

Seesaw Neutrino Signals at the Large Hadron Collider

JHEP 1006:058,2010

Phys.Rev.D82 :093004,2010

鍋島 偉宏 富山大学

余剰次元物理2011 2011年1月24日

Collaborators

齋藤 智之	(東北大学)
浅野 雅樹	(東北大学)
田窪 洋介	(東北大学)
波場 直之	(大阪大学)
藤井 恵介	(KEK)
松本 重貴	(IPMU)
山本 均	(東北大学)
吉岡 興一	(京都大学)

もくじ

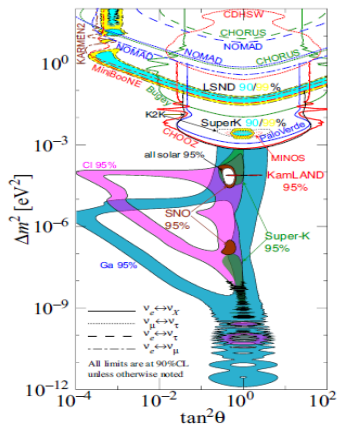
1. イントロダクション
2. セットアップ
3. ニュートリノ質量と
実験からの制限
4. 加速器における展望
5. まとめ

1. イントロダクション

素粒子標準模型の問題点



- ・ヒエラルキー問題
 - ・暗黒物質問題
 - ・ニュートリノ質量問題
- などなど……



$$\Delta m_{21} \equiv m_{\nu_2} - m_{\nu_1} = 9 \times 10^{-3} \text{ eV},$$

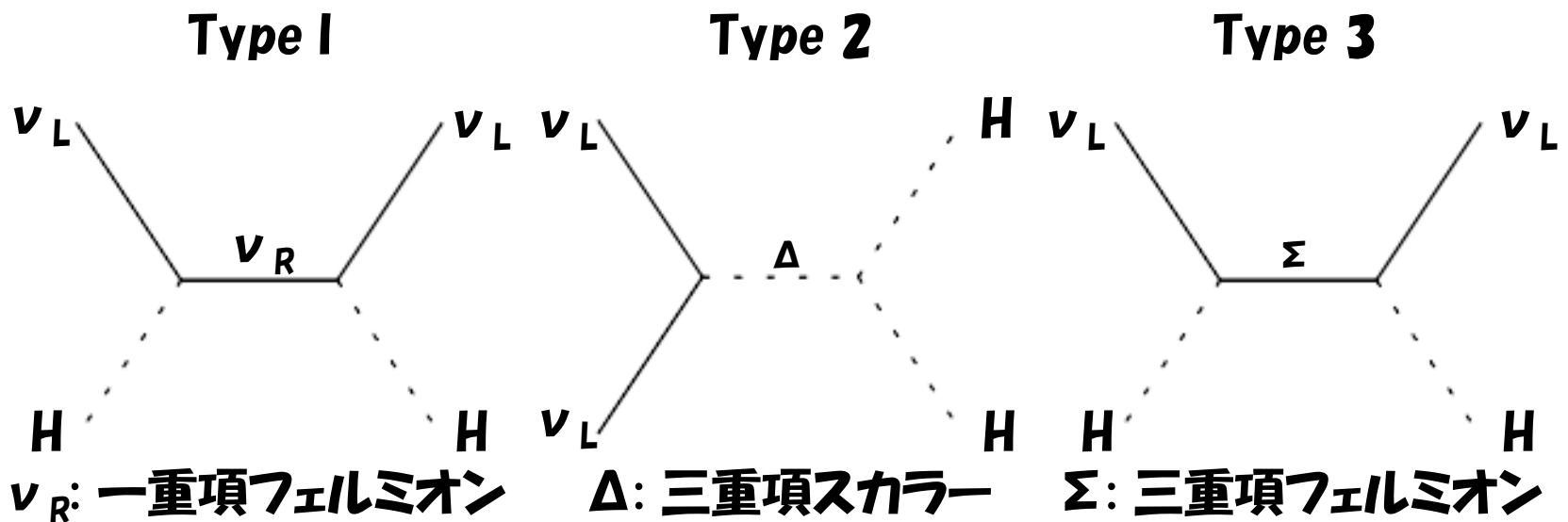
$$\Delta m_{32} \equiv |m_{\nu_3} - m_{\nu_2}| = 5 \times 10^{-2} \text{ eV},$$

$$s_{12} = 0.56, \quad s_{23} = 0.71, \quad s_{13} \leq 0.22.$$

ニュートリノは質量を持たなければならない!

