

# LHC-ATLAS 実験における ウィーノの輻射崩壊を用いた

## Bino-Wino Co-Annihilation シナリオの探索 ～背景事象見積り、系統誤差を含めた最終感度評価～

長坂錬<sup>A</sup>

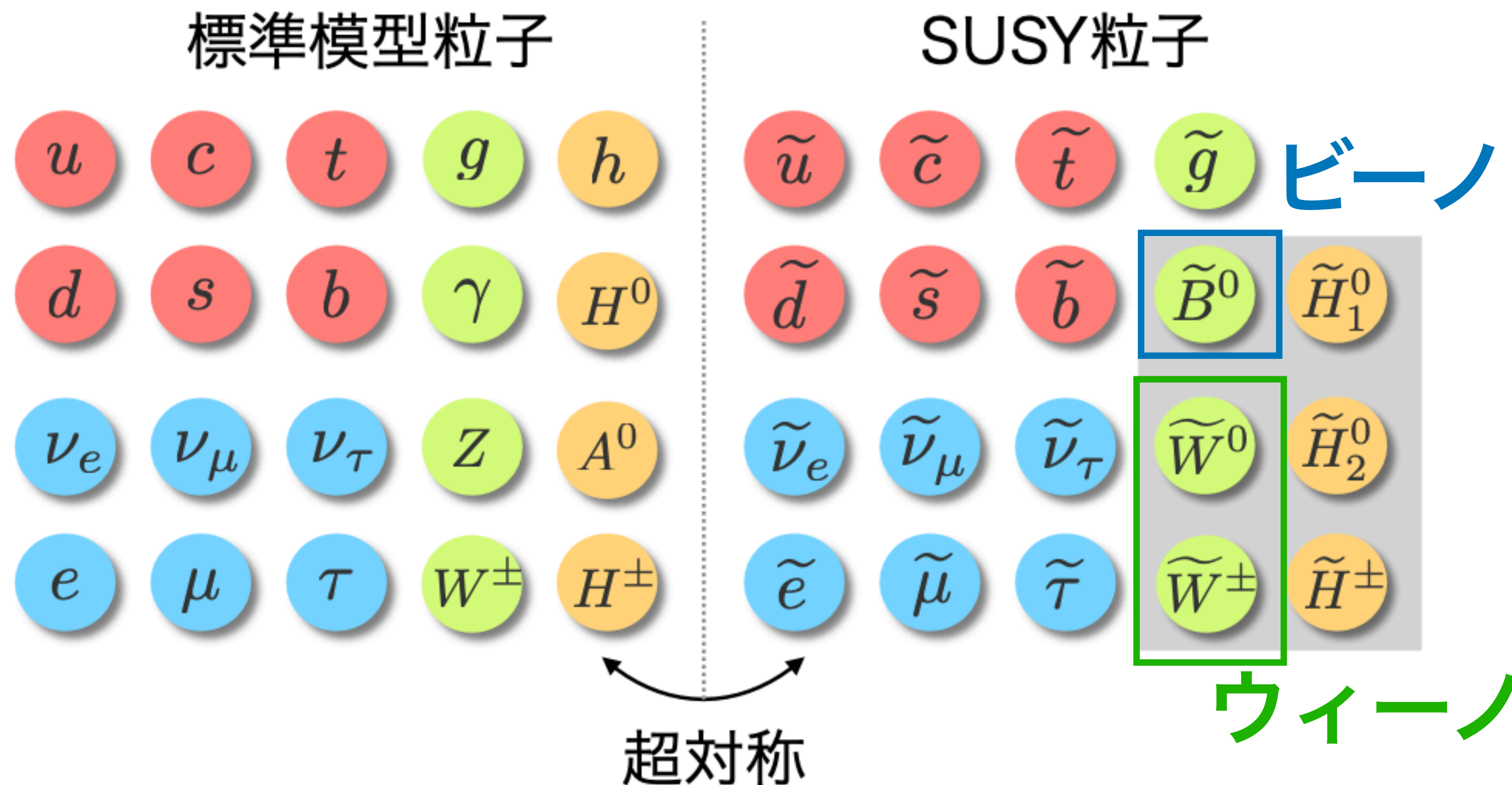
石野雅也<sup>B</sup>, 奥村恭幸<sup>B</sup>, 陳詩遠<sup>C</sup>

所属：東大理<sup>A</sup>, 東大素セ<sup>B</sup>, 京大理<sup>C</sup>

講演番号：16pEK108-3

# 超対称性理論

- ボゾンとフェルミオンの間の対称性(超対称性)を導入
  - 標準模型粒子の対となる超対称性粒子(SUSY粒子)を予言
- ✓暗黒物質候補の存在, 階層性問題の解決, 力の大統一など, 多くの標準模型の問題を解決し得る。



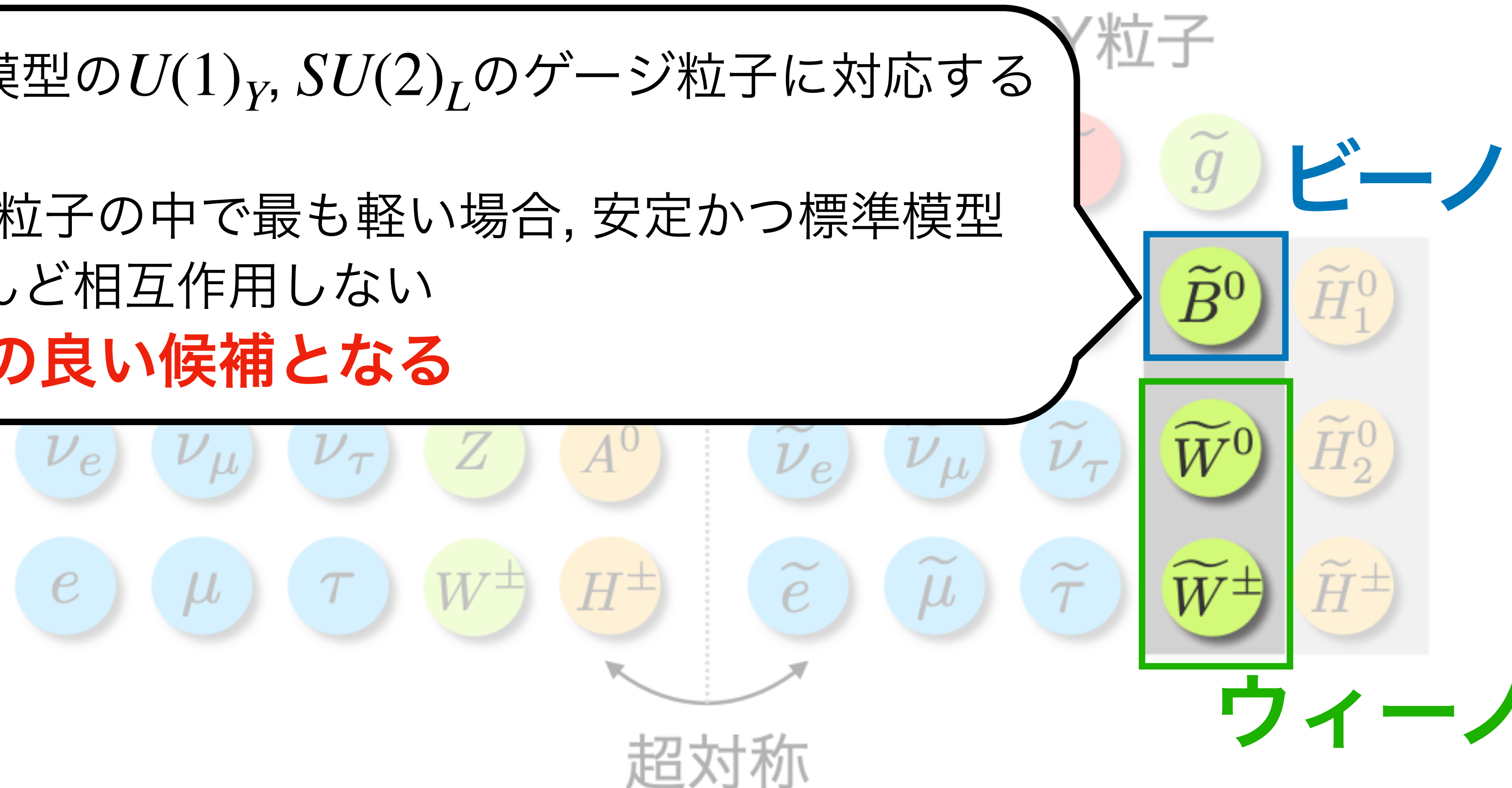
# 超対称性理論

- ボゾンとフェルミオンの間の対称性(超対称性)を導入
- 標準模型粒子の対となる超対称性粒子(SUSY粒子)を预言

✓暗黒物質候補の存在, 階層性問題の解決, 力の大統一など, 多くの標準模型の問題を解決し得る。

- それぞれ標準模型の $U(1)_Y$ ,  $SU(2)_L$ のゲージ粒子に対応するSUSY粒子
- ビーノがSUSY粒子の中で最も軽い場合, 安定かつ標準模型の粒子とほとんど相互作用しない

