THE UNIVERSITY OF TOKYO

ATLAS EXPERIMENT

Search for Gluinos using Final States with One Isolated Lepton in the LHC-ATLAS Experiment.

(LHC-ATLAS 実験における 1 レプトン終状態を用いたグルイーノ探索)

Shion Chen (陳 詩遠)

Summary of Doctoral Dissertation

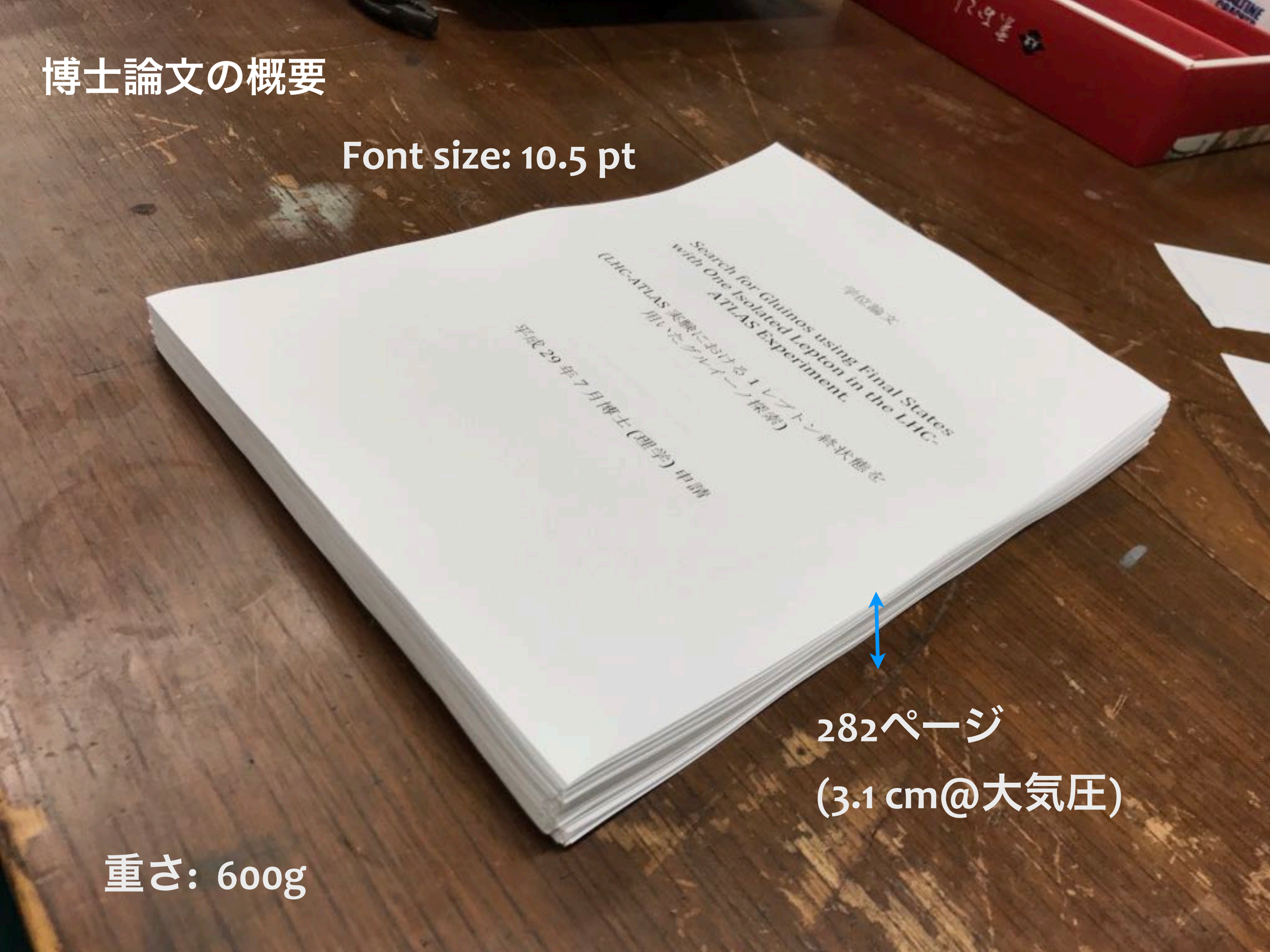
28. July. 2017

博士論文の概要

BURGER KING®

博士論文の概要

Font size: 10.5 pt



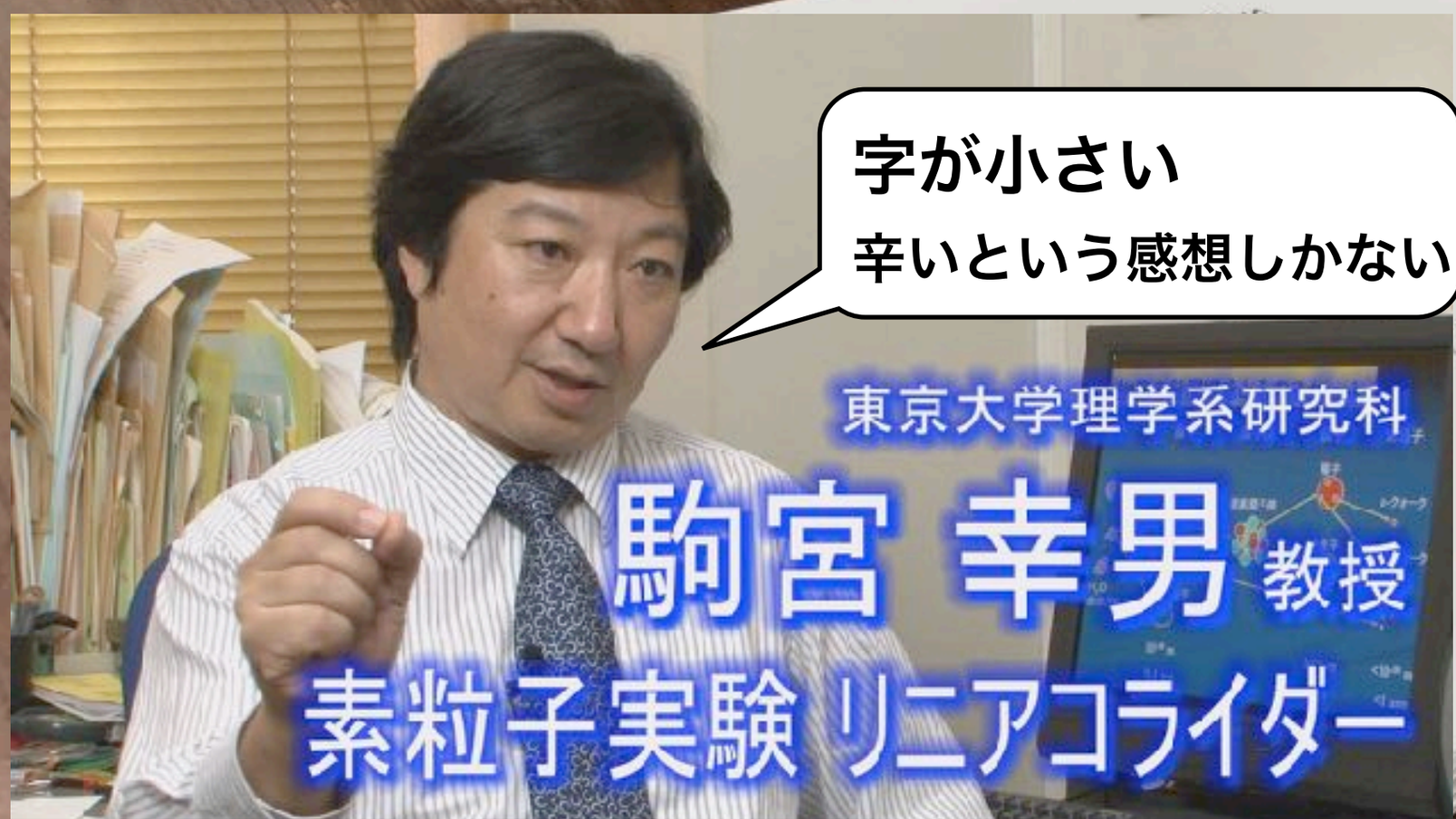
282ページ

(3.1 cm@大気圧)

重さ: 600g

博士論文の概要

Font size: 10.5 pt



282ページ

(3.1 cm@大気圧)

重さ: 600g

平居正仁
浅野敏雄

博士論文の概要

LHCの13TeV 陽子・ 陽子衝突データを解析し,
超対称性粒子 (SUSY) であるgluinoの生成事象を探索した.

物理結果

未探索のgluino信号に感度を持つ解析を構成.
発見に及ばずやむなくlimitを更新した.

解析の売り

従来より”良い”解析を行った

- 感度だけでなく, より一般性の高い, 網羅的な探索を構築
- 信頼性の高いbackground推定方法を確立. 将来にもつながる

Contents

Introduction (1-2章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

Experiment

- 加速器・検出器 (3章)
- Particle Reconstruction / ID (4章)
- MC simulation (5章)
- 解析 (6章-8章)

Result

- 結果 (9章)
- 意義と展望 (10章)

青字:

Collaboration内における

自身のcontribution

Contents

Introduction (1-2章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

Experiment

- 加速器・検出器 (3章)
- Particle Reconstruction / ID (4章)
- MC simulation (5章)
- 解析 (6章-8章)

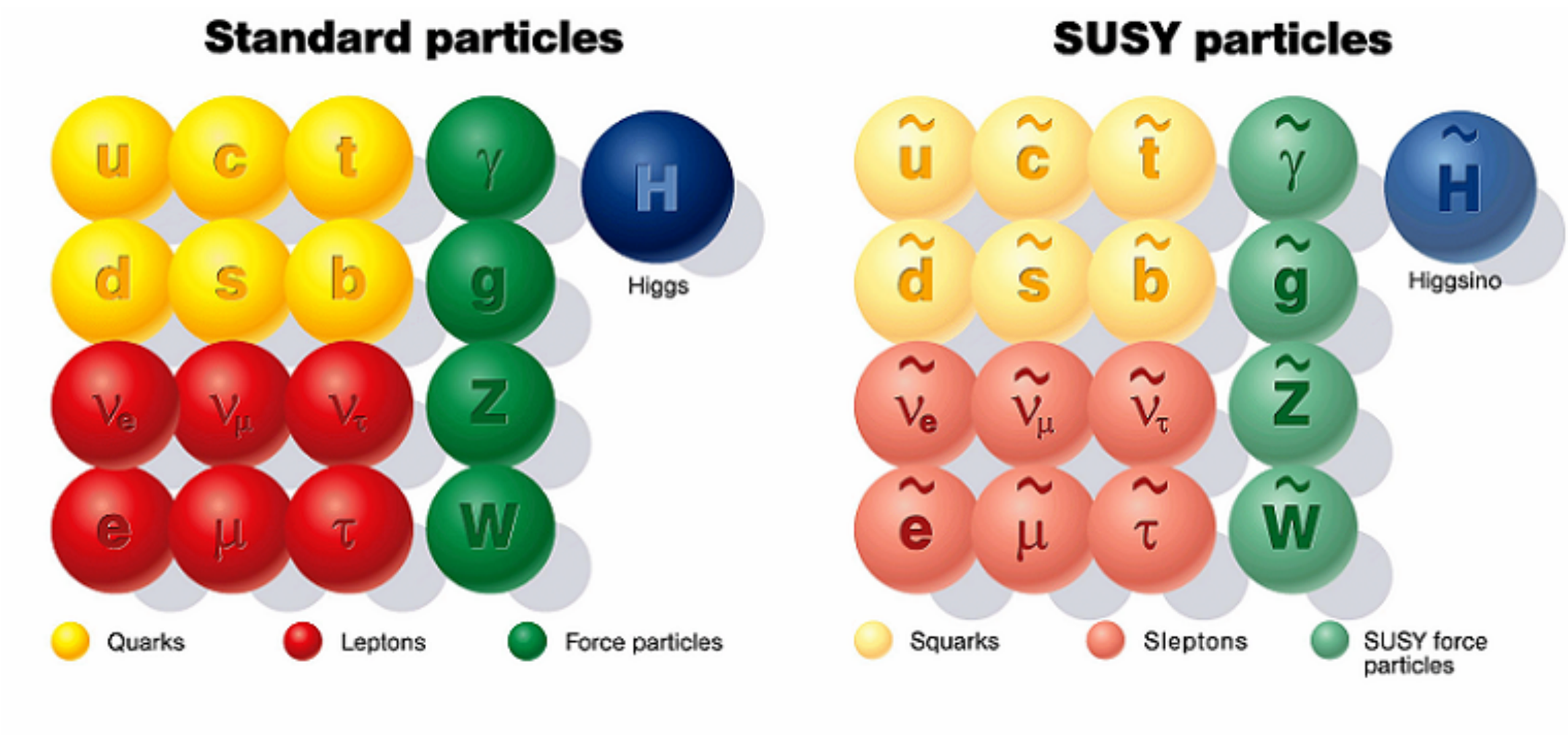
Result

- 結果 (9章)
- 意義と展望 (10章)

超対称性 (SUSY)

(thesis 2.3)

- Boson ⇔ fermionの対称性: 超対称性
- SM粒子に対して逆の統計性を持った”super-partner”を導入
- Gauge symmetryに加えてSUSYを持つようにSMを拡張した理論
  相互作用, couplingの大きさはSMと同じ



人はなぜSUSYを考えるか

SUSYの代表的な信仰基盤

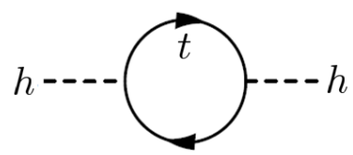
(thesis 2.2)

Standard modelの諸問題解消可能

Higgs mass発散問題

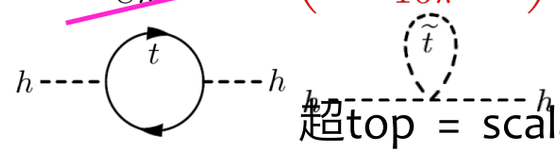
$$\mathrm{SM}: \Delta m^2_{\mathrm{higgs}} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \mathrm{finite}$$

~10³⁸?



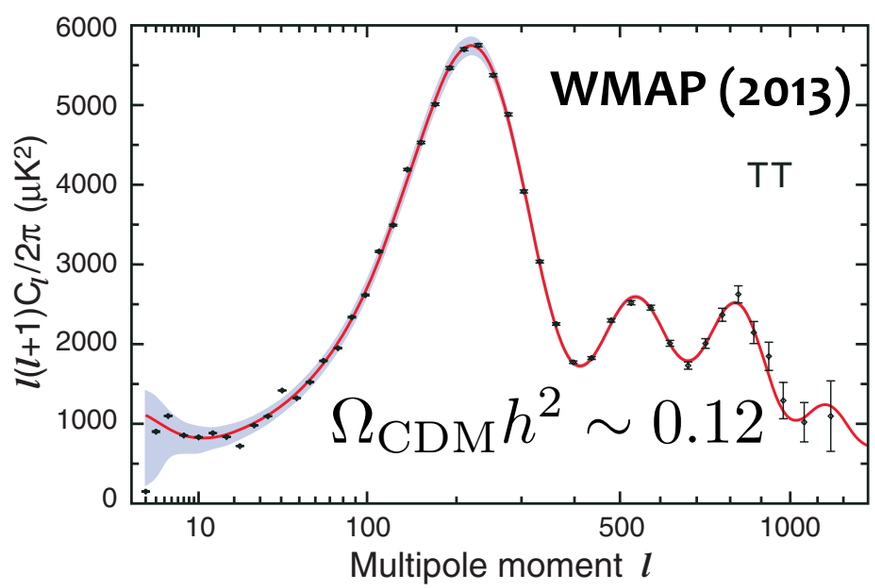
CANCEL

$$\mathrm{MSSM}: \Delta m^2_{\mathrm{higgs}} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \left(2 \times \frac{3|\lambda|^2}{16\pi^2}\Lambda^2\right) + \mathrm{O}(\log\Lambda)$$



超top = scalar-top (stop)

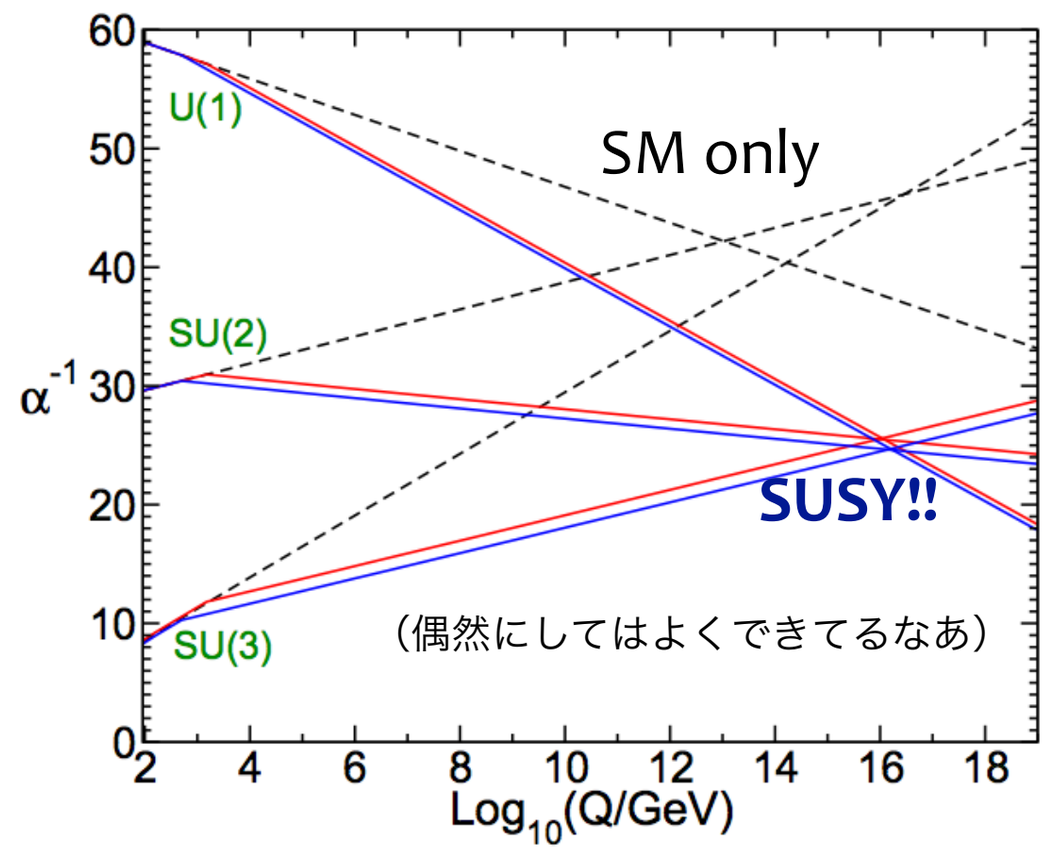
Dark matter



SM: 候補なし **SUSY: 一番軽いSUSY粒子**

究極理論を目指したformalismで有利

- **大統一 (GUT) が自然に実現可能**



- **重力への手がかり…?**

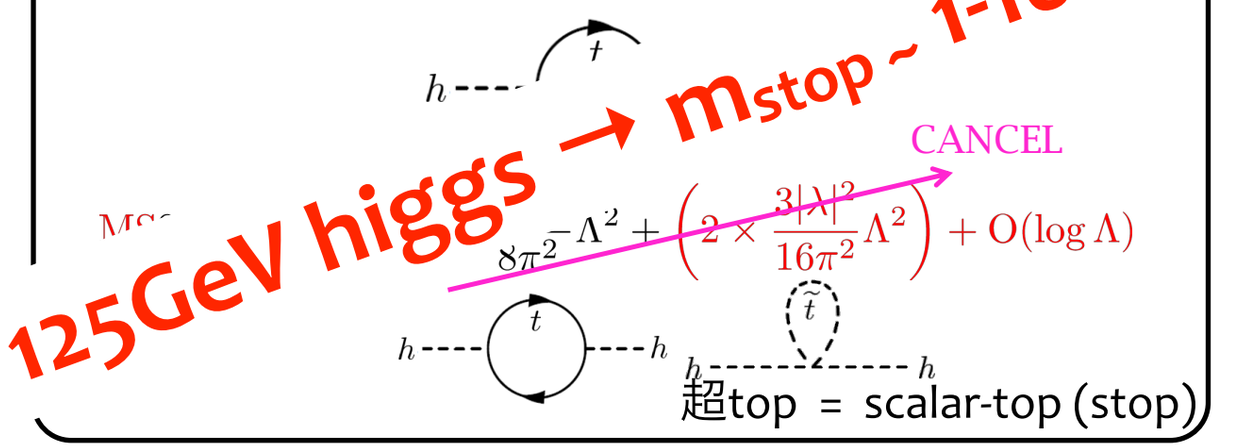
- 超代数が内部対称性と時空対称性を同時に含む.
- ヒモでのくりこみの難易度 etc.

SUSYの代表的な信仰基盤 (thesis 2.2)

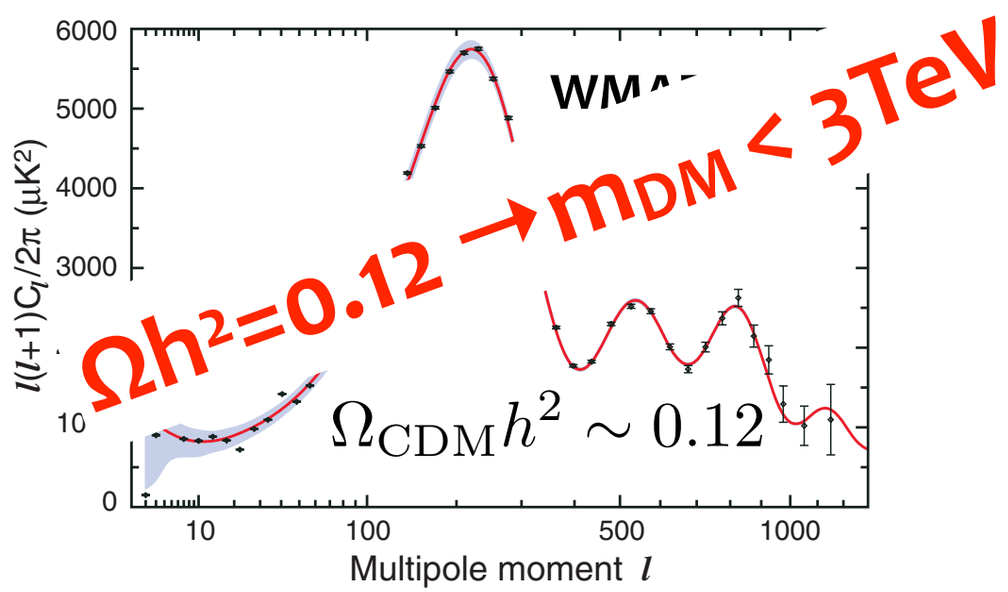
Standard modelの諸問題解消可能

Higgs mass発散問題

$$\mathrm{SM}: \Delta m^2_{\mathrm{higgs}} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \mathrm{finite}$$



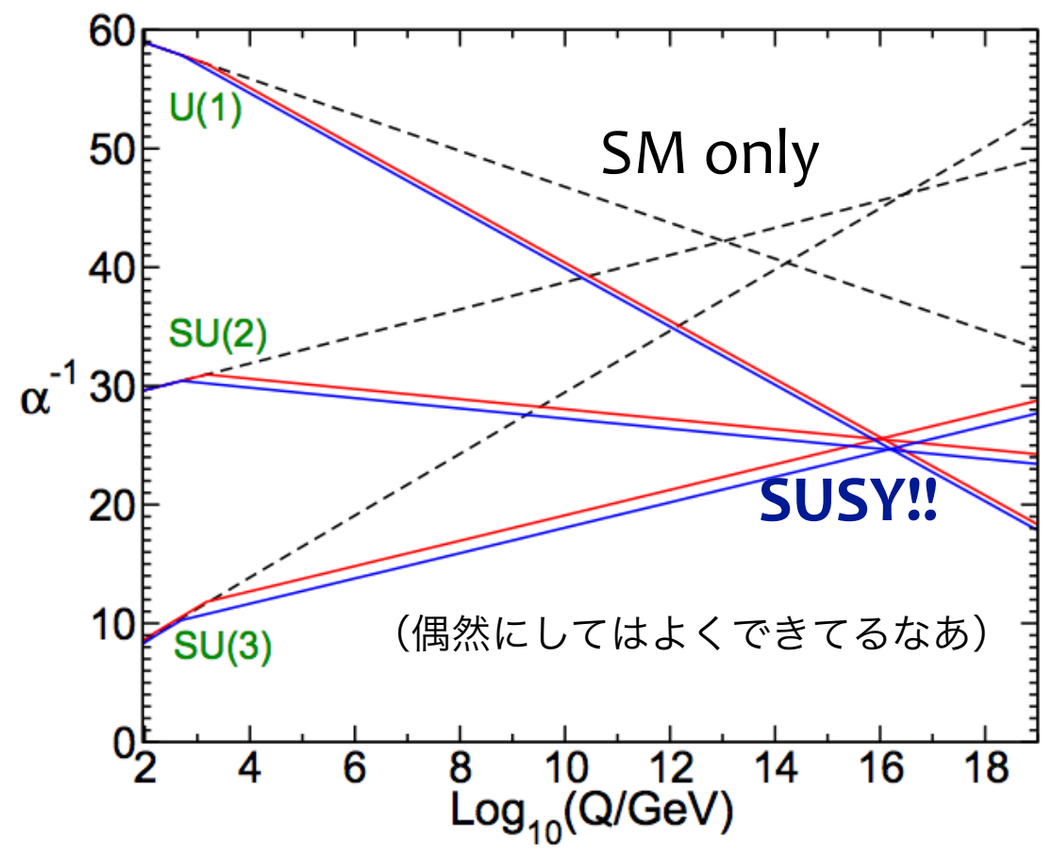
Dark matter



SM: 候補なし **SUSY: 一番軽いSUSY粒子**

究極理論を目指したformalismで有利

- **大統一 (GUT) が自然に実現可能**



- **重力への手がかり…?**

- 超代数が内部対称性と時空対称性を同時に含む.
- ヒモでのくりこみの難易度 etc.

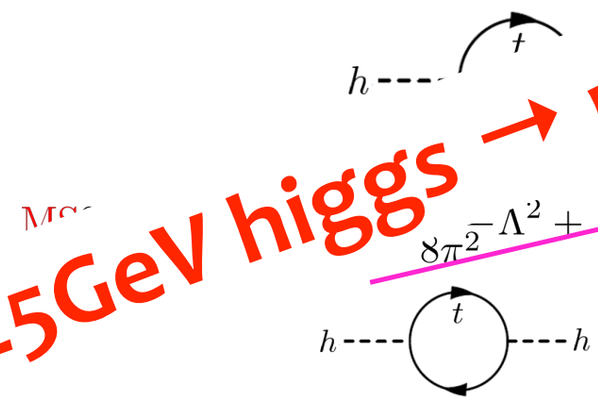
SUSYの代表的な信仰基盤 (thesis 2.2)

TeV-scale SUSY??

目指したformalismで有利

GUT) が自然に実現可能

$$\mathrm{SM}: \Delta m^2_{\mathrm{higgs}} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \mathrm{finite}$$

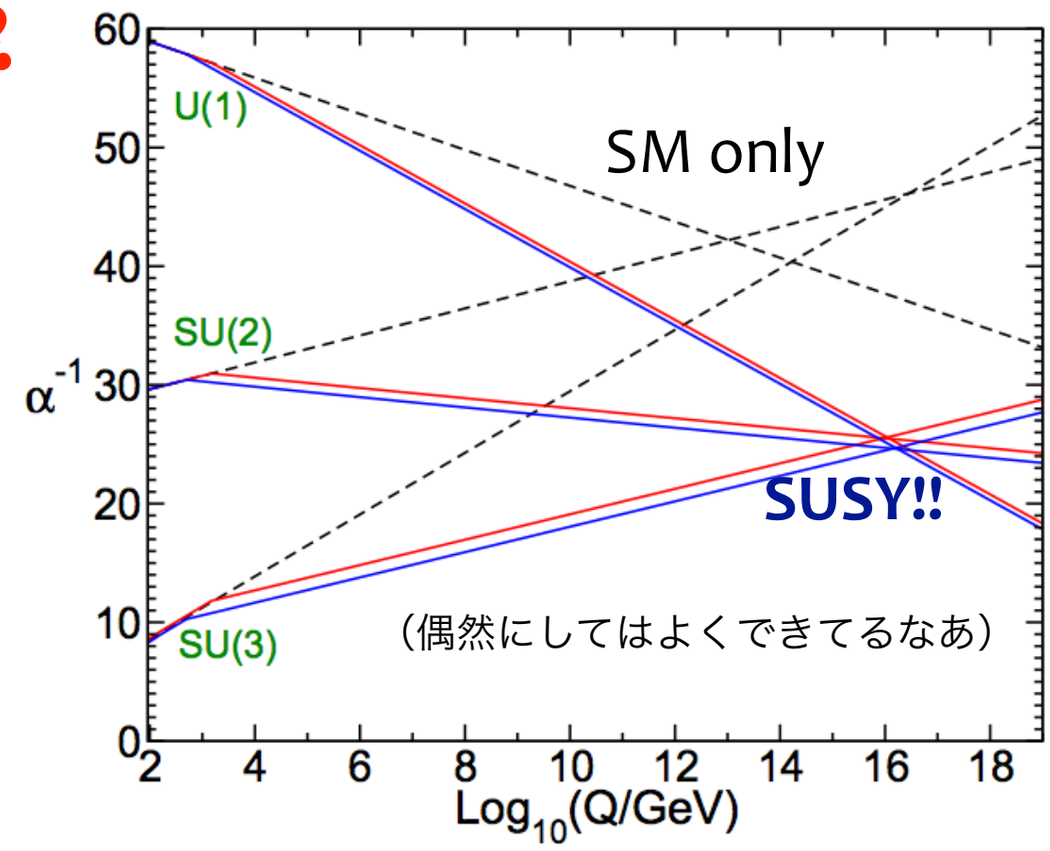


CANCEL

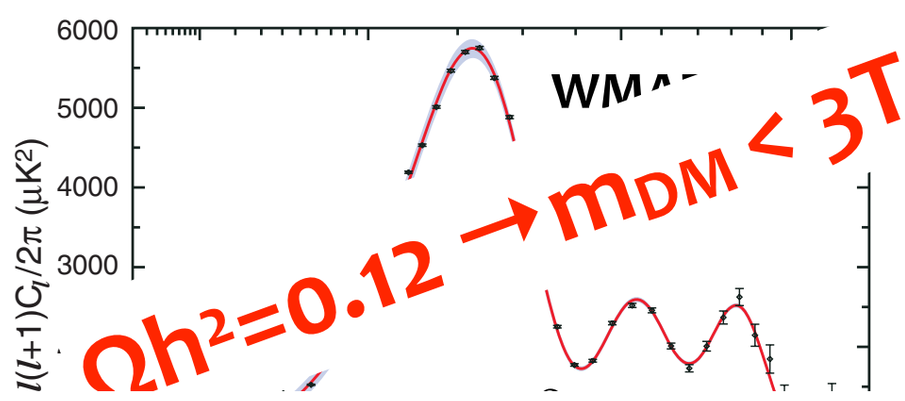
$$\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \left(2\times\frac{3|\lambda|^2}{16\pi^2}\Lambda^2\right) + \mathrm{O}(\log\Lambda)$$

125GeV higgs → m_{stop} ~ 1-10TeV?

超top = scalar-top (stop)



Dark matter



$\Omega h^2 = 0.12$ → m_{DM} < 3TeV

- **重力への手がかり…?**

- 超代数が内部対称性と時空対称性

LHC (√s=13TeV) で直接探索!!

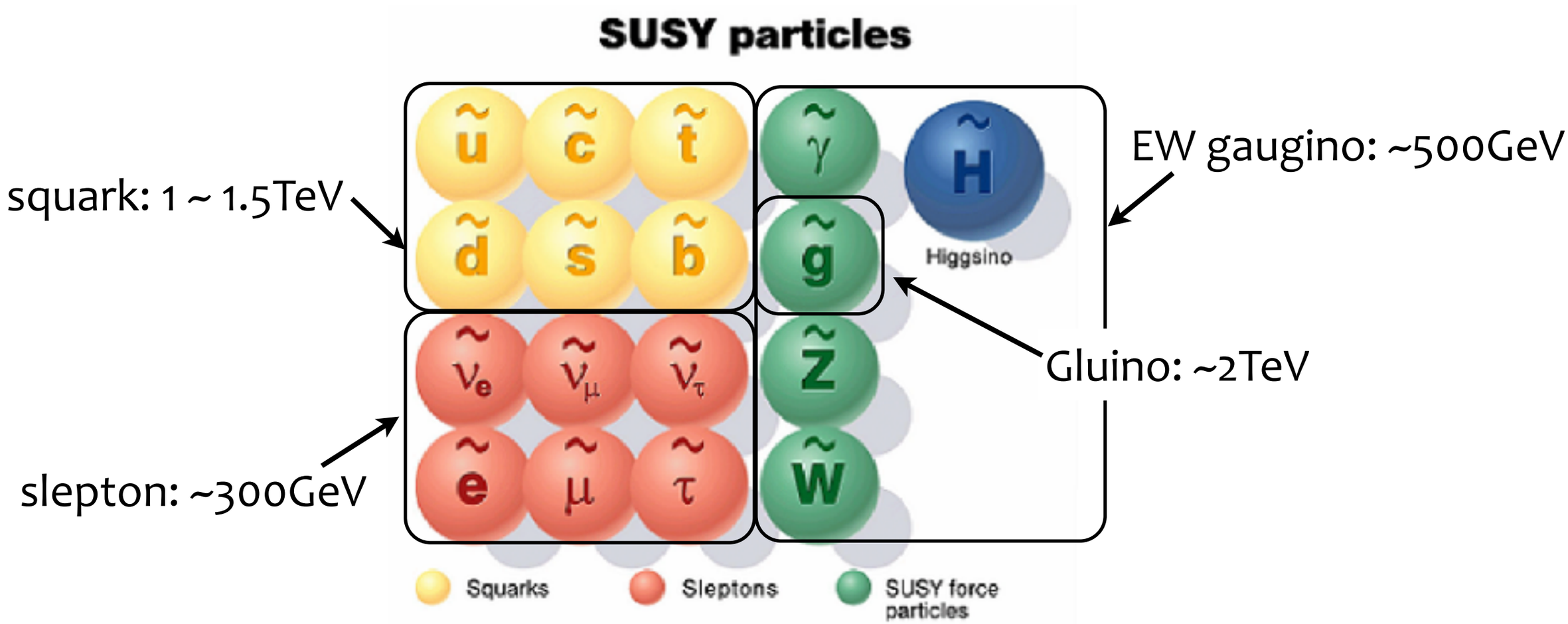
どういうSUSYを探すか

(thesis 2.4/2.5)

TeV-scale SUSYといっても10TeVじゃもう見えない (3TeVでも厳しい).

Reasonableなシナリオにおいてどの粒子が狙い目か, 吟味が必要.