1. イントロダクション

Seesaw機構




ニュートリノに質量を持たせることができる

1. イントロダクション

Seesaw機構

Type I seesaw の場合

$$L = L_{\text{SM}} + \bar{N}i\partial N/2 - M\bar{N}^c N - [y\bar{L}H^c N + h.c.]$$


$$\begin{matrix} \nu & N \\ \nu & \left[\begin{array}{cc} 0 & m_D \\ m_D & M \end{array} \right] \\ N & \end{matrix}$$

$(m_D = y v / \sqrt{2})$

$$m_\nu = m_D^2 / M$$

$v = 0(1)$ で $M = 10^{15} \text{ GeV}$

→

右巻きニュートリノが重くないすぎるため加速器実験で検証できない。

$v = 0(10^{-6})$ で $M = 1 \text{ TeV}$

→

湯川カップリングがとても小さく右巻きニュートリノが標準模型粒子とほとんど相互作用しない。

検証することが難しい……

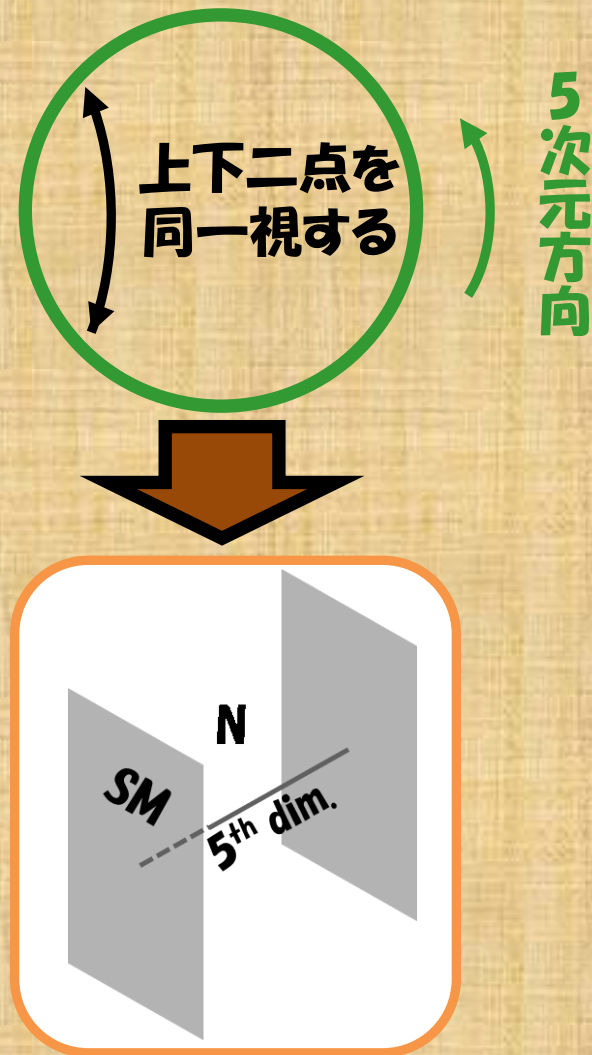
1. イントロダクション

余剰次元模型

S_1/Z_2 でコンパクト化された
5次元の余剰次元模型を考える

このような場合でも右巻きニュートリノ
があればtype I seesawは可能!!

$M = 0(1) \text{ TeV}$ の場合でも y をあまり
抑制させずに微小質量を説明できる!



1. イントロダクション

モチベーション

- Type I seesawでは、ニュートリノの微小質量を説明する際に、導入される右巻きニュートリノの質量が**非常に重い**か結合定数を**非常に小さく**する必要がある……
- 余剰次元模型が実現している場合、右巻ニュートリノ及び余剰次元が $0(1)$ TeVスケールであっても、大きな結合定数のまま**微小質量を説明可能!**



右巻きニュートリノだけが余剰次元に伝搬している場合、その痕跡を加速器実験において検証可能であるか？

2.セットアップ

ラグランジアン

- 半径 R の S_1/Z_2 でコンパクト化された5次元の余剰次元
- 右巻きニュートリノのみが伝搬する
- その質量としてマヨラ質量のみを考える
- その大きさが余剰次元スケールと同程度とする。



