

# 2ループ輻射シーソーモデルにおける複数の暗黒物質の検証可能性

高野浩 金沢大学

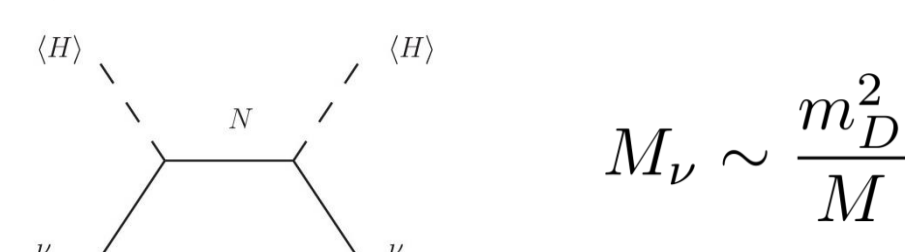
[arXiv:1308.\*\*\*\*]

共同研究者： 青木真由美, 久保治輔, 大川泰志 金沢大学

## 導入

### ニュートリノ質量

ツリーレベルのシーソー (タイプI)

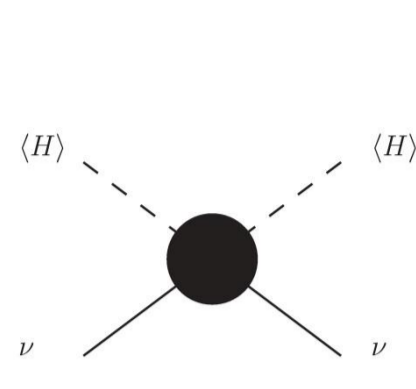


$$M_\nu \sim \frac{m_D^2}{M}$$

$$m_D = \mathcal{O}(1)\text{GeV} \Rightarrow M = \mathcal{O}(10^{10})\text{GeV}$$

輻射シーソー

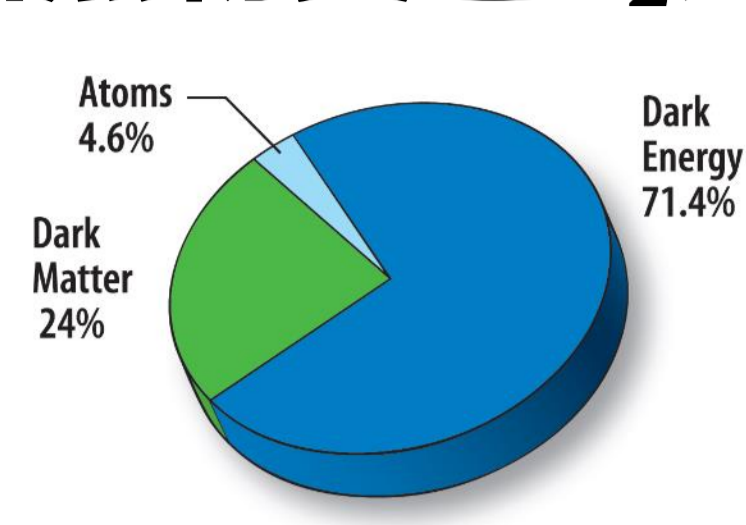
ループによる抑制→マイルドな階層性  
離散対称性の導入→暗黒物質



$$(M = \mathcal{O}(1)\text{TeV}, m_D = \mathcal{O}(1)\text{GeV})$$

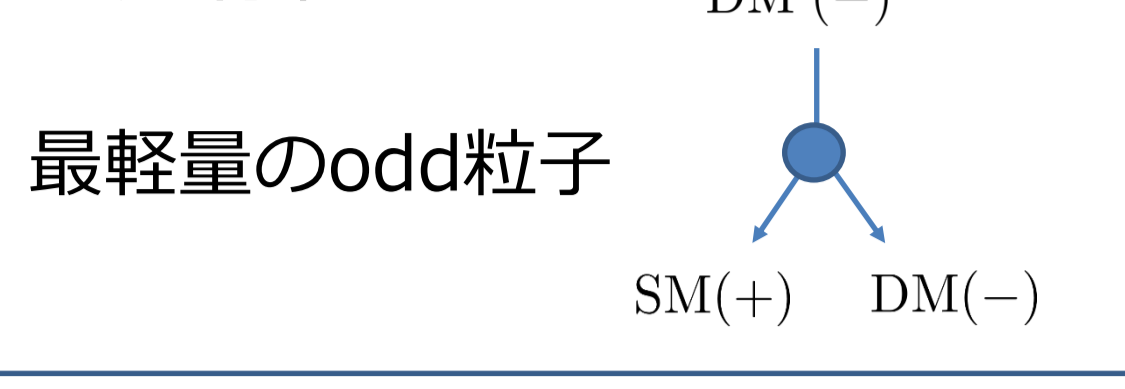
	1loop	2loop	3loop
$M_\nu$	$(\frac{\kappa}{16\pi^2}) \times \frac{m_D^2}{M}$	$(\frac{\kappa}{16\pi^2})^2 \times \frac{m_D^2}{M}$	$(\frac{\kappa}{16\pi^2})^3 \times \frac{m_D^2}{M}$
$\kappa$	$\mathcal{O}(10^{-5})$	$\mathcal{O}(10^{-1})$	$\mathcal{O}(1)$

