

TeVスケールでの $U(1)_{B-L}$ 対称性の  
破れによりニュートリノ質量を説明する  
輻射シーソー模型とその加速器現象

鍋島 偉宏  
富山大学

S. Kanemura, T.N., H. Sugiyama, Phys. Lett. B703:66–70

S. Kanemura, T.N., H. Sugiyama, Phys. Rev. D85, 033004

基研研究会素粒子物理学の進展2012 2012年7月18日

# 1.Introduction

標準模型では説明できない  
いくつかの現象が知られている。

## 1. ニュートリノ振動

Particle Data Group (2012)

–  $\Delta m_{21}^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ,  $\Delta m_{32}^2 \approx 2.32 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

## 2. 暗黒物質

–  $\Omega h^2 \approx 0.11$

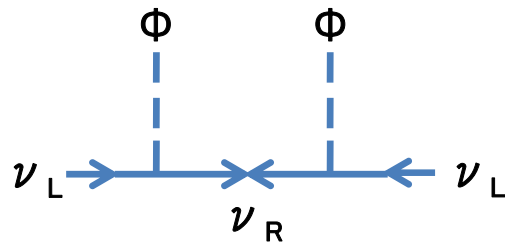
## 3. 宇宙のバリオン数非対称

–  $n_B \approx 2.54 \times 10^{-7} \text{cm}^{-3}$

特に、ニュートリノ振動と暗黒物質は  
TeVスケールでの輻射シーソー模型  
を考えると自然に説明できる！

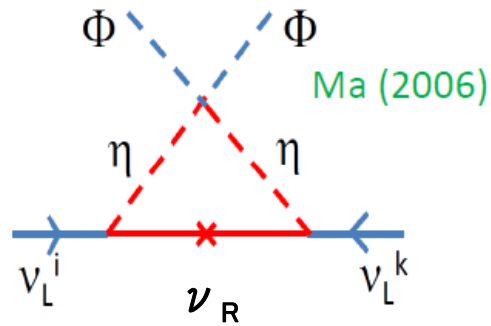
# 1. Introduction

## Neutrino masses



$$M \sim O(1) \text{ TeV}$$

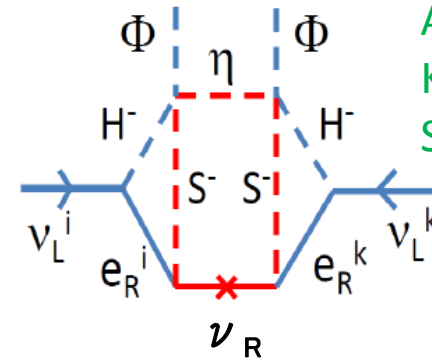
$$\rightarrow c \sim O(10^{-6})$$



Ma (2006)

$$M \sim O(1) \text{ TeV}$$

$$\rightarrow c \sim O(10^{-4})$$



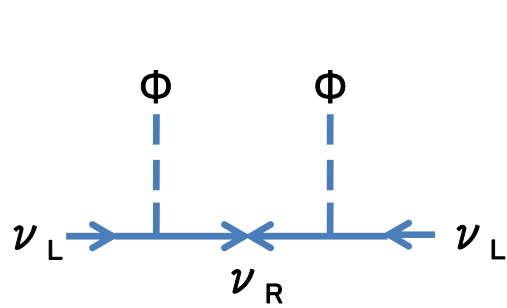
Aoki,  
Kanemura,  
Seto (2008)

$$M \sim O(1) \text{ TeV}$$

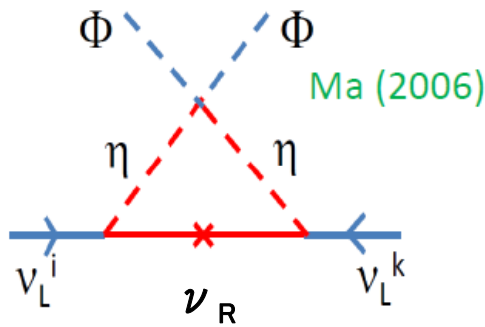
$$\rightarrow c \sim O(1)$$

# 1.Introduction

## Neutrino masses

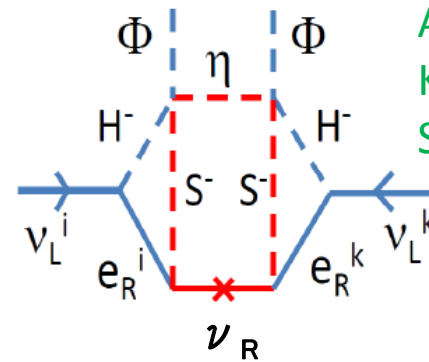


$M \sim O(1) \text{ TeV}$   
 $\rightarrow c \sim O(10^{-6})$



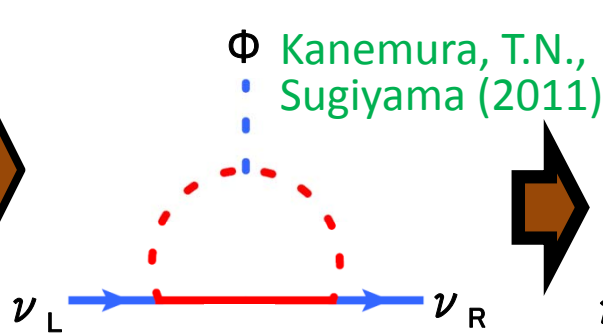
Ma (2006)

$M \sim O(1) \text{ TeV}$   
 $\rightarrow c \sim O(10^{-4})$

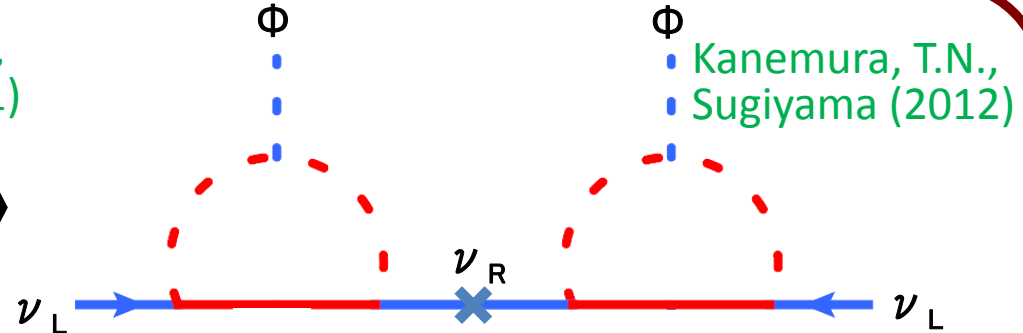


Aoki,  
 Kanemura,  
 Seto (2008)

$M \sim O(1) \text{ TeV}$   
 $\rightarrow c \sim O(1)$



Kanemura, T.N.,  
 Sugiyama (2011)



Kanemura, T.N.,  
 Sugiyama (2012)

$M \sim O(1) \text{ TeV}$   
 $\rightarrow c \sim O(10^{-2}-10^{-1})$      $\nu_R$  are not stable.