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{N}\not{\partial}N - \left[\frac{1}{2}\bar{N}^c M_5 \gamma_5 N + \frac{1}{\sqrt{\Lambda}}\bar{N}Y H^{c\dagger} L \delta(x^5) + h.c. \right]$$



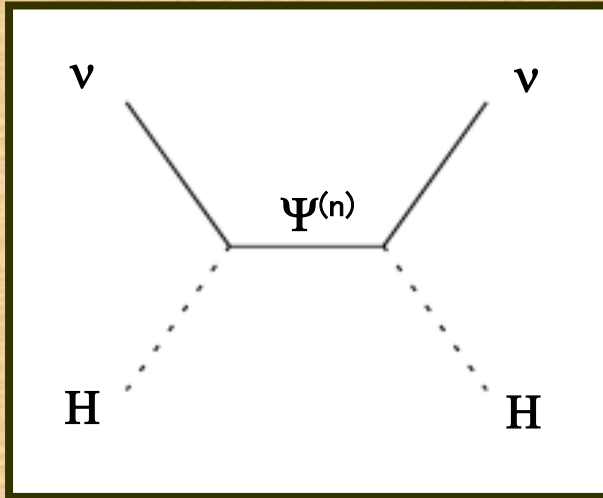
Nを展開
5次元方向積分

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_n \left[\bar{\psi}^{(n)} \left(i\not{\partial} - \frac{2n-1}{2R} \right) \psi^{(n)} \right] \\ - \sum_n \left[\frac{1}{2}\bar{\psi}^{(n)} \left(\frac{n}{2R} - M_5 \right) \psi^{(n)c} + \bar{\psi}^{(n)} Y_\nu H^{c\dagger} P_L L + h.c. \right]$$

3. ニュートリノ質量と実験からの制限

ニュートリノ質量

重い $\Psi^{(n)}$ を積分し有効ラグランジアンを求める



$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{SM} + \left[\frac{\pi^2 R^2}{4} (H^{c\dagger} L)^T Y_\nu^T \left(\frac{1}{2R} - M_5 \right) Y_\nu C^\dagger (H^{c\dagger} L) + h.c. \right] + \frac{\pi^2 R^2}{2} (\bar{L} H^c) Y_\nu^\dagger Y_\nu i \not{\partial} (H^{c\dagger} L)$$

ニュートリノの
質量となる!



$M_5 = 1/2R - \delta_M$ とする

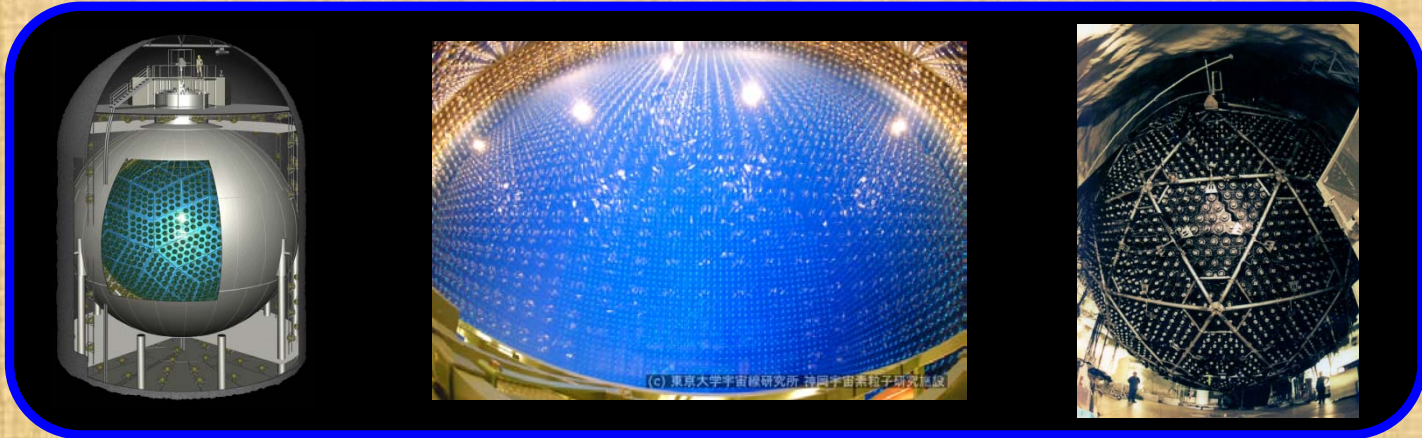
$$m_\nu = \frac{\pi^2 R^2 v^2}{4} U_{MNS}^T Y_\nu^T \delta_M Y_\nu U_{MNS}$$

$$Y_\nu = \frac{2}{\pi R v} \delta_M^{(-1/2)} O^\dagger \sqrt{m_\nu} U_{MNS}^\dagger$$