✓ 暗黒物質の良い候補となる

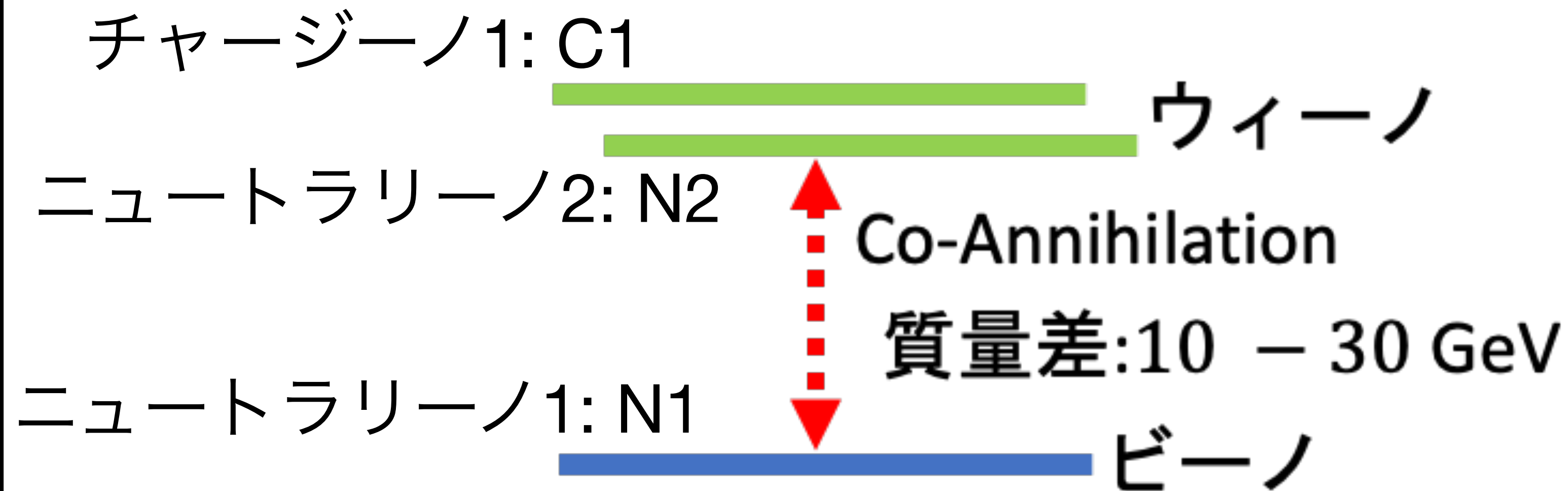




# 超対称性理論

- ボゾンとフェルミオンの間の対称性(超対称性)を導入
- 標準模型粒子の対となる超対称性粒子(SUSY粒子)を预言

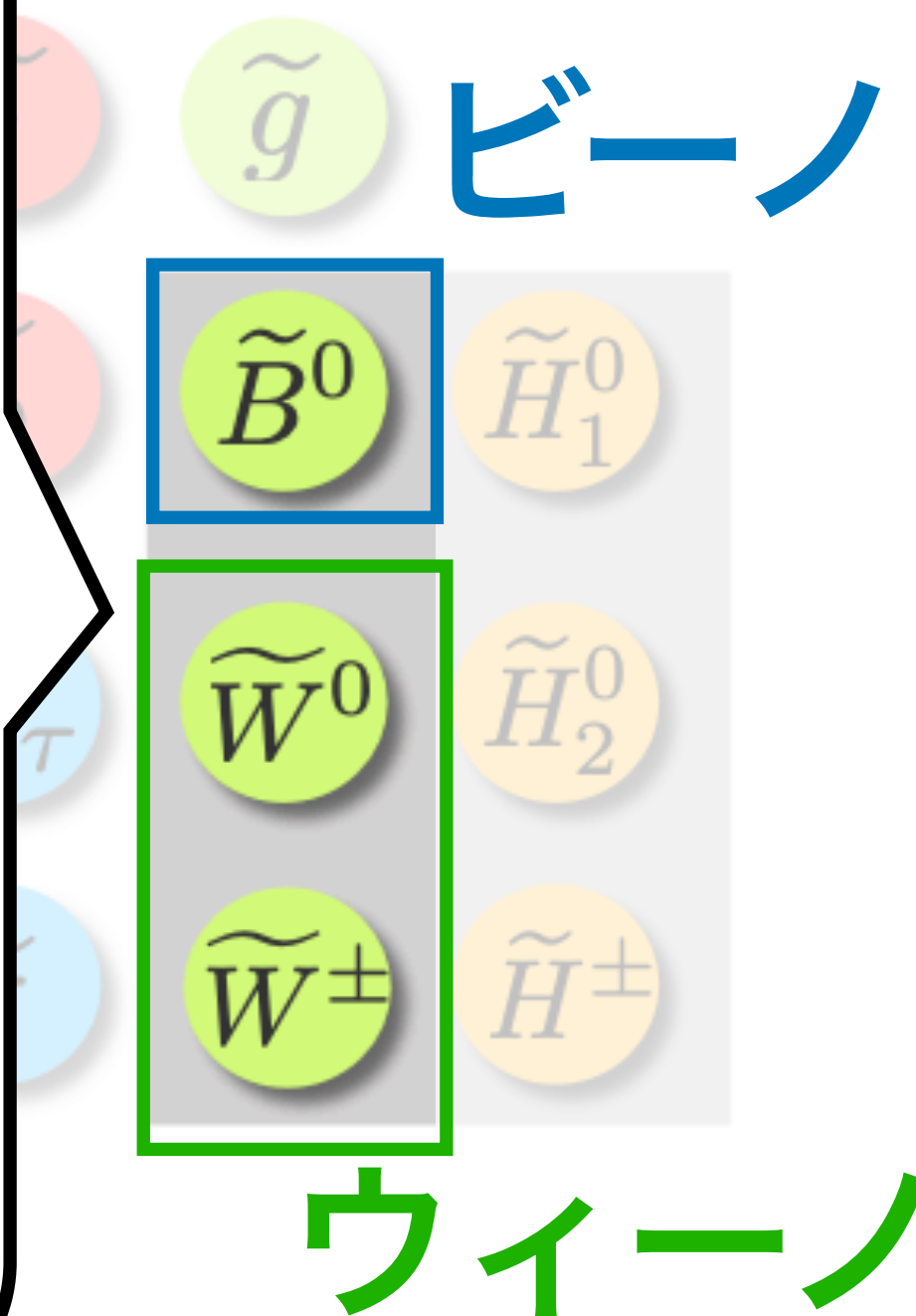
- 特にビーノとウィーノの質量差が10 - 30 GeVのシナリオ (Bino-Wino Co-Annihilation: BWCAシナリオ)は、**暗黒物質の残存量を説明することができるため、現象論における有力なベンチマークである。**



N1, N2, C1は質量固有状態を表す

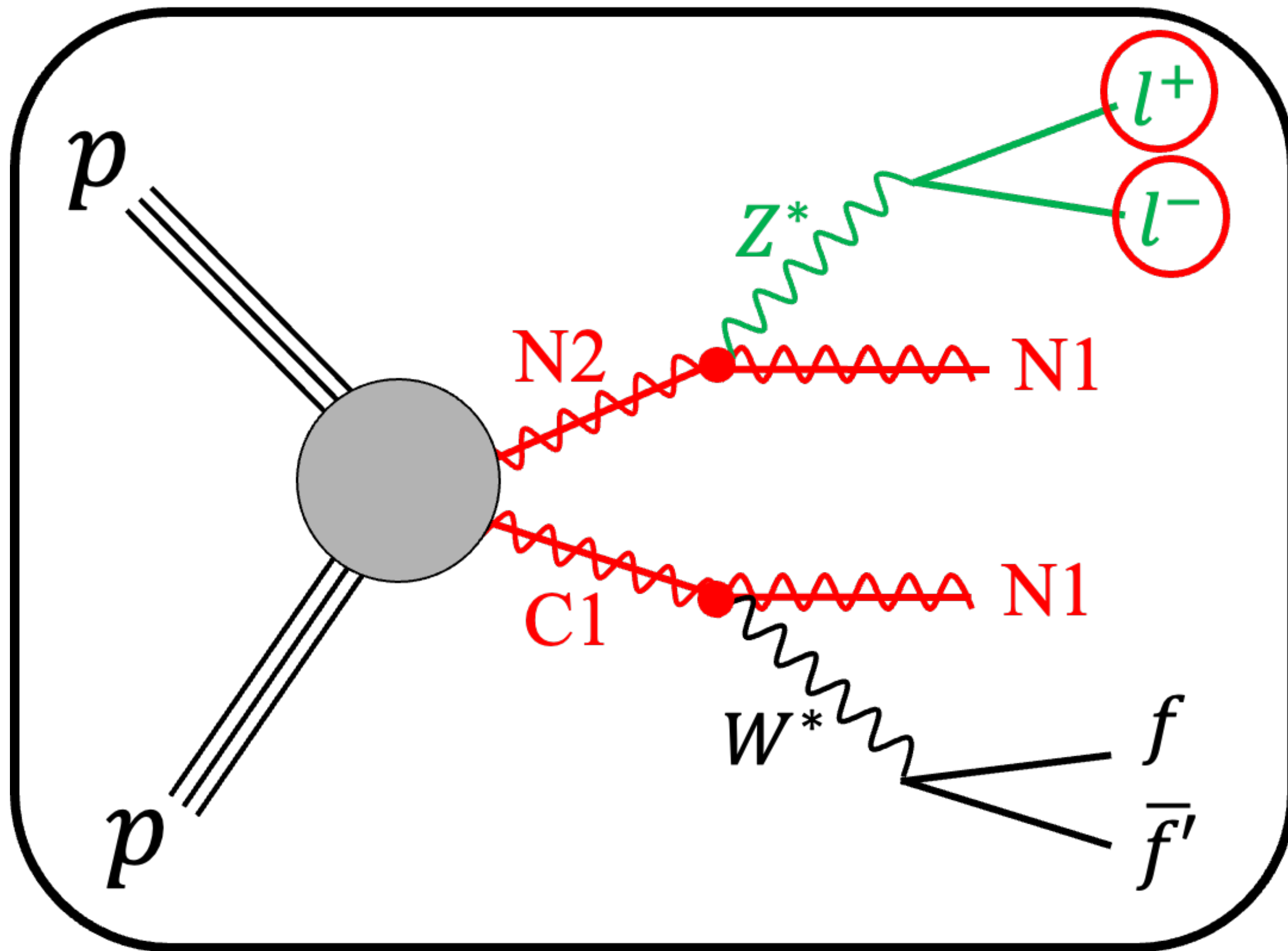
など、多くの標準模型の問題を

粒子



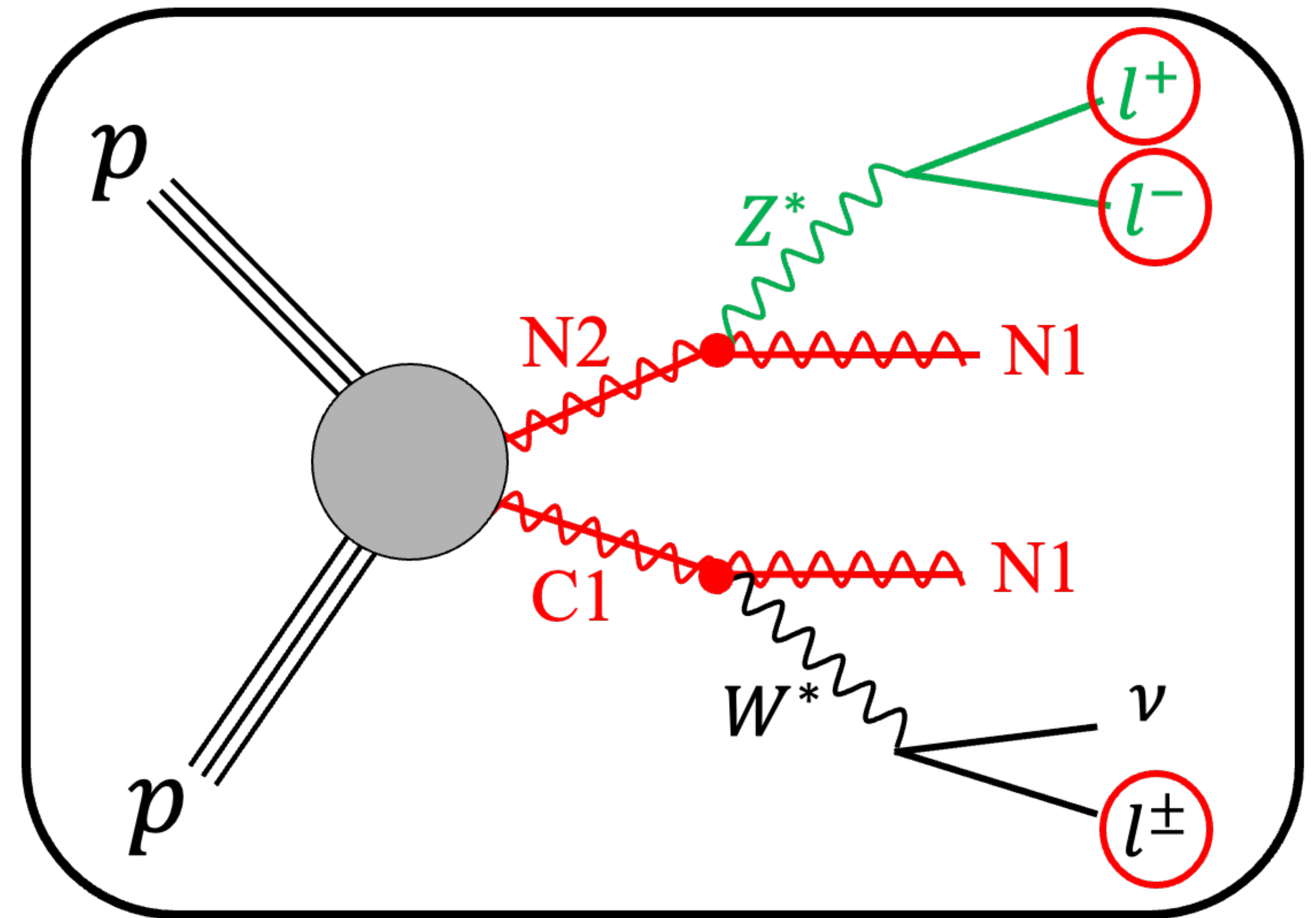
# BWCAシナリオに対する先行研究

- 比較的質量差が小さい (10 - 30 GeV) 信号に対しては,  $Z$  を経由したレプトンへの崩壊を仮定し, 2レプトン解析と3レプトン解析が行われていた



