡献。

二、B-LSSM和LRSM的中性轻子

1、B-LSSM

引入两个新的标量单态和三代右手中性轻子，通过Type-I see-saw自然的获得轻中微子质量，中性轻子的质量矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} 0, & M_D^T \\ M_D, & M_R \end{pmatrix}, \tag{2.1}$$

通过幺正矩阵U_ν对角化后可以获得中性轻子的物理质量

$$U_\nu^T \begin{pmatrix} 0, & M_D^T \\ M_D, & M_R \end{pmatrix} U_\nu = \begin{pmatrix} \hat{m}_\nu, & 0 \\ 0, & \hat{M}_\nu \end{pmatrix}, \tag{2.2}$$

可以将U_ν表示为

$$U_\nu = \begin{pmatrix} U & S \\ T & V \end{pmatrix}, \tag{2.3}$$

二、B-LSSM和LRSM的中性轻子

- B-LSSM中带电轻子-中性轻子-W玻色子的相互作用可写为

$$\mathcal{L}_I = \frac{ig_2}{\sqrt{2}}\sum_{j=1}^{3}\Big[U_{ij}\bar{e}_i\gamma^\mu P_L N_{L,j} W^-_{L,\mu} + S_{ij}\bar{e}_i\gamma^\mu P_L N_{H,j} W^-_{L,\mu} + h.c\Big] \tag{2.4}$$

2、LRSM

引入标量三重态和三代右手中性轻子，通过Type-I+II see-saw获得轻中微子质量，中性轻子的质量矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} M_L, & M_D^T \\ M_D, & M_R \end{pmatrix}, \tag{2.5}$$

二、B-LSSM和LRSM的中性轻子

用类似于B-LSSM中的幺正矩阵对角化上面的质量矩阵可以得到物理的中性轻子质量。LRSM中的右手W玻色子会和左手W玻色子混合，形式为

$$\frac{g_2^2}{4}\begin{pmatrix} W_L^{I+}, & W_R^{I+} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_1^2+v_2^2+2v_L^2, & 2v_1v_2 \\ 2v_1v_2, & v_1^2+v_2^2+2v_R^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} W_L^{I-} \\ W_R^{I-} \end{pmatrix}, \tag{2.6}$$

通过对角化可将相互作用本征态可以写成质量本征态的形式

$$\begin{pmatrix} W_L^{I\pm} \\ W_R^{I\pm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta, & -\sin\zeta \\ \sin\zeta, & \cos\zeta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} W_L^{\pm} \\ W_R^{\pm} \end{pmatrix}, \tag{2.7}$$

二、B-LSSM和LRSM的中性轻子

- LRSM中带电轻子-中性轻子-W玻色子、u-d-W玻色子的相互作用可写为

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_I = \frac{ig_2}{\sqrt{2}}\sum_{j=1}^{3}\Big[&\bar{e}_i(\cos\zeta U_{ij}\gamma^\mu P_L + \sin\zeta T^*_{ij}\gamma^\mu P_R)N_{L,j}W^-_{L,\mu}\\
&+\bar{e}_i(\cos\zeta T^*_{ij}\gamma^\mu P_R - \sin\zeta U_{ij}\gamma^\mu P_L)N_{L,j}W^-_{R,\mu}\\
&+\bar{e}_i(\cos\zeta S_{ij}\gamma^\mu P_L + \sin\zeta V^*_{ij}\gamma^\mu P_R)N_{H,j}W^-_{L,\mu}\\
&+\bar{e}_i(\cos\zeta V^*_{ij}\gamma^\mu P_R - \sin\zeta S_{ij}\gamma^\mu P_L)N_{H,j}W^-_{R,\mu}\\
&+\bar{u}(\cos\zeta\gamma^\mu P_L + \sin\zeta\gamma^\mu P_R)dW^-_{L,\mu}\\
&+\bar{u}(\cos\zeta\gamma^\mu P_R - \sin\zeta\gamma^\mu P_L)dW^-_{R,\mu} + h.c\Big]
\end{aligned}
\tag{2.8}
$$

