

Discovery of minimal Universal Extra Dimension at the LHC

2011年1月25日 余剰次元2011@大阪大学

飛岡 幸作

東京大学数物連携宇宙研究機構
修士2年

Motivation

- ・暗黒物質候補を持つ余剰次元模型

Universal Extra Dimensions (UED)

LHCでの発見可能

- ・質量スペクトラムは縮退している
- ・先行研究は

$$4\text{leptons} + E_T^{\text{miss}}$$

- ・ジェットを用いた解析

質量決定として提唱されている M_{T2} を用いて解析する

Channel: 2jets + at least 1lepton/ 1fb^{-1} at 7TeV, 14TeV

- ・結果

14TeV 1fb^{-1} で $1/R \sim 1.1\text{TeV}$ まで発見可能

(UED暗黒物質シナリオが好むのは $1/R \sim 1.4\text{TeV}$)

流れ

1. minimal Universal Extra Dimension

暗黒物質熱的残存量

2. M_{T2} のカットとしての性質

→ SM, mUED

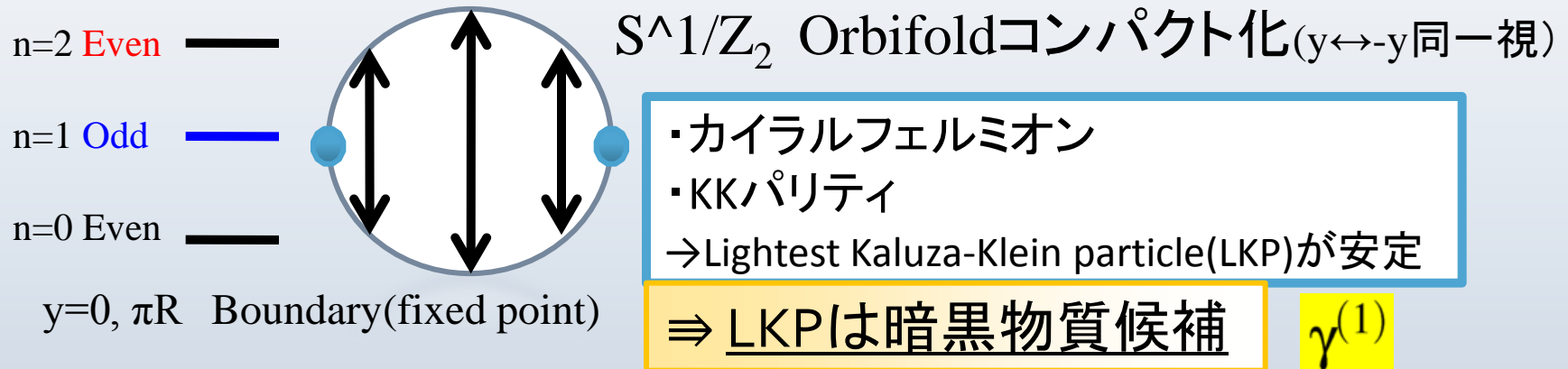
3. LHCでの発見可能性

2 jets + at least 1 lepton

Universal Extra Dimensions

“Universal”: 全ての標準模型粒子が余剰次元方向に伝搬する

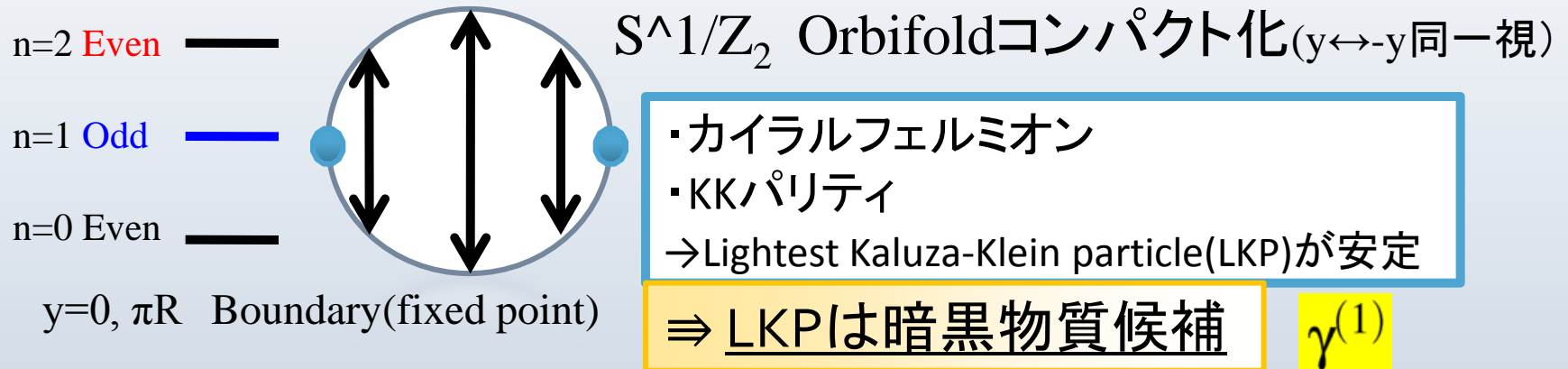
- ・Minkowski 4次元 + 半径 R の空間1次元 (S^1) $1/R \sim 1\text{TeV}$
- ・0モードが標準模型粒子、
高次モード(Kaluza-Klein modes)が無限に存在する(KK tower)



Universal Extra Dimensions

“Universal”: 全ての標準模型粒子が余剰次元方向に伝搬する

- ・Minkowski 4次元 + 半径 R の空間1次元 (S^1) $1/R \sim 1\text{TeV}$
- ・0モードが標準模型粒子、
高次モード(Kaluza-Klein modes)が無限に存在する(KK tower)



“minimal”UED → Boundaryに何も特別な項を置かない
 パラメータは3つ (like mSUGRA)

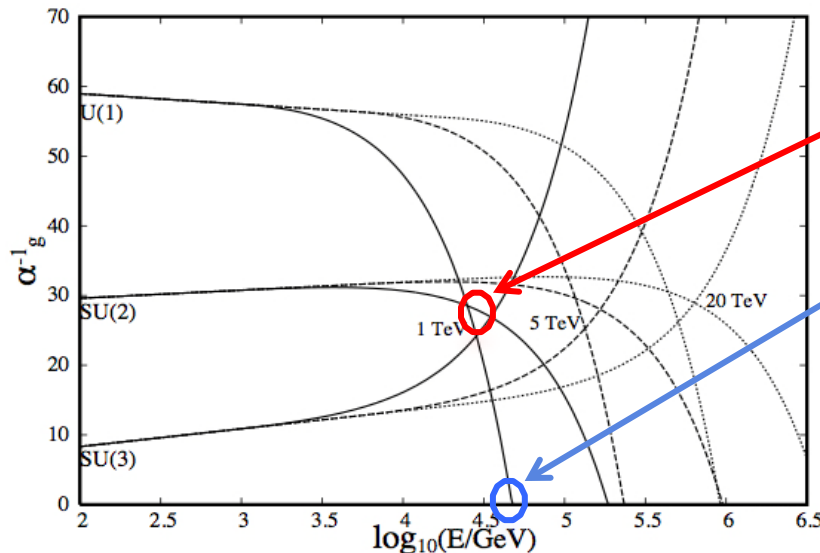
R, Λ, m_h

カットオフΛとゲージ結合定数

- 高いエネルギースケールでは、KKモードが次々増えて、ベータ関数の振る舞いがpower lawになる

$$\beta^{SM} \rightarrow \beta^{SM} + (\mu R - 1)\beta^{KK}, \quad R^{-1} < \mu < \Lambda$$

$$\frac{d}{d \ln \mu} \alpha^{-1} = -\frac{8\pi}{g^3} \beta \quad (\mu R \text{ は } \mu \text{ までに現れるKK粒子のセットの数 } n \text{ に対応})$$



