

# ILCにおける高次元シーソー モデルの右巻きニュートリノに 関する測定精度の検証

[arXive:1008.2257]

齋藤智之(東北大学)

浅野雅樹、田窪洋介、鍋島偉宏、波場直之、  
藤井恵介、松本重貴、山本均、吉岡興一

2010/09/14 日本物理学会@九州工業大学

# 目次

- 👉 モデル
- 👉 ILC
- 👉 シミュレーション
- 👉 Electronモード解析
- 👉 Tauモード解析
  - 👉 イベント再構成
  - 👉 Likelihood解析
  - 👉 Nの質量と反応断面積の精度の評価
- 👉 まとめ

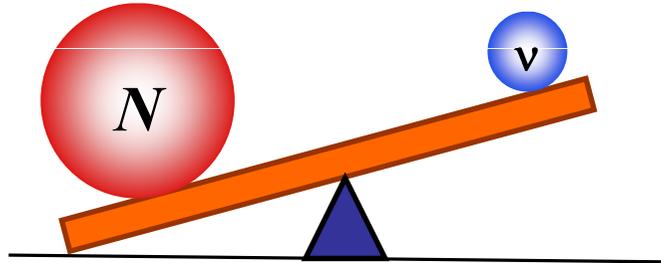
# シーソー機構

シーソー機構：ニュートリノの小さな質量を自然に説明



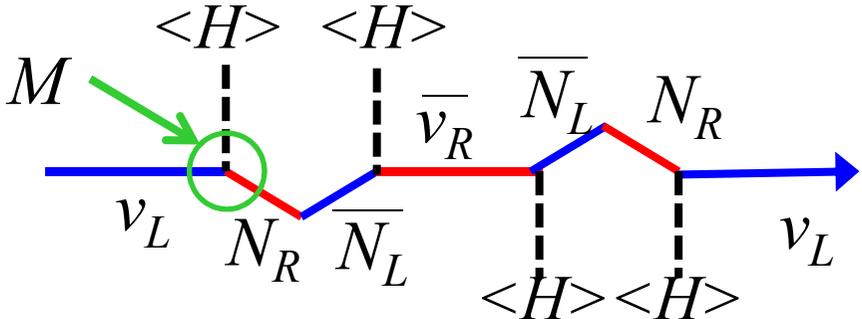
ニュートリノは重い右巻きニュートリノの影響で軽くなる

$$M_\nu = \frac{v^2 y^2}{2M_N} \left[ \begin{array}{l} y : \text{湯川カップリング} \\ v : \text{真空期待値} \end{array} \right]$$



$$M_\nu \sim 0.1 \text{ eV}$$

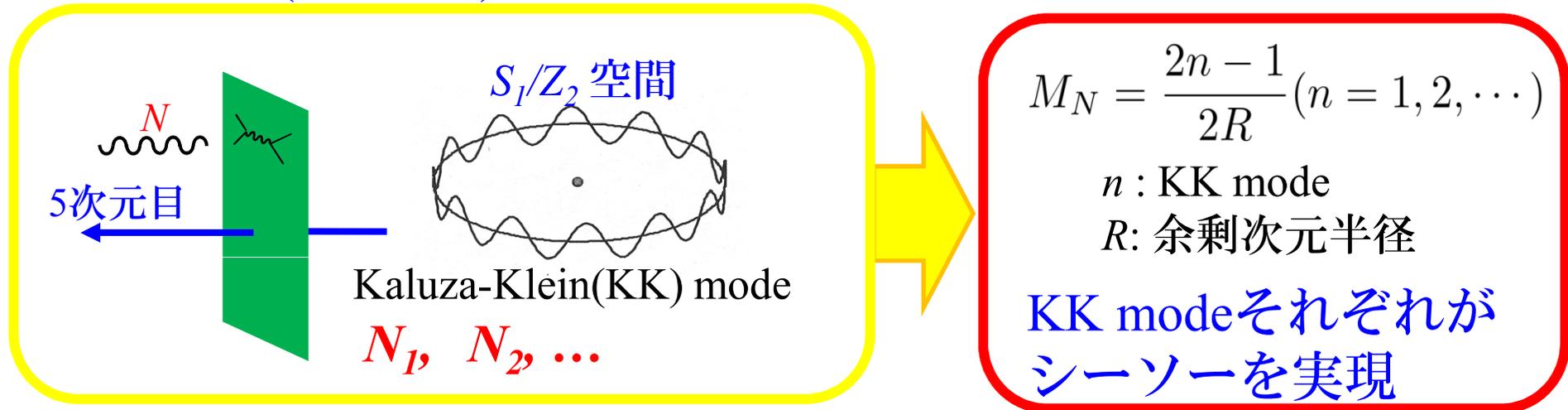
$$\rightarrow M_N = 10^{14} \text{ GeV}$$



