

# ATLAS 検出器を用いた ジェットと横方向消失運動量を 持つ終状態でのグルイーノ探索

安達俊介 (東京大学)

# LHC: 陽子-陽子衝突型加速器



周長27km の世界最大の加速器

ATLAS での最近の物理解析  
のお話(3つ中の1つ)

## セッション10(座長: 長縄 直崇)

9:30~9:50  
(20分)

ATLAS検出器を用いたジェットと横方向消失運動量を持つ終状態でのグルイーノ探索  
安達 俊介 (東京大学)

**SUSY**

9:50~10:10  
(20分)

bクォーク対に崩壊するヒッグス粒子の証拠  
加藤 千曲 (東京大学)

**Higgs**

10:10~10:30  
(20分)

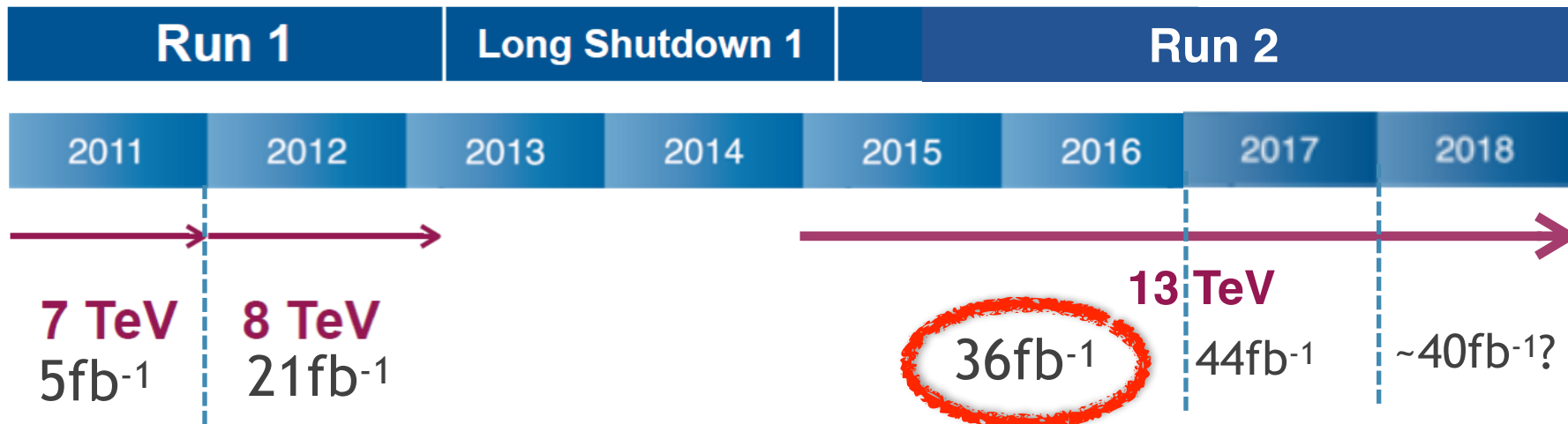
将来の電子陽子衝突LHeC実験におけるH→bb崩壊結合定数測定の研究  
関根 達侑 (東京工業大学)

10:30~10:50  
(20分)

ATLAS実験におけるボソン対共鳴探索の最新結果  
野辺 拓也 (東京大学)

**Exotic**

# LHC の今までの運転状況



ヒッグス粒子の発見

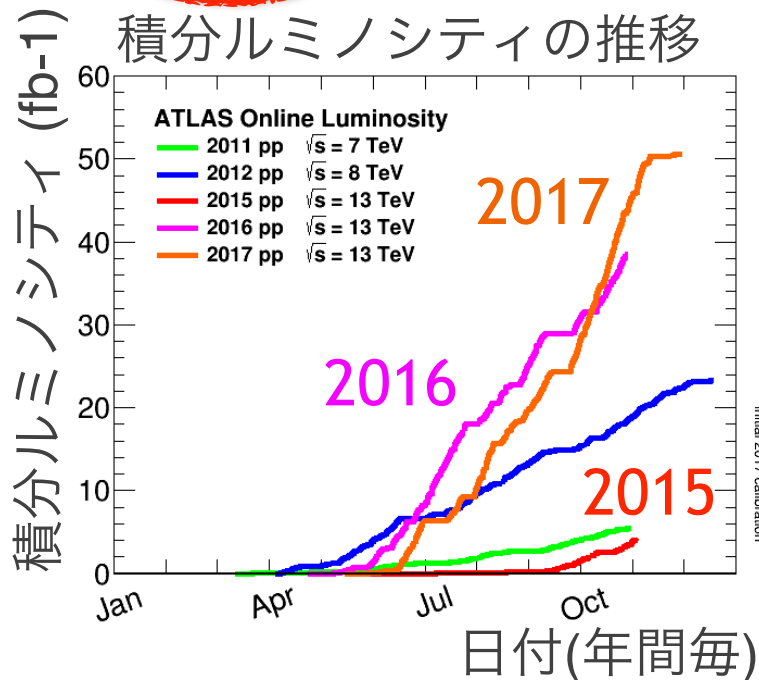
The Nobel Prize in Physics  
2013



Photo: A. Mahmoud  
François Englert  
Prize share: 1/2



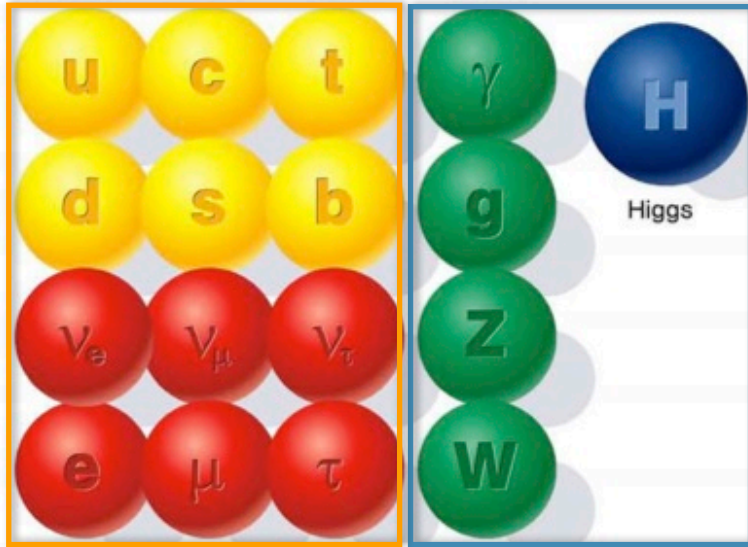
Photo: A. Mahmoud  
Peter W. Higgs  
Prize share: 1/2



# 超対称性理論 (SUSY)

ボソン  $\longleftrightarrow$  フェルミオン

フェルミオン  $\longleftrightarrow$  ボソン

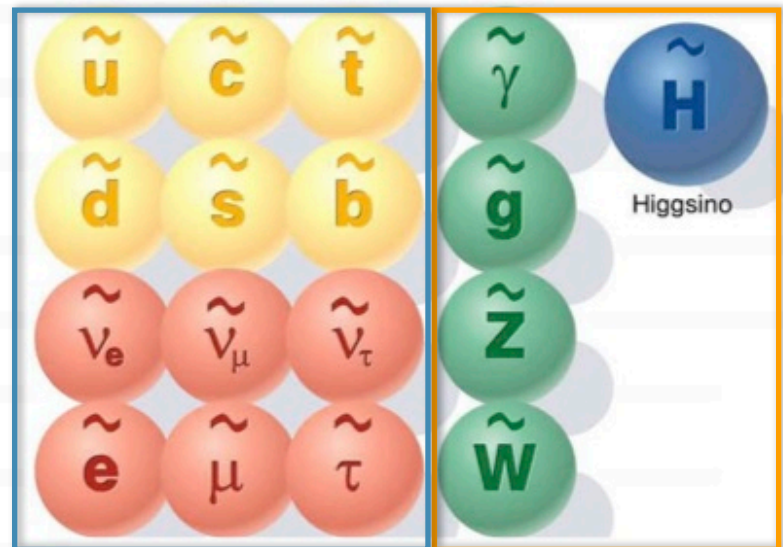


フェルミオン

ボソン

標準理論

(Standard Model : SM)



ボソン

フェルミオン

スフェルミオン

ゲージーノ

超対称性理論

(SuperSymmetry : SUSY)



# 超対称性理論 (SUSY)

## 嬉しい点

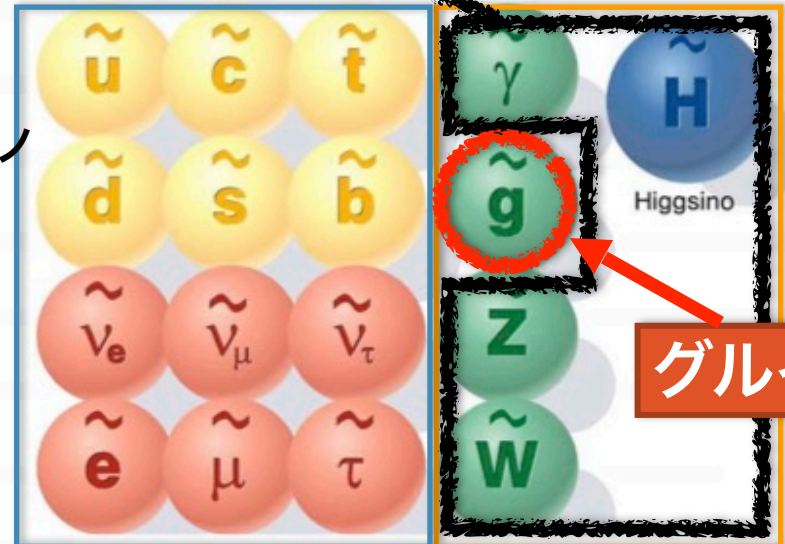
- 荷電中性粒子が混合して  
質量固有状態:  $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$

## ダークマターのよい候補 ニュートラリーノ

- 電弱相互作用と強い相互作用の統一を示唆

## 特徴

- SMよりは重い:  $O(\text{TeV})$
- スフェルミオンは比較的重い ( $>5\text{TeV}$ )
- グルイーノは他のゲージーノより生成断面積が 2桁 以上大きい



スフェルミオン ゲージーノ

超対称性理論  
(SUSY)

# R-parity 保存

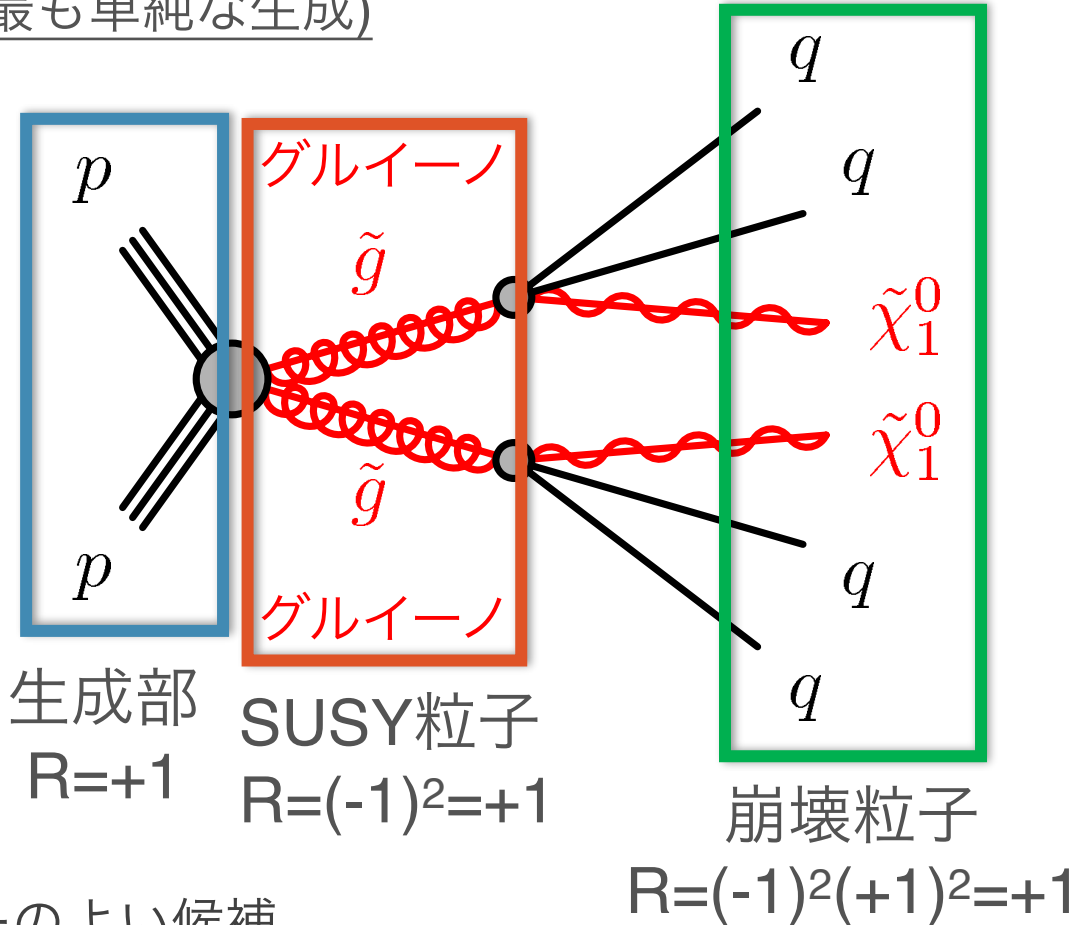
## 仮定

- R-parity 保存  
(陽子崩壊を制限するため)
- $$R = \begin{cases} +1 : \text{SM 粒子} \\ -1 : \text{SUSY 粒子} \end{cases}$$
- 最も軽いSUSY粒子(LSP)が  
中性粒子  $\tilde{\chi}_1^0$  (ニュートラリーノ)

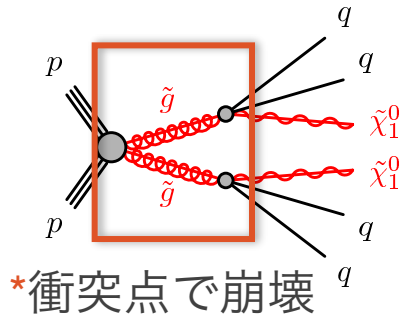
## 特徴

- SUSY粒子は2個生成される
- $\tilde{\chi}_1^0$  は安定かつ2個残る  
⇒ 反応しにくい & ダークマターのよい候補

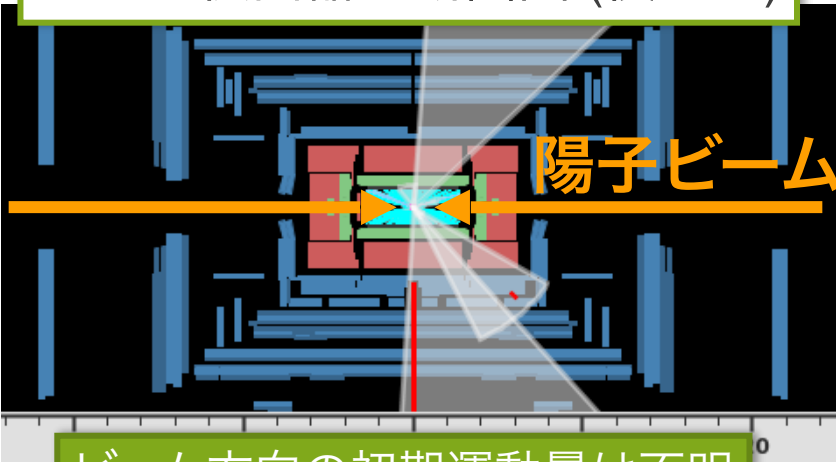
## グルイーノ対生成 (最も単純な生成)



# 検出器での見え方



ATLAS検出器の断面図 (横から)

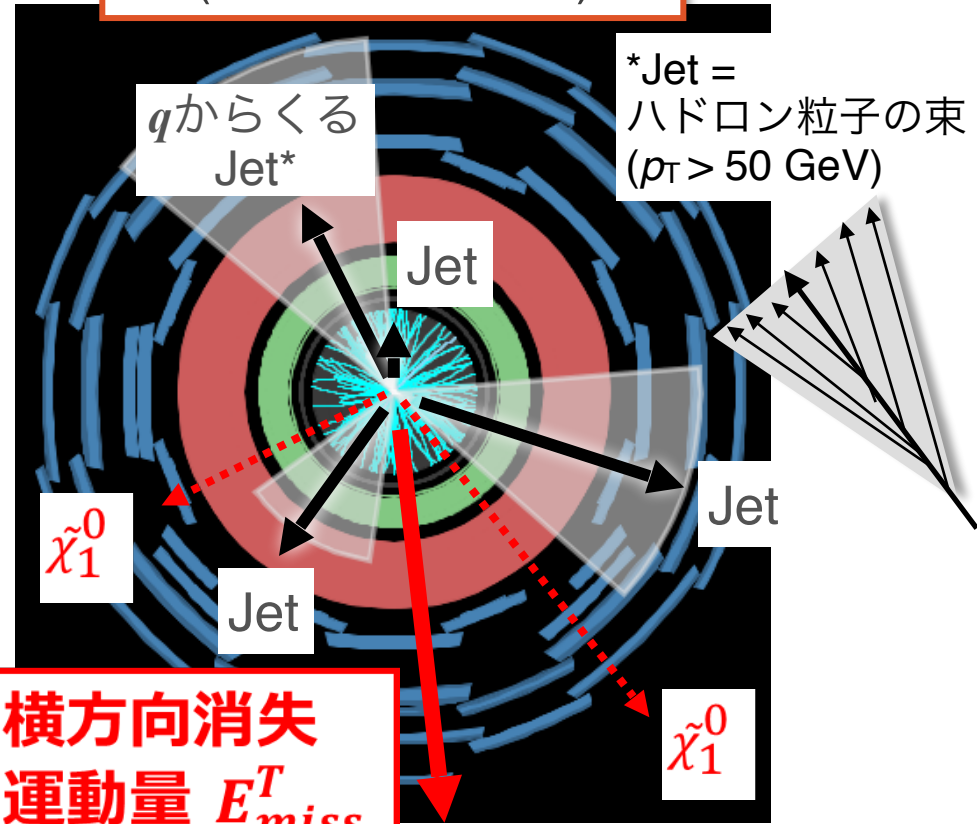


ビーム方向の初期運動量は不明

右図の平面で

⇒ 消失運動量のベクトル和 = - 検出した粒子(Jets)の運動量のベクトル和  
 $\tilde{\chi}_1^0$  から生じる横方向消失運動量が大きいのが SUSY の特徴!!