### 暗黒物質とZ<sub>2</sub>対称性

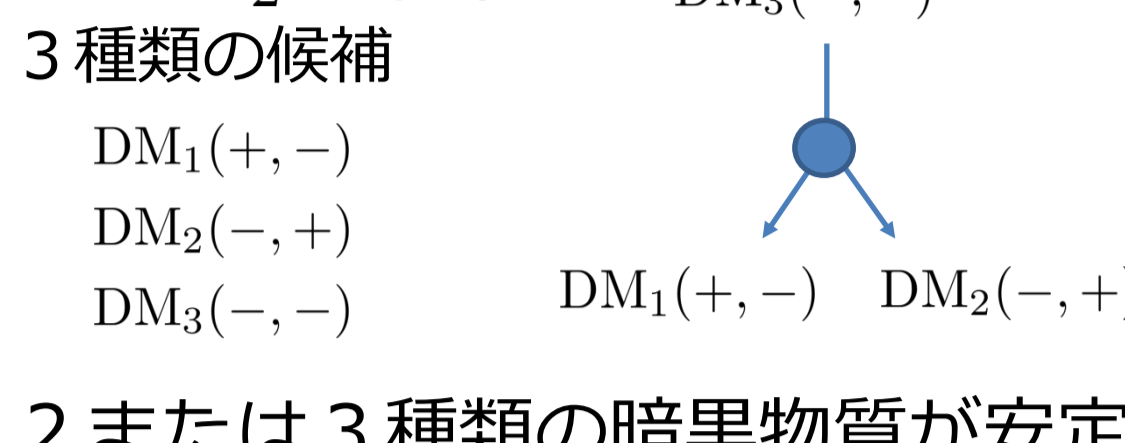


複数の離散対称性  
↓  
複数の暗黒物質

Z<sub>2</sub>対称性



Z<sub>2</sub> × Z'<sub>2</sub> 対称性



### 要旨

1 ループ輻射シーソー (Z<sub>2</sub>対称性)

小さい相互作用項 |λ<sub>5</sub>|

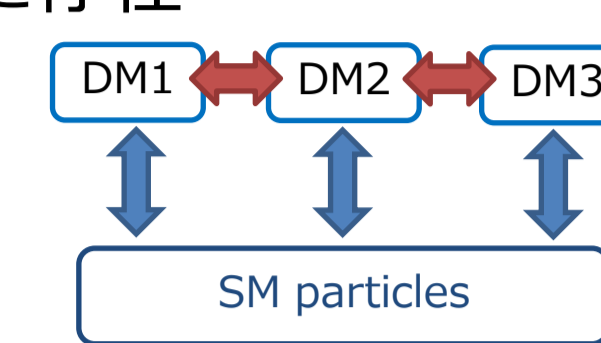
↓ Z<sub>2</sub>対称性の導入

2 ループ輻射シーソー (Z<sub>2</sub> × Z'<sub>2</sub> 対称性)

λ<sub>5</sub><sup>eff</sup> を1ループで説明

複数の暗黒物質が同時に存在

$$\Omega_{\text{obs}} h^2 = \sum_i \Omega_i h^2$$

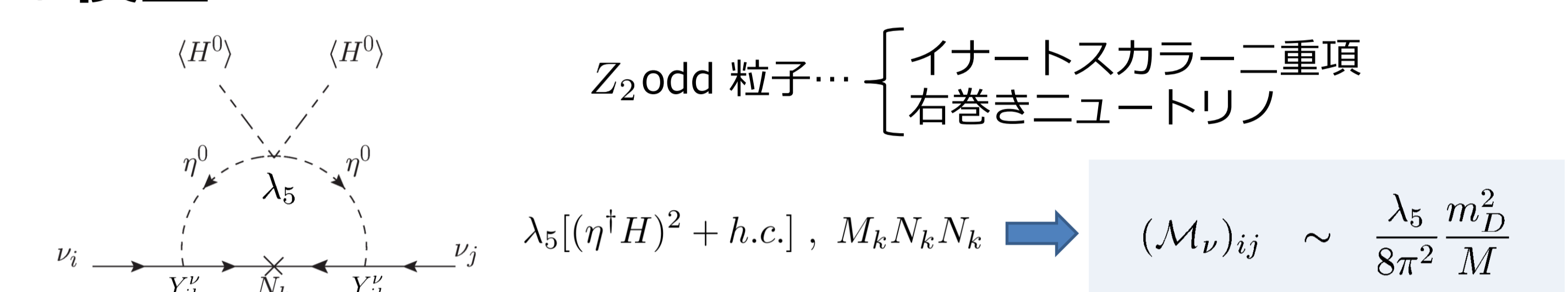


異なる暗黒物質同士の相互作用による効果と、その検出可能性を調べる

## 2ループ輻射シーソーモデル

### Ma模型

E.Ma, Phys. Rev. D73, 077301 (2006)



Z<sub>2</sub> odd 粒子... { イナートスカラー二重項  
右巻きニュートリノ

$$\lambda_5[(\eta^\dagger H)^2 + h.c.], M_k N_k N_k \Rightarrow (\mathcal{M}_\nu)_{ij} \sim \frac{\lambda_5 m_D^2}{8\pi^2 M}$$

右巻きニュートリノ N<sub>1</sub> が暗黒物質の場合 J.Kubo, et al. Phys.Lett. B642 (2006)