右巻きニュートリノ  $N$  は重すぎて観測できない

# 高次元シーソー機構

余剰次元(5次元目)を導入...



## モデルの特徴

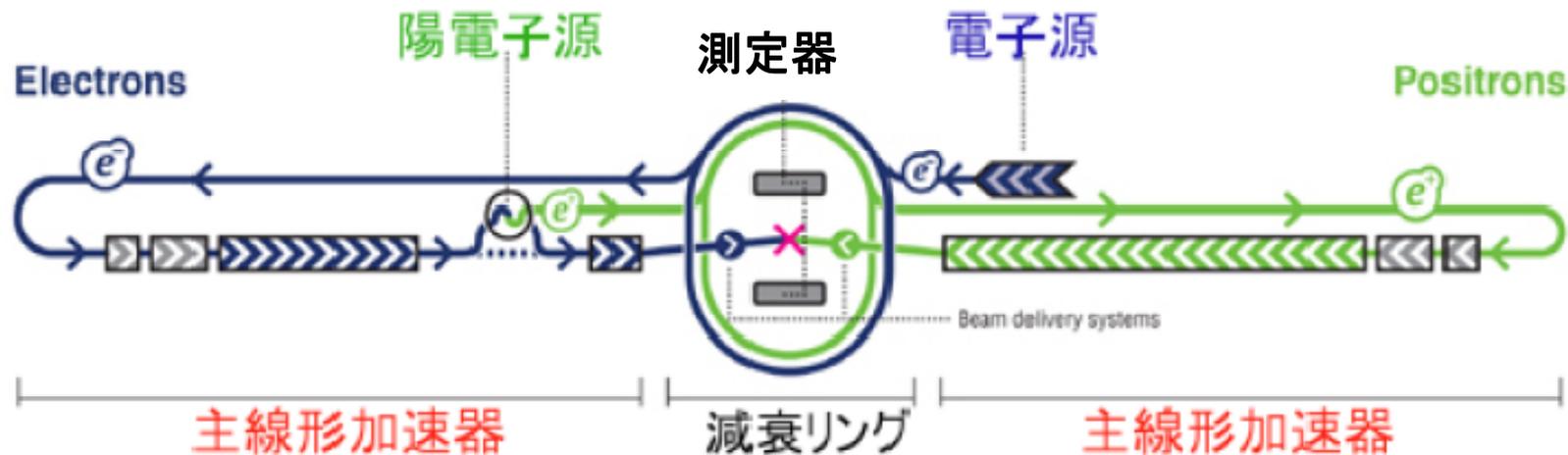
- ☛  $N$ が重くなくても  $\nu$ を軽くできる  
⇒ 例:  $1/R \sim 100\text{GeV} \rightarrow M_N \sim 100\text{GeV}$
- ☛ 湯川結合が大きい  
⇒  $\nu$ との混合が大きく SM粒子と大きなカップリング持つ