LHCにおける直接探索の質量上限 (2016年までのデータで)

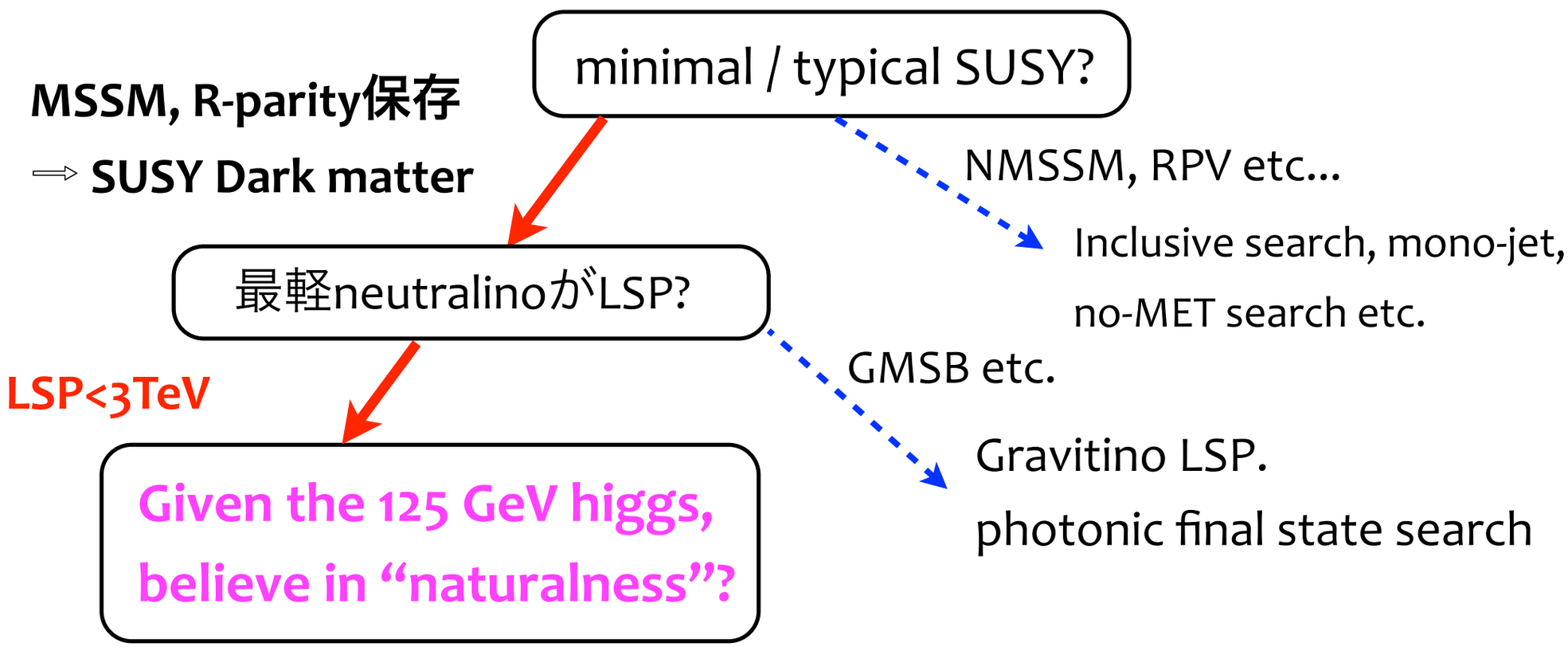


Target SUSY scenario

→ yes
→ no

➔ **今回採用したシナリオ**
⇢ 採用しなかったがアリなシナリオ

原則現状で一番王道・一般的なシナリオを追求



Constraint from 125GeV SM Higgs (thesis 2.4.1)

Higgs 125GeV→デカい高次補正必要

観測値 tree loop

$$m_{h^0}^2 = m_Z^2 \cos^2 2\beta + \delta_t^2,$$

125 <91 ~80GeV

$$\delta_t^2 = \frac{3}{(4\pi)^2}\frac{m_t^4}{v^2}\left[\ln\frac{m_{\tilde{t}}^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{m_{\tilde{t}}^2}\left(1-\frac{X_t^2}{12m_{\tilde{t}}^2}\right)\right]$$

Solution:

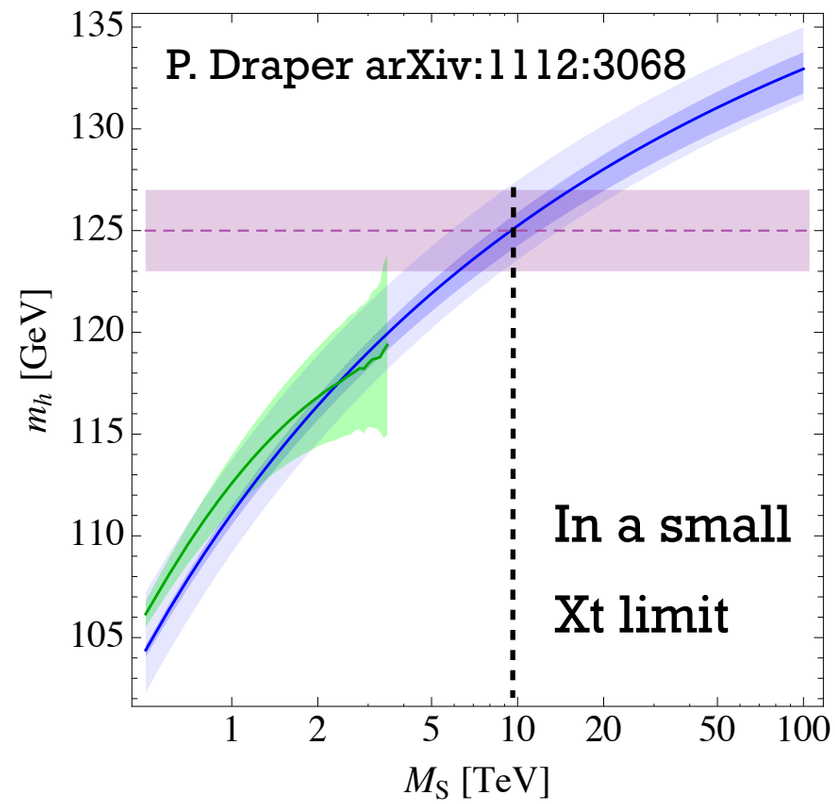
1: Heavy stop (naively ~O(10TeV))

- squark (slepton) 全部重い
- Gauginoだけ軽くなることが可能.
- fine tuning <0.1%.

2: Maximal mixing $(X_t = \sqrt{6}m_{\tilde{t}})$

- stopは軽い (600GeV - 1TeV)
- 他のsquark は重い (FCNCなどからの制限)
- fine tuning いくらかマシ (~1%).

Higgs mass (mh) vs SUSY scale (Ms)



"Naturalness" argument @MSSM

MSSM parameters (e.g. m_{Hu}) をfine tuneして125GeV出す

fine tuningの測度

$$\Delta_{m_h} := \max_i \left|\frac{\partial \log[m_h^2(\text{1-loop})]}{\partial \log p_i}\right|.$$

"Naturalness"を信奉するなら2. そうでもないなら1. (今回は後者)

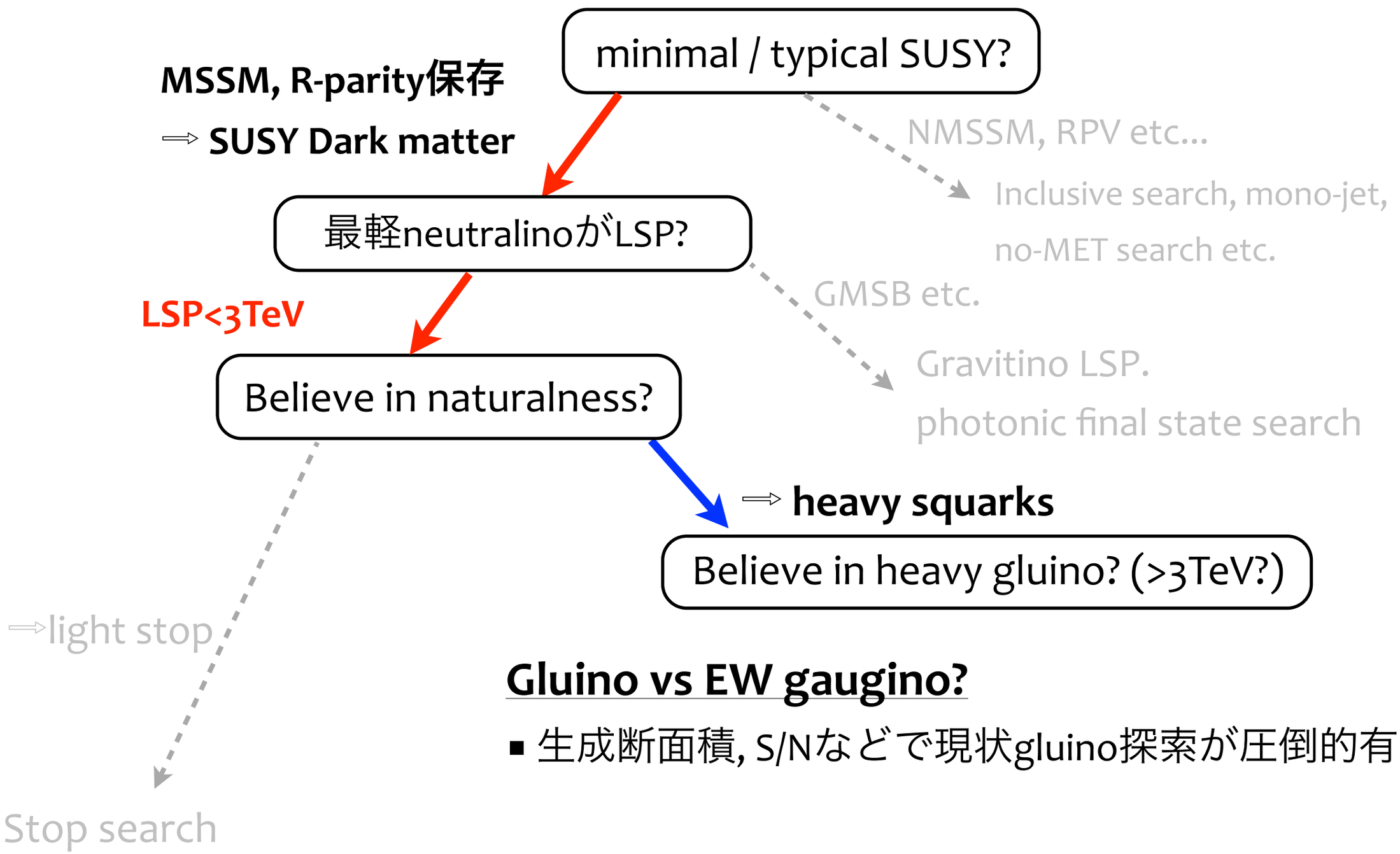
0.1%ほどのfine tuning問題は残るが, SMの階層性問題(10^{-38})に比べたら全然怖くない.

Target SUSY scenario

→ yes
→ no

➔ **今回採用したシナリオ**
⇢ 採用しなかったがアリなシナリオ

原則現状で一番王道・一般的なシナリオを追求



Gluino vs EW gaugino?

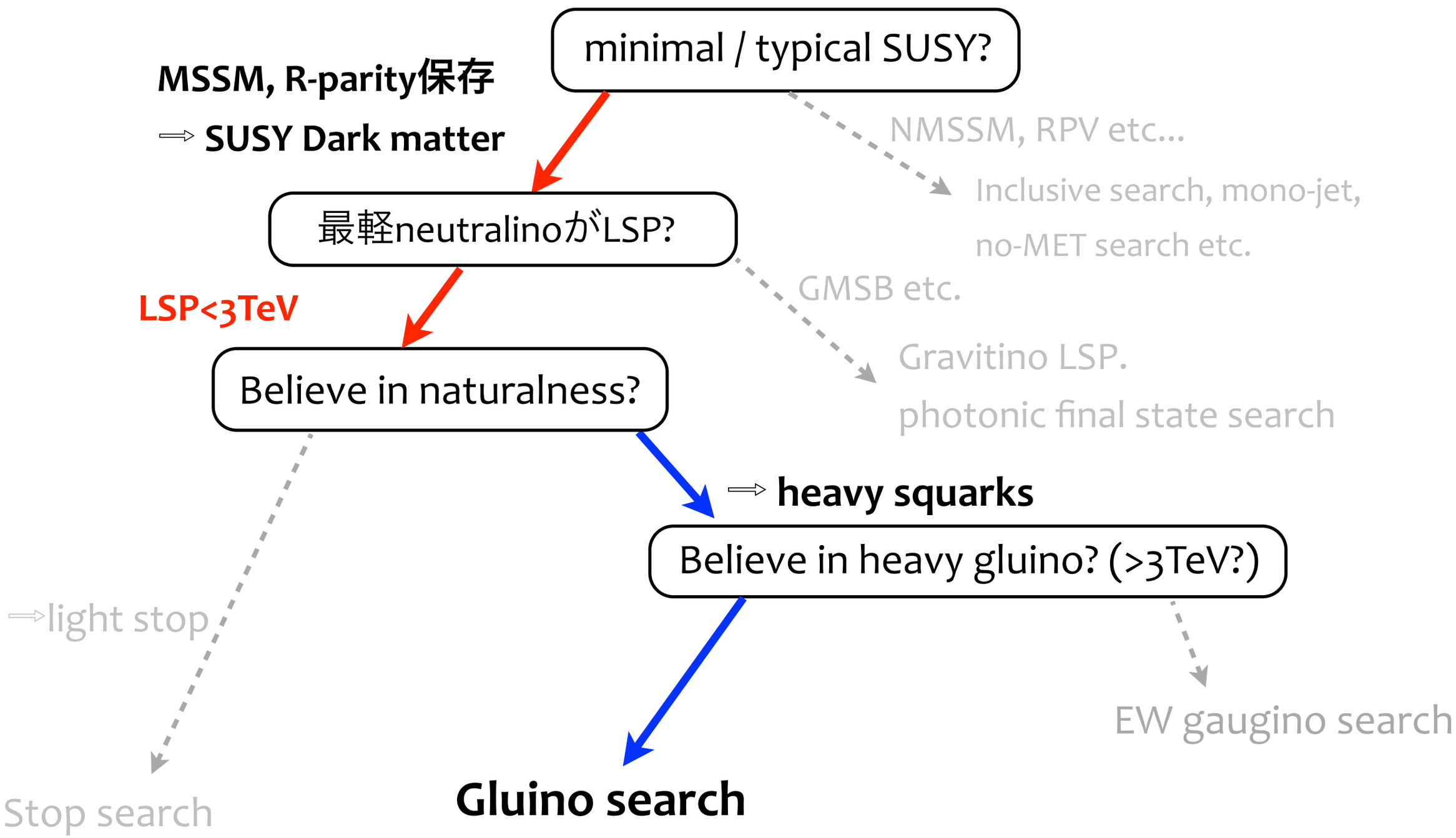
- 生成断面積, S/Nなどで現状gluino探索が圧倒的有利.

Target SUSY scenario

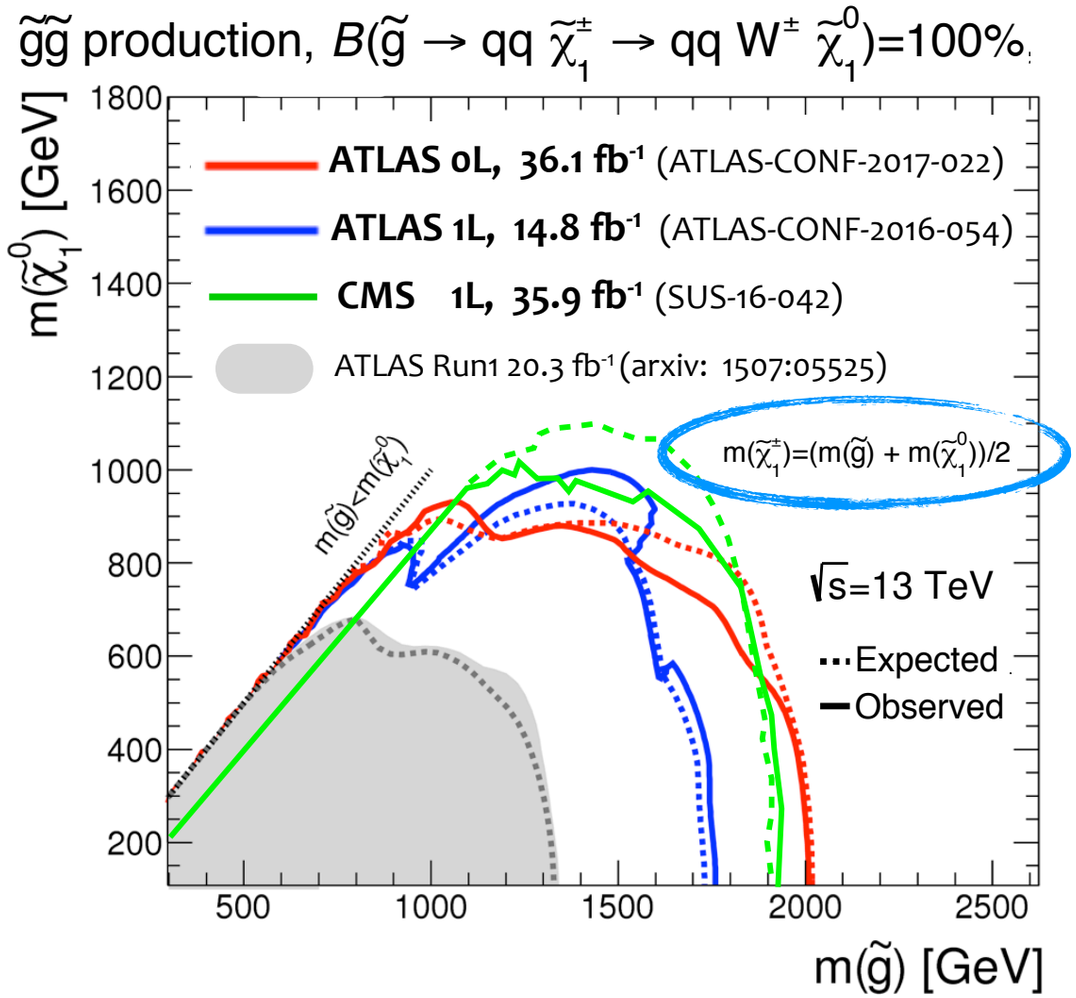
→ yes
→ no

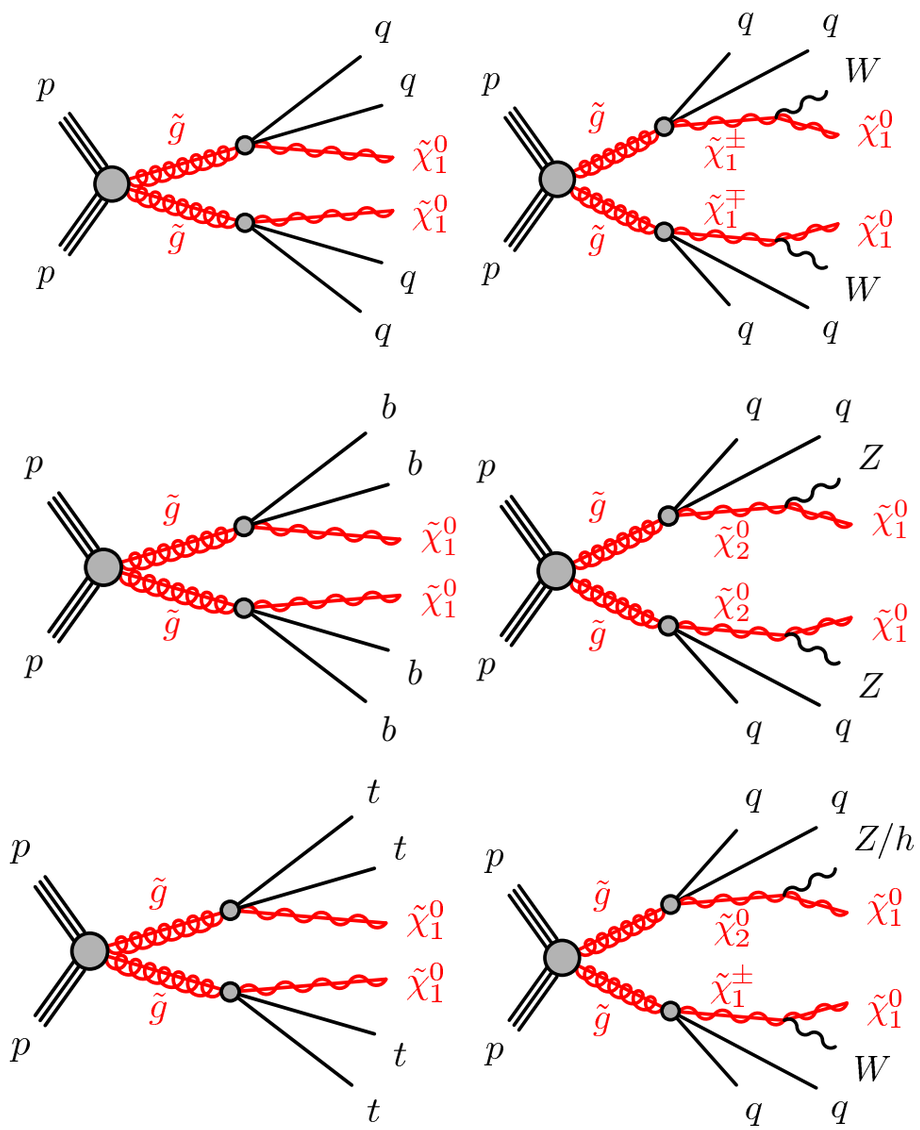
➔ **今回採用したシナリオ**
⇢ 採用しなかったがアリなシナリオ

原則現状で一番王道・一般的なシナリオを追求



Gluino探索の現状 (thesis 2.4.3)





- LHC (ATLAS/CMS) の探索がup-to-date.
- 最も単純なgluino decay, mass spectraを仮定した探索のみやられてきた.

<u>本D論:</u>

先に仮定したSUSY scenarioの下で考えられるgluino decayとmass spectraを網羅.

Target gluino decays (thesis 2.5.3)

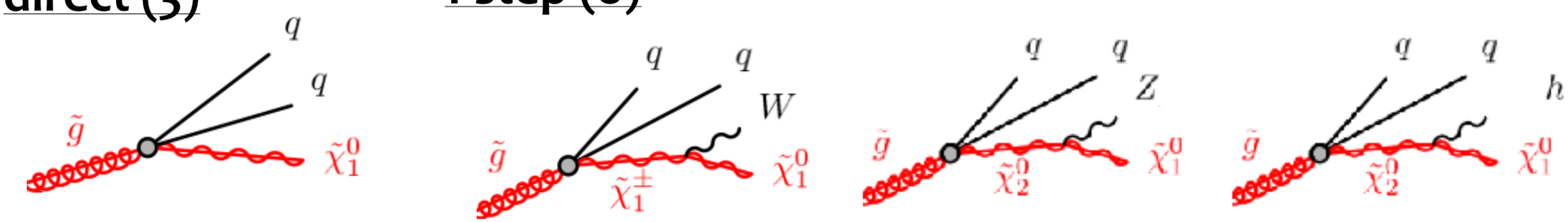
- Squark重いときはvirtual squarkを経由して3体崩壊: $\tilde{g} \to q\bar{q}\tilde{\chi}$

$q = (u, d, s, c, b, t)$ $\tilde{\chi} = (\tilde{\chi}^{\pm}_{1,2}, \tilde{\chi}^{0}_{1-4})$

EW gaugino chargino neutralino

- EW gaugino (χ) のcascade decayも考えるととんでもない数のdecay chain数になるが, そのうち実験のacceptanceが似てるものはmerge. 計11種類のdecayに帰着.

direct (3) **1-step (8)**



qq = (QQ, BB, TT) qq = (QQ', BT) qq = (QQ, BB, TT) qq = (QQ, BB, TT)

※ 2-stepのchain, およびEW gaugino → sleptonのdecayは無視した. 詳細な理由は論文1.5にて.

- Gluinoはpairでできるので終状態は全部で 11 (sym.) + 55(asym.) = 66種類.
- うち1-lepton終状態で感度あるのは45種類 (“benchmark models”).
- その中で3つをreferenceにしてsignal regionを定義.

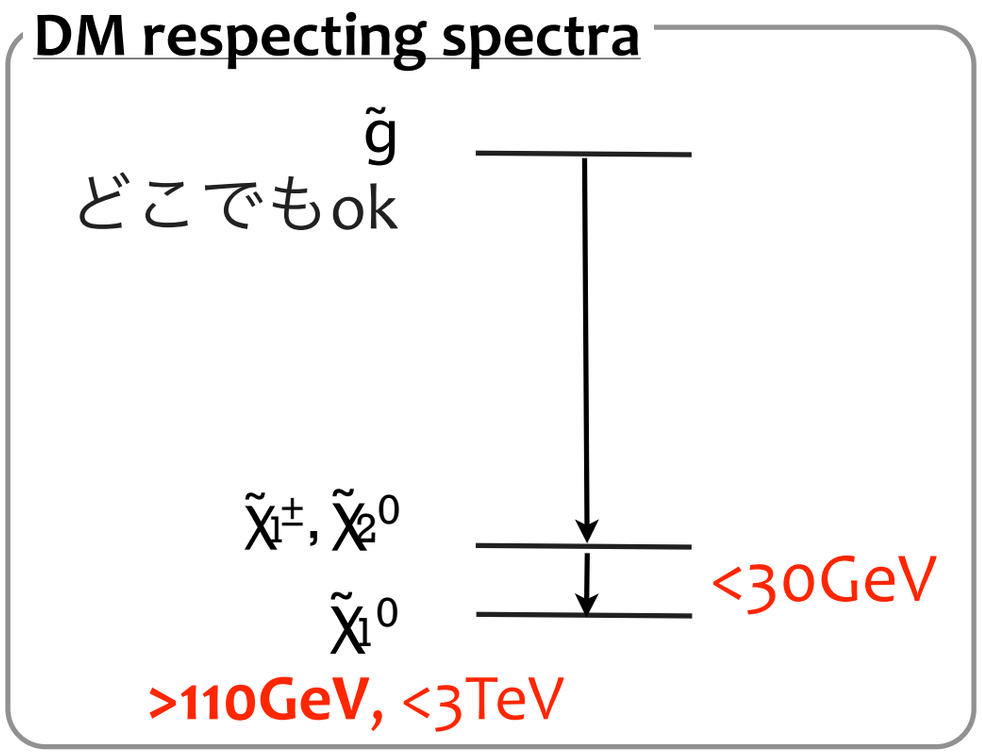
Target mass spectra

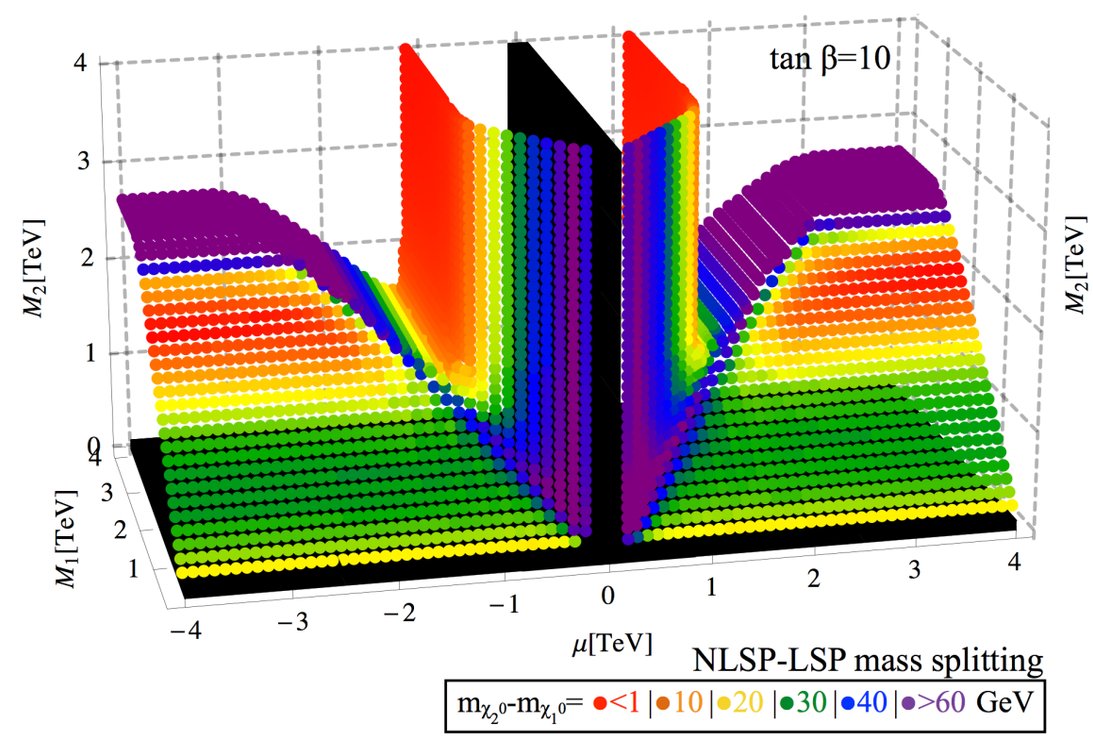
(thesis 2.4.2 / 2.5)

- **Gluino massにはさしたる制限なし. なるべく網羅的に探す.**
- **EW gauginosのmass spectrumには制限あり.**

- LEPの直接探索により LSP mass > 110GeV.
- LSPはDMになるがDM relicを最もよく再現するのは
  * 2番目のEW gaugino (NLSP) とのmass splittingが <30GeVのとき.
  * LSP mass < 3TeV.

ただし不確定要素も多いので, とりわけ重要なシナリオとし, 他も考える.





Contents

Introduction (1章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

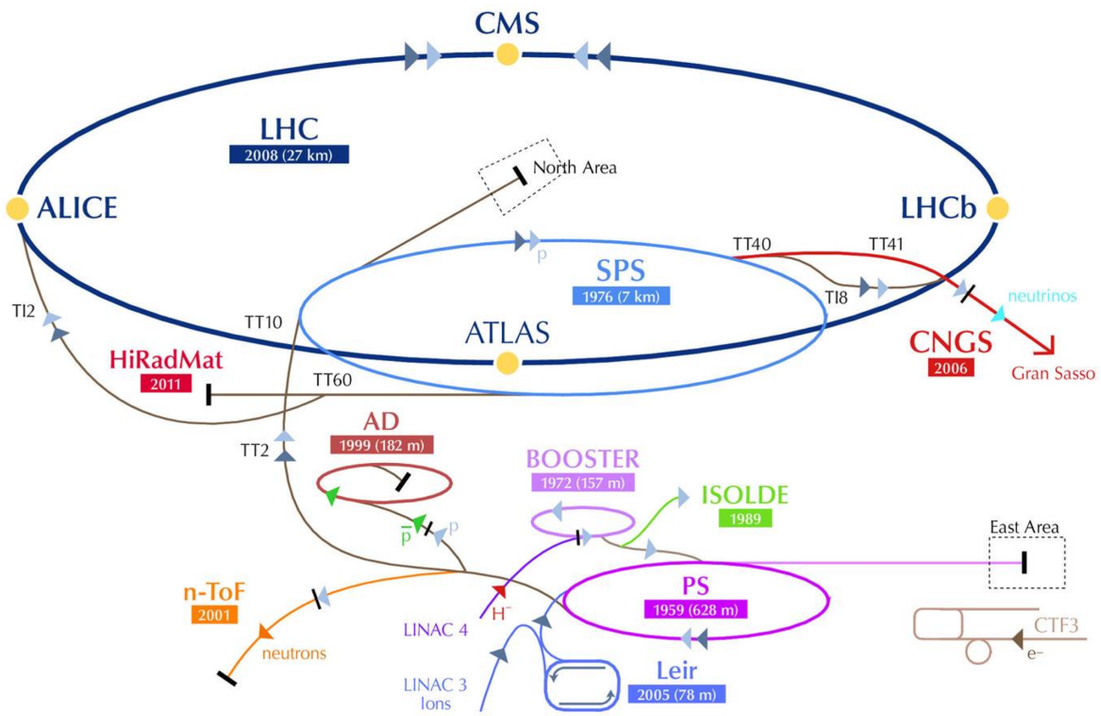
Experiment

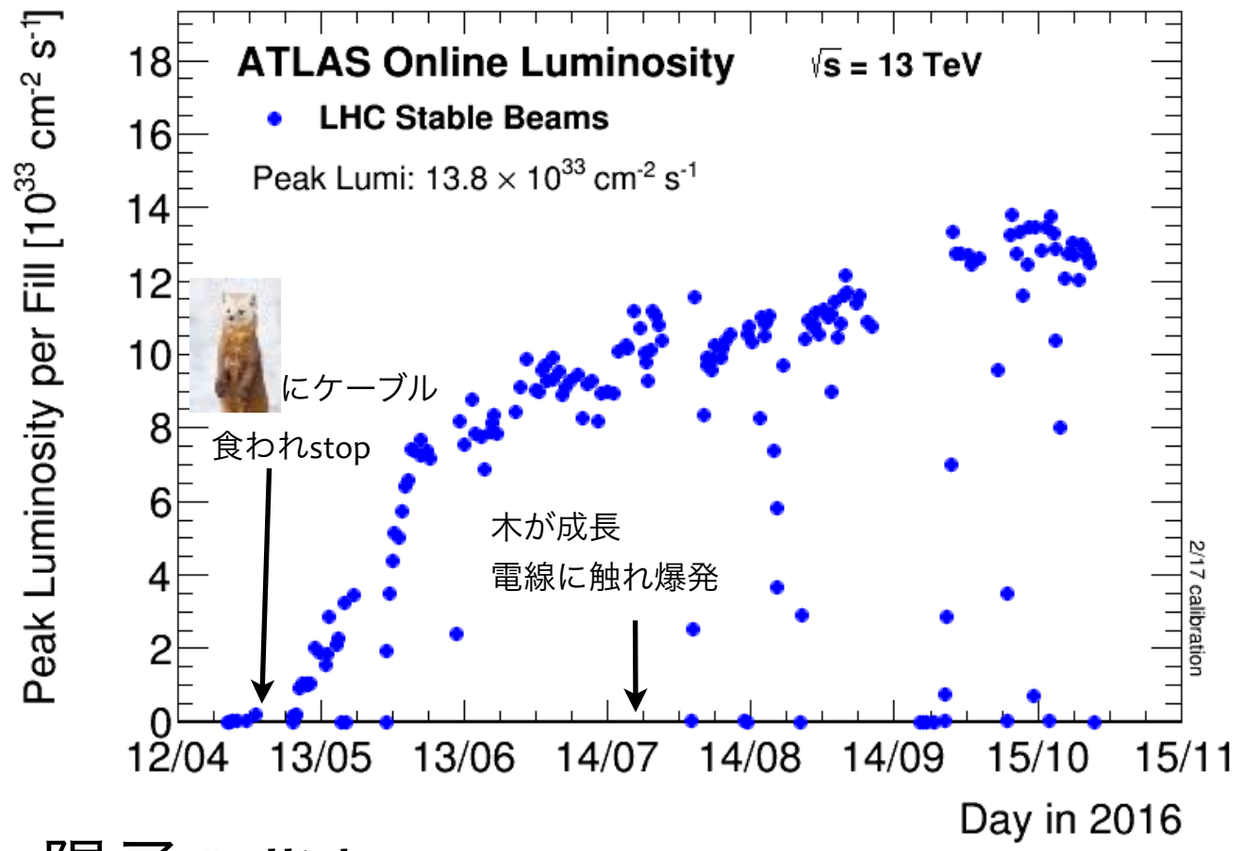
- 加速器・検出器 (2章)
- Particle Reconstruction / ID (3章)
- MC simulation (4章)
- 解析 (5章-7章)

Result

- 結果 (8章)
- 意義と展望 (8章)

The Large Hadron Collider (LHC) (thesis 3.1)





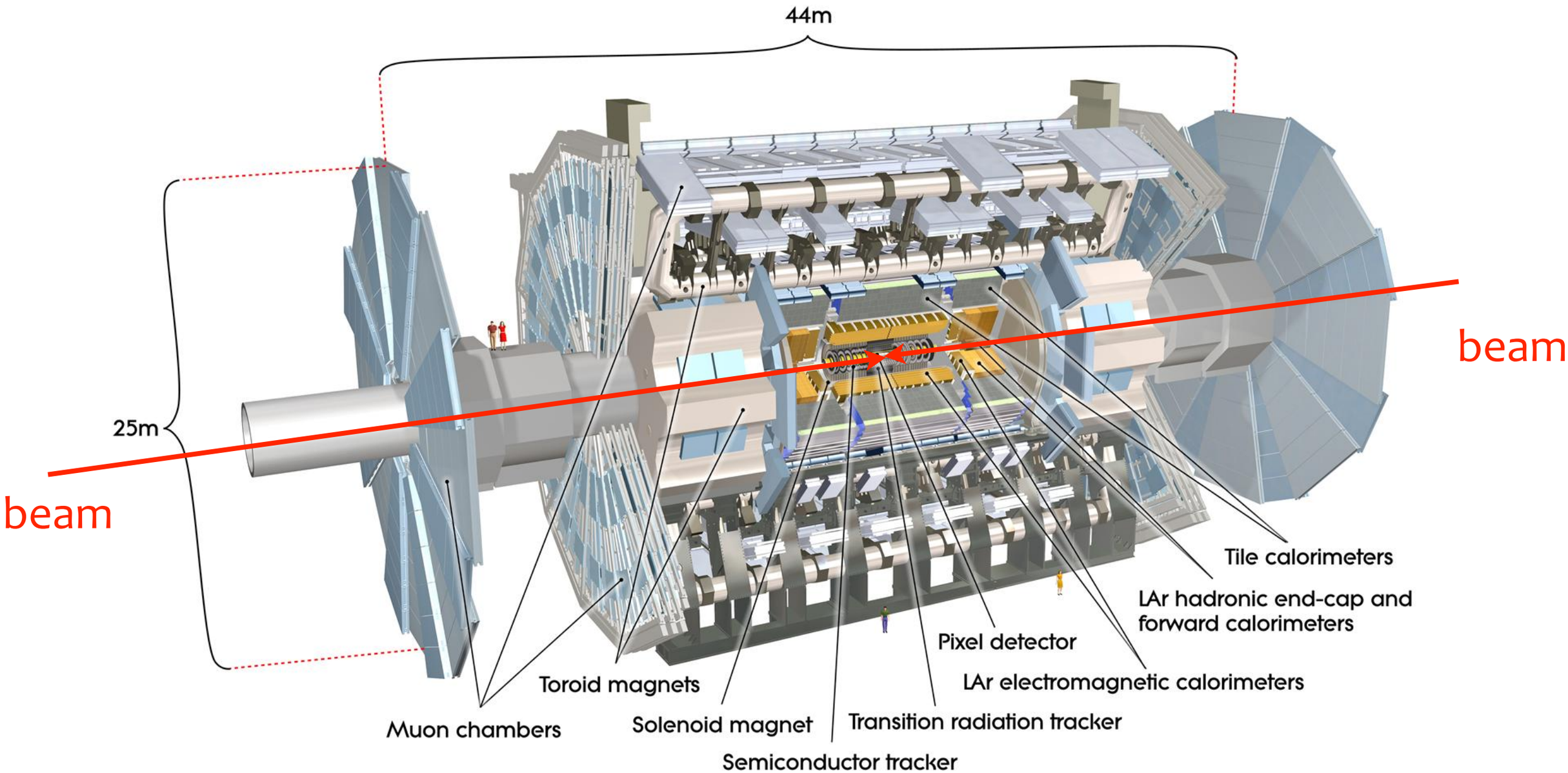
- 欧州原子核研究機構 (CERN) の陽子・陽子Collider
- Run2 (2015~) の主要parameter