ニュートリノの湯川相互作用: Y<sub>ik</sub><sup>ν</sup> L<sub>i</sub> N<sub>k</sub> η

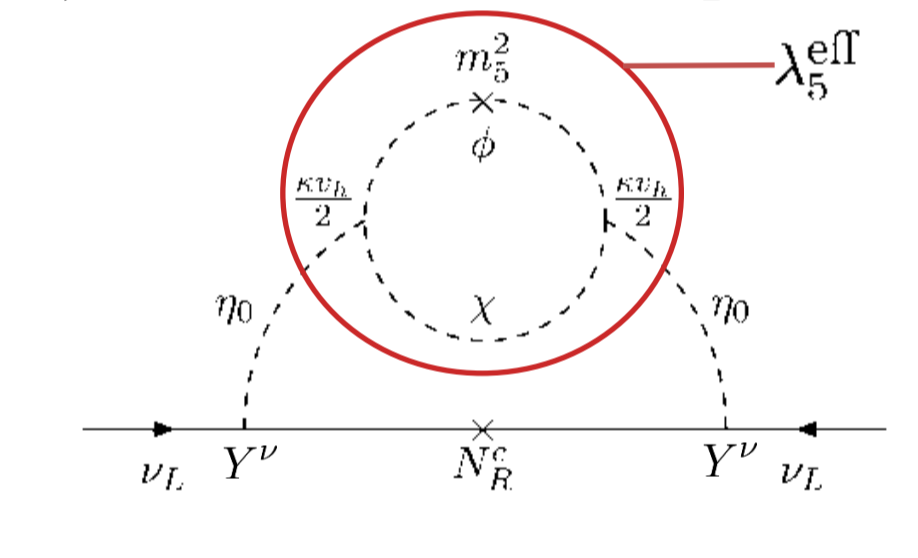
m<sub>η</sub><sup>0</sup>, M<sub>N</sub> = O(100)GeV のとき

$$\text{LFV からの制限 } Br(\mu \rightarrow e\gamma) \lesssim 2.4 \times 10^{-12} \Rightarrow |Y^\nu| \lesssim 10^{-2}$$
$$\text{暗黒物質残存量からの制限 } \Omega_{\text{DM}} h^2 \sim 0.11 \Rightarrow |Y^\nu| \sim 1$$

ニュートリノ質量 M<sub>ν</sub> ≲ O(10<sup>-1</sup>)eV ⇒ |λ<sub>5</sub>| ≲ 10<sup>-5</sup>

右巻きニュートリノが対消滅しにくい  
|λ<sub>5</sub>|が小さい  
ファインチューニングが必要

### 2ループへの拡張



field	SU(2) <sub>L</sub>	U(1) <sub>Y</sub>	L	Z <sub>2</sub>	Z' <sub>2</sub>
L = (ν <sub>L</sub> , l <sub>L</sub> )	2	-1/2	1	+	+
l <sub>R</sub> <sup>c</sup>	1	1	1	+	+
N <sub>R</sub> <sup>c</sup>	1	0	0	-	+
H = (H <sup>+</sup> , H <sup>0</sup> )	2	1/2	0	+	+
η = (η <sup>+</sup> , η <sup>0</sup> )	2	1/2	-1	-	+
χ	1	0	0	+	-
φ	1	0	1	-	-

Z<sub>2</sub> × Z'<sub>2</sub> × L 対称性 ⇒ λ<sub>5</sub>[(H<sup>+</sup>η)<sup>2</sup> + h.c.]

$$\mathcal{L} \text{ term: } \frac{1}{2} m_5^2 [\phi^2 + (\phi^*)^2] \Rightarrow \lambda_5^{\text{eff}} \sim -\frac{\kappa^2}{64\pi^2} \frac{m_5^2}{m_{\phi_R}^2 - m_\chi^2}$$

$$(\mathcal{M}_\nu)_{ij} \sim -\frac{\lambda_5^{\text{eff}}}{16\pi^2} \sum_k \frac{Y_{ik}^\nu Y_{jk}^\nu v_h^2}{M_k} \text{ for } m_\eta \simeq M_k$$
$$m_{\text{new}} = \mathcal{O}(100)\text{GeV}, m_5 = \mathcal{O}(10)\text{GeV}, \kappa = \mathcal{O}(10^{-1}), Y^\nu = \mathcal{O}(10^{-2})$$
$$\Rightarrow \lambda_5^{\text{eff}} = \mathcal{O}(10^{-5}), (\mathcal{M}_\nu)_{ij} = \mathcal{O}(0.1)\text{eV}$$

LFVからの制限を満たし、O(10<sup>-1</sup>) のスカラー相互作用でニュートリノ質量を説明

### 暗黒物質候補

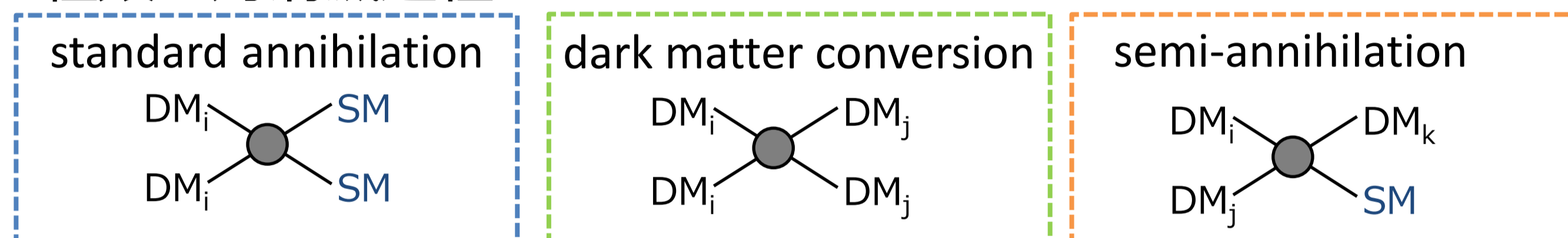
(Z<sub>2</sub>, Z'<sub>2</sub>) = (-, +) N<sub>R</sub><sup>c</sup> or η<sub>R,I</sub><sup>0</sup>  
(Z<sub>2</sub>, Z'<sub>2</sub>) = (+, -) χ  
(Z<sub>2</sub>, Z'<sub>2</sub>) = (-, -) φ<sub>R,I</sub>

イナートスカラー DM η<sub>R</sub><sup>0</sup>, χ M. Aoki, J Kubo, H. Takano Phys. Rev. D 87, 116001 (2013)