三、理论计算

原子核$0\nu2\beta$衰变的计算主要分为三步：1、夸克level有效算子，2、从夸克到核子，3、从核子到原子核。我们的工作重心是在夸克level，计算左右手对称模型（LRSM）和B-L 超对称模型（B-LSSM）中对$^{76}\mathrm{Ge},^{136}\mathrm{Xe}$ $0\nu2\beta$ 衰变的贡献。

1、计算方法

- 夸克level($dd \to uue^-e^-$)：贡献该过程线性独立的九维算子共有九个，过程发生的能量标度在$\mu \sim 100$ MeV。从$\mu = M_W$到$\mu \sim 1$ GeV微扰QCD 可用，利用重整化群方法得到算子系数的演化矩阵。
- 夸克到核子：对于微扰QCD不可用的部分$\mu \sim 1$ GeV到$\mu \sim 100$ MeV，在这一步将其吸收到核子矩阵元的计算中。

三、理论计算

- 核子到原子核：直接利用已经有的结果进行后续的数值计算（F. F. Deppisch, L. Graf, F. Iachello, J. Kotila PRD102(2020)095016）。

2、quark level的有效算子

- 贡献原子核$0\nu 2\beta$衰变的九维算子：

$$\mathcal{L}_{eff}^{DBD} = \frac{G_F^2 \cos^2\theta_C}{2m_p} \sum_{X,Y,Z} \Big[\sum_{i=1}^{3} C_{iZ}^{XY}(\mu) \cdot \mathcal{O}_{iZ}^{XY}(\mu) + \sum_{j=4}^{5} C_j^{XY}(\mu) \cdot \mathcal{O}_j^{XY}(\mu) \Big]. \tag{3.1}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{1Z}^{XY}(\mu) &= 4(\bar{u}P_X d)(\bar{u}P_Y d) j_Z \equiv J_X J_Y j_Z, \\ \mathcal{O}_{2Z}^{XX}(\mu) &= 4(\bar{u}\sigma_{\mu\nu}P_X d)(\bar{u}\sigma^{\mu\nu}P_X d) j_Z \equiv J_{X\mu\nu} J_Y^{\mu\nu} j_Z, \end{aligned} \tag{3.2}$$

三、理论计算

$$\begin{aligned}
\mathcal{O}_{3Z}^{XY}(\mu) &= 4(\bar{u}\gamma_\mu P_X d)(\bar{u}\gamma^\mu P_Y d) j_Z \equiv J_{X\mu} J_Y^\mu j_Z, \\
\mathcal{O}_{4}^{XY}(\mu) &= 4(\bar{u}\gamma_\mu P_X d)(\bar{u}\sigma^{\mu\nu} P_Y d) j_\nu \equiv J_{X\mu} J_Y^{\mu\nu} j_\nu, \\
\mathcal{O}_{5}^{XY}(\mu) &= 4(\bar{u}\gamma_\mu P_X d)(\bar{u} P_Y d) j^\mu \equiv J_{X\mu} J_Y j^\mu.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

其中$j_{L/R}$,j_μ表示轻子流，其定义为：

$$j_{L/R} = \bar{e}(1 \mp \gamma^5) e^c, \qquad j_\mu = \bar{e}\gamma_\mu\gamma^5 e^c. \tag{3.4}$$

3、模型中的计算

模型中的计算就是在先计算有效算子的系数，然后利用得到的RGE演化矩阵将得到的算子系数演化到$\mu \sim 1$ GeV。

三、理论计算

- **B-LSSM：**

  B-LSSM中贡献贡献原子核$0\nu 2\beta$衰变的树图阶费曼图为

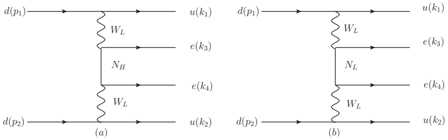

Figure: The Feynman diagrams for the $0\nu 2\beta$ decays in the B-LSSM. (a) The heavy neutral lepton contributions, (b) The light neutrino contributions.