2レプトン解析における信号事象

参照: [arXiv:1911.12606](https://arxiv.org/abs/1911.12606)

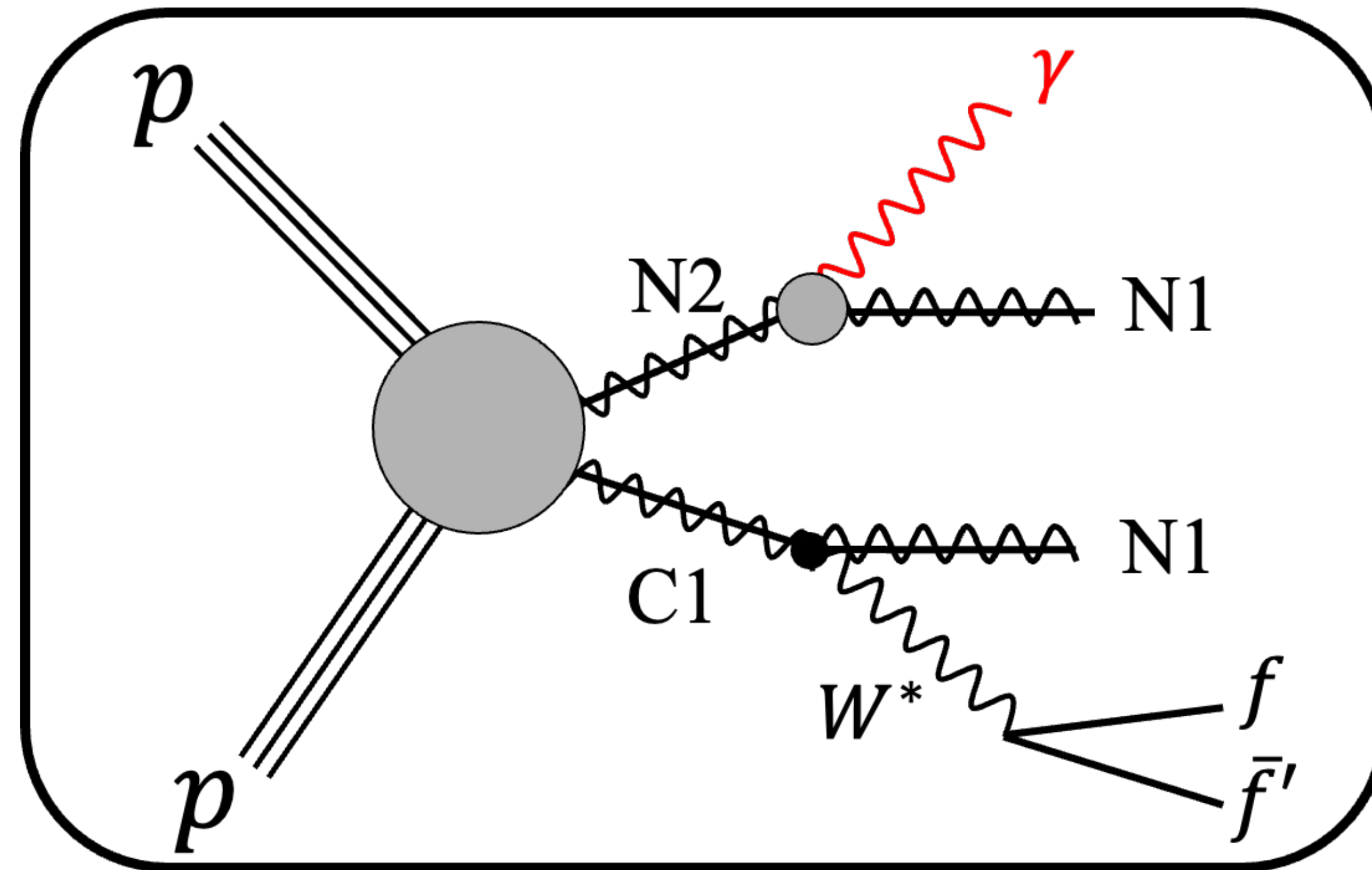


3レプトン解析における信号事象

参照: [arXiv:2106.01676](https://arxiv.org/abs/2106.01676)

# BWCAシナリオと輻射崩壊

- しかし, 高次補正を取り入れた近年の理論研究により, BWCAシナリオでは,  
**N2から光子への十分な崩壊分岐比を持つ**ことが明らかになった。参照: [arXiv:2303.01523](#)
  - スフェルミオンやC2の質量にも依存するが典型的には, 10 - 40 %程度の崩壊分岐比
  - Z への崩壊は抑制され, その結果, 先行研究の探索感度が非常に低いことも分かっている (N2からZを経由したレプトンへの崩壊分岐比は数%) 参照: [arXiv:2402.01392](#)



輻射崩壊を伴う信号事象 (本研究)



# BWCAシナリオと輻射崩壊

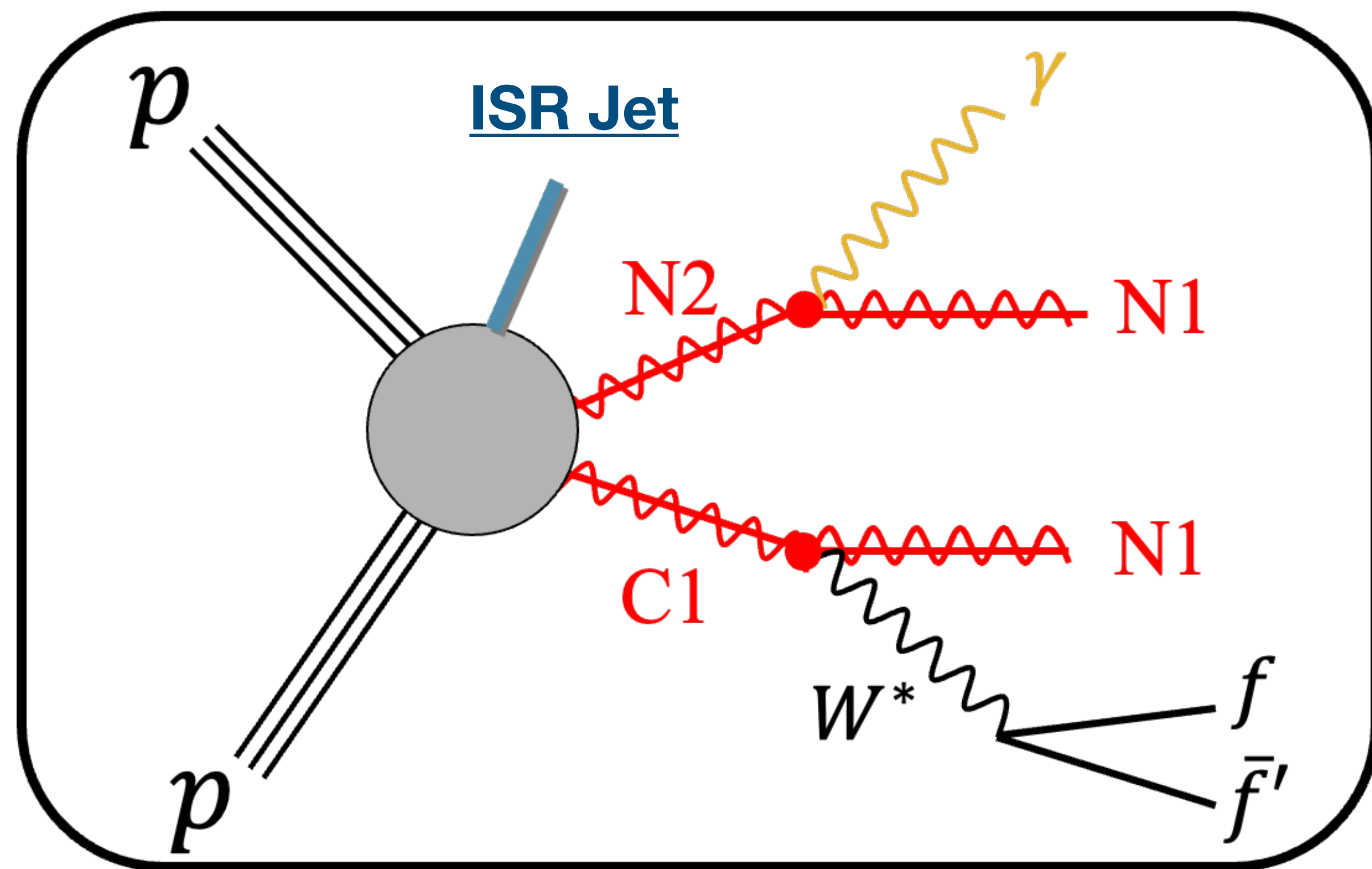
- しかし, 高次補正を取り入れた近年の理論研究により, BWCAシナリオでは,  
**N2から光子への十分な崩壊分岐比を持つ**ことが明らかになった。参照: [arXiv:2303.01523](https://arxiv.org/abs/2303.01523)
  - スフェルミオンやC2の質量にも依存するが典型的には, 10 - 40 %程度の崩壊分岐比

