

Collider phenomenology of Split-UED

竹内道久（東大宇宙線研究所）

Chuan-RenChen, MihokoM.Nojiri, SeongChanPark, JingShu氏
らとの共同研究

arxiv: 0903.1971

目次

Split-UED = mUED + Bulk mass μ

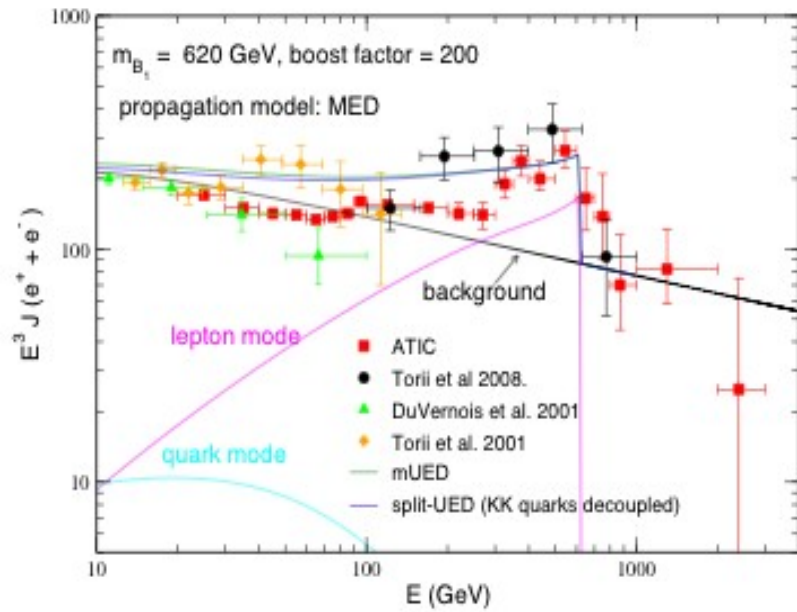
- パートナーはフェルミオン
- ある程度縮退した質量スペクトル (mUED からの性質)
- クォークパートナー (q_1) だけ重い

- Motivation
- Model
- Collider signal

Split-UED を考える Motivation

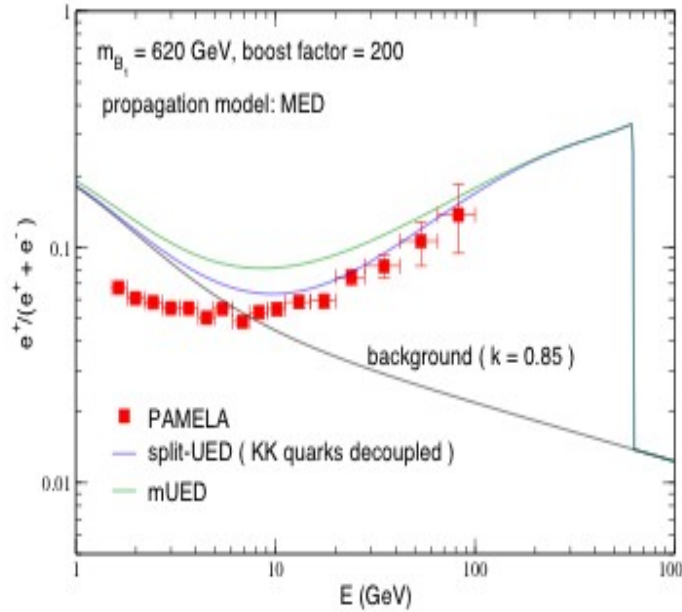
- 様々な宇宙線の観測とダークマターの関係
 - ATIC/PPP-BETS ($e^+ e^-$ total flux)
 - PAMELA (e^+ fraction)
 - anti-proton-proton ratio (no excess)
 - gamma-ray (no excess)
- LHC でのシグナルが見やすい
 - フェルミオンなので生成断面積が大きい
 - q_1 と他の粒子の質量差が大きいのでシグナルが見やすい

