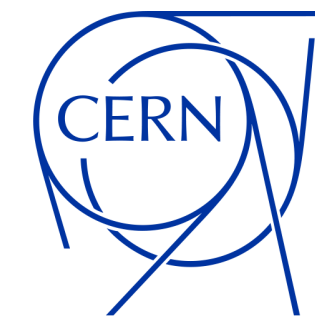




LHC-ATLAS 実験における ウィーノの輻射崩壊を用いた、 Bino-Wino Co-Annihilation シナリオの探索感度評価

長坂 錬^A

石野 雅也^B, 奥村 恭幸^B, 陳 詩遠^C

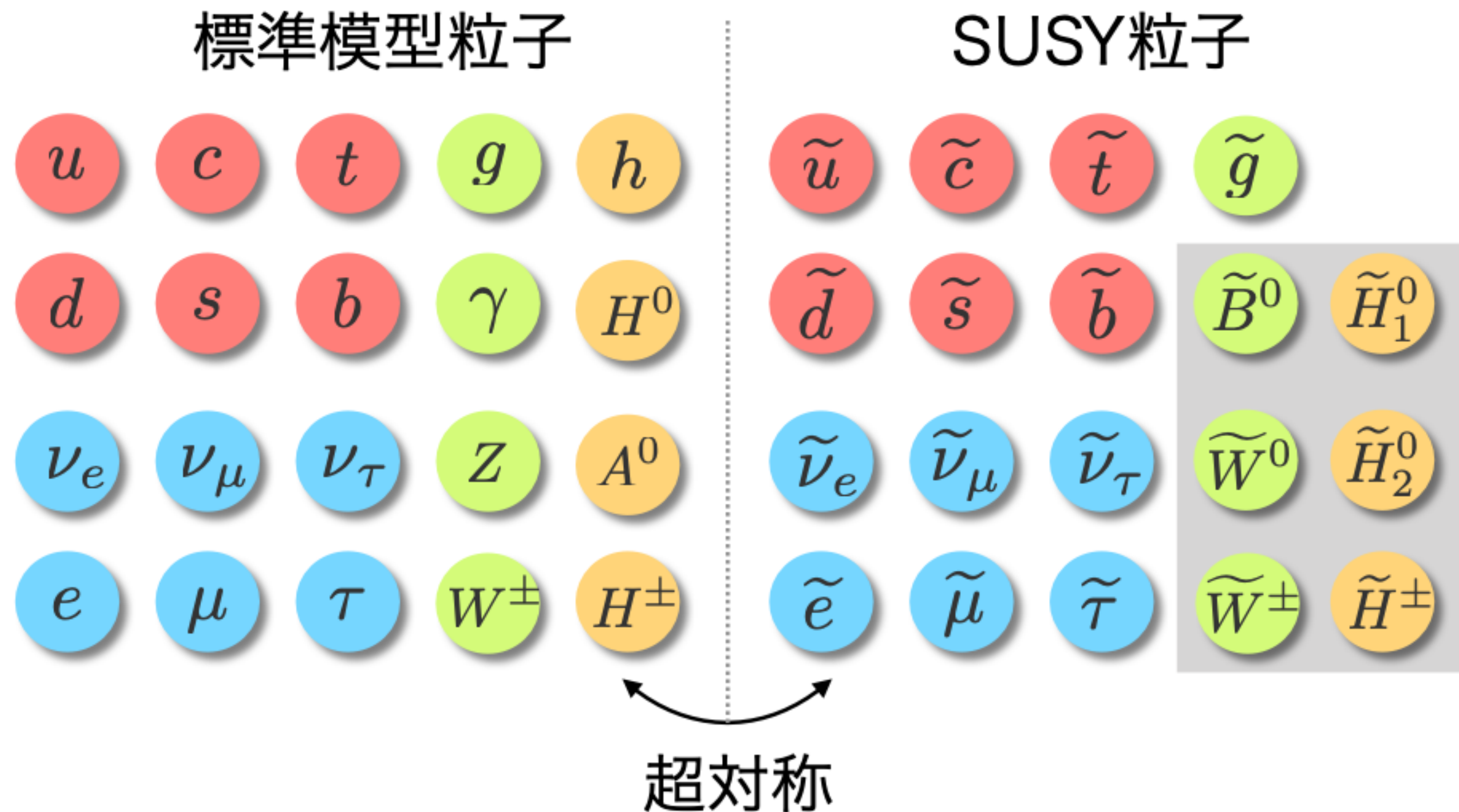
所属：東大理^A, 東大素セ^B, 京大理^C

講演番号：18aWB208-1

超対称性理論

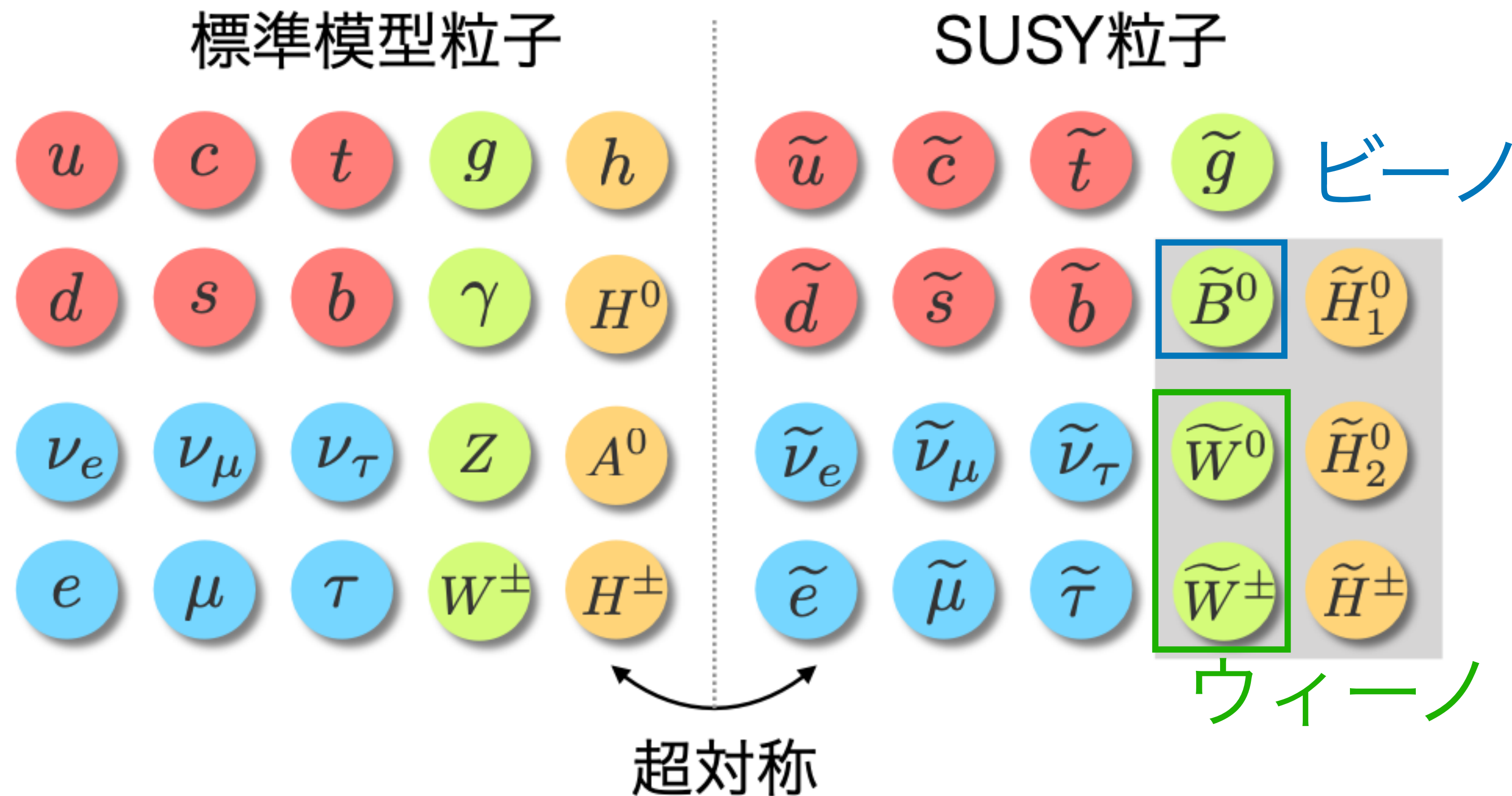
- ボゾンとフェルミオンの間の対称性(超対称性)を導入
- 標準模型粒子の対となる超対称性粒子(SUSY粒子)を预言

