

3ループ輻射シーソー模型

折笠 雄太 (KNRC/KIAS)

arXiv: 1507.02412

共同研究者: 岡田寛 (NCTS)、西脇健二 (KIAS)

ILC夏の合宿2015

2015年7月20日ナイトセッション

標準模型

標準模型は100GeVスケールの物理をよく記述するが、説明できない現象がいくつか存在する

質量階層性
ダークマター など



これらを説明できる模型

輻射シーソー模型

質量階層性

クォーク質量

$$m_u = 2.3 \times 10^{-3} \text{ GeV}, m_c = 1.3 \text{ GeV}, m_t = 173 \text{ GeV}$$

$$m_d = 4.8 \times 10^{-3} \text{ GeV}, m_s = 9.5 \times 10^{-2} \text{ GeV}, m_b = 4.2 \text{ GeV}$$

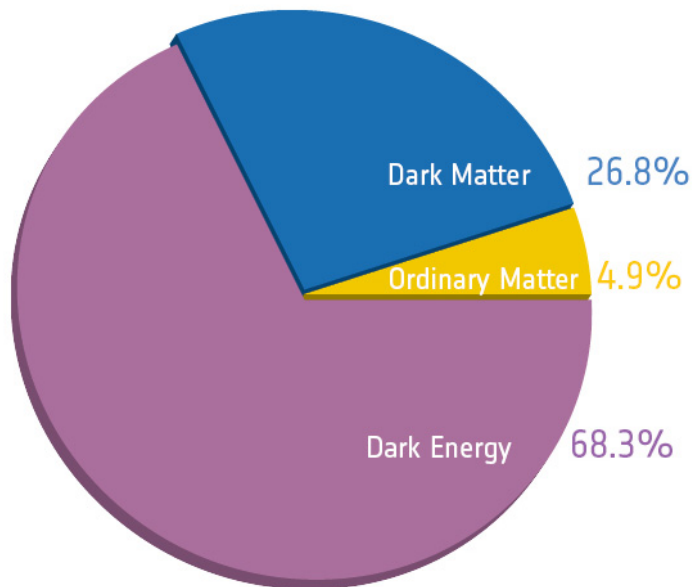
レプトン質量

$$m_e = 5.1 \times 10^{-4} \text{ GeV}, m_\mu = 0.11 \text{ GeV}, m_\tau = 1.8 \text{ GeV}$$

$$m_\nu \sim 10^{-11} \text{ GeV}$$

ニュートリノだけがとても軽い

ダークマター



ダークマターの特徴

- 質量を持つ
- 中性である
- 安定である

シーソー機構

5次元オペレータ

$$\frac{f}{\Lambda} hh\nu_L\nu_L$$

$$m_\nu \sim \mathcal{O}(0.1)eV \rightarrow \frac{f}{\Lambda} \sim \mathcal{O}(10^{-14})GeV^{-1}$$

$$f \sim \mathcal{O}(1) \quad \Lambda \sim \mathcal{O}(10^{14})GeV$$

輻射シーソー模型

$$m_\nu = \frac{1}{(16\pi^2)^n} \frac{fv^2}{\sqrt{2}\Lambda}$$

$$\begin{aligned} \frac{f}{\Lambda} &\sim (16\pi^2)^n \times \mathcal{O}(10^{-14}) \text{GeV}^{-1} \\ &\sim \mathcal{O}(10^{2n-14}) \text{GeV}^{-1} \end{aligned}$$

ループファクターによってTeVスケール新粒子
自然にダークマターの候補を含む

目次

- イントロ
- 模型
- LFVとLHCからの制限
- ダークマター

模型

Field contents

	Lepton Fields			Scalar Fields				
Characters	L_{L_i}	e_{R_i}	N_{R_i}	Φ	Σ_0	h_1^+	h_2^+	k^{++}
$SU(3)_C$	1	1	1	1	1	1	1	1
$SU(2)_L$	2	1	1	2	1	1	1	1
$U(1)_Y$	$-1/2$	-1	0	$1/2$	0	1	1	2
$U(1)$	0	0	$-x$	0	$2x$	0	x	$2x$