ATIC, PAMELA



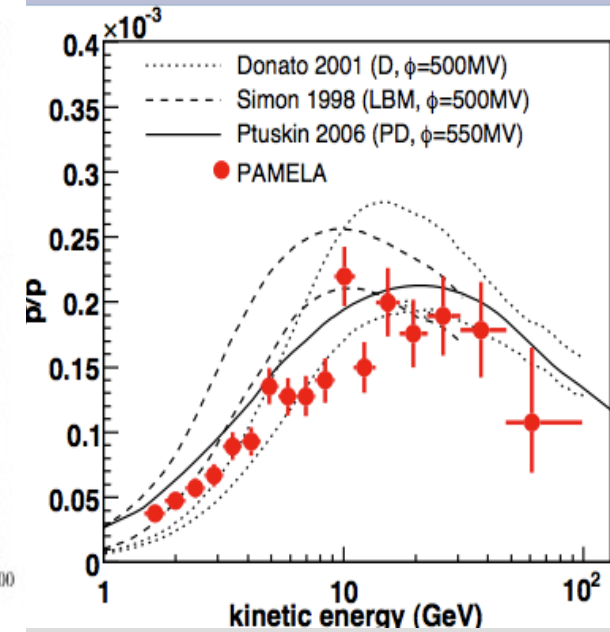
e^+ & e^- flux

600 GeV 付近にピーク



$e^+/(e^- + e^+)$ flux

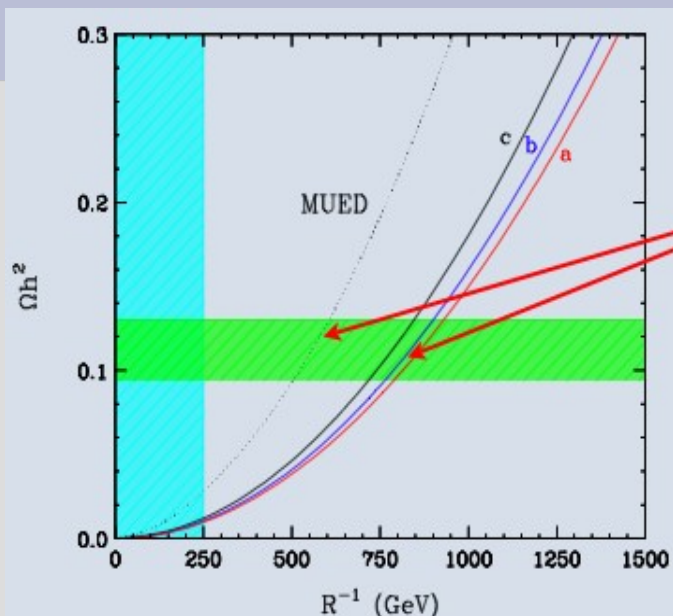
100GeV 以上の
 e^+ ソースの存在



anti-p / p flux

Excess なし

Dark Matter 対消滅による説明



mUED では DM abundance を説明する
のに、600 GeV 程度の LKPDM は自然



DM 対消滅により e+ flux を説明できる

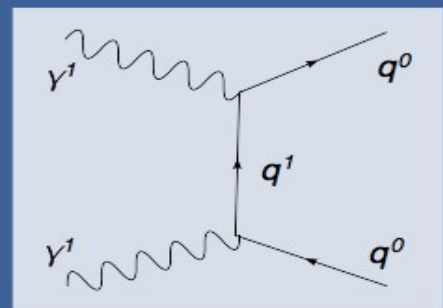
K. Kong, K. Matchev, JHEP 0601:038, (2006)

一方、宇宙線の観測によると、ハドロンモードの寄与が小さいことが示唆されている

Increase the
mass of q^1



suppress



クォークパートナーだけを重くするメカニズムが欲しい

Split-UED 模型

- mUED + bulk mass μ

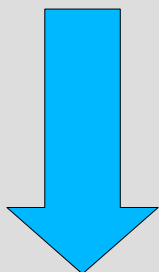
$$S_{\text{split-UED}} = \int d^4x \int_{-L}^L dy \left[\mathcal{L}_{\text{mUED}} - \lambda \Phi(y) \bar{\Psi}_q(x, y) \Psi_q(x, y) \right]$$

$$\lambda \langle \Phi(y) \rangle = \mu \epsilon(y) \quad +1 \text{ for } 0 < y < L \text{ and } -1 \text{ for } -L < y < 0.$$

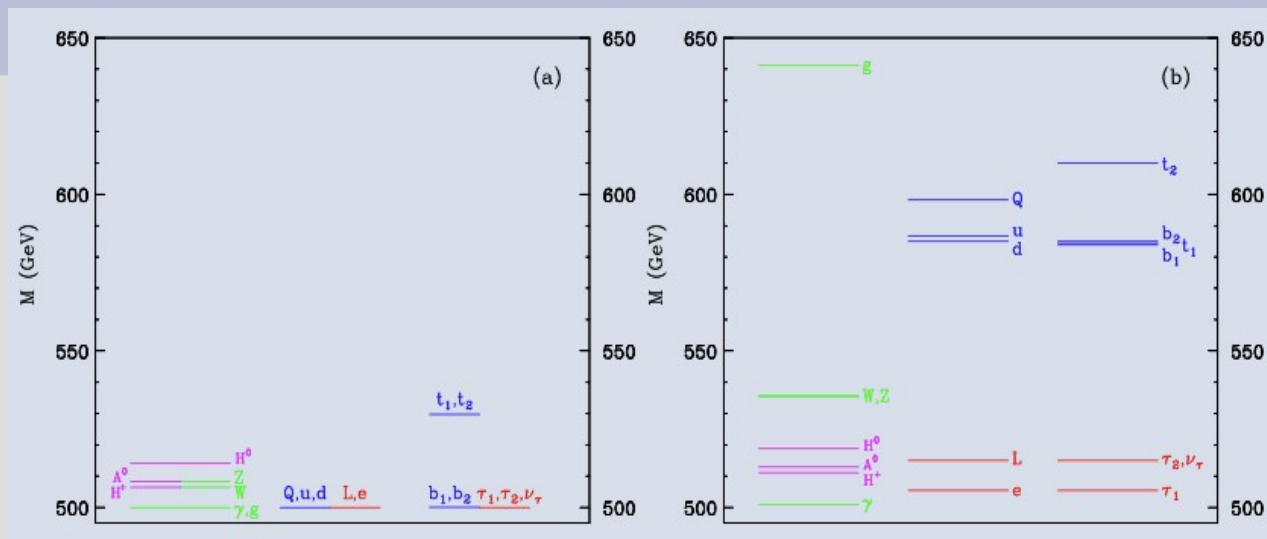
- クォーク場のみのカップル
- 5D 方向の並進対称性を破る
 - ➡ KK 数保存を破る、KK-parity は残る
- $\mu=0$ で mUED になる