このような場合を考える。

# 1.Introduction

## WIMP dark matter

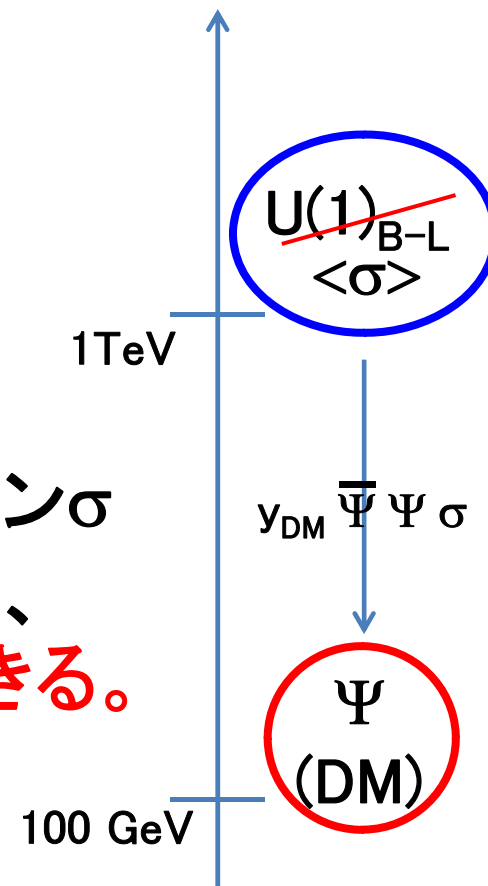
- WIMP暗黒物質の質量:

$$M_{\text{DM}} \sim O(100-1000)\text{GeV}$$



何が $M_{\text{DM}}$ の由来？

例えば $U(1)_{\text{B-L}}$ ゲージ対称性がスカラーボソン $\sigma$ の $O(1-10)\text{TeV}$ の真空期待値で破れる場合、 $M_{\text{DM}}$ は湯川結合 $y_{\text{DM}} \bar{\Psi} \Psi \sigma$ を通じて説明できる。



# 1.Introduction

## WIMP dark matter

- WIMP暗黒物質の質量:

$$M_{\text{DM}} \sim O(100-1000)\text{GeV}$$

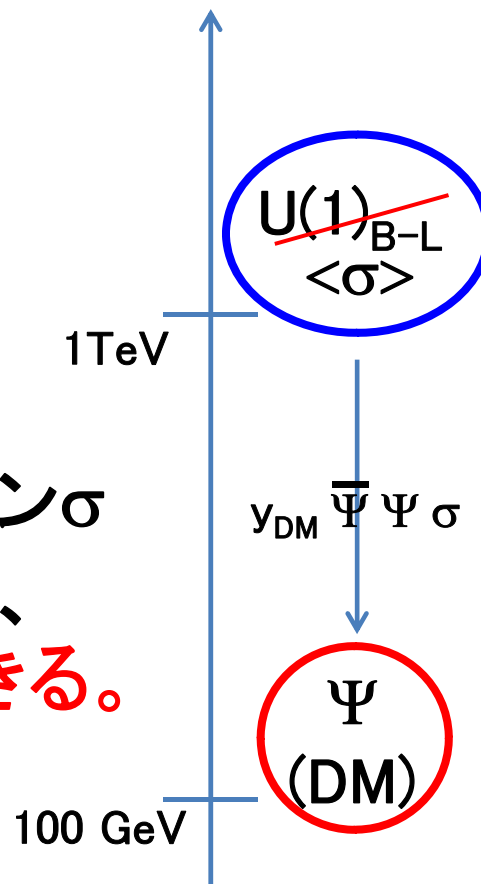


何が $M_{\text{DM}}$ の由来？

例えば $U(1)_{\text{B-L}}$ ゲージ対称性がスカラーボソン $\sigma$ の $O(1-10)\text{TeV}$ の真空期待値で破れる場合、 $M_{\text{DM}}$ は湯川結合 $y_{\text{DM}} \bar{\Psi} \Psi \sigma$ を通じて説明できる。



暗黒物質とニュートリノの質量はTeVスケールで破れる $U(1)_{\text{B-L}}$ ゲージ対称性を導入すると自然に説明可能！



# 2. Model

•  $SU(3)_C \times SU(2)_I \times U(1)_Y \times U(1)_{B-L}$

	$s$	$\eta$	$(\Psi_R)_i$	$(\Psi_L)_i$	$(\nu_R)_i$	$\sigma$
$SU(2)_I$	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
$U(1)_Y$	0	1/2	0	0	0	0
$U(1)_{B-L}$	1/2	1/2	-1/2	3/2	1	2

• New matter particle:

- B-L Higgs scalar  $\sigma$

- Right handed neutrinos  $\nu_R^{1,2}$

-  $SU(2)_I$  singlet scalar  $s$

-  $SU(2)_I$  doublet scalar  $\eta$

- Chiral fermion  $\Psi_{R,L}^{1,2}$



Half unit of  
 $U(1)_{B-L}$  charge  
 $\rightarrow U(1)_{DM}$

$U(1)_{B-L}$  protect: Tree-level  $L\phi_{SM}\nu_R$   
Majorana mass of  $\nu_R$   
Dirac mass of  $\Psi$

## 2.Model

### $U(1)_{B-L}$ symmetry breaking

▪  $\nu_R, \Psi_R$  and  $\Psi_L$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = - (y_R)_i (\nu_R)_i^c (\nu_R)_i (\sigma^0)^* - (y_\Psi)_i \overline{(\Psi_R)_i} (\Psi_L)_i (\sigma^0)^*$$

$$\rightarrow \frac{(M_R)_{ii}}{2} = (y_R)_{ii} \frac{v_\sigma}{\sqrt{2}}, \quad (M_\Psi)_{ii} = (y_\Psi)_{ii} \frac{v_\sigma}{\sqrt{2}} \quad \leftarrow \text{tree level}$$

### Electroweak symmetry breaking

▪  $\phi, \sigma, s$  and  $\eta \rightarrow$  Physical state:  $h, H, S1, S2, \eta^\pm$

$$\begin{pmatrix} h^0 \\ H^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_r^0 \\ \sigma_r^0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} s_1^0 \\ s_2^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta^0 \\ s^0 \end{pmatrix}$$