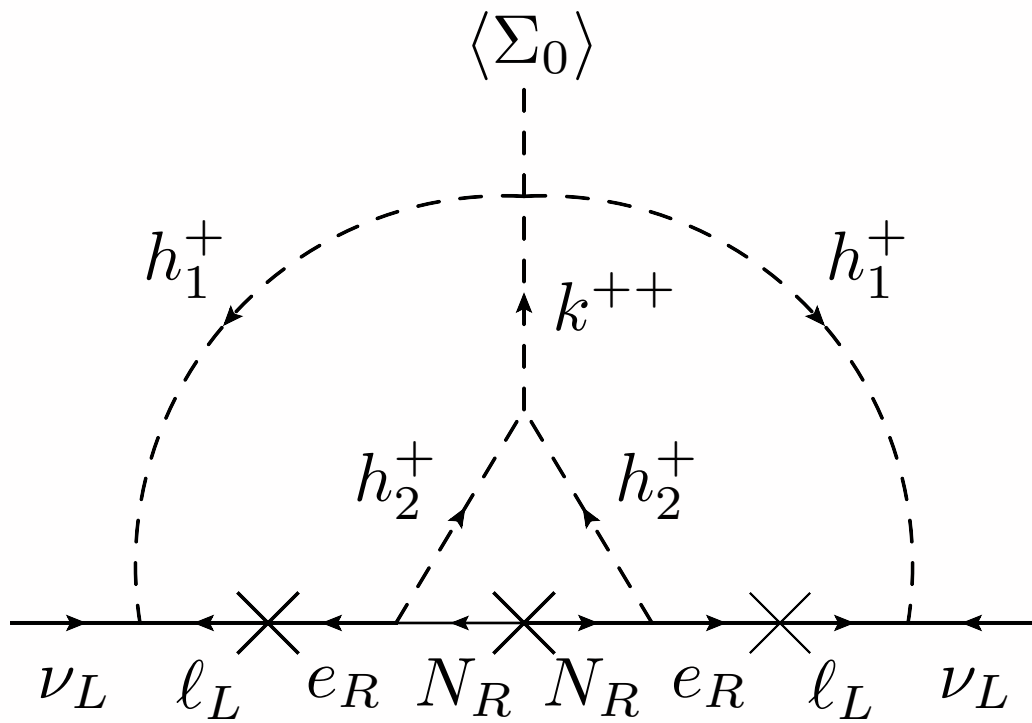
Table 1: Contents of lepton and scalar fields and their charge assignment under $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)$, where $U(1)$ is an additional global symmetry and $x \neq 0$. The subscripts found in the lepton fields i ($= 1, 2, 3$) indicate generations of the fields.

Field contents

	Lepton Fields			Scalar Fields				
Characters	L_{L_i}	e_{R_i}	N_{R_i}	Φ	Σ_0	h_1^+	h_2^+	k^{++}
$SU(3)_C$	1	1	1	1	1	1	1	1
$SU(2)_L$	2	1	1	2	1	1	1	1
$U(1)_Y$	$-1/2$	-1	0	$1/2$	0	1	1	2
$U(1)$	0	0	$-x$	0	$2x$	0	x	$2x$

Table 1: Contents of lepton and scalar fields and their charge assignment under $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)$, where $U(1)$ is an additional global symmetry and $x \neq 0$. The subscripts found in the lepton fields $i (= 1, 2, 3)$ indicate generations of the fields.

ダークマターの候補



$$\mathcal{V} \supset \left[\lambda_{11} \Sigma_0^* h_1^- h_1^- k^{++} + \mu_{22} h_2^+ h_2^+ k^{--} + \text{h.c.} \right]$$

$$(m_\nu)_{ab} = \frac{\mu_{11} \mu_{22}}{(4\pi)^6} \sum_{i,j,k=1}^3 \frac{1}{M_k^4} \left[(y_L)_{ai} m_{\ell_i} (y_R^T)_{ik} (M_{N_k}) (y_R)_{kj} m_{\ell_j} (y_L^T)_{jb} \right]$$

$$\times F_1 \left(\frac{m_{h_1^+}^2}{M_k^2}, \frac{m_{h_2^+}^2}{M_k^2}, \frac{m_{\ell_i}^2}{M_k^2}, \frac{m_{\ell_j}^2}{M_k^2}, \frac{M_{N_k}^2}{M_k^2}, \frac{m_{k^{\pm\pm}}^2}{M_k^2} \right)$$

$$-\mathcal{L}_Y = (y_\ell)_{ij} \bar{L}_{L_i} \Phi e_{R_j} + \frac{1}{2} (y_L)_{ij} \bar{L}_{L_i}^c L_{L_j} h_1^+ + (y_R)_{ij} \bar{N}_{R_i} e_{R_j}^c h_2^- + \frac{1}{2} (y_N)_{ij} \Sigma_0 \bar{N}_{R_i}^c N_{R_j} + \text{h.c.}$$