重心系エネルギー	13 TeV
Peak luminosity	0.5-1.5 × 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$
Bunch spacing	25 ns
Bunchあたりの陽子	~ 10^{11} 個
Bunchあたりの陽子衝突数	20-40

<u>今回の解析</u>

積分lumi.： 36.1 fb^{-1}

ATLAS Detector (thesis 3.2)



- 汎用detector. 粒子の同定/測定を可能な限り行う設計.
- 内側からtracker, calorimeter, muon spectrometer

Inner Detector (ID)

目的: **荷電粒子の飛跡検出**

2T磁場のsolenoidに覆われてる→運動量測定

Transition Radiation Tracker (TRT)

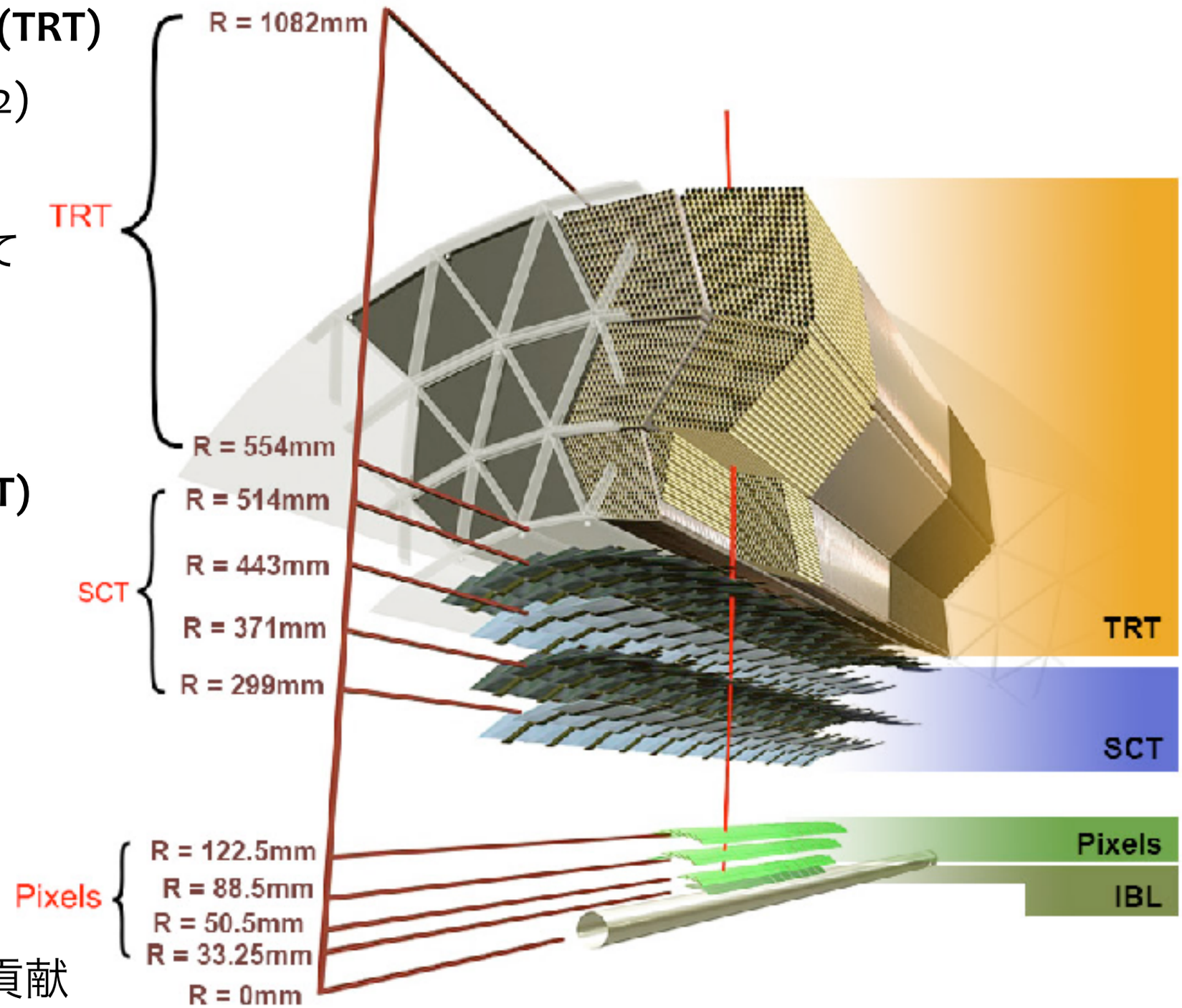
- Drift chamber (平均hit数: 32)
  Xe-Ar gas tubeの集まり
- Transition radiationも測って
  electron IDに貢献

Semi-Conductor Tracker (SCT)

- Silicon strip sensor (6-9層)
- まあまあのhit数・分解能

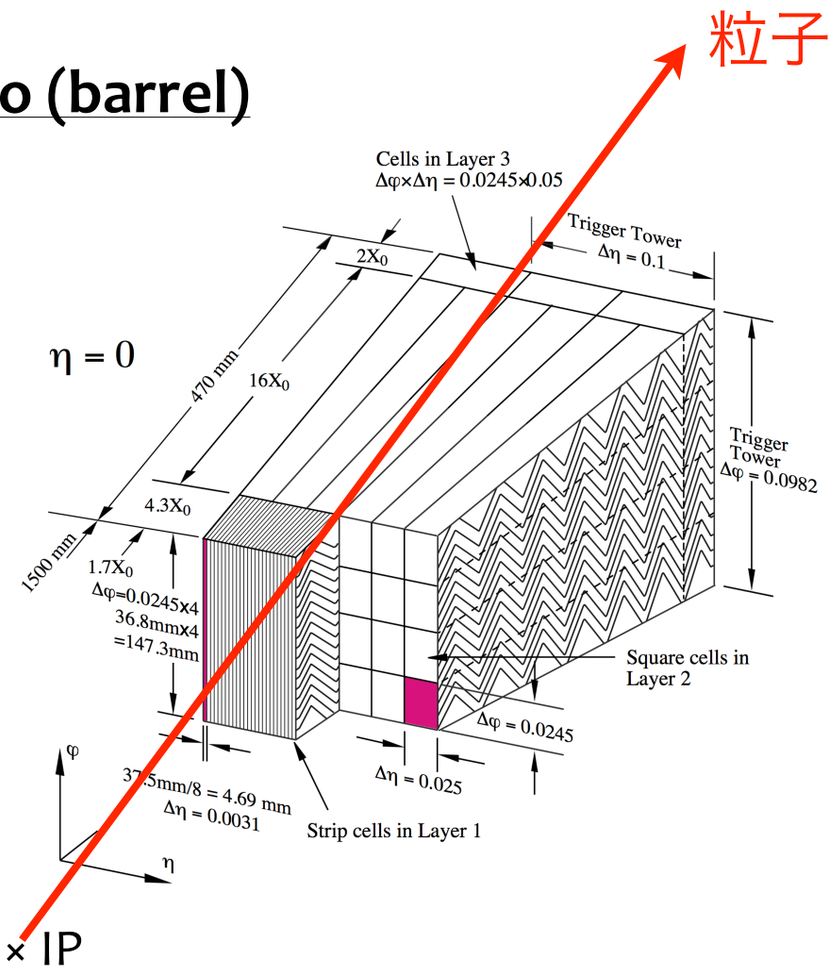
Pixel Detector

- Silicon pixel sensor (3-4層)
- Vertex/trackの精密測定に貢献

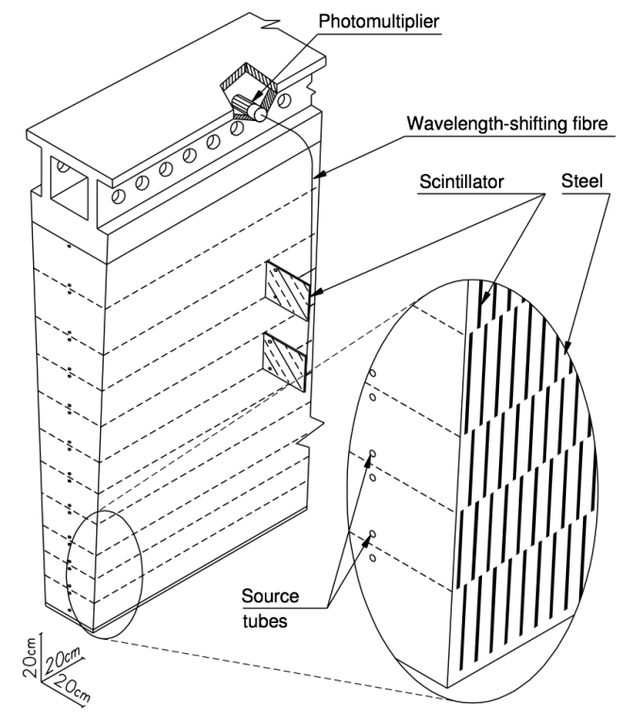


Calorimeter

EM calo (barrel)



Hadronic calo (barrel)



内側: EM calo. **目的:** **Electronの同定・測定**, jet energyの一部測定. **Trigger発行**

Liquid-Ar/Pb sampling calo. Fine segment, $\sigma_E/E \sim 20\% / \sqrt{E(\mathrm{GeV})}$ (for elec.)

外側: Hadronic calo. **目的:** **jetのenergy測定. Trigger発行.**

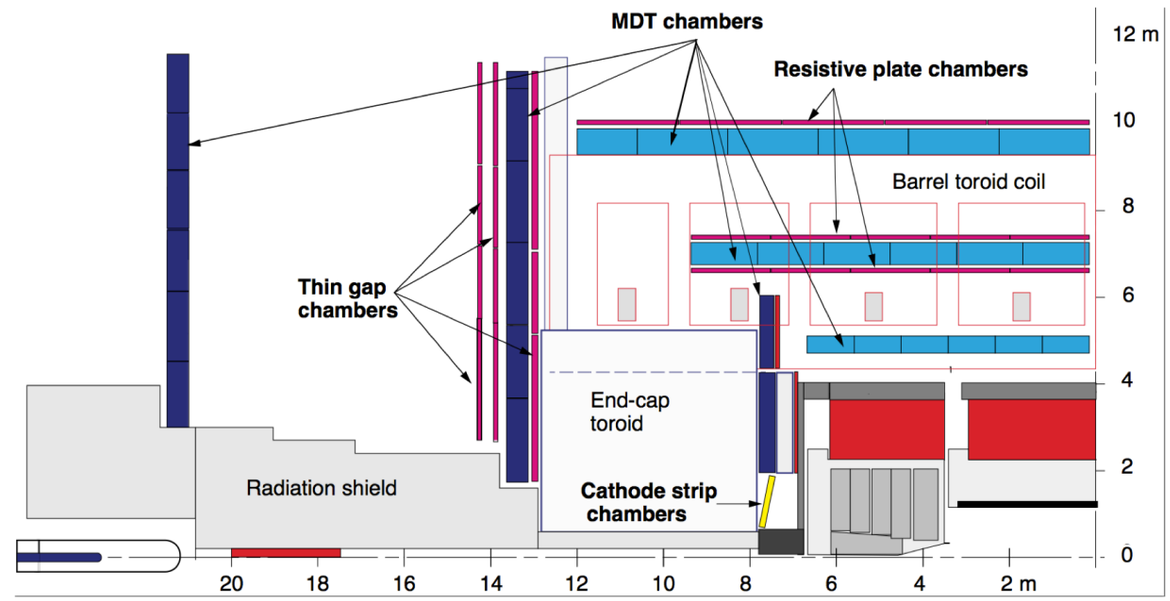
Scintillator/Fe sampling calo. $\sigma_E/E \sim 80\% / \sqrt{E(\mathrm{GeV})}$ (for jet)

Muon Spectrometer (MS)

目的:

Muonを同定・測定.

Hadron colliderにおける重要な**muon trigger発行**



精密測定用:

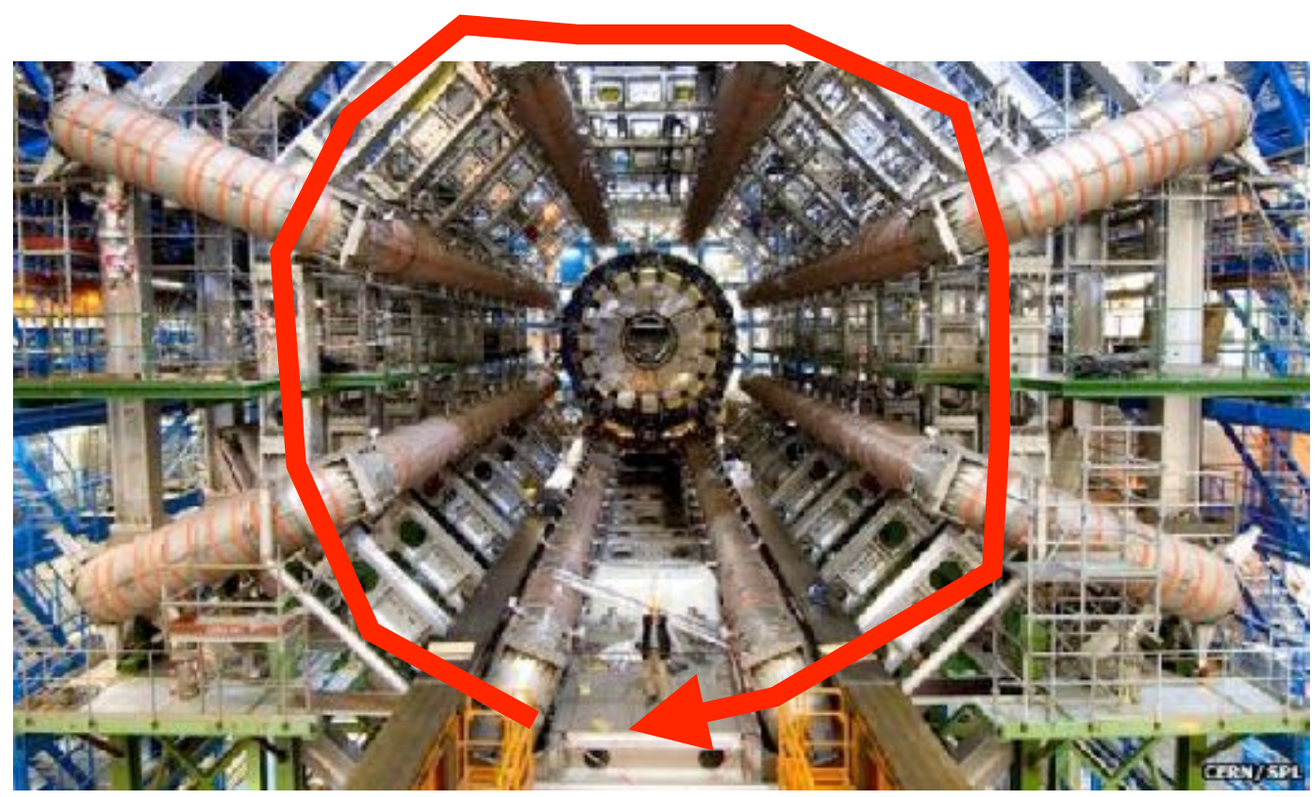
CSC@endcapの前方:　　: MWPC

MDT@それ以外の部分 : Drift Chamber

Trigger 発行用:

TGC@endcap: MWPC

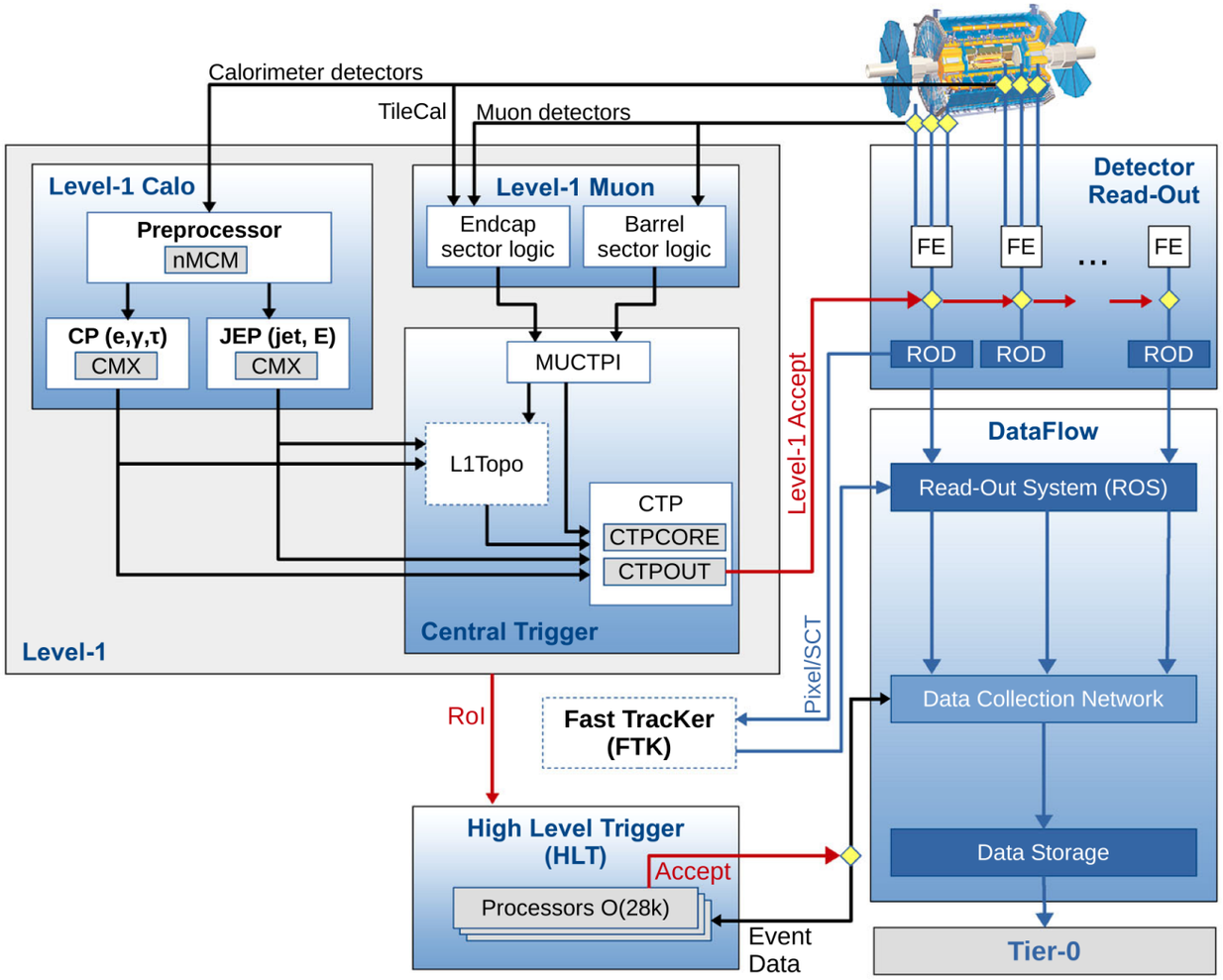
RPC@barrel : Gas gap chamber



- Toroidal磁場で曲げる.

  IDと独立にtrackingが可能

Trigger and Data Acquisition (thesis 3.2.6)



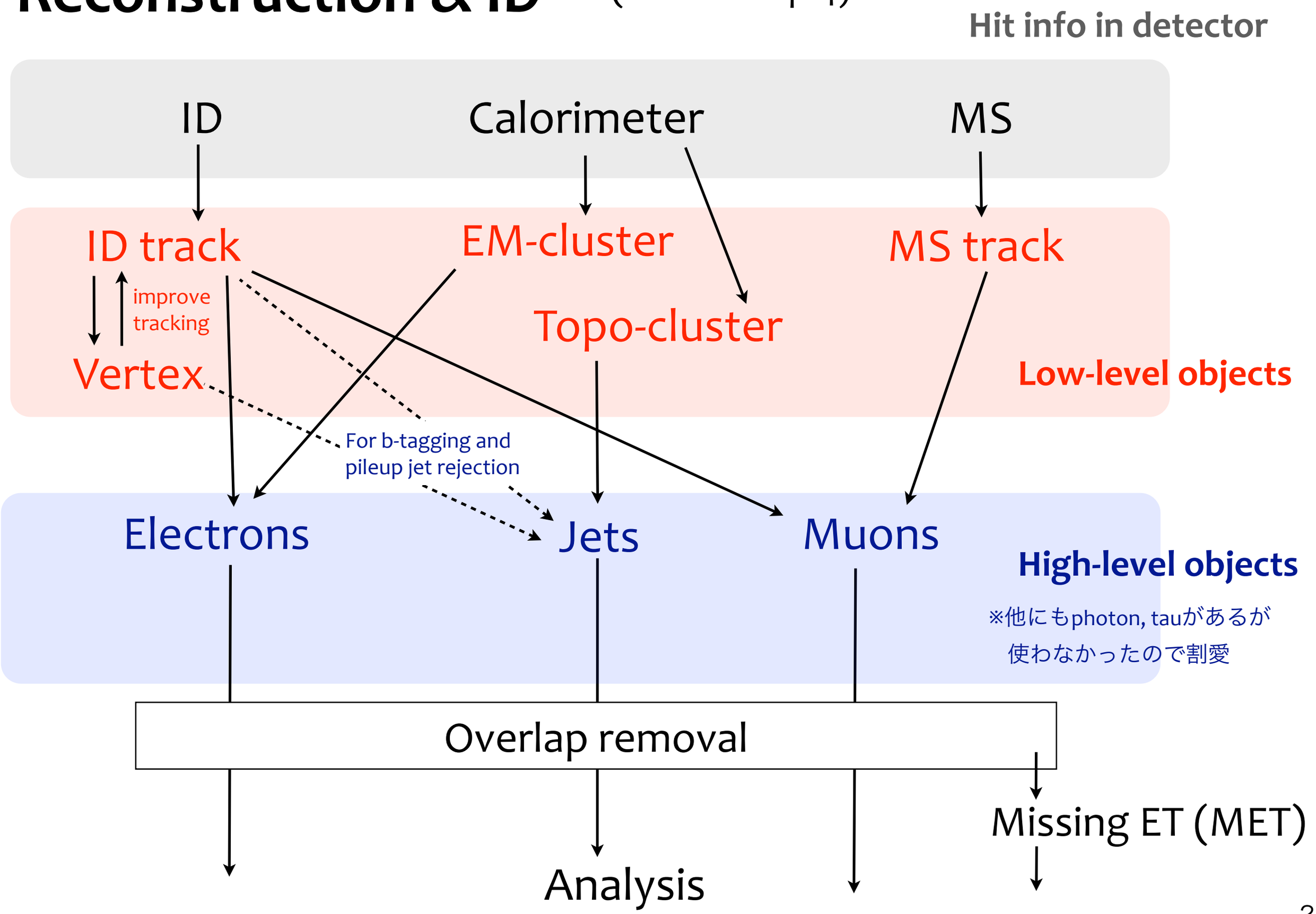
- Junk QCDのとてつもないrateを下げるため two-staged trigger:

Level-1 trigger (L1) : Hardware-based. 早いがテキトー. 簡単なBGをガッツリ落とす.

High-Level Trigger (HLT) : Software-based. L1で稼いだ時間でちゃんと再構成・較正

本解析ではL1もHLTもmissing energy triggerを使用 (thesis 6.1参照)

Reconstruction & ID (thesis chap.4)



Contents

Introduction (1-2章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

Experiment

- 加速器・検出器 (3章)
- Particle Reconstruction / ID (4章)
- MC simulation (5章)
- 解析 (6章-8章)

Result

- 結果 (9章)
- 意義と展望 (10章)

Contents

Introduction (1-2章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

Experiment

- 加速器・検出器 (3章)
- Particle Reconstruction / ID (4章)
- MC simulation (5章)
- 解析 (6章-8章) →

  - Signal regionの設計 (6章)
  - BG estimation (7章)
    & Uncertainties (8章)

Result

- 結果 (9章)
- 意義と展望 (10章)

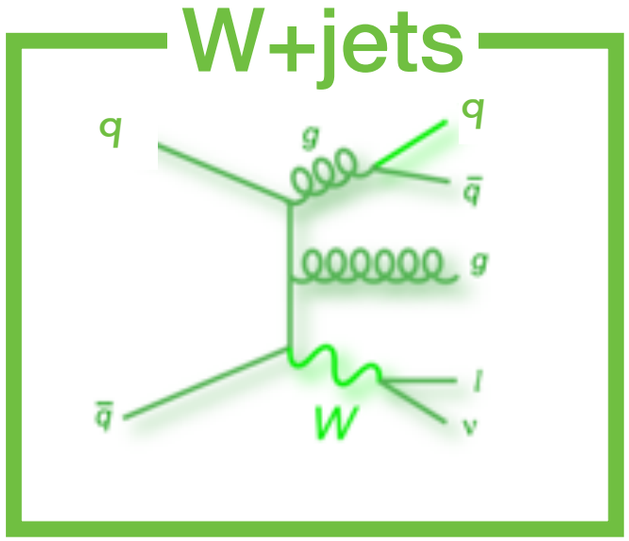
Signal region (SR) の設計 (thesis 6.3/6.3.1)

- 1-lepton終状態 = electron / muon が ちょうど1個の終状態

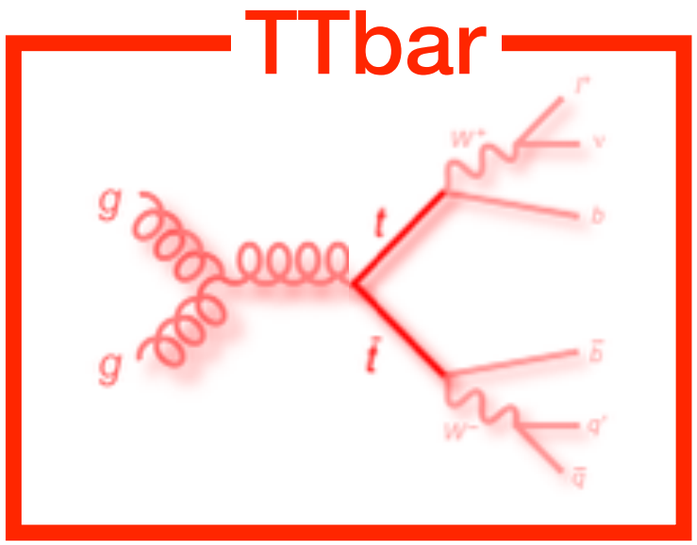
- **解析の様相がかなり異なるのでSRをbの数で分類 (“Category”).**

Category	b-jet multiplicity	Main background
B-vetoed (BV)	0	$W + \text{jets}$
B-tagged (BT)	1-2	$t\bar{t}$
3B	≥ 3	$t\bar{t}$, $t\bar{t} + cc/bb$

Main BG



b: 0個



b: 2個

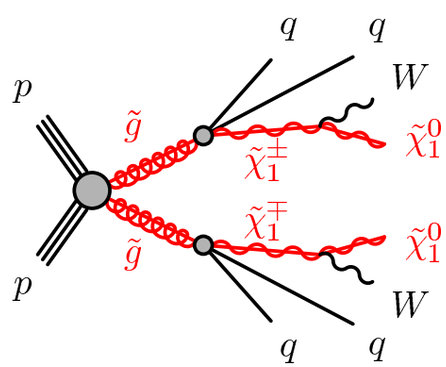
- BV/BTは大体S/N同じ. ⇒ BV/BTは同じcutで扱う,

  3BはS/Nが格段によい ⇒ 3Bはそれとは別にoptimize

Signal region (SR) の設計 (thesis 6.3.1)

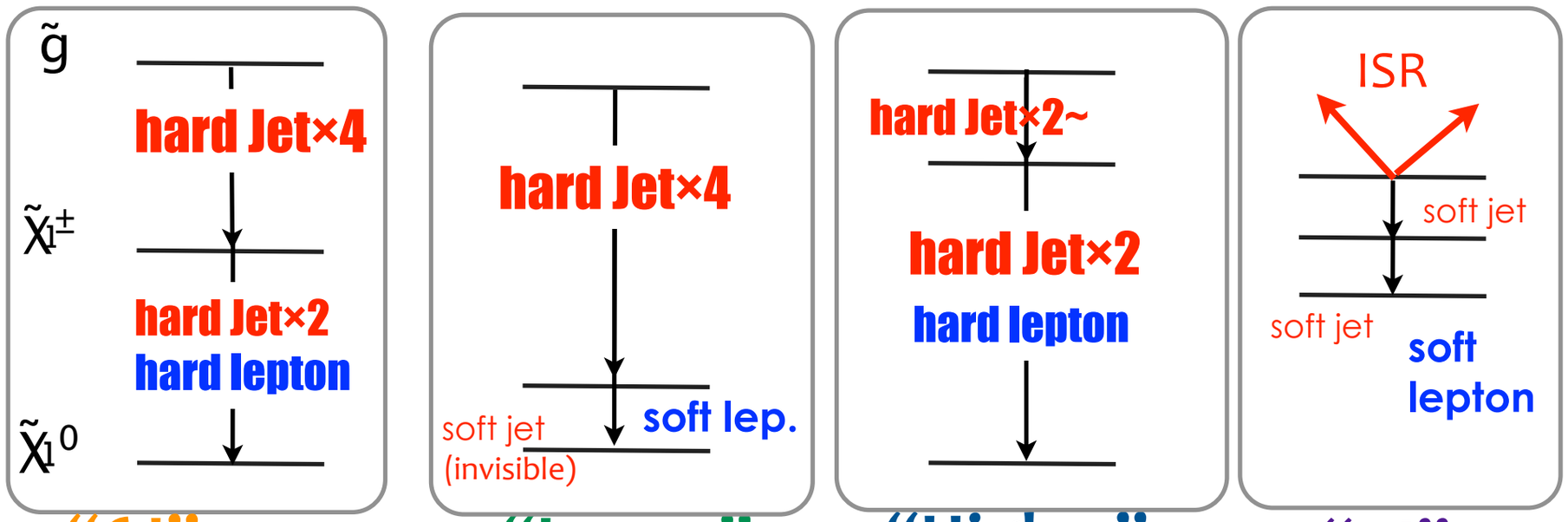
- **BV/BTはさらに1-step decayのパターンを網羅すべく4つの"Tower"を設定.**

e.g. Gluino 1-step
chargino-med.



Mass spliting parameter

$$x := \frac{m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0)}{m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) - m(\tilde{\chi}_1^0)}$$



"6J" "Low-x" "High-x" "2J"

(DM-oriented scenario)

Category	Tower	Electron (muon) p_{T} [GeV]	n_{J} ($p_{\mathrm{T}} > 30$ GeV)
BV/BT	2J	$\in [7(6), 35]$	≥ 2
	6J	> 35	≥ 6
	Low-x	$\in [7(6), 35]$	≥ 4
	High-x	> 35	≥ 4
3B	3B	> 15	≥ 7

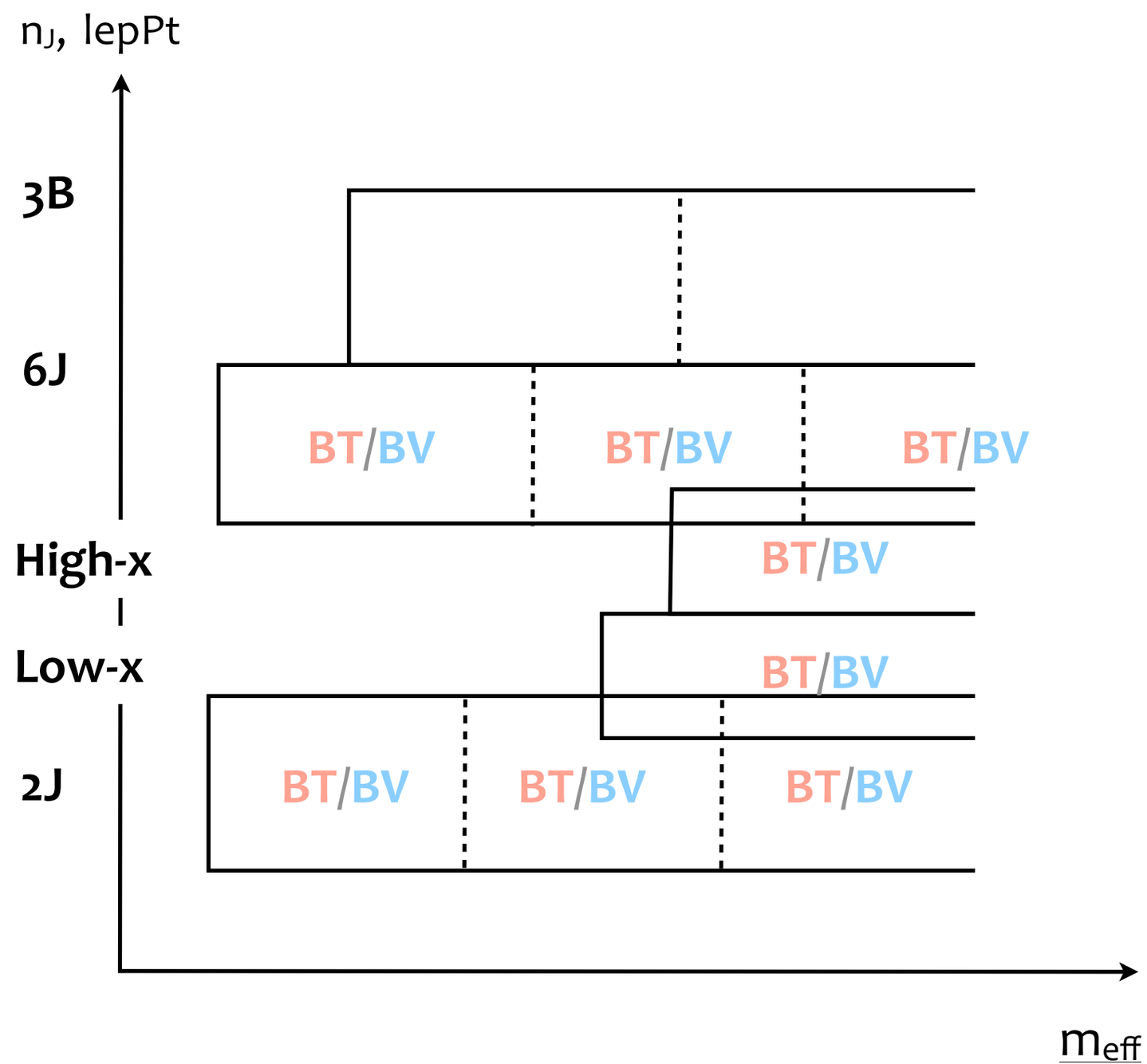
Signal region (SR) の設計 (thesis 6.3.1)

- さらにloose/tight regionの需要があるので, 各towerを m_{eff} でbin分け.

$$m_{\mathrm{eff}} = p_{\mathrm{T}}^{\ell} + \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{jet}}} p_{\mathrm{T},j} + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}.$$

2J,6J:	3 bins
Low-x/High-x:	1 bins
3B:	2bins

- 計18bin.
- 最終的に独立なbinをcombine.



Signal region (SR) の設計 BG落とすためさらにcut (thesis 6.3.2-3)

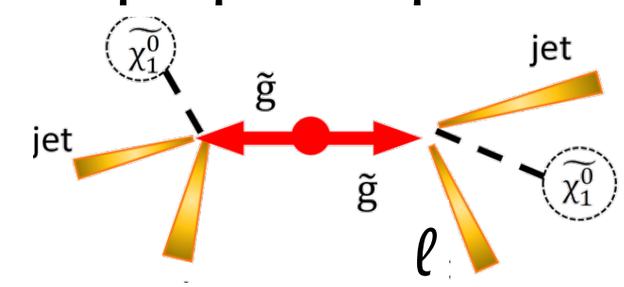
代表的なもの

- **M_T (ℓ,MET)**
  通常SMの1L終状態のleptonとMETはW→ℓν由来.
  $M_T < M_{inv.}$ なので, BGは$M_T \sim m_W$でcut-off.
- **m_{eff}, MET, jetPt**
  終状態粒子のhardさ. 一般的に信号はBGよりhard.
- **Aplanarity:**
  SM BGはISR/FSRだらけでplaner. SUSYはspherical.
- **Topness:**
  Mass constraints-based ttbar tagger.

