

# 余剰次元のモデルとLHC

松本 重貴  
(東北大学)

1. TeraScaleの物理と余剰次元のモデル
2. LHCにおける(各)余剰次元モデルの典型的なシグナルについて

# TeraScaleの物理と余剰次元のモデル

## Standard Model

ほとんどの実験結果を説明可能な模型

でも問題点もある。

( Hierarchy problem, neutrino mass, CKM matrix, GUT, Dark Matter, Dark Energy, Baryogenesis, Inflation )

Standard Model (SM) は間違ってるの？

No! SM は低エネルギー(100 GeV 以下)の物理を記述する有効理論で、より高い(よりマイクロ)エネルギースケールでは、より基本的な素粒子模型(New Physics)が現れる。

どの程度のエネルギースケールでNew Physicsが現れるの？

→ ヒッグス質量に対する輻射補正からヒントが得られる。

# TeraScaleの物理と余剰次元のモデル

## Standard Model

どの程度のエネルギースケールでNew Physicsが現れるの？  
→ ヒッグス質量に対する輻射補正からヒントが得られる。

$$m_h^2 = \underbrace{h \cdots \bullet \cdots h}_{m_0^2 \text{ (bare mass)}} + \underbrace{h \cdots \bigcirc \cdots h}_{0.01 \Lambda_{SM}^2}$$

$(100 \text{ GeV})^2$

$$\Lambda_{SM} < O(1) \text{ TeV}$$

New Physics at 1 TeV

$$(100 \text{ GeV})^2 \text{ for } \Lambda_{SM} = 1 \text{ TeV}$$
$$(1 \text{ TeV})^2 \text{ for } \Lambda_{SM} = 100 \text{ TeV}$$

# TeraScaleの物理と余剰次元のモデル

SMの持つ諸問題を余剰次元を導入することによりTeraScaleで解決するモデルを紹介し、これらのモデルのLHCにおける典型的なシグナルについて議論する。

SMの諸問題を余剰次元を用いてどのスケールで解決されるかは定かではないが。。。

## Standard Model → New Physics



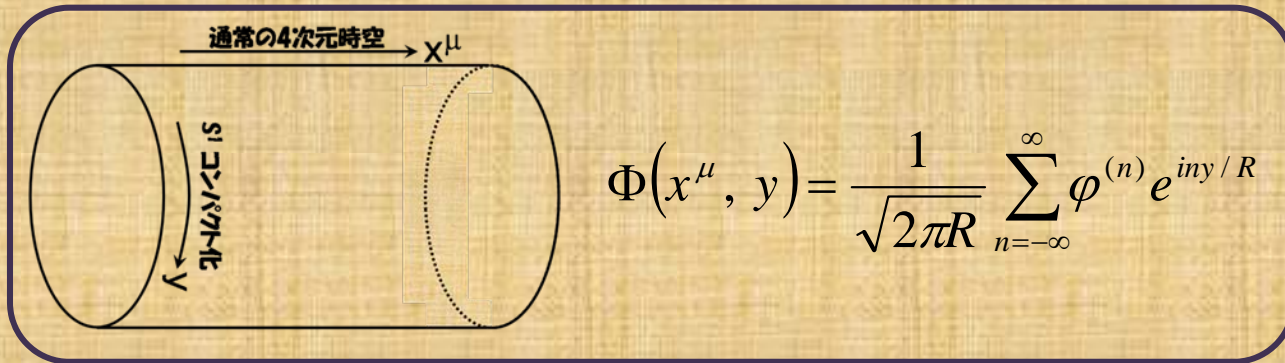
# 余剰次元模型と Kaluza-Klein 粒子たち

Arkani-Hamed, Dmopoulos, Dvali (1998)

## 5次元の作用

$$S_{bulk} = \int d^5x \left[ \frac{1}{2} (\partial_M \Phi)(\partial^M \Phi) - m_0^2 \Phi^2 + \dots \right]$$

$M=0,1,2,3,5$  &  $\Phi = \Phi(x^\mu, y)$



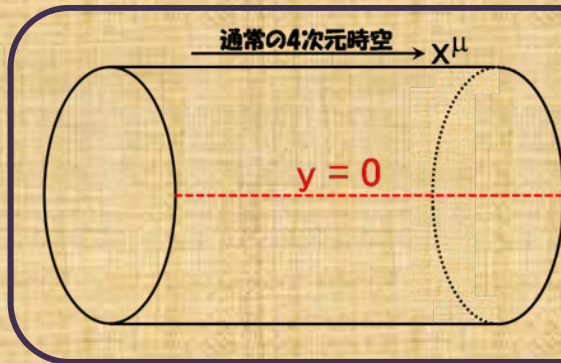
## 4次元の作用

$$S_{bulk} = \int d^4x \left[ \sum_n \left\{ \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi^{(n)}) (\partial^\mu \phi^{(n)}) - \left( \frac{n^2}{R^2} + m_0^2 \right) (\phi^{(n)})^2 \right\} + \dots \right]$$

余剰次元の影響は、(余剰次元を伝搬する)粒子のKK粒子(質量は $1/R$ 程度)として現れる!

# 余剰次元模型と Kaluza-Klein 粒子たち

余剰次元の影響は、(余剰次元を伝搬する)粒子のKK粒子(質量は $1/R$ 程度)として現れる!



Brane の存在  
( $y = 0$ でのみ値  
を持つ場の存在)

$$S = S_{bulk} + \int d^4x [\bar{\psi} (i\partial - m)\psi + g\bar{\psi}\psi\Phi(x^\mu, 0)]$$

Brane場はKK粒子を持たない!