✓暗黒物質候補の存在, 階層性問題の解決, 力の大統一, ミューオン異常磁気能率のズレの解明など, 多くの標準模型の問題を解決し得る。



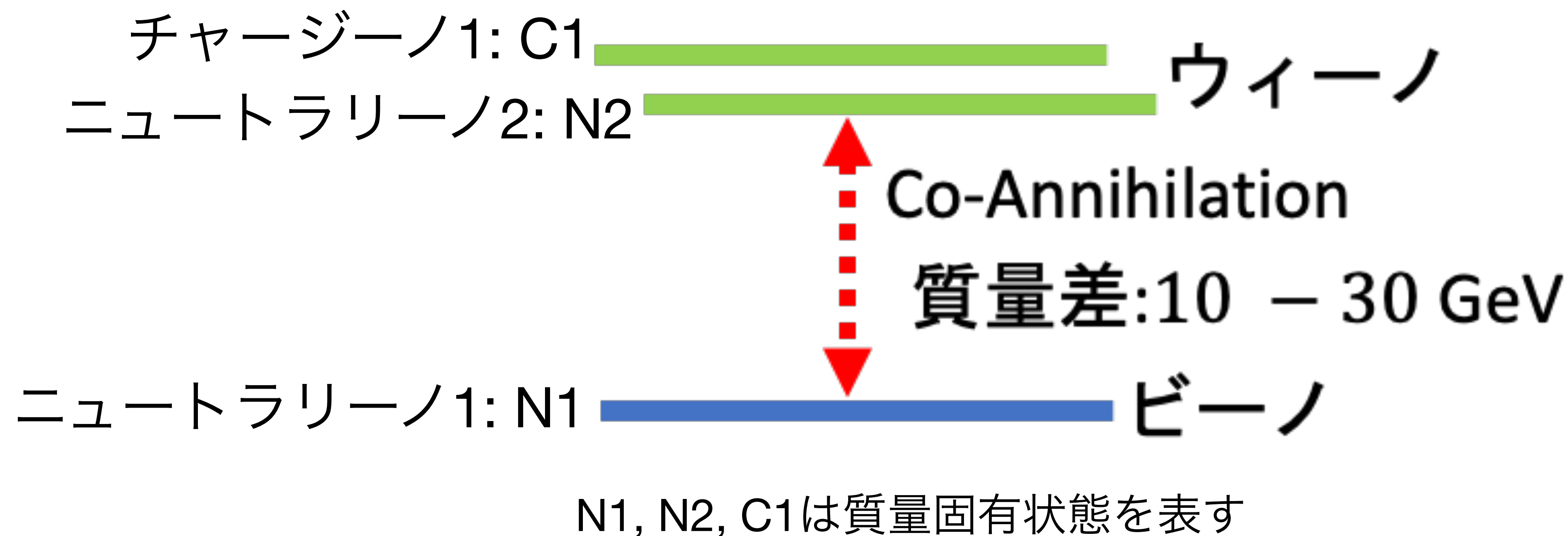
ビーノ・ウィーノ

- 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



Bino-Wino Co-Annihilationシナリオと暗黒物質

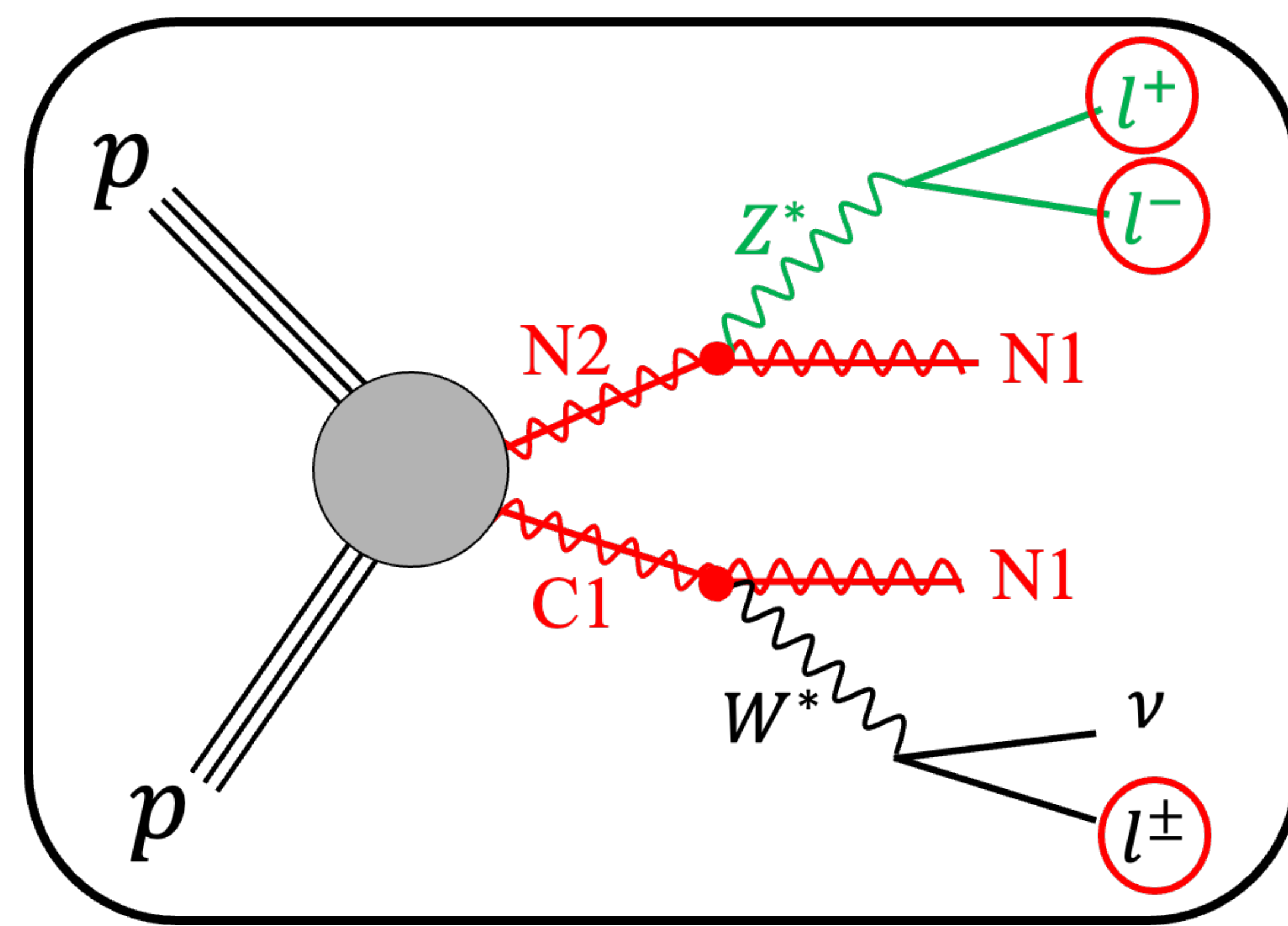
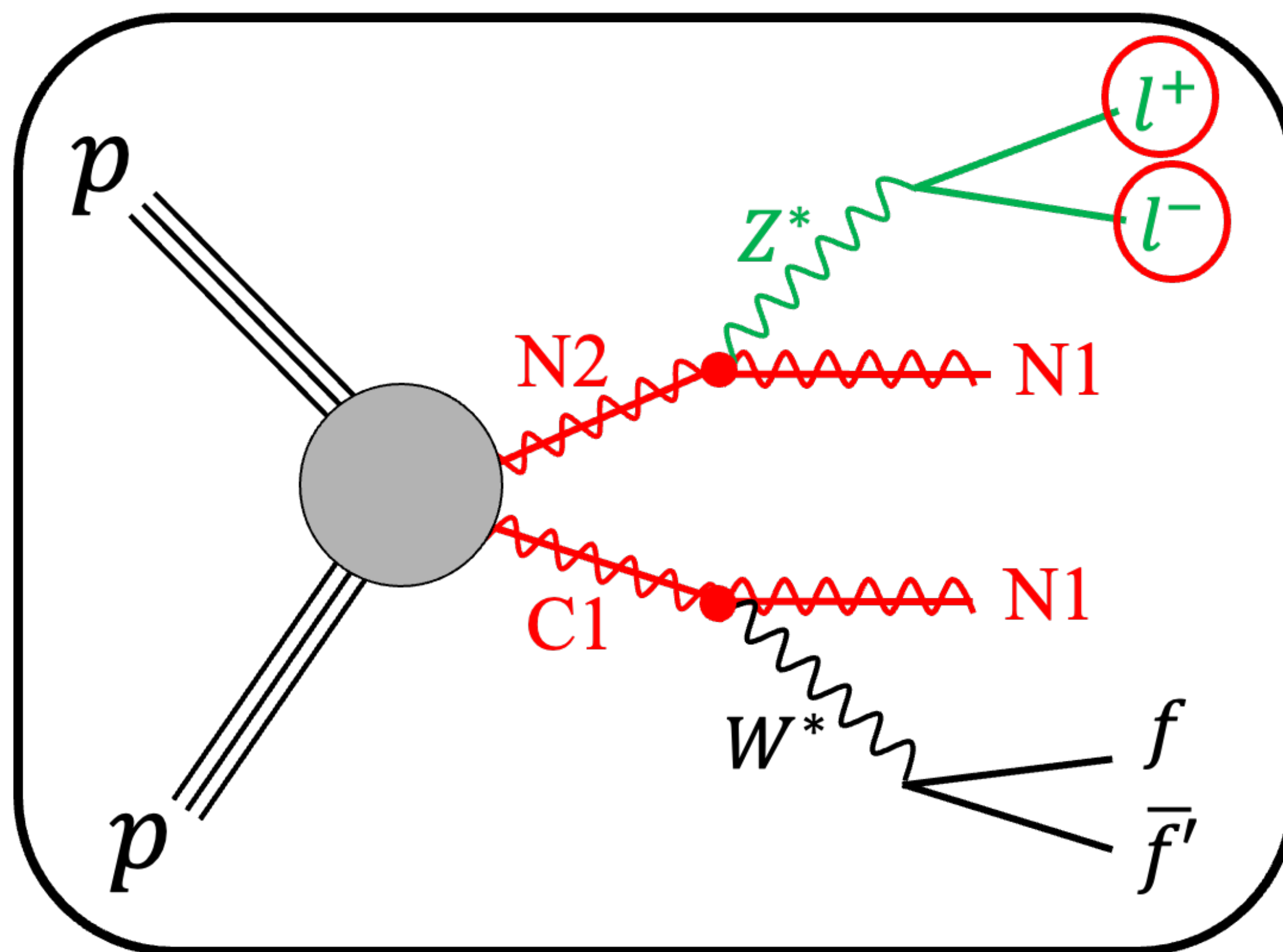
- 特にビーノとウィーノの質量差が10 - 30 GeVのシナリオ(Bino-Wino Co-Annihilation: BWCAシナリオ)は、**暗黒物質の残存量を説明することができるため、現象論における有力なベンチマークである。**