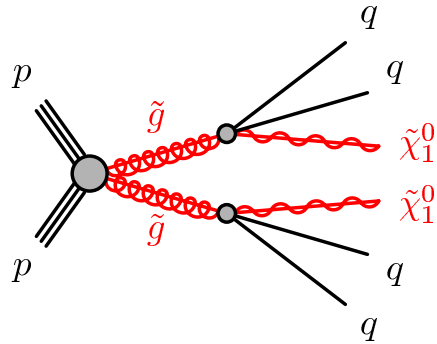
ATLAS検出器の断面図  
(ビーム垂直方向)



横方向消失  
運動量  $E_{miss}^T$

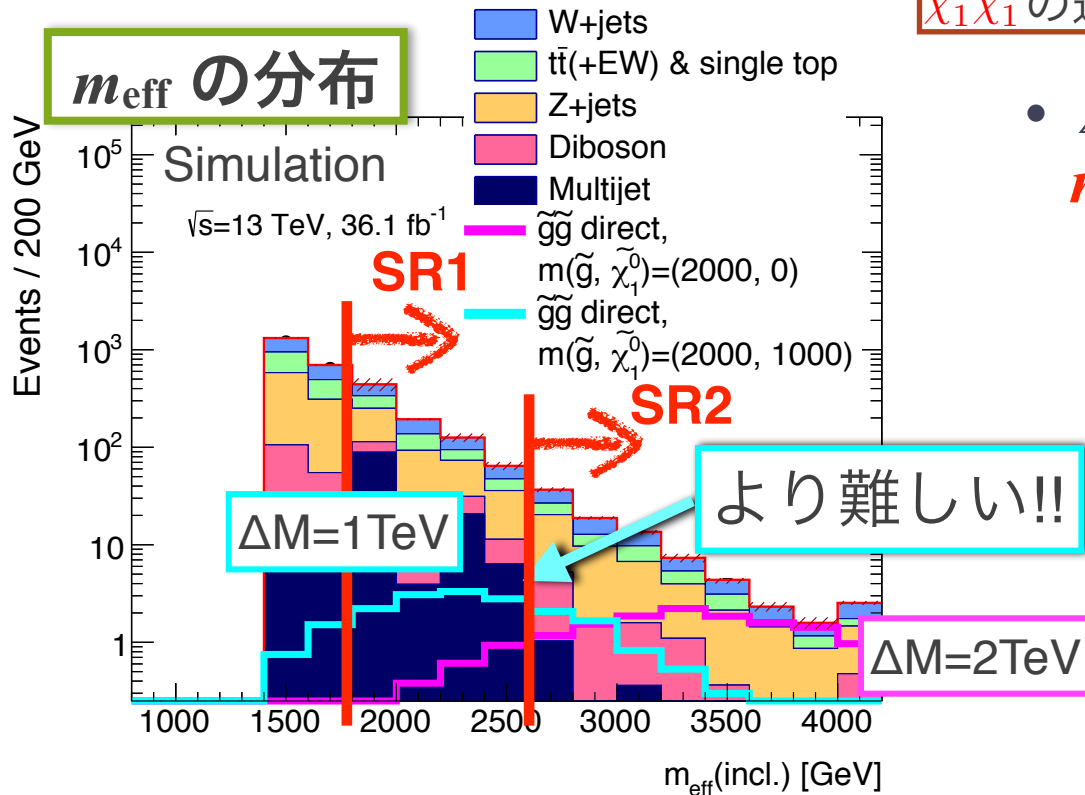
ビーム垂直方向の運動量の合計 = 0

# 信号の特徴



- Lepton( $e$  or  $\mu$ ) がない
- 複数の jets  $N_{\text{jet}} \geq 4$  “MET”
- $\tilde{\chi}_1^0$  からくる横方向消失運動量 ( $E_T^{\text{miss}}$ )
- $m_{\text{eff}} = \underbrace{|\vec{E}_T^{\text{miss}}|}_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 \text{ の運動量}} + \sum_j \underbrace{|\vec{p}_T(j)|}_{qqqq \text{ の運動量}} \propto \Delta Mass(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0)$

## $m_{\text{eff}}$ の分布

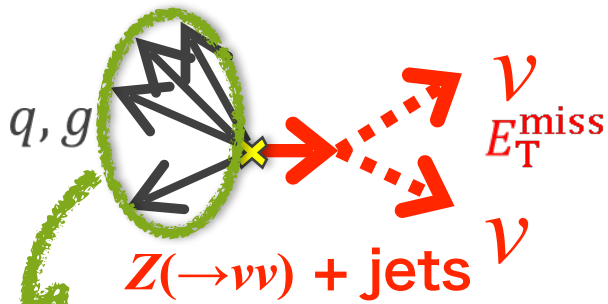


- $\Delta M(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0)$  が小さいほど  $m_{\text{eff}}$  は小さい

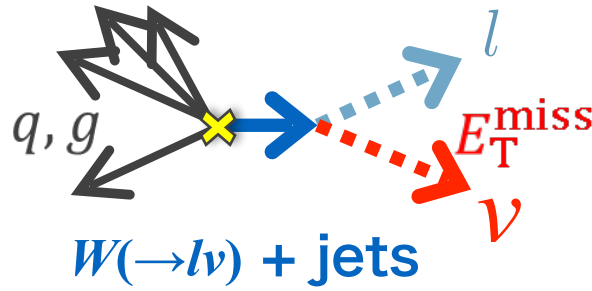
現ATLAS解析では

- 主に  $m_{\text{eff}}$  cut を変えての複数の信号領域(SR)を作成
- 各SRに残る推定BG数とData数を比較してグルイーンを探索

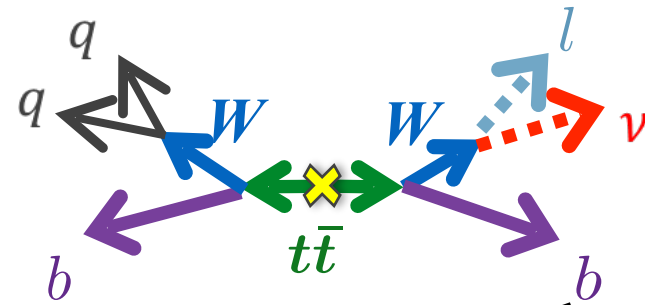
# 主なBackground



quark と gluon は  
jet として認識される



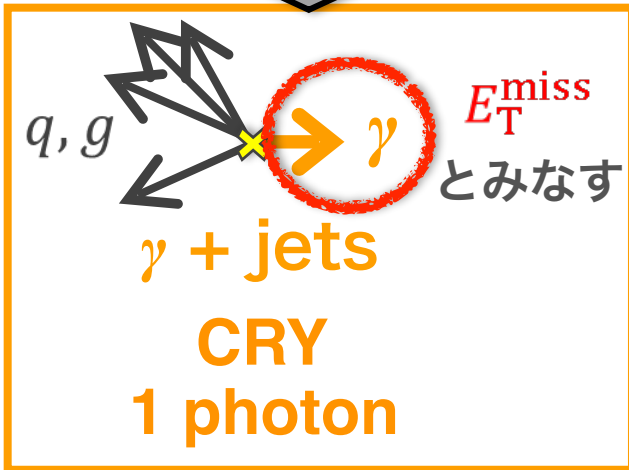
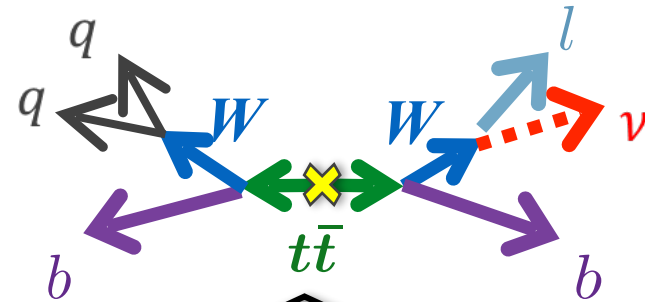
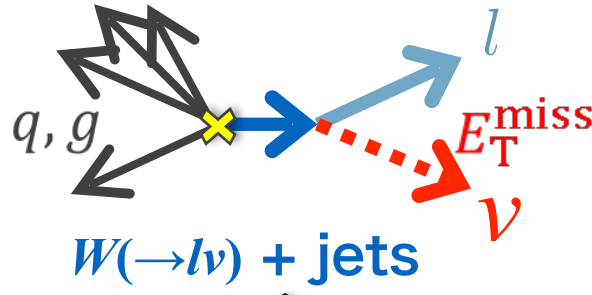
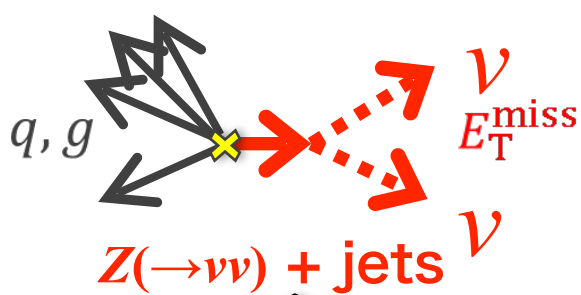
\*崩壊の仕方のみを表す



- $E_T^{\text{miss}}$  の要求  $\Rightarrow W \rightarrow lv$  崩壊する
- Leptonがない要求  $\Rightarrow$  Missing lepton  
or  
 $\tau$  がハドロンに崩壊する (jet)



# Background 推定方法



- \* ここでの lepton は electron or muon
- \* b-quark は長寿命なので識別できる

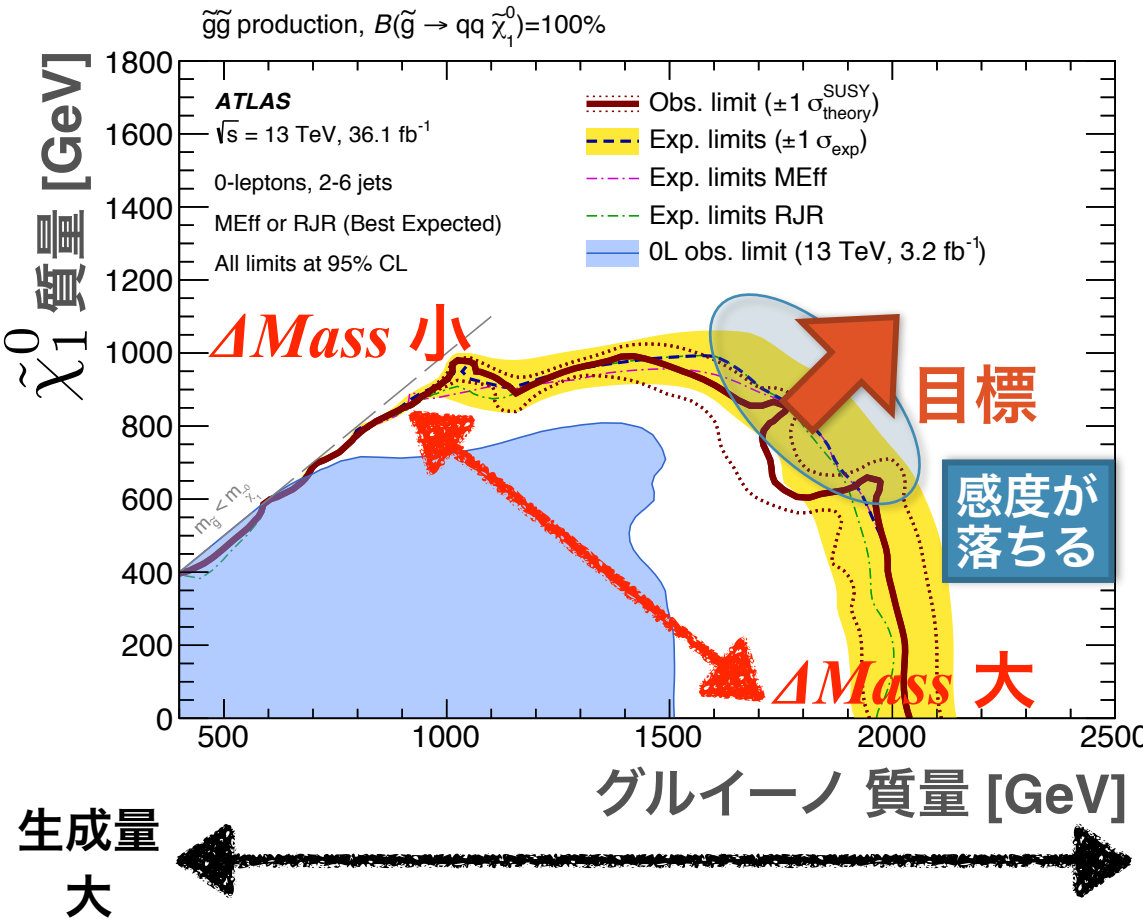
$$N_{SR}^{x, \text{pred}} = N_{CRx}^{x, \text{data}} \times \frac{N_{SR}^{x, \text{MC}}}{N_{CRx}^{x, \text{MC}}}$$

補正係数  $\mu(x)$

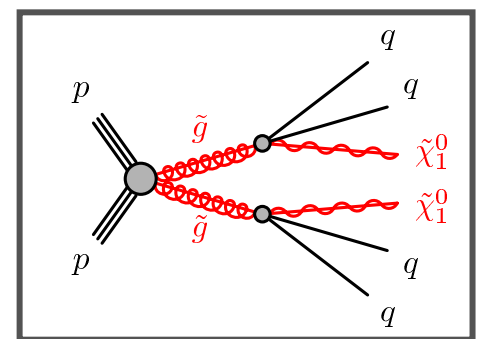
- SR での各background MC  $x$  に対する補正をdataから求める
- 補正は各background enrich な control region(CR)で求める

# 今までの結果 (Moriond 2017, 3月)と目標

[arXiv:1712.02332](https://arxiv.org/abs/1712.02332)



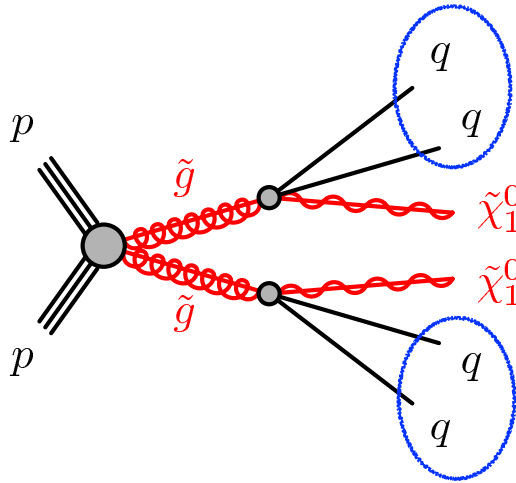
- 有意なexcessは無かった  
 ⇒棄却領域に焼き直す
- 各質量で最も感度の良いSRでの  
 95% C.L. での棄却領域が**赤線内**



新しいテクニック **quark/gluon 分離** & **多変量解析(BDT)** を導入!!