スペクトル (SUSY みたいなもの)

mUED



Split-UED



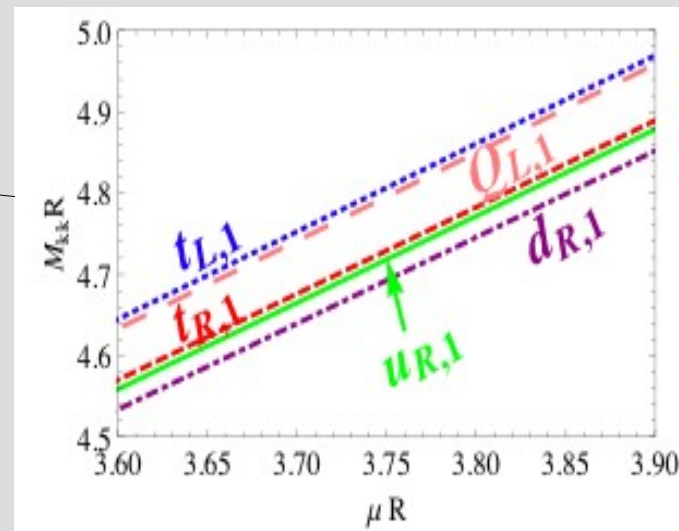
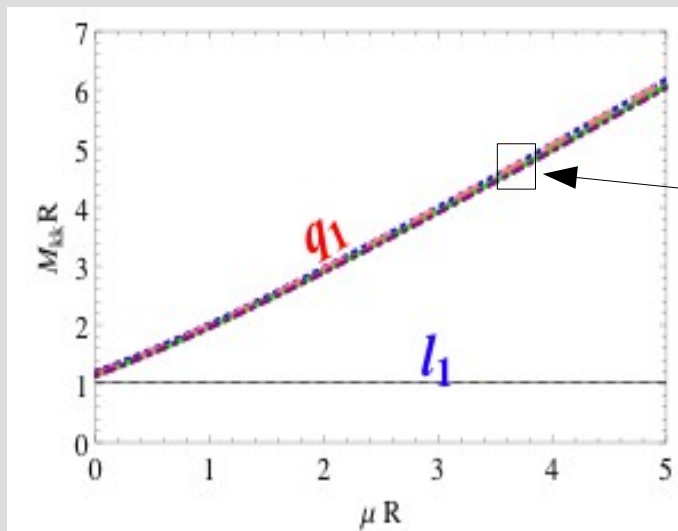
KK level at (a) tree level and (b) one-loop, for $R^{-1} = 500$ GeV,
H-C. Cheng, K. Matchev, M. Schmaltz, Phys. Rev. D 66, 036005 (2002)