Bino-Wino Co-Annihilationシナリオに対する先行研究

2L/3L 解析

- 比較的質量差が小さい領域では, Z を経由したレプトンへの崩壊を仮定し, 2L解析と3L解析が行われていた
 - どちらも低運動量のレプトンに着目



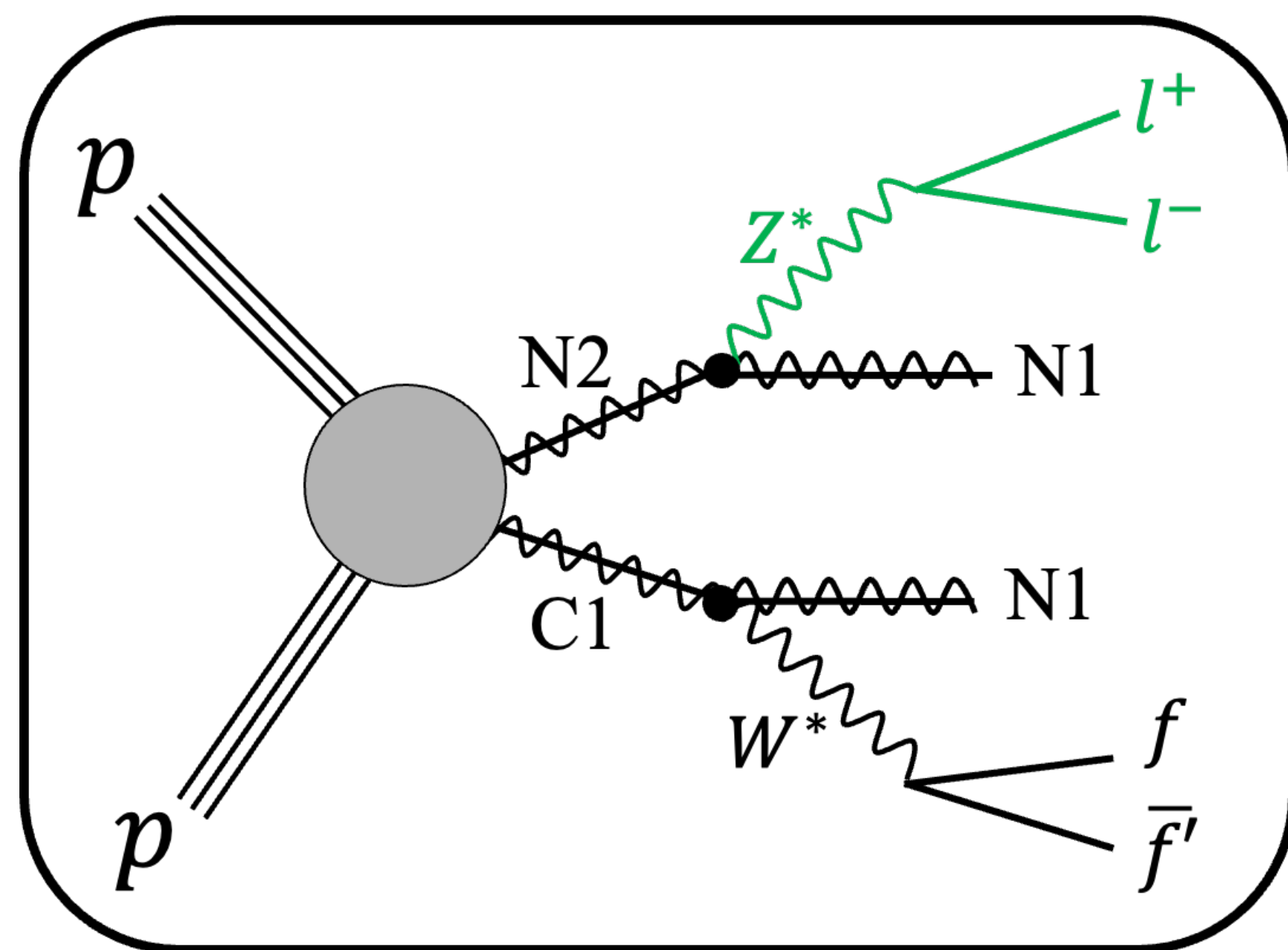
参照: [arXiv:1911.12606](https://arxiv.org/abs/1911.12606) 2L 解析における信号事象