**$1/2R, M_5$ が $0(1)$ TeV でも
 Y_ν は抑制されない!!**

3. ニュートリノ質量と実験からの制限

ニュートリノ振動実験からの制限



$$m_\nu = \begin{pmatrix} m_{\nu_1} & & \\ & m_{\nu_2} & \\ & & m_{\nu_3} \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_1} & & \\ & e^{i\varphi_2} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \phi$$

$$\Delta m_{21} \equiv m_{\nu_2} - m_{\nu_1} = 9 \times 10^{-3} \text{ eV}, \quad \Delta m_{32} \equiv |m_{\nu_3} - m_{\nu_2}| = 5 \times 10^{-2} \text{ eV},$$

$$s_{12} = 0.56, \quad s_{23} = 0.71, \quad s_{13} \leq 0.22.$$

3.ニュートリノ質量と実験からの制限

ニュートリノ質量のパターン

$$m_\nu = \begin{pmatrix} m_{\nu 1} & & \\ & m_{\nu 2} & \\ & & m_{\nu 3} \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_1} & & \\ & e^{i\varphi_2} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \phi$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{21} &\equiv m_{\nu 2} - m_{\nu 1} = 9 \times 10^{-3} \text{ eV}, \\ \Delta m_{32} &\equiv |m_{\nu 3} - m_{\nu 2}| = 5 \times 10^{-2} \text{ eV}, \\ s_{12} &= 0.56, \quad s_{23} = 0.71, \quad s_{13} \leq 0.22. \\ \sum_i m_{\nu i} &\leq 0.67 \text{ eV} \end{aligned}$$

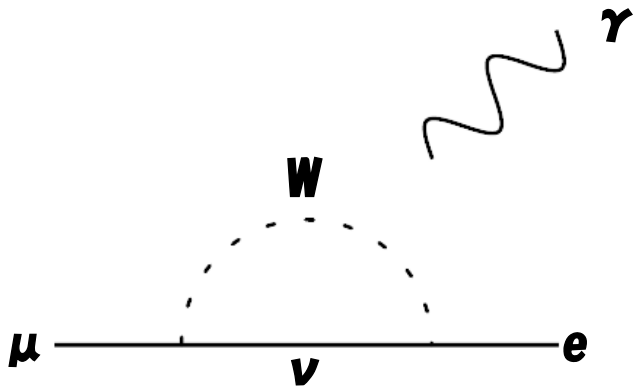


	$m_{\nu 1}$	$m_{\nu 2}$	$m_{\nu 3}$	Model 1		
Normal	0	Δm_{21}	$\Delta m_{21} + \Delta m_{32}$	s_{13}	δ	$\varphi_{1,2}$
Inverted	$\Delta m_{32} - \Delta m_{21}$	Δm_{32}	0	0.07	π	0
Degenerate	m_{tot}	$m_{\text{tot}} + \Delta m_{21}$	$m_{\text{tot}} + \Delta m_{21} + \Delta m_{32}$	0.09	0	0
				0.04	π	0

$$m_{\text{tot}} = (0.67 \text{ eV} - 2\Delta m_{21} - \Delta m_{32})/3 \simeq 0.2 \text{ eV}$$

3. ニュートリノ質量と実験からの制限

レプトン世代混合実験等からの制限



$$\mathcal{O}^{(6)} = \frac{1}{v^2} (\bar{L} \tilde{H}) \epsilon_N i \not{\partial} (\tilde{H}^\dagger L),$$
$$\epsilon_N = \frac{2}{\delta_M} U_{\text{MNS}} m_\nu U_{\text{MNS}}^\dagger,$$