反对称
一般
对称

$$F_1 (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) = \int \mathbf{dX} \frac{1}{\Delta_1} \frac{1}{(\Delta_2)^2} \frac{\rho}{(\Delta_3)^2}$$

$$\int \mathbf{dX} = \int_0^1 dx dy dz \delta(x + y + z - 1) \int_0^1 d\alpha d\beta d\gamma d\delta \delta(\alpha + \beta + \gamma + \delta - 1) \int_0^1 d\rho d\sigma d\omega \delta(\rho + \sigma + \omega - 1)$$

$$\Delta_1 = y(y - 1) + z(z - 1) + 2yz,$$

$$\Delta_2 = (\alpha Y + \delta)^2 - \delta - \alpha Y^2 - \alpha X,$$

$$\Delta_3 = \rho A (X_1, X_2, X_3, X_5, X_6) - \sigma X_4 - \omega X_1,$$

$$A (X_1, X_2, X_3, X_5, X_6) = -\frac{\alpha((x+y)X_2+zX_5)}{((\alpha Y+\delta)^2-\delta-\alpha Y^2-\alpha X)(y(y-1)+z(z-1)+2yz)} + \frac{\beta X_1+\gamma X_3+\delta X_6}{((\alpha Y+\delta)^2-\delta-\alpha Y^2-\alpha X)},$$

$$X = -\left(\frac{y}{y+z}\right)^2 + \frac{y(y-1)}{y(y-1)+z(z-1)+2yz}, \quad Y = \frac{y}{y+z}$$

$$\mathcal{V} \supset \left[\lambda_{11} \Sigma_0^* h_1^- h_1^- k^{++} + \mu_{22} h_2^+ h_2^+ k^{--} + \text{h.c.} \right]$$

$$(m_\nu)_{ab} = \frac{\mu_{11} \mu_{22}}{(4\pi)^6} \sum_{i,j,k=1}^3 \frac{1}{M_k^4} \left[\underline{(y_L)_{ai} m_{\ell_i}} \underline{(y_R^T)_{ik} (M_{N_k})} \underline{(y_R)_{kj} m_{\ell_j}} \underline{(y_L^T)_{jb}} \right]$$

$$\times F_1 \left(\frac{m_{h_1^+}^2}{M_k^2}, \frac{m_{h_2^+}^2}{M_k^2}, \frac{m_{\ell_i}^2}{M_k^2}, \frac{m_{\ell_j}^2}{M_k^2}, \frac{M_{N_k}^2}{M_k^2}, \frac{m_{k^{\pm\pm}}^2}{M_k^2} \right)$$

$$-\mathcal{L}_Y = (y_\ell)_{ij} \bar{L}_{L_i} \Phi e_{R_j} + \frac{1}{2} (y_L)_{ij} \bar{L}_{L_i}^c L_{L_j} h_1^+ + (y_R)_{ij} \bar{N}_{R_i} e_{R_j}^c h_2^- + \frac{1}{2} (y_N)_{ij} \Sigma_0 \bar{N}_{R_i}^c N_{R_j} + \text{h.c.}$$

反对称

一般

对称

$$\mathcal{V} \supset \left[\underbrace{\lambda_{11} \Sigma_0^* h_1^- h_1^- k^{++}}_1 + \underbrace{\mu_{22} h_2^+ h_2^+ k^{--}}_1 + \text{h.c.} \right]$$

$$(m_\nu)_{ab} = \frac{\mu_{11} \mu_{22}}{(4\pi)^6} \sum_{i,j,k=1}^3 \frac{1}{M_k^4} \left[\underbrace{(y_L)_{ai}}_{\text{red}} m_{\ell_i} \underbrace{(y_R^T)_{ik}}_{\text{green}} \underbrace{(M_{N_k})}_{\text{blue}} \underbrace{(y_R)_{kj}}_{\text{green}} m_{\ell_j} \underbrace{(y_L^T)_{jb}}_{\text{red}} \right]$$