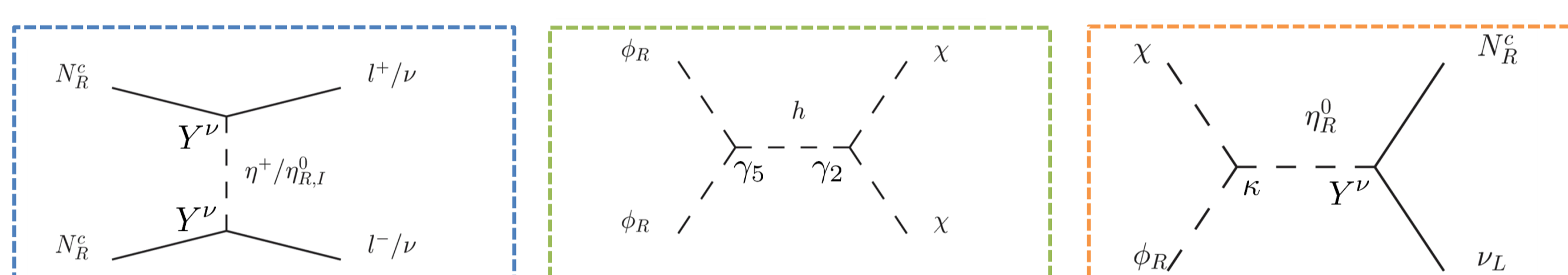
- Relic density
- h → γγ excess (LHC)
- 130 GeV γ ray line (Fermi LAT)

右巻きニュートリノ DM N<sub>R</sub><sup>c</sup>, φ<sub>R</sub>, χ  
N<sub>R</sub><sup>c</sup> の新しい対消滅過程

3種類の対消滅過程



M<sub>N</sub> > m<sub>φ<sub>R</sub></sub> > m<sub>χ</sub> のとき

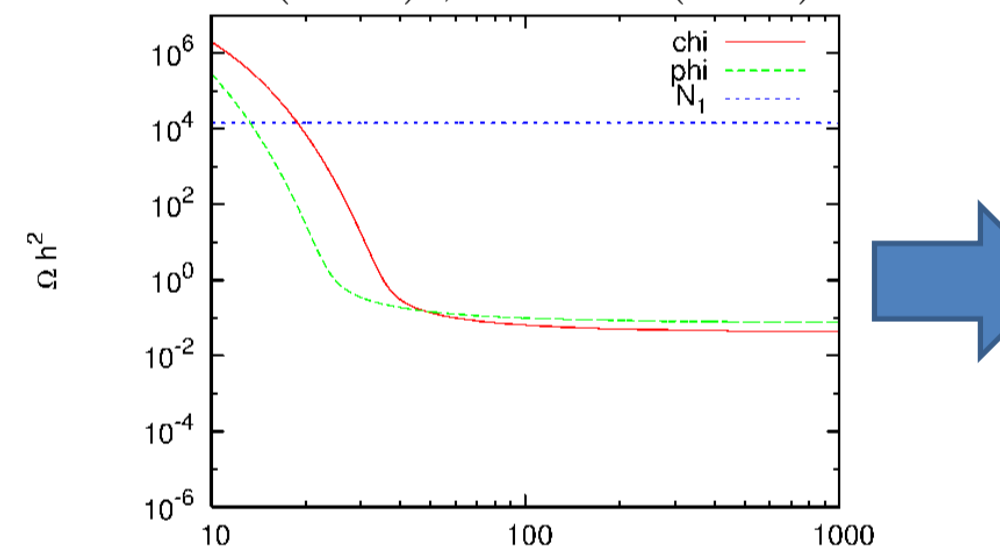


Y<sup>ν</sup>, κ ... LFV, ニュートリノ質量

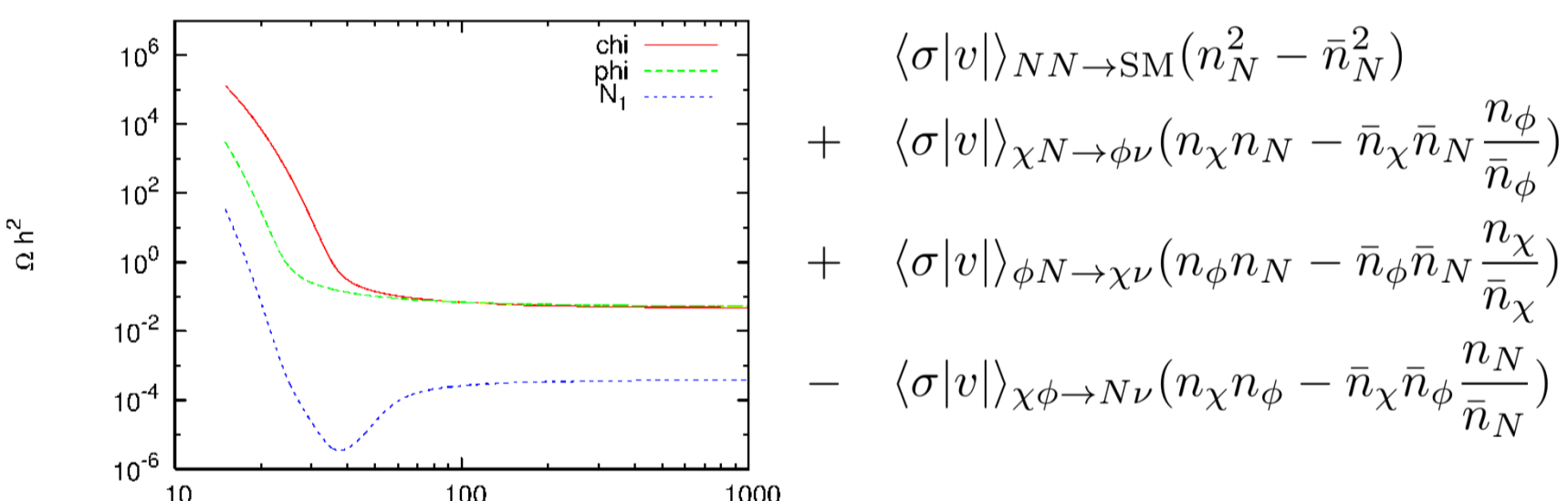
$$(\mathcal{M}_\nu)_{ij} = \mathcal{O}(0.1)\text{eV} \Rightarrow \kappa Y^\nu \sim \mathcal{O}(10^{-3})$$