$$m_{q_n}^{\text{tree}} = \sqrt{\mu^2 + k_n^2},$$

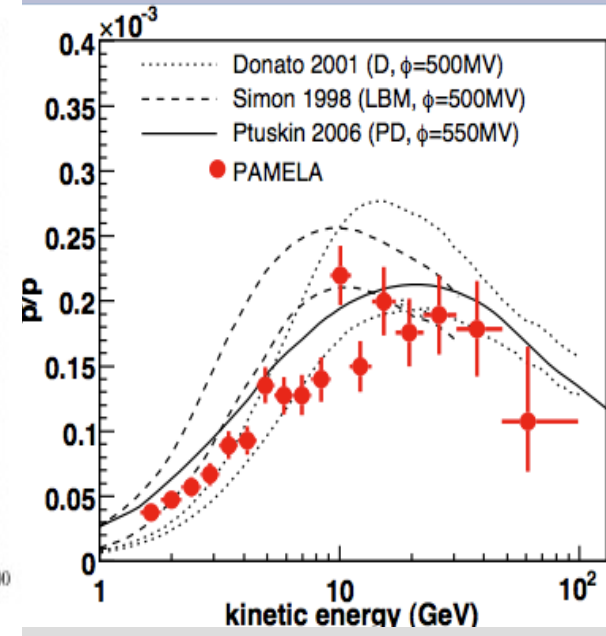
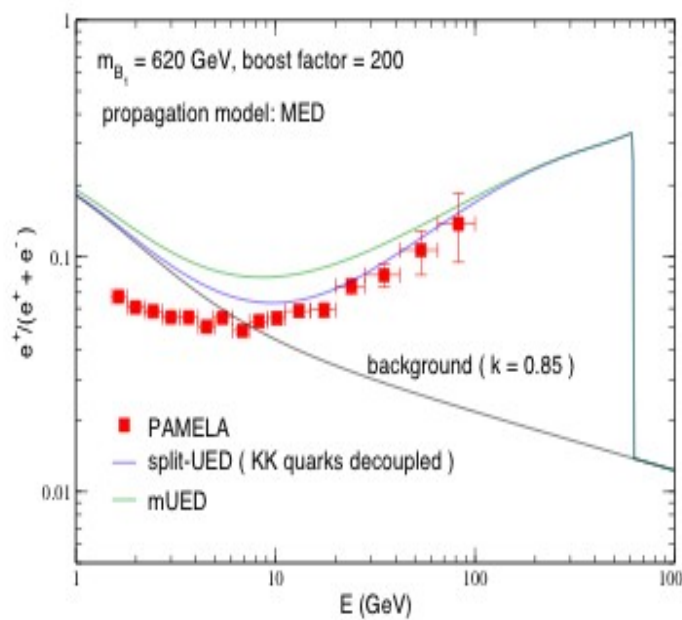
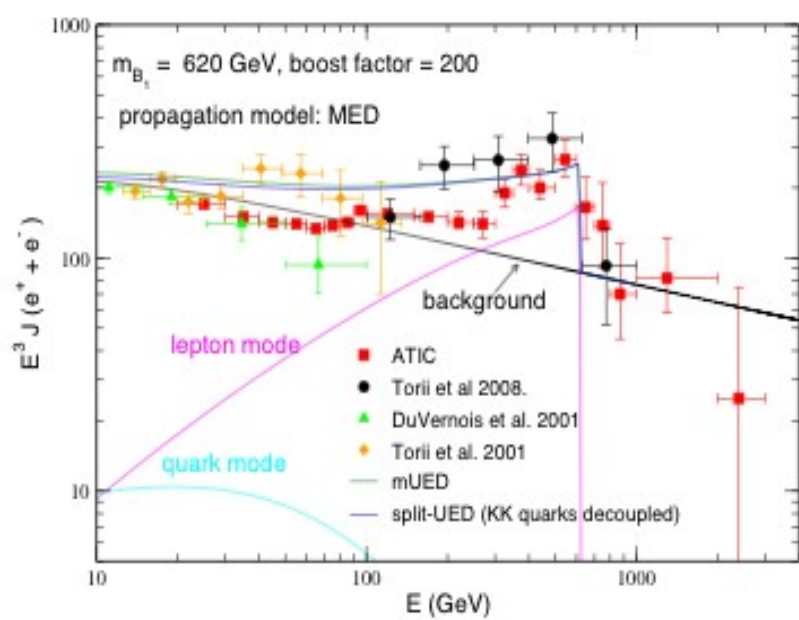
$$m_{l_n}^{\text{tree}} = n/R,$$

$$k_{n-} = -|\mu| \tan k_n L,$$

$$k_{n+} = n/R.$$



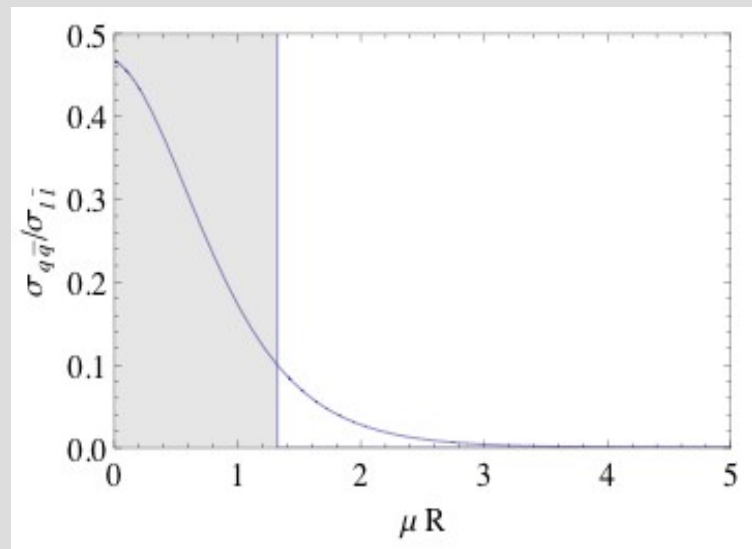
ATIC, PAMELA



e^+ & e^- flux

$e^+/(e^- + e^+)$ flux

anti-p / p flux
Excess なし



ハドロンモードからの e^+ は
ソフトになる

$1/R = 620 \text{ GeV}$ and $\mu = 700 \text{ GeV}$

とかだとちょうど良い

コライダーシグナル

$q_1 q_1$ シグナル

- 生成断面積が大きい

SUSY (スカラー) と違ってフェルミオンである

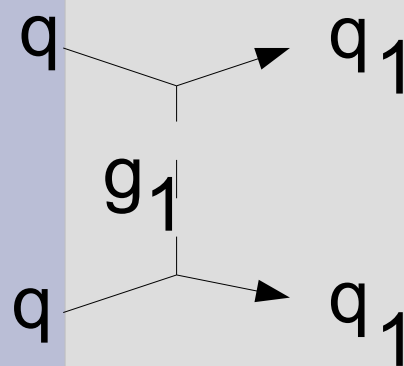
→ 同じ質量でも断面積が 10 ~ 100 倍大きい
p-wave suppression がないため

threshold excitation $\sim \beta^3$ → β

$$\beta = (1 - 4m^2 / s)^{1/2}$$

- mUED と違って mass splitting が大きい

→ ハードジェット ($q_1 \rightarrow g_1 + \text{hard jet}$)