3つのゲージ結合定数が近づく(GUT)

U(1)ゲージ結合定数がすぐに発散する

$$\Lambda R = 20 \sim 50$$

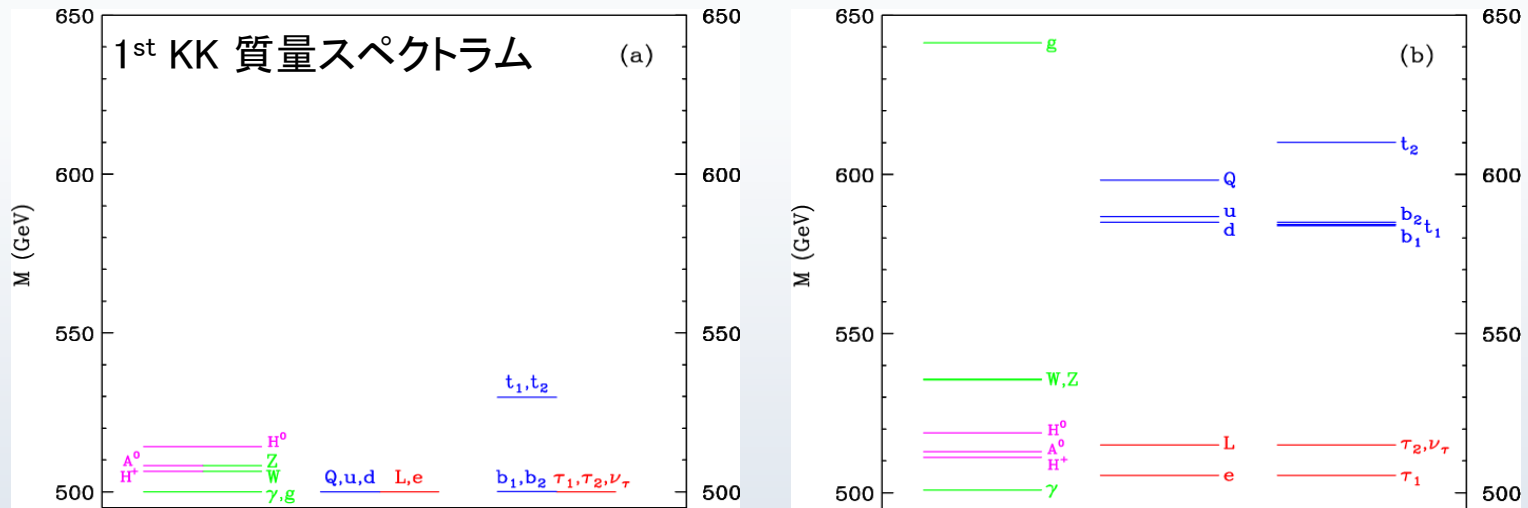
Figure 1: Evolution of gauge couplings for UED with $R^{-1} = 1, 5,$ and 20 TeV . For each of the three couplings, $\alpha_g \equiv g^2/4\pi$.

[Bhattacharyya, Datta, Majee, Raychaudhuri Nucl. Phys. B760(2007)117]

質量補正とLKP

Self energyの輻射補正を考えると質量スペクトラムが変わる

[Cheng, Matchev, Schmaltz PRD66(2002)036005]



$$m_n = \sqrt{m_{\text{SM}}^2 + \frac{n^2}{R^2}} \sim \frac{n}{R} \quad \longrightarrow \quad m_n = \sqrt{m_{\text{SM}}^2 + \frac{n^2}{R^2} + \delta m_n}$$

- KKモードの質量差がひらき、縮退が解ける
- ΛR が大きいほど質量差は大きくなる

$$m_{H_n^\pm}^2 = \frac{n^2}{R^2} + m_W^2 + \delta m_{H_n^\pm}^2$$

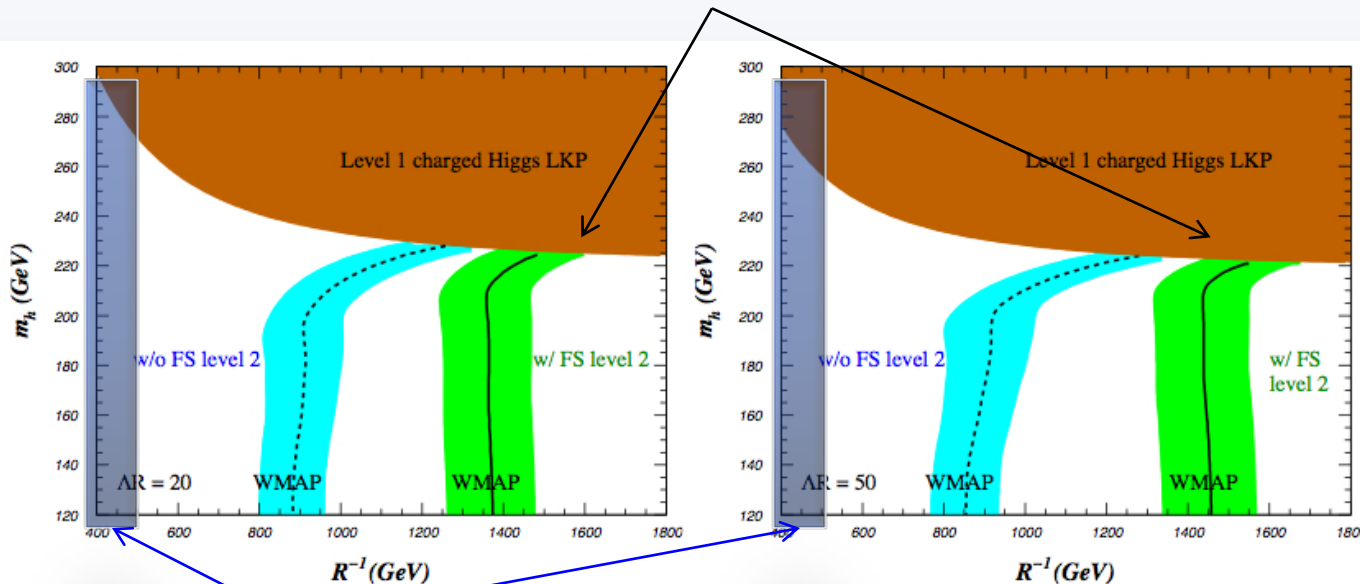
$$\delta m_{H_n^\pm}^2 = \left(\frac{n^2}{R^2} + m_W^2\right) \left(\frac{3g_2^2}{16\pi^2} + \frac{3g'^2}{36\pi^2} - 4\lambda_H\right) \ln \Lambda R$$

λ_H が大きいと、LKPは $\gamma^{(1)}$ ではなく荷電ヒッグスのKKモード $H^{\pm(1)}$ となる (暗黒物質にはならない)