$$\times F_1 \left(\underbrace{\frac{m_{h_1^+}^2}}{M_k^2}}_1, \underbrace{\frac{m_{h_2^+}^2}}{M_k^2}}_1, \frac{m_{\ell_i}^2}{M_k^2}, \frac{m_{\ell_j}^2}{M_k^2}, \underbrace{\frac{M_{N_k}^2}{M_k^2}}_3, \underbrace{\frac{m_{k^{\pm\pm}}^2}{M_k^2}}_1 \right)$$

$$-\mathcal{L}_Y = (y_\ell)_{ij} \bar{L}_{L_i} \Phi e_{R_j} + \underbrace{\frac{1}{2} (y_L)_{ij} \bar{L}_{L_i}^c L_{L_j} h_1^+}_{\text{反对称}} + \underbrace{(y_R)_{ij} \bar{N}_{R_i} e_{R_j}^c h_2^-}_{\text{一般}} + \underbrace{\frac{1}{2} (y_N)_{ij} \Sigma_0 \bar{N}_{R_i}^c N_{R_j}}_{\text{对称}} + \text{h.c.}$$

1

5

LFVとLHC

Process	(i, f)	Experimental bounds (90% CL)	C_{if}
$\mu^- \rightarrow e^- \gamma$	(2, 1)	$\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) < 5.7 \times 10^{-13}$	1.6×10^{-6}
$\tau^- \rightarrow e^- \gamma$	(3, 1)	$\text{Br}(\tau \rightarrow e \gamma) < 3.3 \times 10^{-8}$	0.52
$\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma$	(3, 2)	$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu \gamma) < 4.4 \times 10^{-8}$	0.7

Type of universality	Experimental bounds (90% CL)
lepton/hadron universality	$\sum_{q=d,s,b} V_{uq}^{\text{exp}} = 0.9999 \pm 0.0006$
μ/e universality	$G_{\mu}^{\text{exp}}/G_e^{\text{exp}} = 1.0010 \pm 0.0009$
τ/μ universality	$G_{\tau}^{\text{exp}}/G_{\mu}^{\text{exp}} = 0.9998 \pm 0.0013$
τ/e universality	$G_{\tau}^{\text{exp}}/G_e^{\text{exp}} = 1.0034 \pm 0.0015$

Process	(i, j, k, l)	Experimental bounds (90% CL)	A_{ijkl}
$\mu^- \rightarrow e^+ e^- e^-$	(2, 1, 1, 1)	$\text{Br} < 1.0 \times 10^{-12}$	2.3×10^{-5}
$\tau^- \rightarrow e^+ e^- e^-$	(3, 1, 1, 1)	$\text{Br} < 2.7 \times 10^{-8}$	0.009
$\tau^- \rightarrow e^+ e^- \mu^-$	(3, 1, 1, 2)	$\text{Br} < 1.8 \times 10^{-8}$	0.005
$\tau^- \rightarrow e^+ \mu^- \mu^-$	(3, 1, 2, 2)	$\text{Br} < 1.7 \times 10^{-8}$	0.007
$\tau^- \rightarrow \mu^+ e^- e^-$	(3, 2, 1, 1)	$\text{Br} < 1.5 \times 10^{-8}$	0.007
$\tau^- \rightarrow \mu^+ e^- \mu^-$	(3, 2, 1, 2)	$\text{Br} < 2.7 \times 10^{-8}$	0.007
$\tau^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^-$	(3, 2, 2, 2)	$\text{Br} < 2.1 \times 10^{-8}$	0.008

$m_{k\pm\pm}$	$(m_{h_1^\pm}, m_{h_2^\pm})$	$F_1(M_{N_2})$	$F_1(M_{N_3})$	# of allowed points
500 GeV	(4.8 TeV, 4.8 TeV)	-1.16818	-11.5428	2726
	(4.0 TeV, 4.0 TeV)	-2.14198	-20.0287	422
	(3.5 TeV, 3.5 TeV)	-3.30195	-29.6525	89
	(3.0 TeV, 3.0 TeV)	-5.37518	-46.0932	16
250 GeV	(4.8 TeV, 4.8 TeV)	-1.21466	-11.9695	1644
	(4.0 TeV, 4.0 TeV)	-2.24746	-20.9444	190
	(3.5 TeV, 3.5 TeV)	-3.49141	-31.2321	31
	(3.0 TeV, 3.0 TeV)	-5.74153	-49.0141	2