Event simulation

質量スペクトル $1/R = 620 \text{ GeV}$ and $\mu = 700 \text{ GeV}$

split-UED	mass	SUSY	mass
q_{L1}	1347 GeV	\tilde{u}_L, \tilde{d}_L	1355, 1358 GeV
u_{R1}	1322 GeV	\tilde{u}_R	1304 GeV
d_{R1}	1318 GeV	\tilde{d}_R	1263 GeV
g_1	794 GeV	\tilde{g}	799 GeV
B_1	621 GeV	$\tilde{\chi}_1^0$	622 GeV

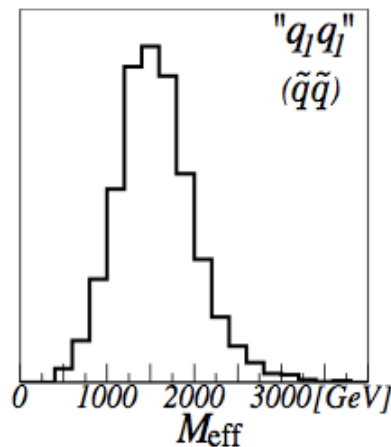
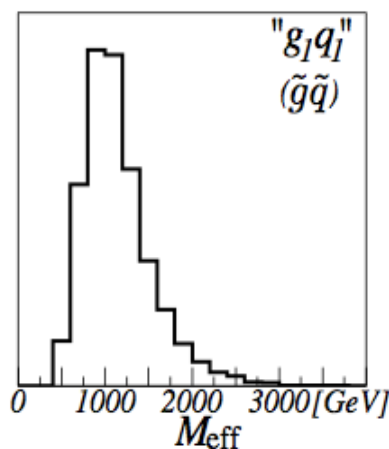
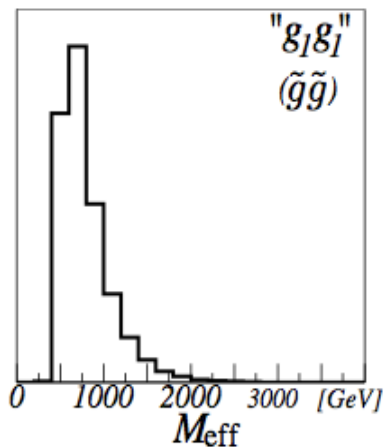
シミュレーションは HERWIG
での MSSM を代用
(Kinematics は同じ)

$q_1 q_1$ 7.64 pb

$\tilde{q} \tilde{q}$ 125 fb

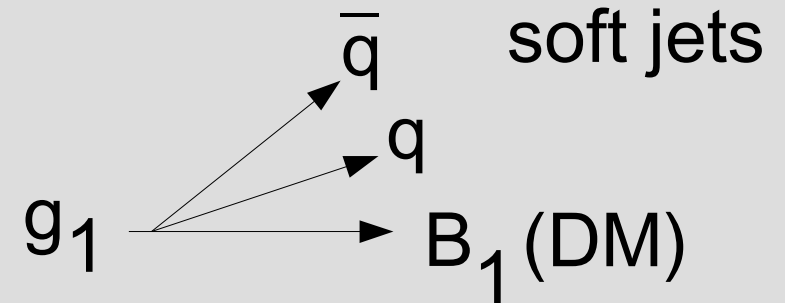
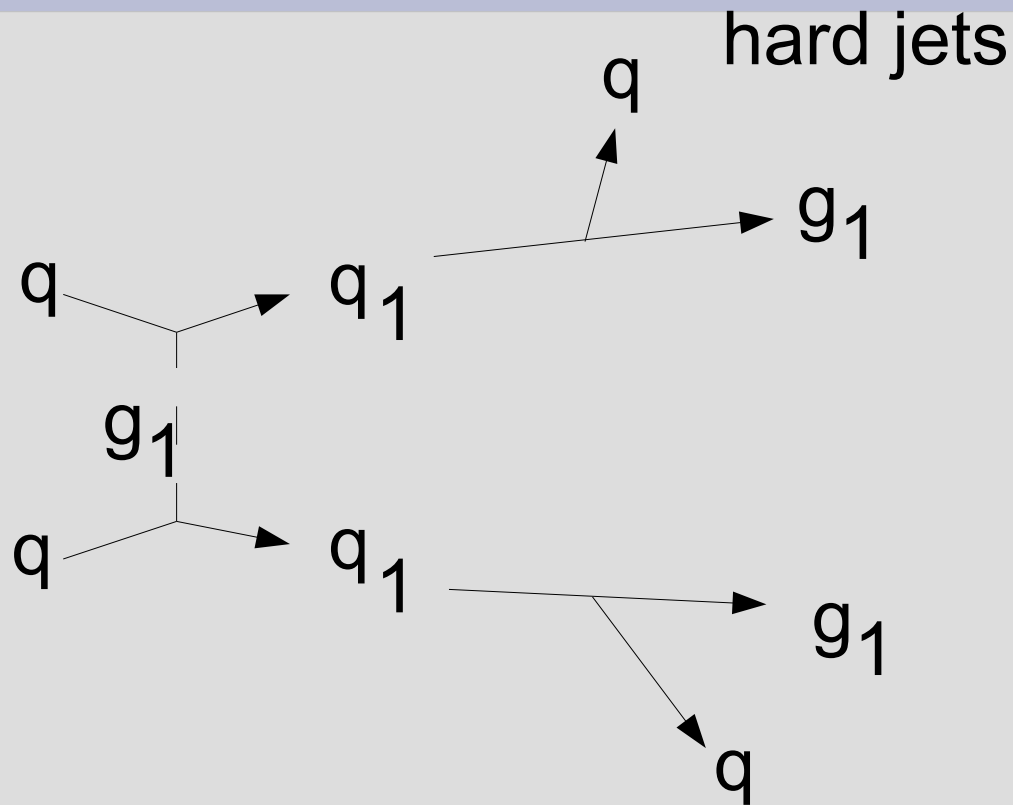
60 倍