在电弱标度下，B-LSSM中贡献原子核$0\nu 2\beta$衰变的系数为

$$C_{3R}^{LL}(H) = \sum_i \frac{2m_p}{M_{\nu_i}}(S_{1i})^2, \quad C_{3R}^{LL}(L) = \sum_i \frac{m_{\nu_i}}{m_e}(U_{1i})^2 \quad (3.5)$$

三、理论计算

- **LRSM：**

LRSM中贡献贡献原子核$0\nu2\beta$衰变的树图阶费曼图为

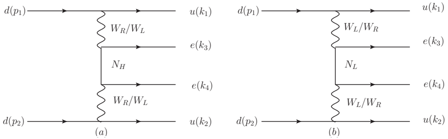

Figure: The Feynman diagrams for the $0\nu2\beta$ decays in the LRSM. (a) The heavy neutral lepton contributions, (b) The light neutrino contributions.

由于右手W玻色子的存在，计算轻中微子的贡献时需考虑中微子传播子$\frac{\not p}{p^2}$项的贡献。我们做了一个新的假设，即在同一个原

三、理论计算

子核中的两个夸克动量一样，则可以将所有的算子化为九维算子，这样就可以直接计算不同贡献之间的干涉效应。重中性轻子的贡献为

$$C_{3L}^{RR}(H)=\frac{2m_p}{M_{\nu_i}}\cos^4\zeta V_{1i}^{*2}(\frac{M_{W_L}}{M_{W_R}})^4,$$
$$C_{3L}^{RL}(H)=\frac{2m_p}{M_{\nu_i}}\cos^3\zeta\sin\zeta V_{1i}^{*2}(\frac{M_{W_L}}{M_{W_R}})^2\,. \qquad (3.6)$$

轻中微子的贡献为

$$C_{3R}^{LL}(L)=\frac{1}{m_e}\cos^3\zeta U_{1i}(m_{\nu_i}\cos\zeta U_{1i}-m_e\sin\zeta T_{1i}^*),$$
$$C_{3R}^{LR}(L)=\frac{m_{\nu_i}}{m_e}\cos^3\zeta\sin\zeta U_{1i}^2,$$
$$C_{3L}^{LL}(L)=-\cos^3\zeta\sin\zeta U_{1i}T_{1i}^*, \qquad (3.7)$$

三、理论计算

$$C_{3L}^{RL}(L) = -\frac{1}{2}\cos^4\zeta U_{1i}T_{1i}^*(\frac{M_{W_L}}{M_{W_R}})^2,$$
$$C_{3R}^{RL}(L) = \frac{1}{-2m_e}\cos^3\zeta U_{1i}\left[m_e\cos\zeta T_{1i}^*(\frac{M_{W_L}}{M_{W_R}})^2 - 2m_{\nu_i}\sin\zeta U_{1i}\right]. \tag{3.8}$$

4、QCD修正

- 为了看考虑QCD修正的大小，以及考虑QCD修正后不同的算子之间是否会发生混合，计算中考虑了QCD修正的效应。原子核$0\nu2\beta$ 衰变发生的能量标度~ 0.1 GeV，从电弱标度到$\mu = 1$ GeV，微扰QCD可用，利用重整化群方法计算反常量纲，得到算子系数的演化矩阵。计算过程主要参考M. Gonzalez *et al*的文章PRD93(2016)013017。

三、理论计算

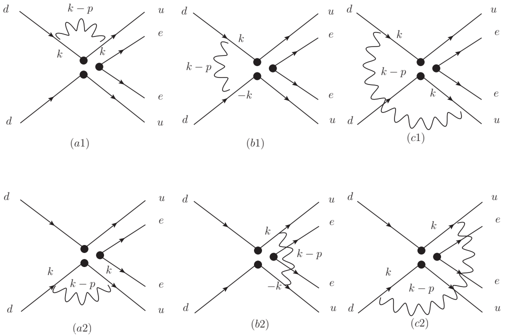

Figure: One-loop QCD corrections to the dimension-9 operators for the $0\nu2\beta$ decays in the effective theory.

