

狄拉克中微子新物理唯象研究

严鑫帅

河南师范大学

2022年9月9日



粒子物理标准模型



宇宙中正反物质不对称性

❖ 宇宙中重子不对称性(BAU)

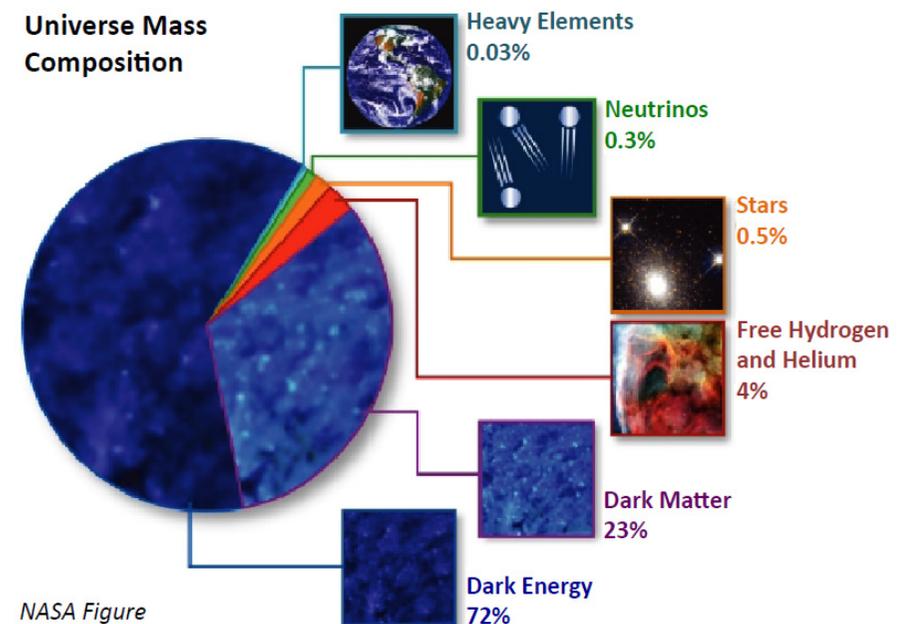
$$\eta_b \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \approx \frac{n_b}{n_\gamma}, \quad Y_B \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s_{\text{SM}}} \approx \frac{n_b}{s_{\text{SM}}}$$

❖ 普朗克2018: *Astron. Astrophys.* 641 (2020) A6

$$\eta_{b,0} = (6.101 \pm 0.027) \times 10^{-10}$$



$$Y_B^{\text{exp}} = (8.68 \pm 0.08) \times 10^{-11}$$



中微子质量问题

❖ 中微子振荡实验:

中微子有质量，轻子部分有混合(PMNS 矩阵)

❖ 标准模型中：无右手中微子、中微子无质量

$$\bar{Q}_L H d_R + \bar{Q}_L \tilde{H} u_R + \bar{L}_L H e_R$$

$$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \quad L_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} G^+ \\ (v_{EW} + h + iG^0)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

➤ Dirac or Majorana?

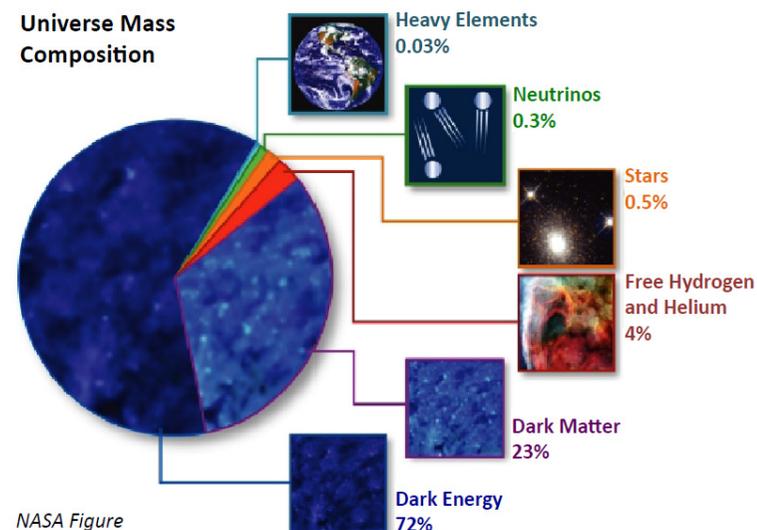
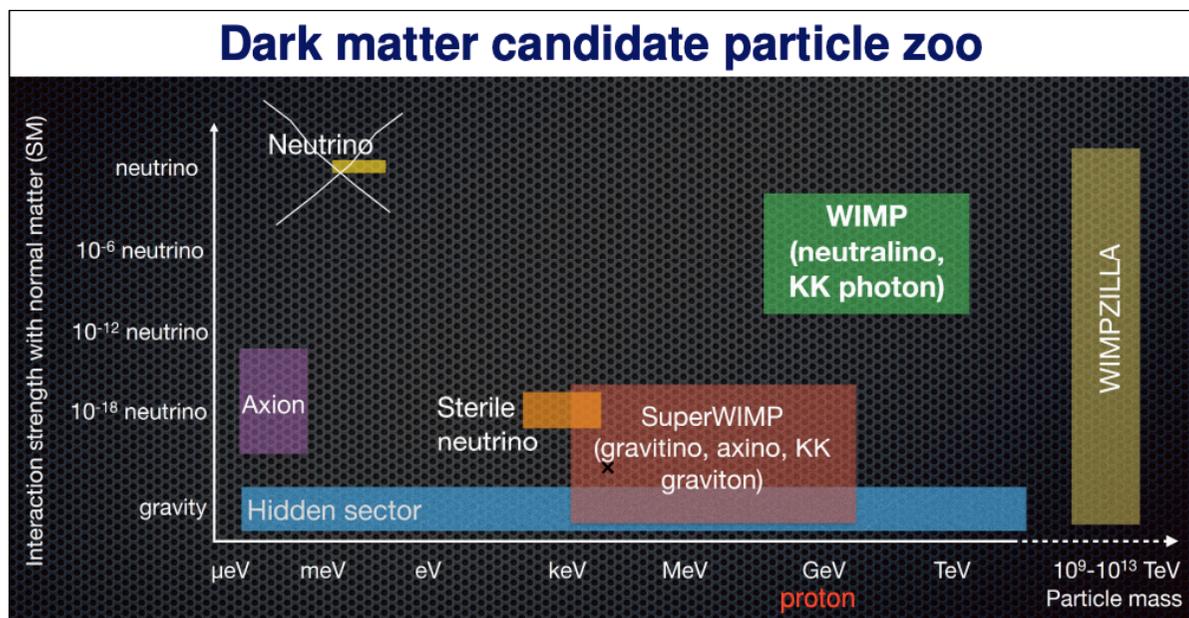
$\bar{\nu}_L m_\nu \nu_R$ $\bar{\nu}_L^c m_\nu \nu_L$

❖ Mass limit: *Astron. Astrophys.* 641 (2020) A6

$$\sum_i m_{\nu_i} < 0.12 \text{ eV}$$

质量如何产生?

暗物质问题



❖ 已知信息:

不带电; 无色(color); 不衰变或寿命非常长; 不属于标准模型任何粒子;
 残余丰度:

$$\omega_{DM} \equiv \Omega_{DM} h^2 = 0.120 \pm 0.001$$

如何产生?