- M_{eff} 分布



	after standard cut	$M_{\text{eff}} > 1 \text{ TeV}$	$M_{\text{eff}} > 1.5 \text{ TeV}$
$q_1 q_1$	0.40	0.37	0.21
$q_1 q_1$	0.30	0.18	0.049
$g_1 q_1$	0.18	0.04	0.007

- シンプルな Kinematics



split-UED	mass	SUSY	mass
q_{L1}	1347 GeV	\tilde{u}_L, \tilde{d}_L	1355, 1358 GeV
u_{R1}	1322 GeV	\tilde{u}_R	1304 GeV
d_{R1}	1318 GeV	\tilde{d}_R	1263 GeV
g_1	794 GeV	\tilde{g}	799 GeV
B_1	621 GeV	$\tilde{\chi}_1^0$	622 GeV

g_1 が DM だったら sqR と同じ Kinematics

MT2

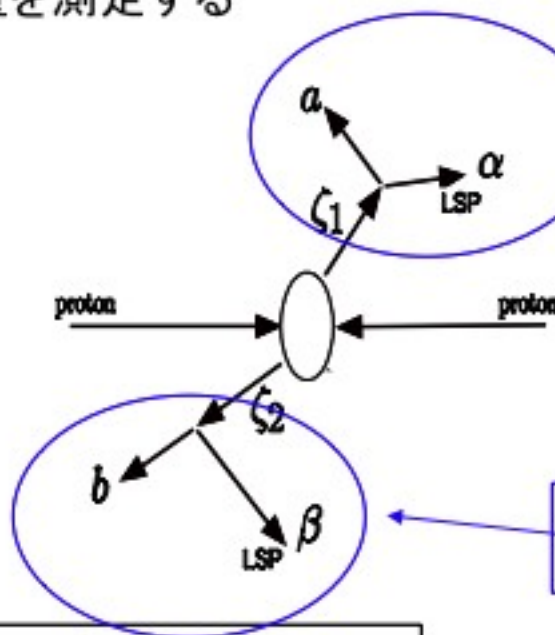
m_{T2} variable を使って質量を測定する

$$\zeta\zeta \rightarrow (a\alpha)(b\beta)$$

$$T\bar{T} \rightarrow (t\Delta_H)(t\Delta_H)$$

1. まずは m_T という量を考える

これは、2つの粒子の pt のみで定義される量



$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

正しい $\mathbf{p}_T^\alpha, \mathbf{p}_T^\beta$ を代入するこぼり立つ式

$$m_T^2(\mathbf{p}_T^b, \mathbf{p}_T^\beta; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

$$\mathbf{p}_T = (p_x, p_y, 0) \quad E_T = \sqrt{|\mathbf{p}_T|^2 + m^2}$$

$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \equiv m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha - \mathbf{p}_T^a \mathbf{p}_T^\alpha] \leq m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha \cos \Delta\eta - \mathbf{p}_T^a \mathbf{p}_T^\alpha] = (p_a + p_\alpha)^2 = m_\zeta^2$$