三、理论计算

- 通过重整化群方法计算得到的反常量纲：

$$\hat{\gamma}^{XX}_{(12)} = -2\begin{pmatrix} 6C_F-3, & -\frac{1}{2N}+\frac{1}{4} \\ -12-\frac{24}{N}, & -3-2C_F \end{pmatrix},$$
$$\gamma^{XX}_{(3)} = -2\Big(\frac{3}{N}-3\Big), \hat{\gamma}^{XY}_{(31)} = -2\begin{pmatrix} -\frac{3}{N}, & -6 \\ 0, & 6C_F \end{pmatrix},$$
$$\hat{\gamma}^{XX}_{(45)} = -2\begin{pmatrix} -\frac{3}{2}-C_F, & -\frac{3}{2}i-\frac{3i}{N} \\ -\frac{i}{2}+\frac{i}{N}, & 3C_F-\frac{3}{2} \end{pmatrix},$$
$$\hat{\gamma}^{XY}_{(45)} = -2\begin{pmatrix} -\frac{3}{2}-C_F, & \frac{3}{2}i+\frac{3i}{N} \\ \frac{i}{2}-\frac{i}{N}, & 3C_F-\frac{3}{2} \end{pmatrix}. \tag{3.9}$$

其中反常量纲$\hat{\gamma}$的定义为

$$\frac{d\vec{C}(\mu)}{d\ln\mu} = \frac{\alpha_s}{4\pi}\hat{\gamma}^T\vec{C}(\mu), \tag{3.10}$$

三、理论计算

- 式（3.9）中的$\hat{\gamma}^{XX}_{(45)}$，$\hat{\gamma}^{XY}_{(45)}$和M. Gonzalez等人的结果不一致，但是和Y. Liao, X. D. Ma, H. L. Wang的文章JHEP03(2020)120结果一致。

解式（3.10）中的微分方程可得Wilson系数的演化

$$\vec{C}(\mu) = \hat{U}(\mu,\Lambda)\cdot\vec{C}(\Lambda) \tag{3.11}$$

其中

$$\begin{aligned}\hat{U}(\mu,\Lambda) &= \hat{V}\mathrm{Diag}\left\{\left[\frac{\alpha_s(\Lambda)}{\alpha_s(\mu)}\right]^{\gamma_i/(2\beta_0)}\right\}\hat{V}^{-1},\\ \mathrm{Diag}\{\gamma_i\} &= \hat{V}^{-1}\hat{\gamma}\hat{V},\ \beta_0 = (33-2f)/3.\end{aligned} \tag{3.12}$$

三、理论计算

然后可以得到从电弱标度M_W到$\mu \sim 1$ GeV演化矩阵的数值结果为（$\alpha_s(M_Z) = 0.118$）：

$$
\begin{aligned}
&\hat{U}^{XX}_{(12)}(\mu,\Lambda) = \begin{pmatrix} 1.96 & 0.01 \\ -2.82 & 0.45 \end{pmatrix}, \\
&\hat{U}^{XY}_{(31)}(\mu,\Lambda) = \begin{pmatrix} 0.87 & -1.4 \\ 0 & 2.97 \end{pmatrix}, \\
&U^{XX}_{3}(\mu,\Lambda) = 0.76, \\
&\hat{U}^{XX}_{(45)}(\mu,\Lambda) = \begin{pmatrix} 0.68 & -0.24i \\ -0.016i & 0.71 \end{pmatrix}, \\
&\hat{U}^{XY}_{(45)}(\mu,\Lambda) = \begin{pmatrix} 0.68 & 0.34i \\ 0.023i & 1.4 \end{pmatrix}.
\end{aligned}
\tag{3.13}
$$