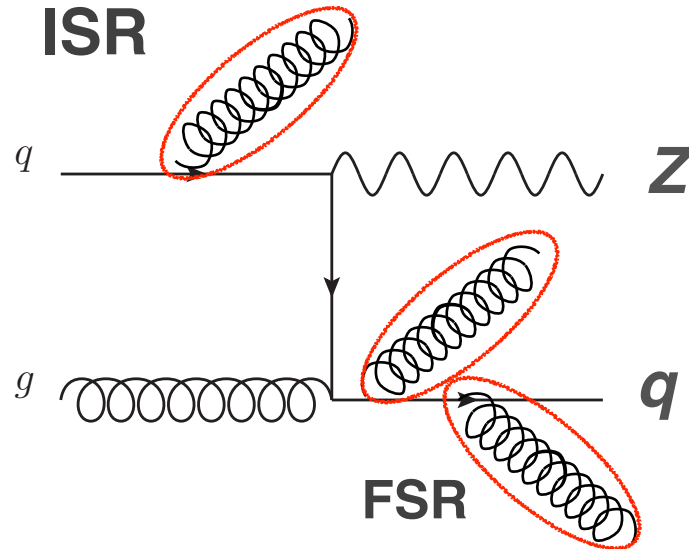
# Signal/background 中の quark/gluon

## Signal



4本のquark jet

## Background (Z+jets)



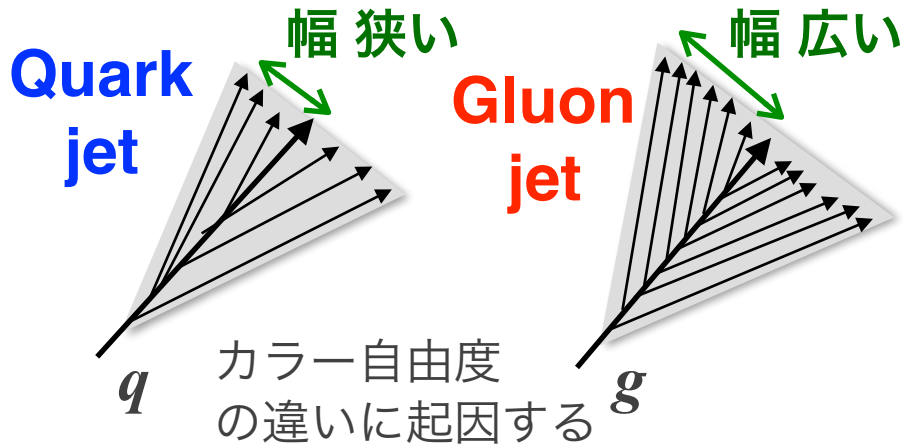
ISR・FSF の gluon

4本 jet があっても

2-3本は gluon 由来

# Quark/gluon 分離変数

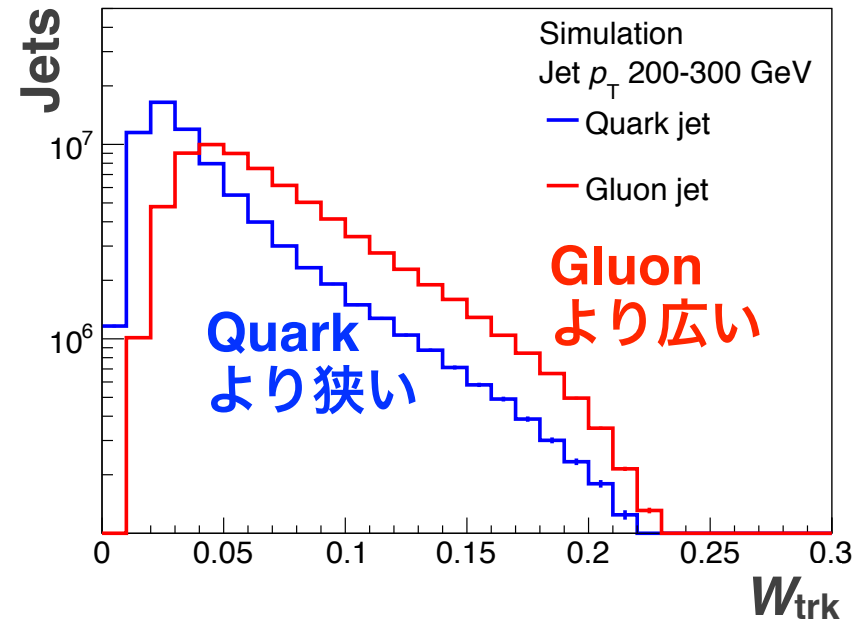
Quark と gluon の違い



## Jet width

Track と jet の距離

$$W_{\text{trk}} = \frac{\sum_{\text{trk} \in \text{jet}} p_{T, \text{trk}} \Delta R_{\text{track, jet}}}{\sum_{\text{trk} \in \text{jet}} p_{T, \text{trk}}}$$



# SR の BDT training

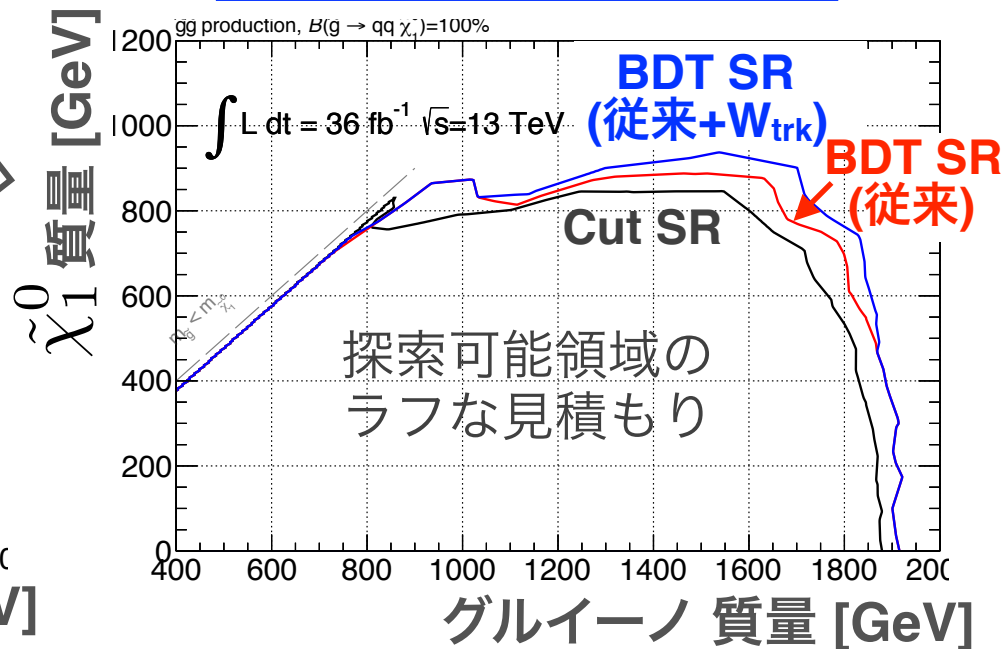
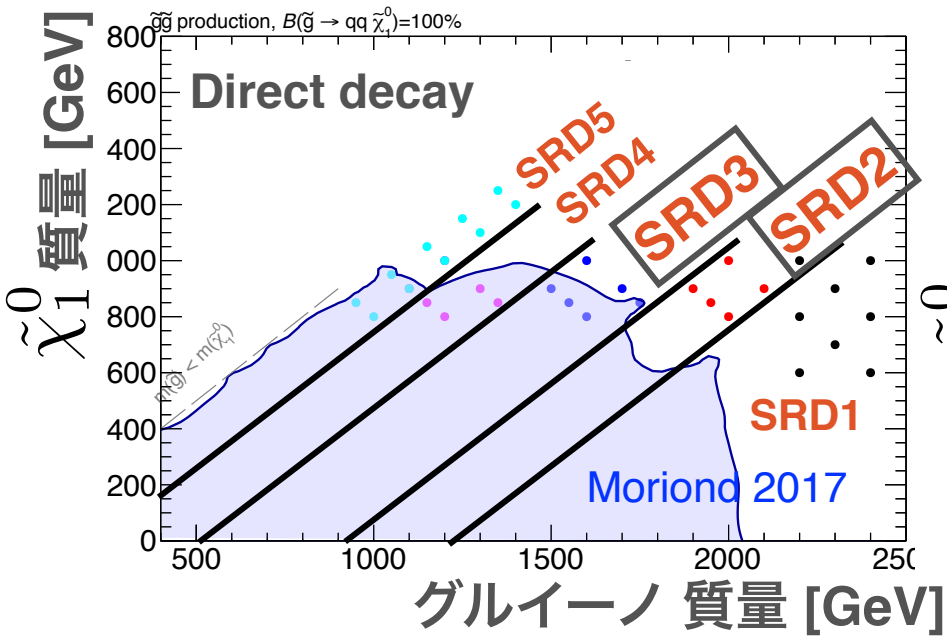
- 多変量解析(BDT) は Bkg と signal の simulation の kinematic 分布を元に、各 event の Bkg or signal らしさを表す変数を作成してくれる(BDT score)
  - 考慮する kinematic 変数は複数 & 変数間の相関も考慮される
- $\Delta Mass$  別に BDT training をする

従来から使っている変数

- $m_{eff}$
- $E_T^{miss}/m_{eff}$
- Aplanarity**  
複数 jets のトポロジーを表す
- 1st - 4th jet  $p_T$
- 1st - 4th jet  $|\eta|$

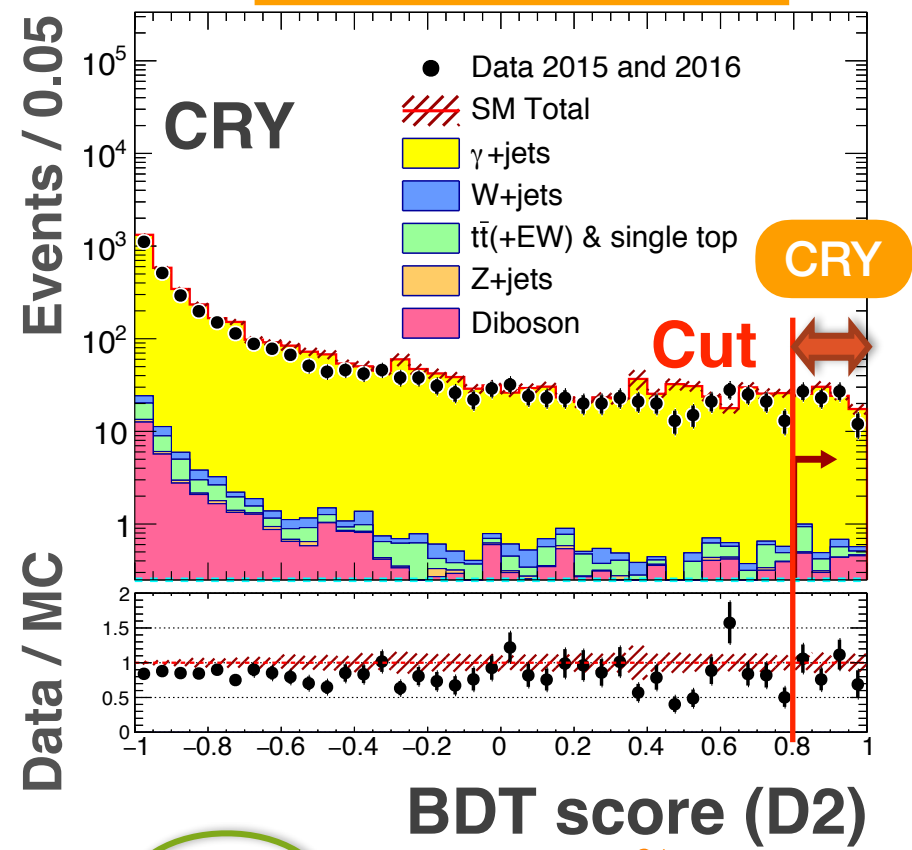
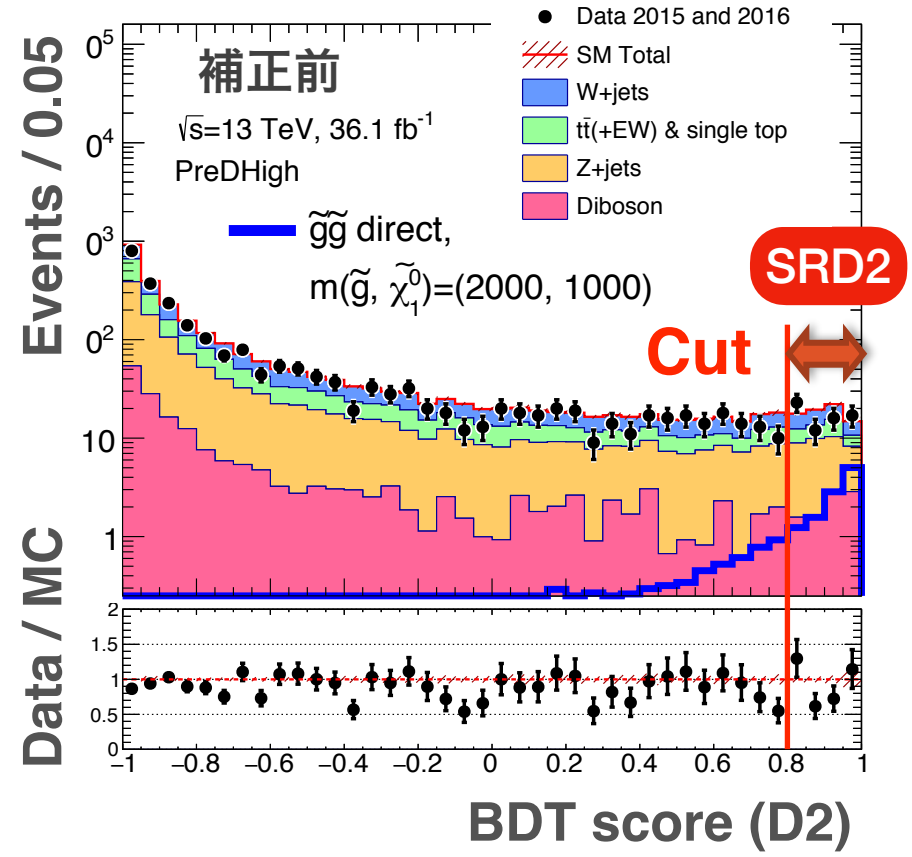
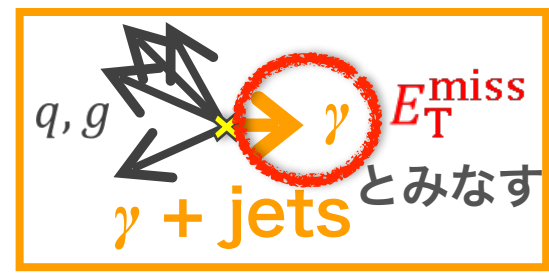
+