暗黒物質の残存量

Coannihilation と 2次KKモードの寄与が重要

- Coannihilation
- + 2次KKモードの共鳴 [Kakizaki, Matsumoto, Senami PRD74(2006) 023504]など
- + 2次KKモード終状態 [Belanger, Kakizaki, Pukhov hep-ph/1001.2577 (Dec 2010)]



電弱精密測定と $b \rightarrow s\gamma$ による制限 $500\text{GeV} \leq 1/R$

mUED暗黒物質シナリオは $1/R \sim 1.4\text{TeV}$ 付近

調べる領域: $500\text{GeV} \leq 1/R \leq 1.6\text{TeV}$

mUEDのLHCシグナル

・散乱断面積が大きい。LHCで最も生成されるのは

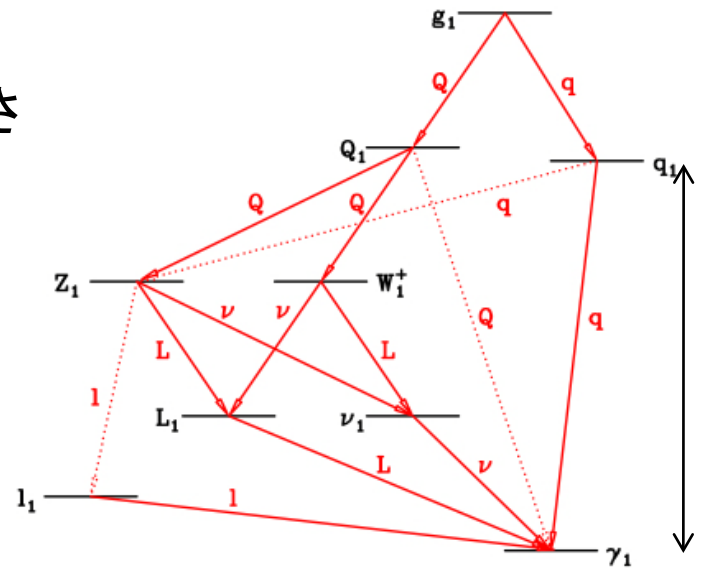
(Q_1, q_1) 対生成

(Q_1, q_1) (g_1) 生成

・ $Q_1 \rightarrow Q + Z_1$

の崩壊から複数の荷電レプトンを出す

先行研究: **4leptons + E_T^{miss}**



($\Lambda R=20, 1/R=500\sim 700\text{GeV}$) $\sim 100\text{GeV}$

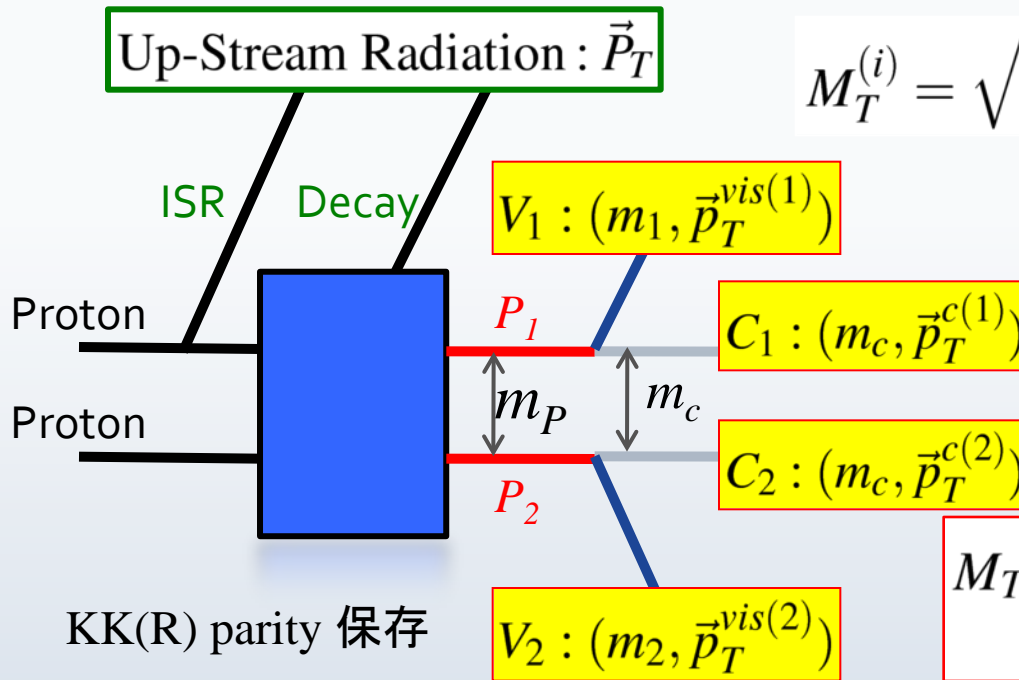
ジェットを用いて発見可能性を調べたい

・ M_{eff} だとバックグラウンドに埋もれてしまう

$$M_{eff} = \sum_{jet} p_T^{jet} + \sum_{lepton}^{all} p_T^{lep} + E_T^{miss}$$

・ M_{T2} をカットとして用いるとmUEDシグナルとバックグラウンドを分離できる (SMバックグラウンドは $M_{T2} \leq m_t$ で抑えられる)

M_{T2}



$$M_T^{(i)} = \sqrt{m_i^2 + m_c^2 + 2(E_T^{vis(i)} E_T^{c(i)} - \vec{p}_T^{vis(i)} \vec{p}_T^{c(i)})}$$

$$E_T^{vis(i)} = \sqrt{m_i^2 + |\vec{p}_T^{vis(i)}|^2}$$

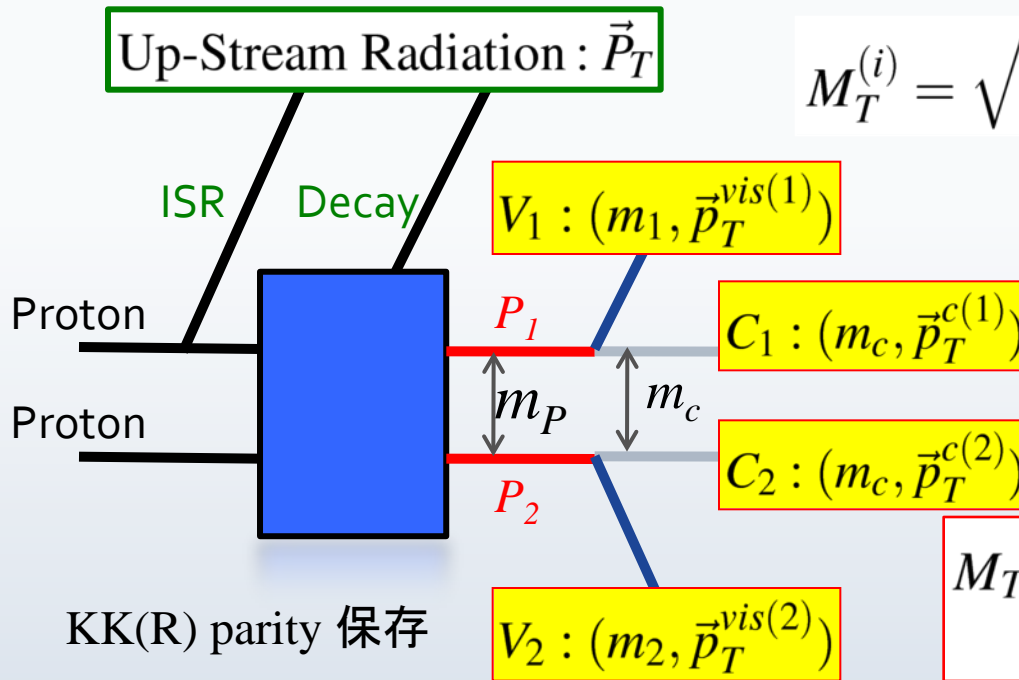
$$E_T^{c(i)} = \sqrt{m_c^2 + |\vec{p}_T^{c(i)}|^2}$$

$$\vec{p}_T^{miss} = \vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)}$$

$$M_{T2} \equiv \min_{\vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)} = \vec{p}_T^{miss}} [\max\{M_T^{(1)}, M_T^{(2)}\}]$$

$$USR : \vec{P}_T \equiv -\vec{p}_T^{vis(1)} - \vec{p}_T^{vis(2)} - \vec{p}_T^{miss}$$