スカラー相互作用 ... Z<sub>2</sub> × Z'<sub>2</sub> 対称性を破らない真空

standard annihilation のみの場合  
κ = O(10<sup>-1</sup>), Y<sup>ν</sup> = O(10<sup>-2</sup>)



全てのannihilationを取り入れた場合



Semi-annihilationの影響で右巻きニュートリノの残存量が大きく変化

## 数値解析

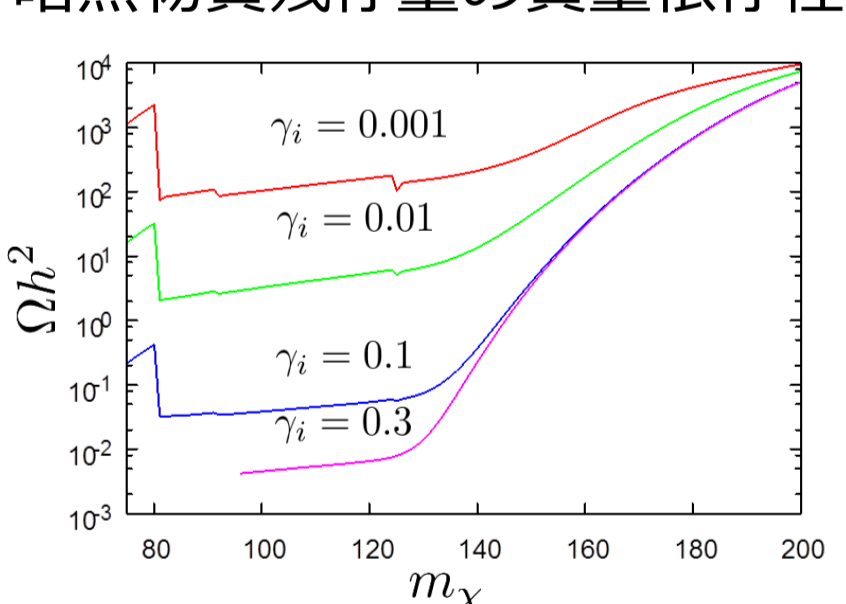
### 暗黒物質の残存量

ボルツマン方程式

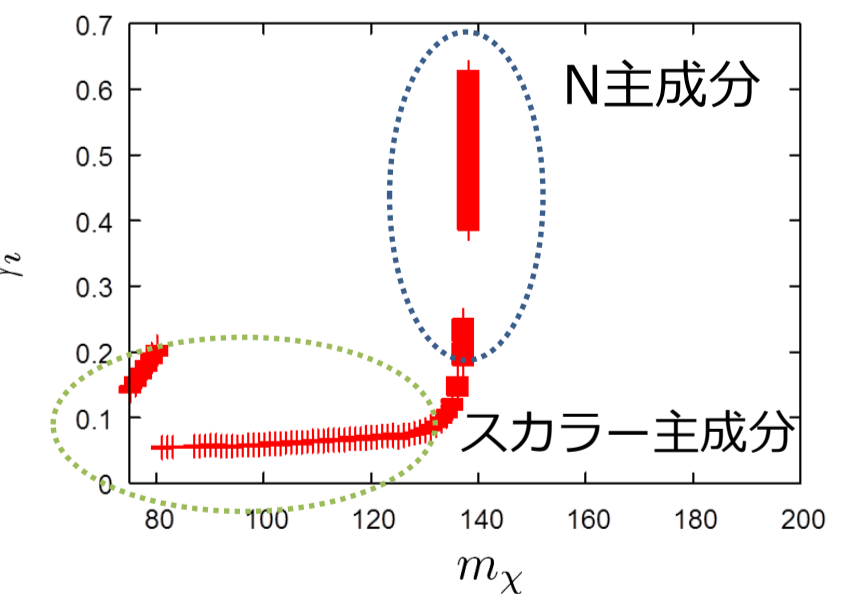
H: Hubble parameter  
n<sub>i</sub>: equilibrium number density

$$\dot{n}_i + 3Hn_i = -[\langle\sigma|v\rangle_{ii\rightarrow\text{SM}}(n_i^2 - \bar{n}_i^2) + \sum_{j,k} \langle\sigma|v\rangle_{i\rightarrow jk}(n_i^2 - \bar{n}_i^2 \frac{n_j^2}{\bar{n}_j^2}) + \sum_{j,k} \langle\sigma|v\rangle_{ij\rightarrow\text{kSM}}(n_i n_j - \bar{n}_i \bar{n}_j \frac{n_k}{\bar{n}_k}) - \sum_{j,k} \langle\sigma|v\rangle_{jk\rightarrow i\text{SM}}(n_j n_k - \bar{n}_j \bar{n}_k \frac{n_i}{\bar{n}_i})]$$

暗黒物質残存量の質量依存性



Ω<sub>DM</sub> h<sup>2</sup> ~ 0.1 となるパラメータ



計算に用いたパラメータ

κ = O(10<sup>-1</sup>), Y<sup>ν</sup> = O(10<sup>-2</sup>)  
γ<sub>2</sub> = γ<sub>5</sub> = γ<sub>7</sub> (簡単のため)