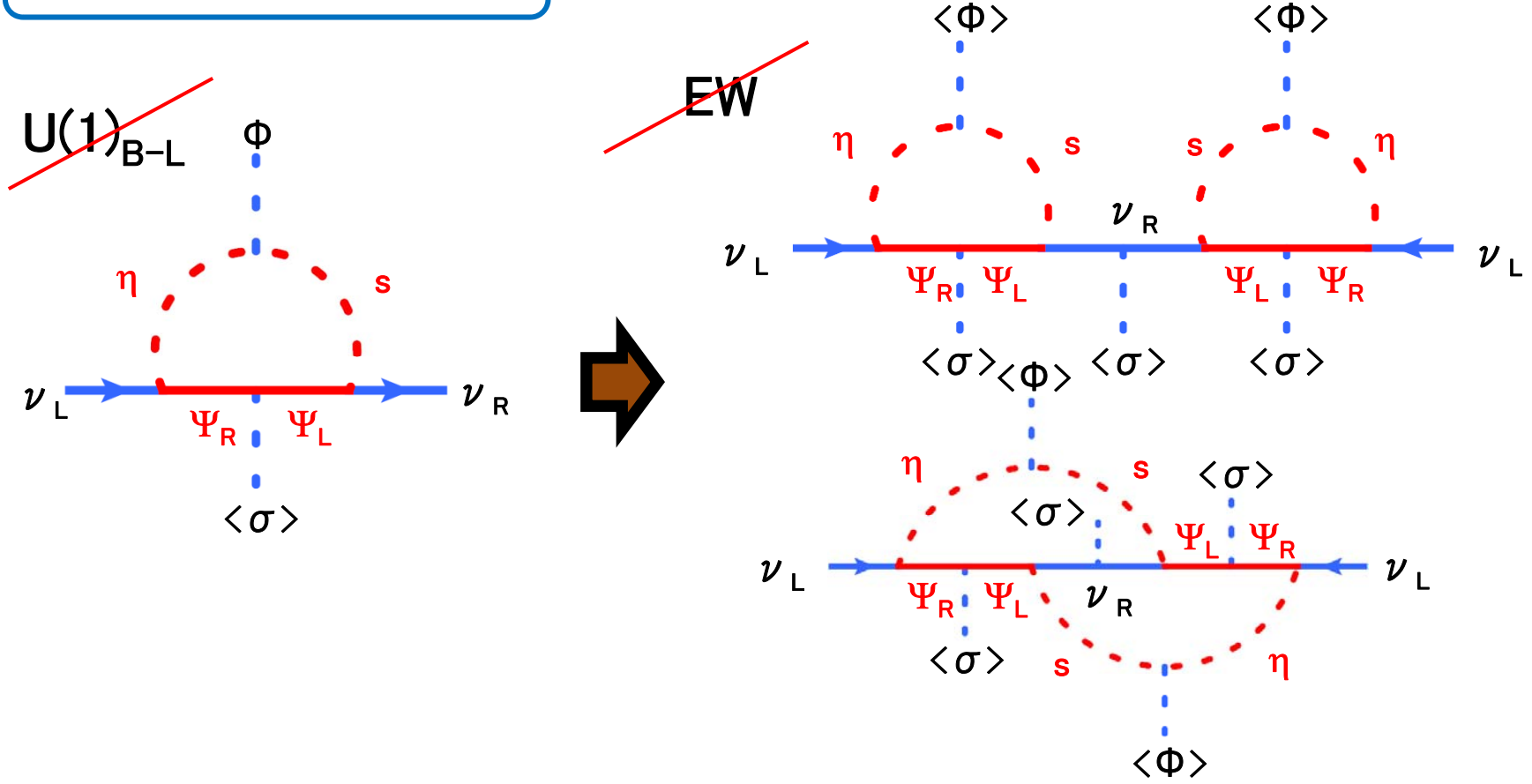
グローバル  $U(1)_{DM}$  は  $U(1)_{B-L}$  ゲージ対称性が破れた後も残る。  
 $\Psi_1$  が最も軽い  $U(1)_{DM}$  粒子であると仮定。

$U(1)_{B-L}$  : ニュートリノの質量  
暗黒物質の質量  
暗黒物質の安定性



# 2.Model

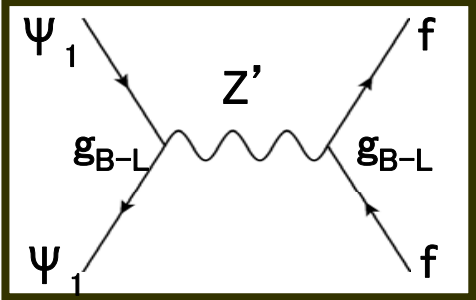
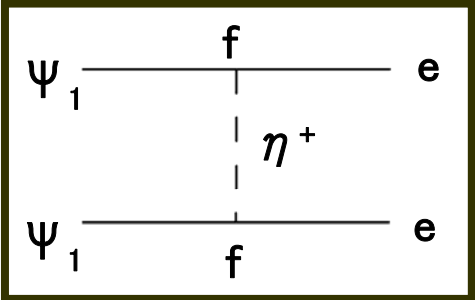
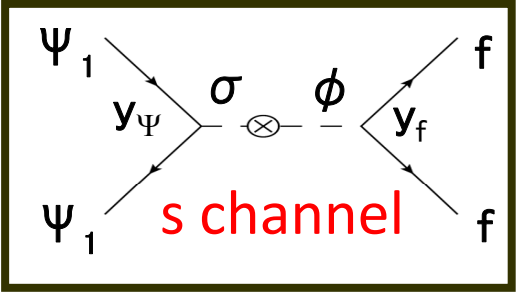
## Neutrino masses



**O(0.1) eV程度の微小なニュートリノ質量をTeVスケールの新粒子、O(0.01-0.1)の結合定数を用いて自然に説明可能!**

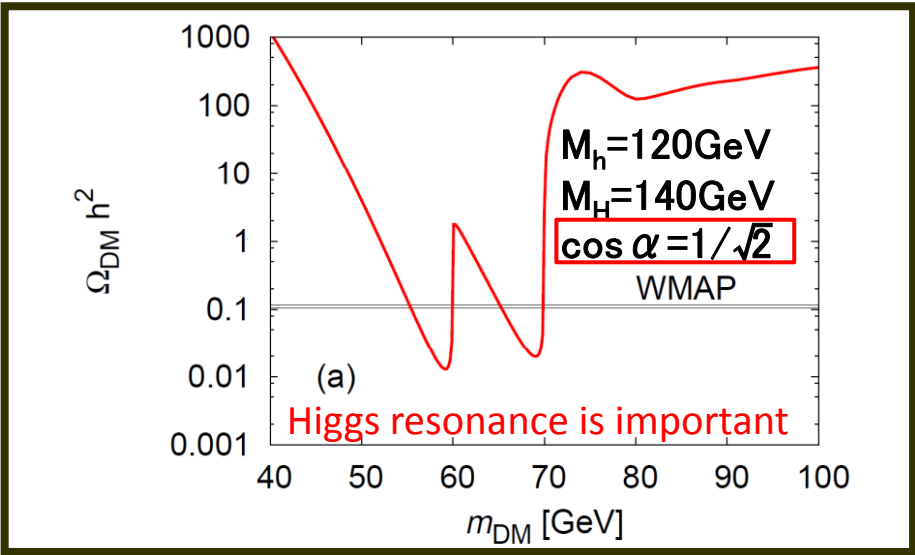
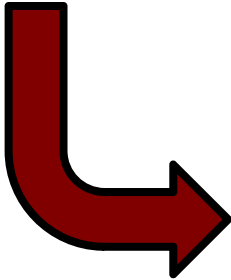
# 2.Model