M_{T2}



$$M_T^{(i)} = \sqrt{m_i^2 + m_c^2 + 2(E_T^{vis(i)} E_T^{c(i)} - \vec{p}_T^{vis(i)} \vec{p}_T^{c(i)})}$$

$$E_T^{vis(i)} = \sqrt{m_i^2 + |\vec{p}_T^{vis(i)}|^2}$$

$$E_T^{c(i)} = \sqrt{m_c^2 + |\vec{p}_T^{c(i)}|^2}$$

$$\vec{p}_T^{miss} = \vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)}$$

$$M_{T2} \equiv \min_{\vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)} = \vec{p}_T^{miss}} [\max\{M_T^{(1)}, M_T^{(2)}\}]$$

$$\text{USR} : \vec{P}_T \equiv -\vec{p}_T^{vis(1)} - \vec{p}_T^{vis(2)} - \vec{p}_T^{miss}$$

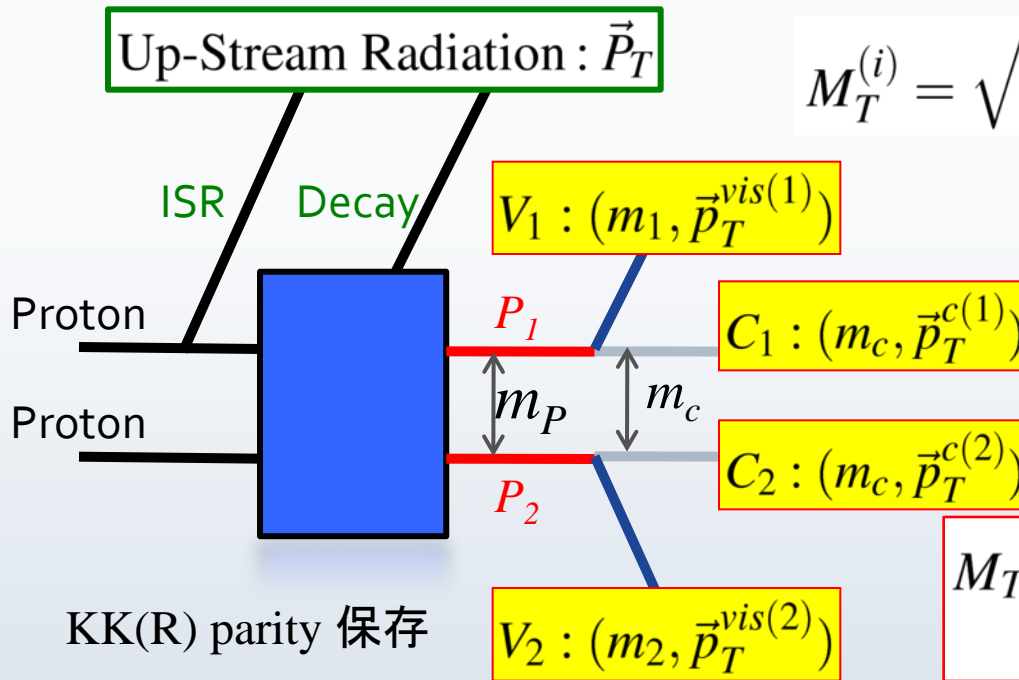
一般に m_c はわからない \Rightarrow テスト質量 \tilde{m}_c を設定して M_{T2} を計算する。

• Endpointの振る舞い

$$\text{If } \tilde{m}_c = m_c, \quad M_{T2}^{max} = m_P$$

$$\text{If } \tilde{m}_c \neq m_c, \quad M_{T2}^{max} : \text{USR}(P_T) \ \& \ \tilde{m}_c \text{ dependent}$$

M_{T2}



$$M_T^{(i)} = \sqrt{m_i^2 + m_c^2 + 2(E_T^{vis(i)} E_T^{c(i)} - \vec{p}_T^{vis(i)} \vec{p}_T^{c(i)})}$$

$$E_T^{vis(i)} = \sqrt{m_i^2 + |\vec{p}_T^{vis(i)}|^2}$$

$$E_T^{c(i)} = \sqrt{m_c^2 + |\vec{p}_T^{c(i)}|^2}$$

$$\vec{p}_T^{miss} = \vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)}$$

$$M_{T2} \equiv \min_{\vec{p}_T^{c(1)} + \vec{p}_T^{c(2)} = \vec{p}_T^{miss}} [\max\{M_T^{(1)}, M_T^{(2)}\}]$$

$$\text{USR} : \vec{P}_T \equiv -\vec{p}_T^{vis(1)} - \vec{p}_T^{vis(2)} - \vec{p}_T^{miss}$$

一般に m_c はわからない \Rightarrow テスト質量 \tilde{m}_c を設定して M_{T2} を計算する。

- Endpointの振る舞い
 - If $\tilde{m}_c = m_c$, $M_{T2}^{max} = m_P$
 - If $\tilde{m}_c \neq m_c$, $M_{T2}^{max} : \text{USR}(P_T) \ \& \ \tilde{m}_c$ dependent

$\tilde{m}_c \Rightarrow 0$ と設定する (M_{T2} event selection)

バックグラウンドに対する M_{T2} の性質

①親粒子の質量で上限

$$M_{T2} \leq m_P \leq m_t$$

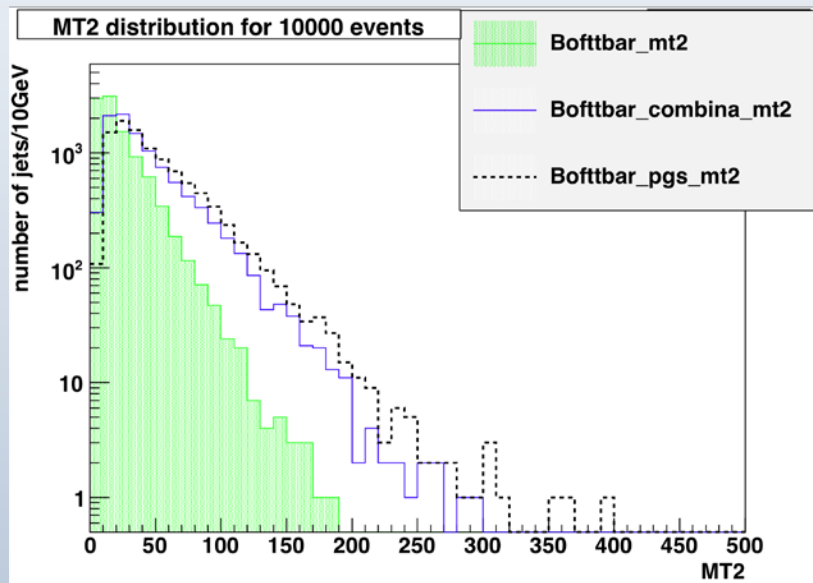
$$\tilde{m}_c \Rightarrow 0$$

観測粒子の質量は小さい、

$$M_T^{(i)} = \sqrt{|\vec{p}_T^{vis(i)}| |\vec{p}_T^{c(i)}| - \vec{p}_T^{vis(i)} \cdot \vec{p}_T^{c(i)}}$$

②missingのないイベントの $M_{T2} \rightarrow 0$.