MT2

m_{T2} variable を使って質量を測定する

m_{T2}

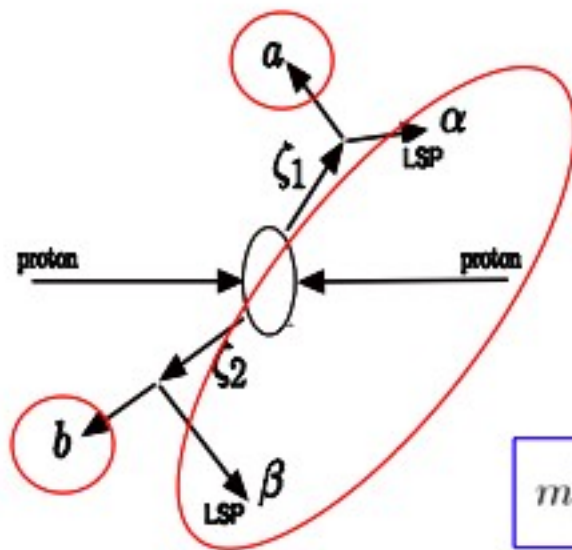
$$\zeta\bar{\zeta} \rightarrow (a\alpha)(b\beta)$$

$$T_-\bar{T}_- \rightarrow (tA_H)(\bar{t}A_H)$$

1. まずは m_T という量を考える

2. 観測できるのは

$$\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^b, E_T$$



$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

しかし、観測できるのは
見えない粒子の運動量
の和のみ

$$m_T^2(\mathbf{p}_T^b, \mathbf{p}_T^\beta; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

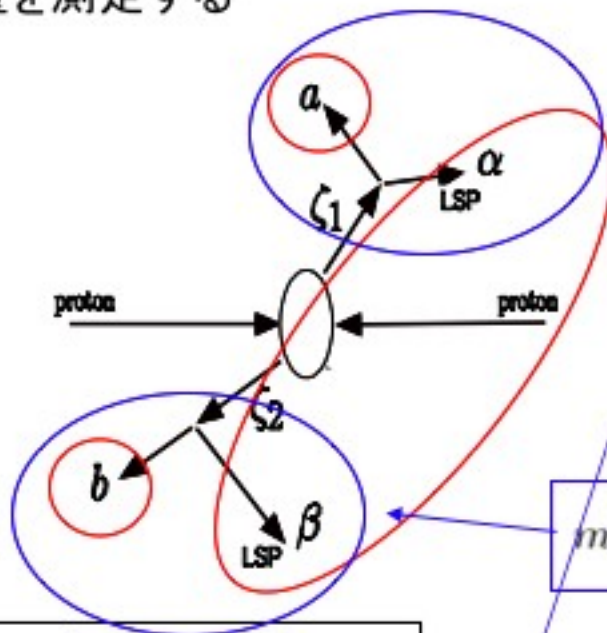
$$\mathbf{p}_T = (p_x, p_y, 0) \quad E_T = \sqrt{|\mathbf{p}_T|^2 + m^2}$$

$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \equiv m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha - \mathbf{p}_T^a \mathbf{p}_T^\alpha] \leq m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha \cos \Delta\eta - p_a^x p_\alpha^x] \\ = (p_a + p_\alpha)^2 = m_\zeta^2$$

MT2

m_{T2} variable を使って質量を測定する

1. 全ての可能な E_T のわけ方を考える
2. 2つの m_T を計算
3. 大きい方を取る
1. 分け方についての最小値を探す



$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

しかし、観測できるのは
見えない粒子の運動量
の和のみ

$$m_T^2(\mathbf{p}_T^b, \mathbf{p}_T^\beta; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \leq m_\zeta^2.$$

$$\mathbf{p}_T = (p_x, p_y, 0) \quad E_T = \sqrt{|\mathbf{p}_T|^2 + m^2}$$

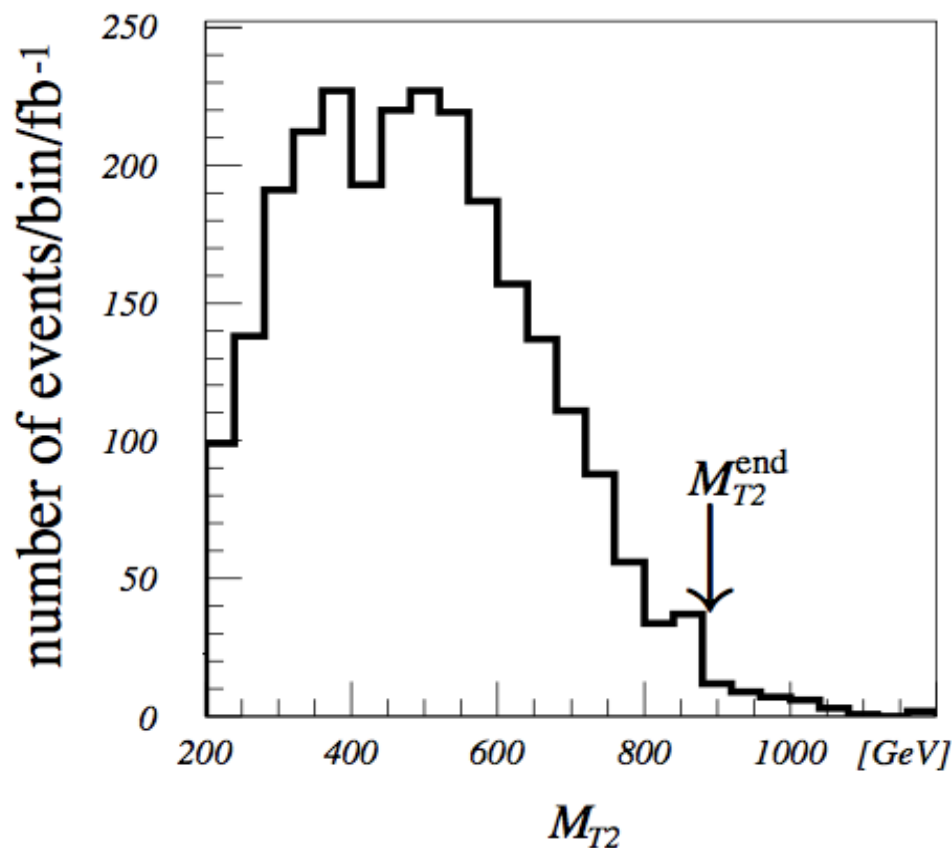
$$m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \equiv m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha - \mathbf{p}_T^a \mathbf{p}_T^\alpha] \leq m_a^2 + m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 + 2[E_T^a E_T^\alpha \cos \Delta\eta - \mathbf{p}_T^a \mathbf{p}_T^\alpha] = (p_a + p_\alpha)^2 = m_\zeta^2$$