結局

余剰次元の特徴的なシグナル  
= KK粒子の存在 (LHCで発見できる?)

# ADD模型

Arkani-Hamed, Dmopoulos, Dvali (1998)

4-dim

SM



Graviton

$$S_{bulk} = M_F^{2+\delta} \int d^4x d^\delta y \sqrt{-G} R_{4+\delta} = M_{Pl}^2 \int d^4x \sqrt{-g} R_4$$



$\delta$ -dim

$$M_{Pl}^2 = M_F^{2+\delta} (2\pi R)^\delta$$

余剰次元:  $T^\delta$

If  $M_F = 1 \text{ TeV}$

$\delta$	$r$
1	$10^{13} \text{ cm}$
2	$10^{-1} \text{ mm}$
3	$10^{-6} \text{ mm}$

$$(1\text{mm})^{-1} = 10^{-3}\text{eV}$$

$$G_{\mu\nu}(x^\mu, y^1, y^2, \dots, y^n) = \sum_n g_{\mu\nu}^{(\vec{n})}(x^\mu) \chi^{(\vec{n})}(\vec{y})$$

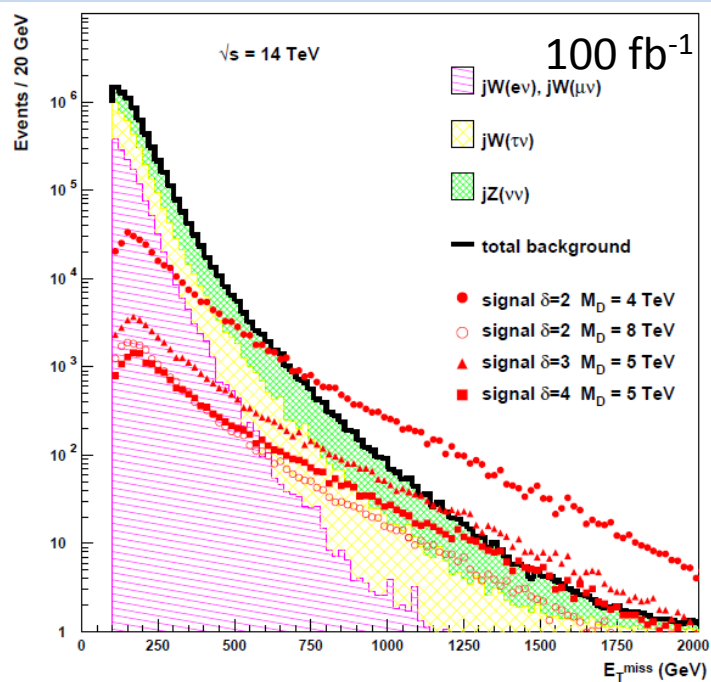
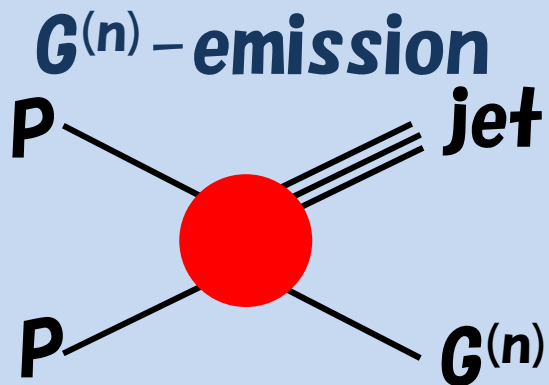
$$\chi^{(n)} \propto e^{i\frac{\vec{n}\cdot\vec{y}}{r}}, \quad (m_{KK}^{(\vec{n})})^2 = \frac{|\vec{n}|^2}{r^2}$$

LHCのシグナル = KK Graviton!

# ADD模型

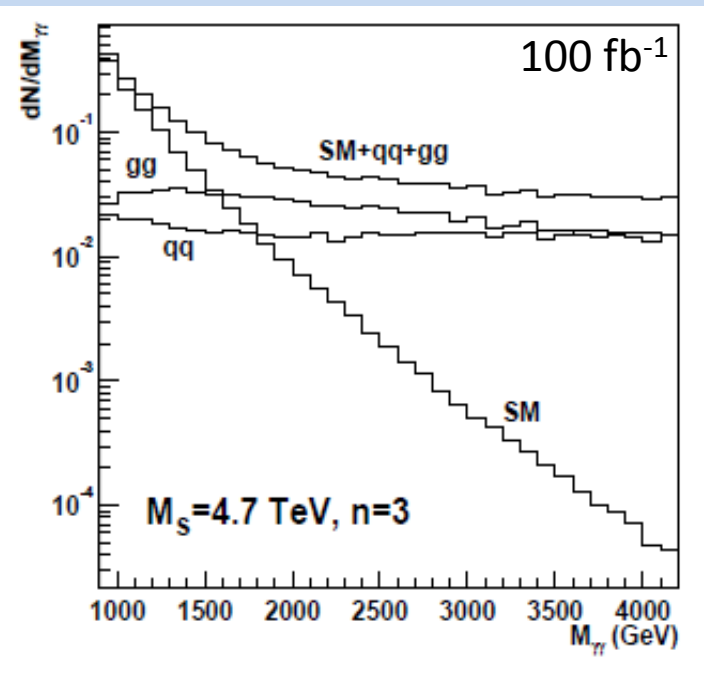
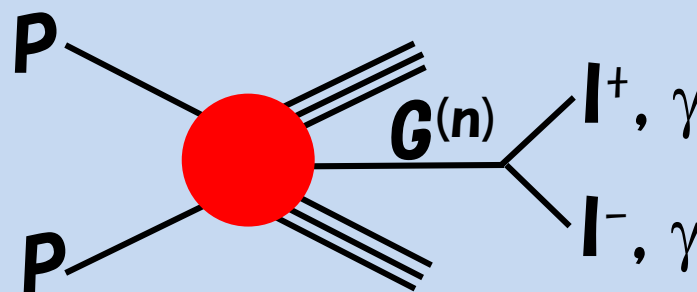
Gravitonの相互作用は $M_{pl}$ で抑制されてるけど、数が多いのでOK!