③Fake missing ($\vec{p}_T^{miss} \parallel \vec{p}_T^{vis(i)}$)のイベントも、 $M_{T2} \rightarrow 0$ ($\vec{p}_T^{c(i)} = \vec{p}_T^{miss}$)



$m_t \leq M_{T2}$ 残留バックグラウンド

1. Combinatorics $t\bar{t}$ など

2. 観測粒子とmissingの起源に関係がない場合

W/Z+2jets, Diboson+jets

$t\bar{t}$ +jets など

シグナルに対する M_{T2} の性質

$$\tilde{m}_c \Rightarrow 0$$

- ・USRがない場合のEndpoint

$$M_{T2} \leq \frac{m_P^2 - m_c^2}{m_P} \equiv 2\mu_0$$

単純な質量差 Δm より大きい！

$$2\mu_0 = \Delta m \left(2 - \frac{\Delta m}{m_P} \right) \geq \Delta m$$

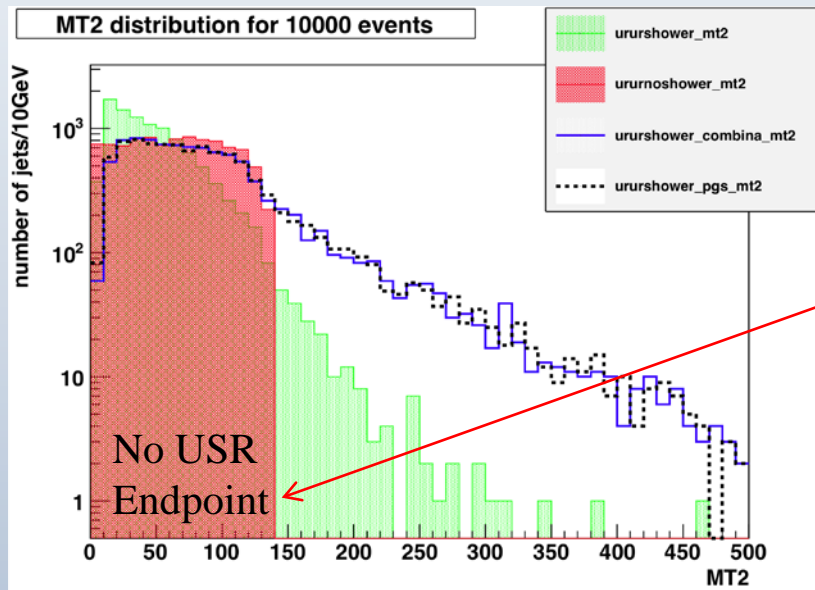
ISRや崩壊 → USR

“重い粒子からはハードなISRが出やすい”

- ・USRがある場合のEndpoint

USRの効果でEndpointはさらに大きくなる!!

$$M_{T2}^{max}(P_T) = \sqrt{4\mu^2(P_T) + 2P_T\mu(P_T)} \geq 2\mu_0$$



$$\mu(P_T) \equiv \frac{m_P^2 - m_c^2}{2m_P} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{P_T}{2m_P} \right)^2} - \frac{P_T}{2m_P} \right)$$

KKquark: 574 GeV LKP: 501 GeV
 $2\mu_0 = 136$ GeV

シグナルに対する M_{T2} の性質

$$\tilde{m}_c \Rightarrow 0$$

- ・USRがない場合のEndpoint

$$M_{T2} \leq \frac{m_P^2 - m_c^2}{m_P} \equiv 2\mu_0$$

単純な質量差 Δm より大きい！

$$2\mu_0 = \Delta m \left(2 - \frac{\Delta m}{m_P}\right) \geq \Delta m$$

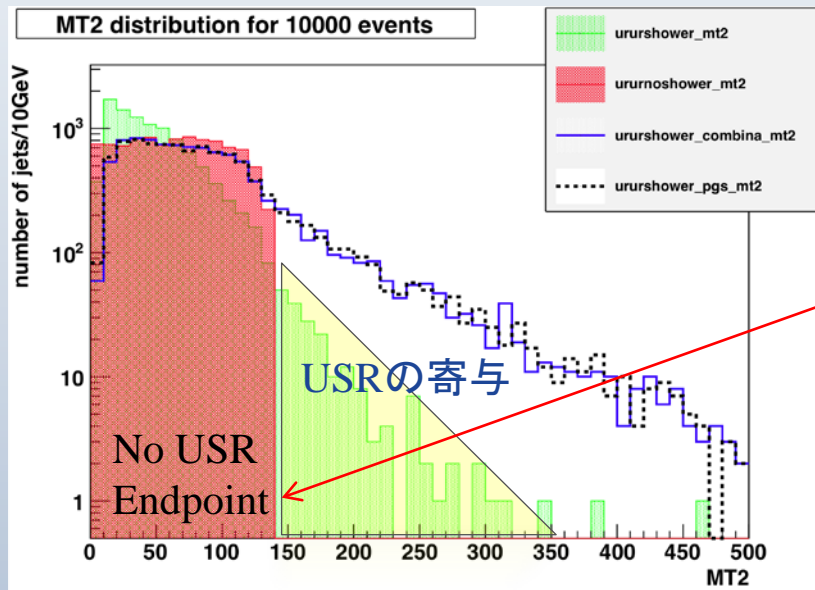
ISRや崩壊 → USR

“重い粒子からはハードなISRが出やすい”

- ・USRがある場合のEndpoint

USRの効果でEndpointはさらに大きくなる!!

$$M_{T2}^{max}(P_T) = \sqrt{4\mu^2(P_T) + 2P_T\mu(P_T)} \geq 2\mu_0$$



$$\mu(P_T) \equiv \frac{m_P^2 - m_c^2}{2m_P} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{P_T}{2m_P}\right)^2} - \frac{P_T}{2m_P} \right)$$

KKquark: 574 GeV LKP: 501 GeV
 $2\mu_0 = 136 \text{ GeV}$

生成イベント

- ・検出器シミュレーションはすべてPGS
- ・mUEDシグナルはPythiaで生成

Parameter	$m_h = 120\text{GeV}$ (fixed)	Luminosity	
	$1/R = 500, 600, \dots, 1600\text{GeV}$	at 7TeV	5 ~ 10 fb ⁻¹
	$\Delta R = 20, 30, 40, 50$	at 14TeV	2 ~ 10 fb ⁻¹