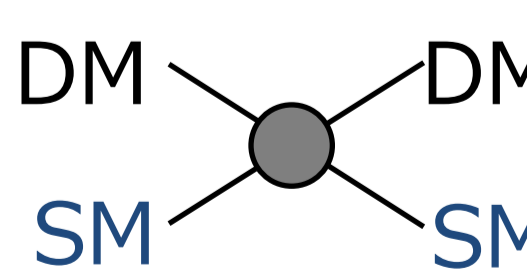
particle	mass[GeV]
N <sub>2,3</sub>	1000
η <sub>R</sub>	m <sub>χ</sub> + m <sub>φ<sub>R</sub></sub> - 10
N <sub>1</sub>	200
φ <sub>I</sub>	m <sub>φ<sub>R</sub></sub> + 10
φ <sub>R</sub>	m <sub>χ</sub> + 50
χ	75 to 200

m<sub>5</sub> = O(10)GeV

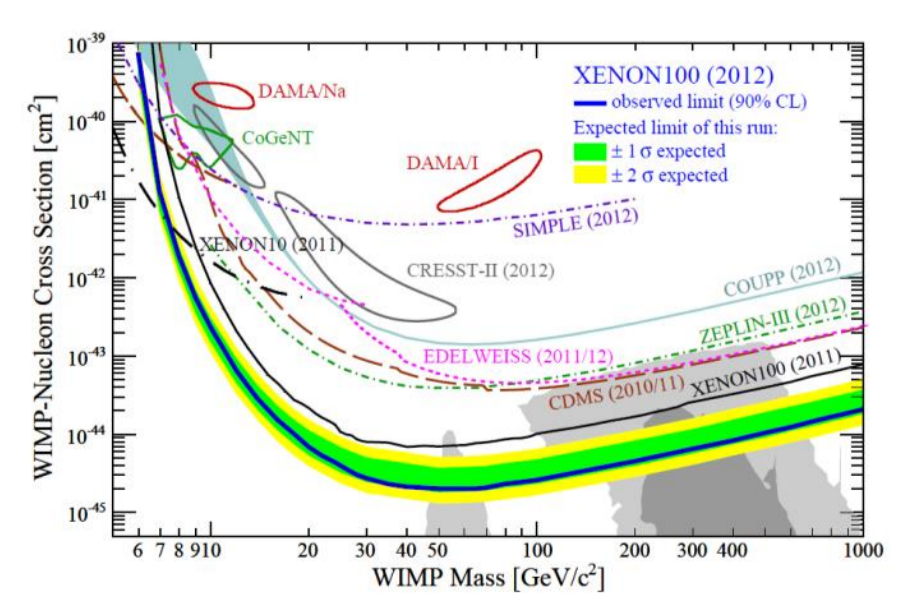
スカラーと右巻きニュートリノの質量差が大きい ⇒ 右巻きニュートリノ生成過程が抑制され残存量が小さくなる

### 直接検出実験

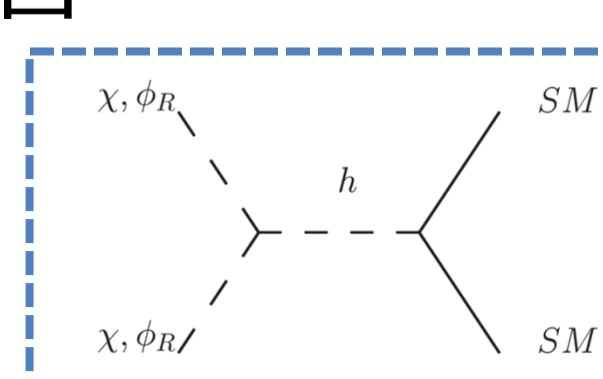
暗黒物質が1種類の場合  
散乱イベント数 ∝ σ<sub>DM</sub> n<sub>DM</sub>