Arkani-Hamed, Dmopoulos, Dvali (1998)



L.Vacavant, I.Hinchliffe (2001)

## Virtual $G^{(n)}$



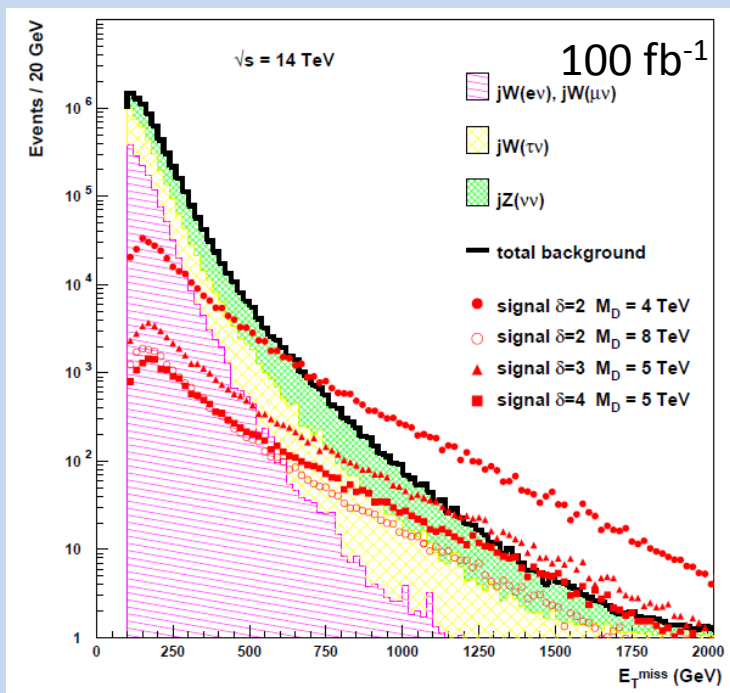
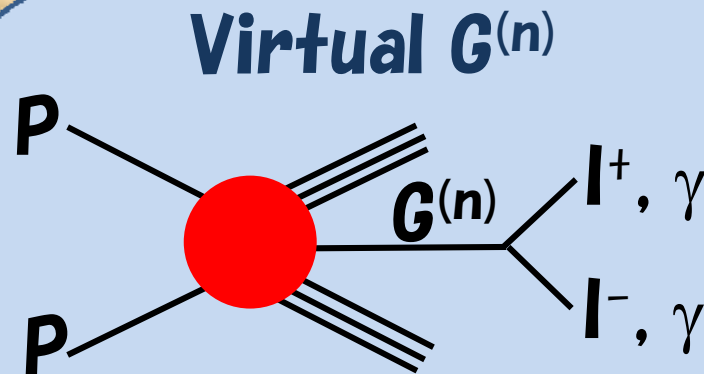
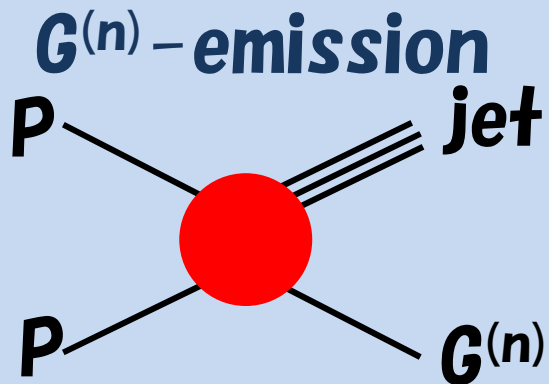
V.Kabachenko, A.Miagkov, A.Zenin (2001)



# ADD模型

Gravitonの相互作用は $M_{pl}$ で抑制されてるけど、数が多いのでOK!

Arkani-Hamed, Dmopoulos, Dvali (1998)



L. Vacavant, I. Hinchliffe (2001)

RealよりVirtualが効く。

実はAmplitudeは発散。

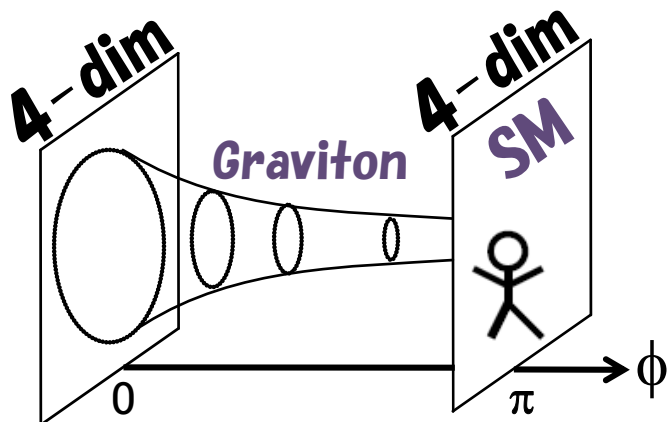
Regularizationが必要。  
(UV completion 模型が必要)