参照: [arXiv:2106.01676](https://arxiv.org/abs/2106.01676) 3L 解析における信号事象

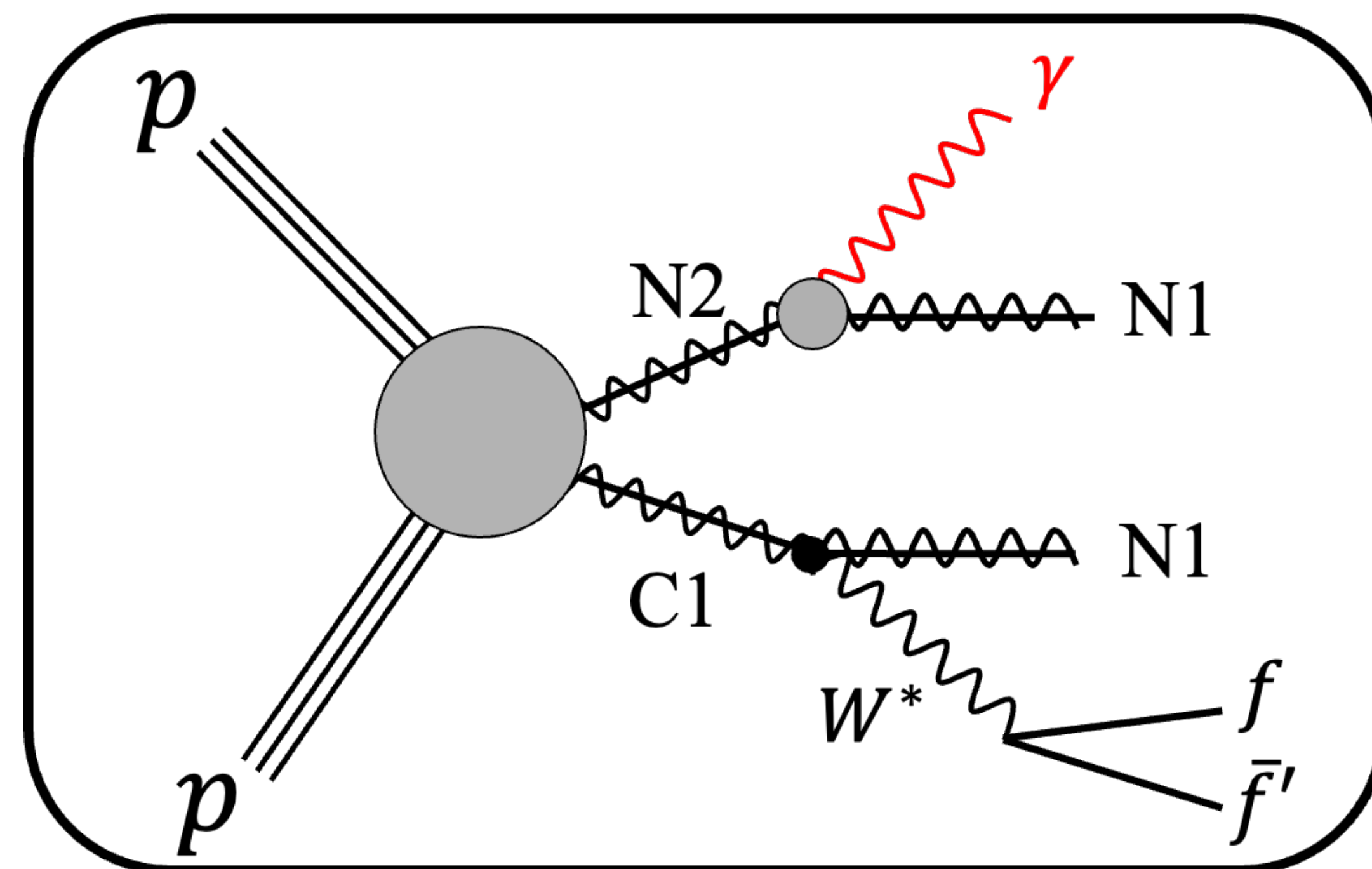
先行研究と輻射崩壊

- しかし, 高次補正を取り入れた近年の理論研究により, 質量差が小さい領域では Z への崩壊は抑制され, 一方で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 - 30 %程度の崩壊分岐比
- その結果, これまでの先行研究の Z への崩壊を仮定した探索感度が, 特に質量差が10 - 20 GeVの領域で非常に低いことも分かっている

[参照: arXiv:2402.01392](#)



Z への崩壊のダイアグラム

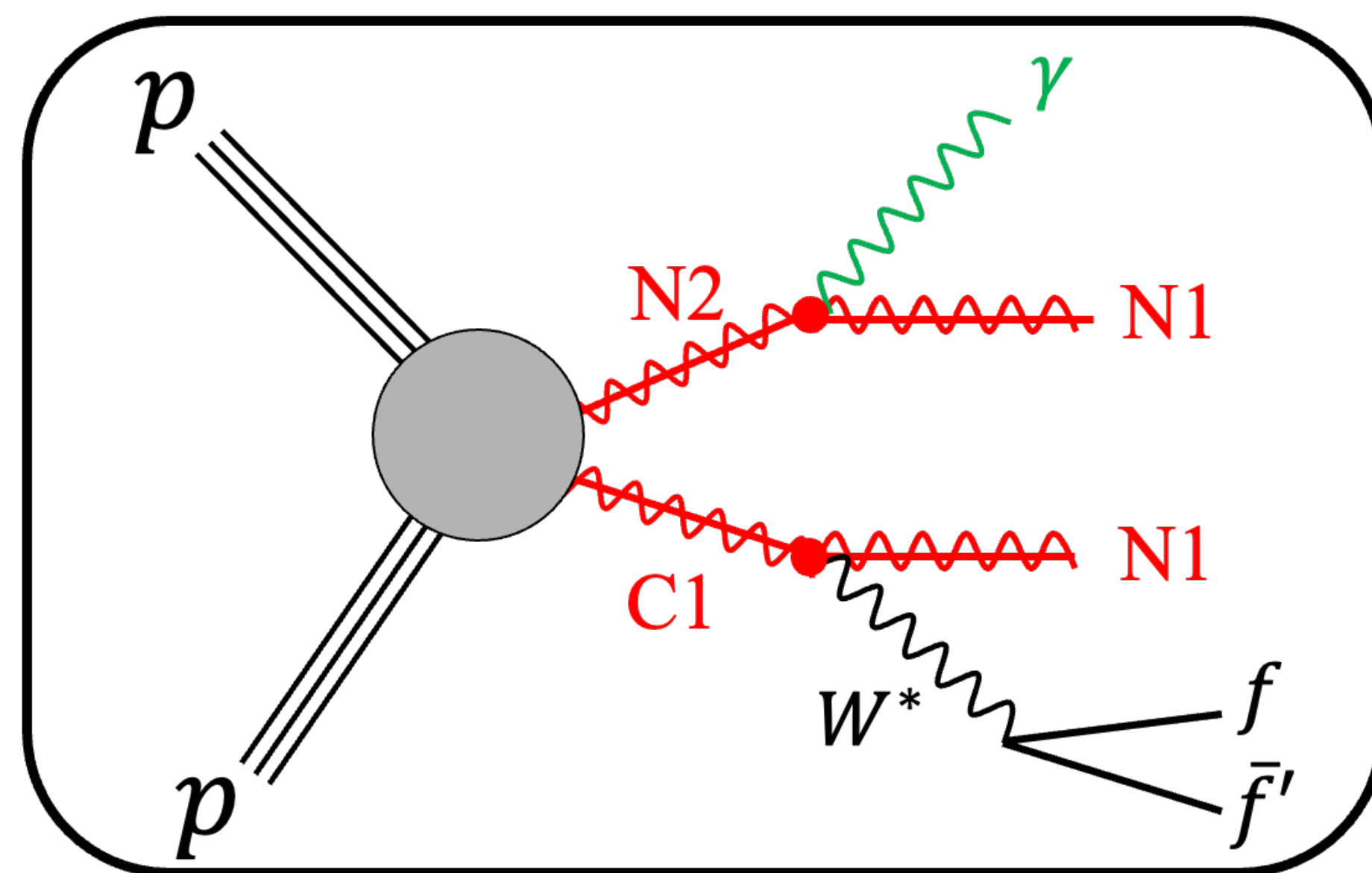


輻射崩壊を伴う信号事象

スフェルミオンやC2を介した1-loopが寄与する

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, モンテカルロシミュレーションを用いて, 基本的な事象選別の元での探索感度評価を行い, 本研究の有望性を検証する