断面積 σ<sub>DM</sub> への制限

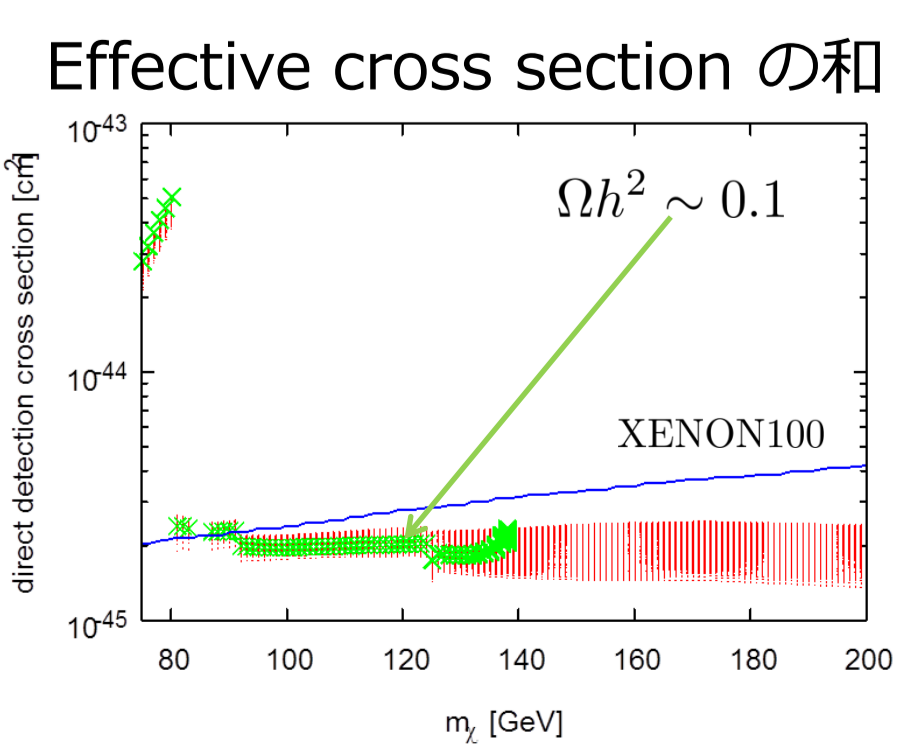


暗黒物質が複数種類の場合  
散乱イベント数 ∝ ∑ σ<sub>i</sub> n<sub>i</sub>



Effective cross section

$$\sigma_i \times \left(\frac{\Omega_i h^2}{0.11}\right)$$



スカラー暗黒物質の相互作用が大きいても、残存量が小さければ実験と矛盾しない

### 間接検出実験

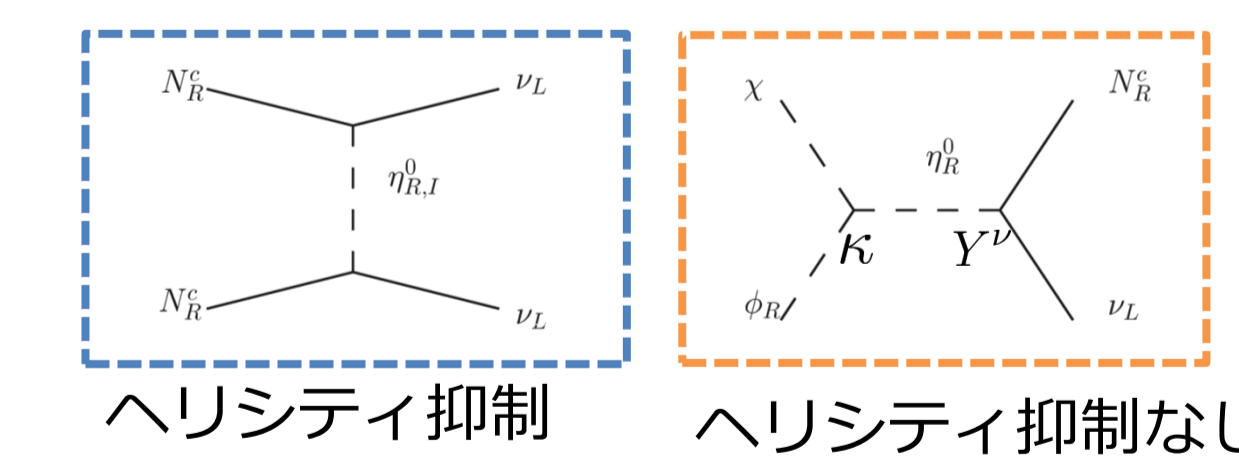
DMの対消滅によるニュートリノ生成

太陽中にある暗黒物質の粒子数 N<sub>i</sub>

$$\dot{N}_i = C_i - C_A(ii \leftrightarrow \text{SM})N_i^2 - C_A(ii \leftrightarrow jj)N_i^2 - C_A(ij \leftrightarrow k\text{SM})N_i N_j$$



単色エネルギーをもつニュートリノの生成過程



IceCubeでの検出イベント数

$$\Gamma_{\text{detect}} = AP(E_\nu)\Gamma_{\text{inc}}$$

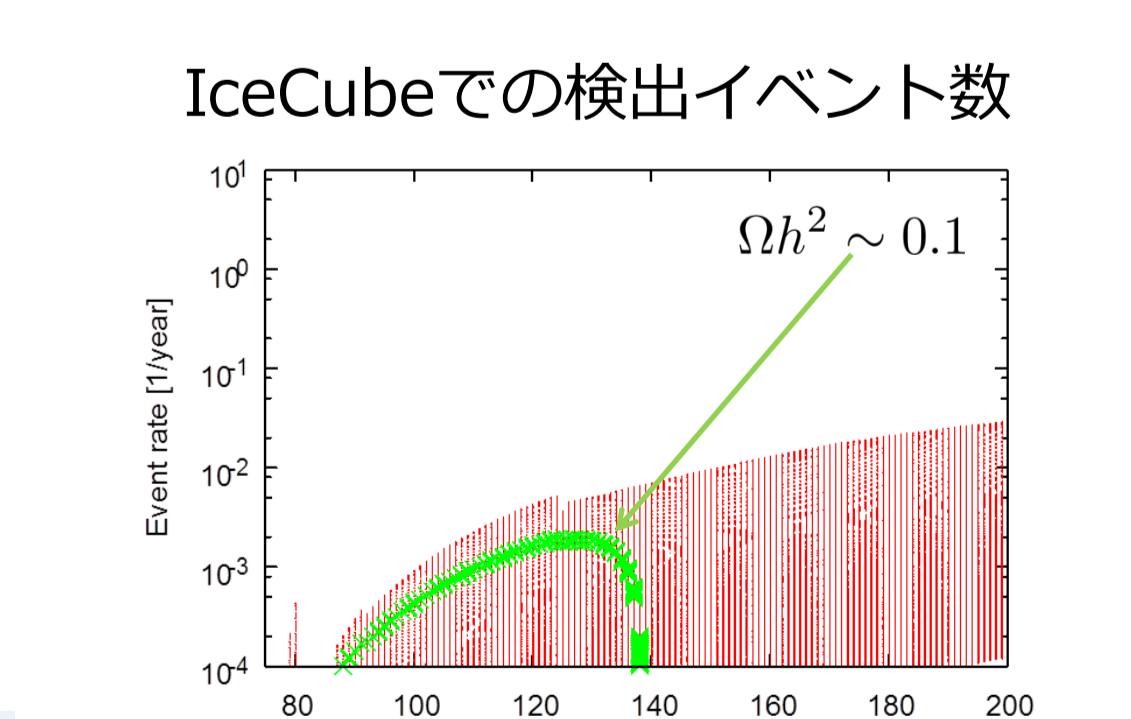
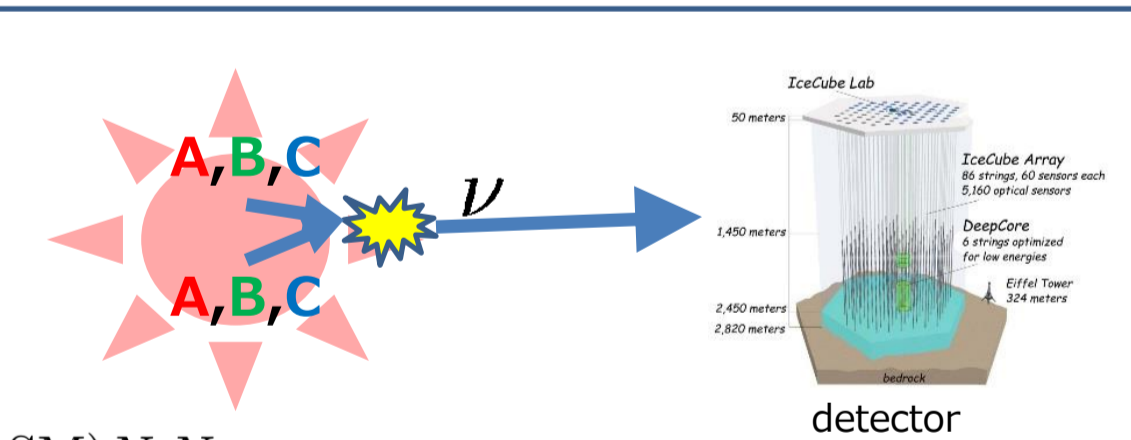
Detector area A ≈ 1km<sup>2</sup>  
Detection probability P(E<sub>ν</sub>) ≈ 2.0(1.0) × 10<sup>-11</sup> (E<sub>ν</sub>/GeV)<sup>2.2</sup>  
Incoming flux Γ<sub>inc</sub> = 1/4πr<sub>0</sub><sup>2</sup> (L ≈ 1km)