**ILCでTeVスケールの  $N$ が観測できる**

# International Linear Collider (ILC)

## 次世代電子・陽電子衝突型線形加速器

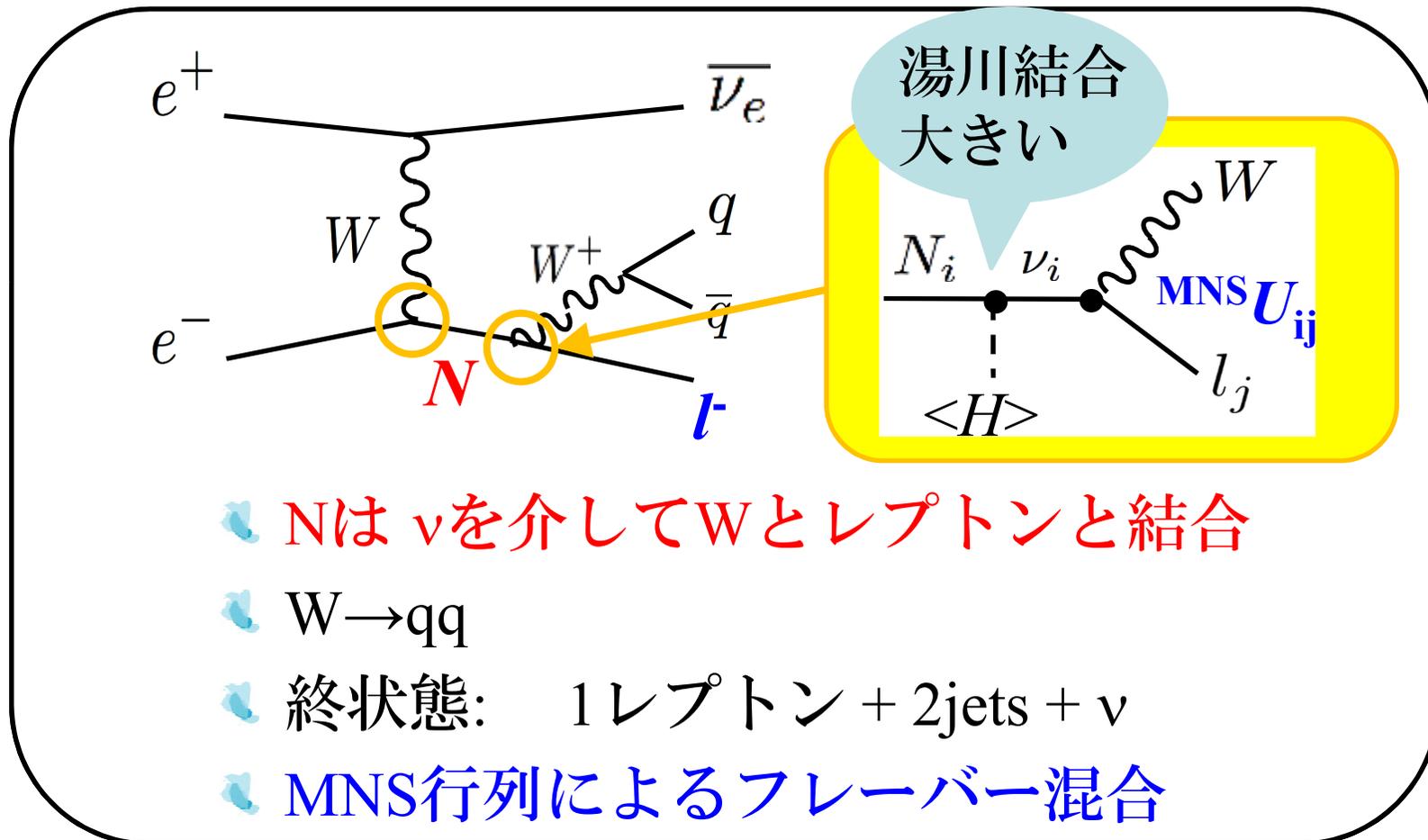
- 重心エネルギー : 500 GeV ( $\rightarrow$  1TeV)
- 最大ルミノシティ :  $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 積分ルミノシティ :  $500 \text{fb}^{-1}$  (4年間)