- ・SMバックグラウンドはMadgraphで生成し、Matchingを行った。
- ・(N)NLOの散乱断面積に規格化 ($\times K \text{ factor} = \sigma_{(N)\text{NLO}} / \sigma_{\text{matching}}$)

SM background	Luminosity (σ_{matching}) 7TeV	14TeV
$t\bar{t} + 0, 1, 2 \text{ jets}$	1.4 fb ⁻¹ (106 pb)	1.1 fb ⁻¹ (623 pb)
$W \rightarrow lv + 1, 2 \text{ jets}^*$	1~1.6 fb ⁻¹ (137 pb)	1~2 fb ⁻¹ (608 pb)
$Z \rightarrow ll + 1, 2 \text{ jets}^*$	1.2 fb ⁻¹ (13 pb)	2.5 fb ⁻¹ (58 pb)
$Z \rightarrow vv + 1, 2 \text{ jets}^*$	1.2 fb ⁻¹ (36 pb)	1 fb ⁻¹ (186 pb)
Diboson + 0, 1, 2 jets	1~1.5 fb ⁻¹ (34 pb)	1~2 fb ⁻¹ (320 pb)

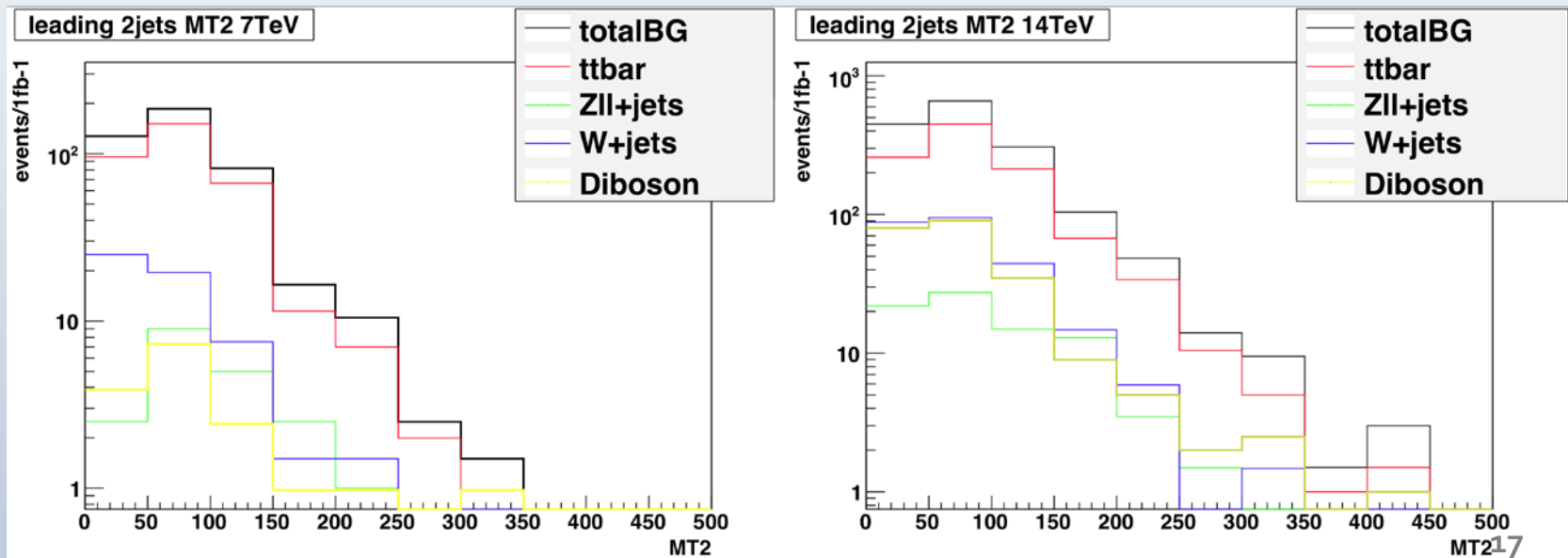
(* W/Z +jetsは leading partonの $P_T > 100\text{GeV}$ というカットを課して生成した)

[Moch Uwer Nucl. Phys.B 183 (2008) 75] [Campbell, Huston, Stirling Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 89]

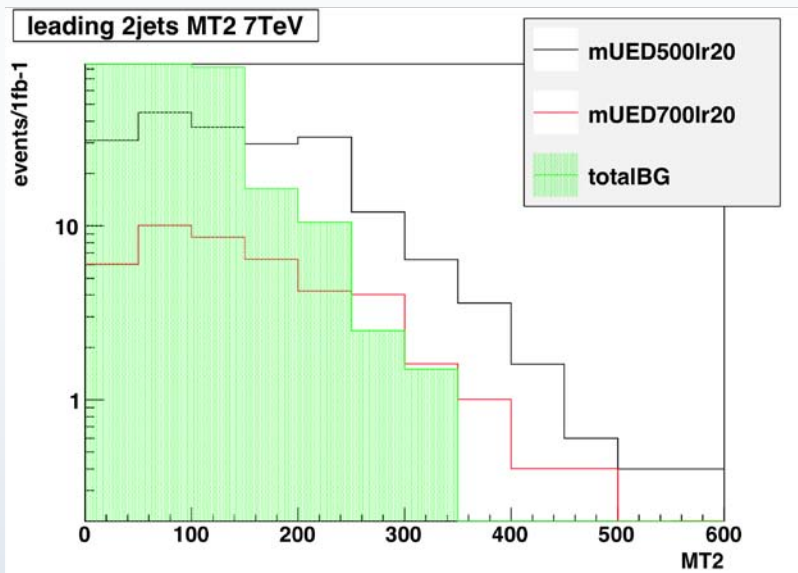
イベントセレクション

1. At least one lepton with $p_T > 20 \text{ GeV}$
2. $p_T^{\text{jet1}} > 100 \text{ GeV}$, $p_T^{\text{jet2}} > 20 \text{ GeV}$
3. $E_T^{\text{miss}} > 100 \text{ GeV}$
4. If only one lepton, $M_T(\text{lepton, missing}) > 100 \text{ GeV}$

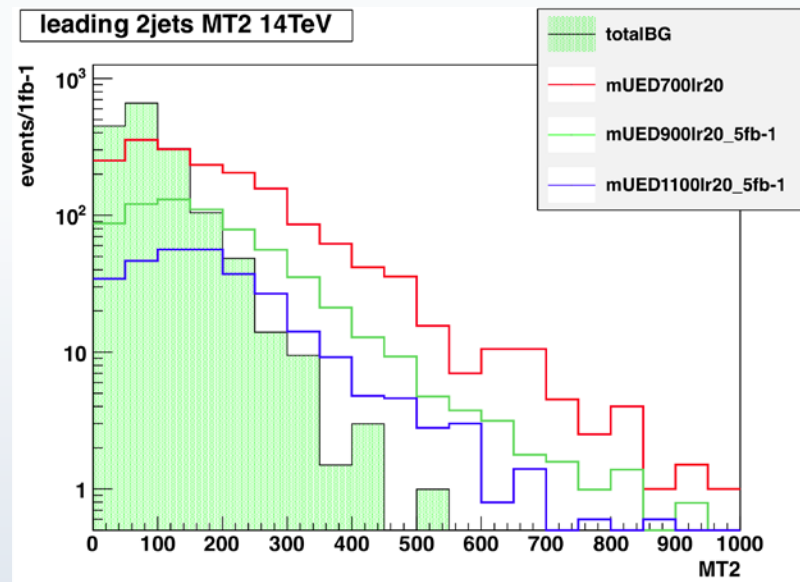
Construct M_{T2} of leading 2 jets



mUED vs Background



7TeV 1fb^{-1}
 $1/R = 500\text{GeV}$ (黒), 700GeV (赤)