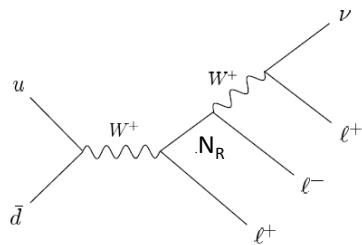
$$\epsilon_N \leq \begin{pmatrix} 10^{-2} & 7 \times 10^{-5} & 1.6 \times 10^{-2} \\ 7 \times 10^{-5} & 10^{-2} & 10^{-2} \\ 1.6 \times 10^{-2} & 10^{-2} & 10^{-2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{ll} \delta_M \geq 3.3 \text{ eV} & \text{for Normal,} \\ \delta_M \geq 4.4 \text{ eV} & \text{for Inverted,} \\ \delta_M \geq 24. \text{ eV} & \text{for Degenerate,} \end{array}$$

4. 加速器における展望

LHC実験における展望

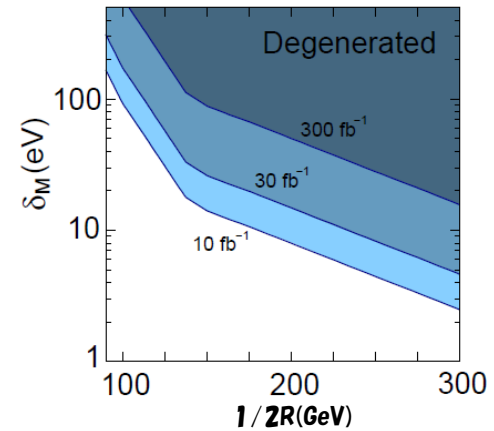
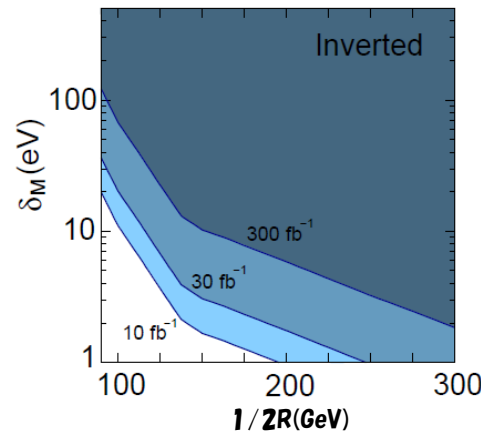
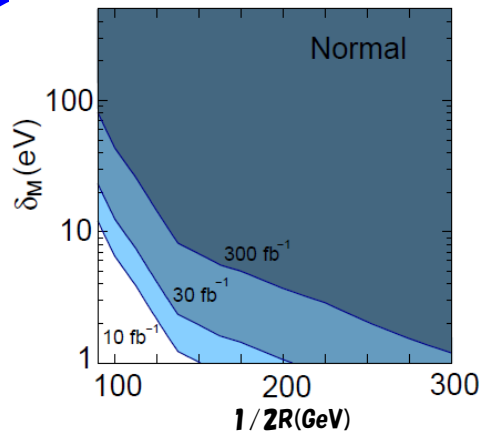
注目するシグナル



用いるカット

- ① 同じ電荷を持つレプトン二つと違う電荷を持つレプトン一つからなるシグナル
- ② 同じ電荷を持つレプトンのエネルギーが30GeV以上
- ③ 電荷の違うレプトン同士の不変質量が $MZ \pm 10\text{GeV}$ に入っていない

LHC実験における検証可能性

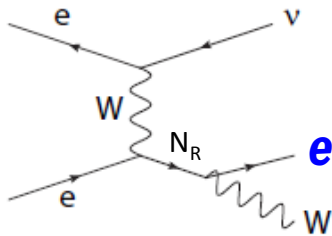


LHCにおける各ニュートリノ質量タイプでの検証可能性
 それぞれの領域の下側が積分ルミノシティを $10, 30, 300\text{fb}^{-1}$
 ためた場合に 3σ で検証可能な領域

4. 加速器における展望

ILC実験における展望(e)