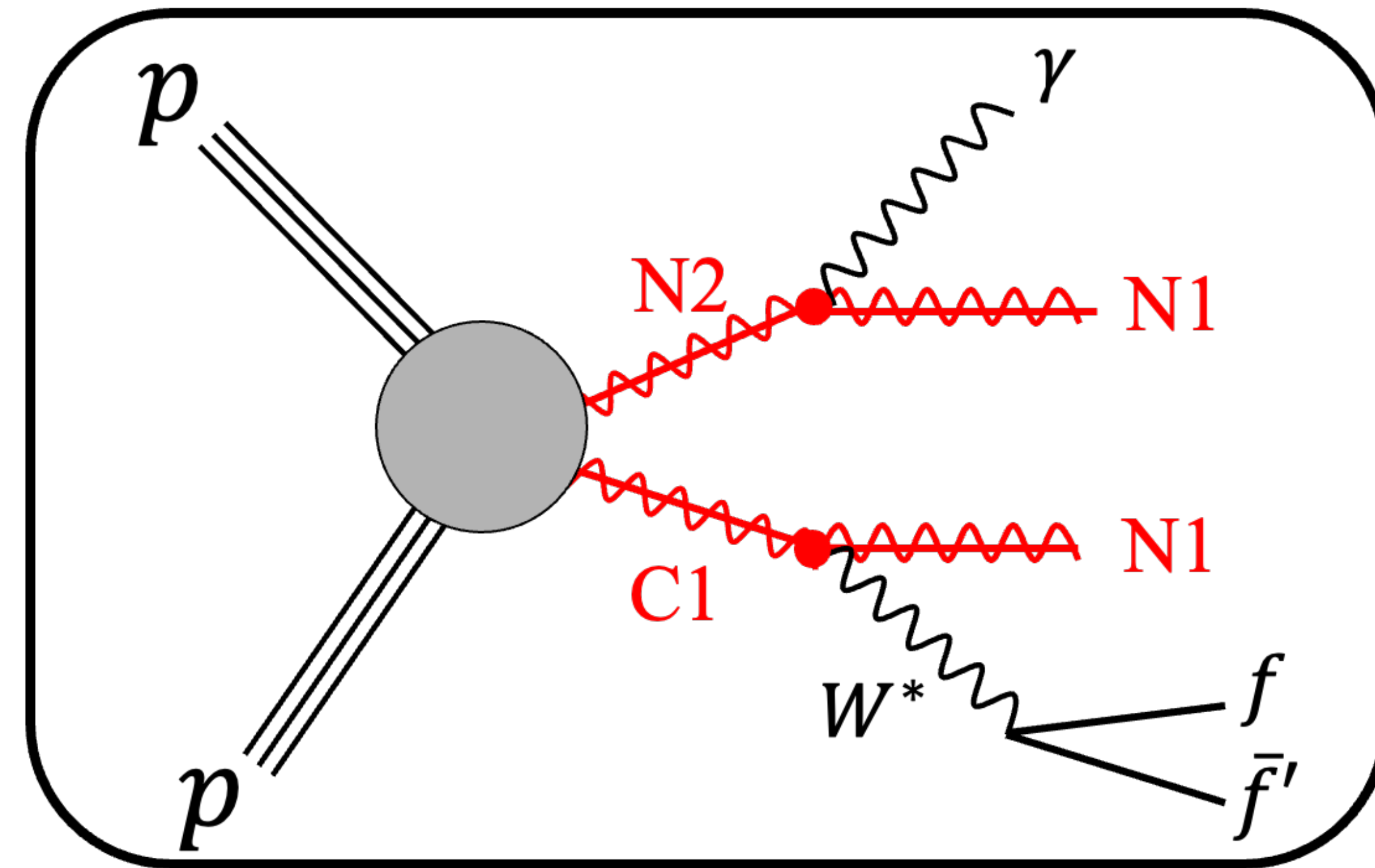


輻射崩壊を伴う信号事象

解析のセットアップ: 信号事象

MCサンプル

- BWCA (Bino-Wino Co-Annihilation) シナリオ
 - LHCにおいては, N2とC1のペア生成が支配的
 - 終状態: $\gamma + W + \text{MET}$
 - MET: Missing E_T
= ビーム軸と垂直方向の損失エネルギー
N1と ν 由来
 - γ と W への崩壊分岐比は100 %としている
- Truth particle level
 - 検出器や粒子再構成アルゴリズムの効果は,
適切なefficiencyをかけることで考慮に入れる