## 本研究のモチベーション

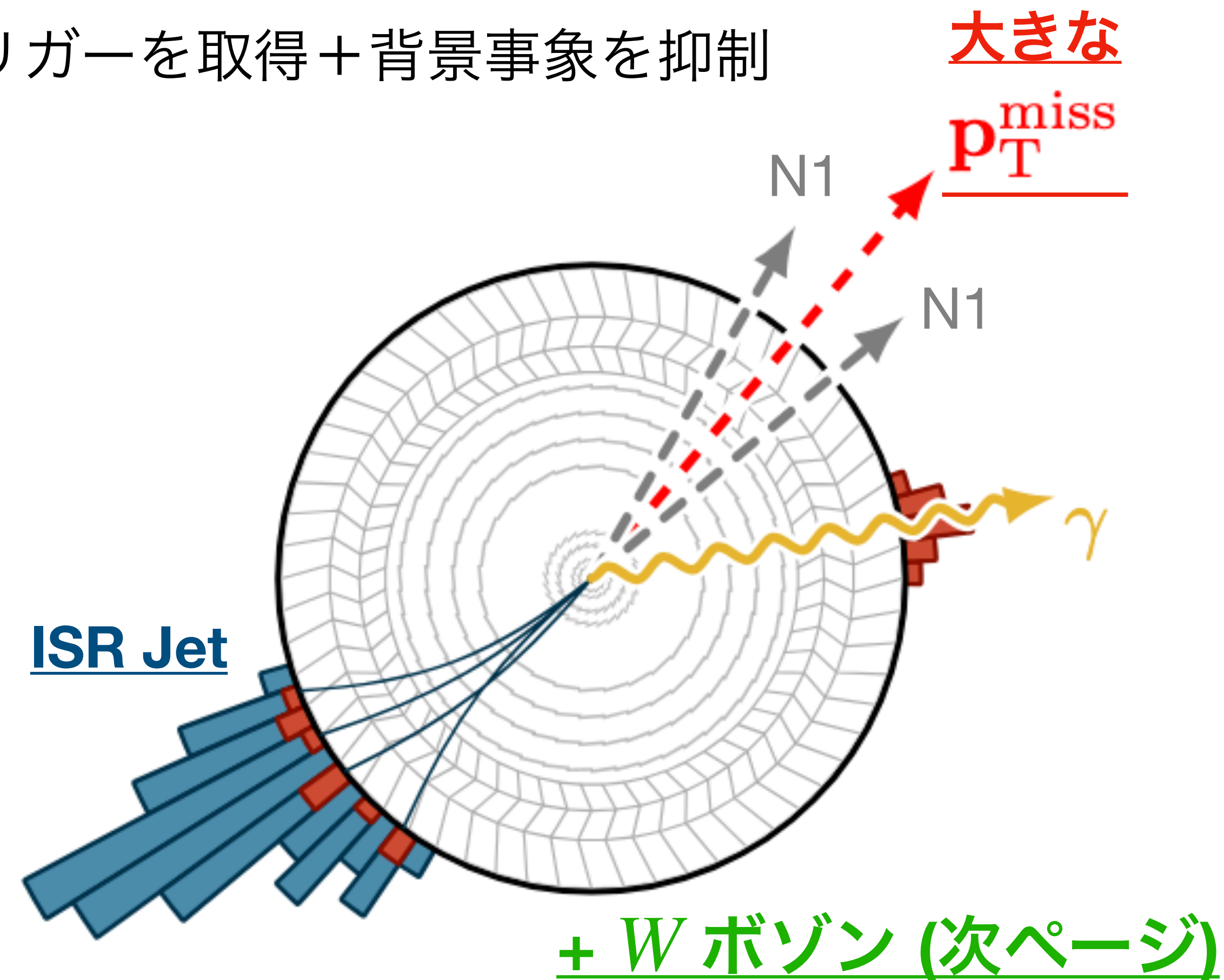
- 光子への崩壊に着目した解析を行うことで, 現象論的に好まれ, かつ先行研究が感度の低い領域を探索することが可能になる
  - 100 GeV以下の比較的低運動量な光子を用いたSUSY粒子探索は, 本研究がLHC-ATLAS実験で初めての試みである
- **本講演では, 最適化された信号領域における, 背景事象見積りや系統誤差評価を含めた探索感度予想を発表する。**

# 解析戦略 ①

- 高い横方向運動量( $p_T$ )の Initial State Radiation (ISR) を持ち, N2とC1のペアの系がブーストした事象に着目
  - 2つのN1由来の 大きな, 損失横運動量  $p_T^{\text{miss}}$  でトリガーを取得 + 背景事象を抑制



信号事象のファインマンダイアグラム



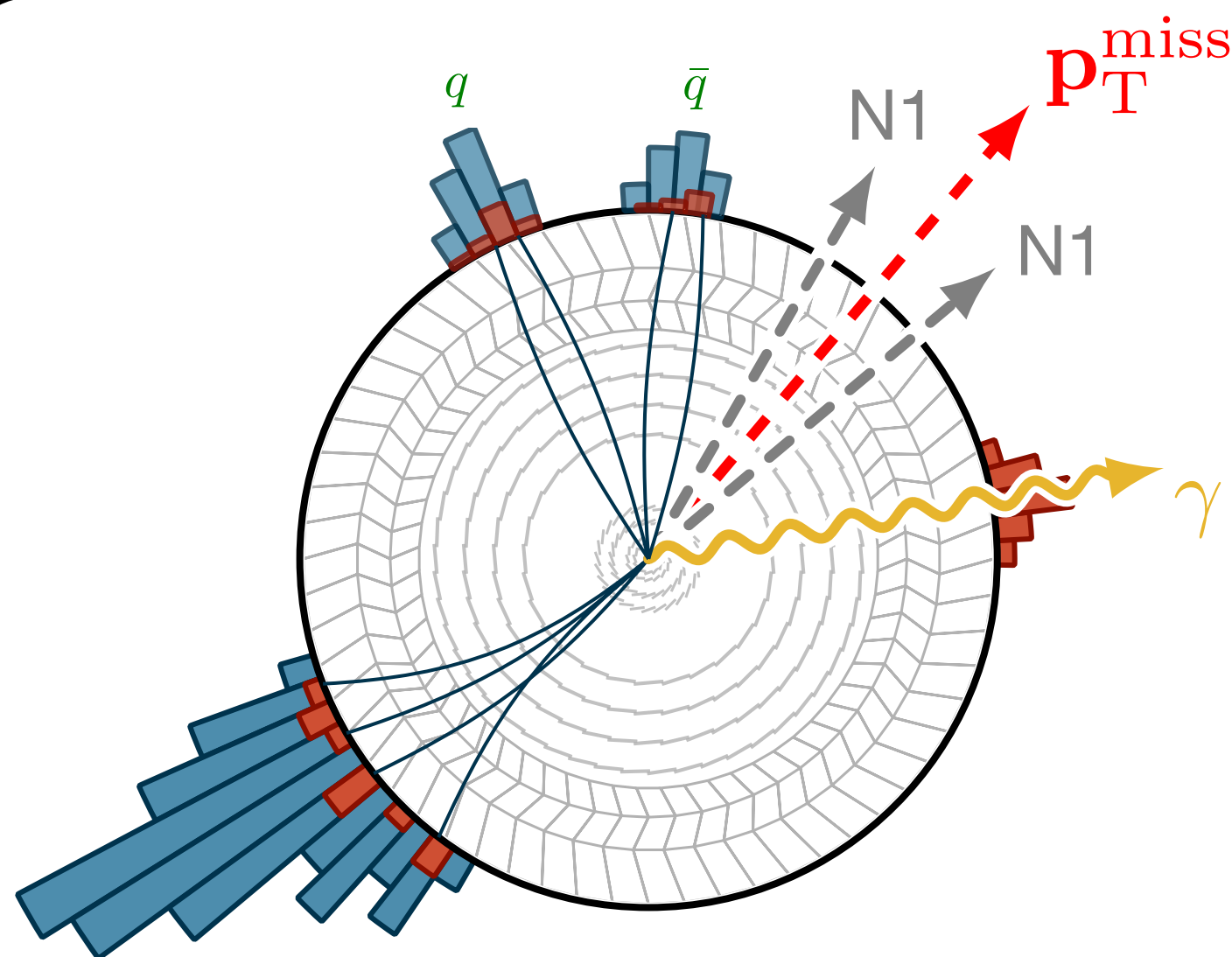
信号事象の検出器応答の模式図



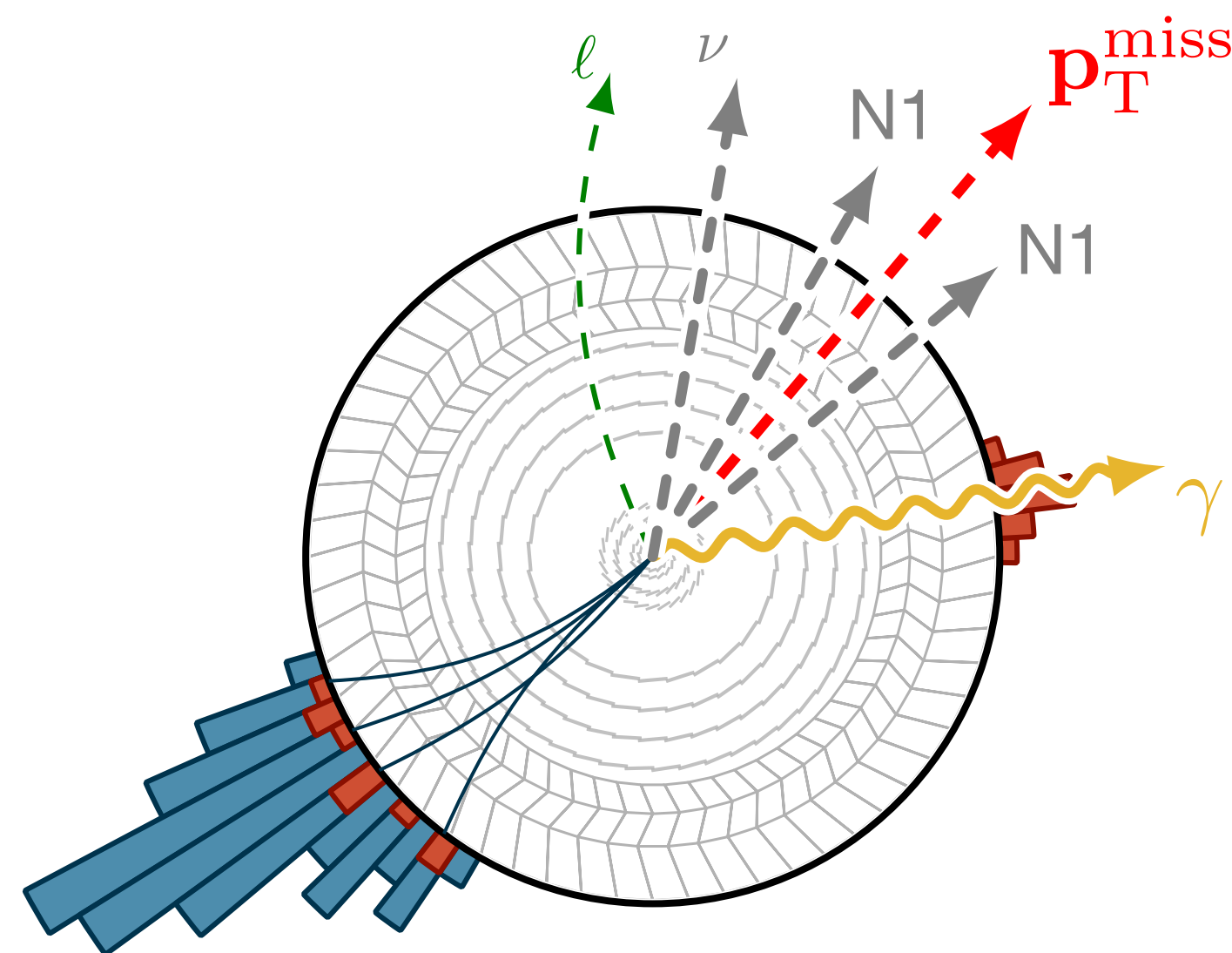
## 解析戦略 ②

- さらに, 終状態に現れるレプトン ( $e, \mu$ ) の数で信号事象を分類
  - 0 レプトン信号領域:  $W$  ボゾンがハドロニック崩壊もしくは, 質量差が小さくレプトンを再構成できない場合に感度を持つ
  - 1 レプトン信号領域:  $W$  ボゾンがレプトニック崩壊する場合に感度を持つ