## Abundance of $\Psi_1$



constraint by  $\mu \rightarrow e\gamma$

$Z'$  is heavy

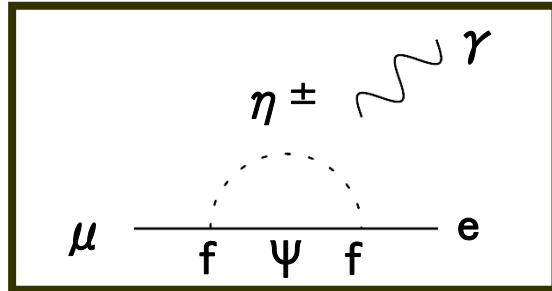


Okada and Seto (2010)  
 Kanemura, Seto and Shimomura (2011)

**$\sigma$ と $\phi$ は最大限に混合する必要がある！**

## 2.Model

### LFV constraint



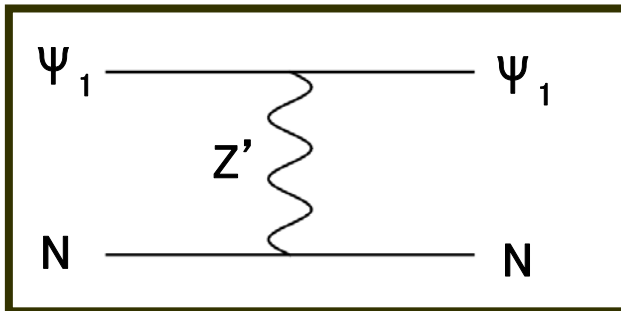
$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha_{\text{em}}}{64\pi G_F^2} \left| \frac{1}{M_{\eta^\pm}^2} f_{\mu i} F_2 \left( \frac{(M_\Psi)_i^2}{M_{\eta^\pm}^2} \right) (f^\dagger)_{ie} \right|^2,$$

$$F_2(a) \equiv \frac{1 - 6a + 3a^2 + 2a^3 - 6a^2 \ln(a)}{6(1-a)^4}.$$

Experimental bound(MEG):  $BR(\mu \rightarrow e, \gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$

J. Adam et al.(2011)

### Direct detection of $\Psi^1$

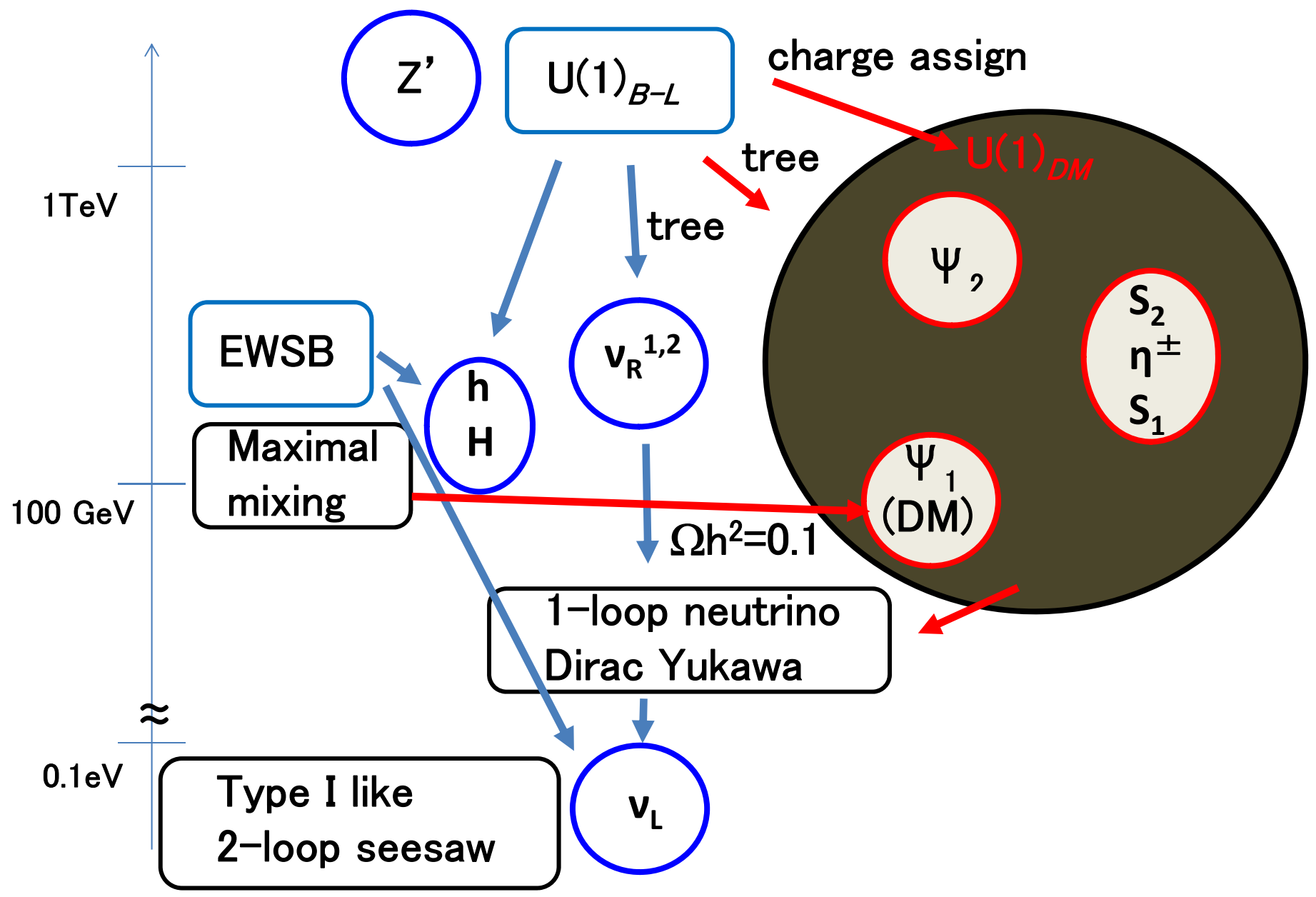


$$\sigma(\Psi_1 N \rightarrow \Psi_1 N) \simeq \left( \frac{g_{B-L}}{m_{Z'}} \right)^4 \frac{m_{\Psi_1}^2 m_N^2}{4\pi(m_{\Psi_1} + m_N)^2}.$$