バックグラウンドの少ない環境で新物理の探索可能

# シグナル

## ILCで観測が期待されるシグナル



終状態のレプトンが  $e$  (electron-mode) と  $\tau$  (tau-mode) の場合を解析

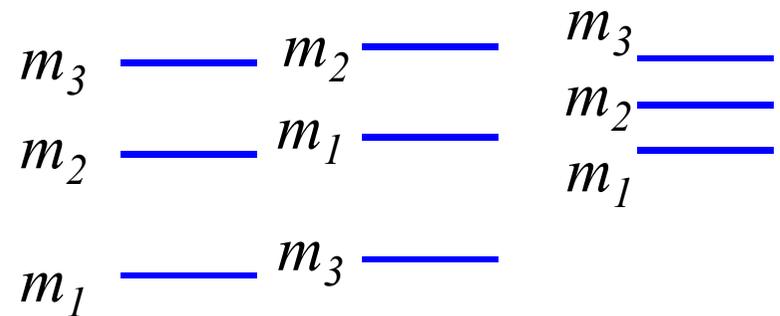
# シミュレーション

- GLDのファストシミュレータを使用
- 重心エネルギー : **500 GeV , 1 TeV**
- 積分ルミノシティ : **500 fb<sup>-1</sup>**
- ニュートリノ質量 : **順階層型、逆階層型、縮退型**

- 右巻きニュートリノ質量

[KK mode]