ちなみにこれらの結果は $\sqrt{s}$ が  
 $M_F$ より小さい場合を考えている。

大きい場合はB.H.生成  
→ 次のTalk

# RS模型

Randall, Sundrum (1999)



Slice of AdS (5-dim)

$$ds^2 = e^{-2kr_c|\phi|} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + r_c^2 d\phi^2$$

Einstein 方程式の解!

$$M_{\text{pl}}^2 = \frac{M^3}{k} (1 - e^{-2kr_c\pi})$$

$$v = M \times e^{-kr_c\pi}$$

$G^{(n)}$  mass

$$m_{KK}^{(n)} \sim x_n k e^{-kr_c\pi}$$

$$J_1(x_n) = 0$$

$$x_1 \sim 3.83$$

$$x_2 \sim 7.02$$

$$x_3 \sim 10.17$$

$$x_4 \sim 13.32$$

$G^{(n)}$  interactions

0-modeは $\phi = 0$ に、n-modeは $\phi = \pi$ に局在!

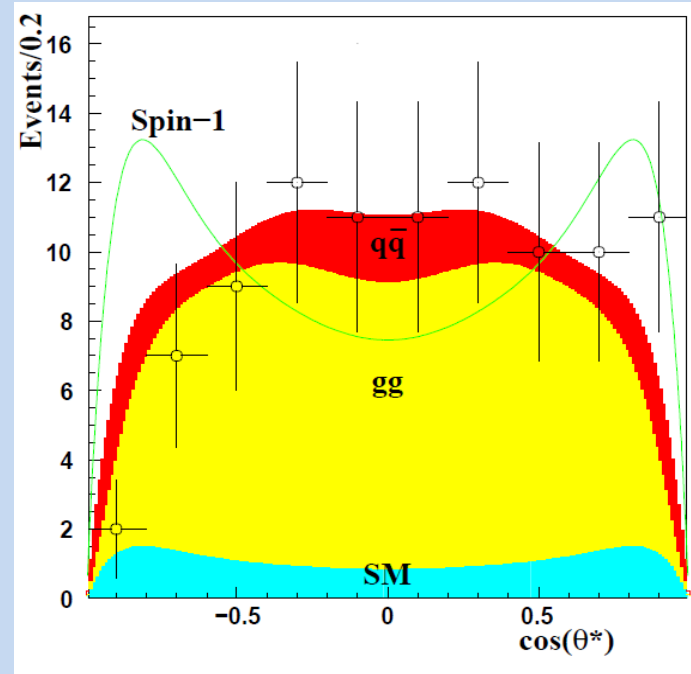
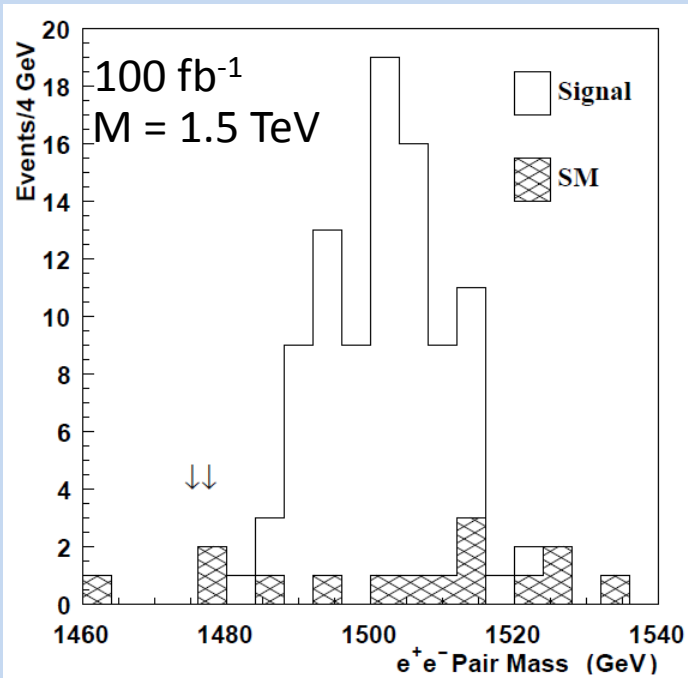
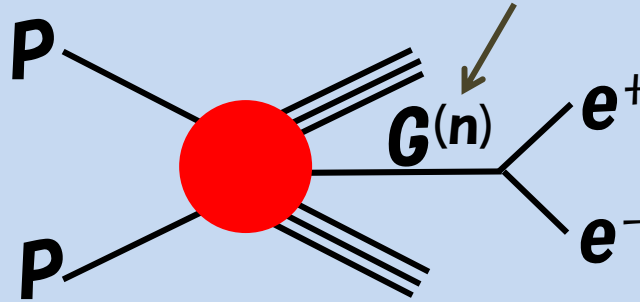
$$\mathcal{L}_{\text{int}} = - \frac{1}{\bar{M}_4} G_{\mu\nu}^{(0)} T^{\mu\nu} - \frac{1}{\bar{M}_4 e^{-kr_c\pi}} \sum_{n=1} G_{\mu\nu}^{(n)} T^{\mu\nu}$$

LHCのシグナル = KK Graviton!