Experimental bound(XENON100):  $\sigma(\Psi_1 N \rightarrow \Psi_1 N) < 8 \times 10^{-45} \text{cm}^2$

E. Aprile et al. (2011)

現在までの実験と無矛盾。



# 2.Model

## Parameter set

- neutrino oscillation
- LFV
- LEP
- DM abundance
- DM direct detection

Normal Hierarchy, Tri-bi maximal  
 (この値は  $\theta_{13}$  に大きく依存しない)

$$f_{ij} = \begin{pmatrix} 0.0757 & 0.0445 \\ 0.01 & -0.0123 \\ -0.141 & -0.0723 \end{pmatrix} \quad h_{ij} = \begin{pmatrix} -0.131 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$M_R = 250 \text{ GeV}, \quad M_{\psi_1} = 57.0 \text{ GeV}, \quad M_{\psi_2} = 800 \text{ GeV}$$

$$M_{S_1} = 200 \text{ GeV}, \quad M_{S_2} = 300 \text{ GeV},$$

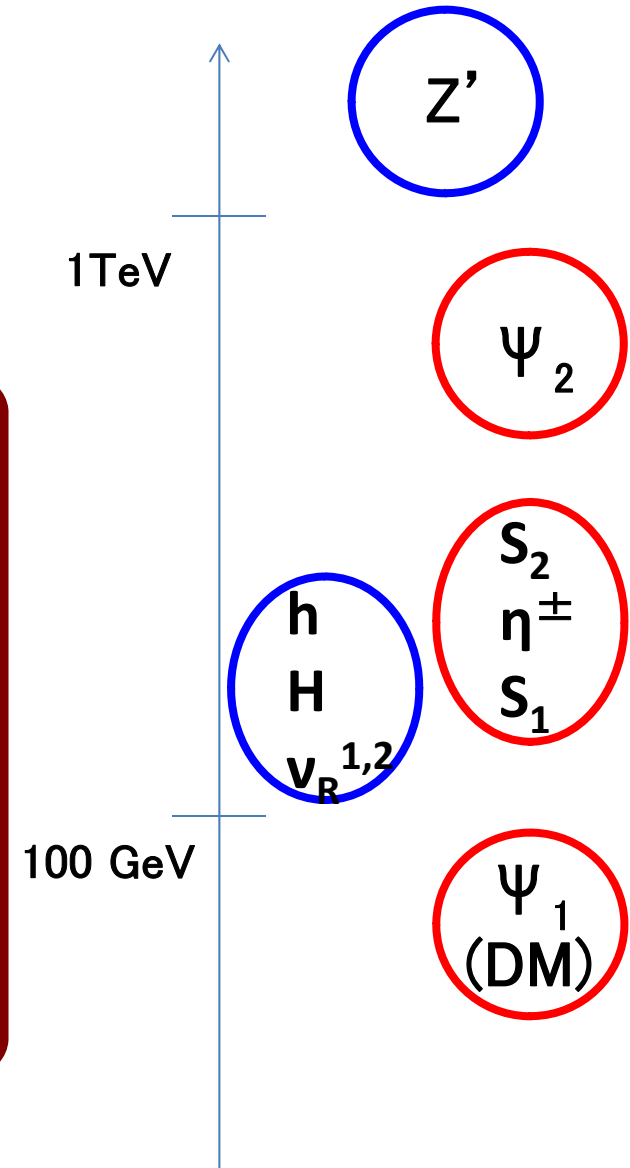
$$M_h = 120 \text{ GeV}, \quad M_H = 140 \text{ GeV},$$

$$M_{\eta^\pm} = 280 \text{ GeV}, \quad \cos \theta = 0.05, \quad \cos \alpha = 1/\sqrt{2},$$

$$g_{B-L} = 0.2, \quad M_{Z'} = 2000 \text{ GeV}, \quad v_\phi = 246 \text{ GeV}, \quad v_\sigma = 5 \text{ TeV}$$

全ての結合定数は  $O(0.01-0.1)$ 、

全ての新粒子の質量は  $O(100-1000) \text{ GeV}$  !



# 3. Physics at the LHC

## Physics of $Z'$

$Z'$  mass:  $O(1-10)\text{TeV}$

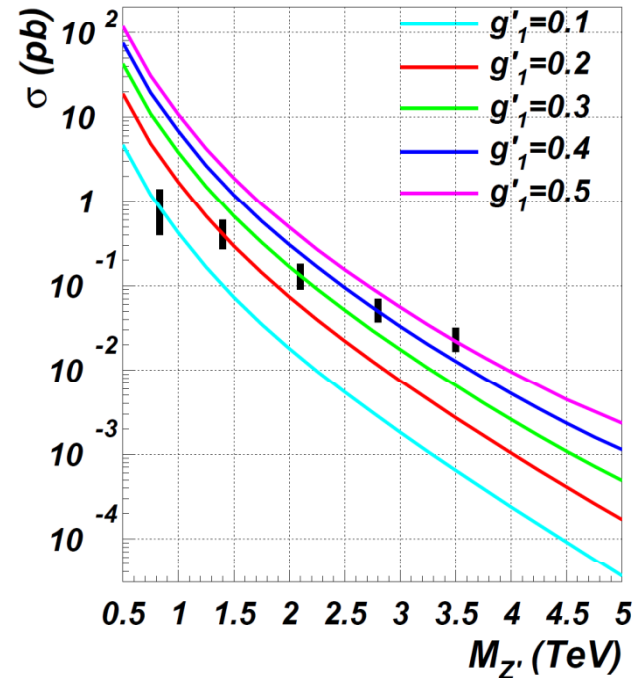
$\Gamma(Z' \rightarrow XX) \propto (\text{B-L charge})^2$

$Z'$  はおおよそ

30% invisibleに崩壊。

$Z'$  の生成断面積は  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$  の  
LHCで  $M_{Z'} = 2000 \text{ GeV}$ 、 $g_{B-L} = 0.2$   
の時に およそ 70 fb