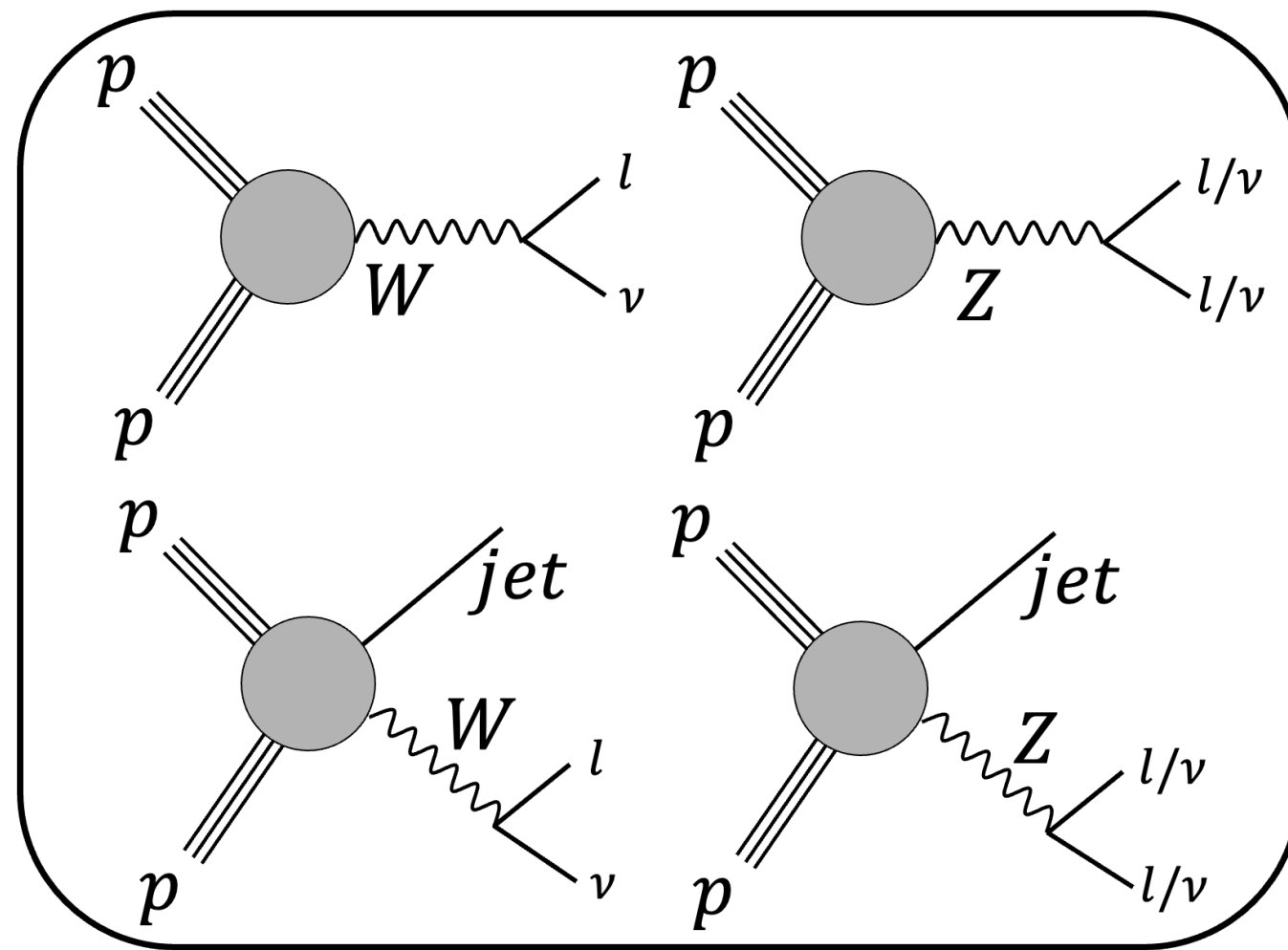


信号事象

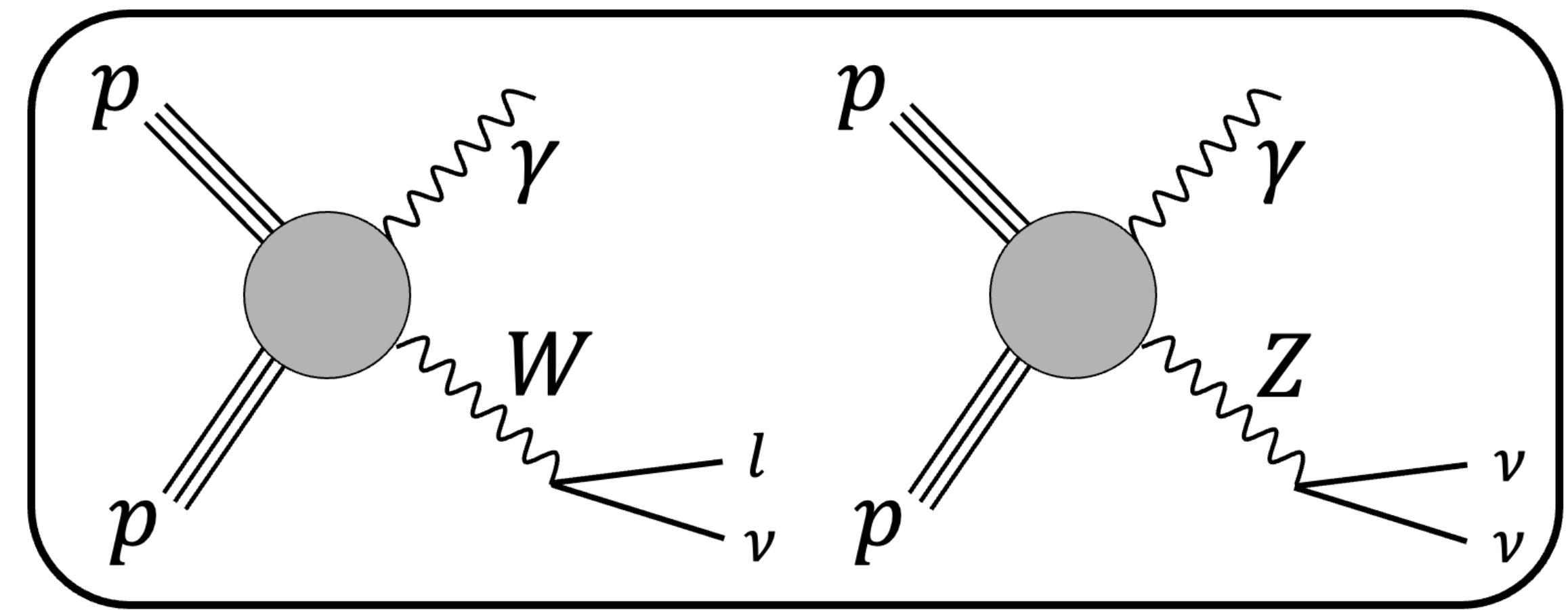
解析のセットアップ: 背景事象

MCサンプル

- 主な背景事象
 - Reducible background: 偽光子(主に高エネルギーjet由来)とMET(ν 由来)を有する
 - $W + \text{jets}, Z + \text{jets}, t\bar{t}$
 - Irreducible background: 光子とMET(ν 由来)を有する
 - $W + \gamma, Z + \gamma$
- 検出器シミュレーション, 粒子再構成アルゴリズムを走らせたサンプル



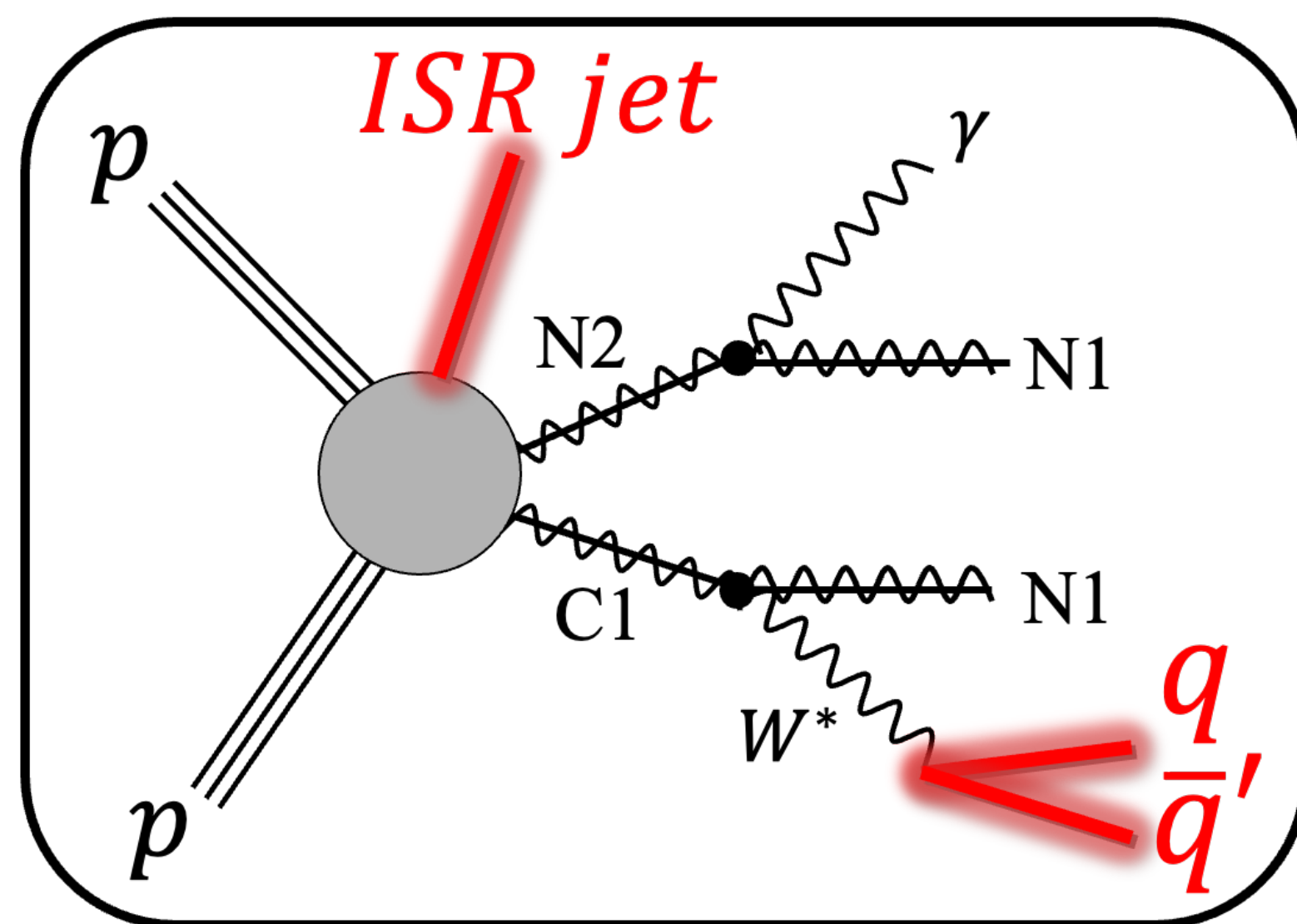
Reducible background: $W + \text{jets}, Z + \text{jets}$