- $N_1$  : **150 GeV**
- $N_2$  : **450 GeV**
- $N_3$  : **750 GeV**

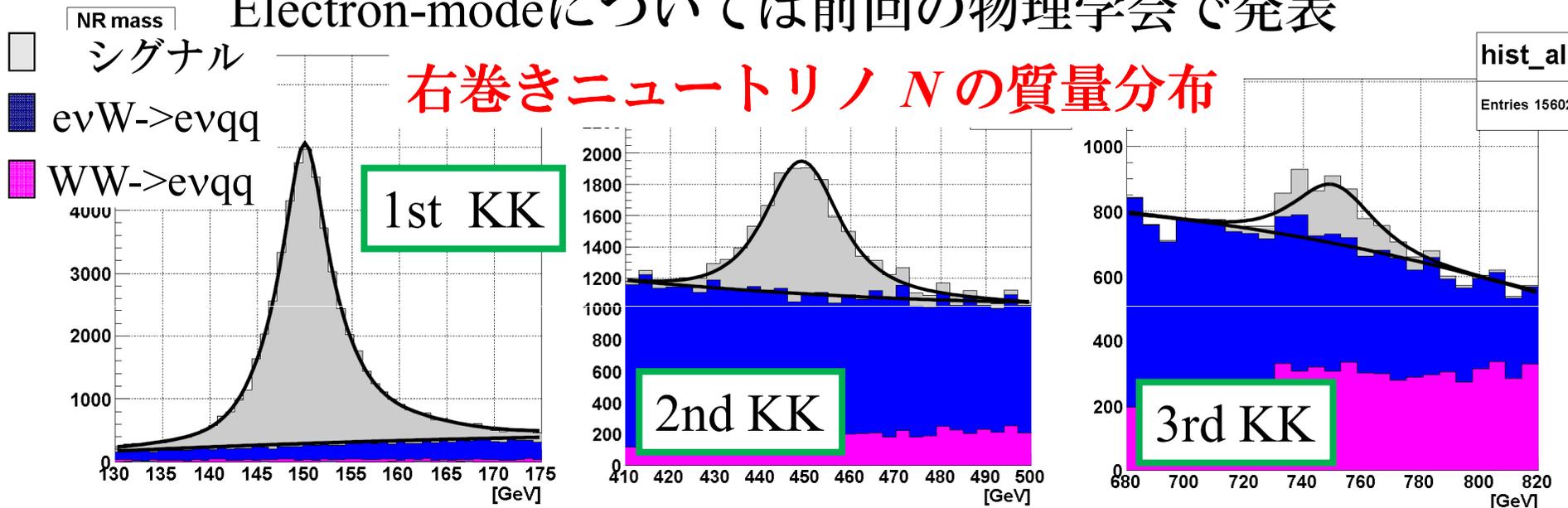


順階層型 逆階層型 縮退型

# Electron モードの解析

Electron-modeについては前回の物理学会で発表

右巻きニュートリノ  $N$  の質量分布

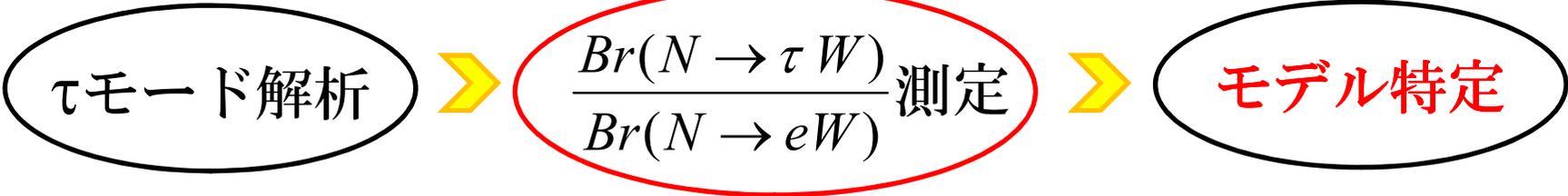


	1st KK	2nd KK	3rd KK
$M_N$ の精度 (%)	0.02	0.05	0.2
反応断面積の精度 (%)	0.58	2.8	9.9

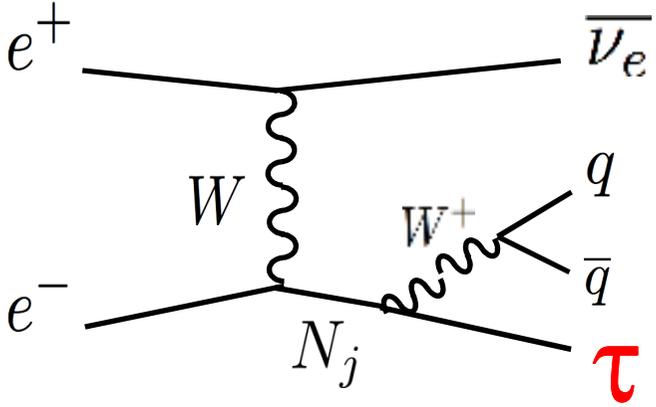
複数のKK モードが高精度で観測可能

# τモードの解析

**Nは Electronモード解析より観測可能**  
しかし、ニュートリノの物理によるものか特定できない



- 解析条件**
- ☛ 重心エネルギー : **500GeV**
  - ☛ 積分ルミノシティ :  $500 \text{ fb}^{-1}$
  - ☛ ニュートリノ質量階層:  
順階層, 逆階層, ~~縮退型~~
  - ☛ N質量 (1stKK) : **150GeV**



# 反応断面積

シグナルとバックグラウンドの反応断面積を計算 (Physsim)

モード	反応断面積(fb)	
シグナル (順階層型)	5.49	
シグナル (逆階層型)	4.18	
Bg {	Electron mode	6.52
	$e\nu W$	4460
	$WW \rightarrow l\nu qq$	3960