バックグラウンド: O(10) [1/year] (IceCube 2013)

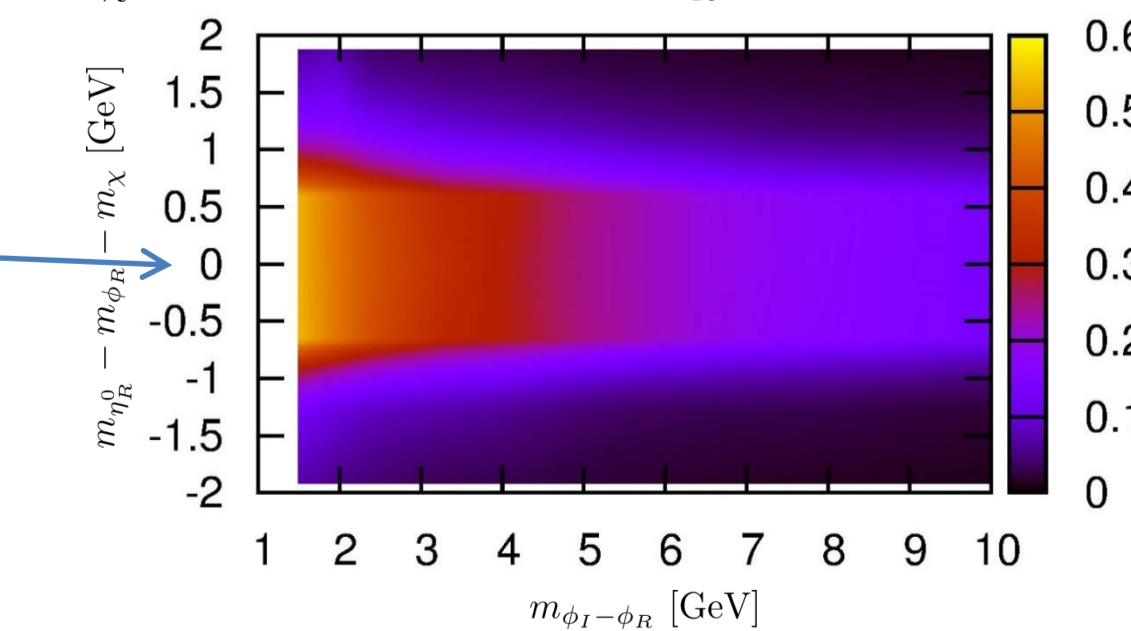
σv(χφ<sub>R</sub> → N<sub>R</sub><sup>c</sup>ν) が大きくなる条件

- small m<sub>5</sub> ⇒ large |κY<sup>ν</sup>|
- η<sub>R</sub><sup>0</sup> の共鳴

O(10) [1/year] のバックグラウンドに対し  
≲ O(1) [1/year] のシグナル



m<sub>χ</sub> = 100GeV で、m<sub>5</sub>, m<sub>η<sub>R</sub><sup>0</sup></sub> を動かした結果



### まとめ

Ma模型を拡張した2ループ輻射シーソーモデル

- Z<sub>2</sub> × Z'<sub>2</sub> 対称性 → 複数の暗黒物質
- semi-annihilationが右巻きニュートリノの残存量に大きく影響
- Ma模型で必要とされるファインチューニングが緩和される

直接検出

- 散乱イベント数は暗黒物質ごとの和
- 相互作用が大きいても残存量が少ないと実験と矛盾しない

間接検出

- semi-annihilationによる単色ニュートリノ生成
- η<sub>R</sub><sup>0</sup> の共鳴で増幅するが、実験のバックグラウンドに比べて1桁程度小さい