1st - 4th jet  $W_{trk}$





# 得られた BDT score (SRD2用)



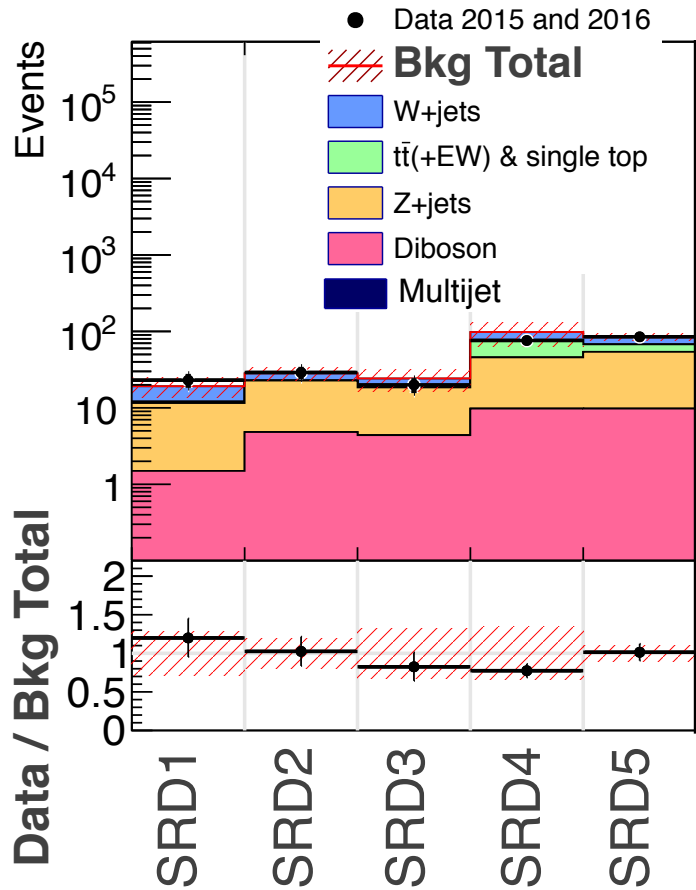
CRY での Data/MC 比( $\mu$ )を SR の Z+jets MC に掛けて補正する

$$\vec{E}_T^{\text{miss}'} = \vec{E}_T^{\text{miss}} + \vec{p}_T^{\gamma}$$

$m_{\text{eff}}$  なども  $\vec{E}_T^{\text{miss}'}$  で再計算

BDT も再計算

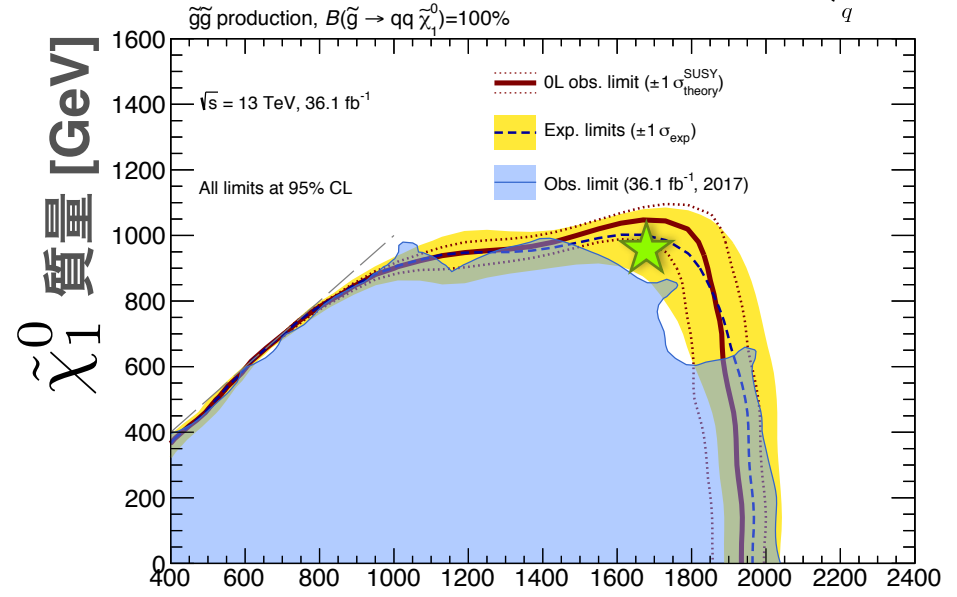
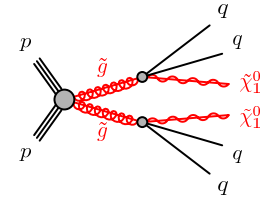
# 結果



有意なズレは見られなかった

# 棄却質量領域

## Direct decay



グルイーノ 質量 [GeV]

| Signal Region   | SRD3         | Previous study |
|---|--------------|----------------|
| Total predicted bkg   | 24 ± 8       | 48.60 ± 7.27   |
| Signal<br>( $\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0$ ) = (1700, 900) GeV | 26.30 ± 6.37 | 25.81 ± 1.39   |
| CLs   | 0.0034       | 0.13           |
| Significance ( $\sigma_{\text{excl}}$ )                       | 2.70         | 1.10           |

# まとめ

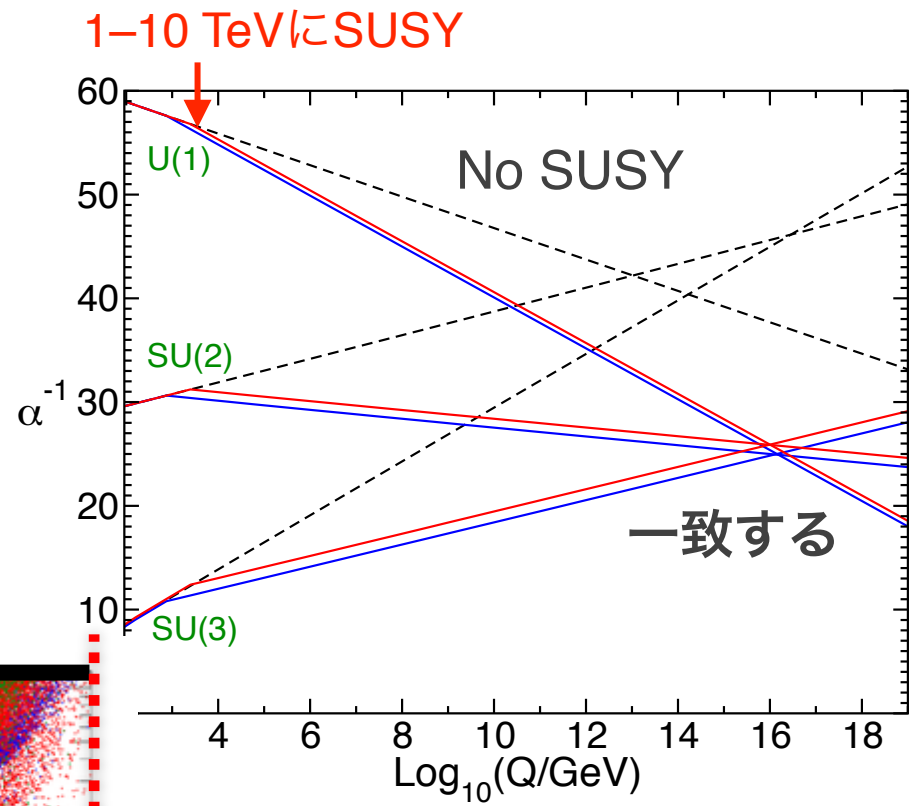
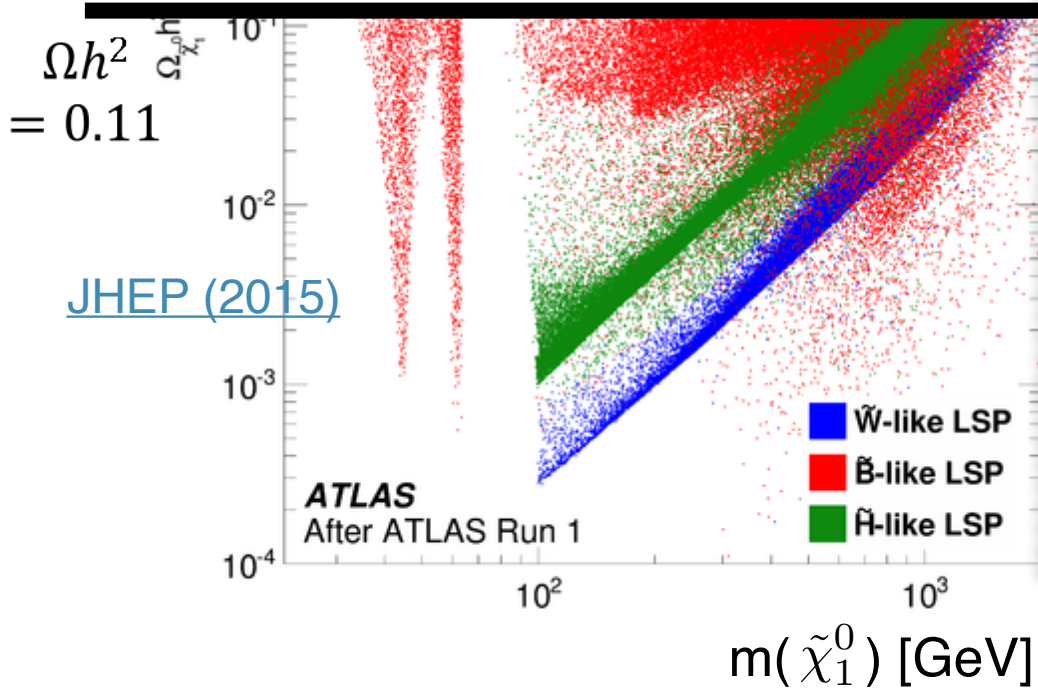
- 比較的軽いと思われるゲージノの中でも反応断面積の大きく、LHCでの探索に適している**グルイーノの探索**を行った
- **目標: グルイーノ $\sim 2\text{TeV}$ , ニュートラリーノ( $\tilde{\chi}_1^0$ ) $\sim 1\text{TeV}$  の比較的重い $\tilde{\chi}_1^0$ に対する今まで**  
あまり感度の無かった領域を探索すること
- 新たに **quark/gluon 分離** と **多変量解析(BDT)** を利用して **significance で 2.5 倍**の改善を得た
- 有意な兆候は得られなかったが以下の領域を新たに探索できた
  - **Gluino direct decay : 1.50–1.80TeV @ LSP=1TeV** を探索

 今まで探索できなかった a few TeV グルイーノ & TeV  $\tilde{\chi}_1^0$  の探索できた

# 副次的なご利益

- Gaugino mass  $\sim 1-10\text{TeV}$

Run1後の pMSSM での  
許容パラメータ点

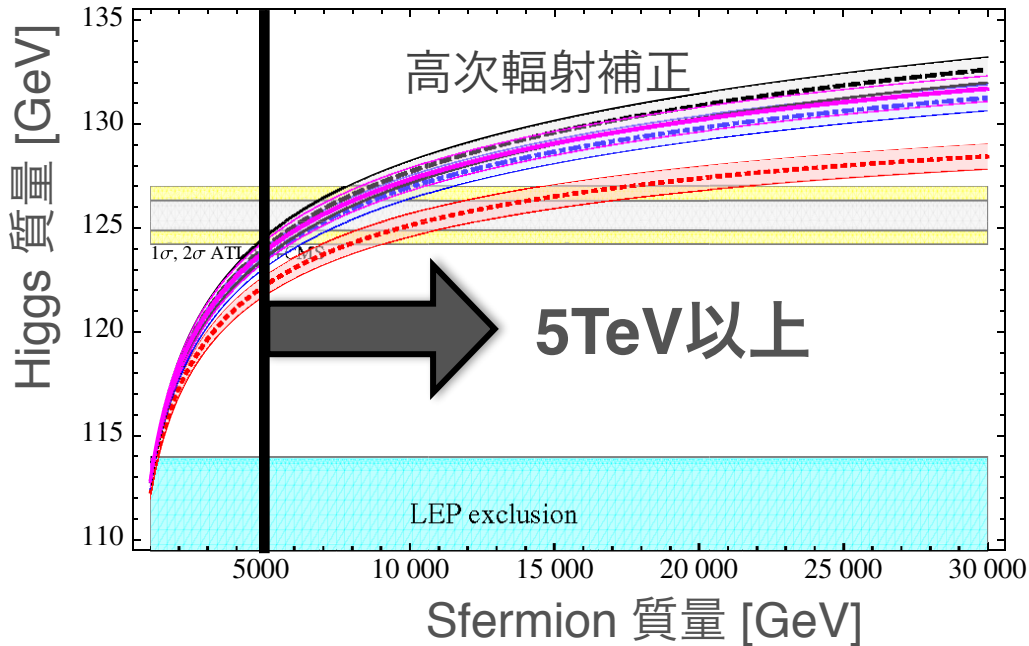


- $\tilde{\chi}_1^0$  mass  $< 3\text{ TeV}$

$m(\tilde{\chi}_1^0) = 3\text{ TeV}$

# Sfermion の質量

$M_h, Q_{RG} = M_S, X_t/M_S = 0, \tan\beta = 20, \mu = 200 \text{ GeV}$



Higgsの質量は

輻射補正なしでは

Z mass 90GeVより軽い

MSSM を仮定した場合、

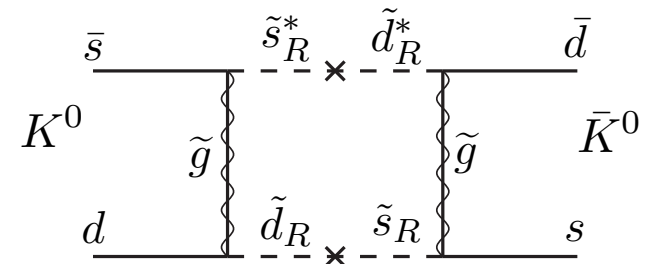
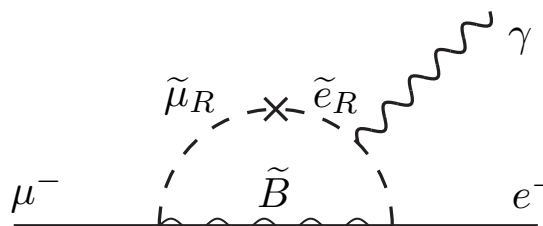
Higgs mass を重くするのに Sfermion (特に stop)が重い必要がある

他にも

Flavour mixing :  $\mu \rightarrow e\gamma$

CP violation :  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$

への実験的厳しい制限から

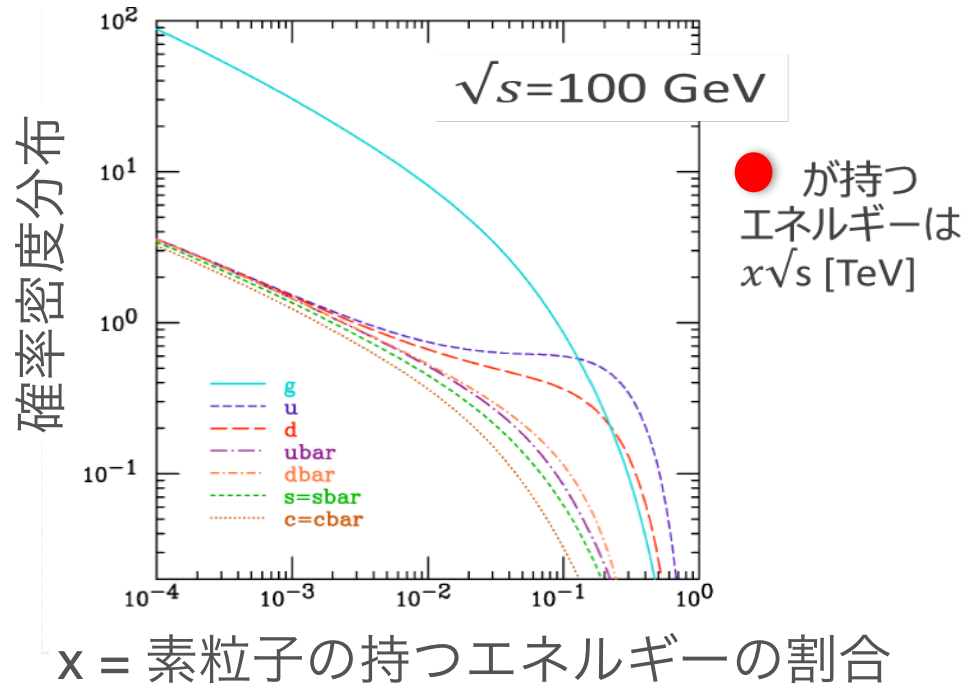
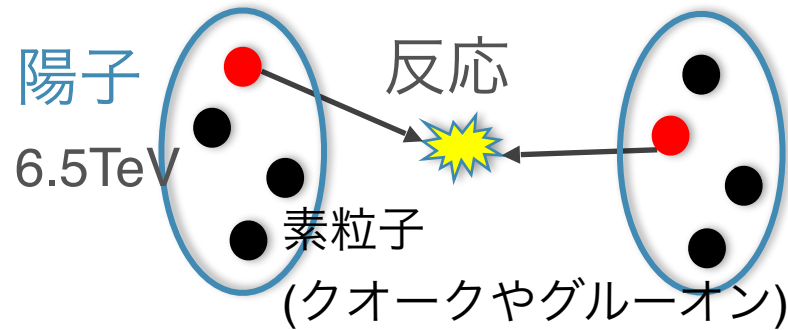
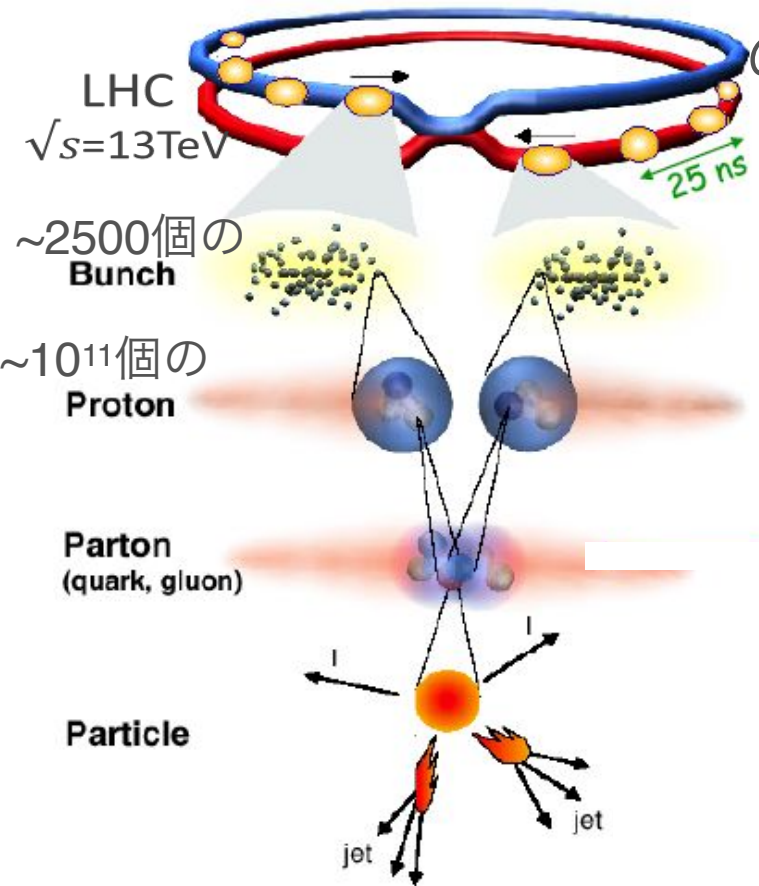