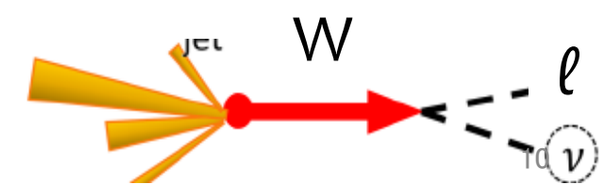
原則:

特定のdecay/massにfine tuneしない.
signalの一般的な性質しか使わない

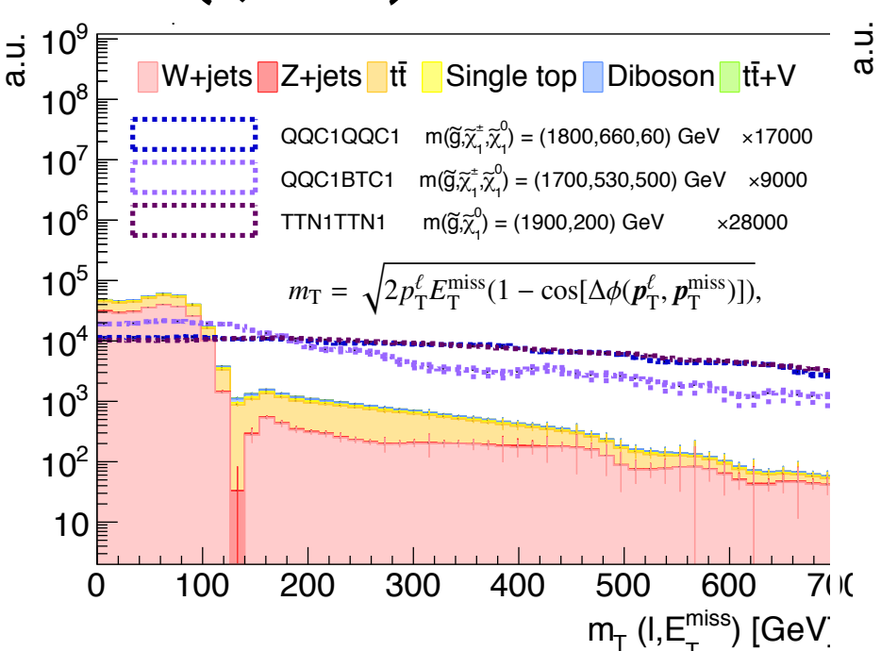
Gluino pair prod. →spherical



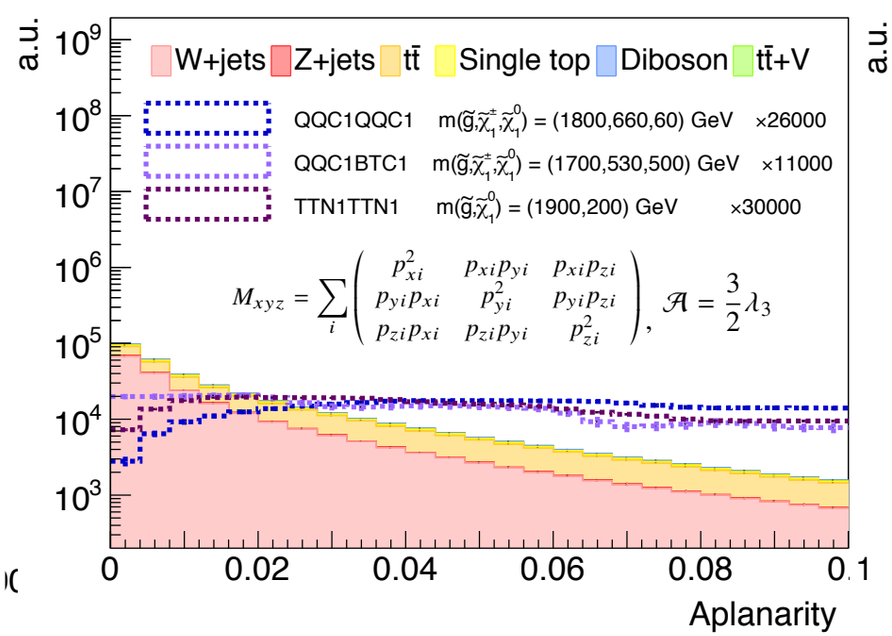
W+jets → planar



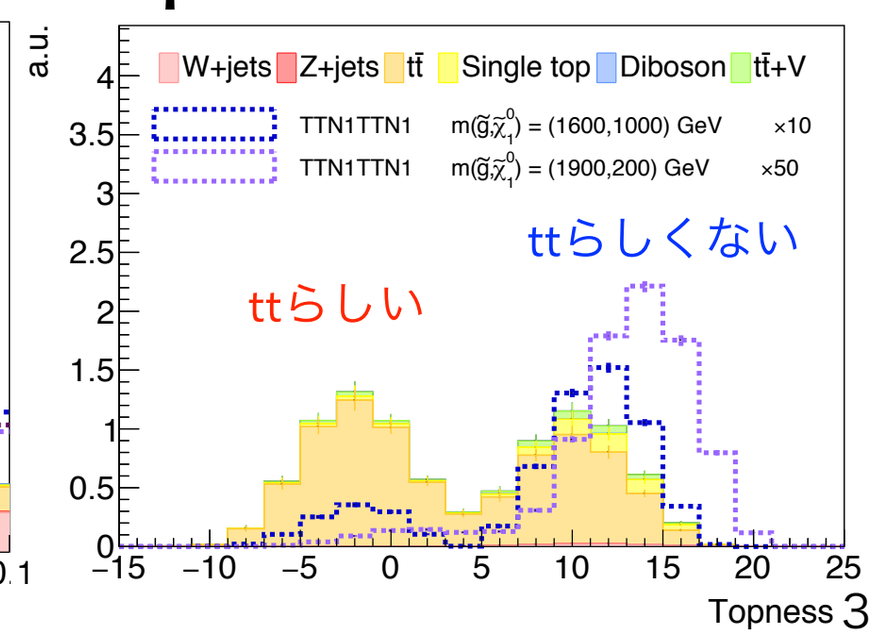
M_T (ℓ,MET)



Aplanarity



Topness (n_B >=3, M_T>125)



Signal regionまとめ

Cutは全体的にやや緩め. Exclusion powerが少し弱くなるかわりにBG estimationがやりやすくなる.

いたときにちゃんと発見できるような設計.

SR tower name →

	2J	**6J**	**Low-x**	**High-x**	**3B**
$n_{\ell,\mathrm{base.}}$	1	1	1	1	1
$n_{\ell,\mathrm{sig.}}$	1	1	1	1	0
$p_{\mathrm{T}}(\ell)$	$[7(6), 35]$	> 35	$[7(6), 35]$	> 35	> 15
$n_{\mathrm{J}}\ (p_{\mathrm{T}} > 30\ \mathrm{GeV})$	≥ 2	≥ 6	≥ 4	≥ 4	≥ 7
$n_{\mathrm{B}}\ (p_{\mathrm{T}} > 30\ \mathrm{GeV})$	0/[1,2]	0/[1,2]	0/[1,2]	0/[1,2]	≥ 3
$E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	> 430	> 350	> 350	> 300	> 300
m_{eff}	[1100/1500/1900)	[1100/1600/2100)	> 1900	> 2000	[1000/1750)
$m_{\mathrm{T}}(p_{\mathrm{T}}(\ell), E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	> 100	> 175	> 100	> 300	> 175
Aplanarity	-	> 0.06	> 0.02	> 0.01	> 0.01
$E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}/m_{\mathrm{eff}}$	> 0.25	-	-	> 0.25	-
$n_{\mathrm{J}}/p_{\mathrm{T}}(\ell)$	> 0.2	-	-	-	-
$\min_{i=1-4} \Delta\phi(j_i, E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	-	-	-	-	> 0.45
Topness	> 4	> 4	> 4	> 4	> 6

Background estimation (thesis chap. 7)

New physics search全般で言えること

最後数発しか残らない→統計エラーdominant

- Systematicの%を競う競技ではない.
- いかにcrazyじゃないことを保証できるかが論点.

SUSY search の BG estimationはタフである

- **SUSY signal は (LSP2個出すので) peak 作らない**

  “side band”がない.

  SMのtailをまじめにmodelしないといけない.

- **TailではMCはかなり間違ってる** (thesis 6.2.1)

  Tailに行くほど高次補正の効果が大きくなるが,

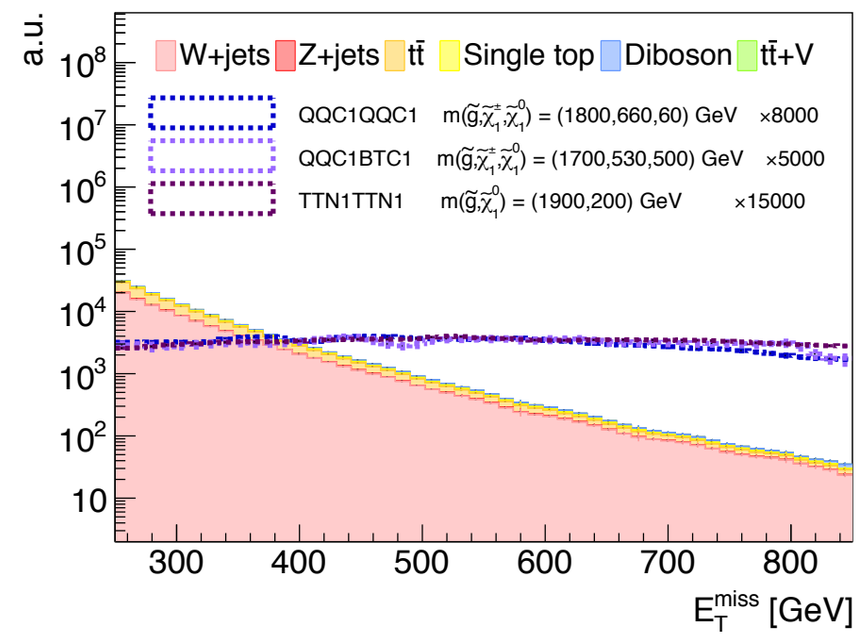
  MCの計算はNLO+αで限界.

  おそらくそれが原因だと思われているが,

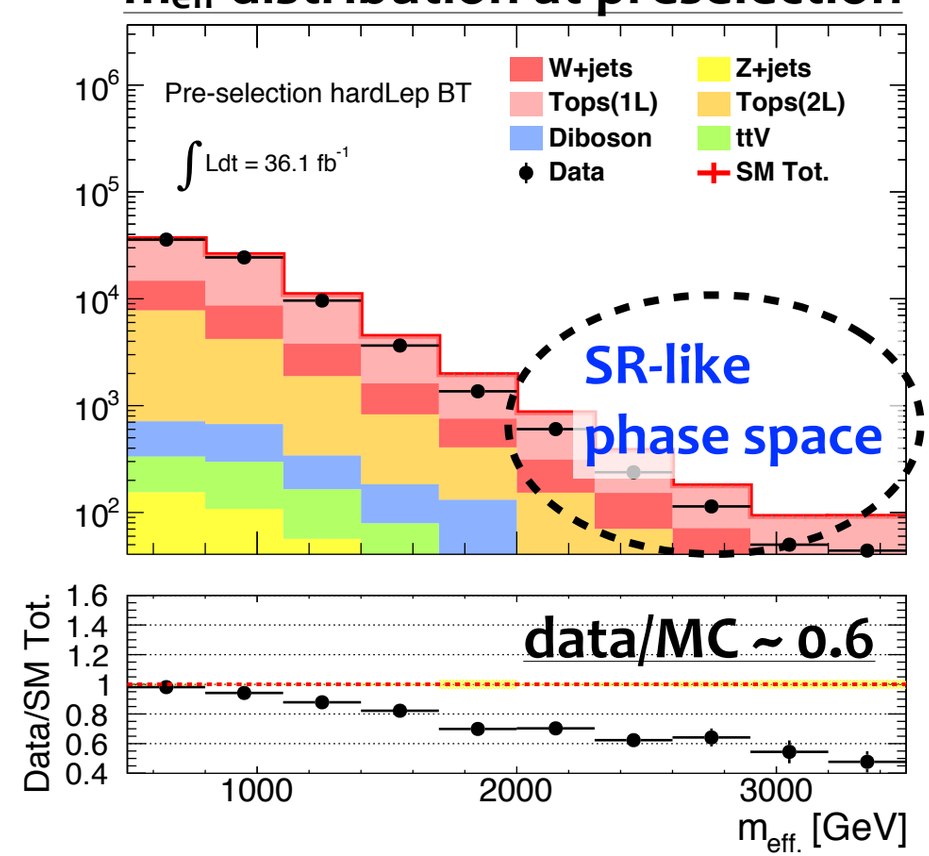
  詳細ははっきりしない (候補は色々ある).

次の2ページに例を見せる

MET distribution at preselection



m_{eff} distribution at preselection

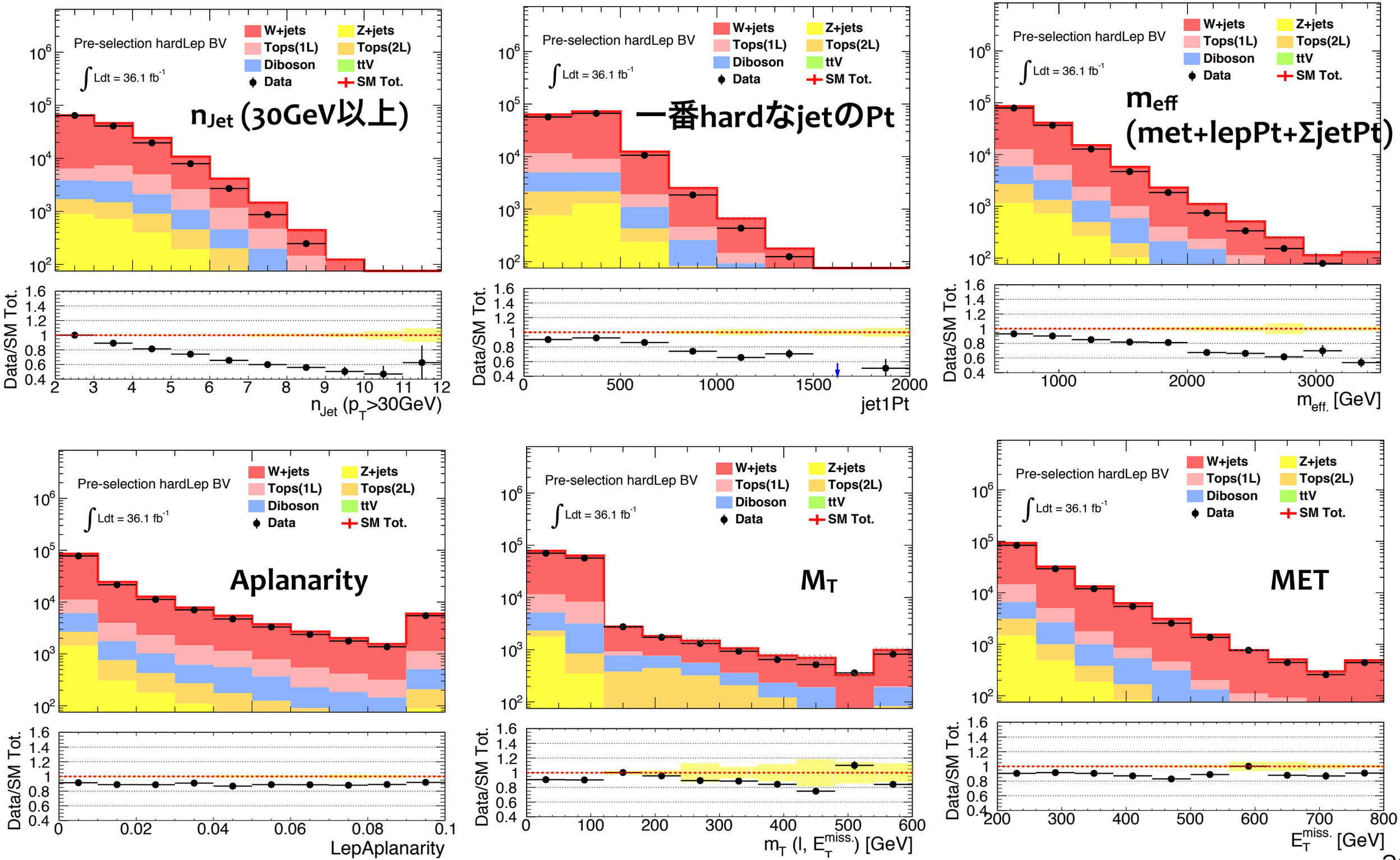


W+jets@ Preselection

(thesis 7.2.1)

jetは全てISR or FSR.　jetの数・PtともにMCが大きすぎる傾向.

粒子のhardさに比例しない変数 (M_T, apl.など) は割とgood.

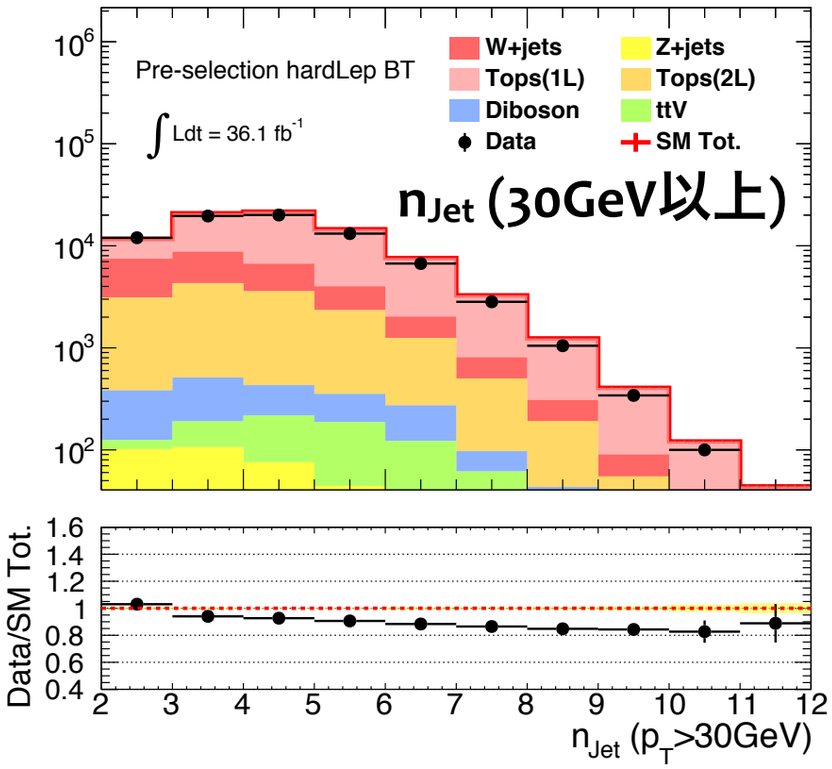


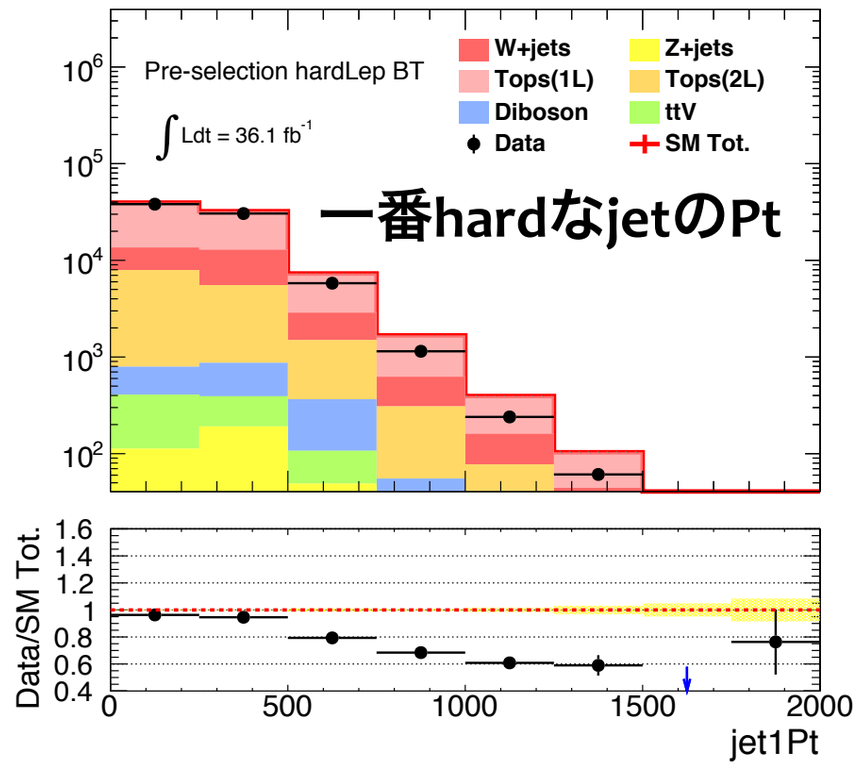
ttbar @Preselection

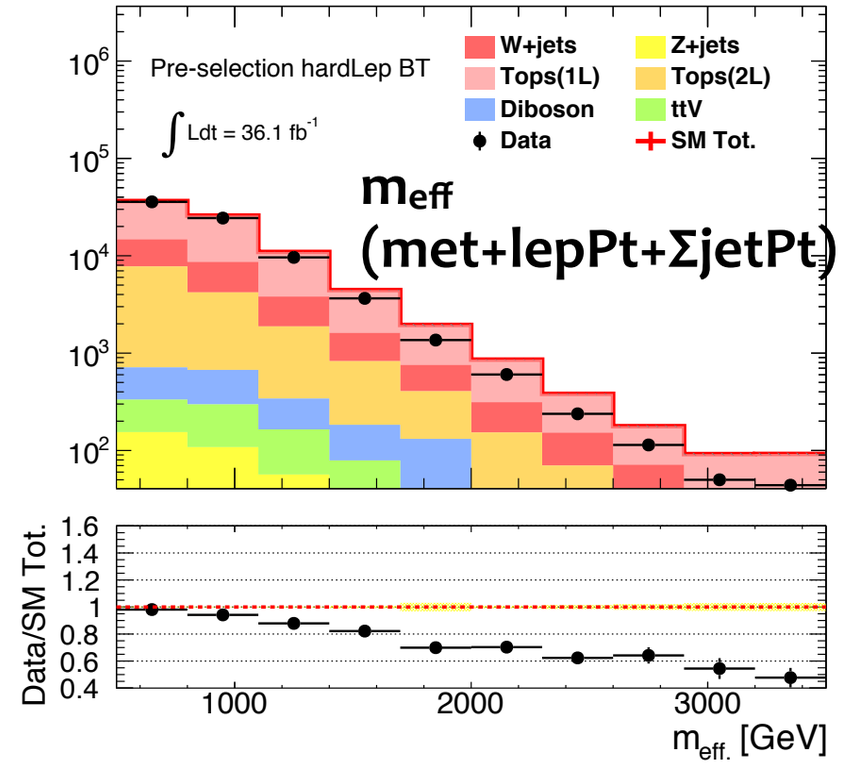
(thesis 7.2.1)

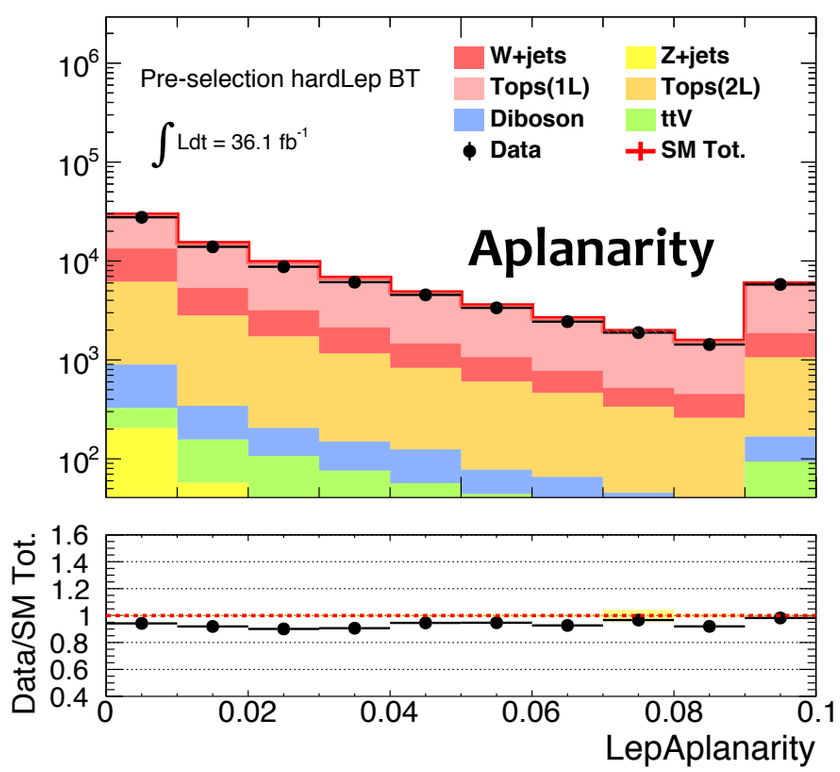
Hardなjetに異常が見られる．ISRのmis-modelingが疑われる．

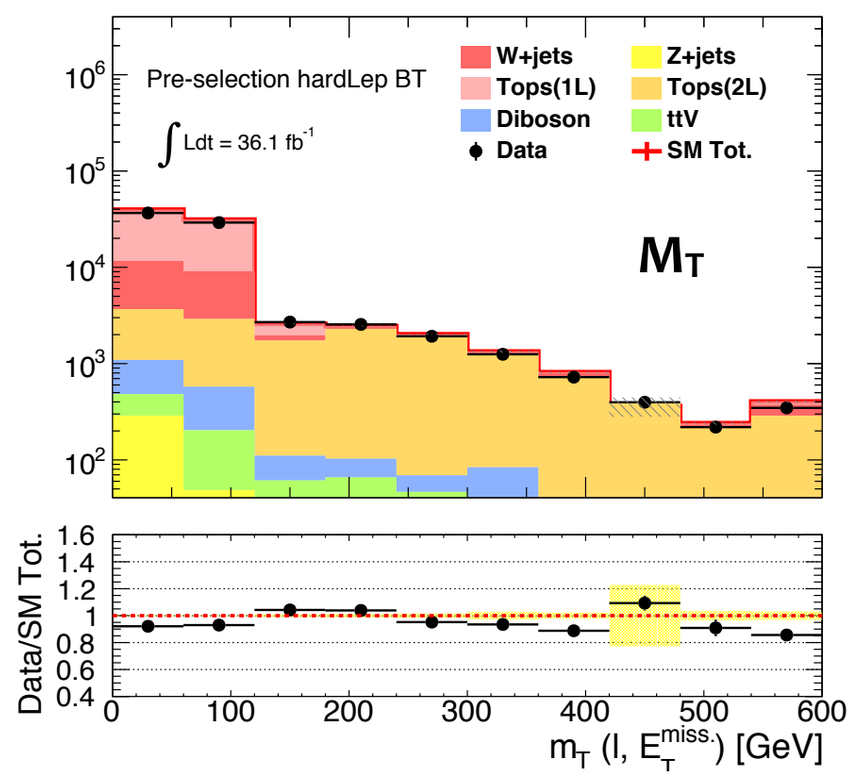
M_Tやaplanarityはほぼwell-modeled.

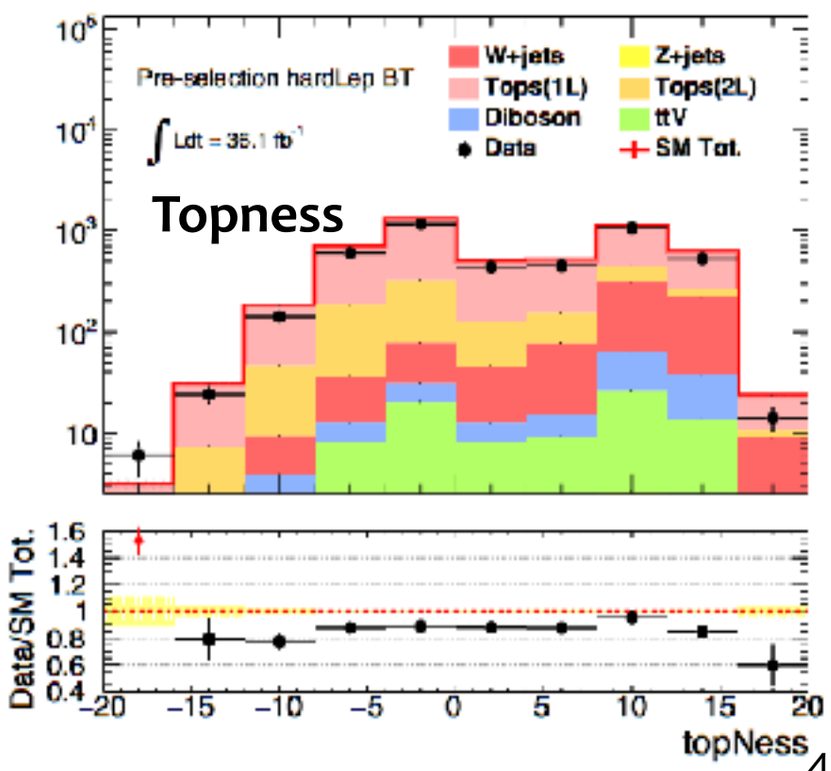












というわけでMCそのまま使うのはダメ。

⇒ **Data-driven approach**

① **Kinematical extrapolation** (conventional, semi-data driven)

② **Object replacement** (~fully data driven)

2つの方法で全てのBGを求める

というわけでMCそのまま使うのはダメ。

⇒ **Data-driven approach**

① **Kinematical extrapolation** (conventional, semi-data driven)

② **Object replacement** (~fully data driven)

2つの方法で全てのBGを求める

Kinematical extrapolation Method (thesis 7.2)

- SRの近くにcontrol region (CR) を設定. そこでMCをdataにエイヤで合わせる.
- 補正後のMCを正しいと思ってそのまま使う. (“extrapolation”)

大事なこと:

- **MC modelingがダメな変数はSRとCRでcut揃える.**

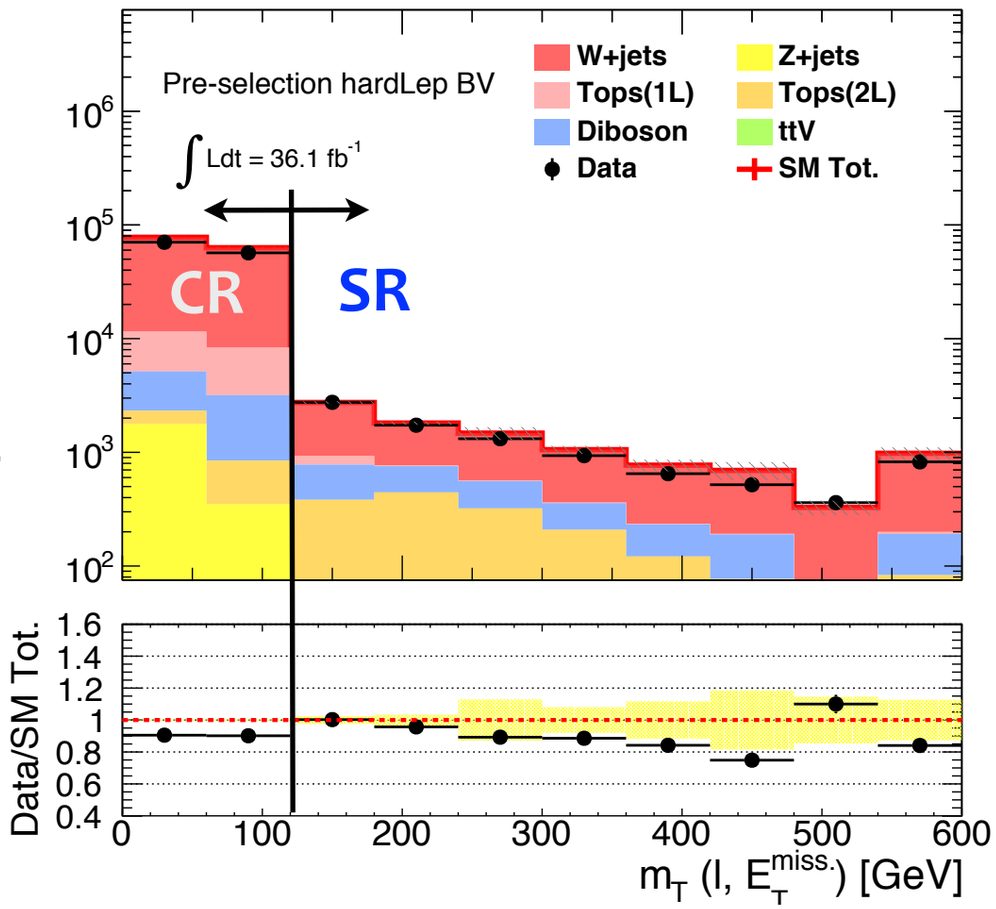
  ダメ変数: nJet, jetPt, m_{eff} など.

- **MC modelingいい変数だけでextrapolate.**

  善い変数: M_T, aplanarity, topness.

※ 補正はW+jetと Top (tt+single-top)のみ

その他のminor BGはMCそのまま使う

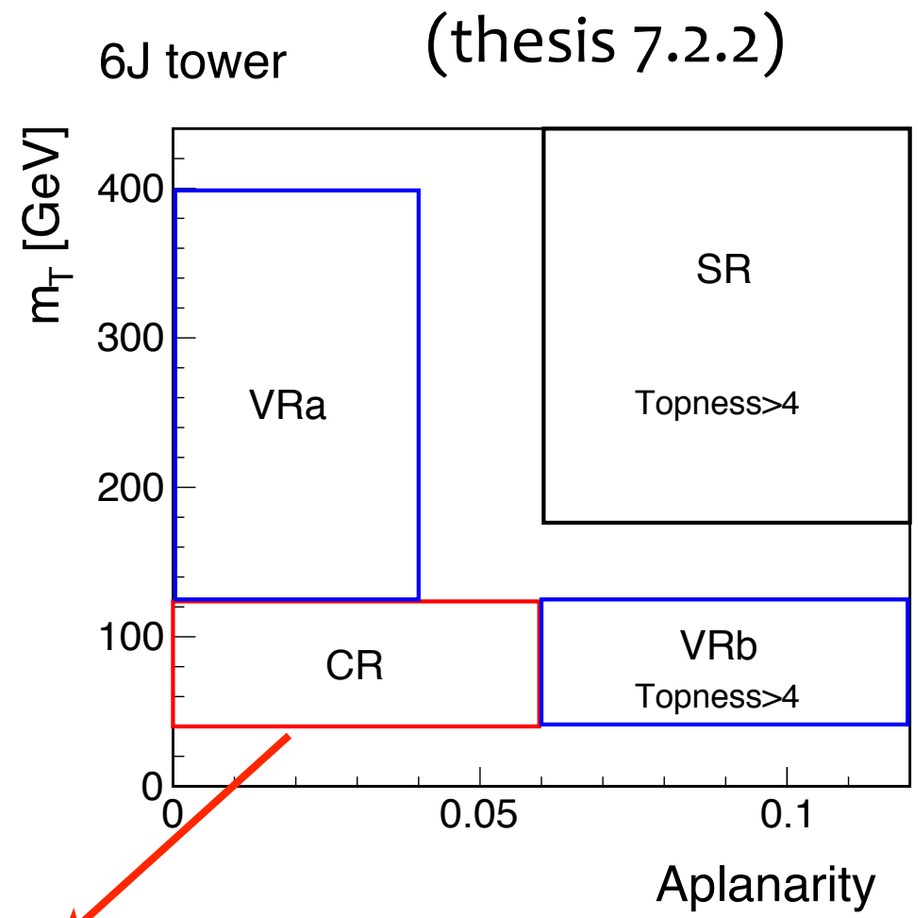


Kinematical extrapolation

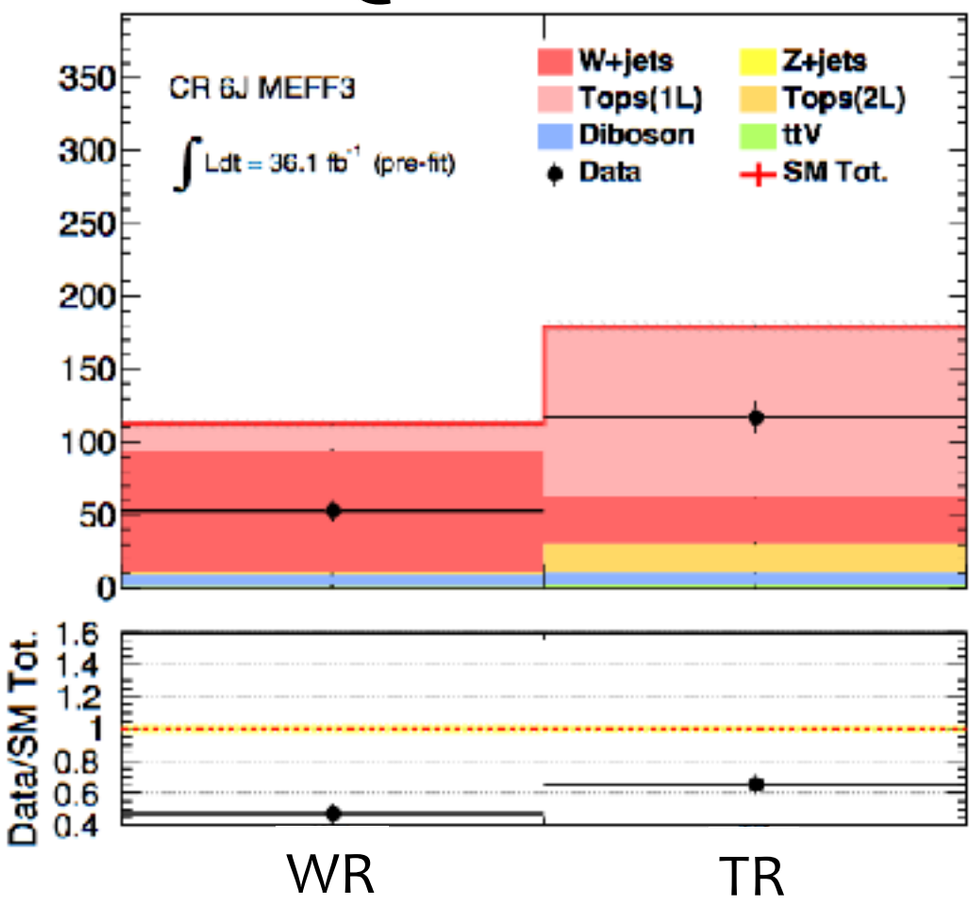
1つのSRにつき**CR 2つ** + Validation region **(VR) 2つ**

CR: WR/TRに分割 (b-tag/b-veto).
W+jets, Topを同時fit, それぞれを補正.