三、理论计算

5、$0\nu2\beta$半衰期

$0\nu2\beta$的衰变宽度可以写为（F. F. Deppisch, L. Graf, F. Iachello, J. Kotila(PRD102(2020)095016)）

$$d\Gamma = 2\pi\overline{|\mathcal{R}|^2}\delta(E_3+E_4+E_F-E_I)\frac{d^3\mathbf{k}_3}{(2\pi)^3}\frac{d^3\mathbf{k}_4}{(2\pi)^3}, \quad (3.14)$$

其中$k_3=(E_3,\mathbf{k}_3), k_4=(E_4,\mathbf{k}_4)$是电子动量，$\mathcal{R}$衰变的矩阵元

$$\begin{aligned}\mathcal{R} &= \langle\mathcal{O}_F^+ e_{k_3s_1}e_{k_4s_2}|\mathcal{L}_{eff}^{DBD}|\mathcal{O}_I^+\rangle \\ &\approx \frac{G_F^2}{2m_p}\sum_{j,J_i} C_{i(Z)}^{XY}\langle e_{k_3s_1}|j|e_{k_4s_2}^C\rangle M_i^{XY},\end{aligned} \quad (3.15)$$

其中

三、理论计算

$$
\begin{aligned}
M_i^{XY} &\equiv \langle \mathcal{O}_F^+ | J_i^X J_i^Y | \mathcal{O}_I^+ \rangle \\
&\approx \sum_{p_1,p_2,n_1,n_2} \langle \mathcal{O}_F^+ | p_1, p_2 \rangle \langle p_1, p_2 | J_i^X J_i^Y | n_1, n_2 \rangle \langle n_1, n_2 | \mathcal{O}_I^+ \rangle \\
&\approx \sum_{p_1,p_2,n_1,n_2} \langle \mathcal{O}_F^+ | p_1, p_2 \rangle \left[\langle p_1 | J_i^X | n_1 \rangle \bigotimes \langle p_2 | J_i^Y | n_2 \rangle \right] \\
&\quad \langle n_1, n_2 | \mathcal{O}_I^+ \rangle
\end{aligned} \tag{3.16}
$$

上式将原子核矩阵元的计算分成了两部分，一是计算核子矩阵元$\langle p_1|J_i^X|n_1\rangle, \langle p_2|J_i^Y|n_2\rangle$；二是计算核子到原子核矩阵元。F. F. Deppisch等人的文章给出了数值结果，只有M_3^{XX}, M_3^{XY}和考虑的两个新物理模型中的计算有关（PRD102(2020)095016）：

三、理论计算

$$
\begin{array}{lll}
 & M_3^{XX} & M_3^{XY} \\
{}^{76}\mathrm{Ge} & -200(-6.64), & 99.8(4.24) \\
{}^{136}\mathrm{Xe} & -111(-3.60), & 51.2(2.17)
\end{array}
\tag{3.17}
$$

- 原子核$0\nu 2\beta$衰变的半衰期可以写为

$$
\begin{aligned}
\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = {} & G_{11+}^{(0)}\Big|\sum_{X,Y} C_{3L}^{XY} M_3^{XY}\Big|^2 + G_{11+}^{(0)}\Big|\sum_{X,Y} C_{3R}^{XY} M_3^{XY}\Big|^2 \\
& +2G_{11-}^{(0)}\Re\Big[\Big(\sum_{X,Y} C_{3L}^{XY} M_3^{XY}\Big)\Big(\sum_{X,Y} C_{3R}^{XY} M_3^{XY}\Big)^*\Big]
\end{aligned}
\tag{3.18}
$$