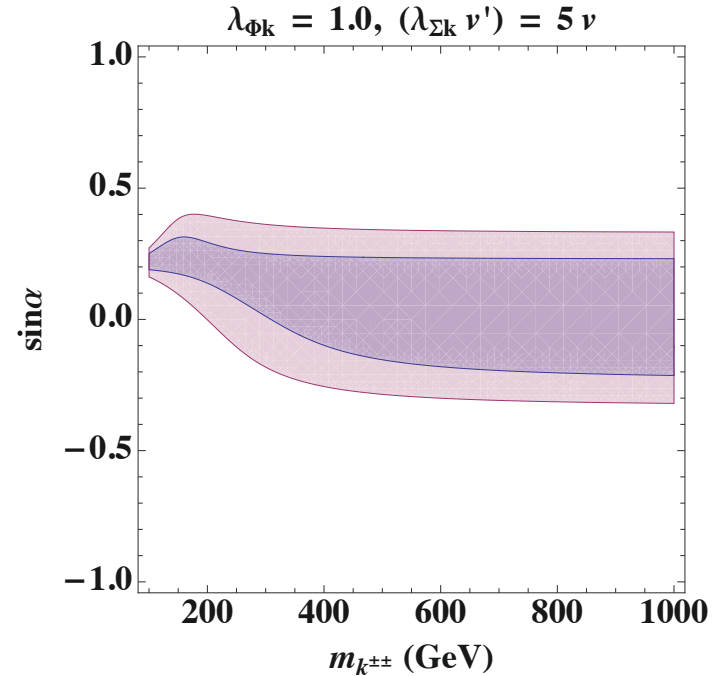
$$M_{N_2} = 5TeV, M_{N_3} = 10TeV$$

$$\mu_{12} = \mu_{22} (\equiv \mu) \in [1 \text{ TeV}, 20 \text{ TeV}], \quad \delta \in [0, 2\pi], \quad \phi \in [0, 2\pi], \quad (y_L)_{23} \in [-1, 1],$$

$$(y_R)_{ij} \in [-0.01, -0.1] \cup [0.01, 0.1] \quad \left(\text{for } (i, j) = (1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (3, 1) \right)$$

加速器による制限

Process	ATLAS	CMS
$h \rightarrow \gamma\gamma$	$1.17^{+0.27}_{-0.27}$	1.12 ± 0.24
$h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$	$1.44^{+0.40}_{-0.33}$	1.00 ± 0.29
$h \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	$1.09^{+0.23}_{-0.21}$	0.83 ± 0.21
$h \rightarrow b\bar{b}$	$0.5^{+0.4}_{-0.4}$	0.84 ± 0.44
$h \rightarrow \tau\bar{\tau}$	$1.4^{+0.4}_{-0.4}$	0.91 ± 0.28