$Z'$  の崩壊分岐比を測定すること  
により  $(1-10)\text{TeV}$  で破れる B-L 対  
称性があることが分かる！

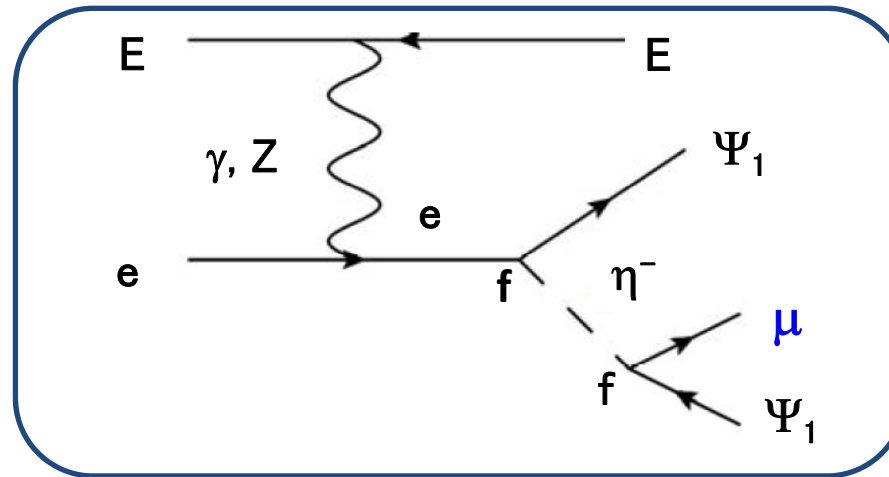


L. Basso, A. Belyaev, S. Moretti and  
C. H. Shepherd-Themistocleous (2009);  
L. Basso (2011)

$Z'$  だけではこの模型を特定することはできない。

# 4. Physics at the ILC

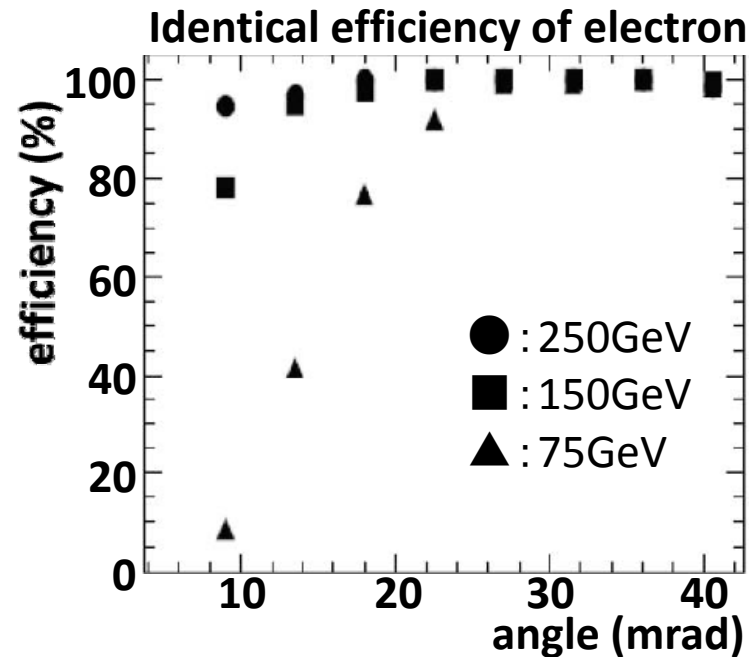
## Physics of $\Psi_1$



1. 暗黒物質は  $L\psi\eta$  結合を通じて電子と直接結合する。
2. シグナルは終状態にでるレプトンの世代が異なるため、**暗黒物質が直接レプトンと結合していることを示唆する。**
3. バックグラウンドは全ての  $e, E \rightarrow e, \mu + \text{missing}$  プロセス。

# 4. Physics at the ILC

## Electron efficiency



I.Bozovic-Jelisavcic [on behalf of the FCAL Collaboration], (2011)

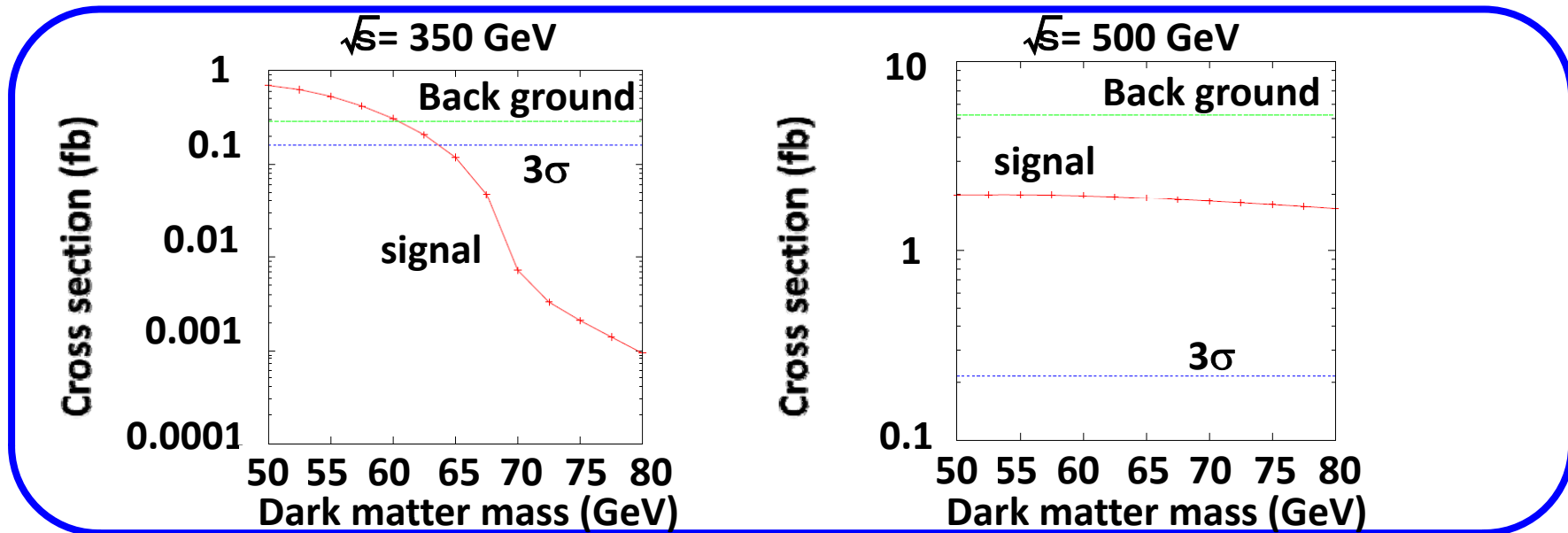
シグナルプロセスは終状態の電子が前方に現れる傾向にある。  
→検出器の前方検出能力が重要！