$$m_{T2}^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^b, \mathbf{p}_T^\beta; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \equiv \min_{\mathbf{p}_T^\alpha + \mathbf{p}_T^\beta = \mathbf{p}_T} \left[\max \left\{ m_T^2(\mathbf{p}_T^a, \mathbf{p}_T^\alpha; m_{\tilde{\chi}_1^0}), m_T^2(\mathbf{p}_T^b, \mathbf{p}_T^\beta; m_{\tilde{\chi}_1^0}) \right\} \right] \leq m_\zeta^2$$

transverseな観測量と、質量のみから決まる量

全ての可能な分け方の中で最小のもの ← ‘全ての’ は正しい分け方を含んでいる

MT2 分布



MT2(test mass=0) のエンドポイントは次で与えられる

$$M_{T2}^{\text{end}} = m_A - \frac{m_X^2}{m_A},$$

今回のスペクトルだと、

$$m_{q1} - \frac{m_{g1}^2}{m_{q1}} \simeq 880 \text{ GeV}.$$

missing momentum として以下のものを使った

$$p_{T\text{miss}} = -p_{Tj_1} - p_{Tj_2}$$

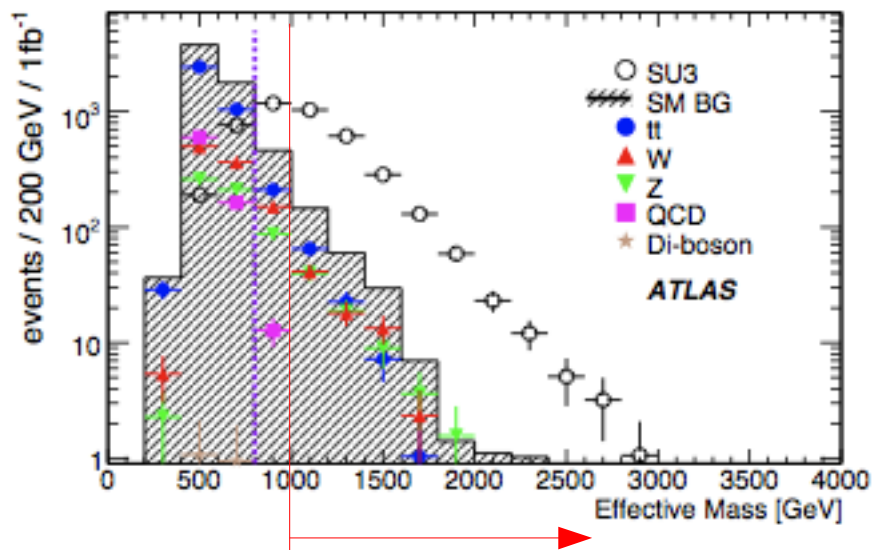
$$7640 \times 0.37 = 2830 \text{ events}$$

レプトンカットを課す前
(課しても半分程度は残るだろう)

SM バックグラウンド

- ATLAS の EP note の 0-lepton mode と同じカットを採用

1. At least four jets with $p_T > 50$ GeV at least one of which must have $p_T > 100$ GeV; and $E_T^{\text{miss}} > 100$ GeV.
2. $E_T^{\text{miss}} > 0.2M_{\text{eff}}$.
3. Transverse sphericity, $S_T > 0.2$.
4. $\Delta\phi(\text{jet}_1 - E_T^{\text{miss}}) > 0.2, \Delta\phi(\text{jet}_2 - E_T^{\text{miss}}) > 0.2, \Delta\phi(\text{jet}_3 - E_T^{\text{miss}}) > 0.2$.
5. Reject events with an e or a μ .



SMBG 300 以下 / 1 fb⁻¹
Signal > 1000 / 1 fb⁻¹

まとめ

- e+e- flux の観測

➡ DM 対消滅へのハドロンモードの寄与が小さいことが示唆されている

➡ Split-UED はクォークのパートナーが重く相性が良い。

- クォークパートナーは生成断面積が大きい (fermion)
- DM との質量差も大きくシグナル検出が容易 (mUED と異なる)
- MT2 を用いて q_1 の質量測定を行った。