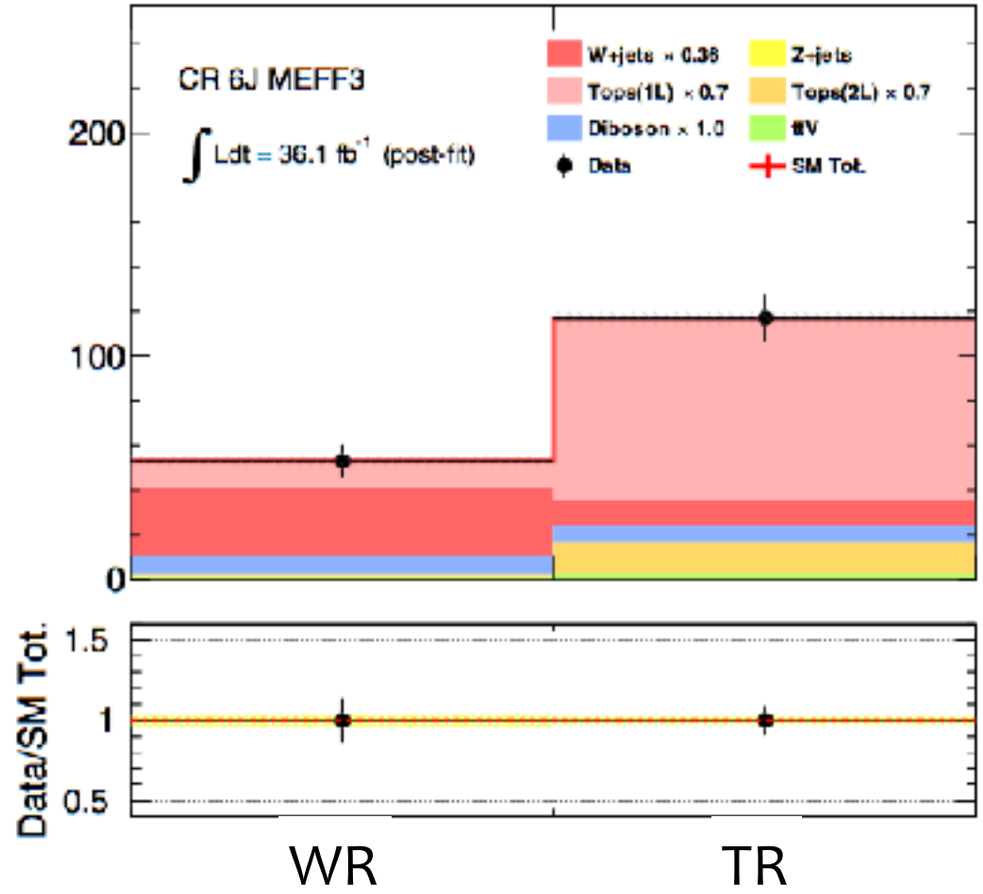
VR: CRとSRの間に設置.
この補正の正当性をチェックする場所.



PRE-fit@CR



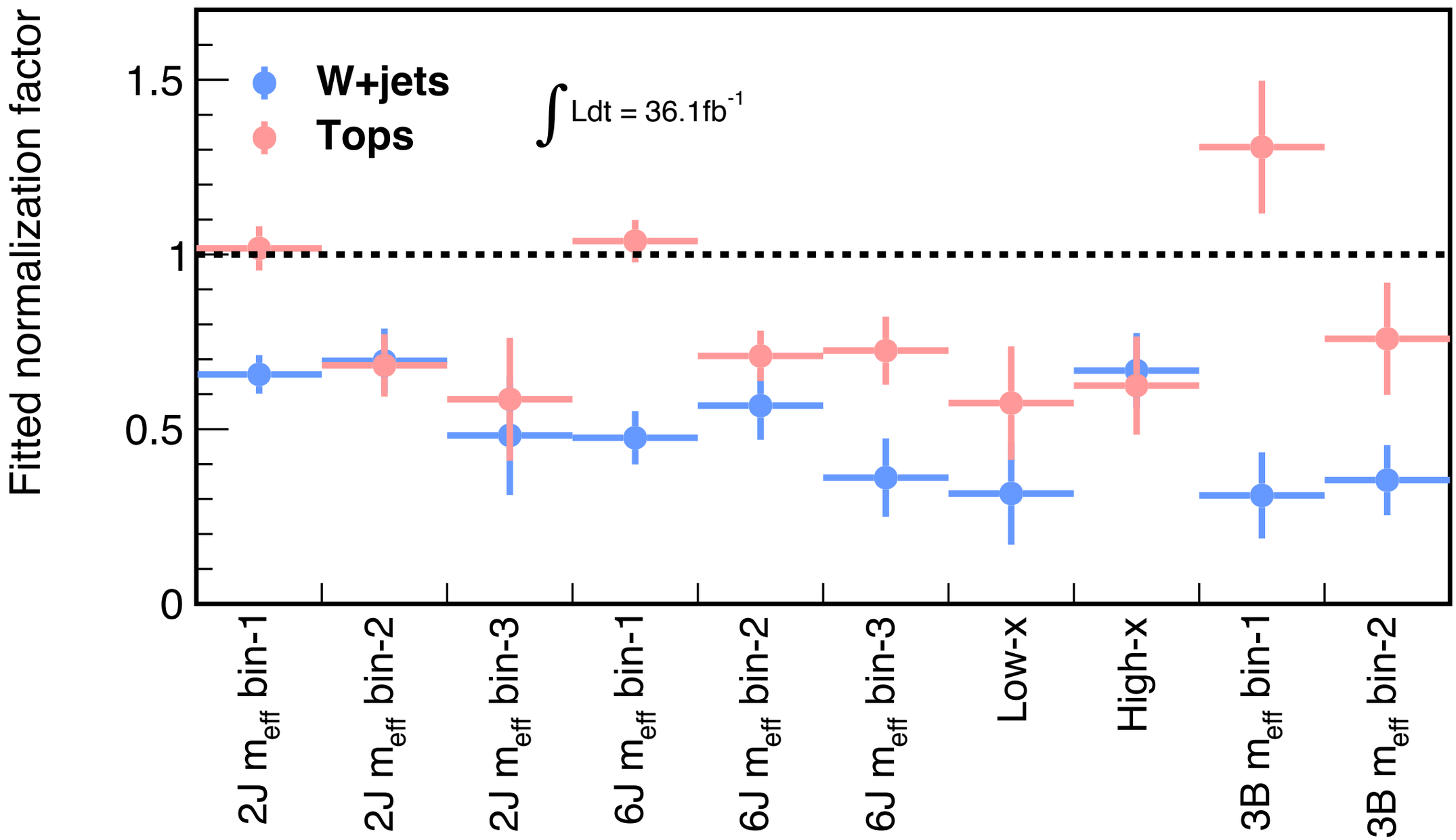
POST-fit@CR



←6J $m_{eff}^{bin\text{-}3}$の例

Kinematical extrapolation Method (thesis 7.2.3)

Fit result (thesis 6.2.4) "Top" = ttbar + single-top



一番ひどいところでNF~0.4 (150% errorに相当).

Uncertainty @Kinematical extrapolation Method

“善い変数”のMC modelingも完璧ではない.

- 理論/実験由来のsystematicsがM_Tやaplanarityなどのshapeに影響を与える.

  把握されている効果はMC variationでimpactを評価.

実験由来の効果: (thesis 8.1)

- Calibrationのresidue (Jet energy scale etc.),
- Jet/MET resolutionのmodeling不定性

(thesis 8.2)

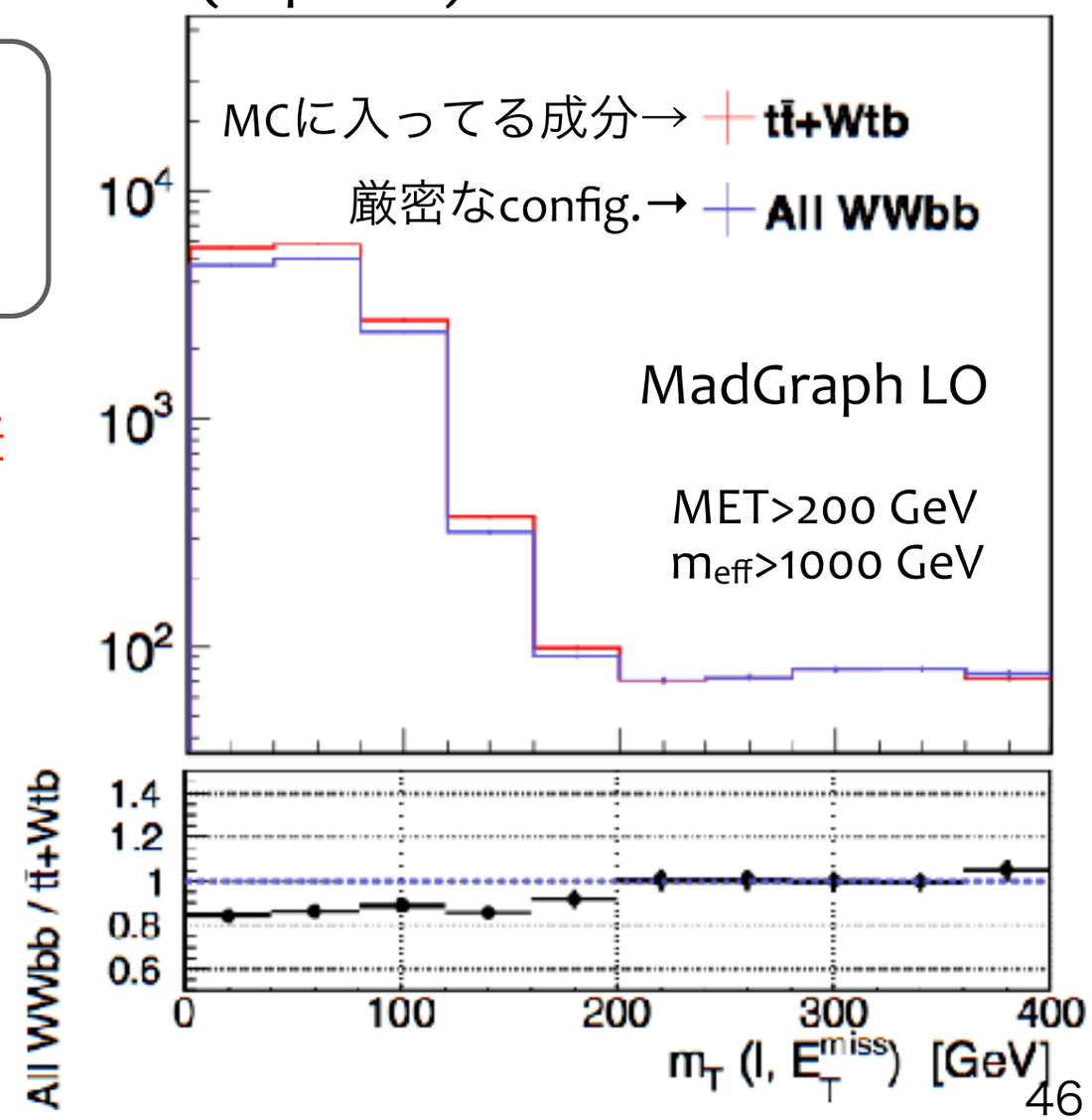
理論由来の効果: ~MCの計算の不定性/近似誤差

- QCD scale dependency.
- Parton shower schemes比較.
- **Off-shell diagramからの寄与 / 干渉.**

  M_Tのcut-off 周辺で比較的に大きい影響.

  常に10%-20% underestimateすることになる

(Topの例)



Uncertainty @Kinematical extrapolation Method

“善い変数”のMC modelingも完璧ではない.

- **さらに(原理的にまだ)把握されてないsystematicsによる効果もある** (thesis 8.3)

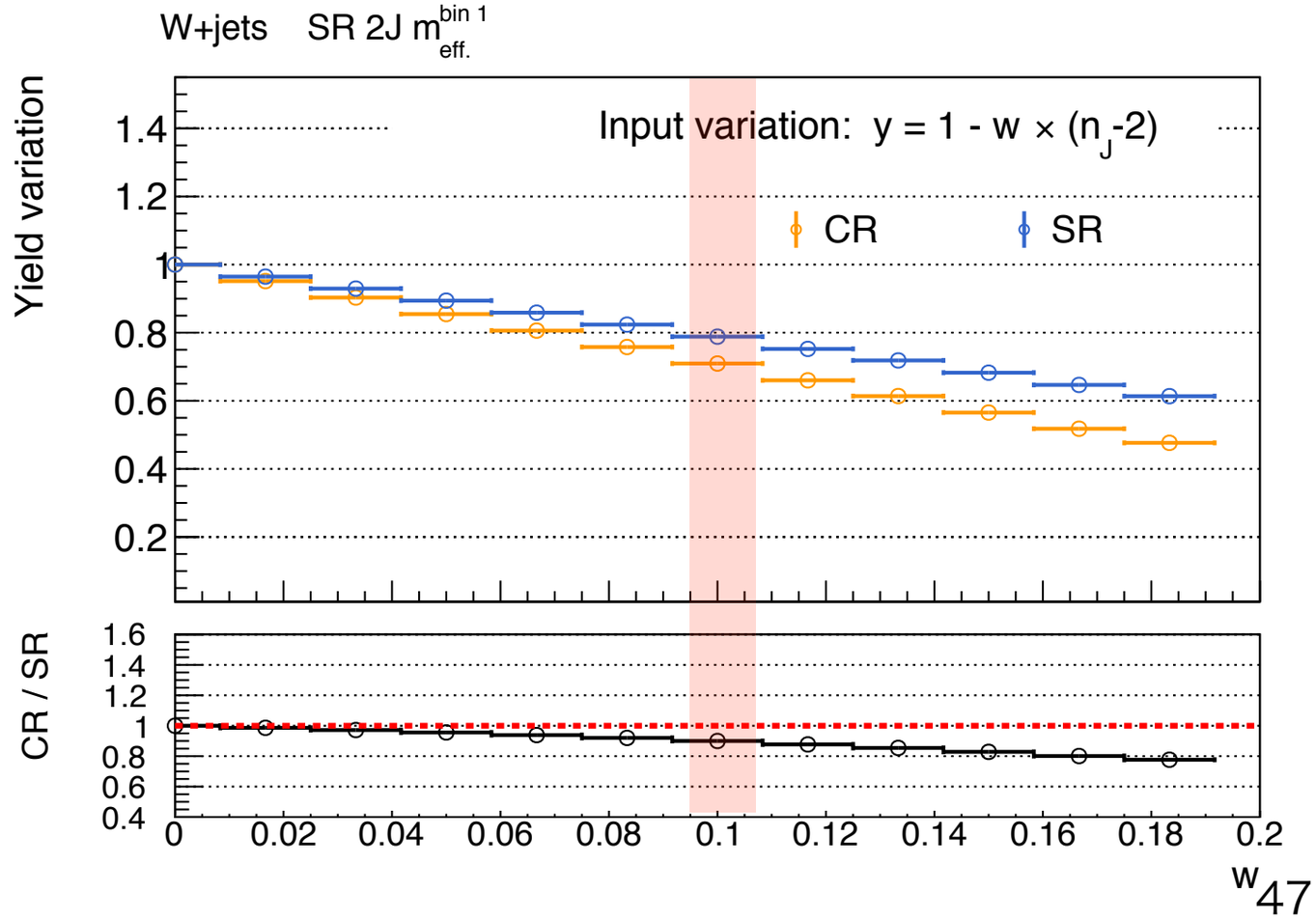
i.e. Pre-selection levelで見たdata/MC discrepancy.

⇨ Empirical functionでMC mis-modelingを表現.

MCをこれでre-weightしたときのextrapolationの不正確さで影響を評価.

e.g. W+jets

MCを $w = 1 - 0.1 \times (n_{\mathrm{J}} - 2)$ でreweightするとmis-modelingが大体治るので, これでunknown systematicsを表現することにする.



- **全体で外挿精度: 20%-50%**

というわけでMCそのまま使うのはダメ。

⇒ **Data-driven approach**

① **Kinematical extrapolation** (conventional, semi-data driven)

② **Object replacement** (~fully data driven)

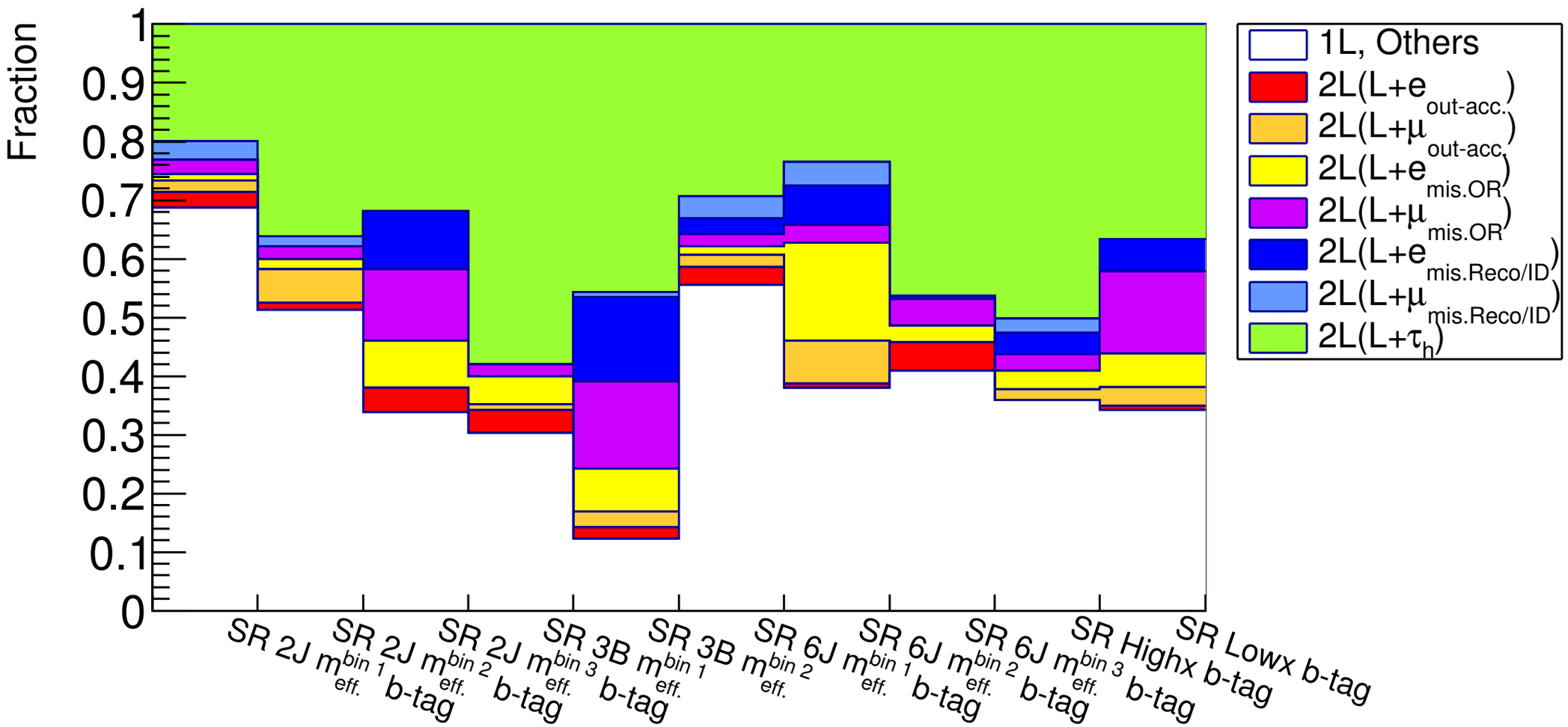
2つの方法で全てのBGを求める

そもそもSRにいるBGは何者なのか (thesis 7.1)

M_T cutで普通の1-lepton BG大量死. 実はSRには **di-leptonic BG** が多い (特にBT, 3B SR)

(tt, Wt, WWなどに由来)

SR BTのbreakdown



[白] 本当に1-lepton

[緑] ℓτ. τ→hadronic. (jetに見える)

[他の色] ℓℓ, ℓ→ℓmis.

何かしらの理由で1個紛失

Kinematical extrapolation @di-leptonicは怪しい

CRとSRで成分が違う.

CRとSRで同じcutかけても取れる

phase spaceが大きく異なる.

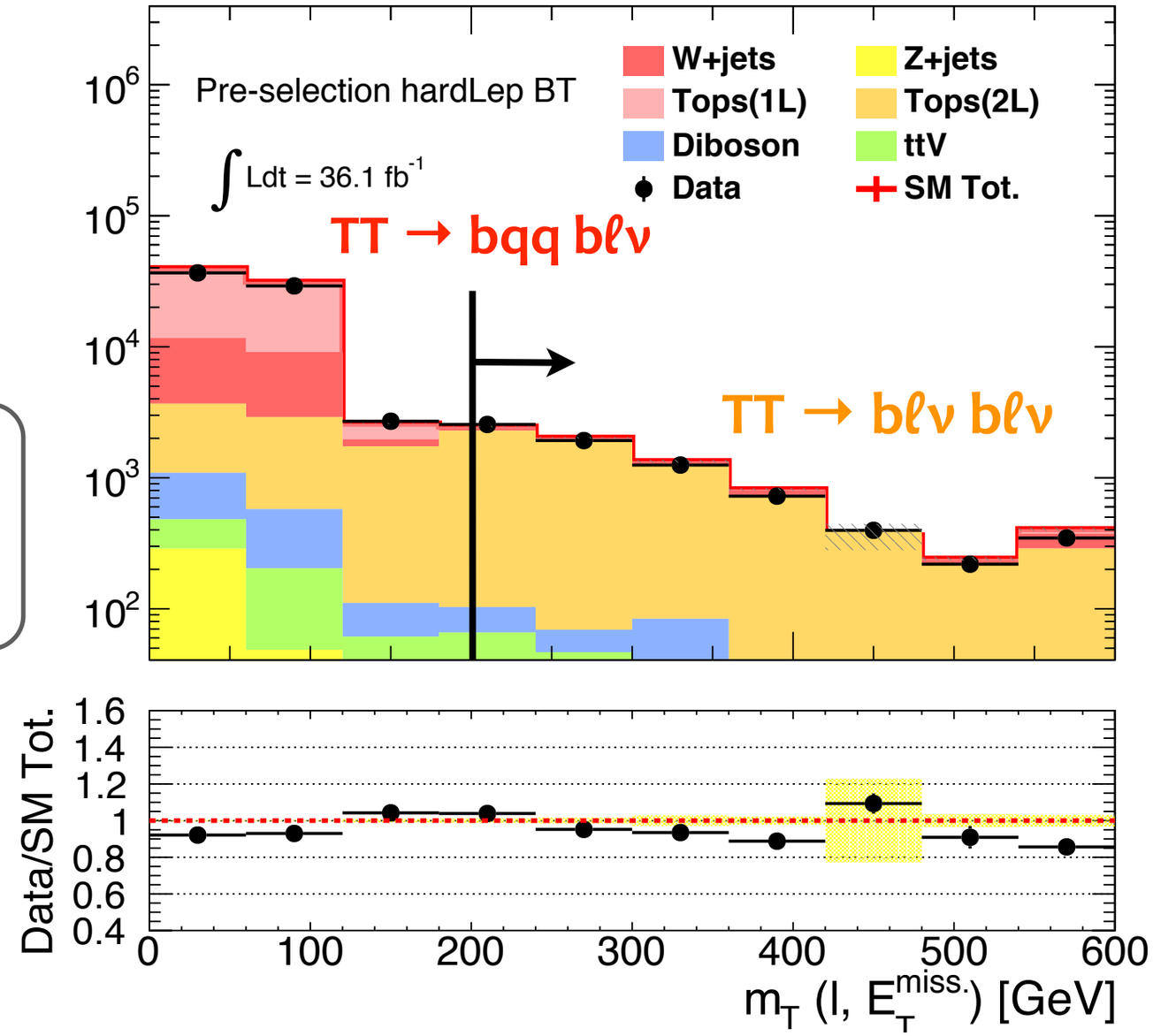
e.g. TTbar

(CR) jet6本要求 → 2本がISR/FSR.

(SR) jet6本要求 → 4本はISR/FSR

ISRの数で実質extrapolate

することになる. それはまずい.



BGがdi-leptonicなら2-lepton regionをCRに使えばよいではないのか？

→ Object replacement

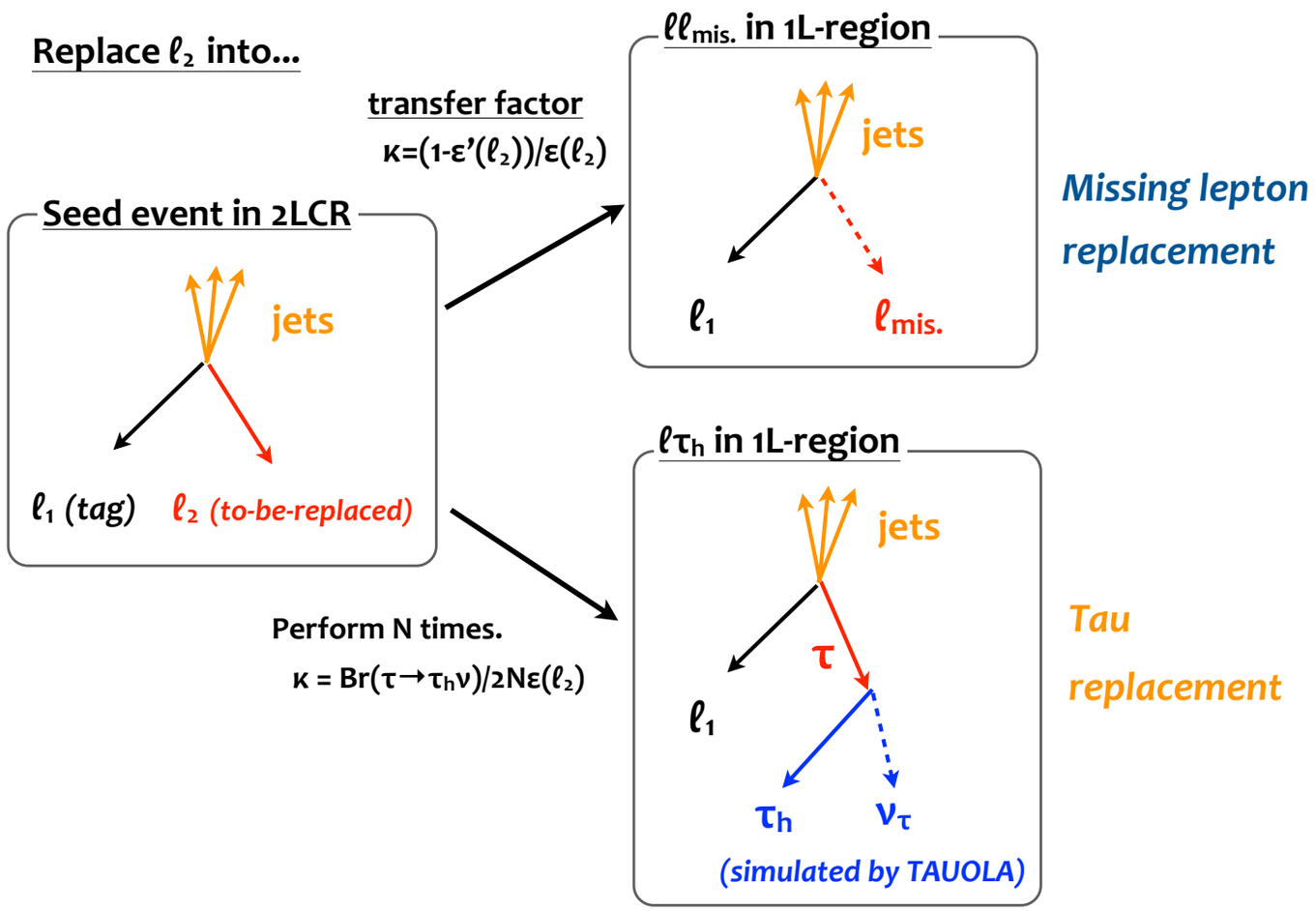
Object replacement method (thesis 7.3)

1. Dataの2 lepton evtを2LCRから拾って来る (seed event).
2. うち片方を**a missing lepton** か **simulated hadronic τ-decay** に置き換える.
3. MET, m_{eff}などの変数を再計算. SRに入ったイベントを数える

ミソ: jetには一切触らない

MCがダメな部分はdataにmodelさせる

よく理解ができてる部分 (τ-decay / lepton ID etc.)はMCを使う



- 置き換えた後のevt (“sub-evt.”)ごとにweight (κ)がassignされる.

  e.g. missing lepton replacement:
  κ = (ineff.)/(eff.)

- 1つのseedから多数のsub-evt.を生成して平均を取っている.

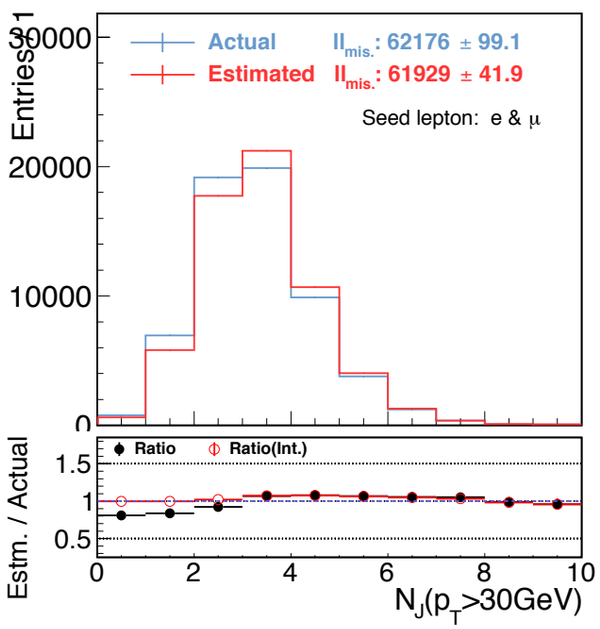
Technicalにはかなり複雑
(thesis 7.3.1)

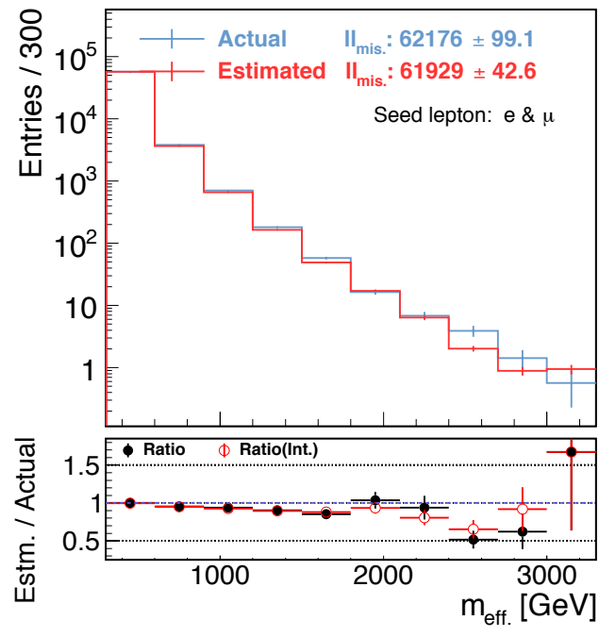
MC closure test

(thesis 7.3.2)

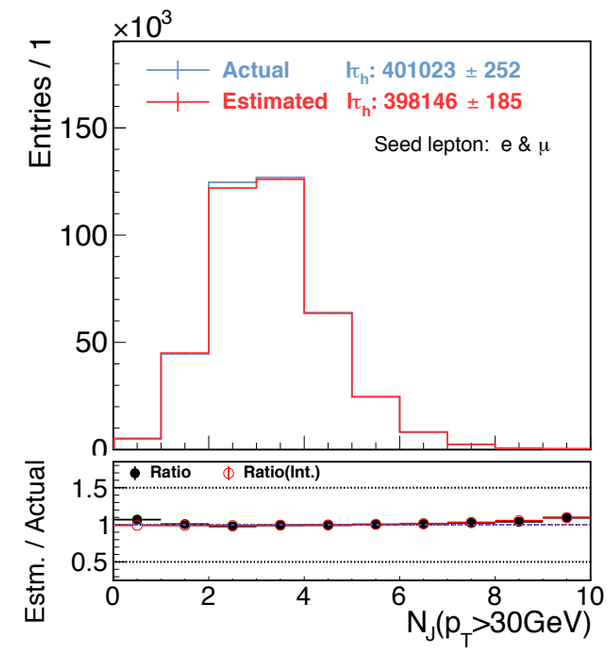
ttbar MC で正しく求まるか試運転 (“closure test”).

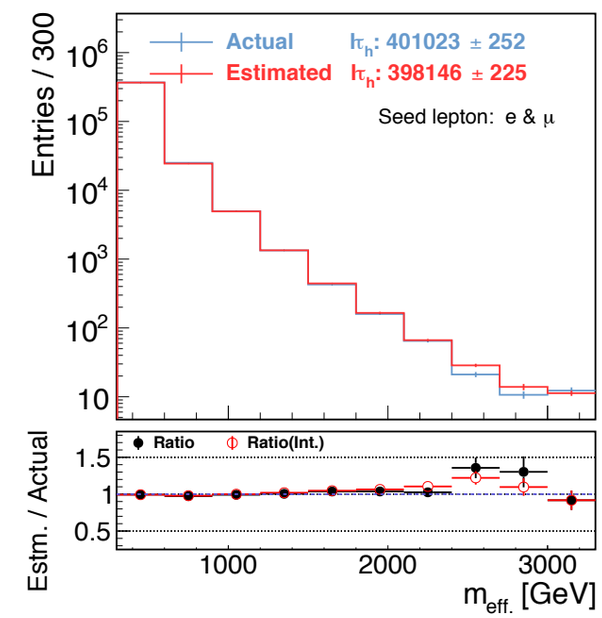
Missing lepton replacement





Tau replacement





-- Real di-leptonic evt. in 1L region -- Estimated by 2L region

- ほとんどの場合でうまくいっている.
- Estimationが少し失敗してる分布もあるが, 原因は大方把握されている (thesis 7.3.3).
  結果にはほとんど影響しない.

Subtraction of “bogus” sub-events (thesis 7.3.4)

置き換えた後のsub-eventの中には実際に存在しないprocessになってる連中がいる

“Bogus sub-events”

- Z or τ から出てきたleptonをτに置き換えた場合
- Seed leptonがそもそもfakeだった場合

Parent of seed lepton	Sub-events of mis. lep. rep.	Sub-events of tau rep.
$W(\to \ell\nu)$	$W+X,\ W\to \ell_{\mathrm{mis.}}\nu$	$W+X,\ W\to \tau_{\mathrm{h}}\nu$
$Z(\to \ell\ell)$	$Z+X,\ Z\to \ell_{\mathrm{mis.}}\ell$	$\times$
$\tau(\to \tau_\ell\nu)$	$\tau_{\ell,\mathrm{mis.}}+X$	$\times$
Fake	$\times$	$\times$

×: need MC subtraction

- MCの寄与を直接引くとMC mis-modelingの影響が無視できないのでratioをかける.

e.g. τ_ℓをtau replaceしたsub-evt.の寄与をsubtractする場合

×以外の成分

$$y_\ell^{\mathrm{Data}} = y_{\ell+\tau_\ell}^{\mathrm{Data}} \times \frac{y_\ell^{\mathrm{MC}}}{y_\ell^{\mathrm{MC}} + y_{\tau_\ell}^{\mathrm{MC}}}$$

subtract後　subtract前

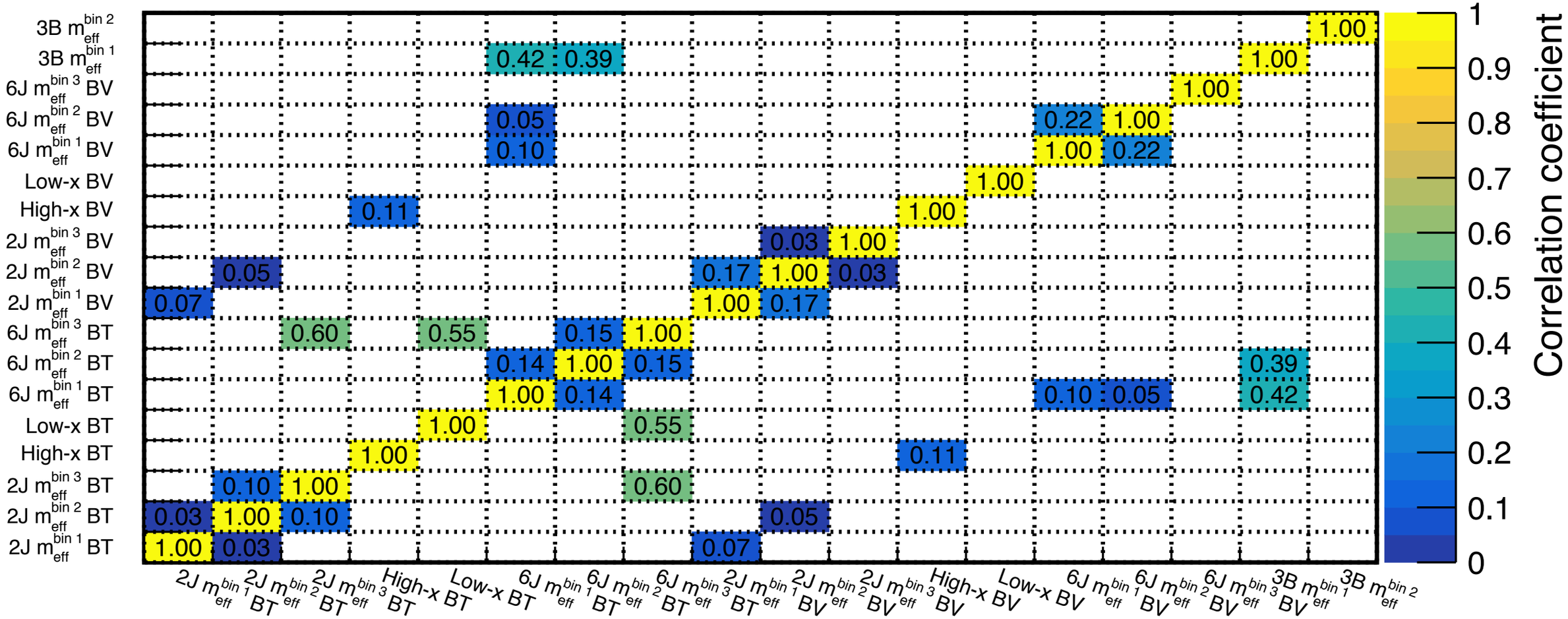
×の成分

Uncertainties@ Obj. rep.