各种反常

Bhupal Dev's talk (2021)

(Partial) List of Existing Anomalies

Anomaly	Significance	Reference
Multileptons@LHC	2-5 σ	1901.05300
Dijet excess@LEP2	4-5 σ	1706.02255
Muon g-2	4.2 σ	2104.03281
LFUV in B-decays	3-5 σ	1909.12524
CKM unitarity	4 σ	2012.01580
LFUV in tau decay	$\sim 2 \sigma$	1909.12524
LSND/MiniBooNE	6.1 σ	2006.16883
NOvA vs T2K	$\sim 2 \sigma$	Neutrino 2020
IceCube HESE vs TG	$\sim 2 \sigma$	2011.03545
ANITA upgoing events	$\sim 2 \sigma$	2010.02869
Neutron lifetime	3.6 σ	2011.13272
^8Be transition	7.2 σ	1910.10459
Proton charge radius	5 σ	2105.00571

Anomaly	Significance	Reference
DAMA/LIBRA	12.9 σ	1907.06405
XENON1T e^- -recoil	2-3 σ	2006.09721
Fermi-LAT GC excess	2-3 σ	1704.03910
AMS e^+/\bar{p} excess	3-5 σ	Phys.Rep.894, 1
3.5 keV X-ray line	4 σ	2008.02283
511 keV gamma-ray line	58 σ	1512.00325
EDGES 21cm spectrum	3.8 σ	1810.05912
Primordial ^7Li problem	4-5 σ	1203.3551
Hubble tension	4.4 σ	2008.11284
σ_8 tension	3 σ	2005.03751
CMB anomalies	2-3 σ	1510.07929
NANOGrav	$\gg 5 \sigma$	2009.04496
Fast Radio Bursts	$\gg 5 \sigma$	1906.05878



Repository: <https://github.com/hepcomm/hepmist>

3

味物理反常

❖ 缪子反常磁矩 $(g - 2)_\mu$ 4.2σ Fermilab+BNL

❖ B介子衰变:

$$R_{D^{(*)}} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{\text{BR}(B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu)} \quad (\text{with } \ell = e, \mu)$$

$R_{D^*}, R_D: 3\sigma$ BaBar (2012); Belle(2015,2017, 2020);LHCb(2015;2018)

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)}$$

$R_K: 3.1\sigma$ *R. Aaij et al. LHCb (2021)*

$R_{K^*}: 2.2-2.4\sigma$ *R. Aaij et al. LHCb (2017)*

Baryogenesis

- ❖ Sakharov 三个基本要素 (1965)
 - 重子数B破缺
 - C和CP宇称破缺
 - 非平衡过程

标准模型可以提供这个3个要素，但不足以产生足够的 η_b

❖ 2种重要的机制:

➤ 电弱重子生成机制 (electroweak baryogenesis)

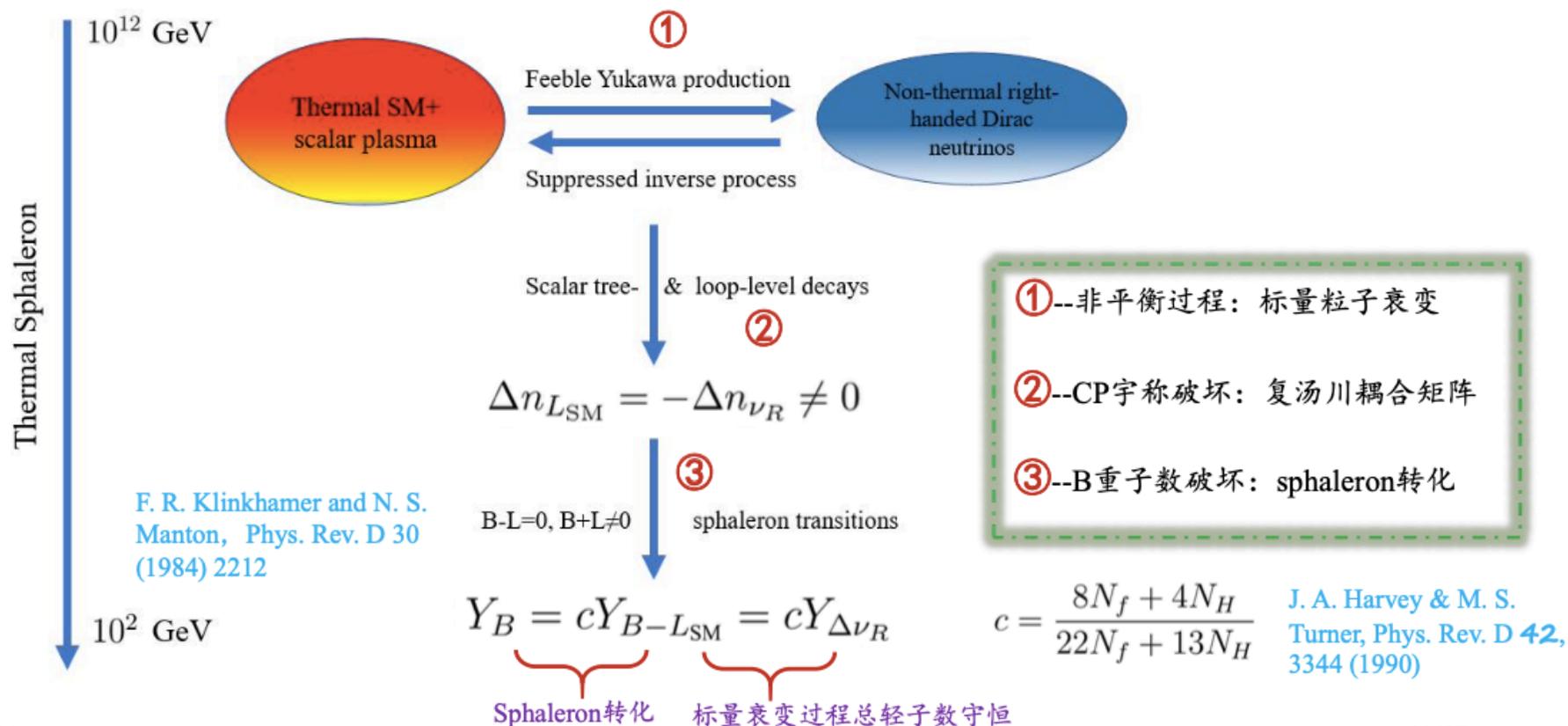
➤ 轻子生成机制

(leptogenesis)
↓
Dirac or **Majorana**



经典狄拉克生成机制

- **基本思想:** K. Dick, *et al*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4039