# RS模型

Randall, Sundrum (1999)

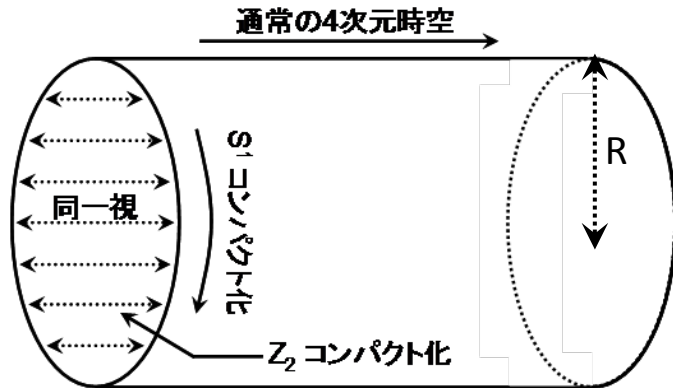
## $G^{(n)}$ Production (Narrow Resonance)



B.C.Allanach, K.Odagiri, M.A.Parker, B.R.Weber (2000)

# UED模型

Appelquist, Cheng, Dobrescu (2001)



**5dim Standard Model**

**全SM粒子が5次元時空を伝搬する模型**  
 ( → 全SM粒子がKK粒子を持つ )

**$n$ th-KK粒子の質量  $\sim n/R$**   
 (各KK数において縮退!)

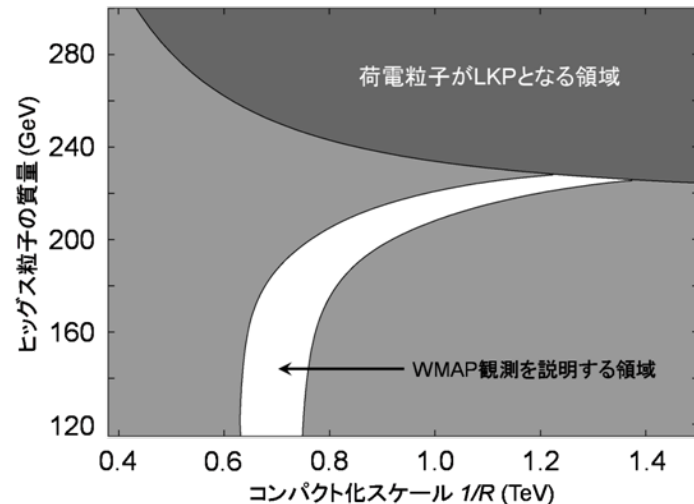
**LHCのシグナル**  
**= SMのKK粒子達!**

**KK parity の存在!**

- ( $A \rightarrow B + C$ ):  $p_{5A} = p_{5B} + p_{5C}$
- $S^1$ -compact:  $n_A = n_B + n_C$
- $Z_2$ -compact:  $(-1)^{n_A} = (-1)^{n_B + n_C}$

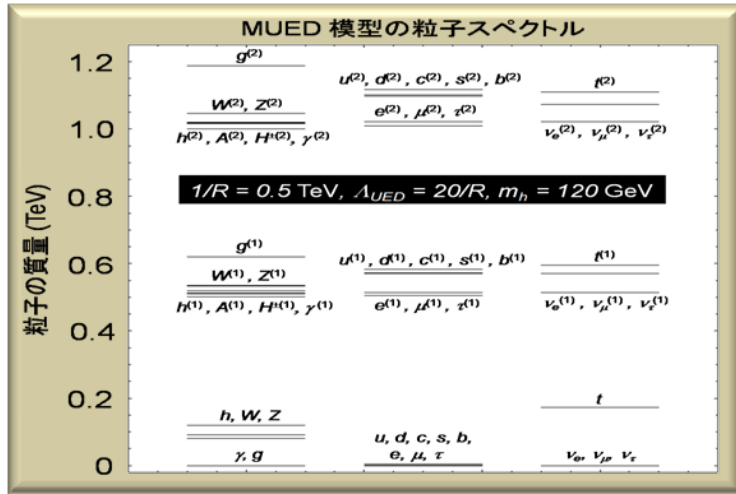
**$n$ th KK 粒子のparity =  $(-1)^n$**

**LKP = DM candidate**  
**(1<sup>st</sup> KK photon)**



# UED模型

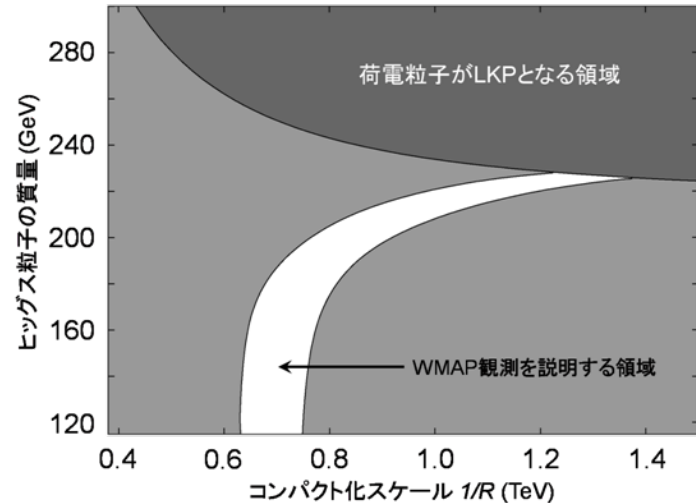
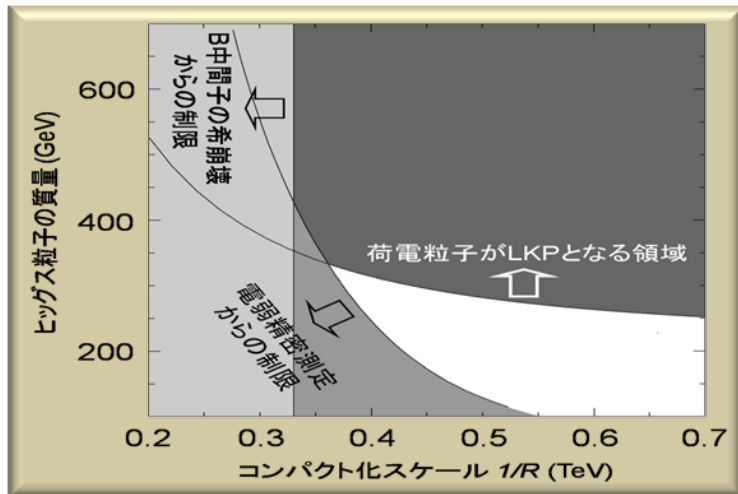
Appelquist, Cheng, Dobrescu (2001)