**Sfermion は重い (>5—10TeV)**



# 陽子-陽子衝突

25ns 間隔で陽子の塊(bunch)がある陽子  
 の中にもpartonと呼ばれる構造がある



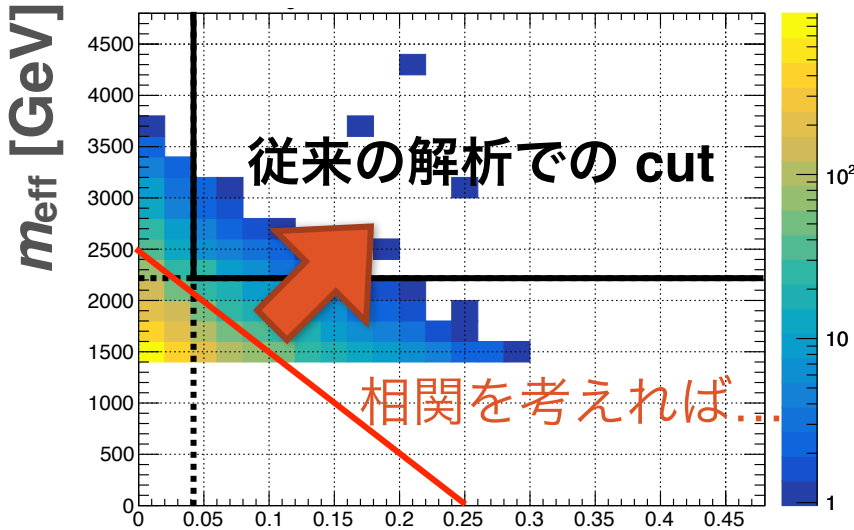
# BDT に利用する変数

従来から使っている変数

- $m_{\text{eff}}$
- $E_{\text{T}}^{\text{miss}}/m_{\text{eff}}$
- **Aplanarity**  
複数 jets の  
トポロジーを表す
- 1st — 4th jet  $p_{\text{T}}$
- 1st — 4th jet  $|\eta|$

**+** 1st — 4th jet  $W_{\text{trk}}$

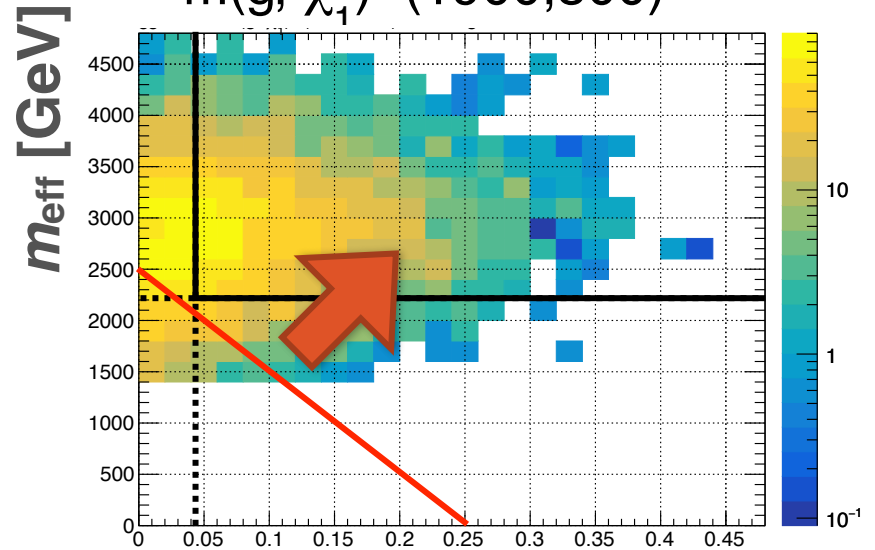
## Total SM background



イベントトポロジー(Aplanarity)

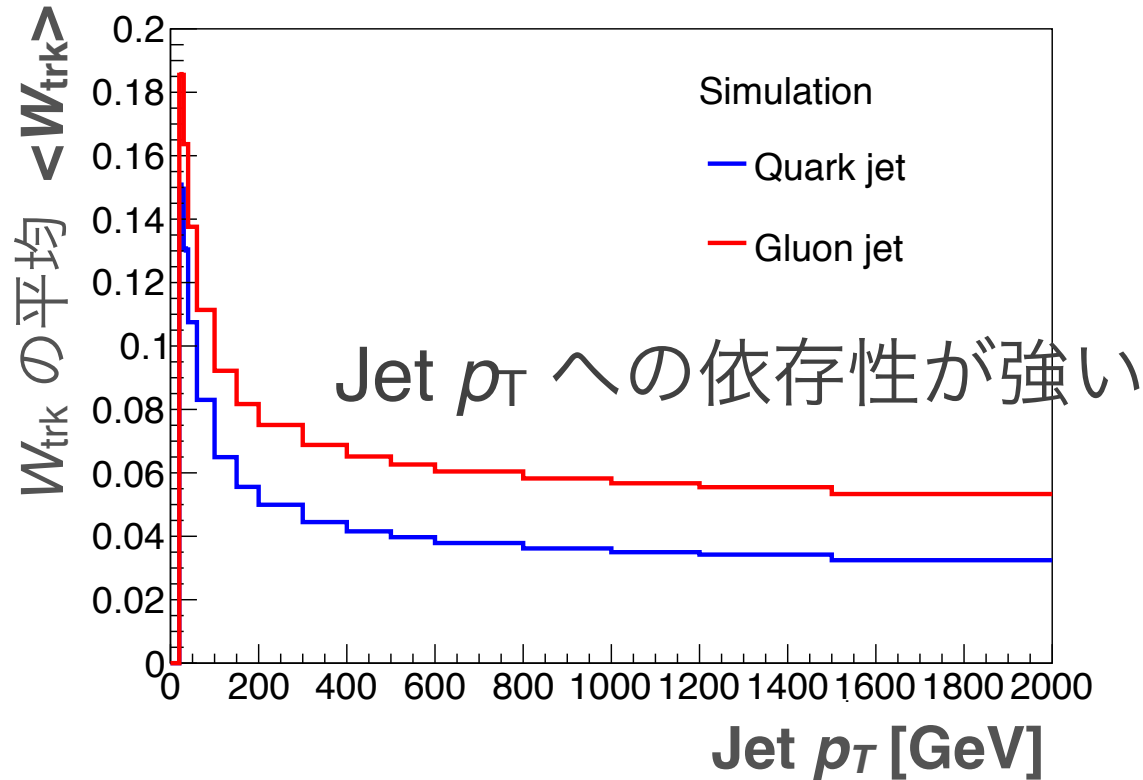
## Signal (direct decay)

$$m(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0) = (1900, 500)$$



イベントトポロジー(Aplanarity)

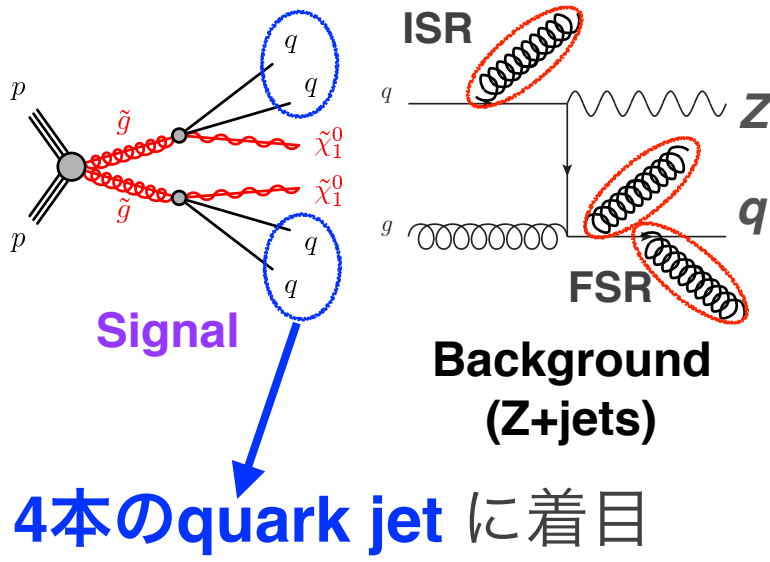
# Jet width の jet $p_T$ に対する依存性



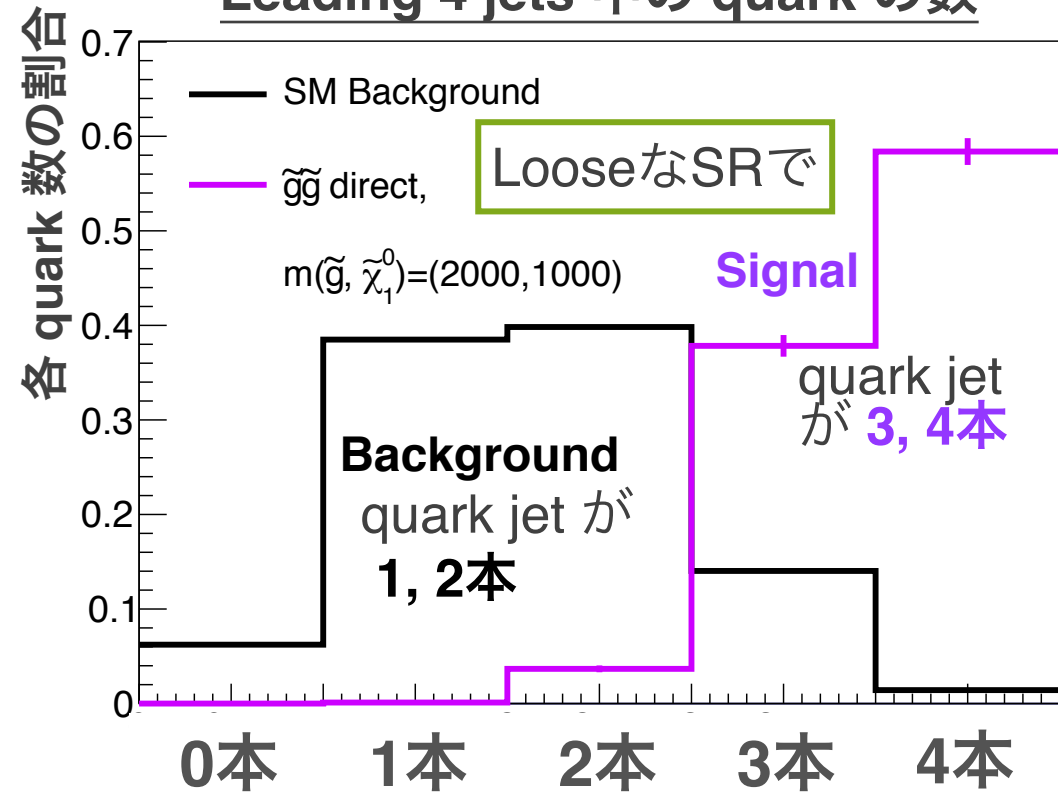
- $W_{\text{trk}}$  の jet  $p_T$  への依存性(相関)を考慮
- 4本すべての jet の  $W_{\text{trk}}$  を事象選択に組み込む

どちらも組み込むために多変数解析(BDT)を利用

# Quark/gluon 分離

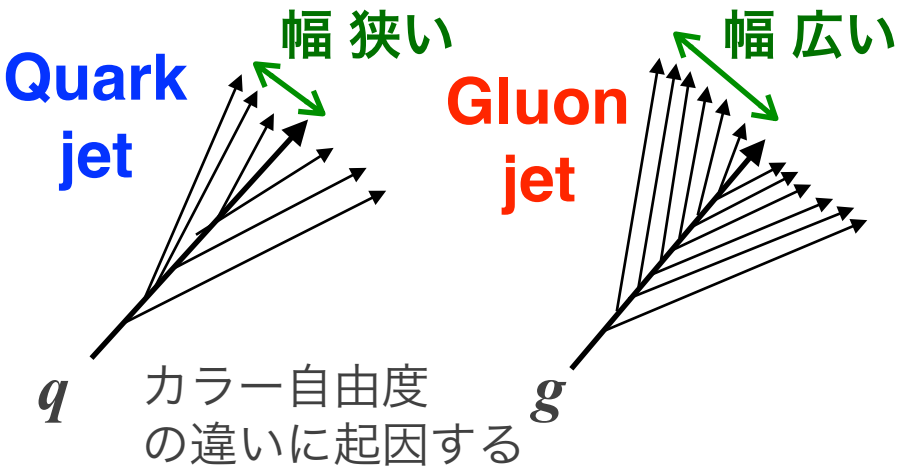


## Leading 4 jets 中の quark の数



# Quark/gluon separation

Quark と gluon の違い

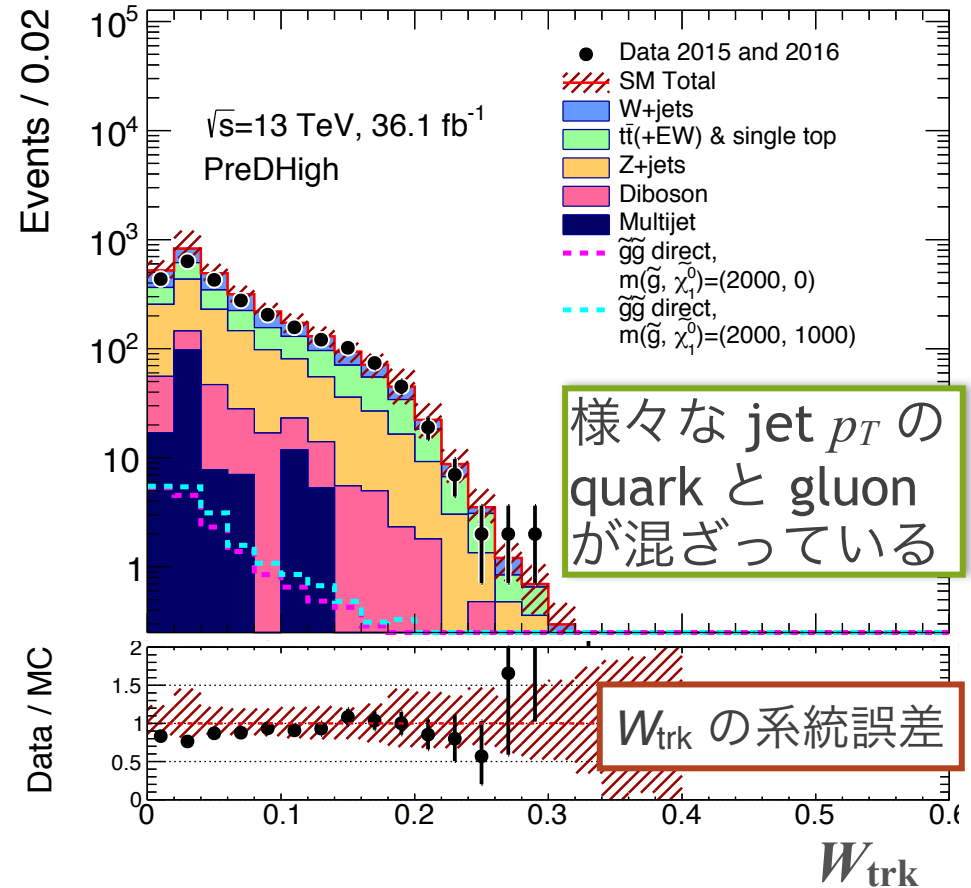


Jet width

Track と jet の距離

$$W_{\text{trk}} = \frac{\sum_{\text{trk} \in \text{jet}} p_{T,\text{trk}} \Delta R_{\text{track, jet}}}{\sum_{\text{trk} \in \text{jet}} p_{T,\text{trk}}}$$