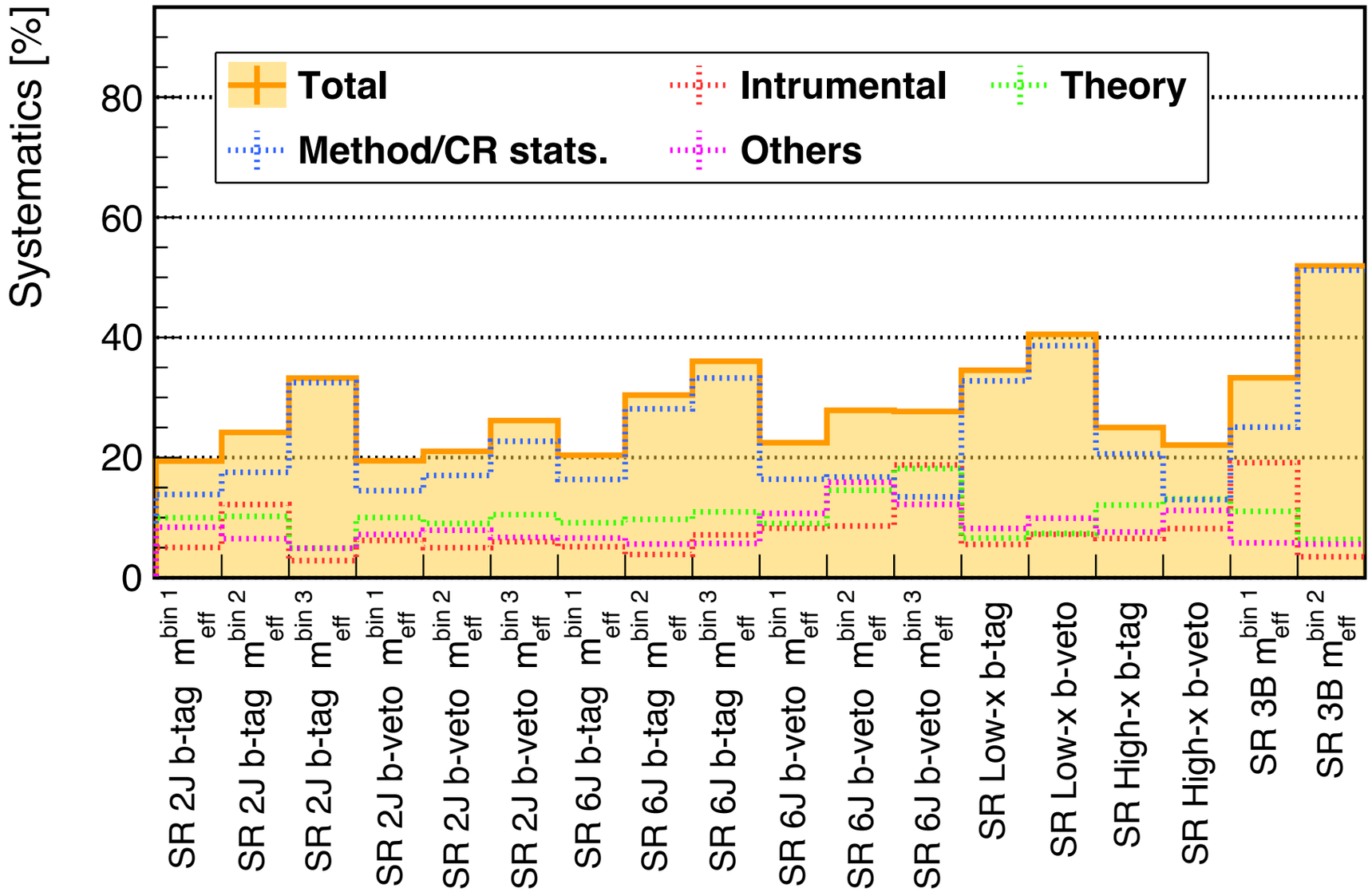
(thesis 8.3.1-2)

- **手法にまつわる不定性:** 5-20% (based on MC non-closure)
- **実験由来の不定性:** negligible
- **MC subtractionの理論不定性:** negligible
- **CRの統計誤差:** 20%-45%.

Bin間の相関が無視できない場合があるが結果への影響は小さい.



BG estm. uncertainties まとめ @SR (thesis 9.2)



CR Stat.がdominant source → 待てば勝手に改善.

これまでほとんどの解析はkine. extp.のみ使ってきた.

理論不定性をstat. errorに焼き直した感じ

Contents

Introduction (1-2章)

- なぜSUSY, なぜgluino, どういうgluino

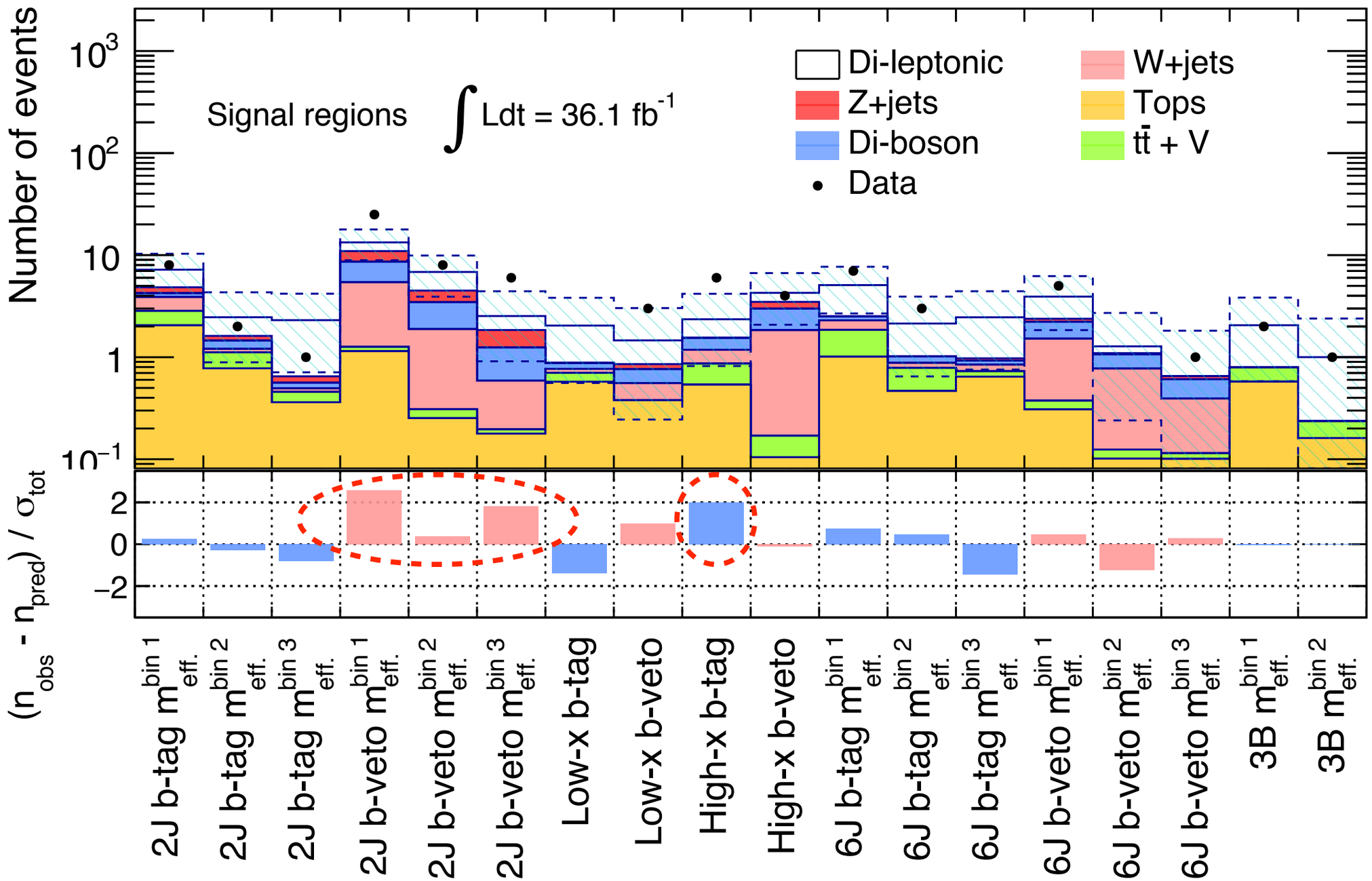
Experiment

- 加速器・検出器 (3章)
- Particle Reconstruction / ID (4章)
- MC simulation (5章)
- 解析 (6章-8章)

Result

- 結果 (9章)
- 意義と展望 (10章)

Unblinded signal regions (thesis 9.2)



若干dataが盛り上がってるところがある (~2σ) が，あんまりsignalっぽくはない.

Stat. error dominantなのでデータ貯めて様子を見たい.

Limit setting (thesis 9.3)

Decay chainごとにupper limitつける

Br. 100%仮定した"simplified model"に対する制限で表現

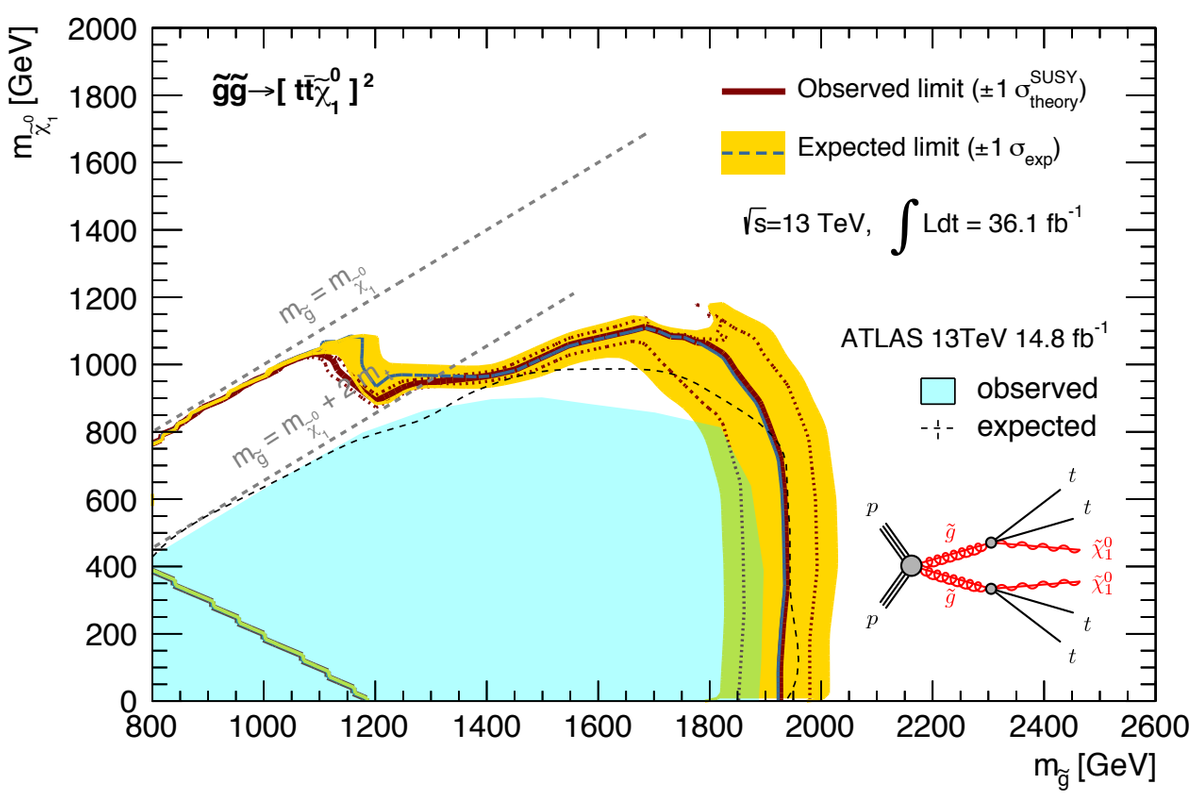
代表的なmodelへの制限. (水色: ATLAS official result@ 14.8fb^{-1})

LSP<1TeVでgluino <1.5TeV-2.0TeV排除.

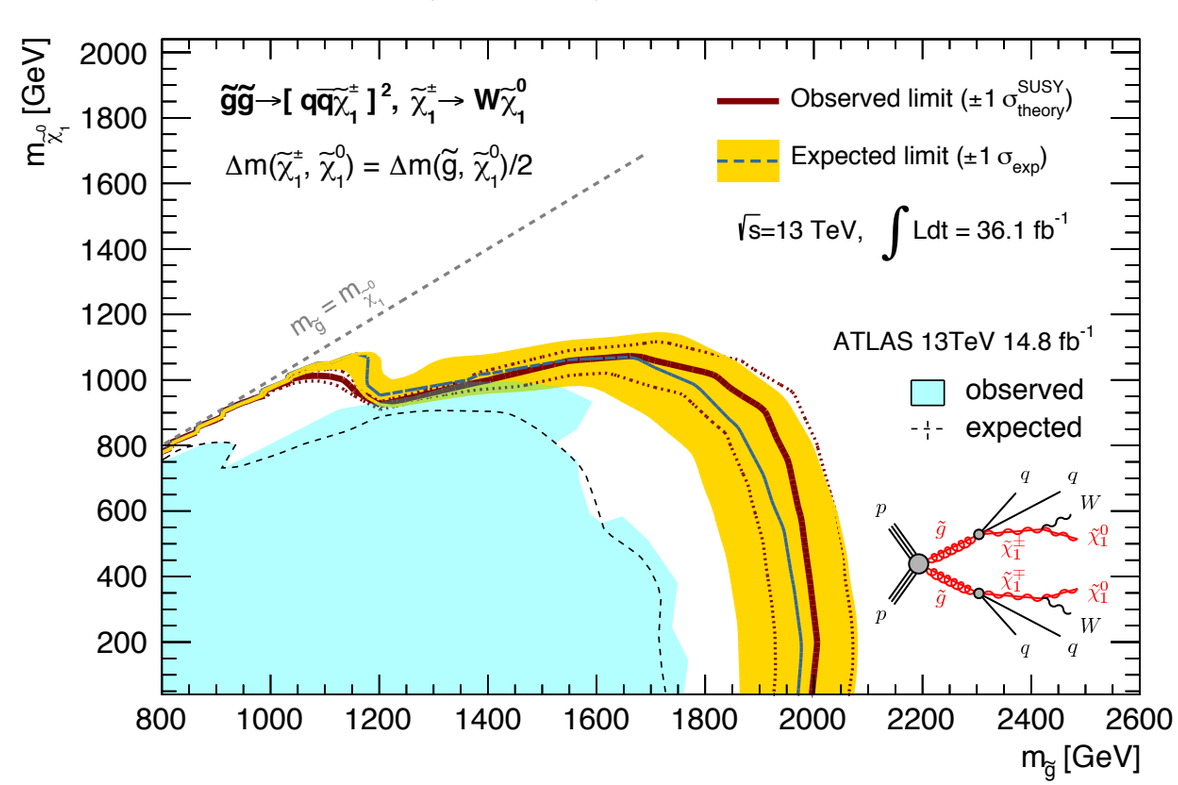
前の結果 (13TeV, L=14.8fb^{-1}) に比べてgluino massにして100-250GeVほど伸びた.

統計量増加による改善は~100GeV. 解析改良によるご利益はある.

TTN1 TTN1



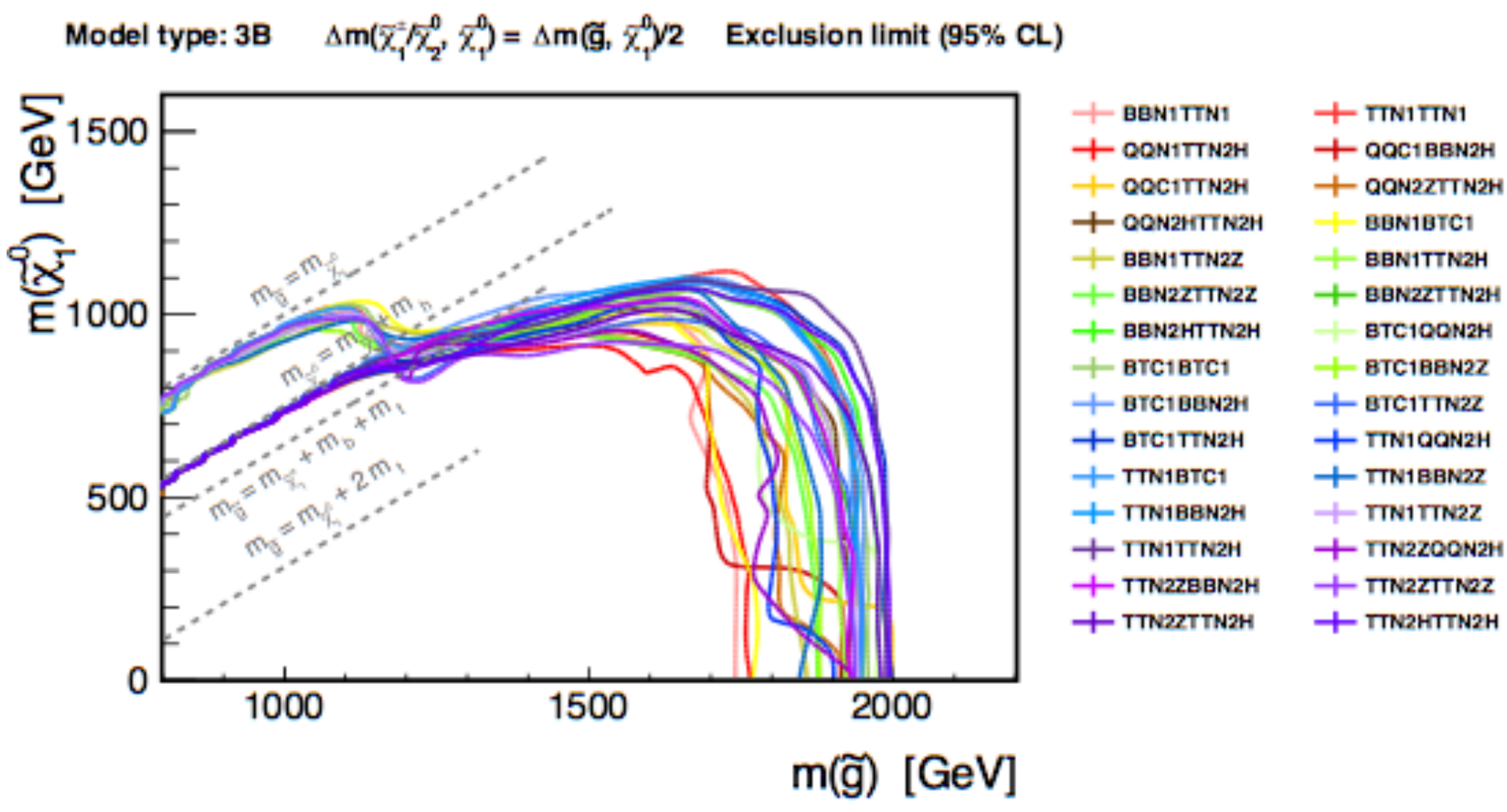
QQC1QQC1 (x=1/2)



Limit setting (thesis 9.3)

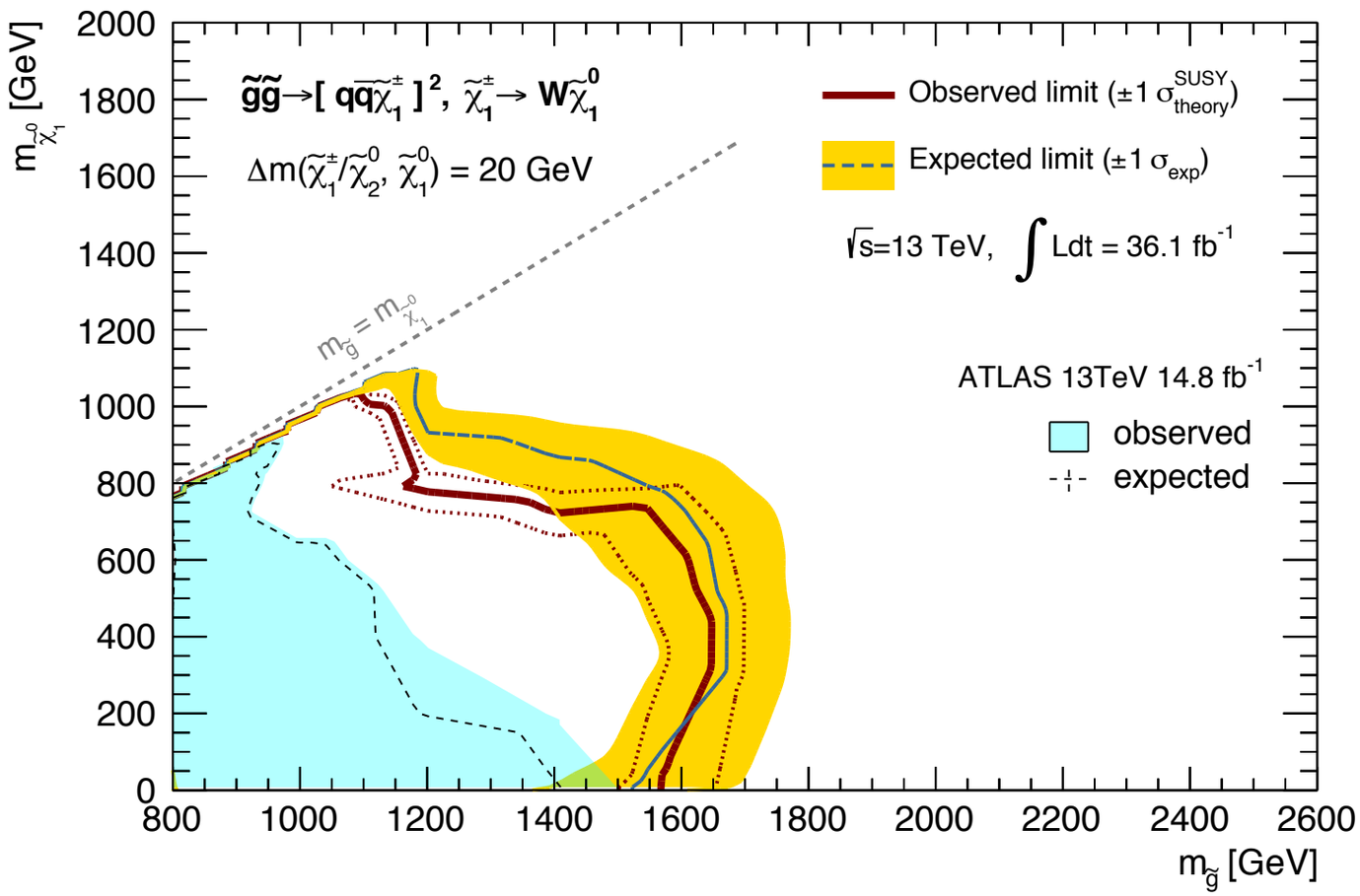
普段考えられてないgluino decayへのlimit

- 初めてこれらのmodelへの制限をexplicitに調べた.
- 感度の穴みたいなものはない.
- 感度の低いmodelは1Lへのbranchが少ないのが主な原因 → 将来0Lとのcomb.で回復可能



Limit setting (thesis 9.3)

Dark matter oriented scenarioへの制限 ($\Delta M_{NLSP\text{-}LSP}$ = 20-30GeV)



水色: ATLAS official result@ 14.8fb^{-1} の結果を使って自分で計算したlimit.

- 過去gluino解析でこのシナリオのためにSRを作ったことはない.
  特にTopがいないmodelに対して大幅な感度改善 (300GeV~400GeV@exp. limit).
  ※ topがいる場合はleptonがhardになれるためこのSRじゃなくても割とひっかかる
- このシナリオへの制限を初めて求めた.

Discussion

Q. 何を初めて成し遂げたか？

何を初めて成し遂げたか？

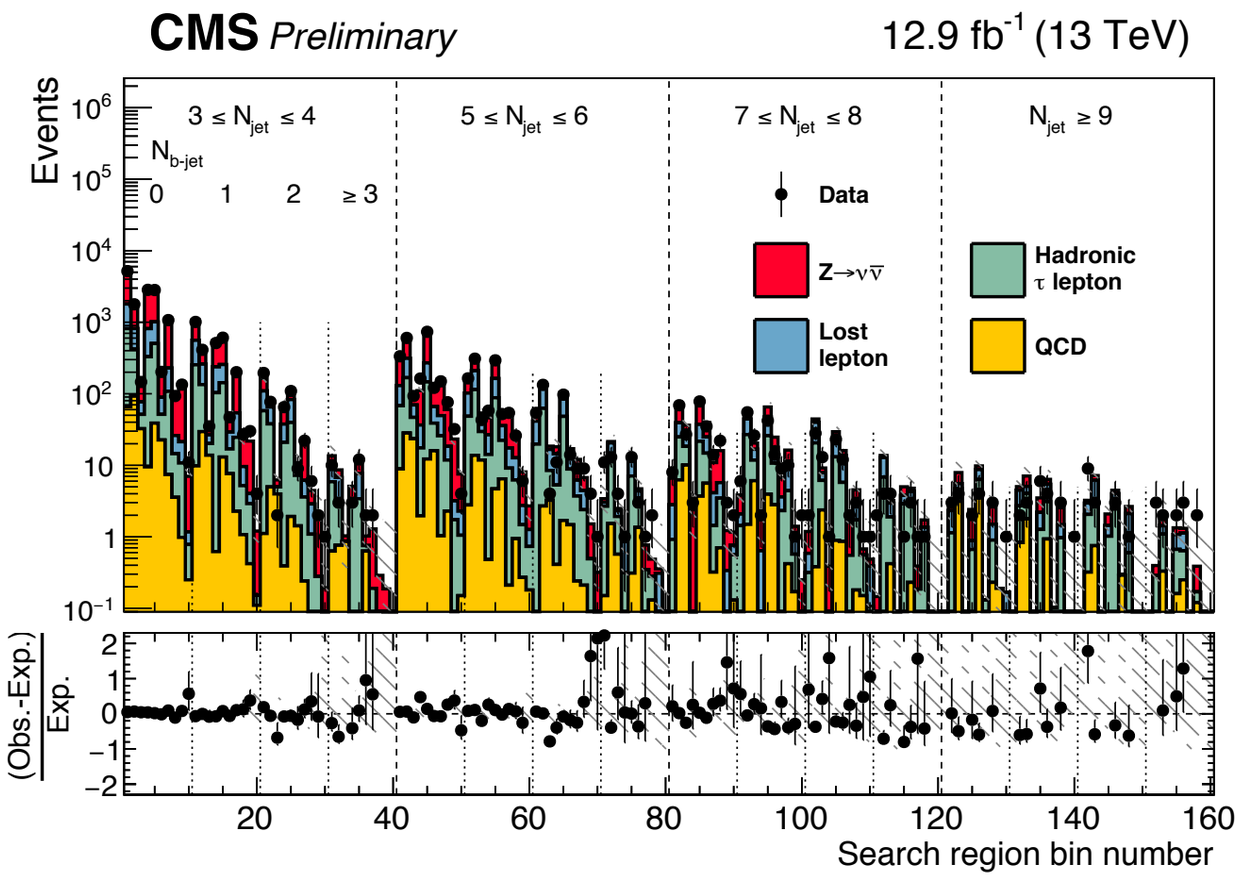
⓪ Exclusion limit 伸ばした.

① Gluinoのdirect/1-step decayを初めて網羅的に探索した。 特に,

- 全てのmass spectraに感度を持つよう解析を改良した.※

  Dark matter-oriented SRを新設. 感度を大幅に改善.

※Decayに関してはCMSのこれまでの解析 (n_{SR}>100) で引っかかるようになっていた可能性が高い. これはこれでLook-elsewhere effectなどの問題がある.



何を初めて成し遂げたか？

⓪ **Exclusion limit 伸ばした.** 理論家を少し苦しめた.

① **Gluinoのdirect/1-step decayを初めて網羅的に探索した。** 特に,

- 全てのmass spectraに感度を持つようSRを改良した. ※

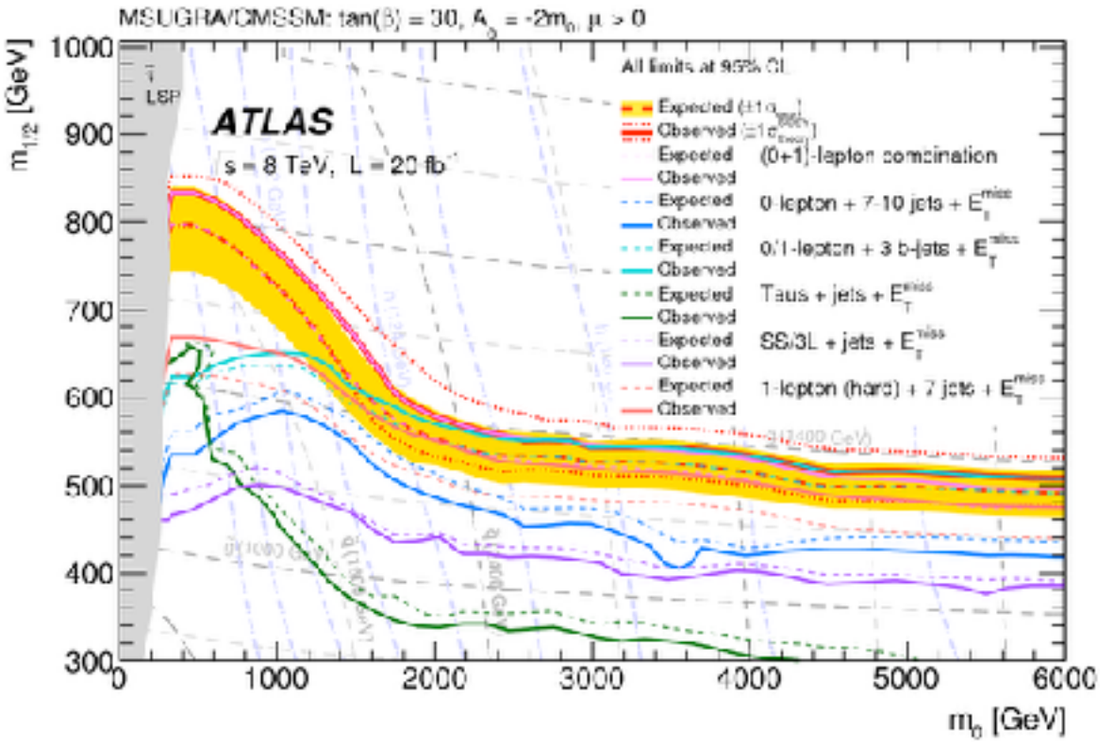
  Dark matter-oriented SRを新設. 感度を大幅に改善.

- Decay chainごとに対する制限を初めてexplicitに調べた.

  - MSSMの大半のparameter spaceを被覆するのに相当.

- 過去にはmSUGRAやpMSSMのような簡易版full modelを考えて, model parametersでscanする作戦が取られた.
- 特にpMSSMは理論家には不評. 使えない.
- 本D論で出した制限は使いやすい.

(理論屋を少し楽にした)



何を初めて成し遂げたか？

② より信頼のおけるBG estimationの方法を確立した

- **Fully data-driven推定法 (Object replacement) の開発.**

○ Idea自体は初出ではない.

- Tau embedding method (ATLAS Run1 H→ττ), arXiv:1506.05623
  崩壊したτを実際にdetector simulation.
  コストがかかりすぎでsyst.が効かないsearchモノでは割に合わない.
- Replacement R&D study@ ATLAS: ATL-PHYS-PUB-2009-083

○ 改良と実装を行った. 特にMCの用途をより制限した.

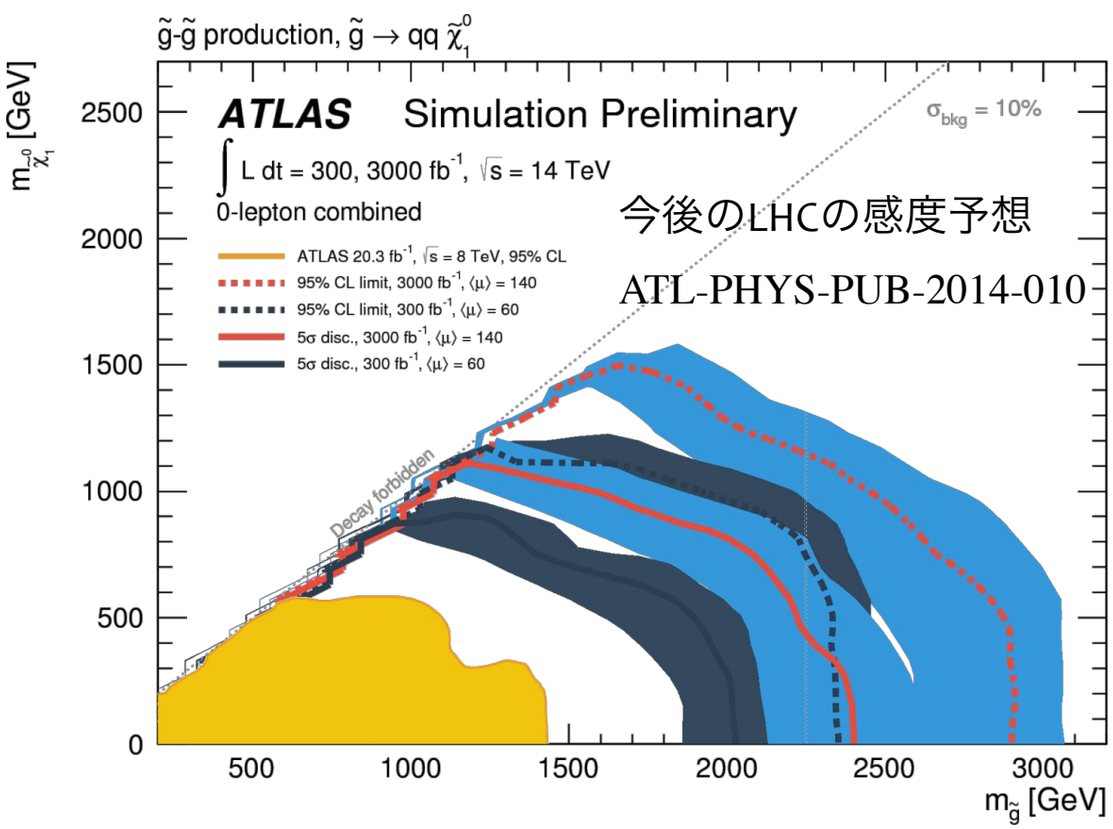
○ CMSも同時期に同様の方法で結果を出した. (0L, CMS-SUS-16-014)
(MCの使い方がやはりやや怪しいが)

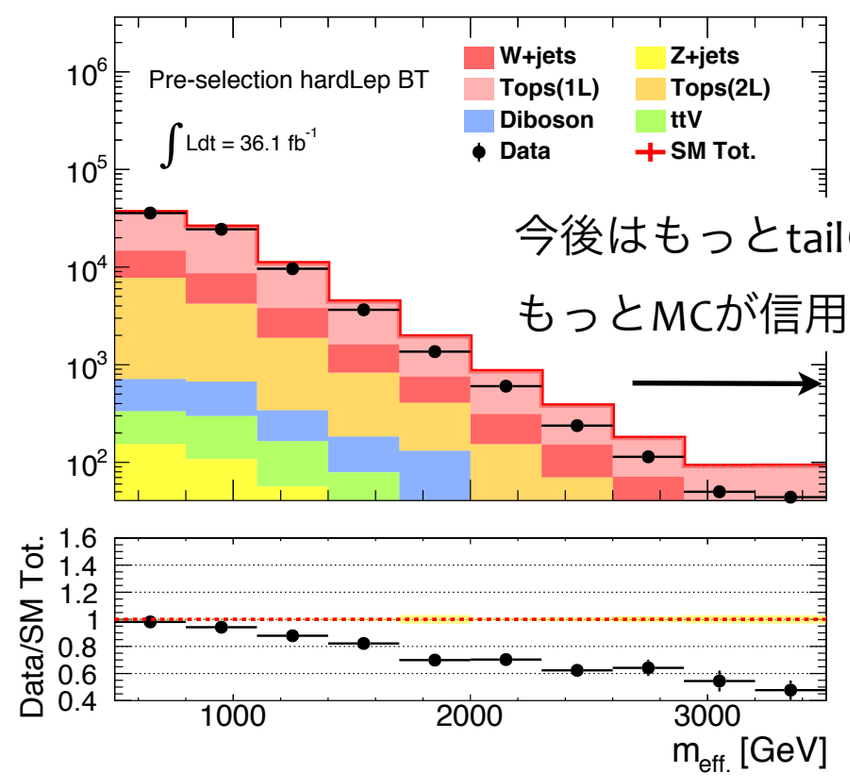
何を初めて成し遂げたか？

② より信頼のおけるBG estimationの方法を確立した

<u>将来的にfully data-driven approachはより重要になる.</u>

- Gluinoの探索はこれからも重要. どんどん重い方に感度が伸びてく.
- ただし, cutもどんどんきつくしてくというのが条件.
  よりワケのわからん効果を食らうようになるためMC modelingは困難.