全SM粒子が5次元時空を伝搬する模型  
( → 全SM粒子がKK粒子を持つ )

$n$ th-KK粒子の質量  $\sim n/R$   
(各KK数において縮退!)

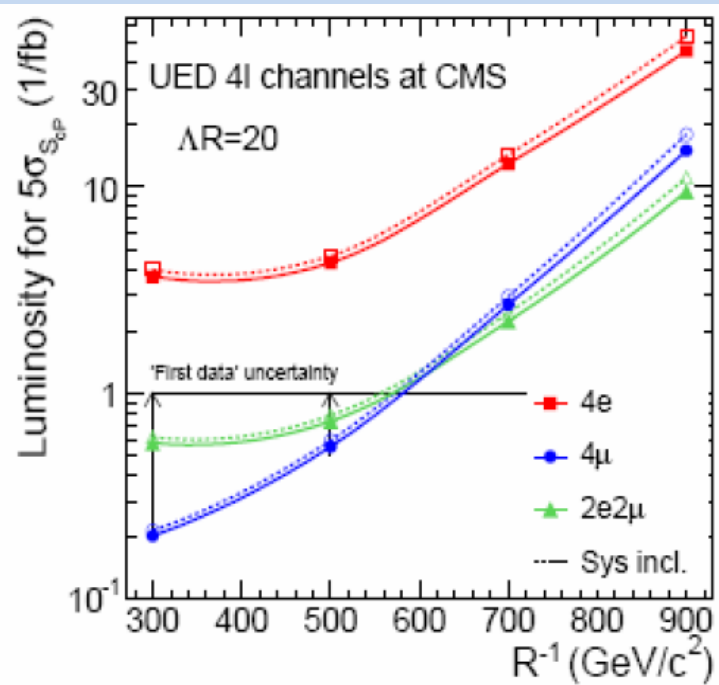
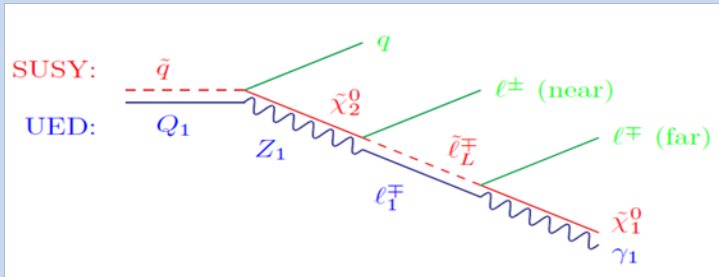
LHCのシグナル  
= SMのKK粒子達!



# UED模型

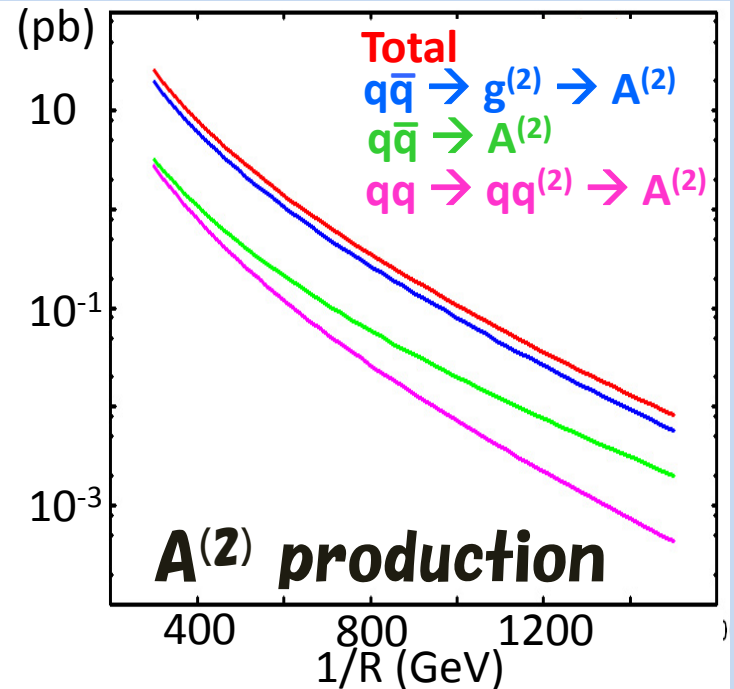
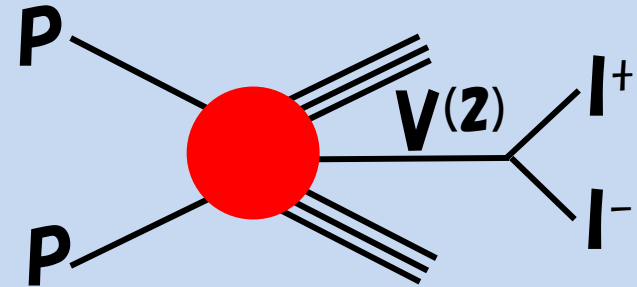
Appelquist, Cheng, Dobrescu (2001)