14TeV 1fb^{-1}
 $1/R = 700$ (赤), 900 (緑), 1100 (青) GeV



$M_{T2} \geq 200\text{GeV}, 250\text{GeV}, 300\text{GeV} \dots$ (50GeV step)
 でSignificanceを評価し、発見可能性を調べる。

発見可能性

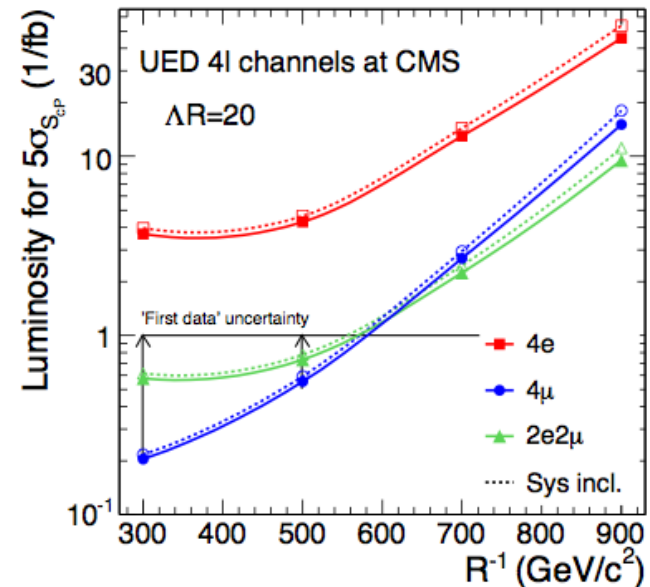
[ATLAS Collaboration, hep-ph/0107056]

バックグラウンドの不定性(20%)を考慮したSignificance Z_B を用いて
シグナル ≥ 10 , $Z_B > 5$ を”発見”とした。

Significance/7TeV 1fb ⁻¹				
R^{-1} (GeV)	$\Lambda R = 20$	$\Lambda R = 30$	$\Lambda R = 40$	$\Lambda R = 50$
500	4.54	6.05	6.36	6.51
600	2.26	3.08	3.32	4.29
Significance/14TeV 1fb ⁻¹				
600~800	10+	10+	10+	10+
900	9.79	10+	10+	10+
1000	7.68	7.98	8.49	9.11
1100	5.90	5.61	5.13	6.35
1200	4.50	4.63	4.49	3.52
1300	2.75	3.58	3.45	4.36
1400	2.06	2.58	1.49	2.56
1500	(1.64)	(1.40)	(1.69)	(1.35)
1600	(0.58)	(1.03)	(1.03)	(1.09)

[M.Kazana (CMS Conference report)
Acta Phys.Polon.B38:449-458,2007]

先行研究: $4\text{leptons} + E_T^{\text{miss}}$



LKP暗黒物質シナリオ $1/R = 1300 \sim 1600 \text{ GeV}$

発見可能性

[ATLAS Collaboration, hep-ph/0107056]

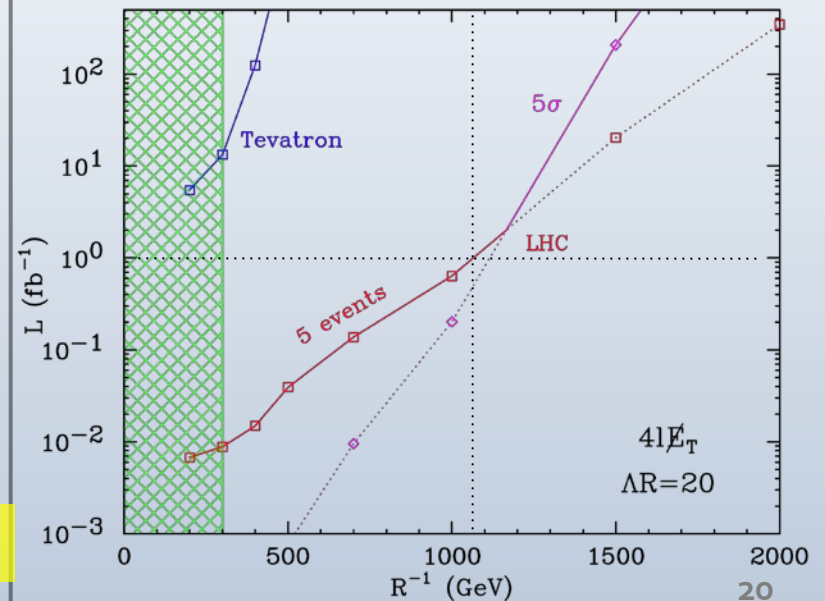
バックグラウンドの不定性(20%)を考慮したSignificance Z_B を用いて
 シグナル ≥ 10 , $Z_B > 5$ を”発見”とした。

Significance/7TeV 1fb ⁻¹				
R^{-1} (GeV)	$\Delta R = 20$	$\Delta R = 30$	$\Delta R = 40$	$\Delta R = 50$
500	4.54	6.05	6.36	6.51
600	2.26	3.08	3.32	4.29
Significance/14TeV 1fb ⁻¹				
600~800	10+	10+	10+	10+
900	9.79	10+	10+	10+
1000	7.68	7.98	8.49	9.11
1100	5.90	5.61	5.13	6.35
1200	4.50	4.63	4.49	3.52
1300	2.75	3.58	3.45	4.36
1400	2.06	2.58	1.49	2.56
1500	(1.64)	(1.40)	(1.69)	(1.35)
1600	(0.58)	(1.03)	(1.03)	(1.09)

LKP暗黒物質シナリオ $1/R = 1300 \sim 1600 \text{ GeV}$

[Cheng, Matchev, Schmaltz
 PRD66,056006(2002)]

先行研究: $4\text{leptons} + E_T^{\text{miss}}$
 100 fb⁻¹で $1/R \sim 1500 \text{ GeV}$ 到達可能(?)



まとめ

- M_{T2} を用いた解析の有効性を議論した
- 14TeV 1fb⁻¹ ではLKP暗黒物質シナリオ一部の領域に迫る
- 発見可能性は先行研究に比べ向上している
- バックグラウンドとシグナルを分離できているので、さらに高いLuminosityではより多くの領域が発見できるだろう

今後の展望

- 1.どの程度のLuminosityでLKP暗黒物質シナリオの領域をカバーできるか
- 2.パラメーターの測定

Significance Z_B

$$Z_B = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2p)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

[J. T. Linnemann,
Measures of significance
in HEP and astrophysics, 2003]

バックグラウンドが N_{data} 以上の数を生じる確率 p は、

$$p = A \int_0^\infty db G(b; N_b, \delta N_b) \sum_{n=N_{data}}^\infty \frac{e^{-b} b^n}{n!}$$

$$A^{-1} = \int_0^\infty db G(b; N_b, \delta N_b) \sum_0^\infty \frac{e^{-b} b^n}{n!},$$