其中$G_{11\pm}^{(0)}$是相空间因子（单位10^{-15} years^{-1}）

$$
\begin{array}{lll}
 & G_{11+}^{(0)} & G_{11-}^{(0)} \\
{}^{76}\mathrm{Ge} & 2.360, & -0.280 \\
{}^{136}\mathrm{Xe} & 14.56, & -1.197
\end{array}
\tag{3.19}
$$

四、数值结果

在做数值计算时考虑的约束：

- 来自于PLANK（Astron. Astrophys. 594, A13 (2016)）对中微子质量求和的限制$\sum_i m_{\nu i} < 0.15$ eV。
- 中微子的质量平方差（I. Esteban *et al*JHEP01(2019)106）

$$\Delta m_{12}^2 \equiv m_{\nu 2}^2 - m_{\nu 1}^2 = (7.4 \pm 0.61) \times 10^{-5}\ \mathrm{eV}^2\,,$$
$$|\Delta m_{23}^2| \equiv |m_{\nu 3}^2 - m_{\nu 2}^2| \approx (2.52 \pm 0.1) \times 10^{-3}\ \mathrm{eV}^2 \quad (4.1)$$

- LRSM中右手W玻色子质量的限制$M_{W_R} \gtrsim 2.9$ TeV（S. Bertolini, A. Maiezza, F. NestiPRD89(2014)095028）。
- $K^0 - \bar{K}^0$, $B^0 - \bar{B}^0$混合（P. S. Bhupal Dev, S. Goswami, M. MitraPRD91(2015)113004）对左手-右手W玻色子混合的限制$\zeta \lesssim 7.7 \times 10^{-4}$。
- 来自于K, B介子CP破坏的数据（S. Bertolini, A. Maiezza, F. NestiPRD89(2014)095028）约束$0.02 < x \equiv v_2/v_1 < 0.5$。
- 轻中微子的混合采用PMNS混合矩阵。

四、数值结果

1、B-LSSM

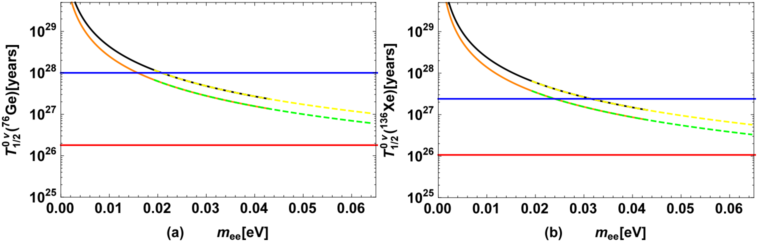

Figure: $T^{0\nu}_{1/2}(^{76}\mathrm{Ge})$ (a) and $T^{0\nu}_{1/2}(^{136}\mathrm{Xe})$ (b) versus $m_{ee} = \sum_{i=1}^{3}(U_{1i})^2 m_{\nu_i}$ are plotted, where the black (orange) solid lines denote the NH results (without QCD corrections), the yellow (green) dashed lines denote the IH results (without QCD corrections).

四、数值结果

2、LRSM

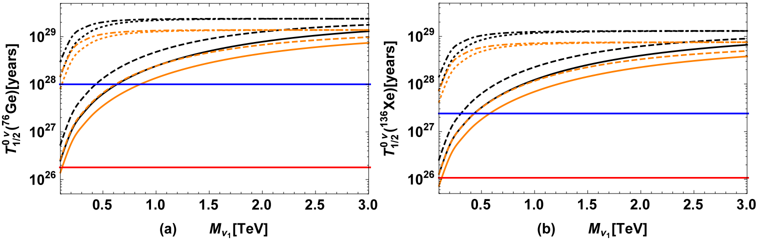

Figure: Taking $m_{ee} = 0.001$ eV, $T^{0\nu}_{1/2}(^{76}\mathrm{Ge})$ (a) and $T^{0\nu}_{1/2}(^{136}\mathrm{Xe})$ (b) versus M_{ν_1} are plotted for $x = 0.1, M_{W_R} = 3$ TeV (black solid lines), $x = 0.4, M_{W_R} = 3$ TeV (black dashed lines), $x = 0.1, M_{W_R} = 5$ TeV (black dotted lines), $x = 0.4, M_{W_R} = 5$ TeV (black dotdashed lines).