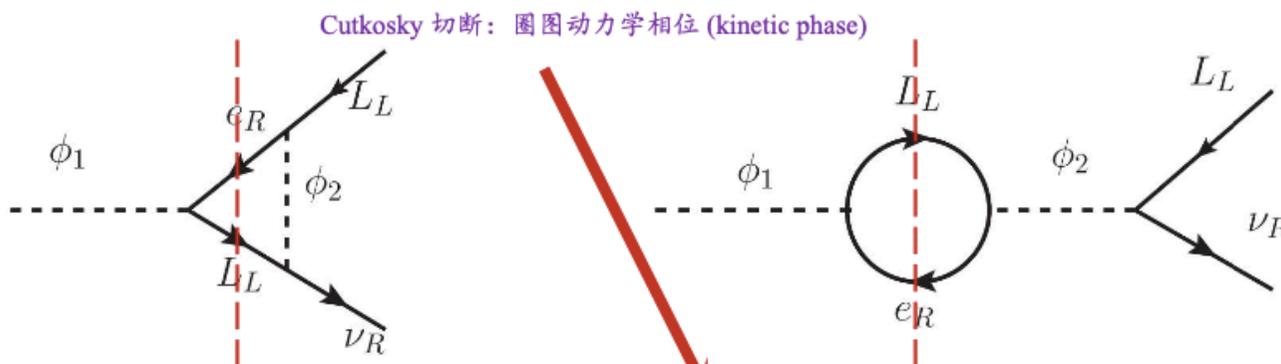


经典狄拉克生成机制

- 模型构建 K. Dick, *et al*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4039

$$\mathcal{L} = Y_{\nu,1} \bar{L}_L \tilde{\phi}_1 \nu_R + Y_{\nu,2} \bar{L}_L \tilde{\phi}_2 \nu_R + Y_{\ell,1} \bar{L}_L \phi_1 e_R + Y_{\ell,2} \bar{L}_L \phi_2 e_R + \text{H.c.}$$

- CP不对称性



$$\epsilon_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) - \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)}{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) + \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)} \simeq 2 \frac{\text{Im}(c_0^* c_1)}{|c_0|^2} \frac{\text{Im}(I_0^* I_1)}{|I_0|^2} \propto \frac{\text{Im}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,2} Y_{\ell,1} Y_{\ell,2}^*)}{\text{Tr}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,1})}$$

汤川矩阵的物理相对相位

$$\longrightarrow Y_{\Delta \nu_R} \propto \epsilon_{CP} \longrightarrow Y_B = \frac{8}{23} Y_{\Delta \nu_R}$$

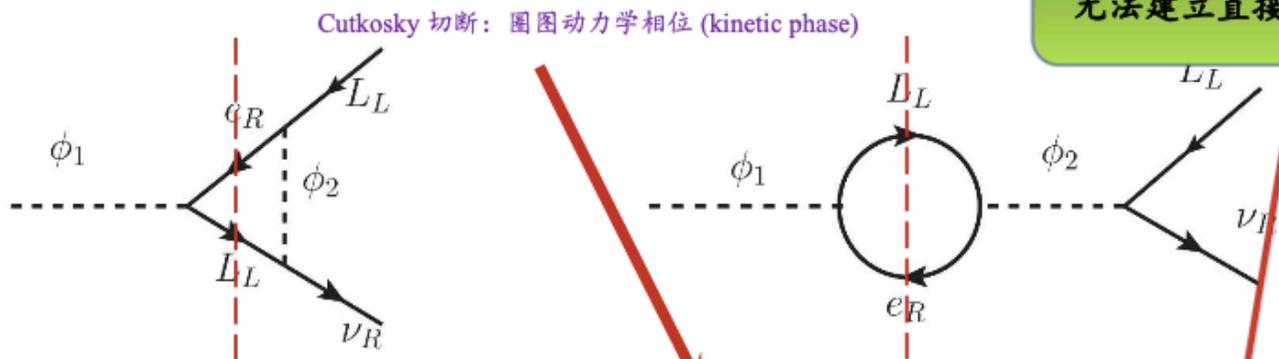
经典狄拉克生成机制

- 模型构建 K. Dick, *et al*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4039

$$\mathcal{L} = Y_{\nu,1} \bar{L}_L \tilde{\phi}_1 \nu_R + Y_{\nu,2} \bar{L}_L \tilde{\phi}_2 \nu_R + Y_{\ell,1} \bar{L}_L \phi_1 e_R + Y_{\ell,2} \bar{L}_L \phi_2 e_R + \text{H.c.}$$

过多未知的汤川耦合矩阵，
无法建立直接的BAU-PMNS联结

- CP不对称性



$$\epsilon_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) - \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)}{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) + \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)} \simeq 2 \frac{\text{Im}(c_0^* c_1)}{|c_0|^2} \frac{\text{Im}(I_0^* I_1)}{|I_0|^2} \propto \frac{\text{Im}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,2} Y_{\ell,1} Y_{\ell,2}^*)}{\text{Tr}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,1})}$$

汤川矩阵的物理相对相位

$$\longrightarrow Y_{\Delta \nu_R} \propto \epsilon_{CP} \longrightarrow Y_B = \frac{8}{23} Y_{\Delta \nu_R}$$

经典狄拉克生成机制

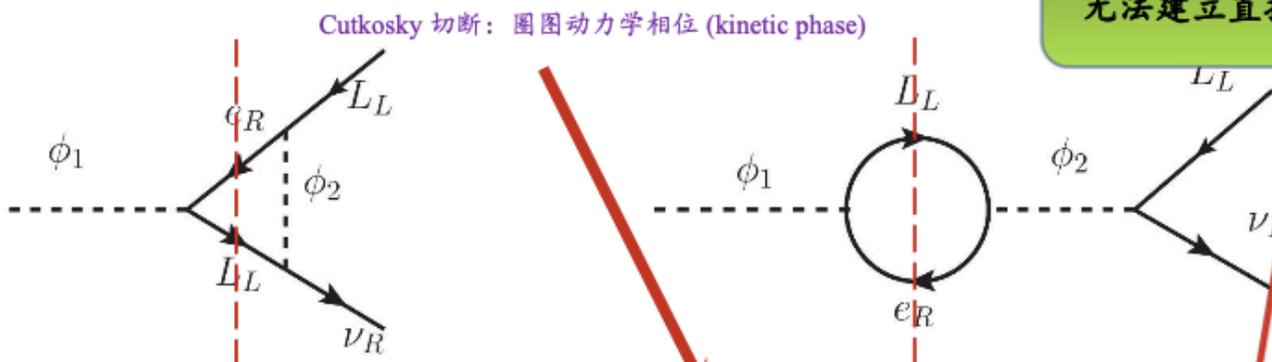
- 模型构建 K. Dick, *et al*, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 4039

中微子质量起源?

$$\mathcal{L} \ni Y_{\nu,1} \bar{L}_L \tilde{\phi}_1 \nu_R + Y_{\nu,2} \bar{L}_L \tilde{\phi}_2 \nu_R + Y_{\ell,1} \bar{L}_L \phi_1 e_R + Y_{\ell,2} \bar{L}_L \phi_2 e_R + \text{H.c}$$

过多未知的汤川耦合矩阵，无法建立直接的BAU-PMNS联结

- CP不对称性



Cutkosky 切断: 圈图动力学相位 (kinetic phase)

$$\epsilon_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) - \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)}{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) + \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)} \simeq 2 \frac{\text{Im}(c_0^* c_1)}{|c_0|^2} \frac{\text{Im}(I_0^* I_1)}{|I_0|^2} \propto \frac{\text{Im}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,2} Y_{\ell,1} Y_{\ell,2}^*)}{\text{Tr}(Y_{\nu,1}^* Y_{\nu,1})}$$

汤川矩阵的物理相对相位

$$\longrightarrow Y_{\Delta \nu_R} \propto \epsilon_{CP} \longrightarrow Y_B = \frac{8}{23} Y_{\Delta \nu_R}$$

纯热力学狄拉克生成机制

Shao-Ping Li: arXiv: 2005. 02927, 2105. 01317, 2201. 04977, 2202.10250

● 模型构建:

标准模型希格斯二重态

$$\mathcal{L} = \tilde{Y}_\nu \bar{L}_L \tilde{\Phi} \nu_R + \tilde{Y}_\ell \bar{L}_L H e_R + \text{H.c.}$$

“亲和”狄拉克中微子希格斯二重态

\tilde{Y}_ℓ 带电轻子质量来源 \tilde{Y}_ν 狄拉克中微子质量来源

狄拉克中微子质量起源&宇宙正反物质不对称性

● 概要:

- ✓ 非平衡条件: $v_\Phi \gtrsim \mathcal{O}(1)$ keV
标量衰变远小于宇宙膨胀速率
- ✓ B重子数破坏: 非微扰sphaleron过程
- ✓ CP不对称性:
 - 动力学相位--热力学Cutkosky切断--纯热力学效应
 - PMNS--狄拉克CP破坏相位

✓ 简单性: “亲和”狄拉克中微子双希格斯二重态

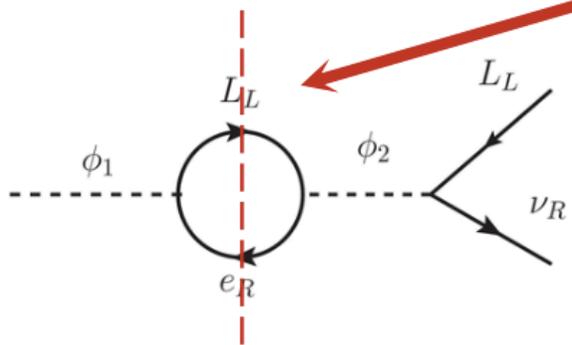
✓ 可检验性: 对撞机标量粒子探测; 宇宙学探测;

✓ BAU-PMNS联结:

$\left. \begin{matrix} \tilde{Y}_\ell \\ \tilde{Y}_\nu \end{matrix} \right\}$ 基矢变换: 带电轻子质量, 狄拉克中微子质量, PMNS矩阵

有限温效应

$$\epsilon_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) - \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)}{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}_L \nu_R) + \Gamma(\Phi \rightarrow L_L \bar{\nu}_R)} \simeq 2 \frac{\text{Im}(c_0^* c_1) \text{Im}(I_0^* I_1)}{|c_0|^2 |I_0|^2}$$



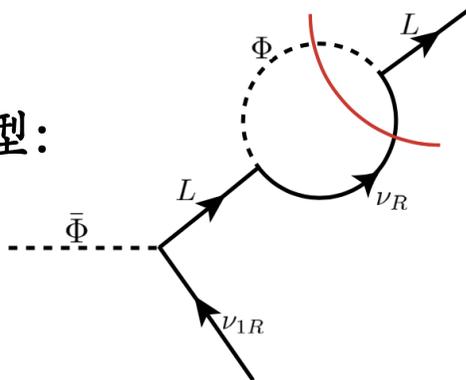
零温QFT: 真空Cutkosky切断

$$m_{\phi_1} > m_{L_L} + m_{e_R}$$

有限温度QFT: 热力学Cutkosky切断

$$m_{\phi_1} < m_{L_L} + m_{e_R}$$

➤ 这个模型:



热力学质量

➤ 电弱破缺前, $T > 100\text{GeV}$,
近似色散关系:

$$p^0 \approx \pm(m^2(T) + |\mathbf{p}|^2)^{1/2}$$

H. A. Weldon, *Phys. Rev. D* **26** (1982)
2789

$$\left\{ \begin{array}{l} m_L^2(T) = \left(\frac{3g_2^2}{32} + \frac{g_1^2}{32} + \frac{\tilde{Y}_\ell \tilde{Y}_\ell^\dagger}{16} + \frac{\tilde{Y}_\nu \tilde{Y}_\nu^\dagger}{16} \right) T^2, \\ m_e^2(T) = \left(\frac{g_1^2}{8} + \frac{\tilde{Y}_\ell^\dagger \tilde{Y}_\ell}{8} \right) T^2, \\ m_\nu^2(T) = \left(\frac{\tilde{Y}_\nu^\dagger \tilde{Y}_\nu}{8} \right) T^2 \end{array} \right.$$

非对角矩阵!

热力学质量对角化

● 经典条件: $\tilde{Y}_\ell \gg \tilde{Y}_\nu$ \longrightarrow $m_L^2(T) = \left(\frac{3g_2^2}{32} + \frac{g_1^2}{32} + \frac{\tilde{Y}_\ell \tilde{Y}_\ell^\dagger}{16} \right) T^2$

基矢变换 $L_L \rightarrow V_L^\dagger L_L^{tb}, \quad e_R \rightarrow V_R^{e,\dagger} e_R^{tb}, \quad \nu_R \rightarrow V_R^{\nu,\dagger} \nu_R^{tb}$

\longrightarrow $\tilde{Y}_\ell \rightarrow V_L \tilde{Y}_\ell V_R^{e,\dagger} \equiv Y_\ell^{tb}, \quad \tilde{Y}_\nu \rightarrow V_L \tilde{Y}_\nu V_R^{\nu,\dagger} \equiv Y_\nu^{tb}$