## Leptons with $E_{T\text{miss}}$



M.Kazana, CMS CR 2006/062

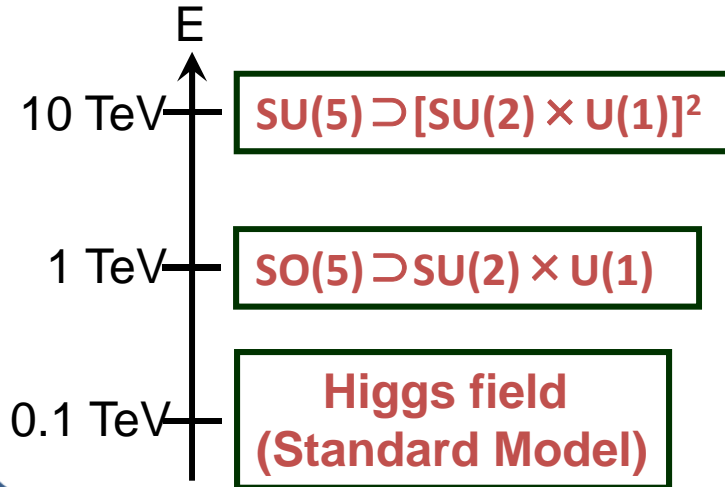
## $V^{(2)}$ productions



S.M., J.Sato, Senami, Yamanaka (2008?)

# LHT模型

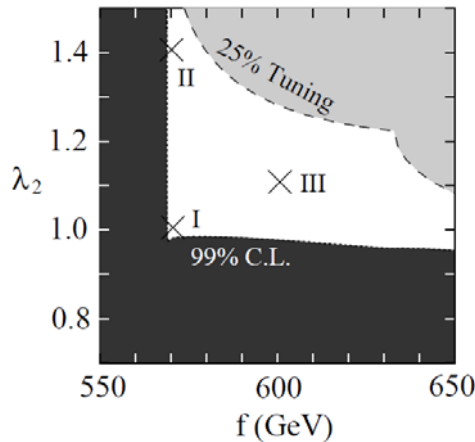
Arkani-Hamed, Cohoan, Katz, Nelson (2002)



1. HiggsはSU(5)  $\rightarrow$  SO(5)のpseudo NG 粒子
2. Explicit BreakingはHiggsの2次発散が1-loop levelで出ないようにアレンジ!  
模型自身はnl $\sigma$ -modelで記述!

SM 粒子のLH partners  
 $W_H, Z_H, A_H, T_+, T_-$  等々

## Constraints



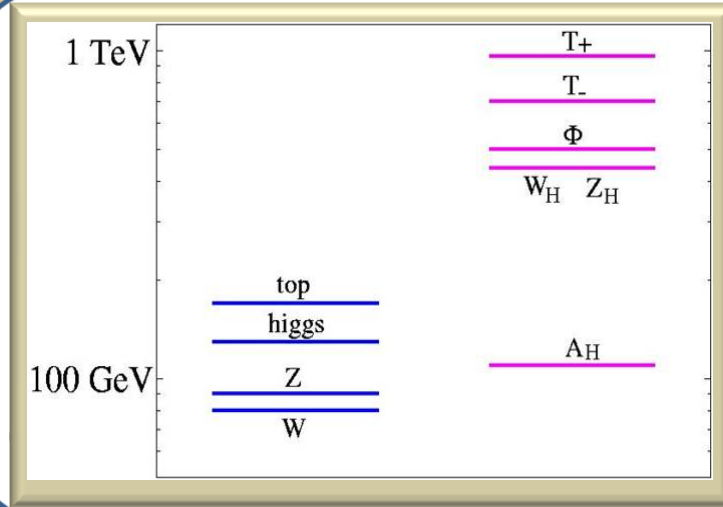
## Top partner productions

Colored New Particle =  $T_+$  &  $T_-$   
Top partner の質量  $\sim 800$  GeV

LHCのシグナル  
= Top Partners!

# LHT模型

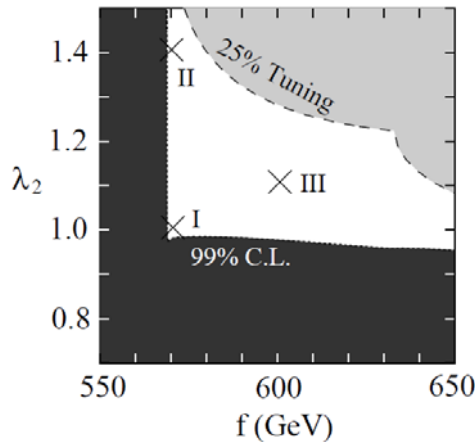
Arkani-Hamed, Cohoan, Katz, Nelson (2002)