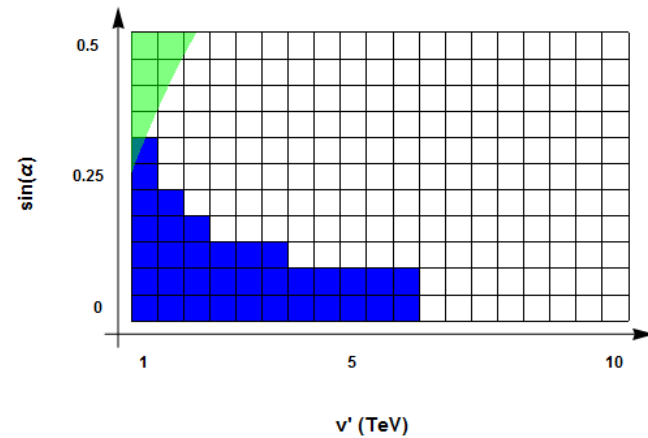
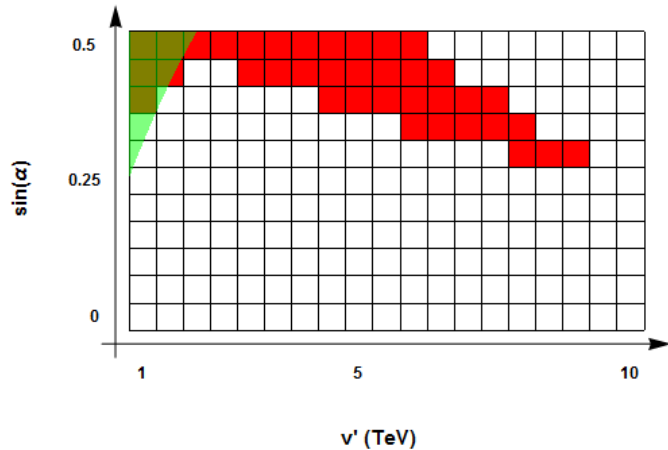
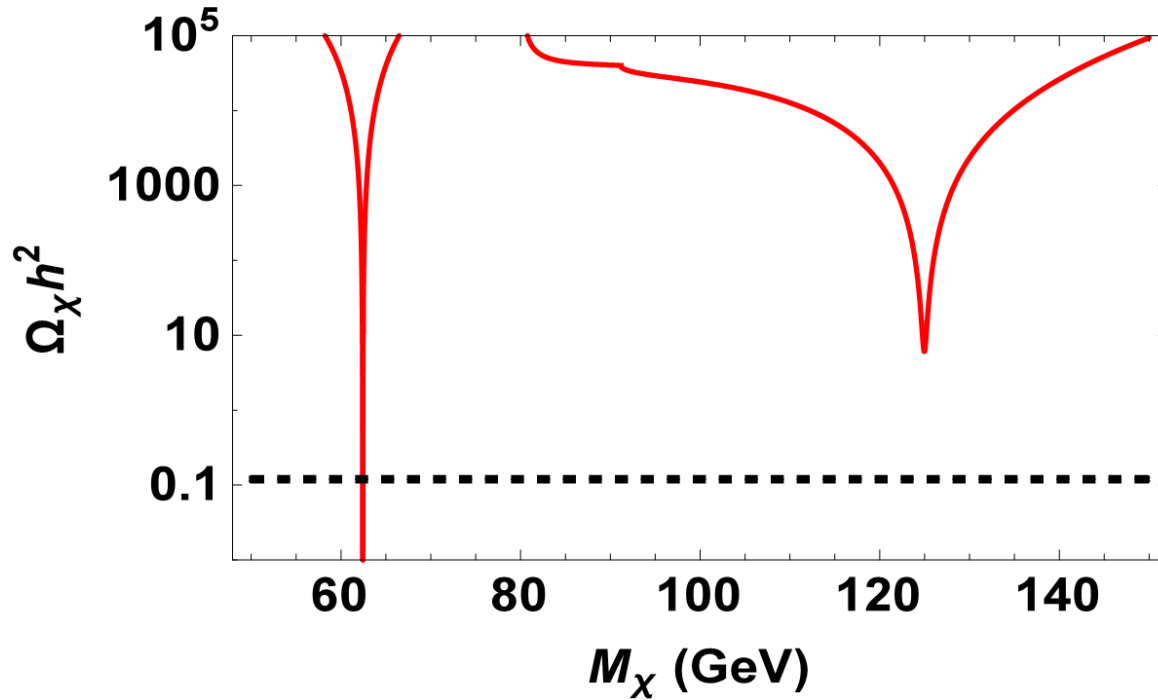
$$|\sin \alpha| \lesssim 0.3$$

LHC $pp \rightarrow \gamma/Z \rightarrow k^{++}k^{--} \rightarrow e^+e^+e^-e^-$ からの制限