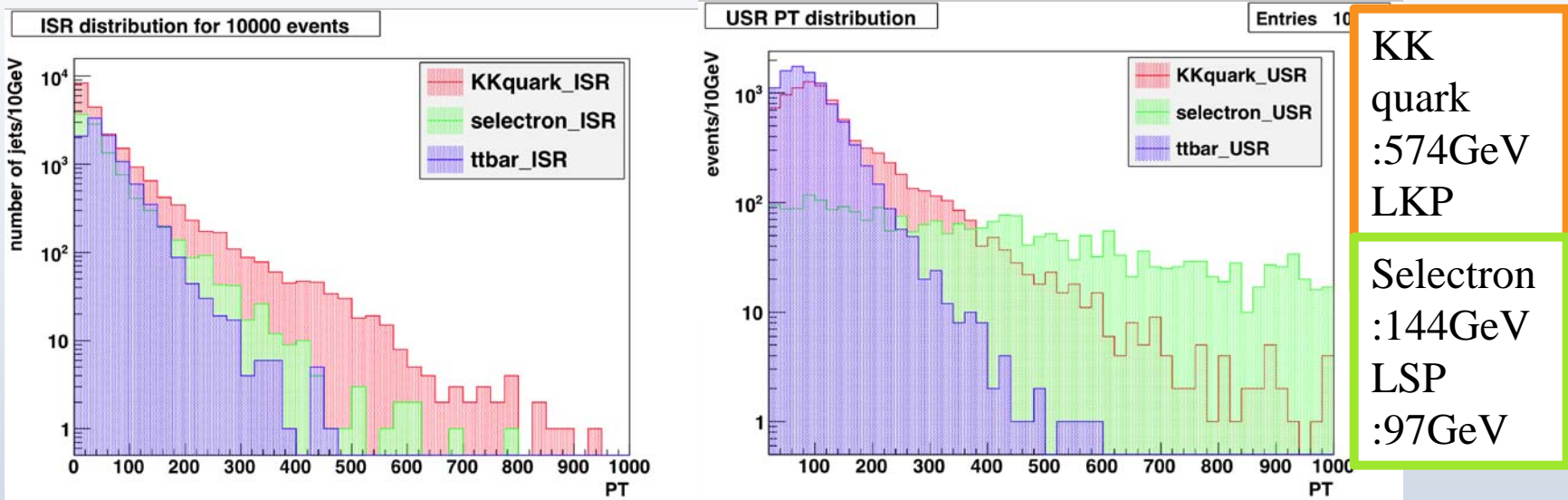
G はガウス関数で N_b は平均、 δN_b は分散

Backup Slides

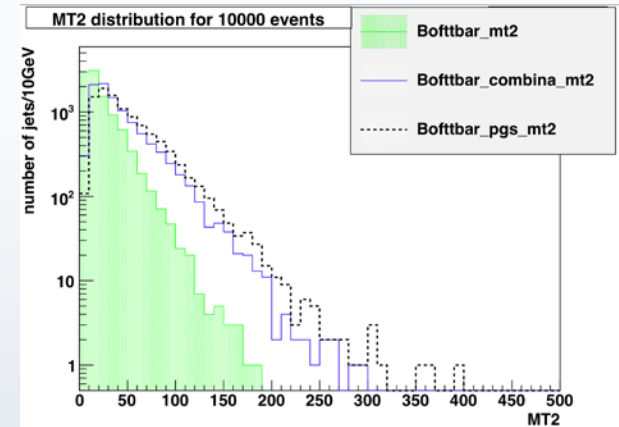
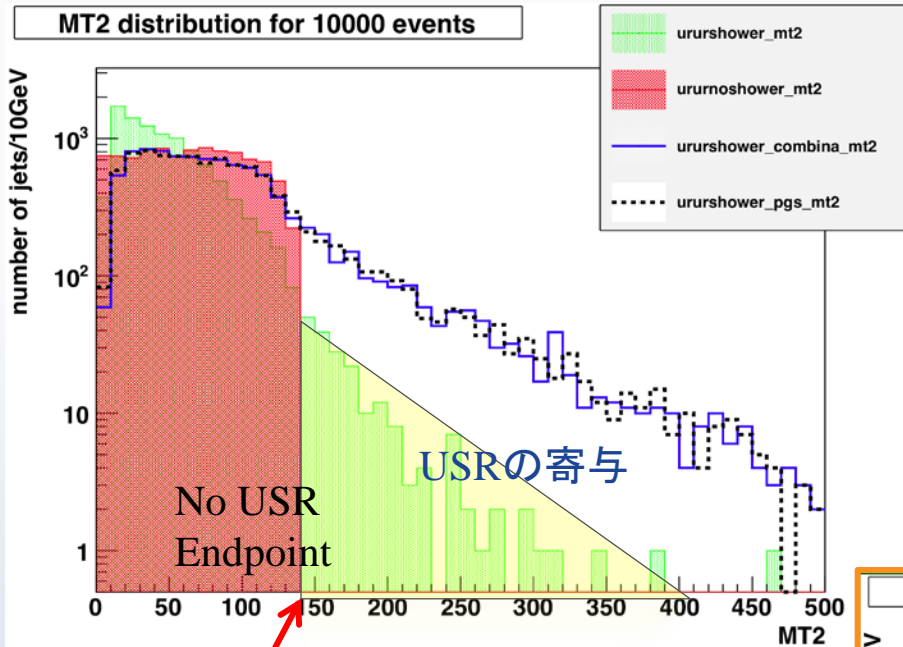
ISR & USR

ISRや崩壊→ USR

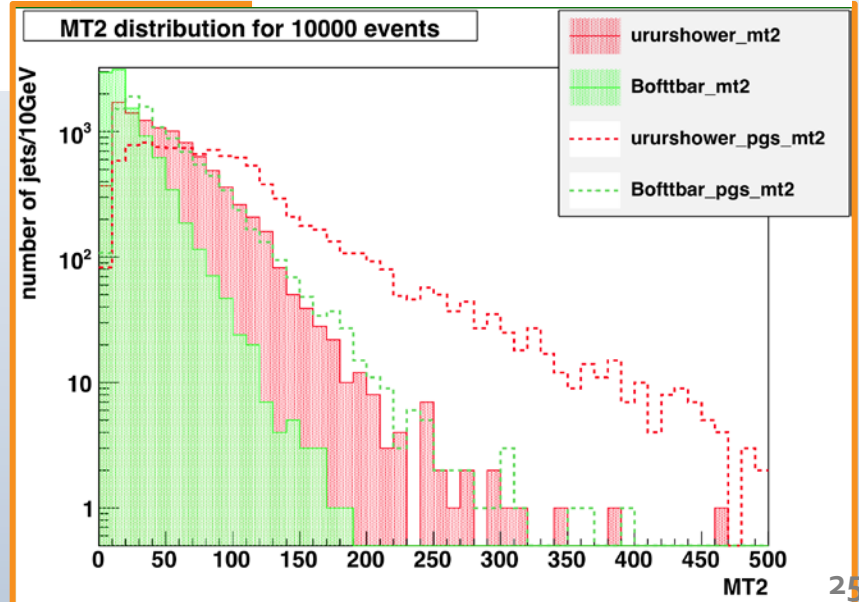
“重い粒子からはハードなISRが出やすい”



シグナルに対する M_{T2} の性質



KKquark: 574 GeV LKP: 501 GeV
 $2\mu_0 = 136$ GeV



USRがない場合のEndpoint