✓本講演では質量差10 - 30 GeVへの感度が大きい, 0 レプトン信号領域について詳しく説明する

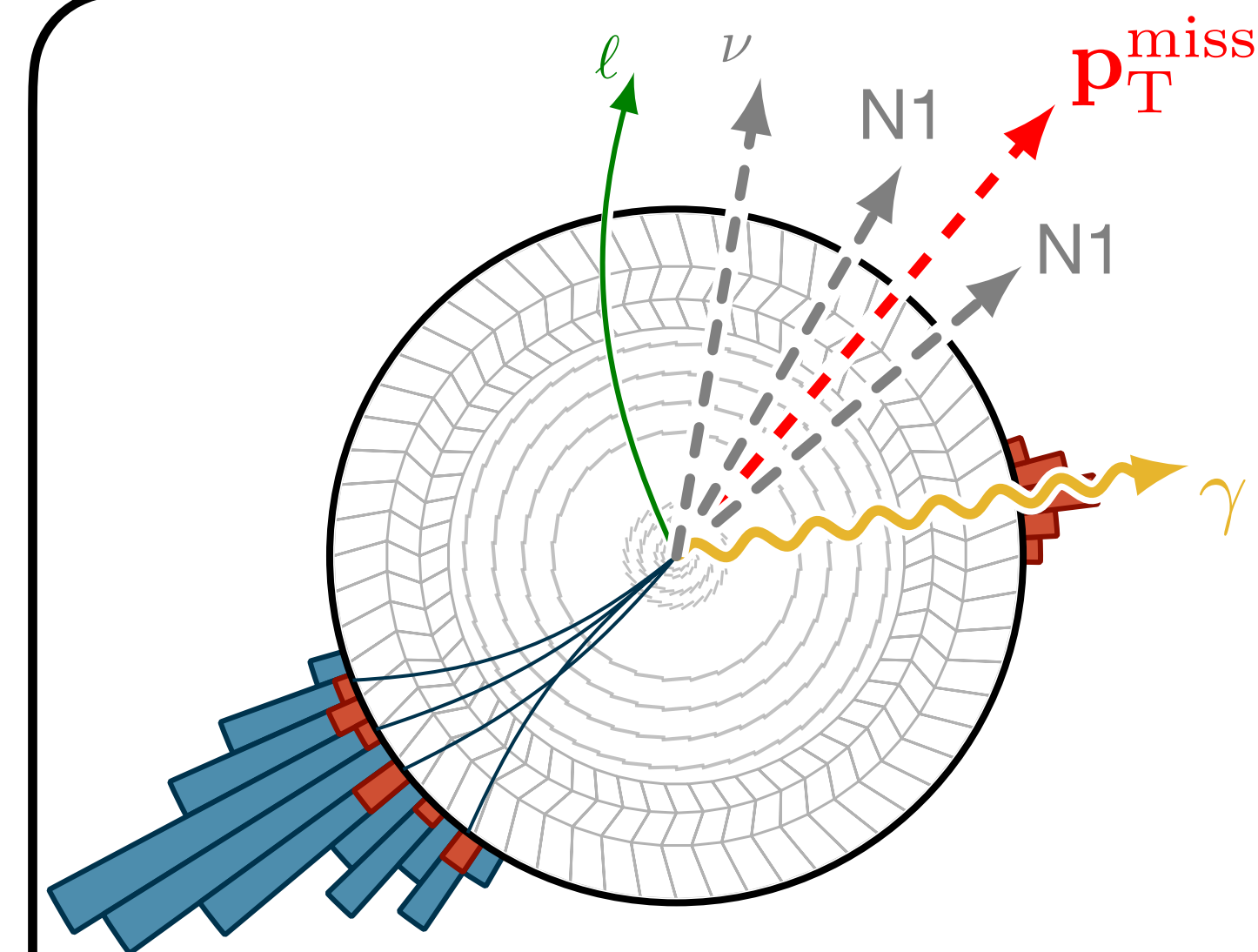


$W$  ボゾンがハドロニック崩壊



$W$  ボゾンがレプトニック崩壊するが, レプトンが再構成されない

0 レプトン信号領域



$W$  ボゾンがレプトニック崩壊

1 レプトン信号領域

# 解析戦略 ③：0レプトン信号領域の場合

- 光子と  $p_T^{\text{miss}}$  で再構成した横運動量  $m_T(\gamma)$  が特徴的な分布を持ち, 信号・背景分離に役立つ

- 信号事象: 質量差に依存して分布する**

- 質量差が大きいと,  $m_T(\gamma)$  の値も大きい

- $m_T(\gamma) =$

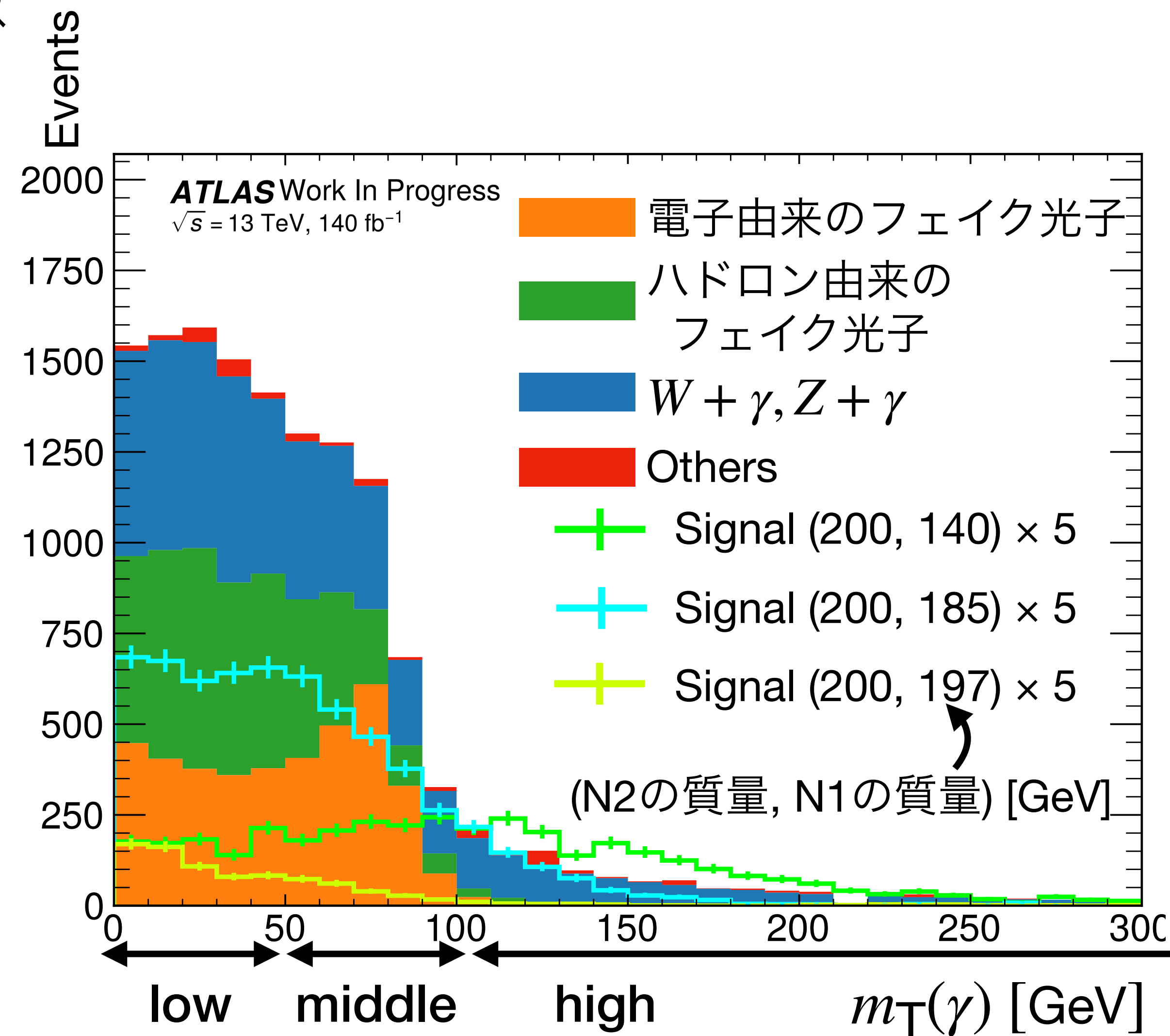
$$\sqrt{2 \times p_T^\gamma \times p_T^{\text{miss}} \times (1 - \cos(\phi^\gamma - \phi^{\text{miss}}))}$$

- 背景事象:**

- 電子由来のフェイク光子及び, ハドロン由来のフェイク光子は,  $m_T(\gamma)$  も小さい値を取る

✓  $m_T(\gamma)$  の値に従って, 信号領域を low, middle, high に分割

✓ BWCAシナリオ(質量差10 - 30 GeV)に対しては, 0L  $m_T$  low, middle信号領域が重要



# 解析戦略 ③：0レプトン信号領域の場合

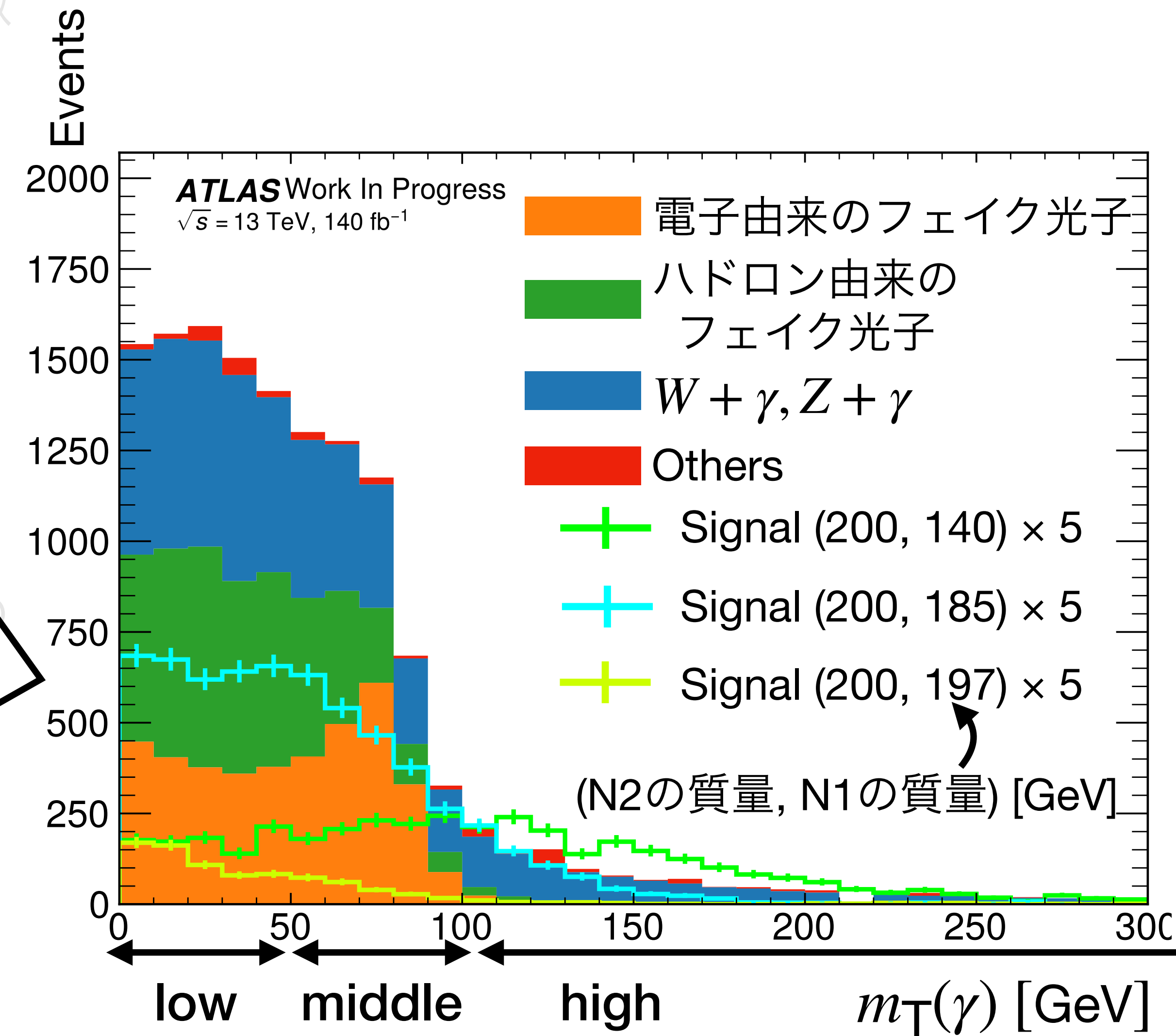
- 光子と $p_T^{\text{miss}}$ で再構成した横運動量 $m_T(\gamma)$ が特徴的な分布を持ち, 信号・背景分離に役立つ
- 信号事象: 質量差に依存して分布する
  - 質量差が大きいと,  $m_T(\gamma)$  の値も大きい