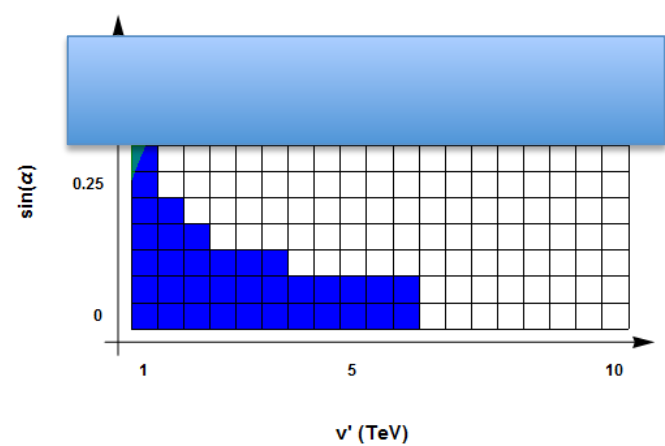
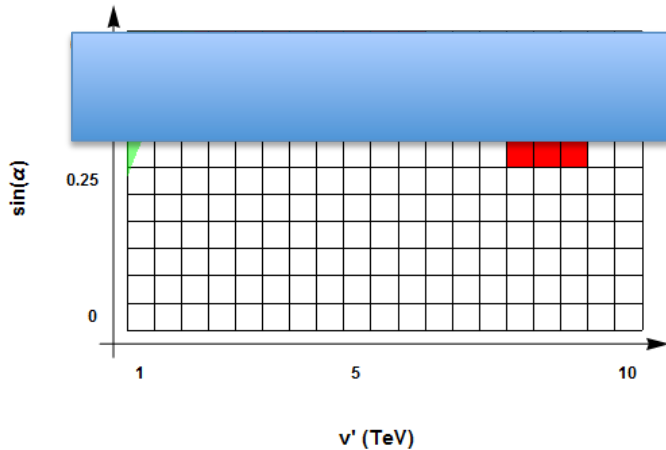
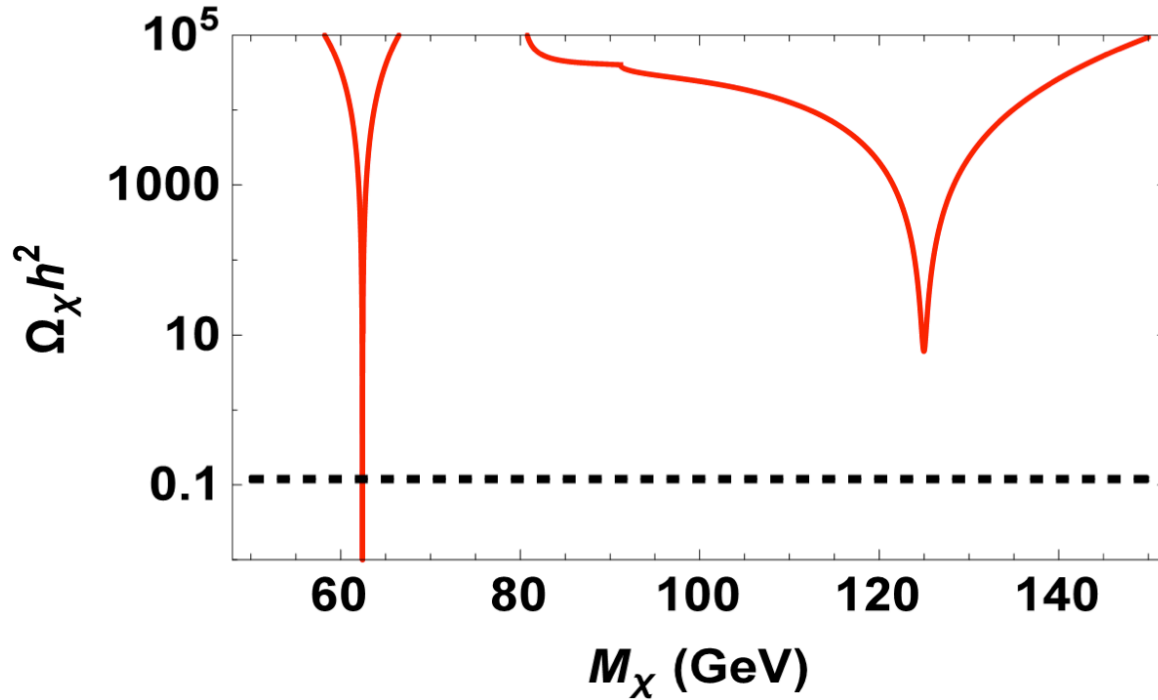
$$m_k > 320 \text{ GeV}$$

ダークマター

ダークマター



ダークマター



まとめ

- 3ループの新しい輻射シーソーモデルを提案した
- LFVの制限を満たせる
- 右巻きニュートリノがダークマターとなる