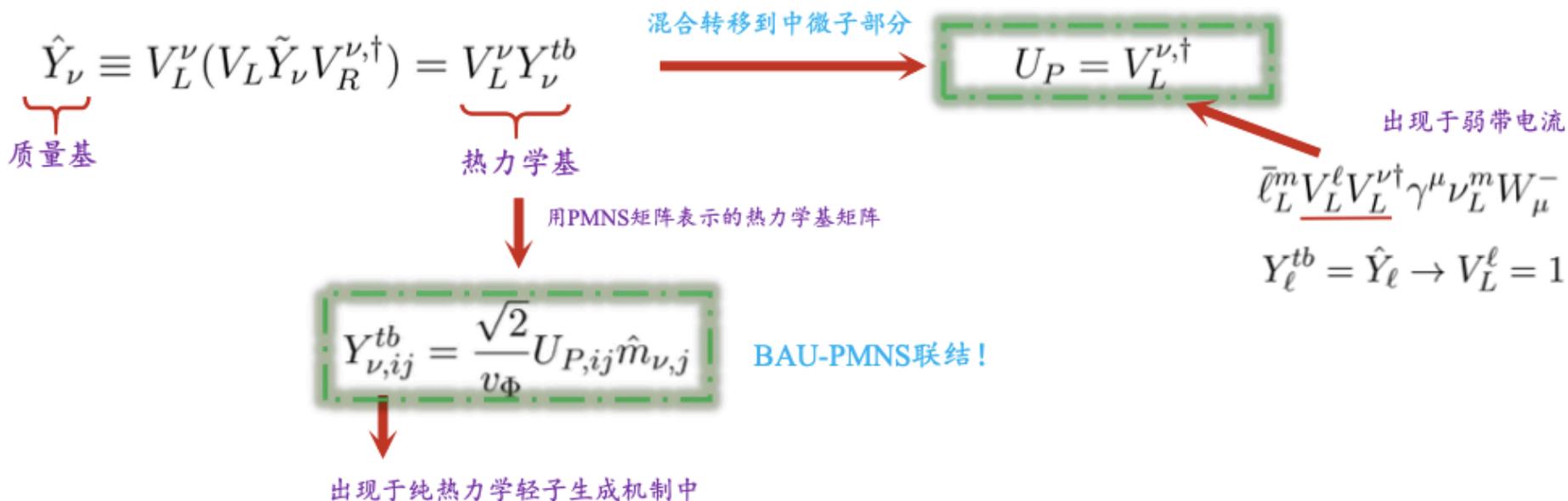
● 对角化

$m_L^2(T)$	$\tilde{Y}_\ell \tilde{Y}_\ell^\dagger \rightarrow V_L \tilde{Y}_\ell \tilde{Y}_\ell^\dagger V_L^\dagger = Y_\ell^{tb} Y_\ell^{tb,\dagger} = \hat{Y}_L^2 = \hat{Y}_\ell^2$	}	热力学基	
$m_e^2(T)$	$\tilde{Y}_\ell^\dagger \tilde{Y}_\ell \rightarrow V_R^e \tilde{Y}_\ell^\dagger \tilde{Y}_\ell V_R^{e,\dagger} = Y_\ell^{tb,\dagger} Y_\ell^{tb} = \hat{Y}_\ell^2$		}	$Y_\ell^{tb} = \hat{Y}_\ell, Y_\nu^{tb} \neq \hat{Y}_\nu$
$m_\nu^2(T)$	$\tilde{Y}_\nu^\dagger \tilde{Y}_\nu \rightarrow V_R^\nu \tilde{Y}_\nu^\dagger \tilde{Y}_\nu V_R^{\nu,\dagger} = Y_\nu^{tb,\dagger} Y_\nu^{tb} = \hat{Y}_\nu^2$			

热力学质量对角化

- 规范对称破缺后

热力学基到（真空）质量基： 仅需对左手态中微子作么正变换 $\rightarrow \nu_L^{tb} \rightarrow V_L^{\nu,\dagger} \nu_L^m$

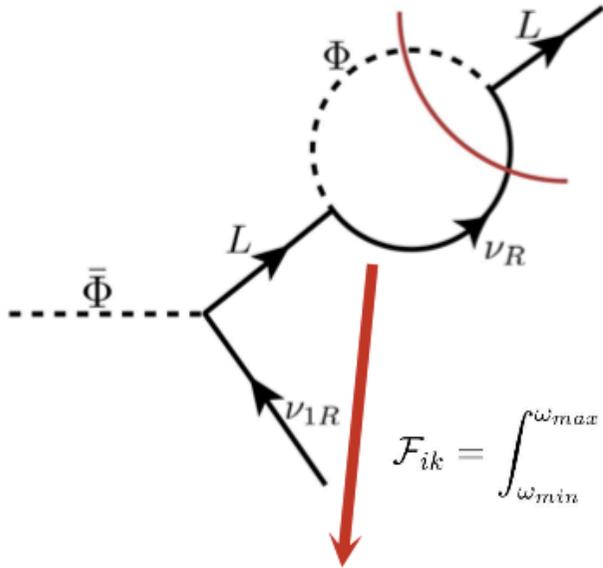


最轻中微子生成机制

- CP不对称性来源:

ν_1 -轻子生成 (ν_1 -leptogenesis) 机制

热力学Cutkosky切断: 圈图动力学相位



$$\epsilon_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{1R}) - \Gamma(\Phi \rightarrow L\bar{\nu}_{1R})}{\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{1R}) + \Gamma(\Phi \rightarrow L\bar{\nu}_{1R})}$$

$$= \frac{1}{4\pi} \frac{\sum_{i \neq k} \text{Im}[Y_{\nu,i1}^{tb,*} Y_{\nu,k1}^{tb} (Y_{\nu}^{tb} Y_{\nu}^{tb,\dagger})_{ik}]}{\sum_j |Y_{\nu,j1}^{tb}|^2 (m_{\Phi}^2 - m_{L,j}^2)} \mathcal{F}_{ik}$$

$$\mathcal{F}_{ik} = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} d\omega \frac{m_{\Phi}^2 [f_F(-\omega) + f_B(E_i - \omega)]}{(m_{\Phi}^2 - m_{L,i}^2)(m_{L,i}^2 - m_{L,k}^2)} [(m_{L,i}^2 - m_{\Phi}^2)m_{\Phi} - 2m_{L,i}^2\omega]$$

$$Y_{\nu,ij}^{tb} = \frac{\sqrt{2}}{v_{\Phi}} U_{P,ij} \hat{m}_{\nu,j}$$

- 纯有限温度动力学相位

$$m_{\Phi}(T) > m_L(T) + m_{\nu_R}(T)$$

BAU-PMNS联结!

最轻中微子生成机制

- 最轻右手狄拉克中微子粒子数演化：玻尔兹曼方程

$$\frac{dY_{\Delta\nu_{1R}}}{dT} = -\frac{g_{\Phi}m_{\Phi}^2}{s_{\text{SM}}H\pi^2}\epsilon_{CP}K_1(m_{\Phi}/T)\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{1R}) \quad Y_{\Delta\nu_{1R}} \equiv (n_{\nu_{1R}} - \bar{n}_{\nu_{1R}})/s_{\text{SM}}$$

$$\longrightarrow Y_{\Delta\nu_{1R}}(T_f) - Y_{\Delta\nu_{1R}}(T_i) \approx Y_{\Delta\nu_{1R}}(T_f) = \int_{T_f}^{T_i} \frac{g_{\Phi}m_{\Phi}^2}{s_{\text{SM}}H\pi^2}\epsilon_{CP}K_1(m_{\Phi}/T)\Gamma(\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{1R})$$



$$Y_B = \frac{8}{23}Y_{\Delta\nu_{1R}} \quad \longleftarrow \quad Y_{\Delta\nu_{1R}} \sim \epsilon_{CP}Y_{\nu_{1R}}$$

最轻中微子生成机制

- 重子不对称量

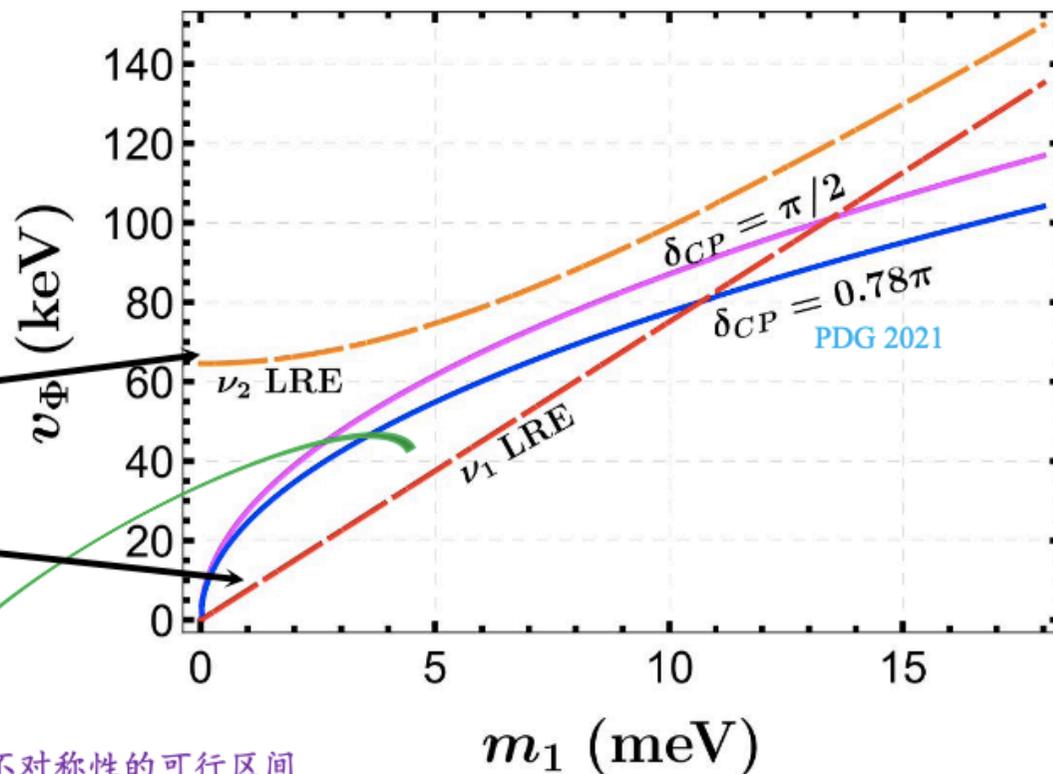
$$Y_B \approx Y_B^{\text{exp}} \left(\frac{m_1}{\text{meV}} \right)^2 \left(\frac{v_\Phi}{30.83 \text{ keV}} \right)^{-4} \left(\frac{\sin \delta_{CP}}{0.64} \right)$$