電子の検出角として $\sqrt{s}=350$  GeV, 500 GeVそれぞれに対して  
30 mrad, 20 mrad 以上を考える。



# 4. Physics at the ILC

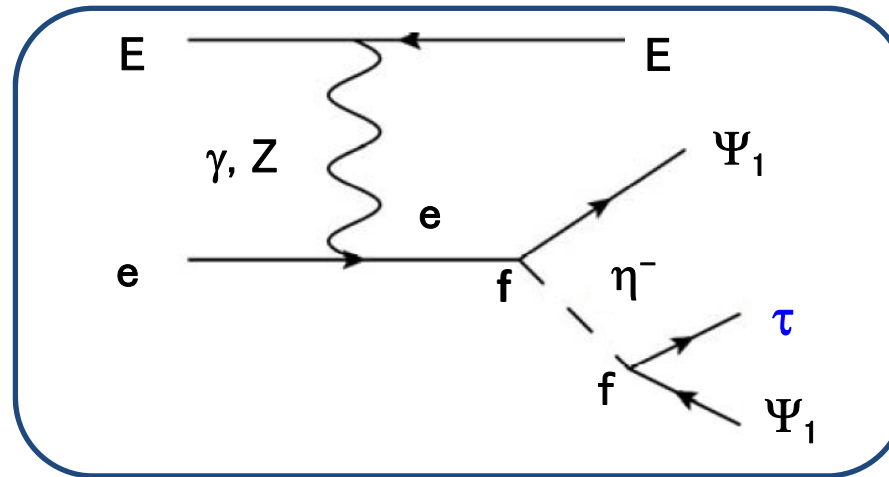
$$-0.8 < \cos(\mu) < 0.8, \quad E_\mu > 80\text{GeV},$$
$$E_e < 120\text{GeV}, \quad M_{\text{miss}} > 120\text{GeV}, \quad -0.8 < \cos(e\mu) < 0.8.$$



暗黒物質はILCで $1\text{ab}^{-1}$ のデータが溜まった時に、  
 $\sqrt{s} = 350\text{GeV}$  :  $M_{\text{DM}} \lesssim 64$  GeV の場合 $3\sigma$  C.L.で検証可能！  
 $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$  :  $M_{\text{DM}} = 0(100)$  GeVまで $5\sigma$  C.L.で検証可能！

# 4. Physics at the ILC

$e, E \rightarrow e, \tau, \not{\nu}$  processes

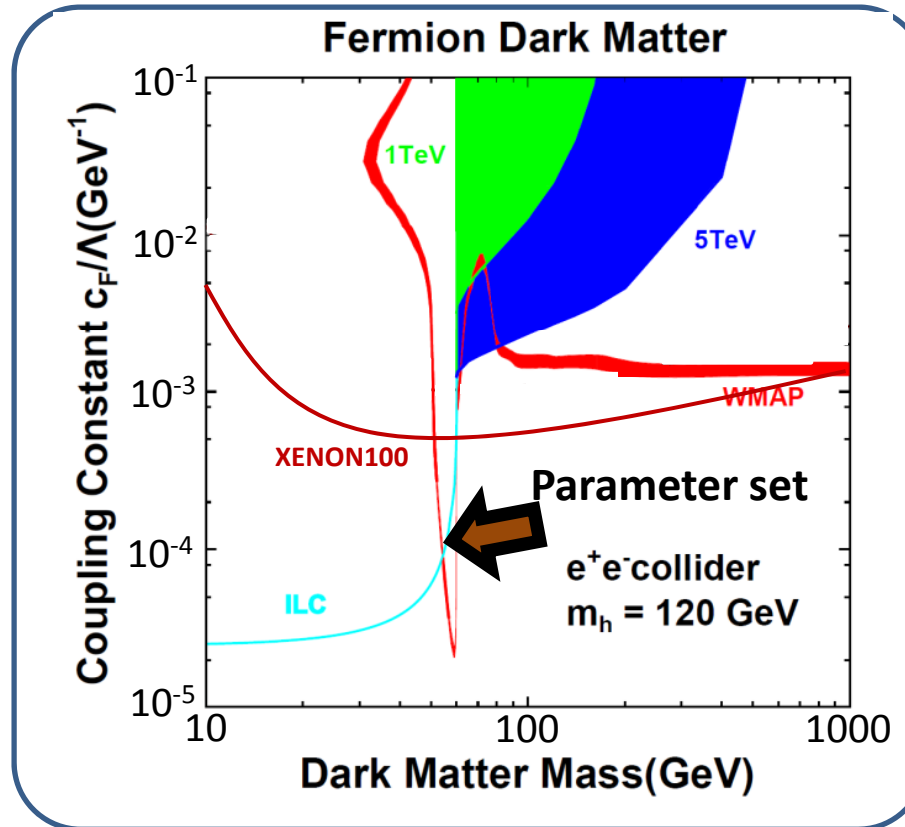


$\mu \rightarrow e\gamma$  からの制限を逃れるため、  
暗黒物質は  $\mu$  よりも  $\tau$  と強く結合する傾向にある。



$\mu$  モードの断面積が小さい場合でも、  
 $\tau$  モードを調べることにより暗黒物質を検証可能！

## 4. Physics at the ILC

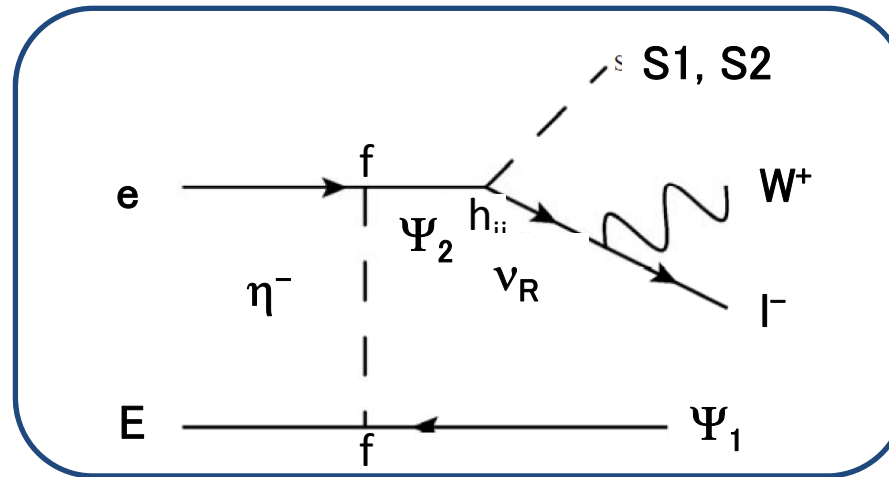


S.Kanemura, S.Matsumoto,  
TN, H.Taniguchi (2011).