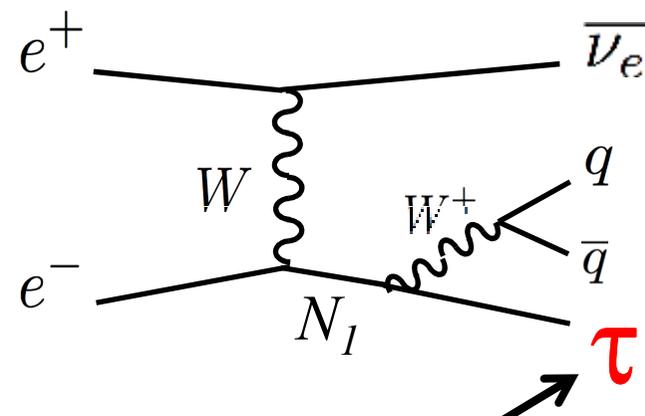
バックグラウンドの  
反応断面積は  
非常に大きい

強力なバックグラウンド除去方法が必要

# イベント再構成

## イベントの再構成の方法

- 1, 強制的に3jetで組む
- 2,  $\tau$  jet ID  
⇒ 3jetの内トラック数の最も少ないジェット
- 3,  $W$  再構成  
⇒ 残りの2jetを組む
- 4,  $\tau$  jet 再構成 ⇒  $N$  の質量を知っているとし補正をかける
- 5,  $N$  再構成 ⇒ 2jet +  $\tau$



$\nu$ によるmissingあり

右巻きニュートリノの質量を再構成し評価

# カットのまとめ

	シグナル	Electron モード	evW	WW
カット前	2090	3260	2231000	1980000
$10 < E_{\tau} < 150$	1880	2655	1574690	1155700
$60 < M_{2jet} < 100$	1525	2227	1206880	833895
<b>Likelihood_enw &gt; 0.63</b>	1077	1837	112158	683066
<b>Likelihood_e &gt; 0.11</b>	999	996	81226	367250
$80 < M_N < 160$	993	939	53093	94225
$135 < M_N (\text{補正}) < 165$	821	554	12276	14861
カット効率(%)	39.3%	17.0%	0.55%	0.75%
<b>信号有意度</b>	<b>4.86</b>			

バックグラウンドが効率よく除去できた

# Likelihood 解析

$$L = \frac{L_{sig}}{L_{sig} + L_{bg}}$$

Kinematic カットののみでは十分でないのでLikelihood解析を行った

## Likelihood 変数 (より $\tau$ らしいイベントを選ぶ)

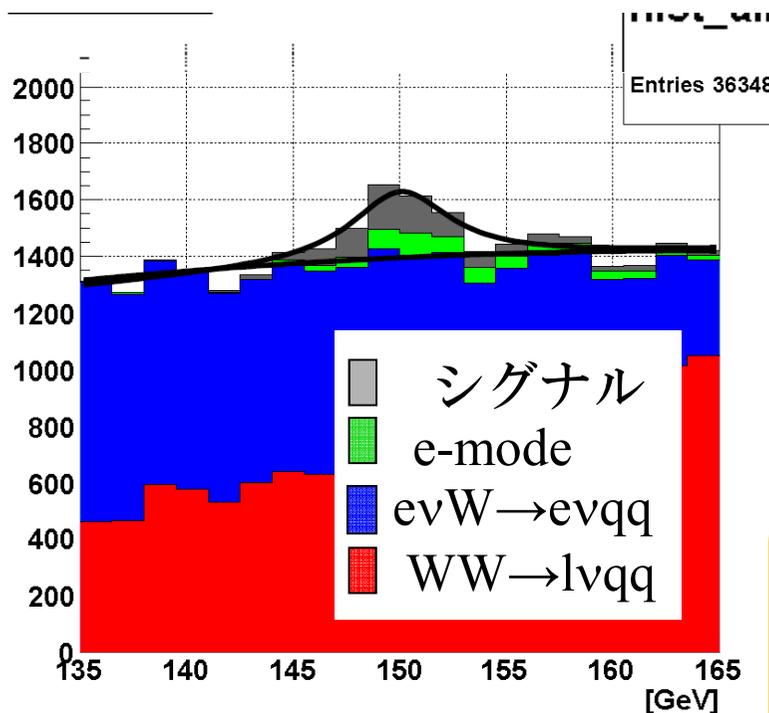
- ①  $\tau$  jet 中のトラック数
- ②  $\tau$  jet 中の最高エネルギーのトラックのエネルギー
- ③ 最高エネルギーのトラックを除いた  $\tau$  jet のトータルエネルギー