✓  $W + \gamma, Z + \gamma$ , 電子由来のフェイク光子, ハドロン由来のフェイク光子背景事象の正確な見積りが特に重要

- 本講演では, 特に電子由来のフェイク光子背景事象の見積りについて詳しく述べる

✓  $m_T(\gamma)$  の値に従って, 信号領域を low, middle, high に分割

✓ BWCAシナリオ(質量差10 - 30 GeV)に対しては, 0L  $m_T$  low, middle信号領域が重要

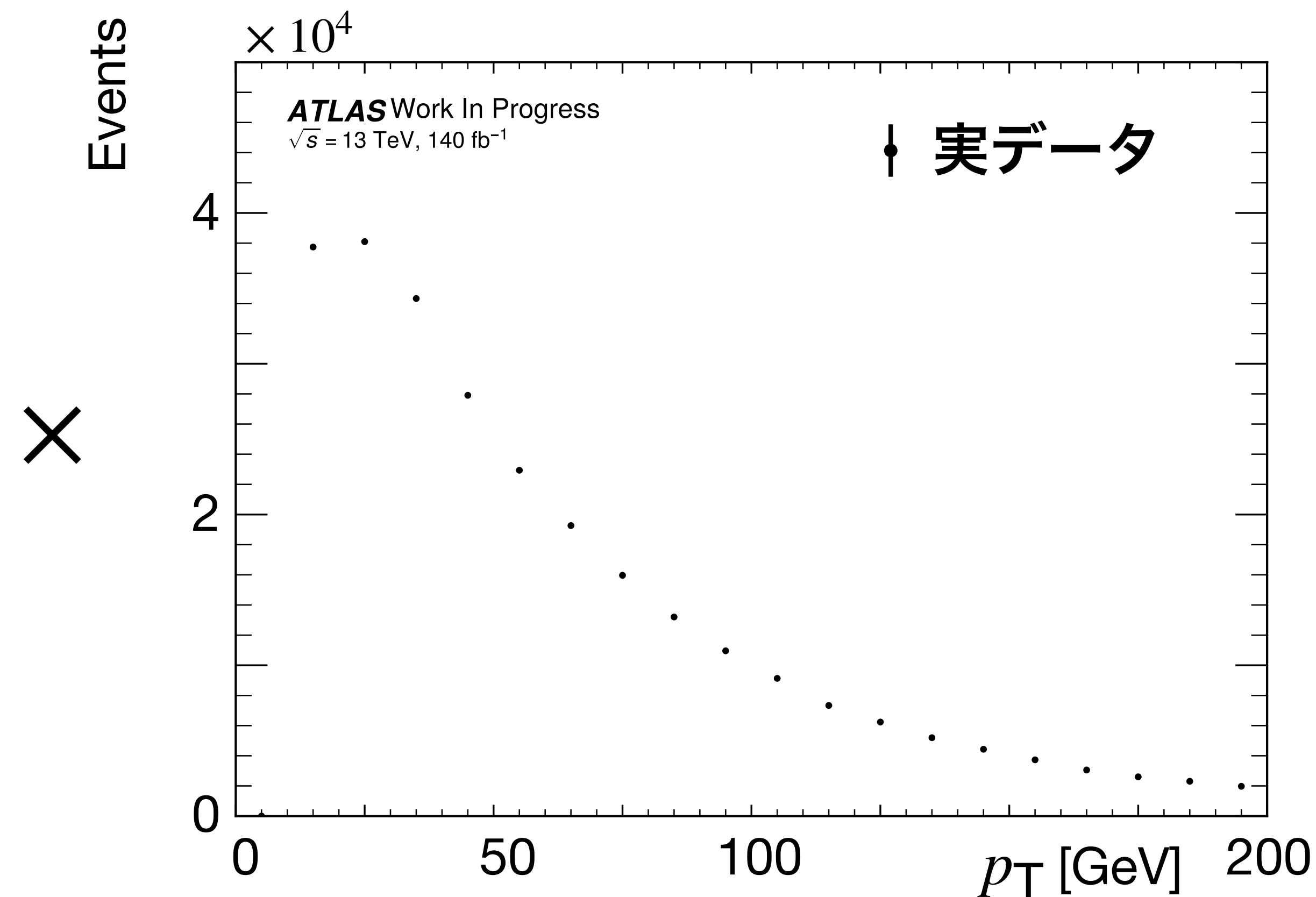
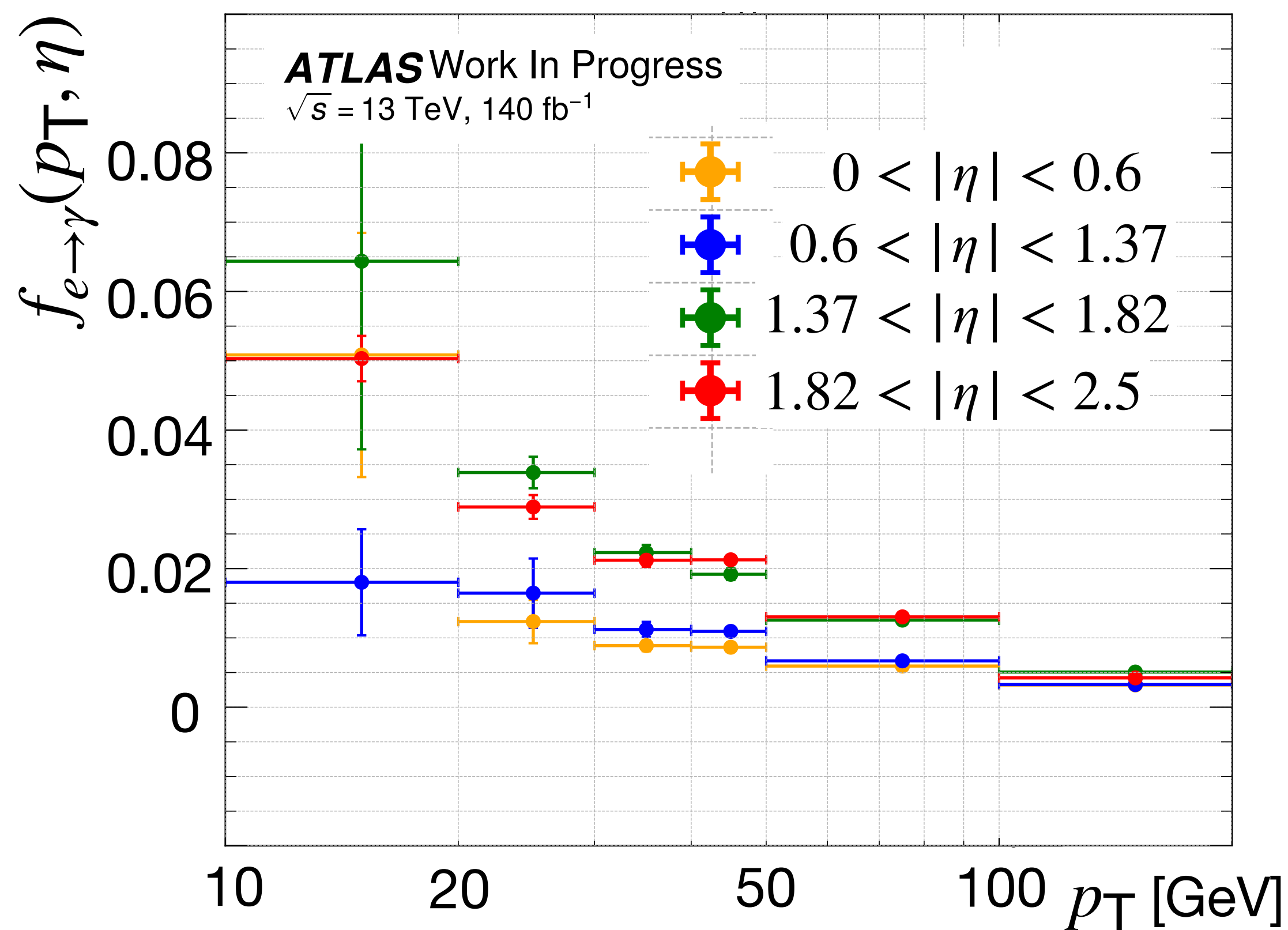




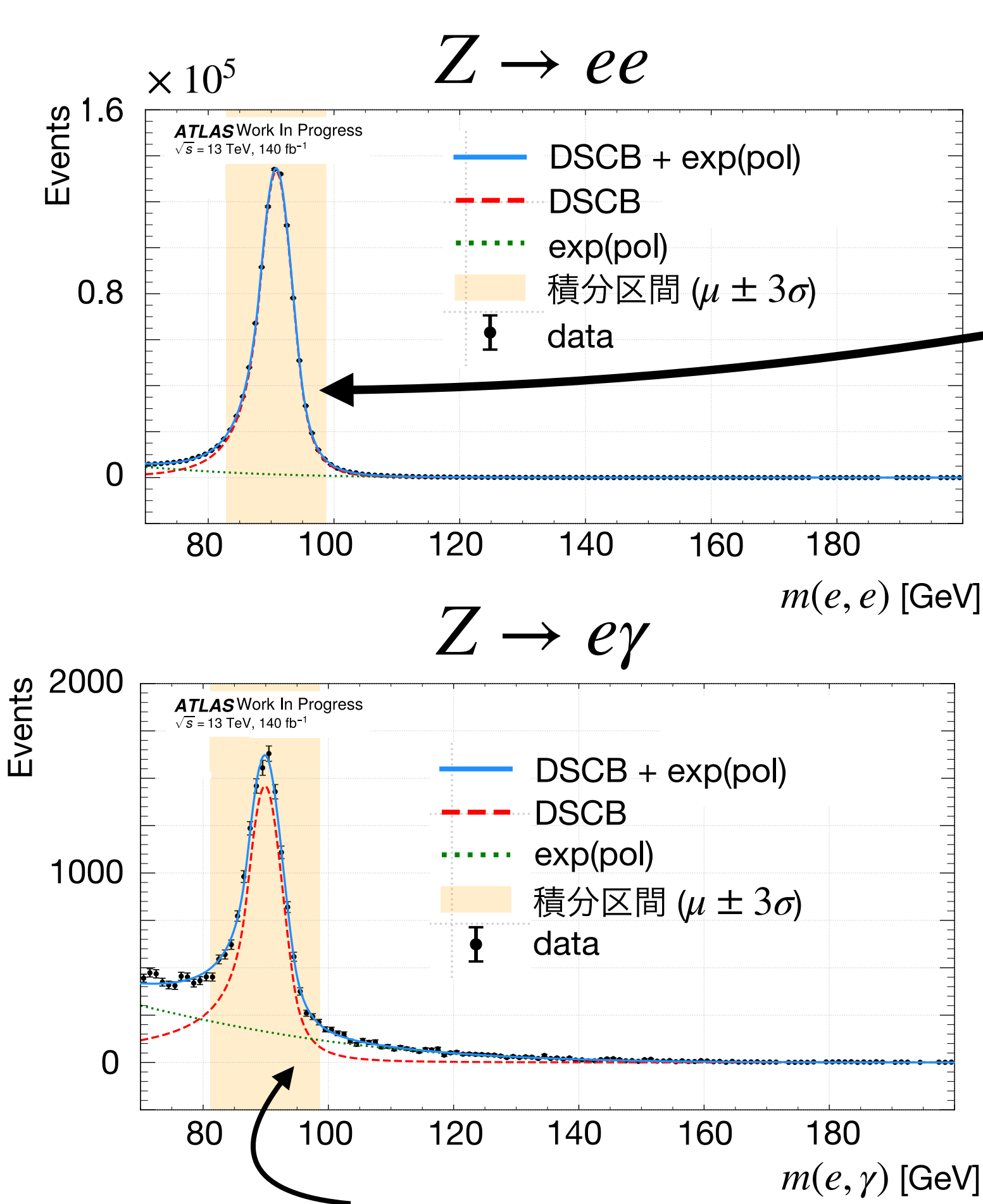
# 電子由来のフェイク光子背景事象: 見積り手法の概要

- 実データで**電子→光子のフェイク確率**を求め, 信号領域の光子の条件を, 電子に変えた領域における実データの事象数に適用し, 見積もる。

$$N_{e \rightarrow \gamma}^{SR} = \sum_{p_T, \eta} \boxed{f_{e \rightarrow \gamma}(p_T, \eta)} \times N_{total}^{SR(\gamma \rightarrow e)}(p_T, \eta)$$