ある SR-like で loose な selection 後の 1<sup>st</sup> jet  $W_{\text{trk}}$

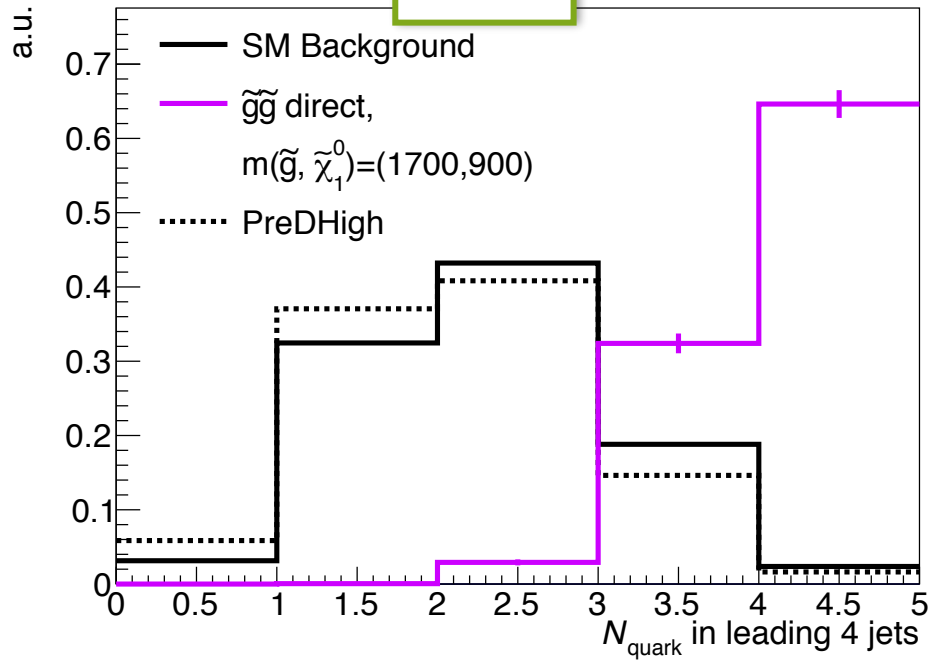


\* Normalization は後に補正する

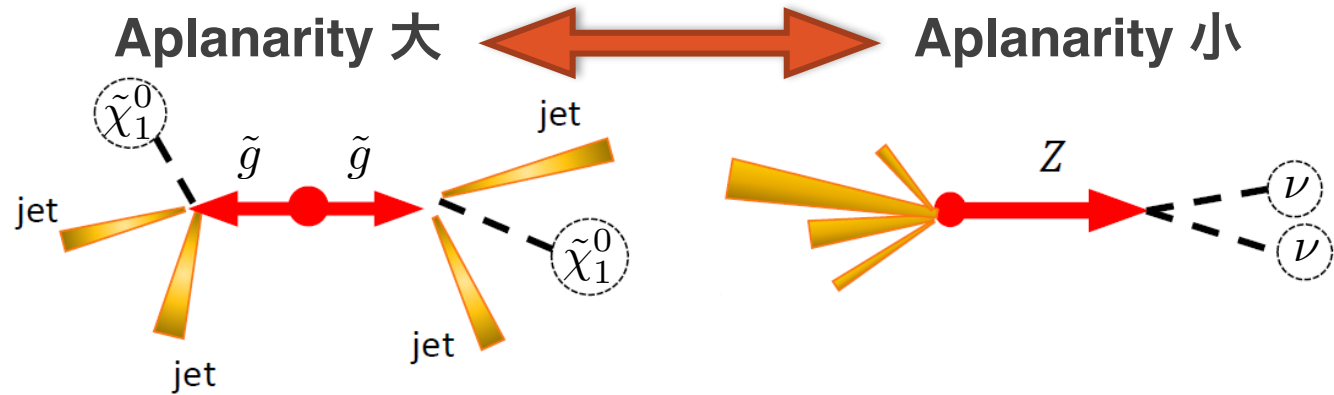


# Quark 本数

SRD3



# Aplanarity



## 定義

$$M_{xyz} = \sum_i \begin{pmatrix} p_{xi}^2 & p_{xi} p_{yi} & p_{xi} p_{zi} \\ p_{yi} p_{xi} & p_{yi}^2 & p_{yi} p_{zi} \\ p_{zi} p_{xi} & p_{zi} p_{yi} & p_{zi}^2 \end{pmatrix}$$

\* $p_i$  は  $i$  番目の jet の運動量

行列  $M_{xyz}$  の固有値を  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  とする  
( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ )

Sphericity  $S = \frac{3}{2}(\lambda_2 + \lambda_3),$

Transverse sphericity  $S_{\perp} = \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2},$

Aplanarity  $A = \frac{3}{2}\lambda_3.$

# Preselection

| Selection                           | PreDHigh   | PreDLow  |
|-------------------------------------|------------|----------|
| Lepton                              | 0 lepton   |          |
| $E_{T}^{\text{miss}}$               | > 300 GeV  |          |
| Jet 数<br>( $p_T > 50 \text{ GeV}$ ) | $\geq 4$   | $\geq 2$ |
| $m_{\text{eff}}$                    | > 1400 GeV |          |

| Selection |                         | PreDHigh     | PreDLow      |
|-----------|-------------------------|--------------|--------------|
| Main {    | Z/ $\gamma^*$ + jets    | 1046 (35.7%) | 4643 (39.1%) |
|           | $t\bar{t}$ + single top | 728 (24.8%)  | 2381 (20.0%) |
|           | W+jets                  | 809 (27.6%)  | 3183 (26.8%) |
|           | Diboson                 | 200 (6.8%)   | 625 (5.3%)   |
|           | Multi-jet               | 146 (5.0%)   | 1053 (8.9%)  |
|           | <b>Total</b>            | <b>2929</b>  | <b>11884</b> |

# Signal region (SR) の定義

| Signal region  | D1                     | D2                   | D3                     | D4                     | D5                     |
|--|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Preselection   | PreDHigh               |                      |                        |                        | PreDLow                |
| $ \eta(j_{1-4}) $  | -                      |                      | $< 2.1$                |                        | -                      |
| $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2,(3)}, \vec{E}_T^{\text{miss}})_{\text{min}}$ | $>0.4$                 | $>0.6$               | $>0.6$                 | $>0.4$                 | $>0.2$                 |
| $\Delta\phi(\text{jet}_{i>3}, \vec{E}_T^{\text{miss}})_{\text{min}}$     | $>0.2$                 | $>0.4$               | $>0.4$                 | $>0.2$                 | $>0.1$                 |
| BDT score  | $>0.90$                | $>0.80$              | $>0.80$                | $>0.60$                | $>0.75$                |
| Training signal mass $\Delta M(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0)$             | $\sim 1.5 \text{ TeV}$ | $\sim 1 \text{ TeV}$ | $\sim 500 \text{ GeV}$ | $\sim 300 \text{ GeV}$ | $\sim 150 \text{ GeV}$ |

| Signal region  | O1                     | O2                     | O3                     | O4                     | O5                    |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Preselection   | PreOHigh               |                        |                        | PreOLow                |                       |
| $ \eta(j_{1-4}) $  | -                      |                        | $< 2.1$                |                        | $< 2.1$               |
| $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2,(3)}, \vec{E}_T^{\text{miss}})_{\text{min}}$ |                        | $>0.4$                 |                        |                        | $>0.4$                |
| $\Delta\phi(\text{jet}_{i>3}, \vec{E}_T^{\text{miss}})_{\text{min}}$     |                        | $>0.2$                 |                        |                        | $>0.2$                |
| Number of jets ( $N_{\text{jet}}$ )                                      | -                      | -                      | -                      | $\geq 6$               | -                     |
| BDT score  | $>0.80$                | $>0.70$                | $>0.50$                | $>0.00$                | $>-0.15$              |
| Training signal mass $\Delta M(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0)$             | $\sim 1.3 \text{ TeV}$ | $\sim 900 \text{ GeV}$ | $\sim 500 \text{ GeV}$ | $\sim 200 \text{ GeV}$ | $\sim 80 \text{ GeV}$ |

# SR と CR の kinematics

## SRD2

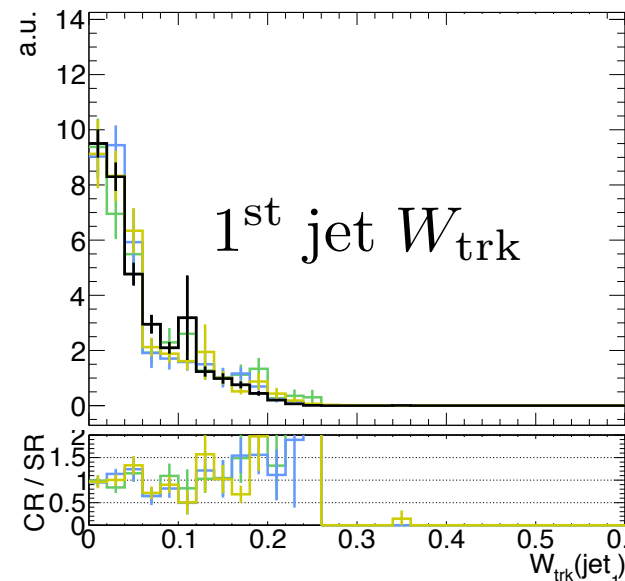
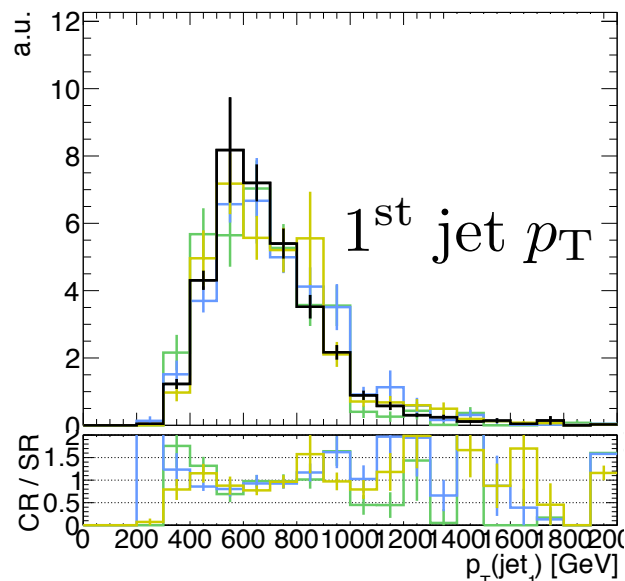
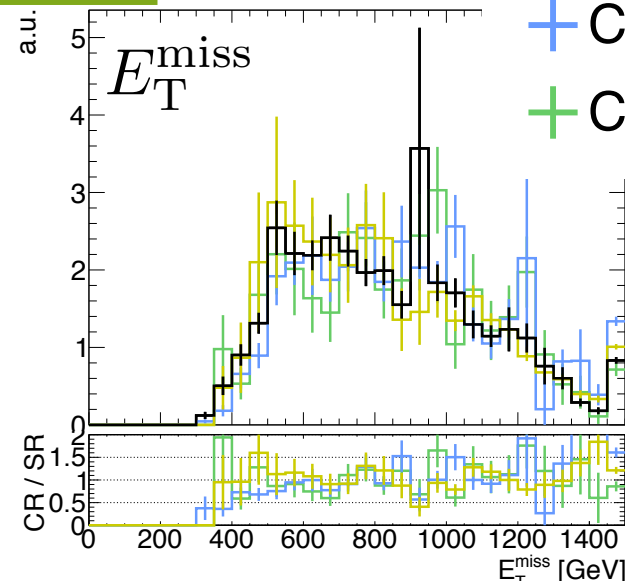
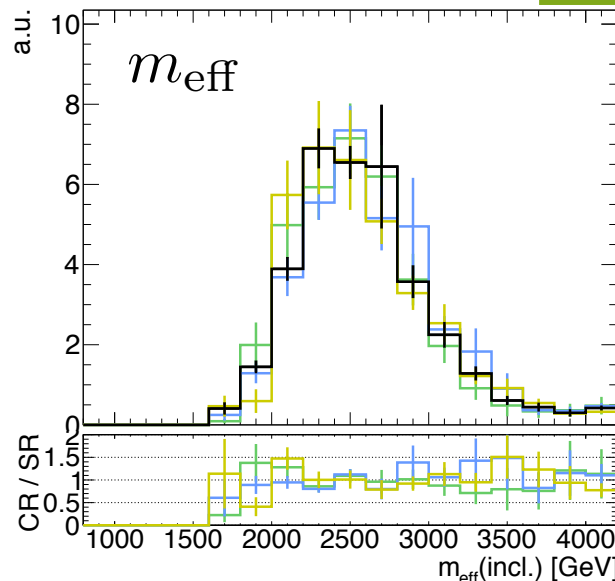
+ SR

+ CRY

+ CRW

+ CRT

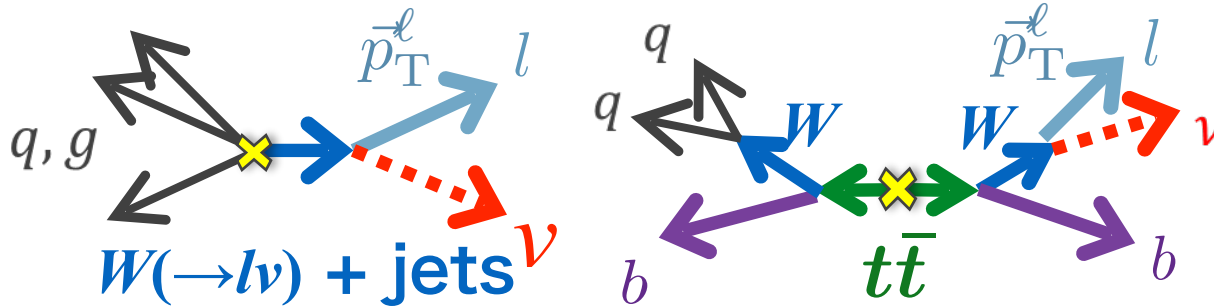
BDT cut を  
同じにすることで  
似た kinematics を  
取ってこれている



# CRW · CRT / VRW · VRT

W は  $m_T$  cut で取り出す

$$m_T = \sqrt{2p_T^\ell E_T^{\text{miss}} (1 - \cos[\Delta\phi(\vec{p}_T^\ell, \vec{E}_T^{\text{miss}})])}$$



Lepton の扱い方

A.  $E_T^{\text{miss}}$  として扱う :

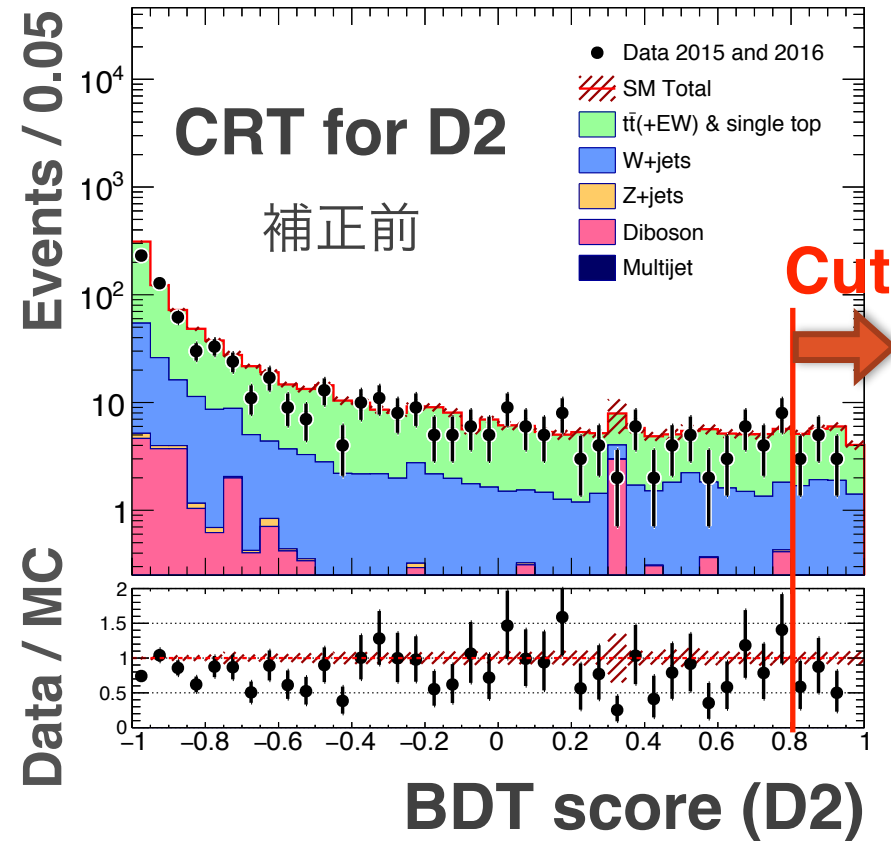
$$\vec{E}_T^{\text{miss}'} = \vec{E}_T^{\text{miss}} + \vec{p}_T^\ell$$