# 右巻きニュートリノの質量分布

再構成した $M_N$  分布から $M_N$ と反応断面積の精度を評価

## 右巻きニュートリノの質量 [逆階層型]



## ILCで得られる精度

	順階層型	逆階層型
$M_N$ の精度(%)	0.18	0.21
反応断面積の精度(%)	11.3	12.4
$Br(\tau)/Br(e)$ の精度(%)	13.1	12.4

Electronモードの結果と合わせて  
 $Br(N \rightarrow \tau W)$ と $Br(N \rightarrow eW)$ の比  
を評価

# まとめ

高次元シーソーモデルの右巻きニュートリノを含むシグナルのILCにおける測定精度を評価した。

- ☛ **Electron モード** : 複数のKKモードを観測可能
- ☛ **Tau モード** : 1st KKを観測可能

崩壊分岐比の比の精度

	順階層	逆階層
$\Delta[Br(\tau\text{-mode})/Br(e\text{-mode})]$	13.1 %	12.4 %

崩壊分岐比の比によりモデルの特定ができることを示唆できた

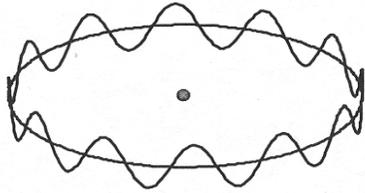


Back up

# ラグランジアン

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{int.}} = & -\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{n=1} \frac{1}{\pi R M_n} W_{\mu}^{\dagger} \bar{e} \gamma^{\mu} U_{MNS} \left( \frac{2M_{\nu}^d}{\delta_M} \right)^{\frac{1}{2}} P_L N_n \\
 & -\frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_{n=1} \frac{1}{\pi R M_n} Z_{\mu} \bar{\nu}_d \gamma^{\mu} \left( \frac{2M_{\nu}^d}{\delta_M} \right)^{\frac{1}{2}} P_L N_n \\
 & - \sum_{n=1} \frac{1}{\pi R v} h \bar{\nu}_d \left( \frac{2M_{\nu}^d}{\delta_M} \right)^{\frac{1}{2}} P_R N_n + \text{h.c.} .
 \end{aligned}$$

# 高次元シーソー機構



Kaluza-Klein(KK) mode

$N_1, N_2, \dots$

$$M_N = \frac{2n - 1}{2R} (n = 1, 2, \dots)$$

$n$  : KK mode

$R$ : 余剰次元半径

$$M_\nu = \underbrace{\frac{m_D^2}{M}}_{\text{0th KK}} + \underbrace{\left( \frac{m_D^2}{3M} - \frac{m_D^2}{M} \right)}_{\text{1st KK}} + \underbrace{\left( \frac{m_D^2}{5M} - \frac{m_D^2}{3M} \right)}_{\text{2nd KK}} \dots$$