BAU-PMNS联结!

- 限制：右手中微子左右平衡条件

$$\Gamma_{\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{1R}} \lesssim H(T_{\text{sph}}) \lesssim \Gamma_{\bar{\Phi} \rightarrow \bar{L}\nu_{2R}(\nu_{3R})}$$

$$\left(\frac{m_1}{\text{meV}} \right) \lesssim \left(\frac{v_\Phi}{7.51 \text{ keV}} \right) \lesssim \sqrt{\left(\frac{m_1}{\text{meV}} \right)^2 + 73.89}$$



解释宇宙正反物质不对称性的可行区间

类希格斯机制（真空质量生成）

S. Gabriel & S. Nandi, Phys. Lett. B 655 (2007) 141

- 类希格斯 (Higgs-like) 机制--典型：“亲和”中微子双希格斯二重态模型 (neutrinophilic 2HDM)

$$Y_\nu \bar{L}_L \tilde{\Phi} \nu_{Ri} \quad \Phi_i = \begin{pmatrix} \phi_i^+ \\ (v_i + \rho_i + i\eta_i)/\sqrt{2} \end{pmatrix} \rightarrow m_\nu = \frac{v_\Phi}{\sqrt{2}} Y_\nu$$

整体U(1)对称

- 双希格斯标量势

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = m_{11}^2 \Phi_1^\dagger \Phi_1 + m_{22}^2 \Phi_2^\dagger \Phi_2 - \left[\mu^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \text{H.c.} \right] + \frac{\lambda_1}{2} (\Phi_1^\dagger \Phi_1)^2 + \frac{\lambda_2}{2} (\Phi_2^\dagger \Phi_2)^2 + \lambda_3 (\Phi_1^\dagger \Phi_1) (\Phi_2^\dagger \Phi_2) + \lambda_4 (\Phi_1^\dagger \Phi_2) (\Phi_2^\dagger \Phi_1)$$

U(1) 软破缺

- 自发性对称破缺

$$\left. \frac{\partial V}{\partial \Phi_1} \right|_{\langle \Phi_1 \rangle = v_1/\sqrt{2}} = 0, \quad \left. \frac{\partial V}{\partial \Phi_2} \right|_{\langle \Phi_2 \rangle = v_2/\sqrt{2}} = 0 \quad \rightarrow \quad v_1 \approx v_{EW}, \quad v_\Phi \equiv v_2 \approx \frac{\mu^2}{\lambda v_{EW}^2 + m_{22}^2} v_{EW}$$

类跷跷板 (seesaw-like) 压低

$v_\Phi \ll v_{EW}$

类希格斯机制：观测性

- 味物理过程、宇宙学效应
 - $v_\Phi = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$
 - 轻子味破坏: $\mu \rightarrow e\gamma$ E. Bertuzzo, *et al*, JHEP 01 (2016) 018
未来MEG实验可观测!
 - 早期宇宙有效中微子数偏移 ΔN_{eff} 过大!
 - $v_\Phi \gtrsim \mathcal{O}(1) \text{ keV}$
 - 轻子味破坏: 反应率太小
 - 早期宇宙有效中微子数偏移: BBN、CMB可检测

Shao-Ping Li: arXiv: 2202.10250

● 对撞机唯象

$$pp \rightarrow \gamma^*, Z^* \rightarrow H^+ H^- \quad H^\pm \rightarrow W^\pm + h \quad H^\pm \rightarrow \ell^\pm + \nu_R$$

Scotogenic 中微子模型

- 基本思想:

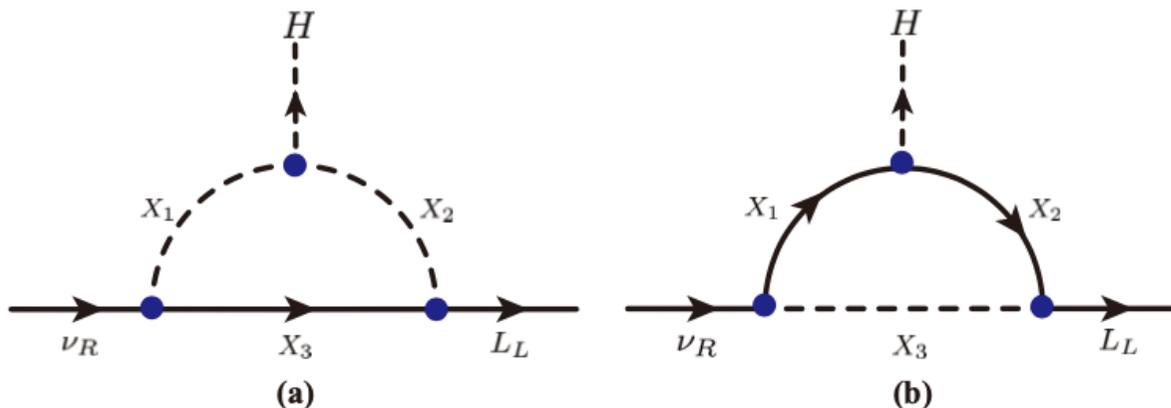
- 中微子质量还可以通过跷跷板机制、1圈图和2圈图等实现
- 暗物质参与其中

Active

DM + Neutrino

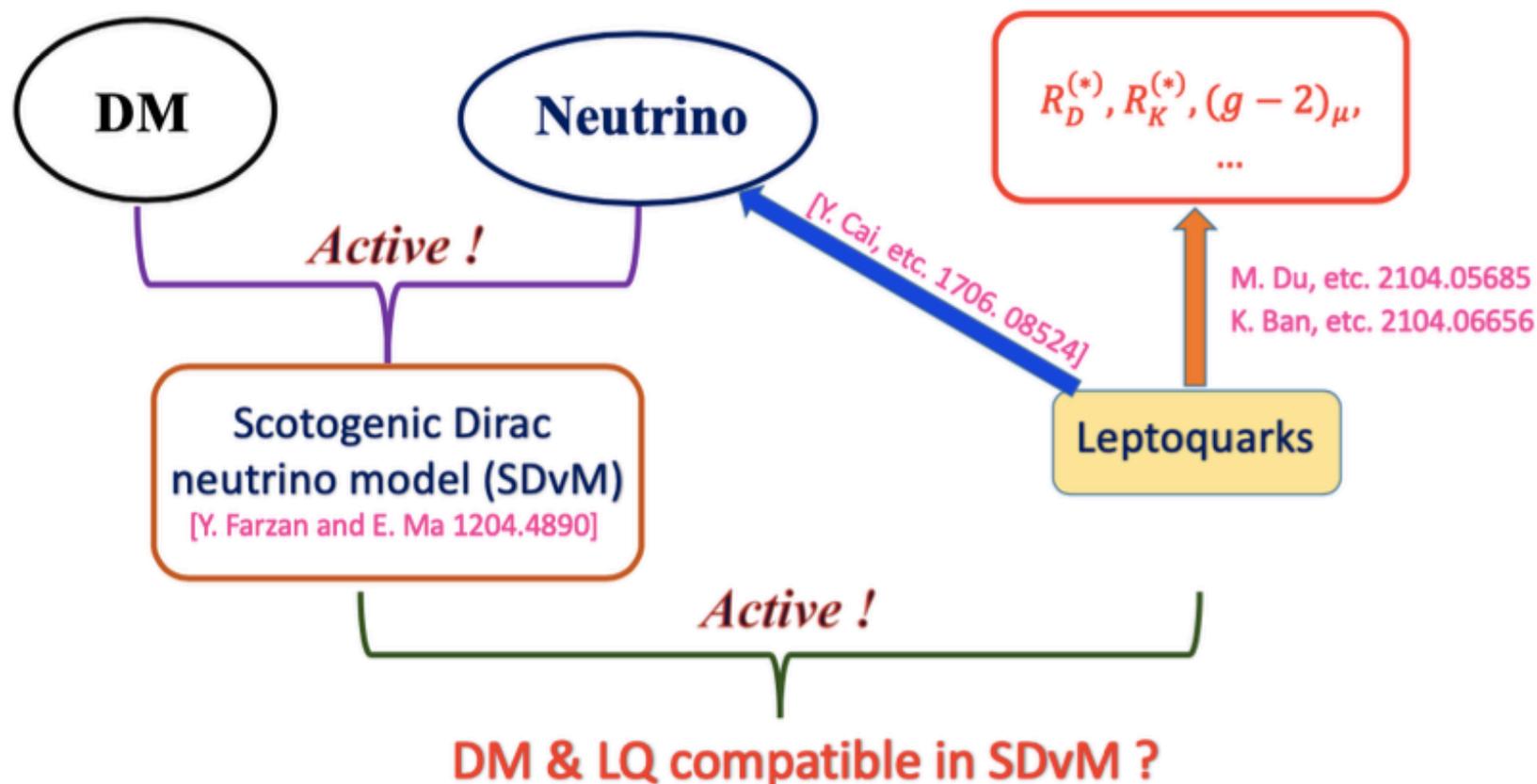
- 以d=4为例: $\mathcal{L}_4 = -y\bar{L}_L\tilde{H}\nu_R + \text{H.c.}$

E. Ma and O. Popov, Phys. Lett. B 764, 142



一个想法：同一理论框架下解决尽可能多问题

Shao-Ping Li *et. al* 2204.09201

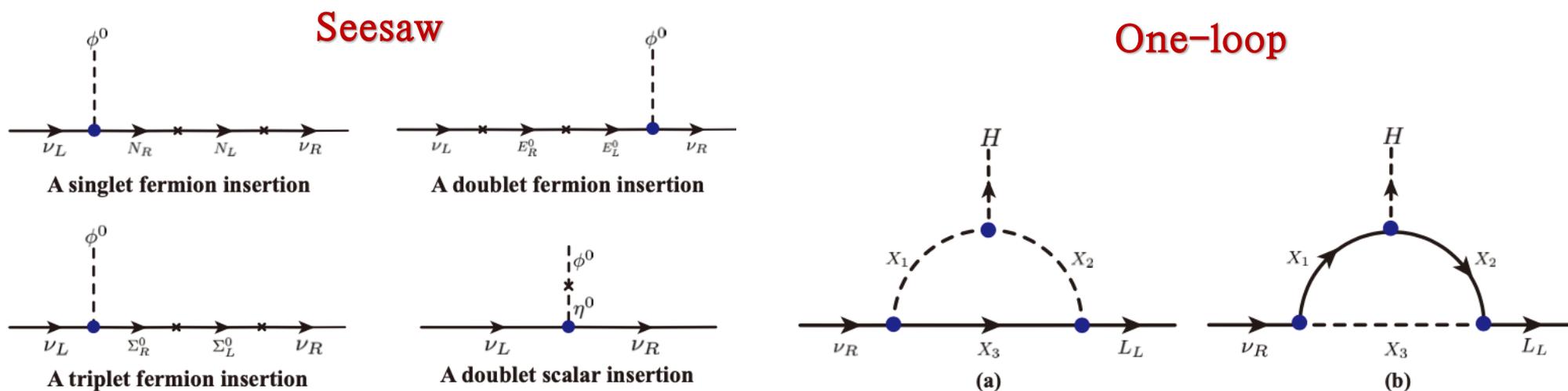


从 $d=4$ 的算符出发

$$\mathcal{L}_4 = -y\bar{L}_L\tilde{H}\nu_R + \text{H.c.}$$

➤ 考虑它的树图(seesaw)、1圈图和2圈图等实现

E. Ma and O. Popov, Phys. Lett. B 764, 142



➤ 只考虑新粒子的 $SU_L(2)$ 单态、二重态和三重态！

Minimal

LQ和DM

LQs: 6 scalars+6 vectors

Scalar LQ	SM Rep.	Vector LQ	SM Rep.
$S_1 \bar{Q}_L^C L_L$	$(\bar{3}, 1, 1/3)$	$U_{1\mu} \bar{Q}_L \gamma^\mu L_L$	$(3, 1, 2/3)$
$S_1 \bar{u}_R^C e_R$		$U_{1\mu} \bar{d}_R \gamma^\mu e_R$	
$S_1 \bar{d}_R^C \nu_R$		$U_{1\mu} \bar{u}_R \gamma^\mu \nu_R$	
$S_3 \bar{Q}_L^C L_L$	$(\bar{3}, 3, 1/3)$	$U_{3\mu} \bar{Q}_L \gamma^\mu L_L$	$(3, 3, 2/3)$
$R_2 \bar{u}_R L_L$	$(3, 2, 7/6)$	$V_{2\mu} \bar{d}_R^C \gamma^\mu L_L$	$(\bar{3}, 2, 5/6)$
$R_2 \bar{Q}_L e_R$		$V_{2\mu} \bar{Q}_L^C \gamma^\mu e_R$	
$\tilde{S}_1 \bar{d}_R^C e_R$	$(\bar{3}, 1, 4/3)$	$\tilde{U}_{1\mu} \bar{u}_R \gamma^\mu e_R$	$(3, 1, 5/3)$
$\tilde{R}_2 \bar{d}_R L_L$	$(3, 2, 1/6)$	$\tilde{V}_{2\mu} \bar{u}_R^C \gamma^\mu L_L$	$(\bar{3}, 2, -1/6)$
$\tilde{R}_2 \bar{Q}_L \nu_R$		$\tilde{V}_{2\mu} \bar{Q}_L^C \gamma^\mu \nu_R$	
$\bar{S}_1 \bar{u}_R^C \nu_R$	$(\bar{3}, 1, -2/3)$	$\bar{U}_{1\mu} \bar{d}_R \gamma^\mu \nu_R$	$(3, 1, -1/3)$