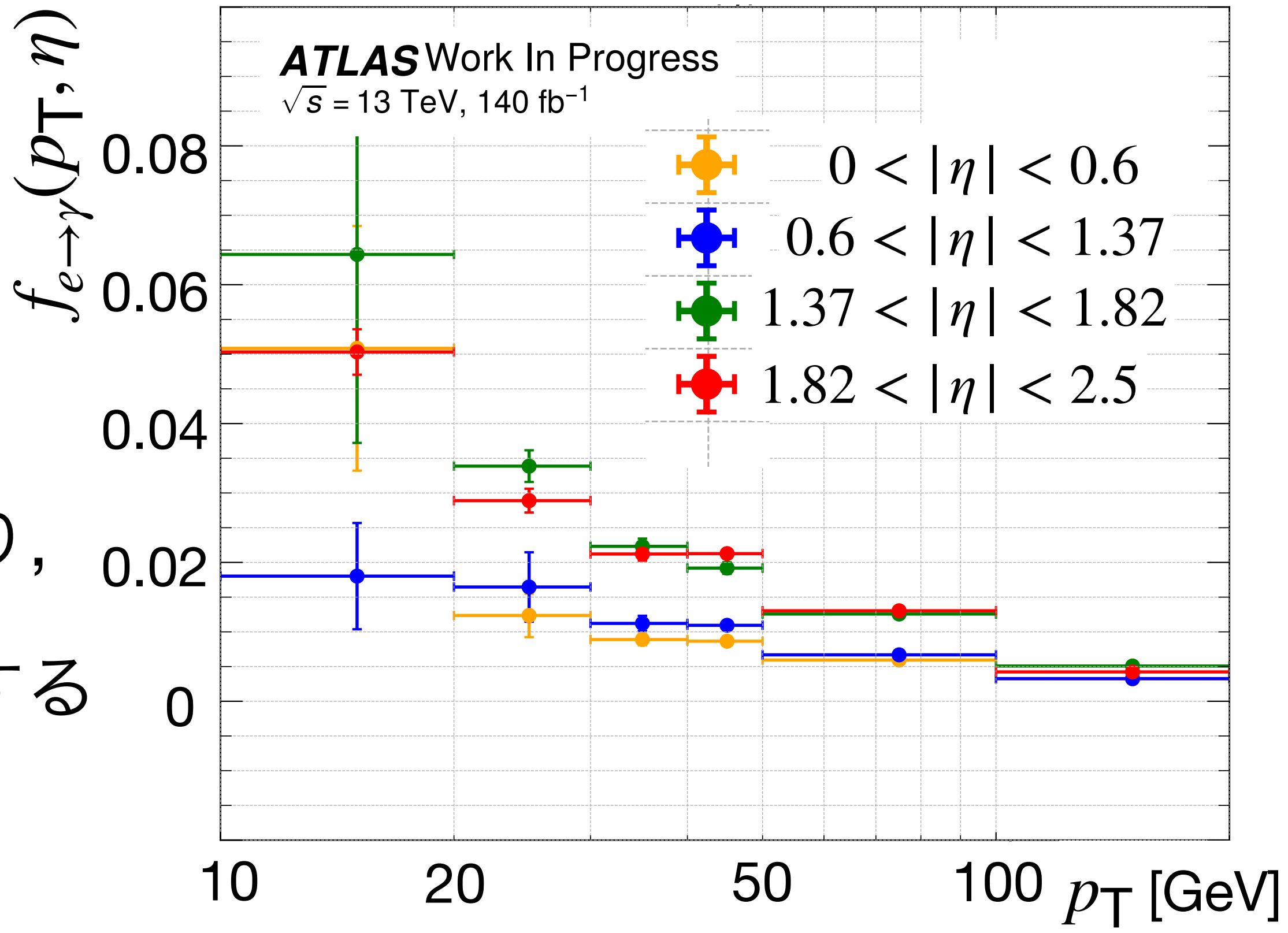
# 電子由来のフェイク光子背景事象: フェイク確率 $f_{e \rightarrow \gamma}(p_T, \eta)$ の測定



① Double Sided Crystal Ball関数 (Z resonance) + exp関数 (その他の寄与) で, 実データをフィット

$f_{e \rightarrow \gamma}(p_T, \eta) = N_{e\gamma} / N_{ee}$

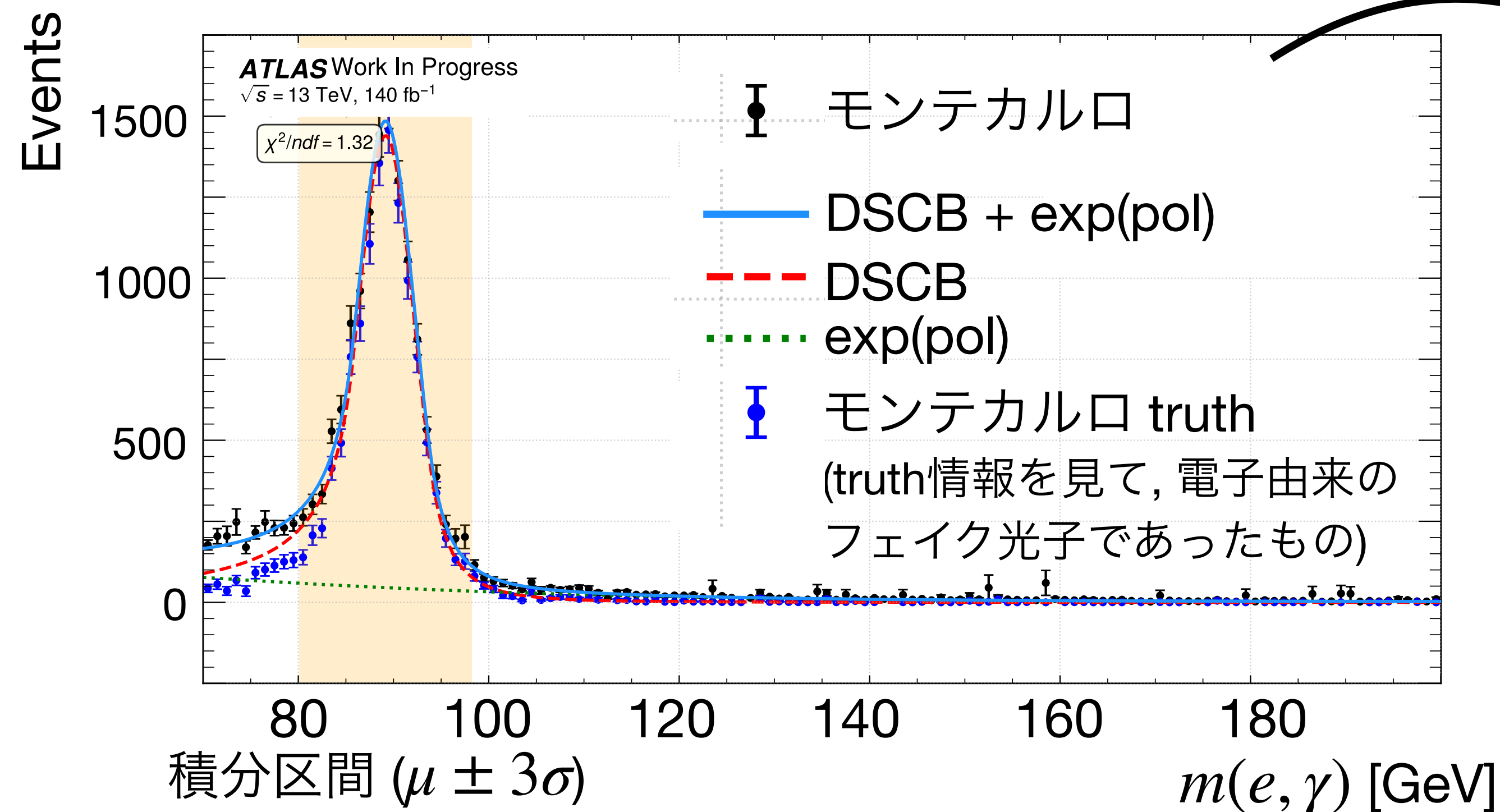
③ 事象数の比を取り,  
電子→光子の  
フェイク確率を測定する



② フィット後のDSCBを,  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ で積分し,  $Z \rightarrow ee/e\gamma$ の事象数  $N_{ee}, N_{e\gamma}$  を抽出

# 系統誤差の例: フィットの事象数抽出に関する系統誤差

- $Z \rightarrow ee/\gamma$  を用いて, フェイク確率を求める際の, フィットの事象数抽出に関する誤差
  - 本解析特有の系統誤差
- 実データではなく, モンテカルロに同様のフィットを行い, フィットによって抽出された事象数と, モンテカルロのtruthの情報を見て抽出された事象数の違いを, フィットによる事象数抽出に関する系統誤差として, 計上する



$$f(p_T, \eta)^{\text{fit}} = N_{e\gamma}^{\text{fit}} / N_{ee}^{\text{fit}} = 11847 / 351426 = 3.37 \%$$

$$f(p_T, \eta)^{\text{truth}} = N_{e\gamma}^{\text{truth}} / N_{ee}^{\text{truth}} = 11283 / 356110 = 3.17 \%$$