Summary

- **TeV-scale SUSYはSMを超える新物理でも取り分け大事な枠組み**

  LHCでの直接探索は非常に重要

- **125GeV higgsで態度が試される (gluino or scalar-top?)**

  ⇒ Gluino探す

- **Gluino decayは難しい. どんな崩壊もありえる.**

  1-leptonで見える45 modelsを網羅

- **Data-driven Background estimationでdiscovery-orientedな解析を構築**

- 発見はできなかった.

- **LSP<1TeVのところでgluino <1.5TeV-2.0TeV排除.**

Backup

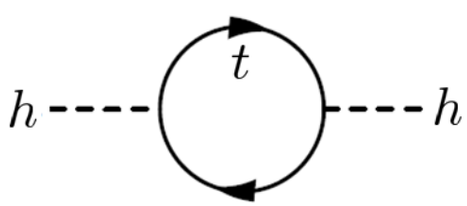
Higgs massの発散問題 (thesis 2.2.1)

高次摂動項のdiagramにより粒子のmassが発散

⇒ Gauge symm.で保証されるpartnerのおかげでlog発散.

SM: Higgsだけ手で入れたせいでpartnerがいない →2次発散.

$$\Delta m^2_{\rm higgs} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \text{finite}$$



Λ: cut-off scale

loop内のtopの運動量積分の上限 (~Planck scale?)

e.g. Top-quarkを介したloop

$$m^2_{\rm higgs} \sim m^2_{\rm bare} + \Delta m^2_{\rm higgs}$$

125	**10^{38}**	**-10^{38}**
(測定値)	**(理論パラメータ)**	**(理論の構造とΛで決まる数)**

※くりこみ自体は可能なので理論が破綻しているわけではない.

無理矢理SMの範疇で解釈すると...

- 輻射補正は19ケタ分. Bare massも19ケタでしかも17ケタ分一致 → 125GeVで見える

Bare massは完全なるfree parameter. 本来どこであってもいいと思うと甚だ不自然.

Higgs massの発散問題 (thesis 2.2.1)

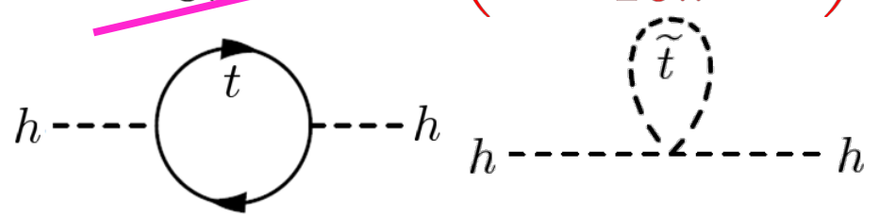
[解決法1] 新粒子で発散止める (“輻射補正は実は19ケタもない”)

Topと寄与が逆な”partner”を突っ込む.

@SUSY: scalar-top (stop)

CANCEL

$$\mathrm{MSSM}: \Delta m^2_{\mathrm{higgs}} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \left(2 \times \frac{3|\lambda|^2}{16\pi^2}\Lambda^2\right) + \mathrm{O}(\log\Lambda)$$



Λに対して対数発散。125GeVとの階層性はなくなる。

[解決法2] SM適用上限スケールが割と低いと信じる. (“Λ << Planck scale”)

e.g. higgsの内部構造があって見え始める (techni-color theory etc.)

Dark matter (DM)

(thesis 2.2.2)

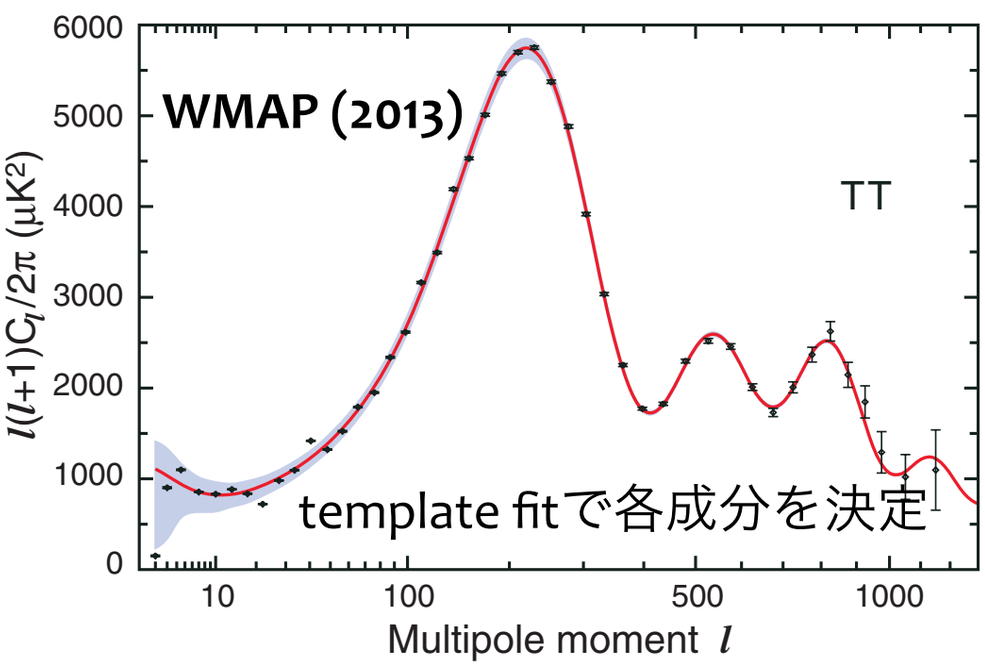
分光学から推定される銀河や星雲の質量
< 運動学 or 重力レンズ効果で見積もられる質量

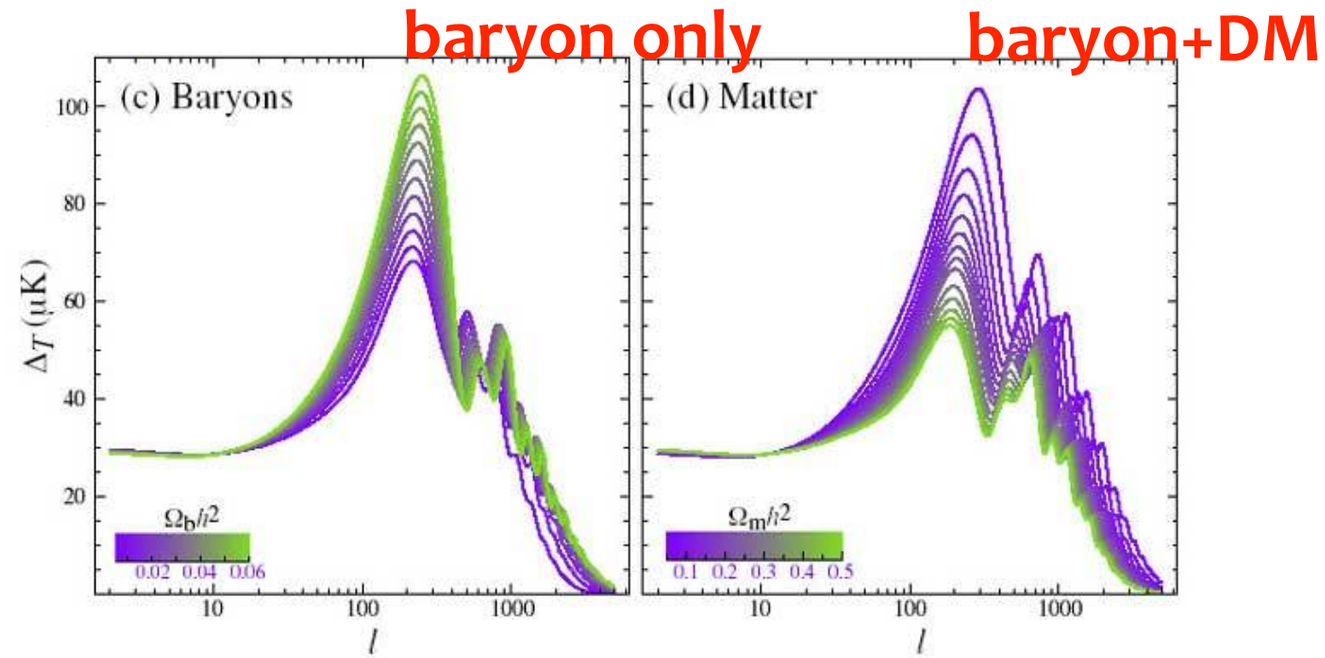
→“Dark matter”

暗い天体などが疑われたがどれも微妙. 現在はnon-baryonicな未知粒子を正体とするのが支配的.

DMとDark energyを最もシンプルに入れたΛ-CDM (Cold Dark Matter) Modelで

観測はかなりよく説明される. DMの量もCMBでよく測られてる.





Dark matter density
($\Omega_h := \Omega_m - \Omega_B$)

$$\Omega_h h^2 = \begin{cases} 0.1138 \pm 0.0045 & \text{(WMAP)} \\ 0.1186 \pm 0.0020 & \text{(Planck, TT+lowP+lensing)} \end{cases}$$

Dark matter (DM) (thesis 2.2.2)

典型的なDMの性質:

- 光出さない安定粒子 (Weakly Interacting Massive Particle; WIMP).
- 銀河中心など局在してることが多いため非相対論的.

SM:

候補なし

ニュートリノがかつて疑われたが相対論的. 銀河形成とかの説明が難しい.

SUSY:

R-parity保存している場合, 一番軽いneutralinoが最も自然な候補

- weak interactionの対消滅断面積でrelicが説明しやすい
- O(100GeV-1TeV)で非相対論的

大統一 (thesis 2.2.3)

- GUT: デカい群にSM埋め込めんでstrong/EWを統一

  GUT scale ~ 10^{16}GeV.

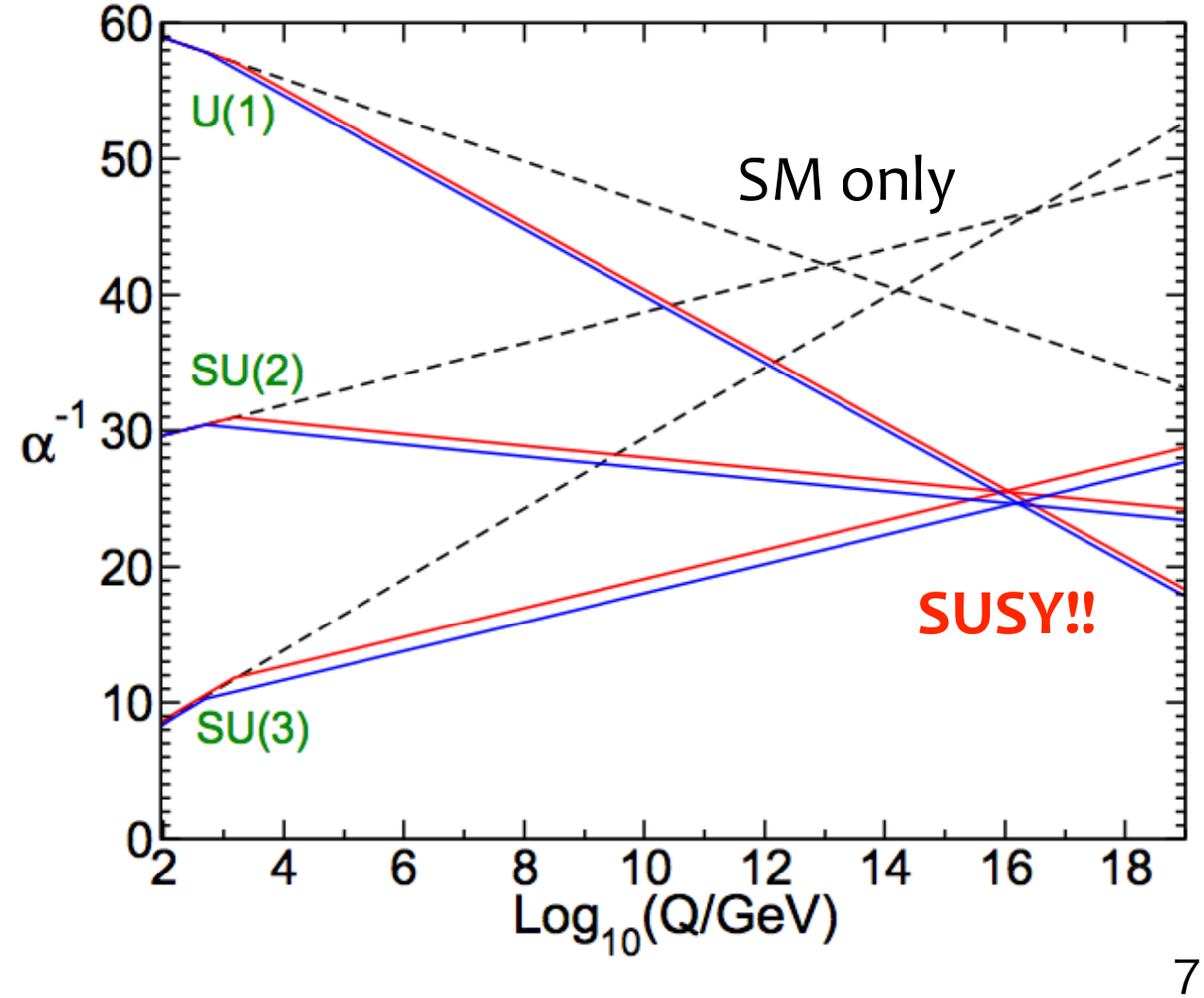
- SMの粒子だけではrunning couplingは統一しない

  ⇒ 新粒子が必須

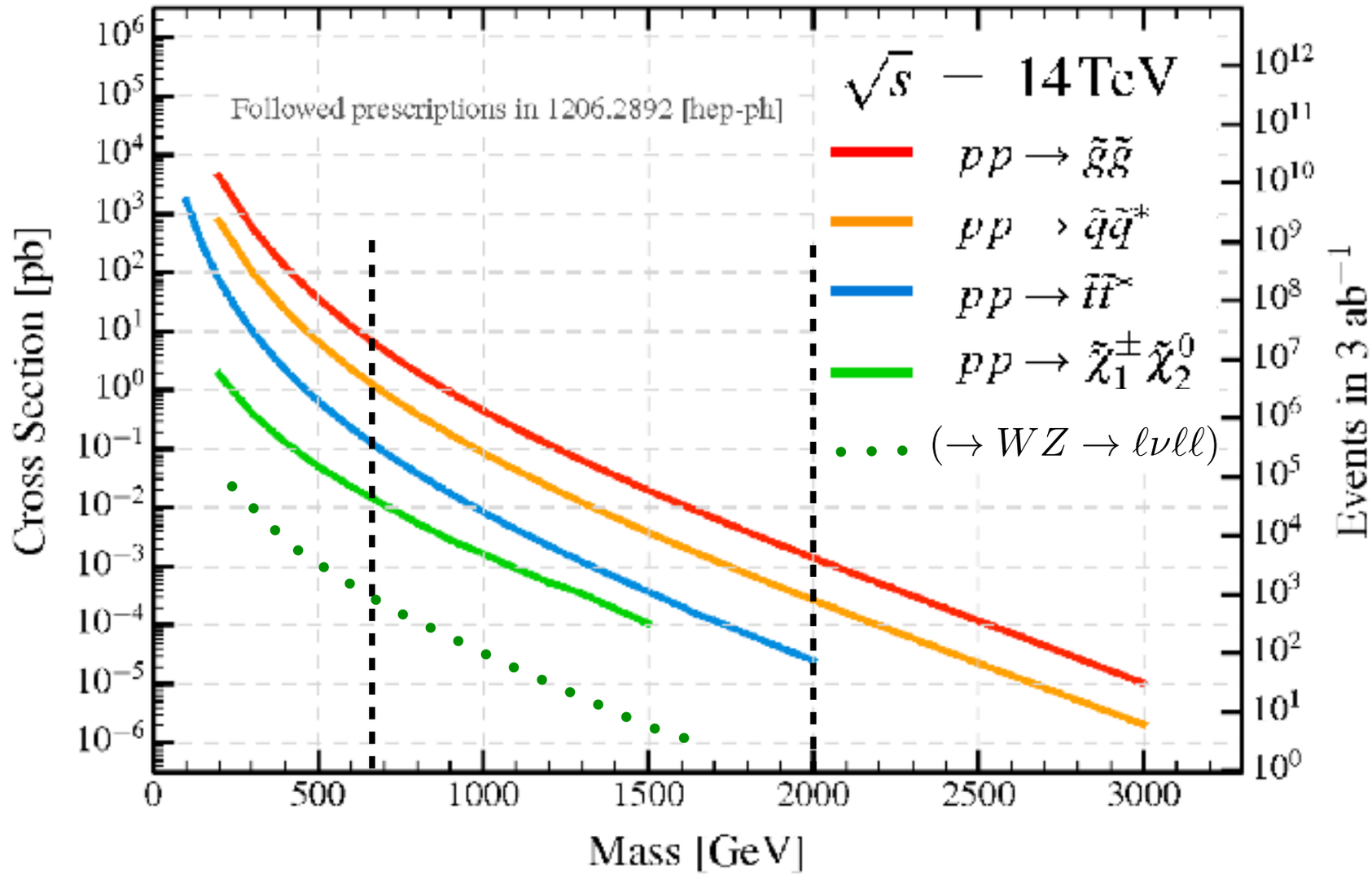
SUSY:

Parameterのfine tuneをせずともかなりの精度で一致する.

（偶然にしてはよくできてるなあ）



EW gaugino vs Gluino?

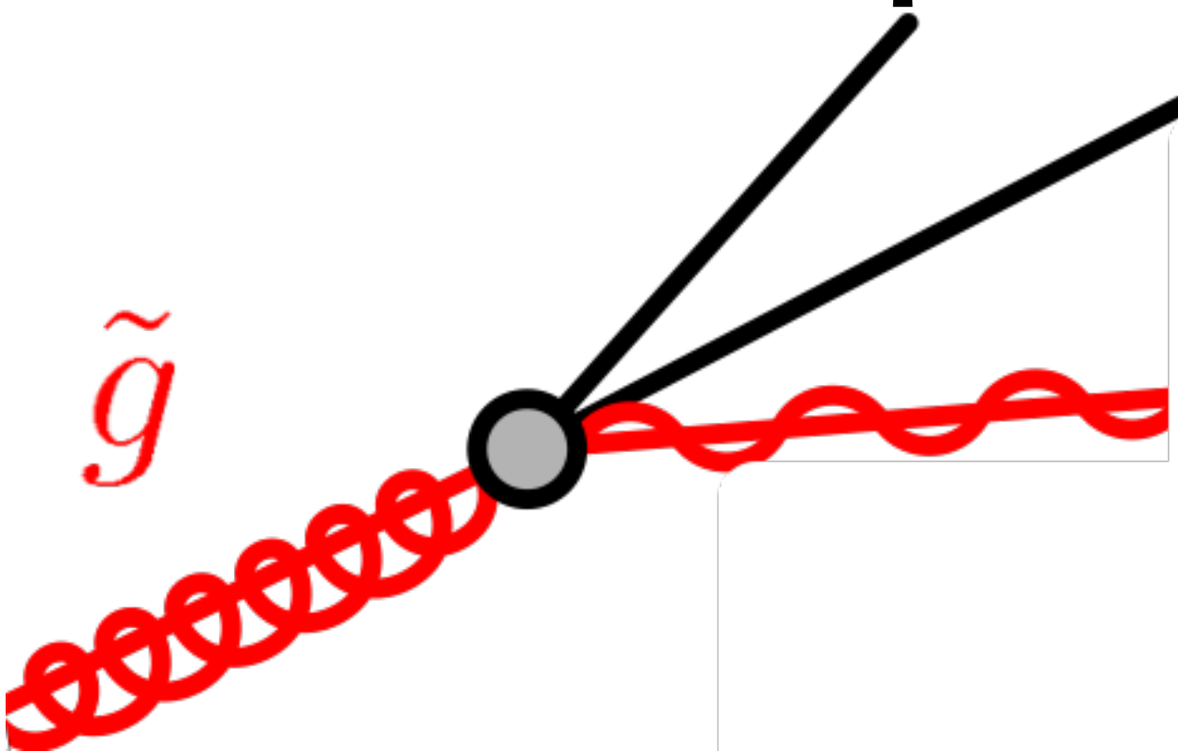


- DMによってmassの上限がある分gluinoが重かった場合EW gauginoが有利.
  ただ断面積超小さい. 意味のある探索をするには大統計が必要
- LHCはHadron collider. Gluinoの生成断面積がべらぼうに大きい.

⇨ **現状gluinoが重いと断定する理由もないのでGluinoを狙う**

Gluino decay (thesis 2.5.1)

- Squark重いときはvirtual squarkを経由して3体崩壊



q $\bar{q}'$ = (qq,bb,tt) or (qq,bt)

$\tilde{\chi} = (\tilde{\chi}_{1\text{-}2}^{\pm}, \tilde{\chi}_{1\text{-}4}^{0})$

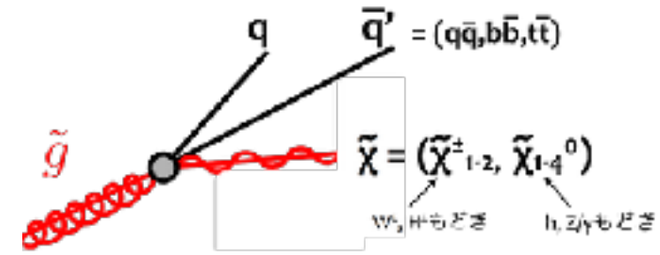
$W^{\pm}$, $H^{\pm}$もどき　　h, Z/γもどき

(mixしてる)

- どのqqの組み合わせが好まれるかはχの成分次第

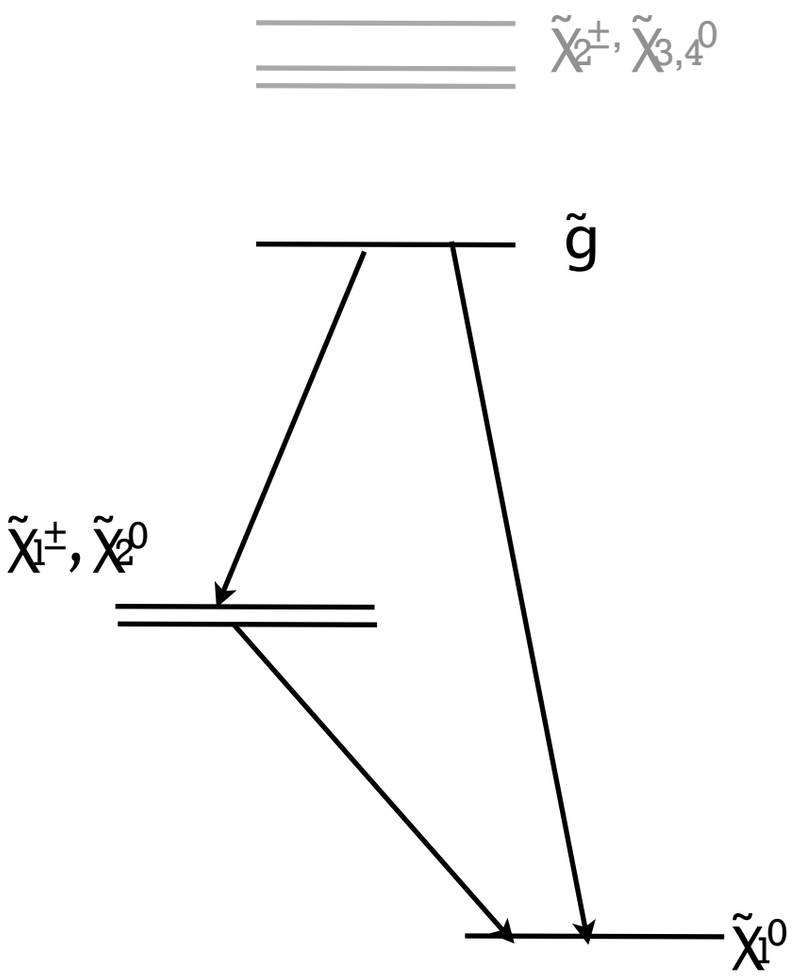
e.g. neutral higgsino ⇒ tt多い　　charged wino ⇒ ud, sc, bt 全部同じくらい

Gluino decay - full chain (thesis 2.5.3)



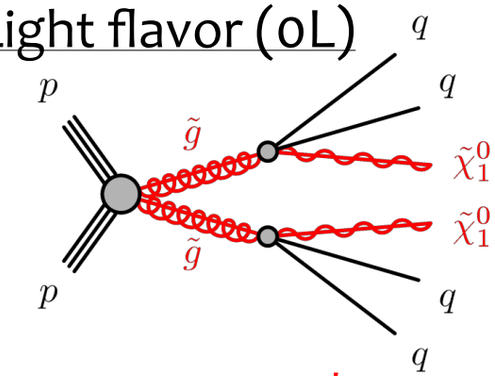
- どのχにいくかはχのmass spectra / mixing次第
  - (6:2:1の法則などから) wino, binoはgluinoより軽いと思ってイイ
  - higgsinoはどこでも有り得る.

Higgsino重かったら

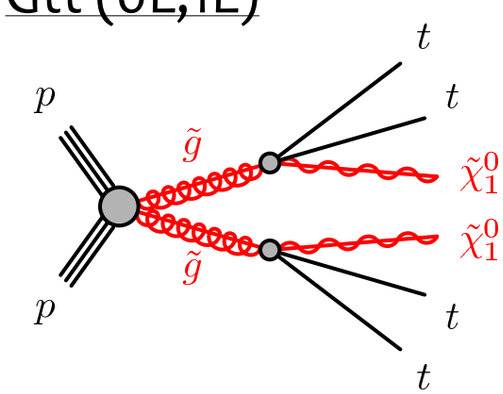


"Direct"

Light flavor (0L)

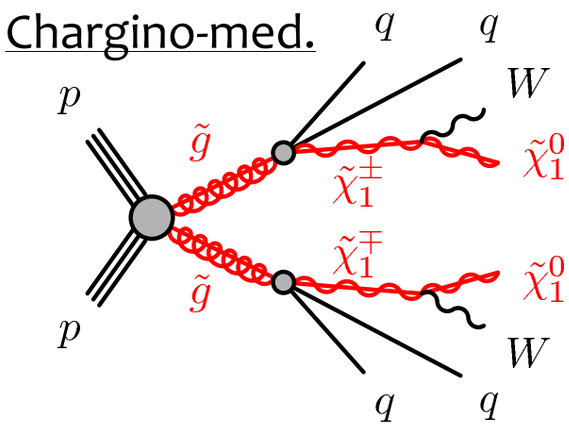


Gtt (0L,1L)

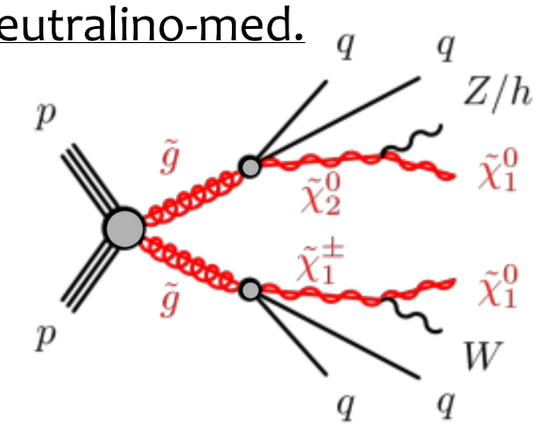


"1-step"

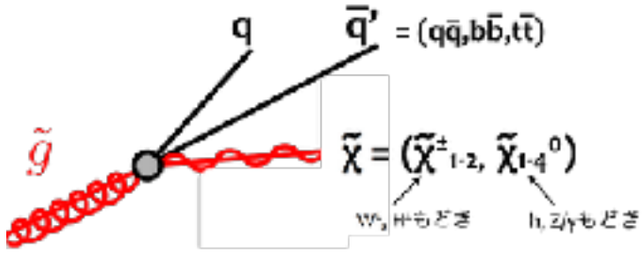
Chargino-med.



Neutralino-med.

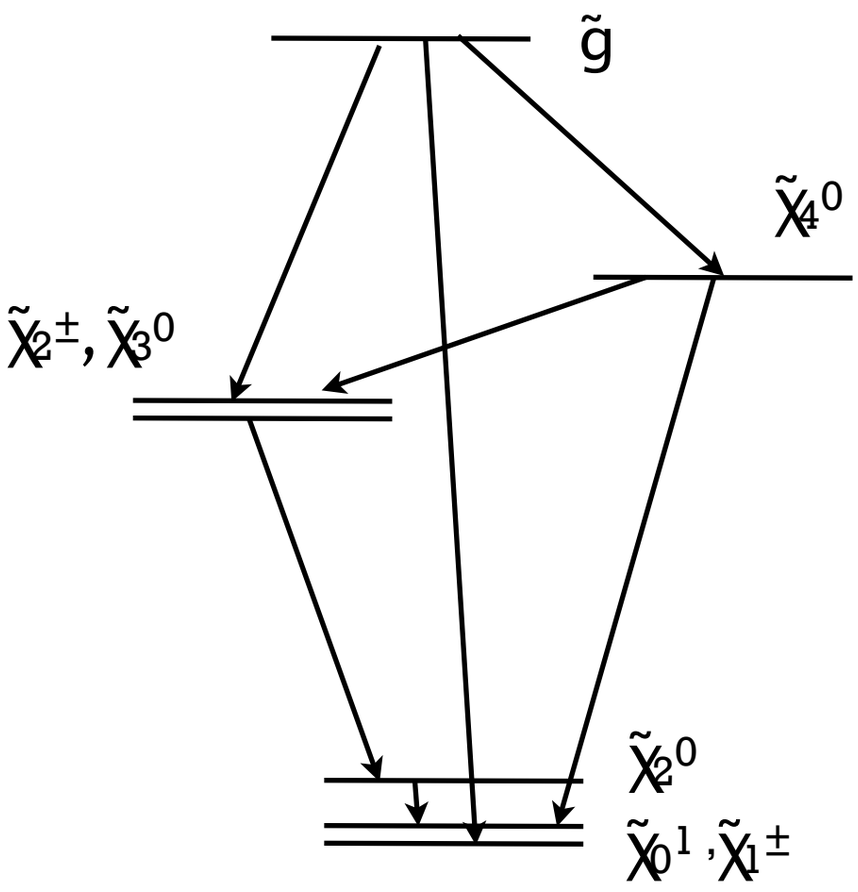


Gluino decay - full chain (thesis 2.5.3)



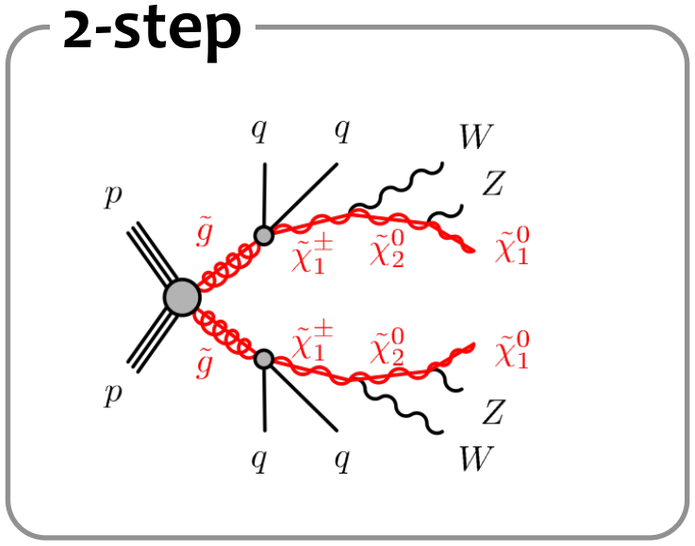
- どのχにいくかはχのmass spectra / mixing次第
  - (6:2:1の法則/迷信?などから) wino, binoはgluinoより軽いと思ってイイ
  - higgsinoはどこでも有り得る.

Higgsino軽かったら



2-step (softなやつは無視)

まで起こるようになる.

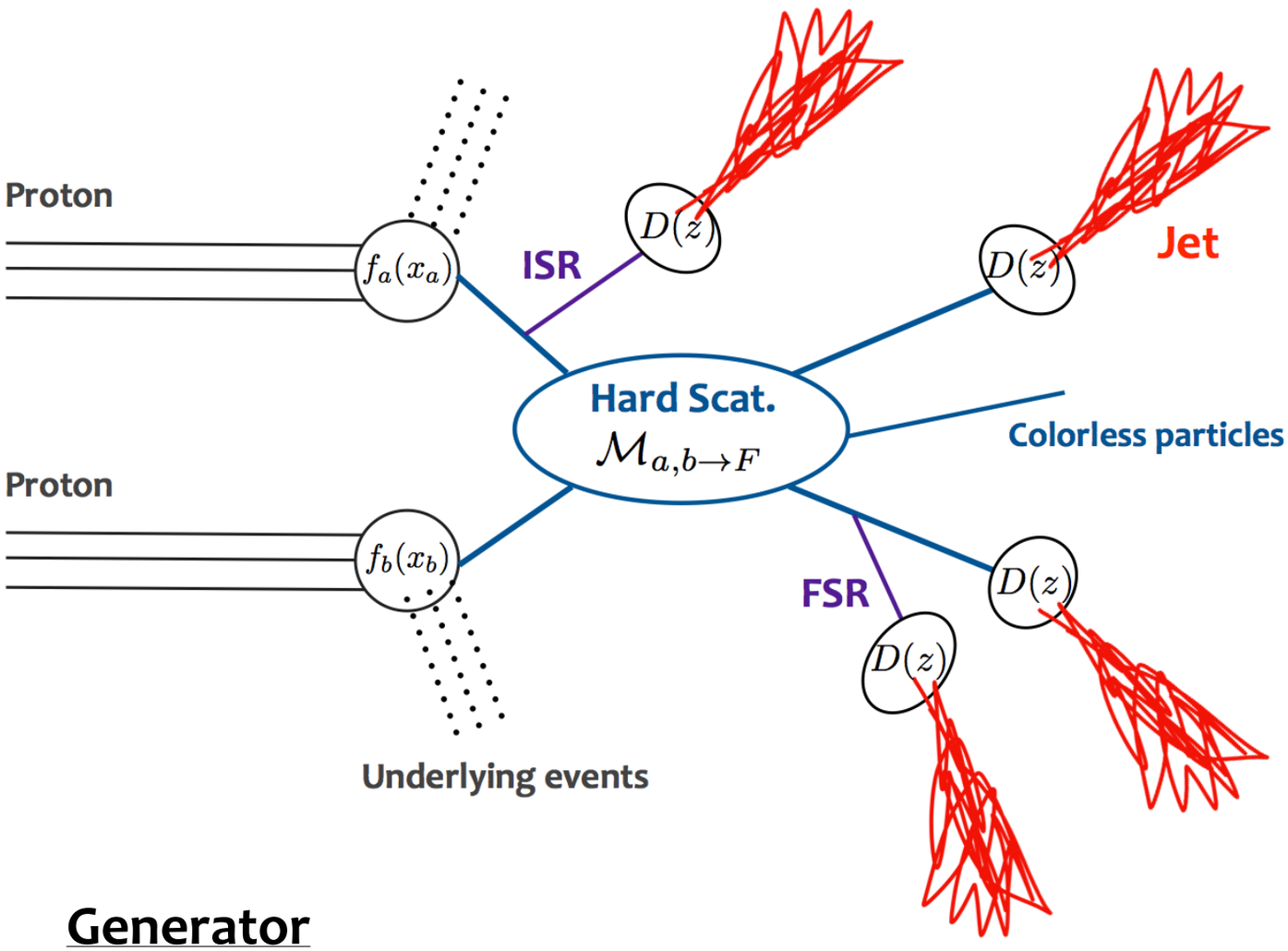


だが、

- 一般にbranch大きくない
- みんな等間隔くらいじゃないと1-stepに似る.
- Multi-jet analysisっていうやつで多分カバーされている

  ⇒ なので2-step以上は今回は無視

MC Simulation (thesis chap.4)



pp-collisionに関わる現象

- Proton internal dynamics (→PDF)
- Hard scattering
- ISR/FSR
- Hadronization, underlying events

Factorization theoremによって
---- で区切られた部分で個別に
記述すればokということが保証される.