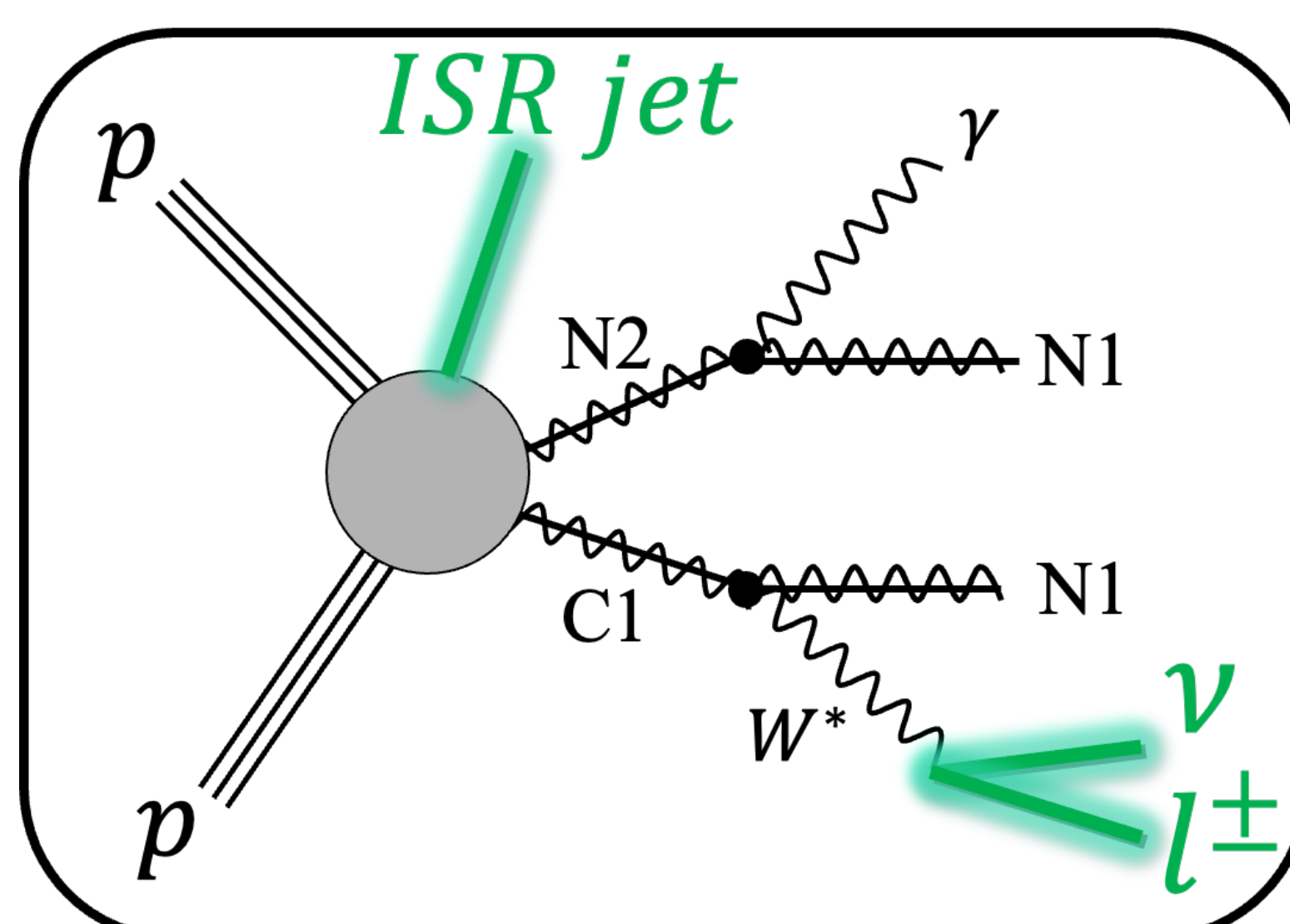
Irreducible background: $W + \gamma, Z + \gamma$

信号領域の定義

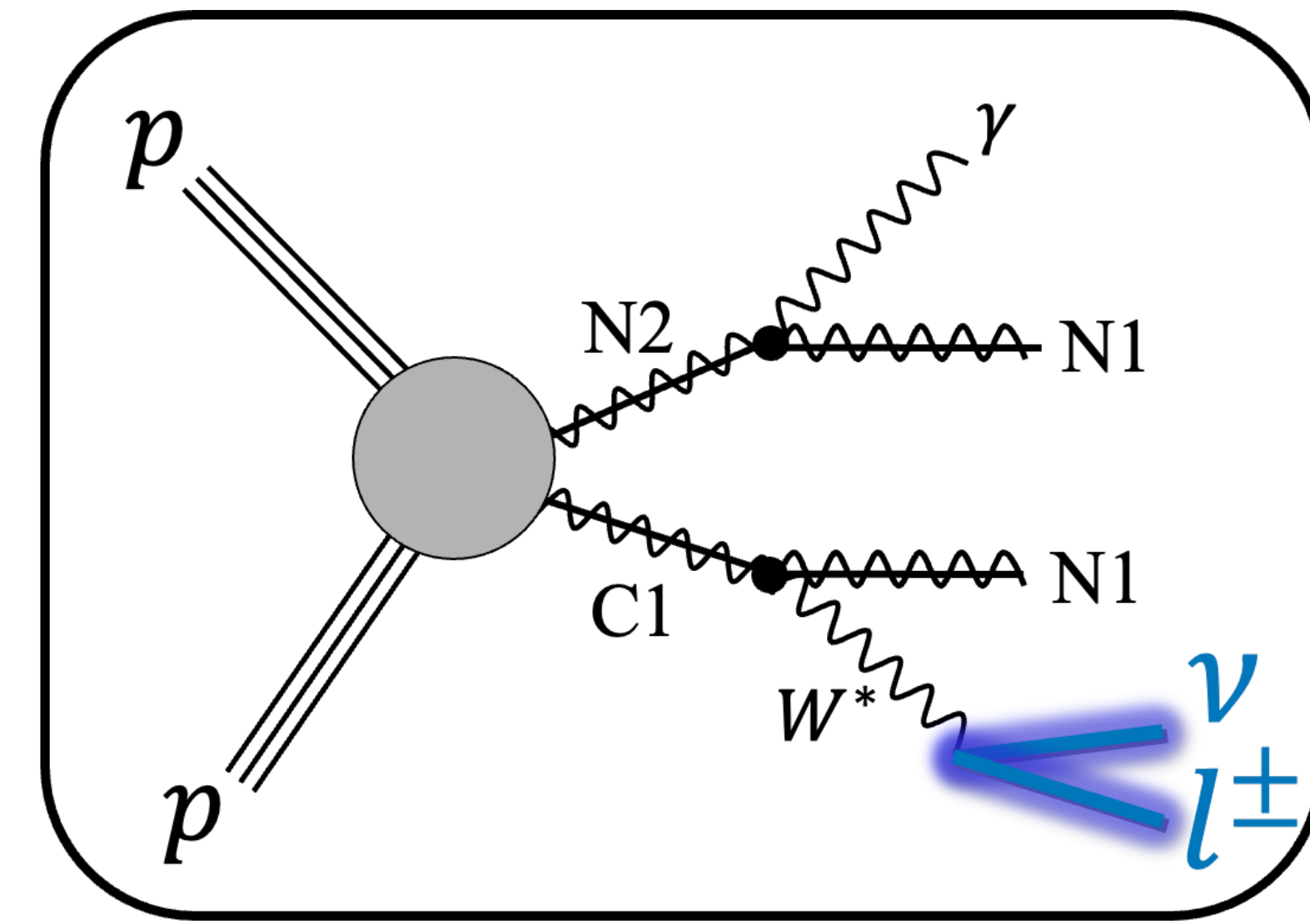
- ISR (Initial State Radiation) jetとレプトンの有無を元に以下の3つの信号領域を設定
 - ISR jet を持つ系は, 系全体がISR jet と逆方向にブーストしており, N1 由来の高いMETが期待される
- 質量差が10 - 30 GeVの場合, 光子とレプトンは低運動量であり, トリガーにかからない
 - ➡ ISRがある場合は, METトリガーを鳴らすことが可能
- * トリガーとして, METトリガーと1レプトントリガーを用いる