$$\Delta f(p_T, \eta)^{\text{syst fit}} = 0.20 \%$$



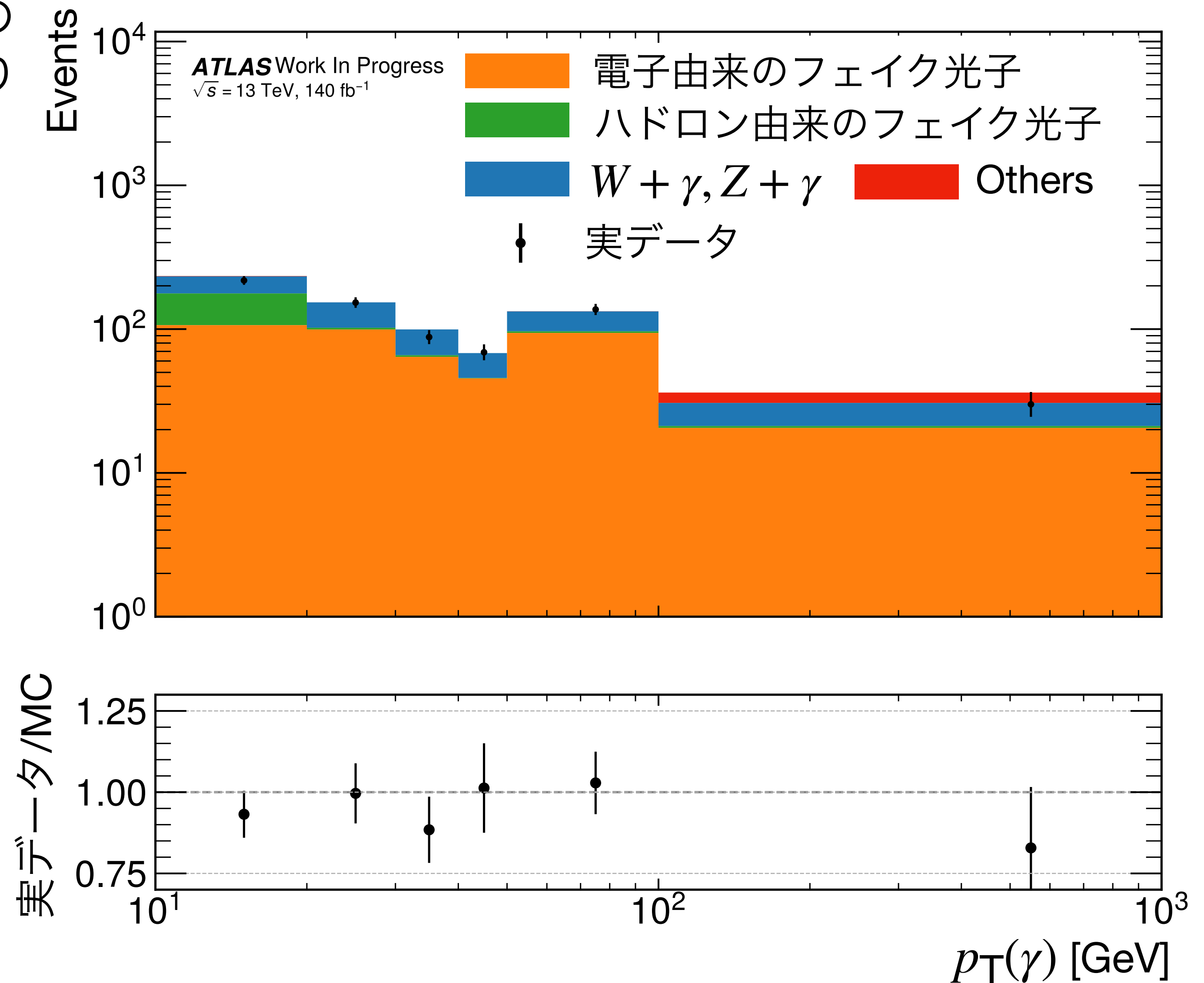
# 見積り手法の妥当性の確認: 電子由来のフェイク光子背景事象

✓  $W + \gamma, Z + \gamma$  背景事象やハドロン由来のフェイク光子背景事象についても, 見積り手法を確立

✓ 系統誤差に関しても, 理論誤差等を含め, 主要なものを考慮に入れる

- 電子由来のフェイク光子背景事象の検証領域を定義
  - ✓ 信号領域と排反
  - ✓ 十分な統計数
  - ✓ 電子由来のフェイク光子の割合  
~ 64 % と十分大きい

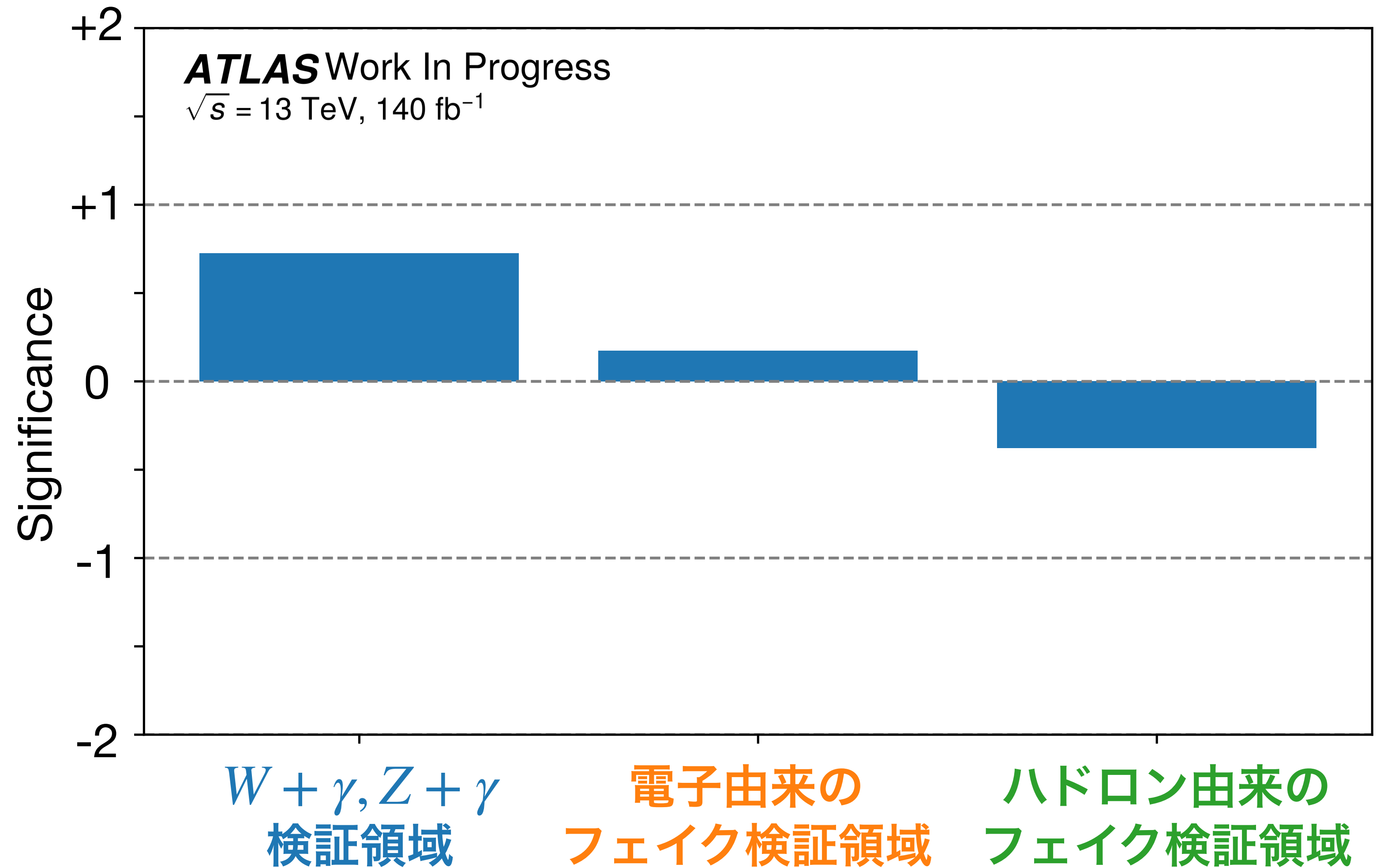
✓ 全ての  $p_T(\gamma)$  範囲で, 見積もった背景事象数と実データがエラーの範囲内で一致



# 見積り手法の妥当性の確認: 全ての主要な背景事象

✓  $W + \gamma, Z + \gamma$  背景事象やハドロン由来のフェイク光子背景事象についても, 検証領域を定義

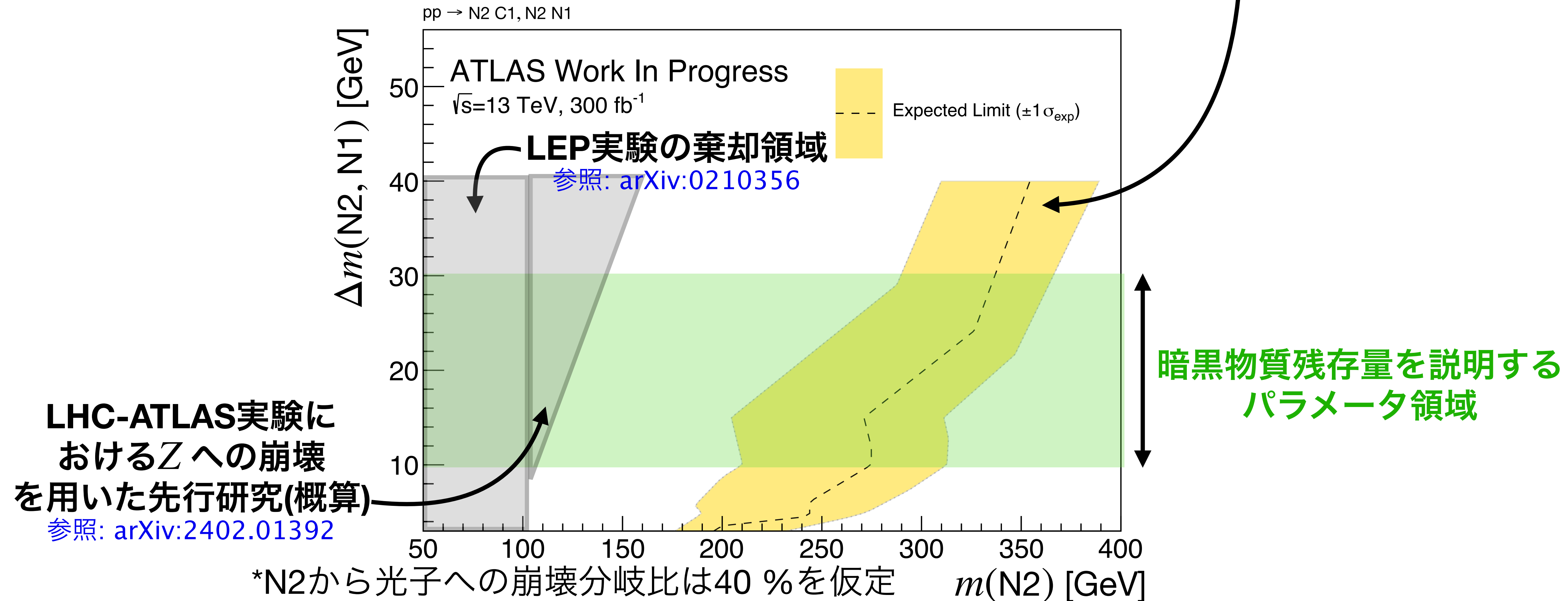
✓ 全ての検証領域において, 見積りがエラーの範囲内でデータと一致



# 予想される探索感度

✓現象論的に強く動機づけられる, 質量差が10 - 30 GeVの時, 300 GeV程度のウィーノまで感度を持つ

- 世界で初めて, BWCAシナリオに対する輻射崩壊を用いた探索。





# まとめと今後の展望

## まとめ

- Bino-Wino Co-Annihilation シナリオ
  - ✓暗黒物質の残存量を説明できるなど, 現象論におけるベンチマークである
    - ウィーノが輻射崩壊をする場合が, 十分な分岐比を持つことが明らかになった
- 背景事象の見積り及び系統誤差の評価
  - $W + \gamma, Z + \gamma$  背景事象および, フェイク光子背景事象の見積り手法を確立
  - 背景事象数, 信号事象数に関する系統誤差の見積りも完了
  - ✓見積り手法を検証領域を用いて確認
- 予想される探索感度
  - ✓世界で初めて, BWCAシナリオに対する輻射崩壊を用いた探索。
  - ✓現象論的に強く動機づけられる, 質量差が10 - 30 GeVの時, 最大300 GeVウィーノまで感度を持つ

## 今後の展望

- ATLAS実験Run 2 + Run 3の $300 \text{ fb}^{-1}$ での結果公表を目指す