B. Jet として扱う :

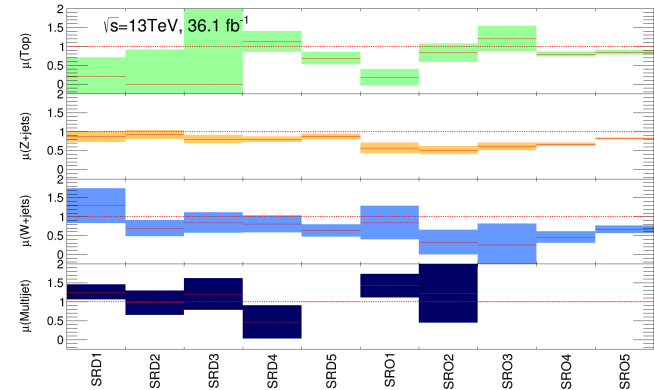
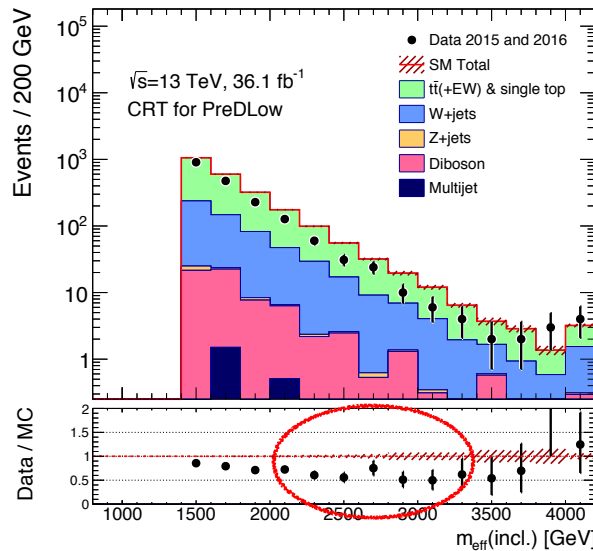
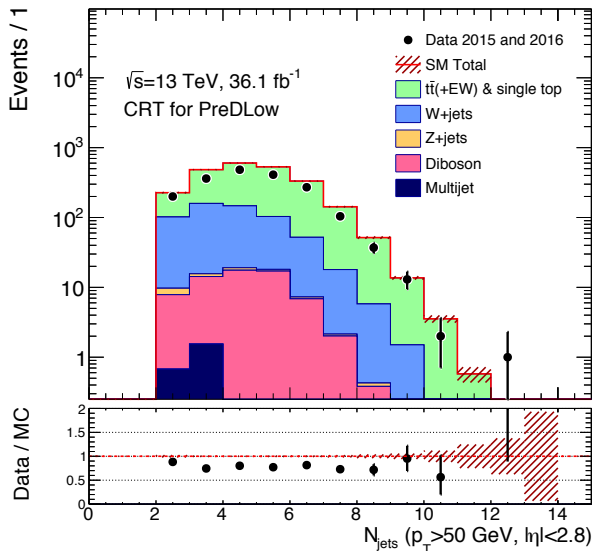
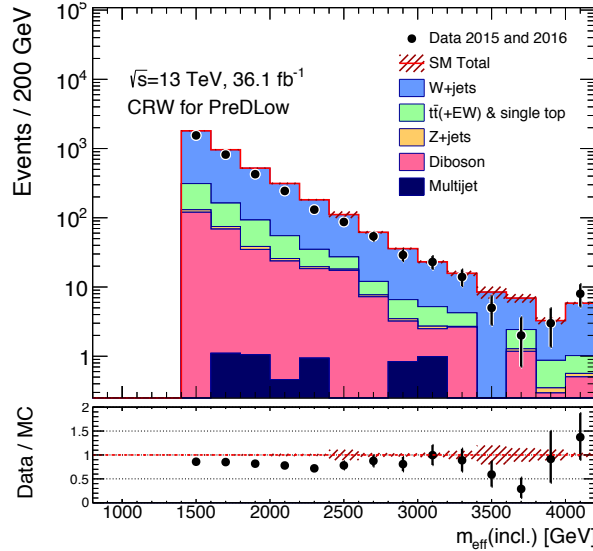
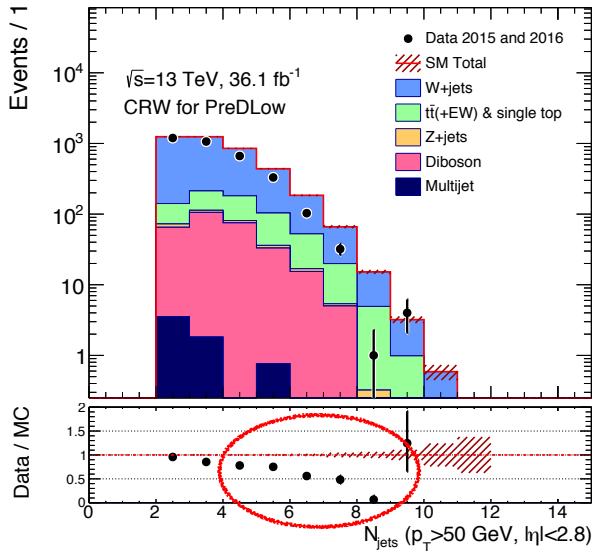
$p_T$  が  $\vec{p}_T^\ell$  の jet とする

A : CR ← 統計量が多いので

B : VR



# CRW / CRT



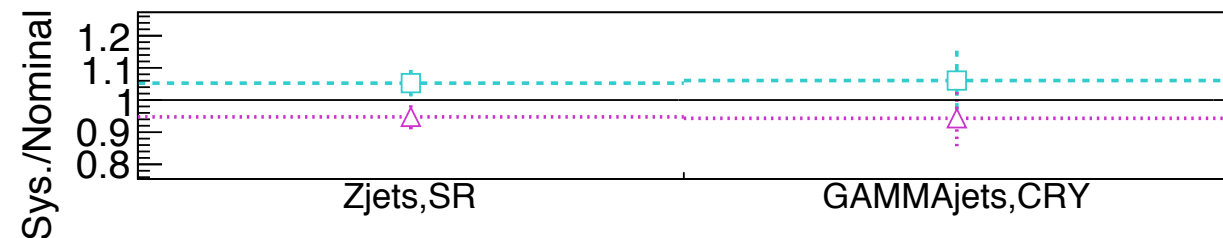
$N_{\text{jet}}$  の大きい  
 SRO1-4 で  $\mu$  が低くなる

$m_{\text{eff}}$  の大きい  
 SRD1-2, SRO1 で  
 $\mu$  が低くなる

# 系統誤差の種類

SR と CR の correlate している  
誤差は比でキャンセルしうる

$$N_{SR}^{x,pred} = N_{CRx}^{x,data} \times \frac{N_{SR}^{x,MC}}{N_{CRx}^{x,MC}}$$



---□--- Jet energy scale up  
---△--- Jet energy scale down

- Particle 毎の系統誤差
  - jet の energy scale の誤差
  - jet の  $W_{trk}$  の SF の誤差
- MCのbackground毎のmodelingの系統誤差
  - $Z/W+jets, t\bar{t}$  の MC生成時のパラメータを変えたときの変化分
    - Factorization factor, renormalization factor など



# 主な系統誤差

全SR にかけて total syst. は10–30%程度

| SRD2                       |                  |
|----------------------------|------------------|
| Background Prediction      | 28.3±5.4 [19.1%] |
| $W_{\text{trk}}$ PDF Gluon | ±3.3 [11.9%]     |
| $\mu(Z+\text{jets})$       | ±2.2 [8.0%]      |
| $\mu(W+\text{jets})$       | ±1.7 [6.1%]      |

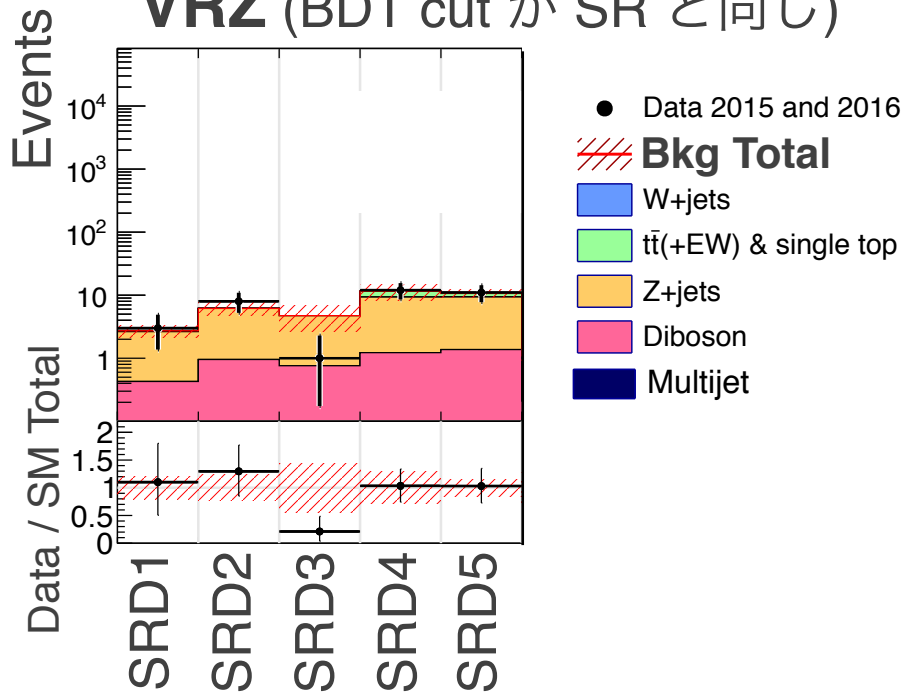
- $\mu(x)$  : CR で求めた補正係数  $\mu(x)$  に対する誤差。  
CRでの data の統計が原因 ← BDT cut を厳しく掛けているため
- $W_{\text{trk}}$  PDF Gluon : Gluon の  $W_{\text{trk}}$  に対する Parton Distribution Function の系統誤差

# Validation for Z+jets

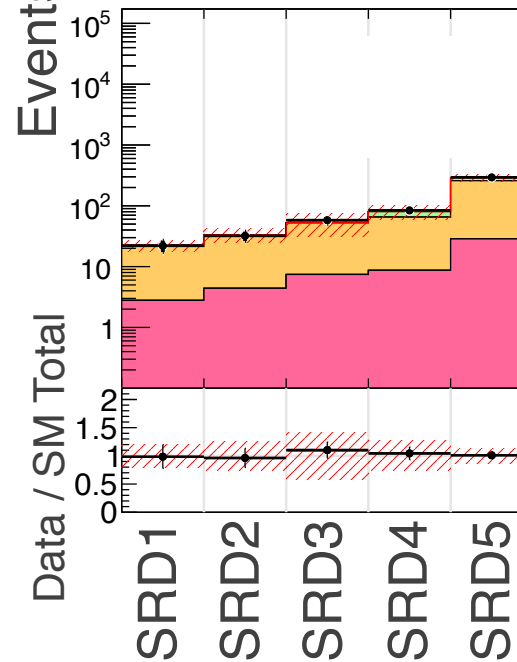
Z+jets の VR ( $Z \rightarrow ll$ )

CR で求めた  $\mu$  を用いて  
Background を VR でも  
推定

**VRZ** (BDT cut が SR と同じ)



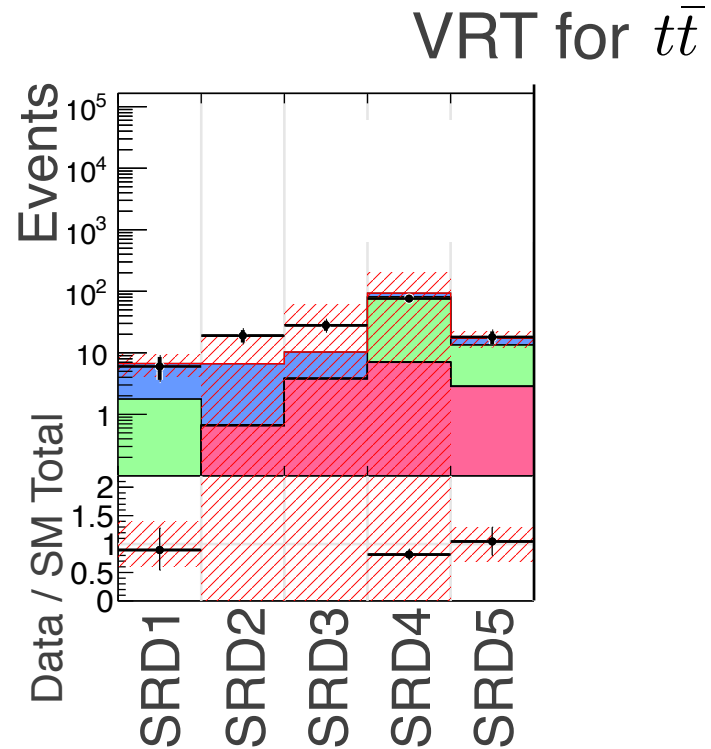
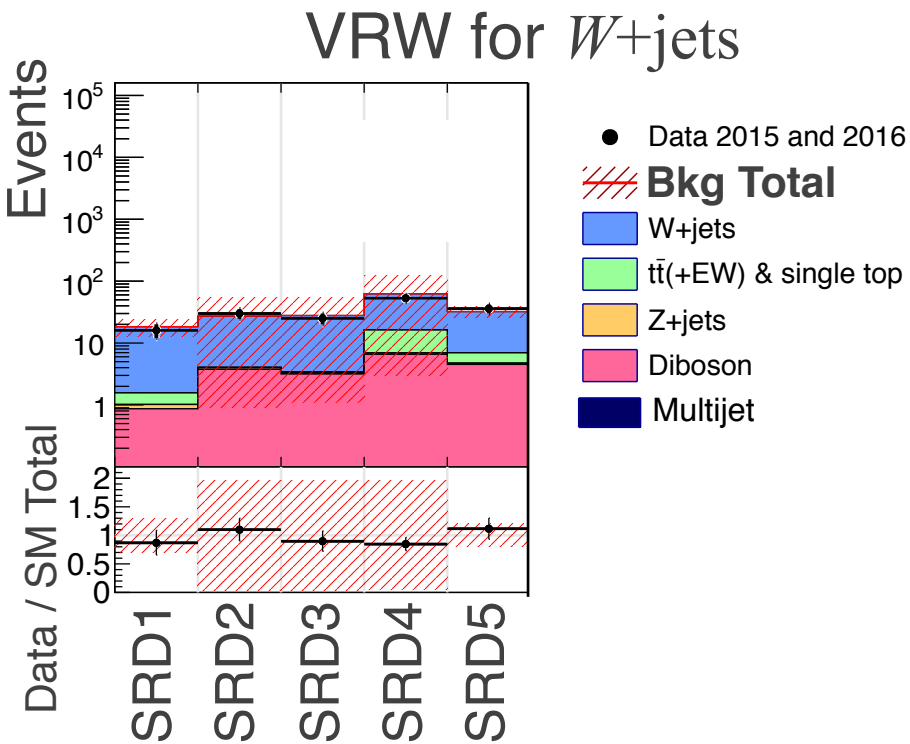
**BDT cut 緩めて**