暗物质

- 暗物质候选者条件:

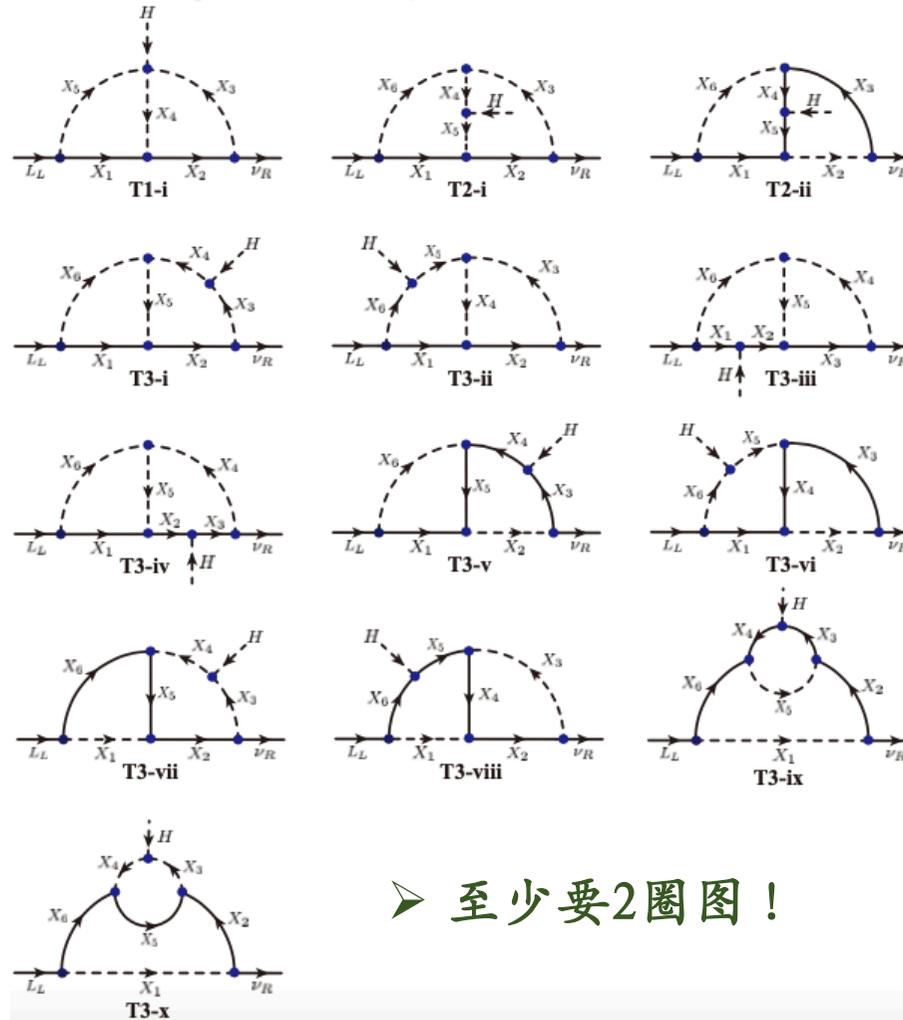
- 为避免来自暗物质直接测量实验的限制, 要求暗物质: $\alpha = T_3 = 0$;
如果是标量二重态, 则 $\alpha = \mp 1/2$

- 保证暗物质的稳定性,
引入 Z_2 对称性:

- $Z_2(+)$: 所有标准模型粒子以及右手中微子;
 - $Z_2(-)$: 暗物质候选者

LQ和DM可共存的图

Shao-Ping Li et. al 2204. 09201



确定新粒子的量子数，
建立相应唯象模型。

➤ 至少要2圈图！

唯象模型

Model	$R_{K(*)}$	$R_{D(*)}$	$(g-2)_\mu$
U_1	✓	✓	✓
V_2	✓	✓	✓
S_1	✗	✓	✓
S_3	✓	✗	✗
R_2	✗	✓	✓

❖ 3个选择:

- U_1 或者 V_2 ;
- (i) $S_1 + S_3$; (ii) $R_2 + S_3$;

❖ 未来模型的唯象研究:

- 模型参数的限制;
- 中微子质量的计算
- $B_{\text{Ald}}/9$ DM残余分度

T1-1

Model	X_1^F	X_2^F	X_3	X_4	X_5	Dark matter
A-1	\bar{Q}_L	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(3, 2, \alpha + \frac{1}{6})^-$	$S_{1,3}^\dagger$	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
A-2	\bar{Q}_L	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(3, 1 \oplus 3, \alpha + \frac{1}{6})^-$	$S_{1,3}^\dagger$	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$
B-1	u_R	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 1, \alpha - \frac{2}{3})^-$	R_2^\dagger	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
B-2	u_R	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 2, \alpha - \frac{2}{3})^-$	R_2^\dagger	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$
C-1	d_R	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 1 \oplus 3, \alpha + \frac{1}{3})^-$	\tilde{R}_2^\dagger	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
C-2	d_R	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 2, \alpha + \frac{1}{3})^-$	\tilde{R}_2^\dagger	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$
D-1	Q_L	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 2, \alpha - \frac{1}{6})^-$	$U_{1,3}^\dagger$	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
D-2	Q_L	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(\bar{3}, 1 \oplus 3, \alpha - \frac{1}{6})^-$	$U_{1,3}^\dagger$	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$
E-1	\bar{u}_R	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(3, 1 \oplus 3, \alpha + \frac{2}{3})^-$	\tilde{V}_2^\dagger	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
E-2	\bar{u}_R	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(3, 2, \alpha + \frac{2}{3})^-$	\tilde{V}_2^\dagger	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$
F-1	\bar{d}_R	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(1, 1 \oplus 3, \alpha)^-$	$(3, 1 \oplus 3, \alpha - \frac{1}{3})^-$	V_2^\dagger	$[X_2, X_3]_{\alpha=0}$
F-2	\bar{d}_R	$(1, 2, \alpha)^-$	$(1, 2, \alpha)^-$	$(3, 2, \alpha - \frac{1}{3})^-$	V_2^\dagger	$X_3 _{\alpha=\frac{1}{2}}$



$Z_2(-)$ 奇宇称、有色、与夸克和

暗物质 X_2 耦合, 可产生强子invisible衰变

总结与展望

- 自然界依然存在很多问题，标准模型无法解答：中微子质量、宇宙中正反物质不对称、暗物质以及实验上发现的各种反常。需要新物理和新机制。
- 这些问题可以相互关联。寻求在同一理论框架下解决尽可能多问题。
- 纯热力学狄拉克轻子生成机制：用简单的质量生成机制，在有限度效应下可实现宇宙正反物质不对称的生成；具有简单性、预言性、关联性和可检验性。
- 兼容LQ的scotogenic狄拉克模型有很大几率可同时解释中微子质量、暗物质形成以及味物理反常等问题。
- 期待未来进一步建立更系统、更丰度的狄拉克中微子物理研究领域。