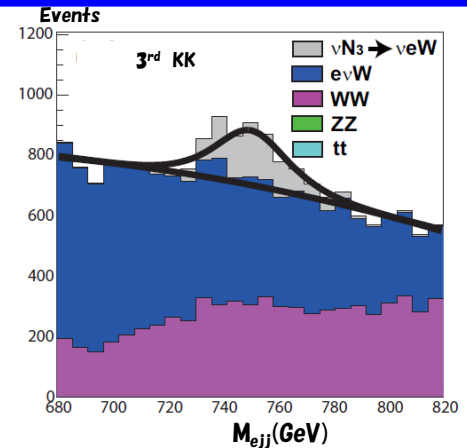
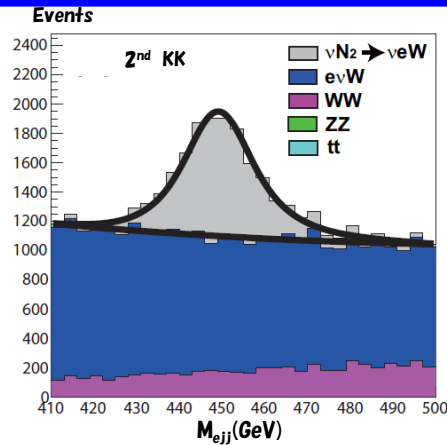
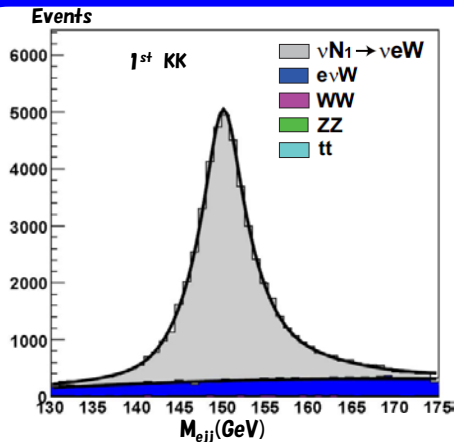
注目するシグナル



用いるカット(1st KK)

- ① レプトンのエネルギーが10GeV~400GeV
- ② 二つのジェットの不変質量が60GeV~100GeV
- ③ レプトンと二つのジェットの不変質量が135GeV~165GeV

ILC実験における検証可能性(inverted)

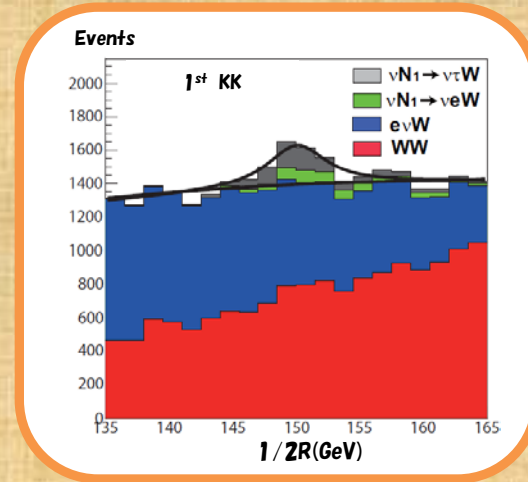
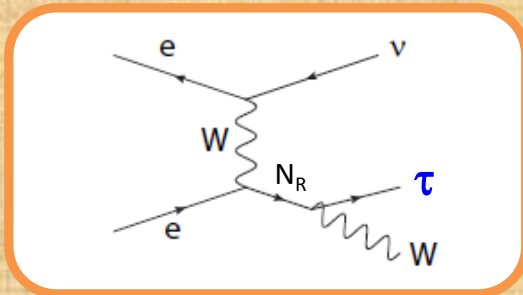


$R^{-1} = 0.3 \text{ TeV}$, $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$ で積分ルミ/シティ 500 fb^{-1}
 たまた場合の M_{ejj} から再構成された各KKニュートリノの質量分布

4. 加速器における展望

ILC実験における展望(τ)

注目するシグナル



ILC実験では終状態が $\nu e W$, $\nu \tau W$ それぞれの
場合のシグナルを測定できる可能性がある!



この二つのシグナルを比較することにより N_{eW} と $N_{\tau W}$ の比が分かる。
→すでに判明していると期待される U_{MNS} と比較することでこの
シグナルがニュートリノに関連するものであることが分かる!

5.まとめ

- ① 右巻きニュートリノ及び余剰次元のスケールが $0(1)\text{TeV}$ である5次元の余剰次元模型を考えた
- ② 右巻きニュートリノと余剰次元のスケールが **ほぼ同じ**である場合、結合定数を大きく保ったままニュートリノの**微小質量を説明可能!**
- ③ 既存の実験からの制限を満たす領域でLHC実験での検証可能性を評価したところ **広いパラメータ領域で検証可能性がある!!**
- ④ ILCはeモードでは **3^{rd} KKニュートリノ**まで質量を明らかにすることができ、 τ モードでも **1^{st} KKニュートリノ**を測定できる可能性がある!