1. HiggsはSU(5) → SO(5)のpseudo NG 粒子
2. Explicit BreakingはHiggsの2次発散が1-loop levelで出ないようにアレンジ!  
 模型自身はnlσ-modelで記述!

SM 粒子のLH partners  
 W<sub>H</sub>, Z<sub>H</sub>, A<sub>H</sub>, T<sub>+</sub>, T<sub>-</sub> 等々

## Constraints



## Top partner productions

Colored New Particle = T<sub>+</sub> & T<sub>-</sub>  
 Top partner の質量 ~ 800 GeV

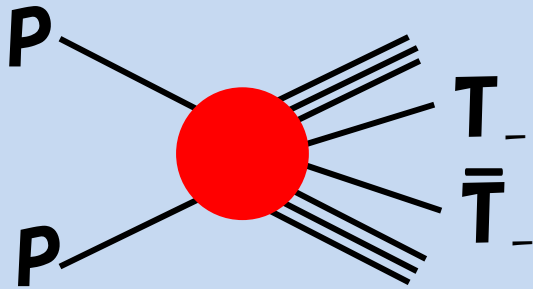
LHCのシグナル  
 = Top Partners!



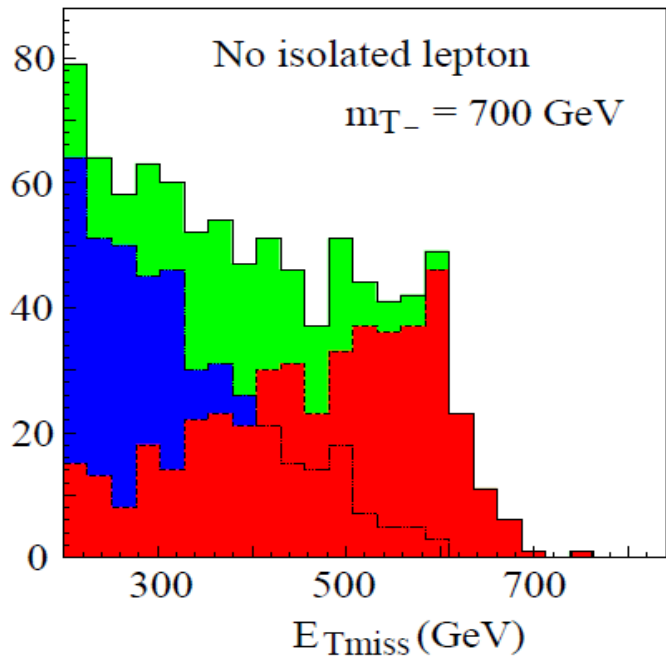
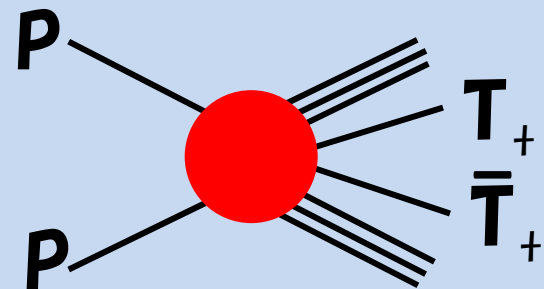
# LHT模型

Arkani-Hamed, Cohoan, Katz, Nelson (2002)

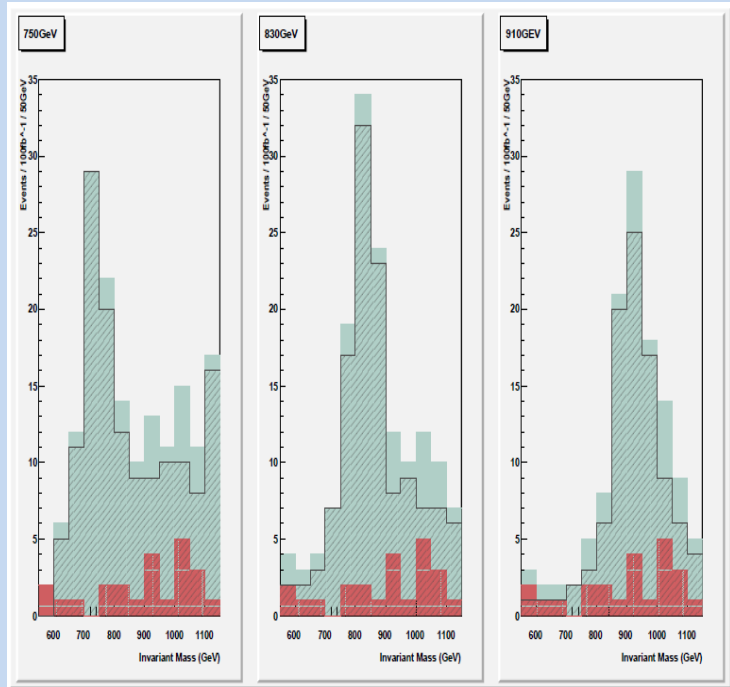
## $T_-$ production



## $T_+$ production



S.M, Nojiri, Nomura (2007)



S.M, T.Moroi, K.Tobe (2008?)

# Summary

- 1. 標準模型の問題点をTeraScaleにおいて解決する  
余剰次元模型等 (ADD,LS,UED、LHT)を紹介。**
- 2. LHCにおけるこれらNew Physicsのシグナルは、  
余剰次元を飛ぶ粒子のKK粒子たち。**
- 3. KK粒子たちのシグナルは結構派手！  
(SMとの区別は容易)**
- 4. 一旦New Physicsのシグナルが見えた際に、実際に  
どのような物理が実現しているか(模型間の区別)には  
詳細な解析は必要。**