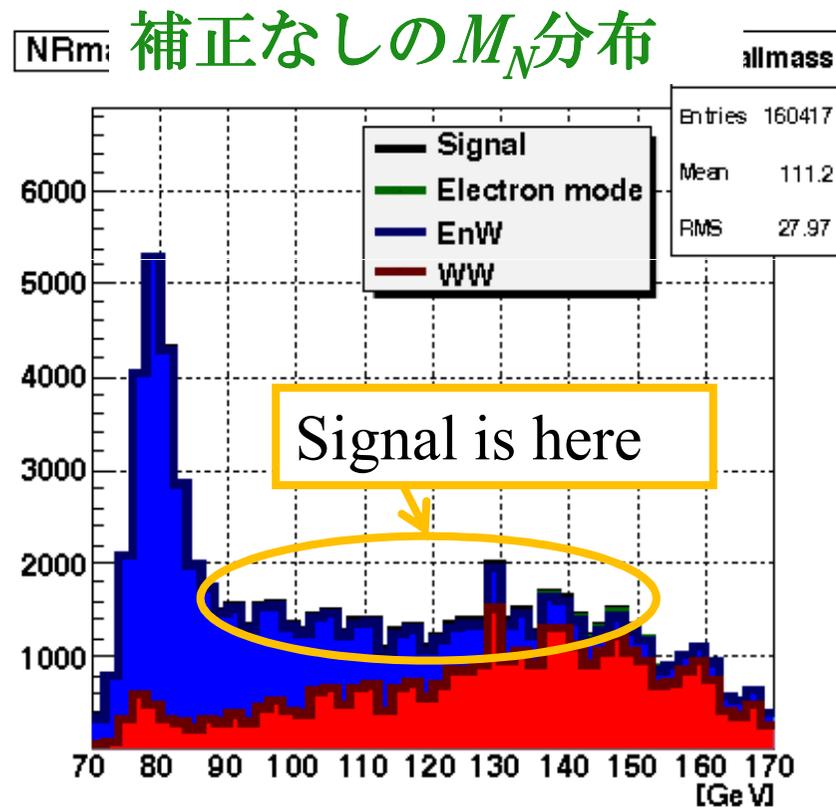
KK モードそれぞれでシーソーが起き、 $M_\nu$  が軽くなる

# ニュートリノの質量階層

	階層型	逆階層型	縮退型
$\nu_e$ (eV)	0	0.041	0.20
$\nu_\mu$ (eV)	0.009	0.05	0.21
$\nu_\tau$ (eV)	0.059	0	0.26

Hierarchy	$s_{13}$	$\delta$	$\varphi_1$	$\varphi_2$
(N)	0.07	$\pi$	0	0
(I)	0.09	0	0	0
(D)	0.04	$\pi$	0	0

# 補正なしの $M_N$ 分布



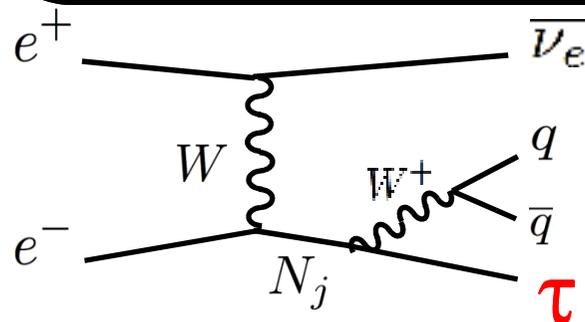
⇒タウのmissingの影響により  
シグナルのピークが広がる

# $\tau$ のmissingに関する補正

Electronモードの解析より $M_N$ を知っているという仮定を使い  
Nを再構成する

## $M_N$ に対する補正

- 1,  $M_N (=150\text{GeV})$ を用いて、Nのエネルギー $E_N$ を計算
- 2, tau のエネルギー( $E_\tau$ ) =  $E_N - E_{2jet}$  で計算
- 3, 2jetとtauの運動量と $E_N$ から $M_N$ を計算



tauのmissingを避けて $M_N$ を再構成できた

# カットのまとめ [階層型]

	Signal	Electron mode	evW	WW
<b>before cut</b>	2745	3260	2231000	1980000
<b><math>10 &lt; E_{\tau} &lt; 150</math></b>	2483	2655	1574690	1155700
<b><math>60 &lt; M_w &lt; 100</math></b>	2016	2227	1206880	833895
<b>likelihood_enw &gt; 0.79</b>	1338	1686	81995	64089
<b>likelihood_e &gt; 0.13</b>	1231	858	56008	354982
<b><math>80 &lt; M_N &lt; 160</math></b>	1224	847	39358	86328
<b><math>135 &lt; \text{new } M_N &lt; 165</math></b>	1029	495	8989	13788
<b>Cut Efficiency (%)</b>	37.5%	15.2%	4.03%	0.70%
<b>信号有意度</b>	<b>6.6</b>			

バックグラウンドが効率よく除去できた