Generator

- Hard scattering + additional jets (ISR,FSR) ×1-4 はmatrix-elementで計算.
  摂動計算は (Lowest-order; LO) からnext-to-LO (NLO) くらいまでやられている.
- 高次摂動効果は近似を使って部分的に取り入れられている.
  e.g. “parton shower” techniqueでsoftなISR, FSRを生成.
- Parton distribution function (PDF)は数値input. Hadronizationは現象論的なmodelを使用.

MC Simulation (thesis chap.4)

Main BG

Physics process	Generator	$n_{\mathrm{ME}}^{\mathrm{a.p.}}$
SUSY processes	MG5_aMC@NLO2.3.3 [106] (LO)	2
$W/Z+$jets	Sherpa 2.2.1 [108] (NLO)	2(NLO), +2(LO)
$t\bar{t}$	Powheg +Box v2 [110] (NLO)	1
Single-top (Wt-ch.)	Powheg +Box v2 (NLO)	1
Single-top (s-ch.)	Powheg +Box v2 (NLO)	1
Single-top (t-ch.)	Powheg +Box v1 (LO)	1
Di-bosons	Sherpa 2.1.1 (LO)	1-2(NLO) +2-3(LO)
$t\bar{t}+W$	MG5_aMC@NLO2.2.3 (LO)	2
$t\bar{t}+Z$	MG5_aMC@NLO2.2.3 (LO)	1
$t\bar{t}+WW$	MG5_aMC@NLO2.2.3 (LO)	0

Generator

- この解析ではBGのISR, FSR modelingが肝心.
  Main BG である W+jets と ttbar はNLOで生成.
  W+jetsはadditional partonのdiagramも可能な限り含めて計算.

Detector simulation

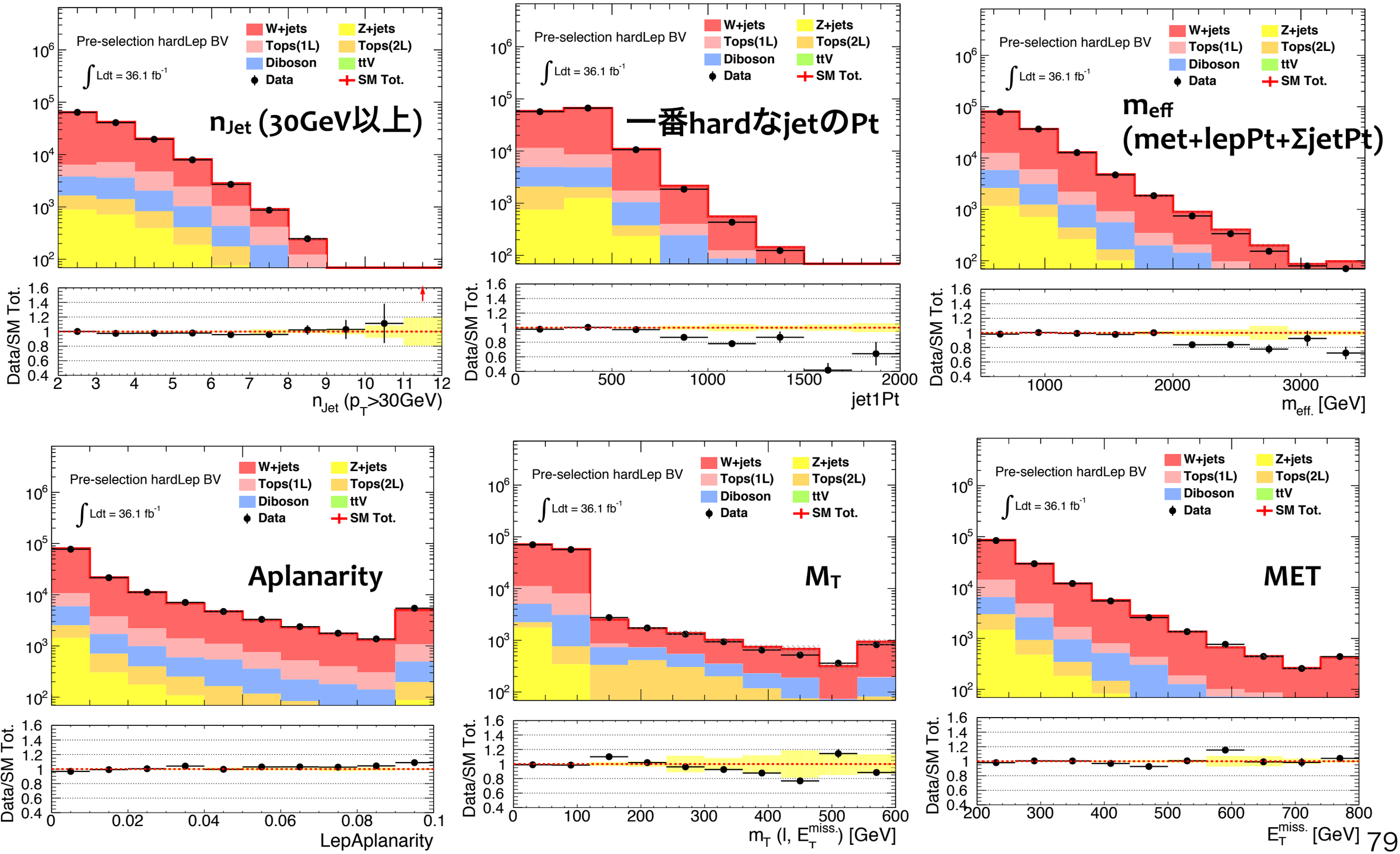
- BGは全てGeantのfull simulation.
- SUSY signalはbulkのphase spaceなのでresolutionなどのsmearing効果ほとんどないため, reference modelはfast simulation, その他のmodelはefficiency emulationで済ませた.

W+jets@ Preselection (rwgt.)

jet multiplicityでreweightすると大分マトモになる

$$w = 1 - 0.1 \times (n_{\mathrm{J}} - 2)$$

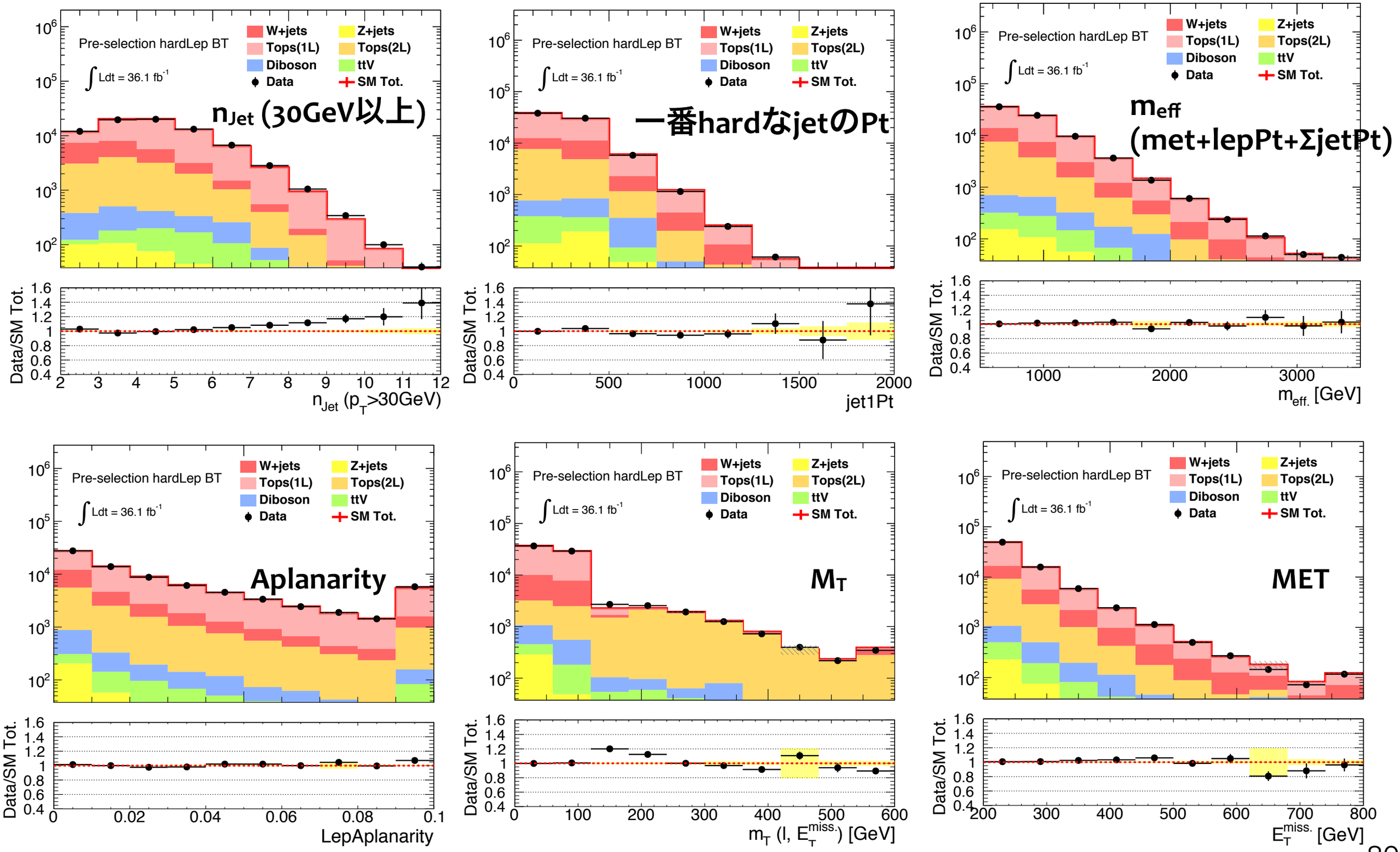
このreweightingでmis-modelingを表現することにし, error などの評価の際などに使う.



ttbar @Preselection (rwgt.)

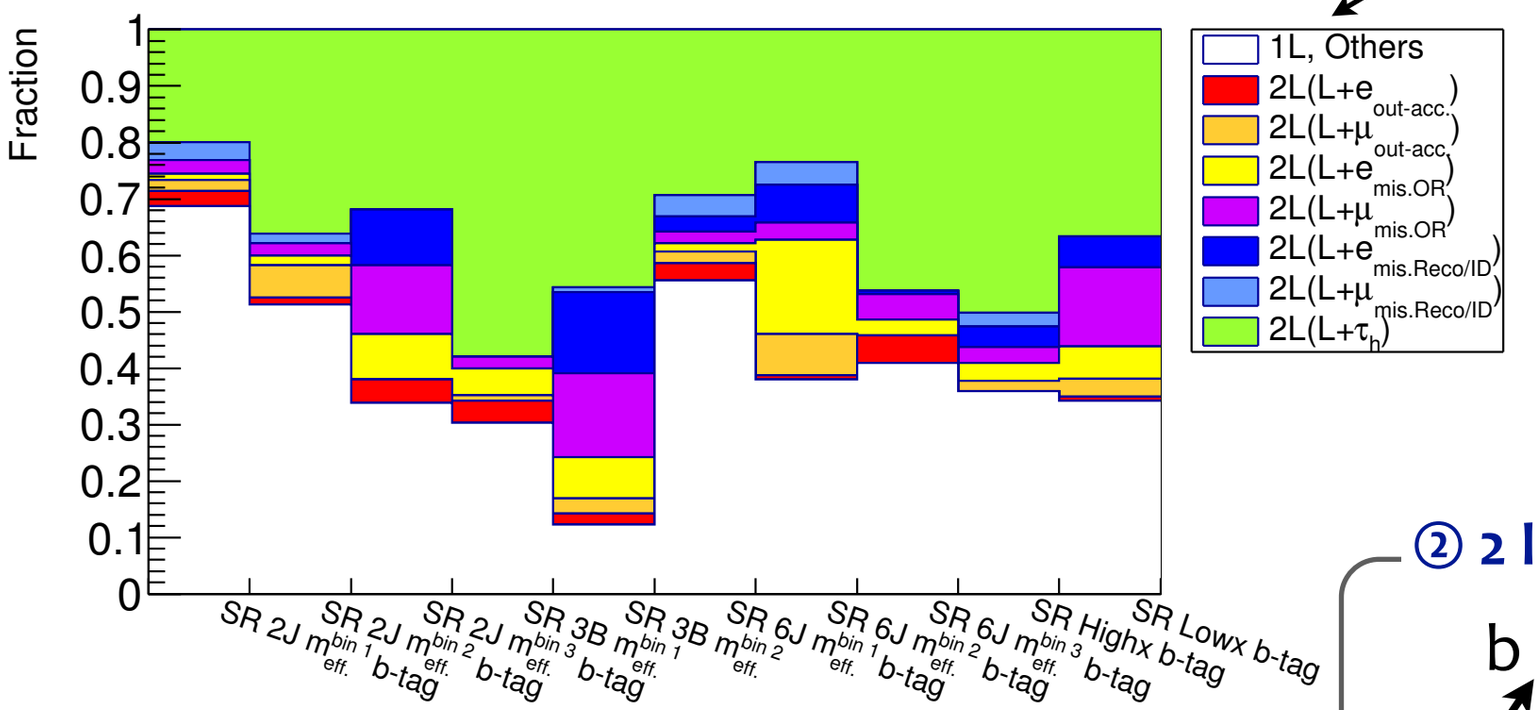
Pt(tt) (ttbar systemのp_T, ISRのp_Tのベクトル和に等しい)でreweightすると結構直る. やはりISRが主要な病根か.

$$w = 1.05 \times [1 - 0.061 \times p_T(t\bar{t})]$$



1-lepton regionにいるdi-leptonic eventとはどういうものか (thesis 7.1)

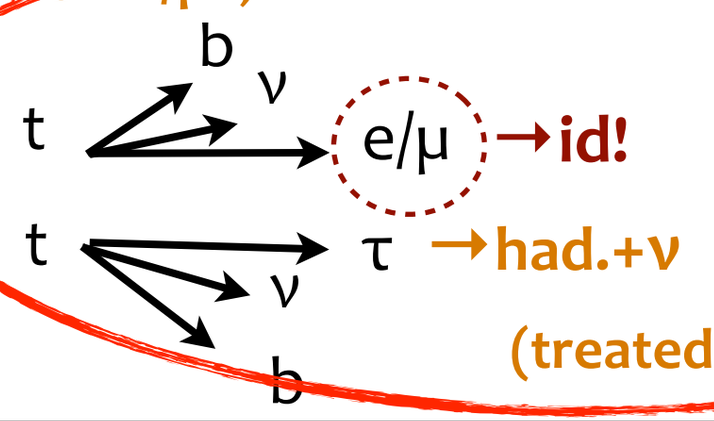
SR BT/3BのBG breakdown



"1L ": 実際lepton 1つしか出てないprocess
e.g. ttbar→semi-lep, W+jets etc.

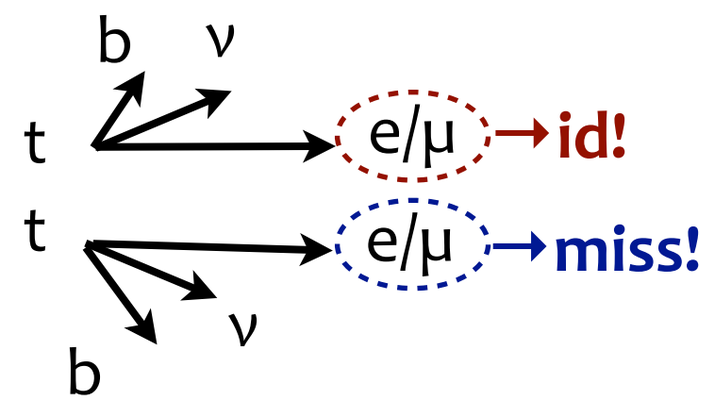
これらはobject replacementで求められる
他のやつらはkine. extrpに任せる

① eτ/μτ, τ→hadronic decay



緑の成分

② 2 light lepton (e/μ) → 1 missed.



Why is the lepton missed?

-Detectorの外飛んでく / pt低すぎ (赤,橙)

- Reco/IDの要求満たせず (青・水色).

- Jetとのoverlap removalで死亡 (紫・黄)

Systematic uncertainties まとめ @SR

BG成分	推定方法	実験誤差	理論不定性	手法に由来する不定性	CR stats.
Semi-leptonic (W+jets, Tops)	Kine. Extp.	5%-20%	Known theo. syst. による影響 25%-40%	Unknown theo. syst. による影響 5%-20%	10%-30%
		(M_Tなどのshapeのuncertainty)			
Semi-leptonic (その他)	MCそのまま	10%-20%	20%-40%	-	-
		(SR yieldのuncertainty)			
Di-leptonic	Obj. Rep.	modeling on the tau-to-jet scale negligible	tau decay, MC subtraction negligible	MC non-closure 5%-20%	20%-50%

Profile likelihood fitting (thesis 9.1)

red: number of data events

$$\mathcal{L}(\mu; \mu^i_{\mathrm{W}}, \mu^i_{\mathrm{Top}}, \boldsymbol{\theta}) = \mathcal{L}(\boldsymbol{n}^{\mathrm{SR}}, \boldsymbol{n}^{\mathrm{WR}}, \boldsymbol{n}^{\mathrm{TR}} | \mu, \mu^i_{\mathrm{W}}, \mu^i_{\mathrm{Top}}, \boldsymbol{\theta})$$
$$= \mathcal{P}_{\mathrm{SR}} \times \mathcal{P}_{\mathrm{CR}} \times \prod_{k \in \mathrm{syst.}} \rho(\theta_k),$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{SR}} = \prod_{i \notin \mathbf{3B}} \left[\prod_{b \in \mathrm{BT,BV}} \mathrm{Pois}\left(n^{\mathrm{SR}}_{i,b} | \mu s^{\mathrm{SR}}_{i,b}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{W}}\, w^{\mathrm{SR}}_{i,b}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{Top}}\, t^{\mathrm{SR}}_{i,b}(\boldsymbol{\theta}) + b^{\mathrm{SR}}_{i,b}(\boldsymbol{\theta})\right) \right]$$
$$\times \prod_{i \in \mathbf{3B}} \mathrm{Pois}\left(n^{\mathrm{SR}}_{i} | \mu s^{\mathrm{SR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{W}}\, w^{\mathrm{SR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{Top}}\, t^{\mathrm{SR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + b^{\mathrm{SR}}_{i}(\boldsymbol{\theta})\right)$$

$$\mathcal{P}_{\mathrm{CR}} = \prod_{i} \mathrm{Pois}\left(n^{\mathrm{TR}}_{i} | \mu s^{\mathrm{WR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{W}}\, w^{\mathrm{WR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{Top}}\, t^{\mathrm{WR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + b^{\mathrm{WR}}_{i}(\boldsymbol{\theta})\right)$$
$$\times \mathrm{Pois}\left(n^{\mathrm{WR}}_{i} | \mu s^{\mathrm{TR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{W}}\, w^{\mathrm{TR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + \mu^i_{\mathrm{Top}}\, t^{\mathrm{TR}}_{i}(\boldsymbol{\theta}) + b^{\mathrm{TR}}_{i}(\boldsymbol{\theta})\right)$$

Parameters to be fit

μ: signal strength

μ_W, μ_{Top}: W+jets, Topのnorm. factor

$\boldsymbol{\theta}$: nuisance parameters

Constants obtained from BG estimation

s_i: region-iにおけるsignalの量 (MC)

w_i: region-iにおけるW+jetsの量 (MC)※

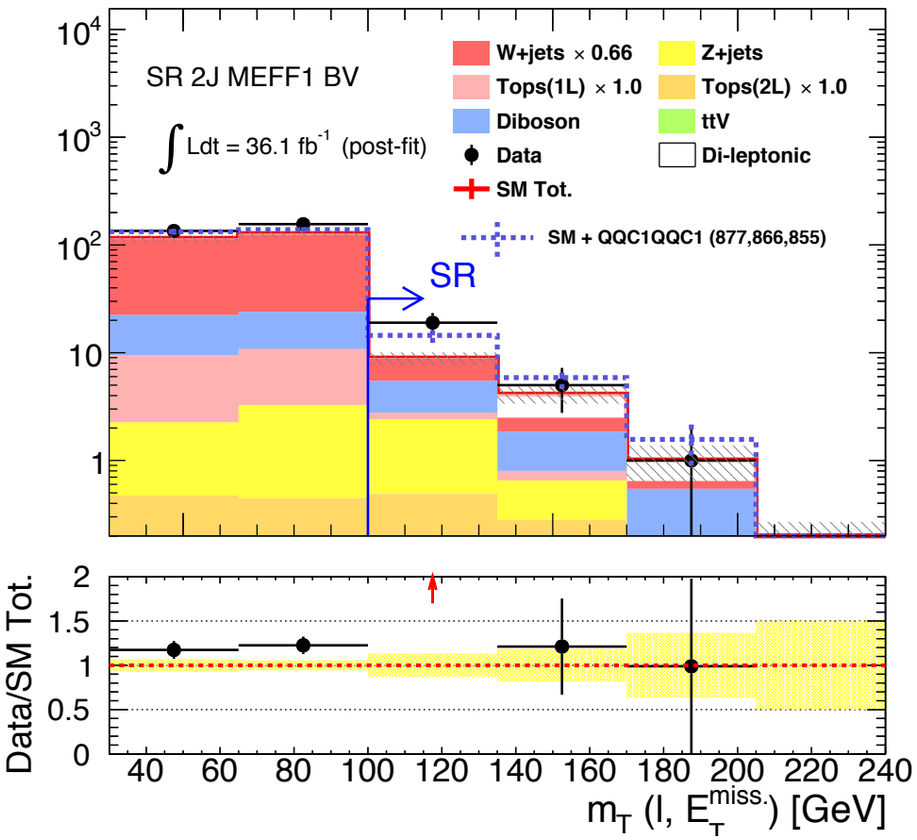
t_i: region-iにおけるtop BGの量 (MC)※

※ obj. Rep. で求める分は除く

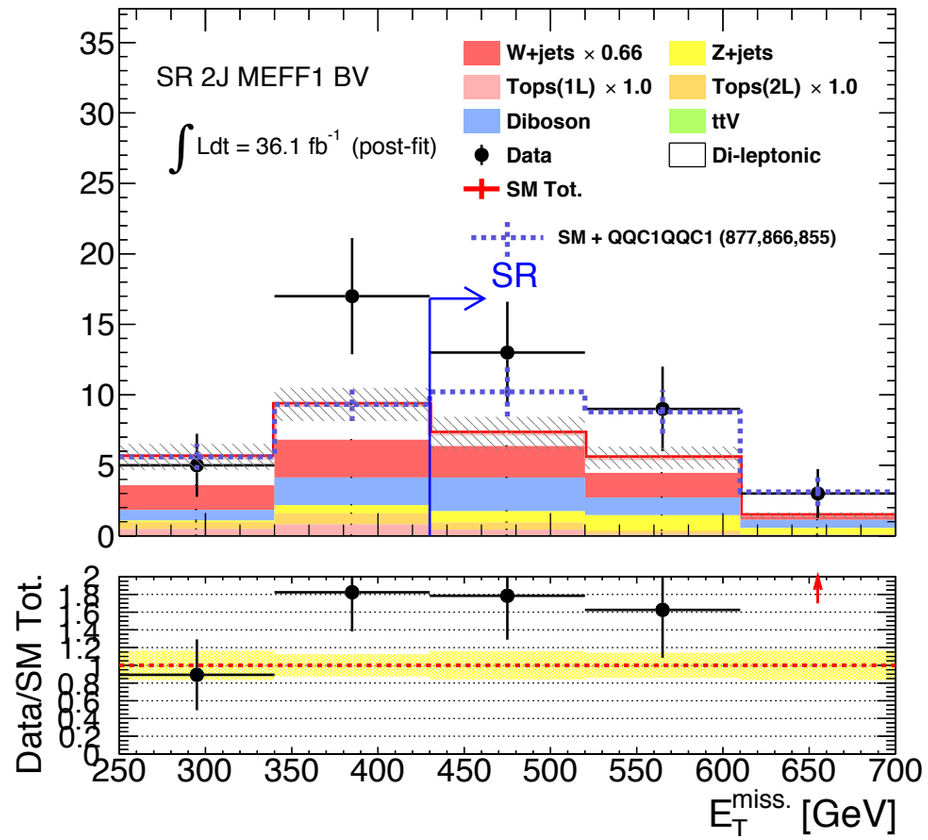
b_i: region-iにおける他のBGの量 (MC, objRep)

SR 2J $m_{eff}^{bin\text{-}1}$ BV (thesis 9.2)

M_T



MET

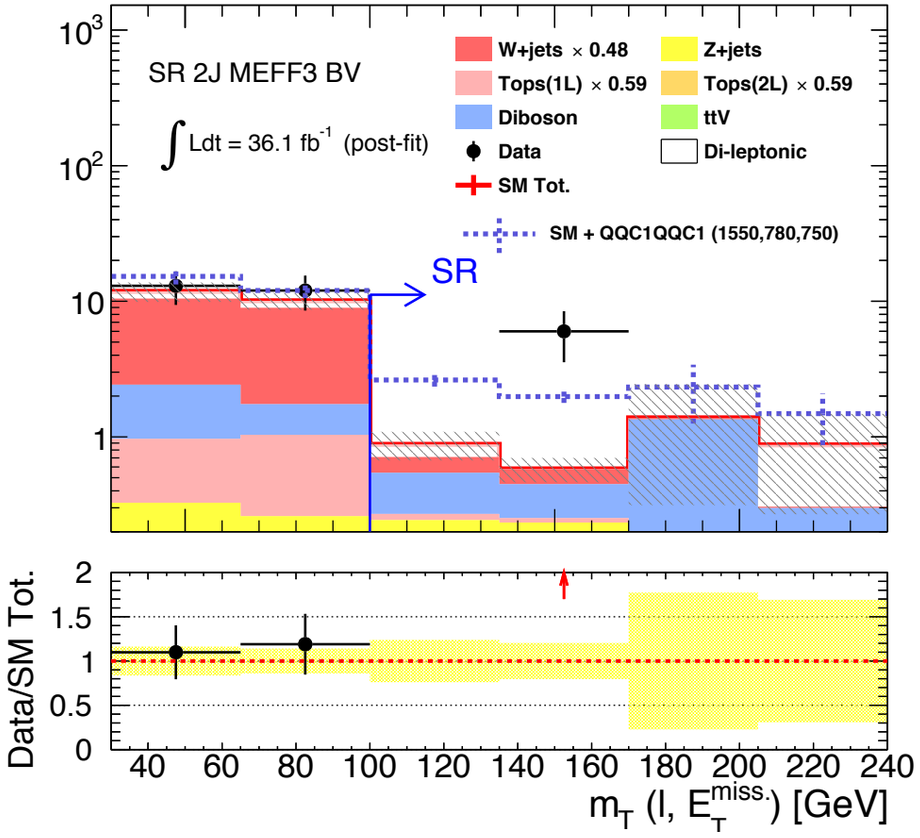


- M_Tのcut-off regionなので, VRのexcessと同様M_T shapeのmodeling errorが疑われる.
- それでもここまでのズレは説明できないので, 統計 or 本物?

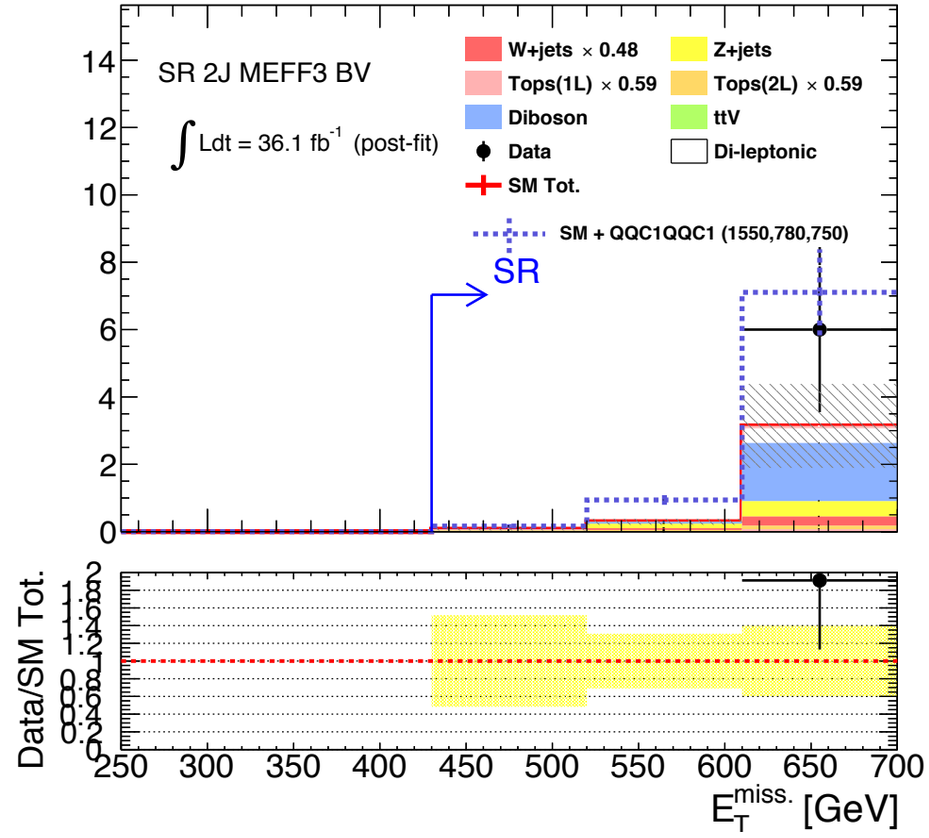
  一応相当compressedしたsignalとexcessはconsistent.

SR 2J $m_{eff}^{bin\text{-}3}$ BV (thesis 9.2)

M_T



MET

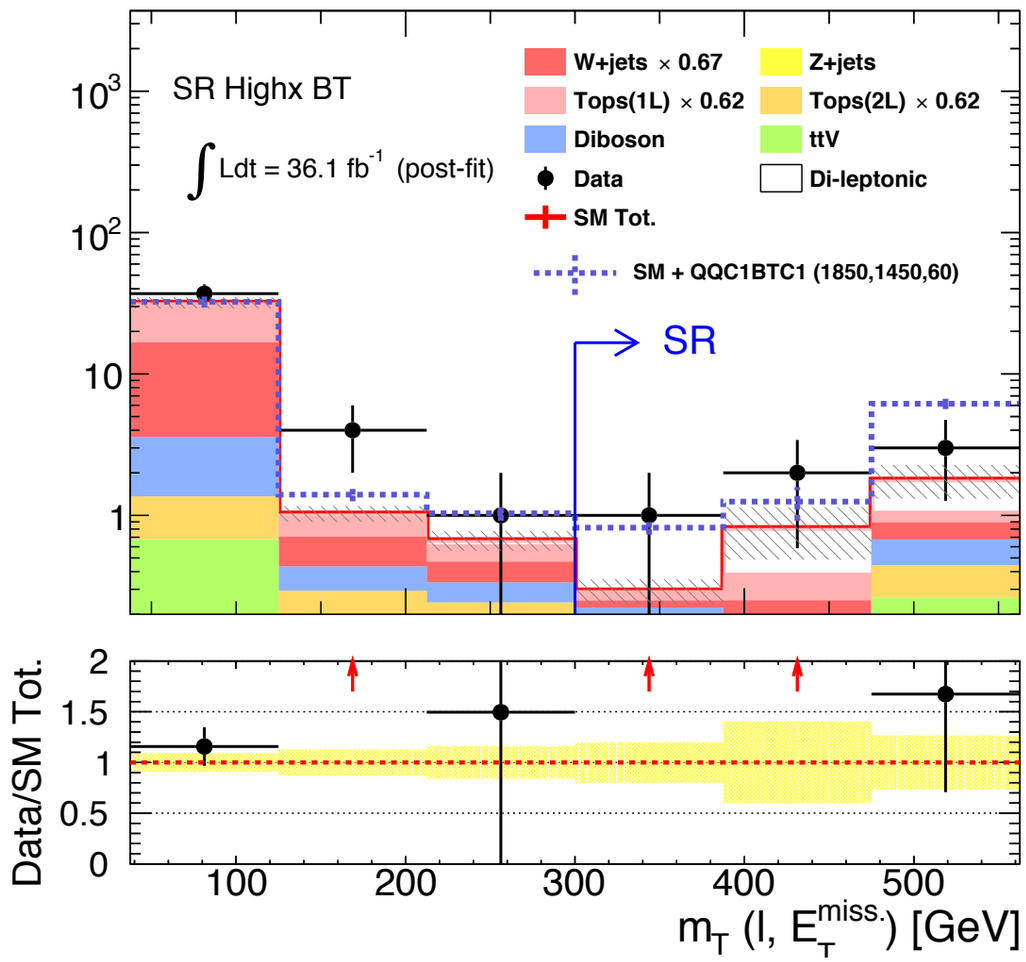


- SignalであれBGであれM_Tにpeakすることはないので,
  少なくとも一部は統計の上ぶれの可能性が高い.

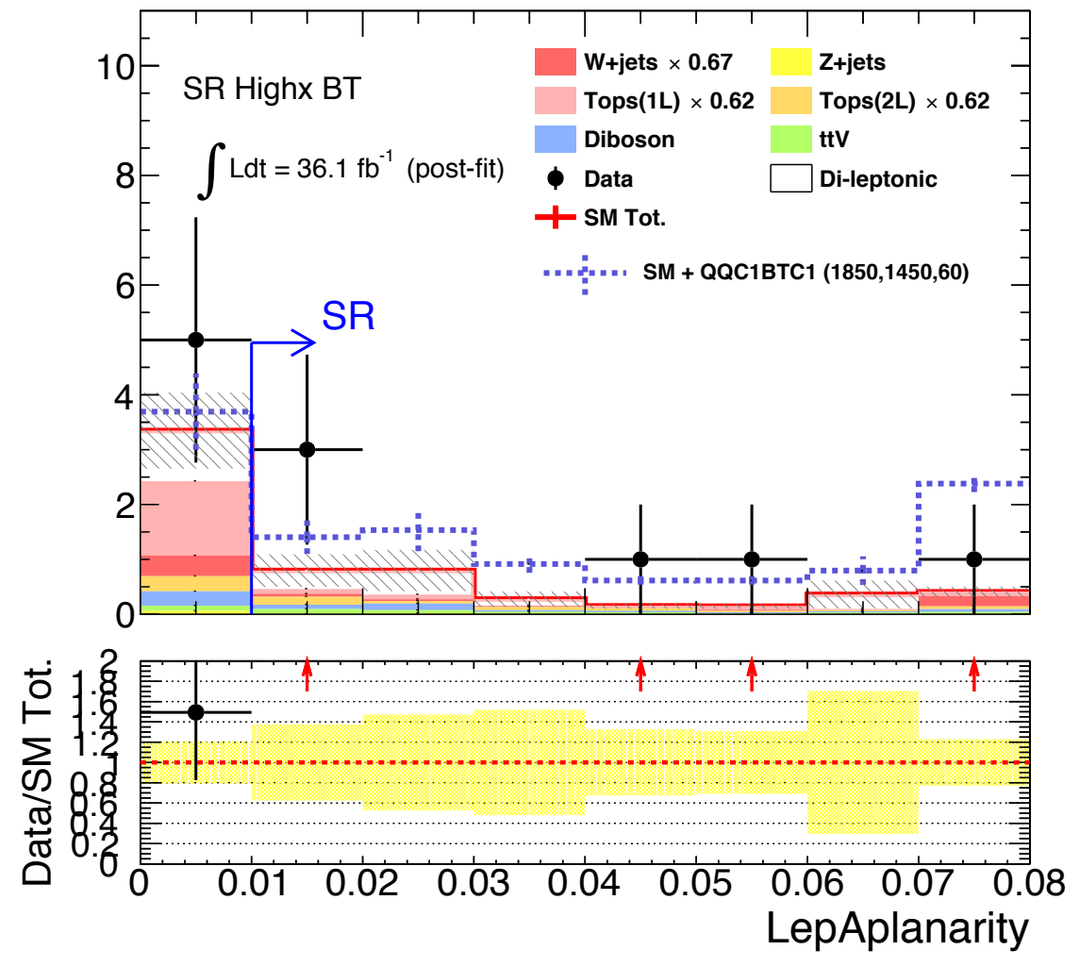
- 6発ともmuon. なんか変なことが...?
  muonのqualityは良好. isolationもよい.
  METは大きいがmuonとの相関なし.

SR High-x BT (thesis 9.2)

M_T



Aplanarity



- observed: 6 / expected: 2.3

  なんとも…

※ M_T cut-off regionのexcessはmodeling error + 統計か?