VRZ だと統計が少なすぎるので、  
BDT 緩めた領域でも check → よく合っている

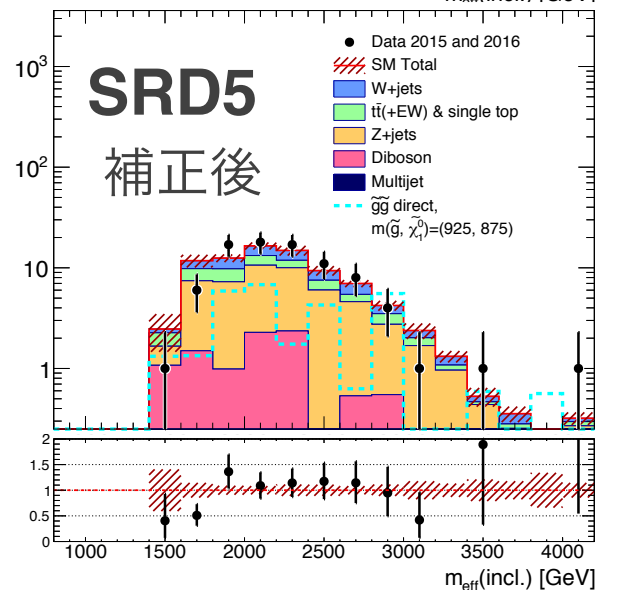
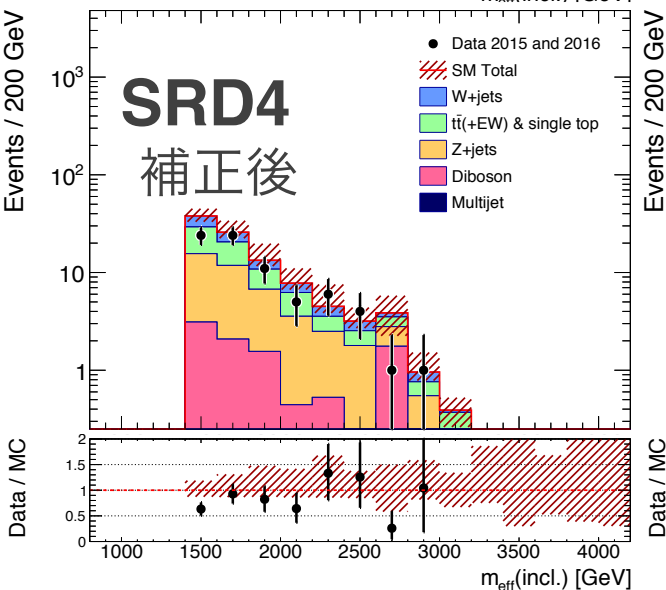
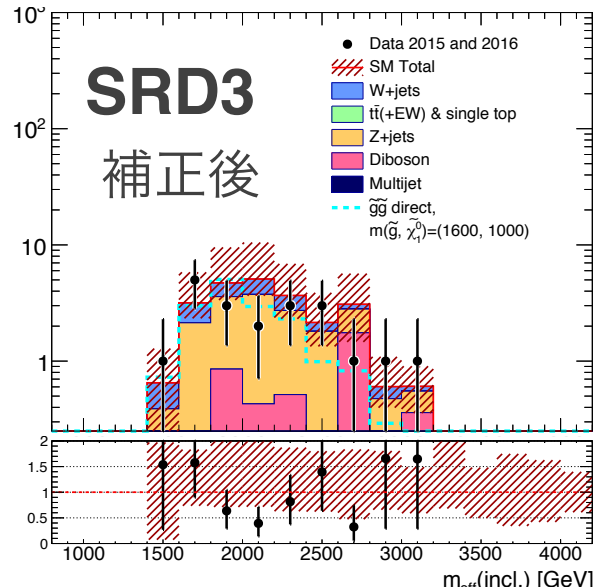
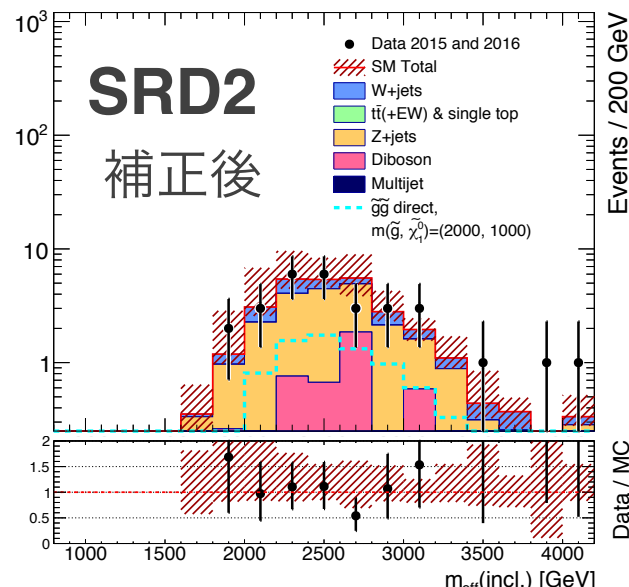
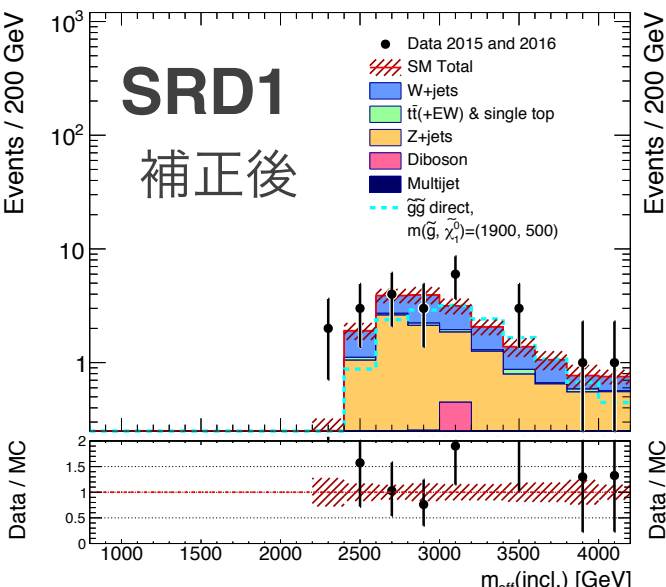
# Validation for $W+\text{jets} / t\bar{t}$

$W+\text{jets}/t\bar{t}$  の VR ( $l \rightarrow \text{jet}$ )

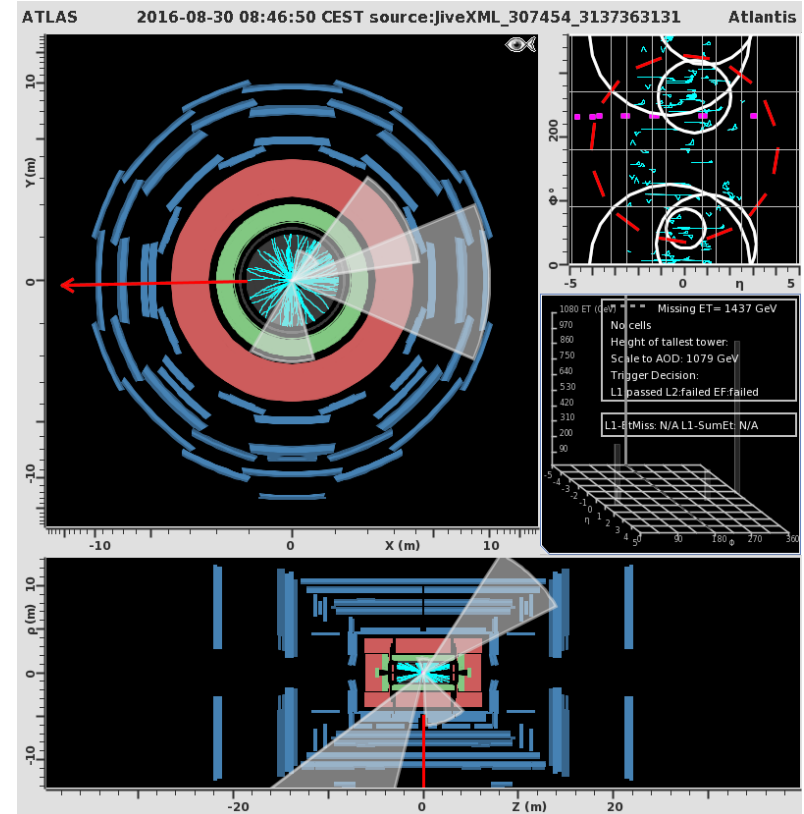
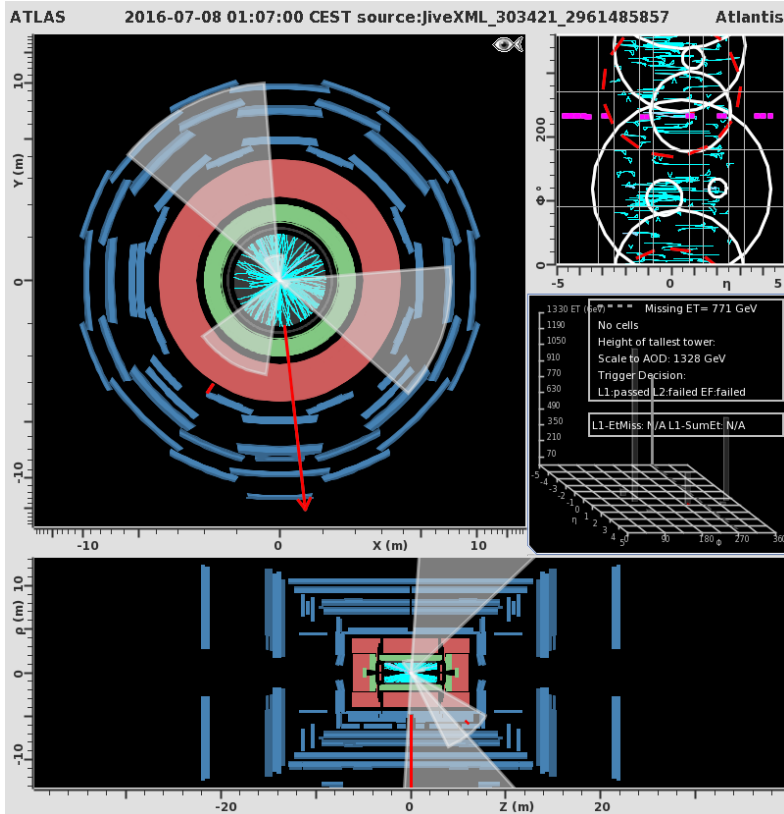


VRW / VRT でも誤差の範囲で合っている

# $m_{\text{eff}}$ 分布



# Event display for SRD2 $m_{\text{eff}} > 3800 \text{ GeV}$



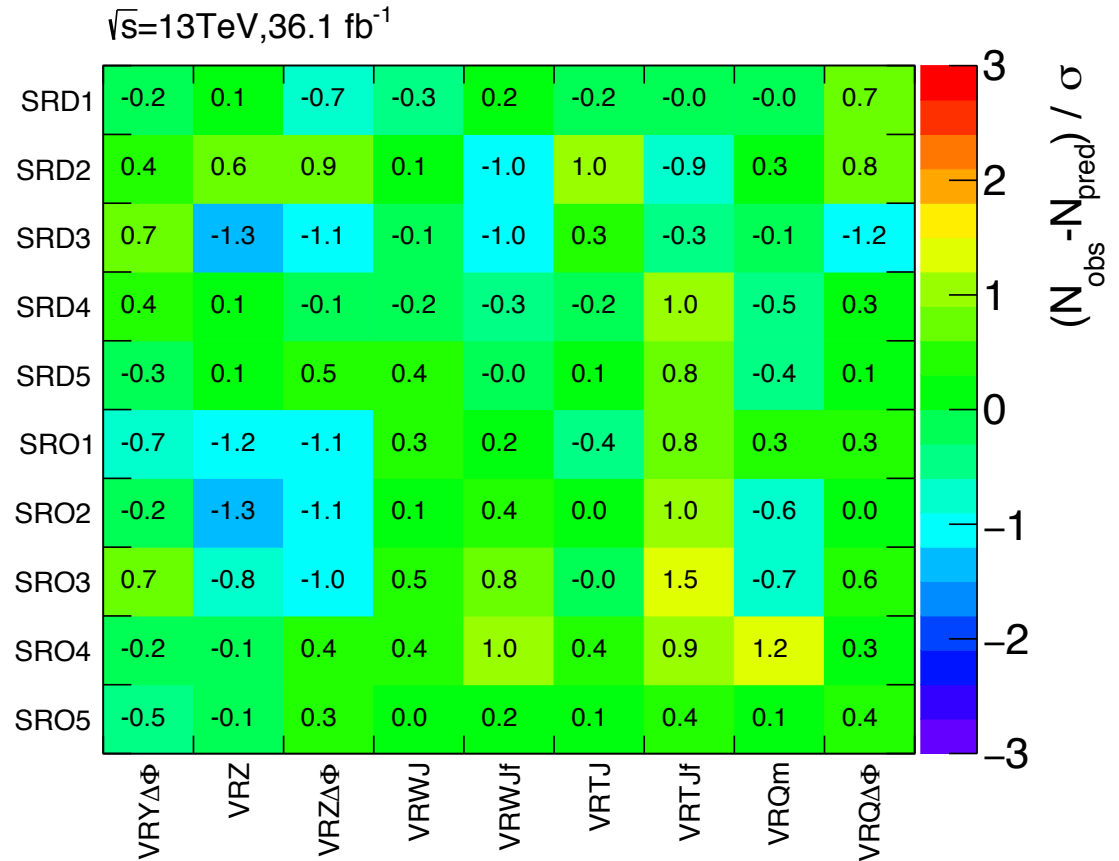
|   | $m_{\text{eff}}$<br>[GeV] | met<br>[GeV] | met/<br>$m_{\text{eff}}(4j)$ | $N_{\text{jet}}/$<br>$N_{\text{bjet}}/$<br>$N_{\text{taujet}}$ | Aplanarity | jetPt[GeV]           | jetWtrk                     |
|---|---------------------------|--------------|------------------------------|--|------------|----------------------|-----------------------------|
| 左 | 3811                      | 930          | 0.24                         | 4/0/0  | 0.094      | 1591/827/37<br>0/91  | 0.018/0.029/0.<br>014/0.131 |
| 右 | 4288                      | 1908         | 0.44                         | 4/0/0  | 0.042      | 1389/578/30<br>2/109 | 0.010/0.035/0.<br>032/0/052 |

# Validation summary

各SR × 各種VR

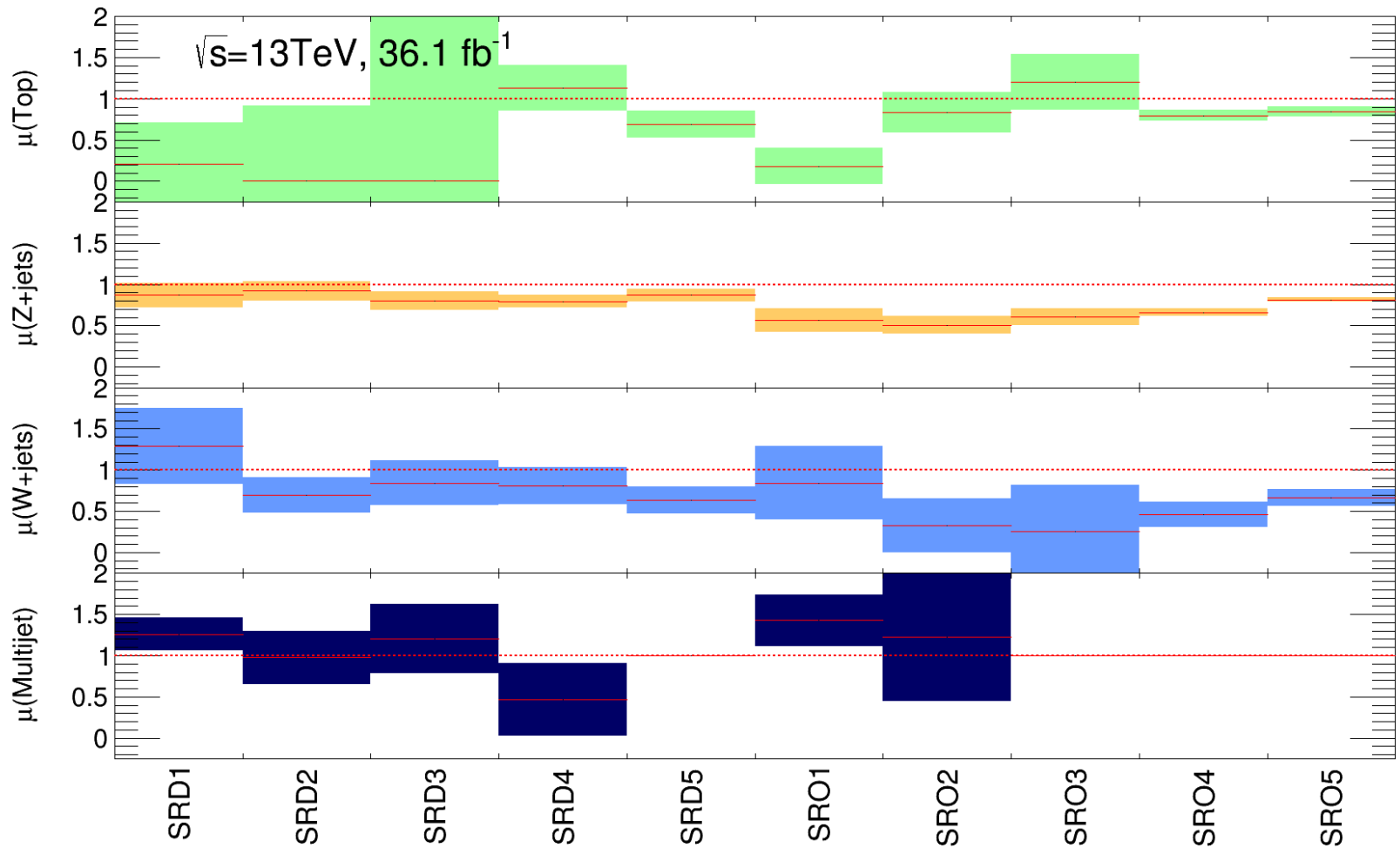
ズれていても  
最大 1.5 $\sigma$

Conservative な  
誤差が付けられている



$$z = (N_{\text{obs}} - N_{\text{pred}}) / \sqrt{\sigma_{\text{obs}}^2 + \sigma_{\text{pred}}^2}$$

# 補正係数 $\mu$ summary



# 120fb-1 での期待発見感度 $3\sigma$