$\sqrt{s}=350 \text{ GeV}$ のILCで $500\text{fb}^{-1}$ のデータが集まった時に、  
ヒッグス粒子のinvisibleへの崩壊を調べることで、  
暗黒物質 $\Psi_1$ を $3\sigma$ で検証可能。

# 4. Physics at the ILC

## Physics of $\nu_R$

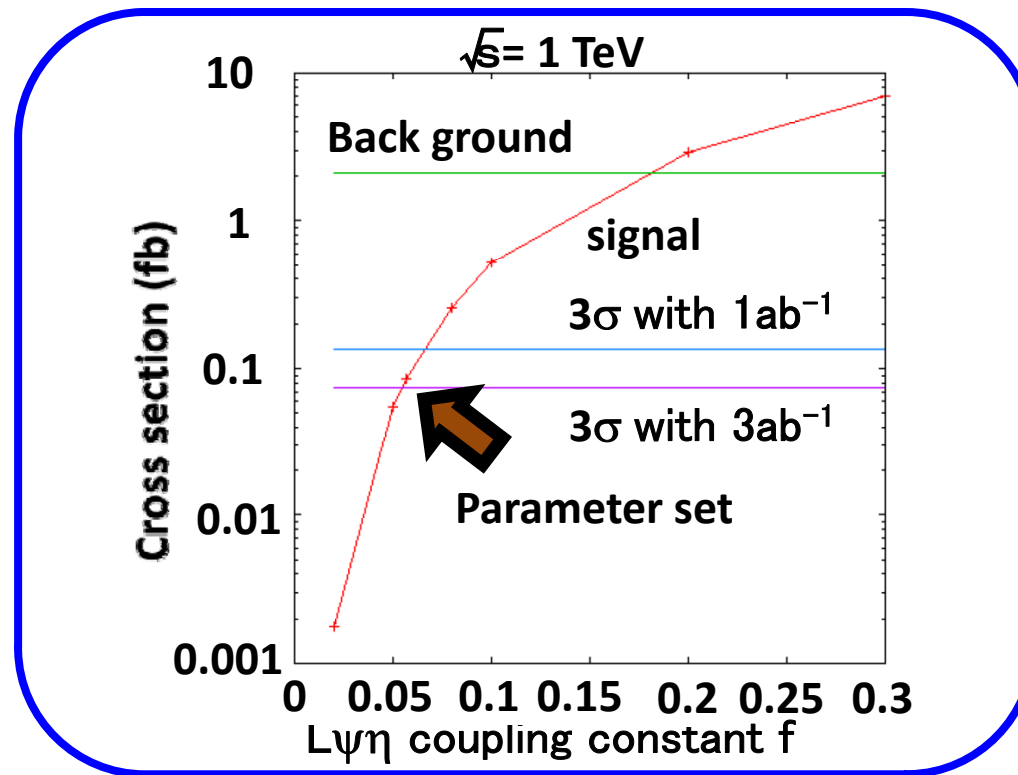


1. パラメータセットでは、  
右巻きニュートリノは主にWボソン、レプトン対に崩壊する。
2. この解析ではWボソンがjet二つに崩壊する過程に注目。
3. バックグラウンドは全ての  $e, E \rightarrow e$  (or  $\mu$ ),  $W + \text{missing}$  プロセス。

# 4. Physics at the ILC

$$-0.95 < \cos(\theta) < 0.95, \quad 200 \text{ GeV} < M_{\text{miss}} < 600 \text{ GeV},$$

$$240 \text{ GeV} < M_{w,l} < 260 \text{ GeV}, \quad E_l < 300 \text{ GeV}, \quad 300 \text{ GeV} < E_{w,l} < 600 \text{ GeV}.$$



右巻きニュートリノは $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$  の ILC で  $3 \text{ ab}^{-1}$  データが溜まった時に、 $3\sigma$  C.L. で検証可能！

# 4. Physics at the ILC

## SM-like Higgs bosons

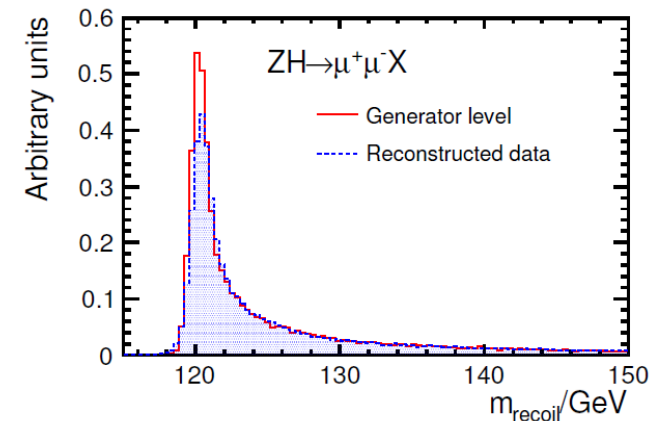
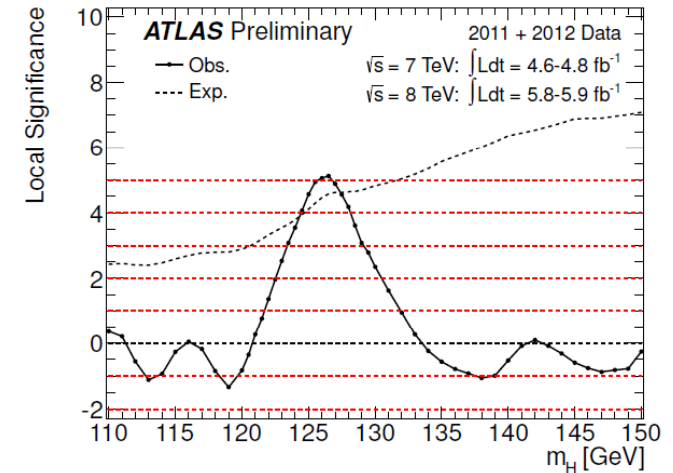
このモデルでは標準模型的なヒッグスボソンを $O(100)\text{GeV}$ に二つ予言。



LHCでSMヒッグスボソンが一つ見つかる？



LHCでは一つのSMヒッグスボソンにしか見えない場合でもILCでは質量が $50\text{MeV}$ 以上違えばヒッグスボソンが二つあることが分かる！



## 5. Conclusion

- ①  $U(1)_{B-L}$  ゲージ対称性がニュートリノ、暗黒物質の質量と暗黒物質の安定性の共通の起源となる TeVスケールの輻射シーソー模型の加速器での検証可能性を考えた。
- ②  $Z'_{B-L}$  はLHCで発見される。
- ③ 暗黒物質  $\Psi_1$  は  $\sqrt{s} = 350 \text{ GeV}$  のILCで  $1 \text{ ab}^{-1}$  のデータが溜まると  $M_{DM} \lesssim 64 \text{ GeV}$  まで  $3\sigma$  で検証可能。
- ④  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$  のILCでは  $1 \text{ ab}^{-1}$  のデータが溜まると  $O(100) \text{ GeV}$  の暗黒物質が  $5\sigma$  で検証可能。
- ⑤ 右巻きニュートリノは  $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$  のILCで  $3 \text{ ab}^{-1}$  のデータが溜まった時に  $3\sigma$  で検証可能。
- ⑥ ILCでは標準模型的なヒッグスが二つだと分かる。
- ⑦ ILC はこの模型を他の模型と区別可能！