四、数值结果

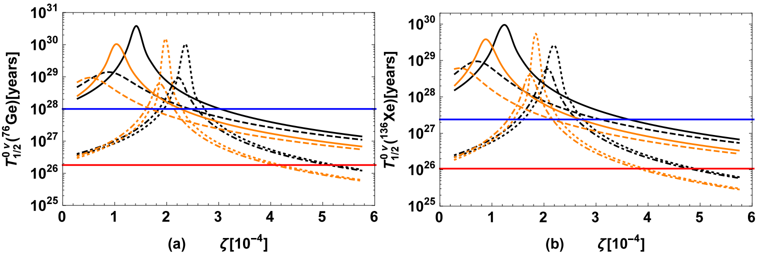

Figure: Taking $M_{\nu 1} = 1$ TeV, $M_{W_R} = 3$ TeV, then $T^{0\nu}_{1/2}(^{76}\mathrm{Ge})$ (a) and $T^{0\nu}_{1/2}(^{136}\mathrm{Xe})$ (b) versus ζ are plotted for $m_{ee} = 0.01$ eV, $M_{D11} = 0.2$ GeV (black solid lines), $m_{ee} = 0.02$ eV, $M_{D11} = 0.2$ GeV (black dashed lines), $m_{ee} = 0.01$ eV, $M_{D11} = 0.8$ GeV (black dotted lines), $m_{ee} = 0.02$ eV, $M_{D11} = 0.8$ GeV (black dotdashed lines).

四、数值结果

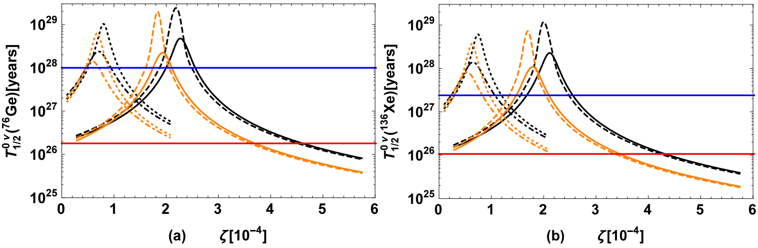

Figure: Taking $M_{\nu 1} = 0.5$ TeV, $M_{D11} = 0.5$ GeV, then $T^{0\nu}_{1/2}(^{76}\text{Ge})$ (a) and $T^{0\nu}_{1/2}(^{136}\text{Xe})$ (b) versus ζ are plotted for $m_{ee} = 0.01$ eV, $M_{W_R} = 3$ TeV (black solid lines), $m_{ee} = 0.02$ eV, $M_{W_R} = 3$ TeV (black dashed lines), $m_{ee} = 0.01$ eV, $M_{W_R} = 5$ TeV (black dotted lines), $m_{ee} = 0.02$ eV, $M_{W_R} = 5$ TeV (black dotdashed lines).

五、结果讨论

- QCD修正对原子核$0\nu 2\beta$衰变有十分重要的作用。在两个新物理模型中，数值结果的修正能达到40%左右。
- B-LSSM中中微子获得质量的方式是Type-I see-saw，重中性轻子的贡献会被轻-重混合角严重压低，轻中微子的贡献为将来探测到原子核$0\nu 2\beta$衰变提供了很强的可能性。
- LRSM中存在右手的W玻色子，因此中微子传播子分子上$\not{p}$也会贡献，假设两个初态夸克动量相同、末态夸克动量相同后，可将所有贡献的算子转化为九维算子，可以直接计算不同贡献之间的干涉。此外，数值结果表明不同的贡献之间有相消的效应。

Thanks!