High MET and 0L領域



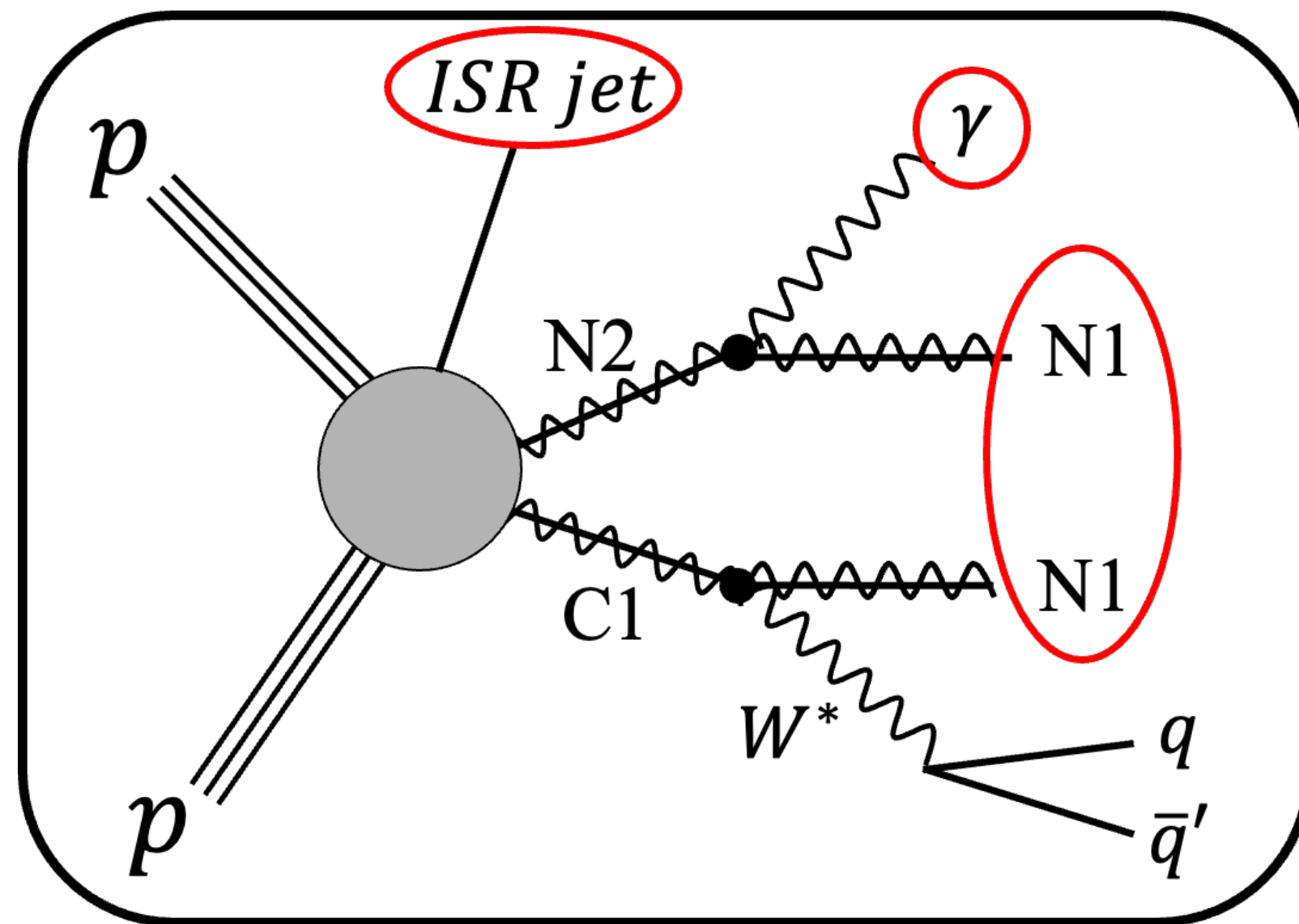
High MET and 1L領域



Low MET and 1L領域

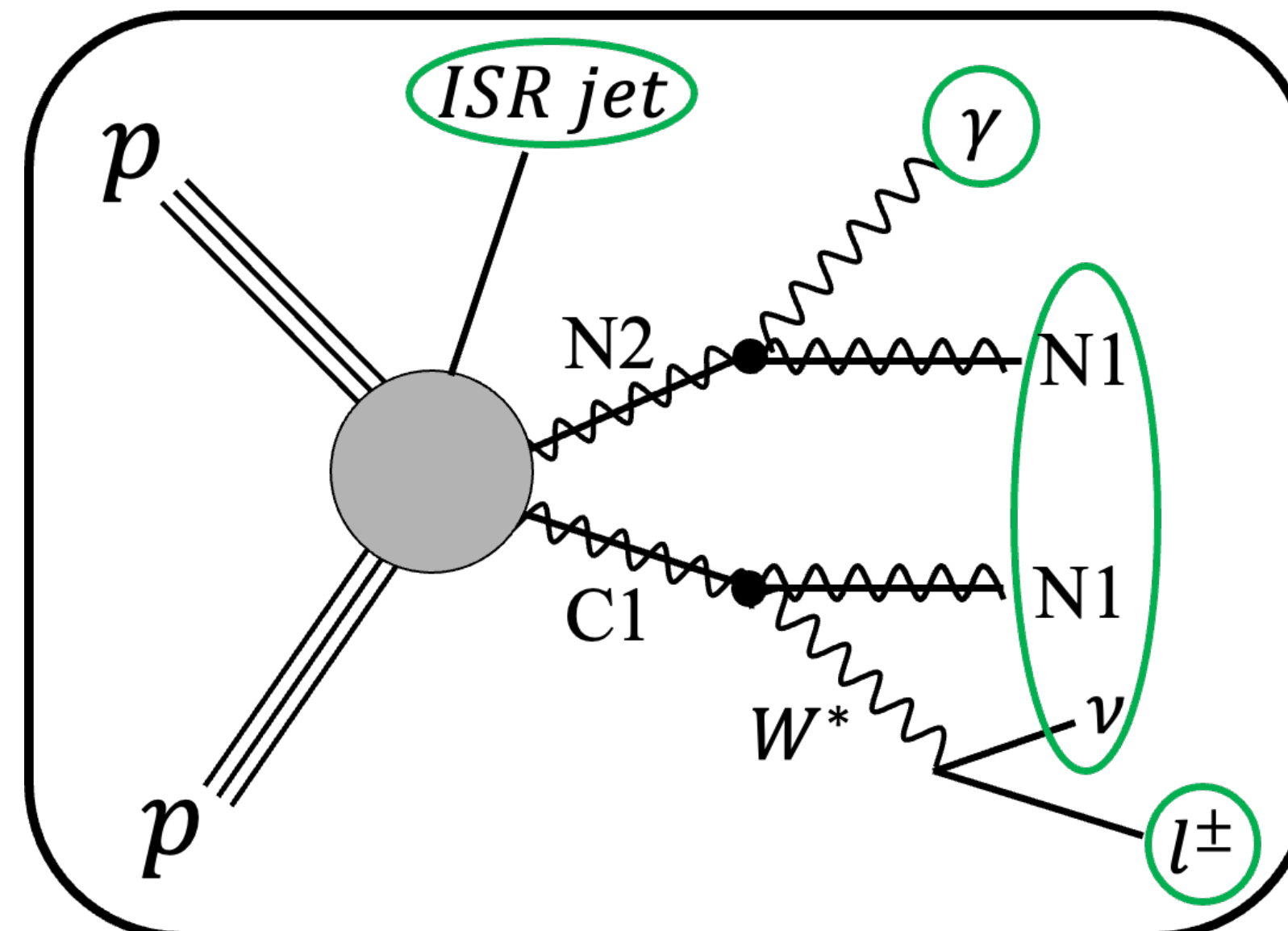
各信号領域で期待される終状態

- それぞれの信号領域に合わせた, 基本的な事象選別を行う
- 本講演では現状, 最も感度の高いHigh MET and 1L領域について詳しく講演した後, 3つの信号領域をcombineした結果も講演する



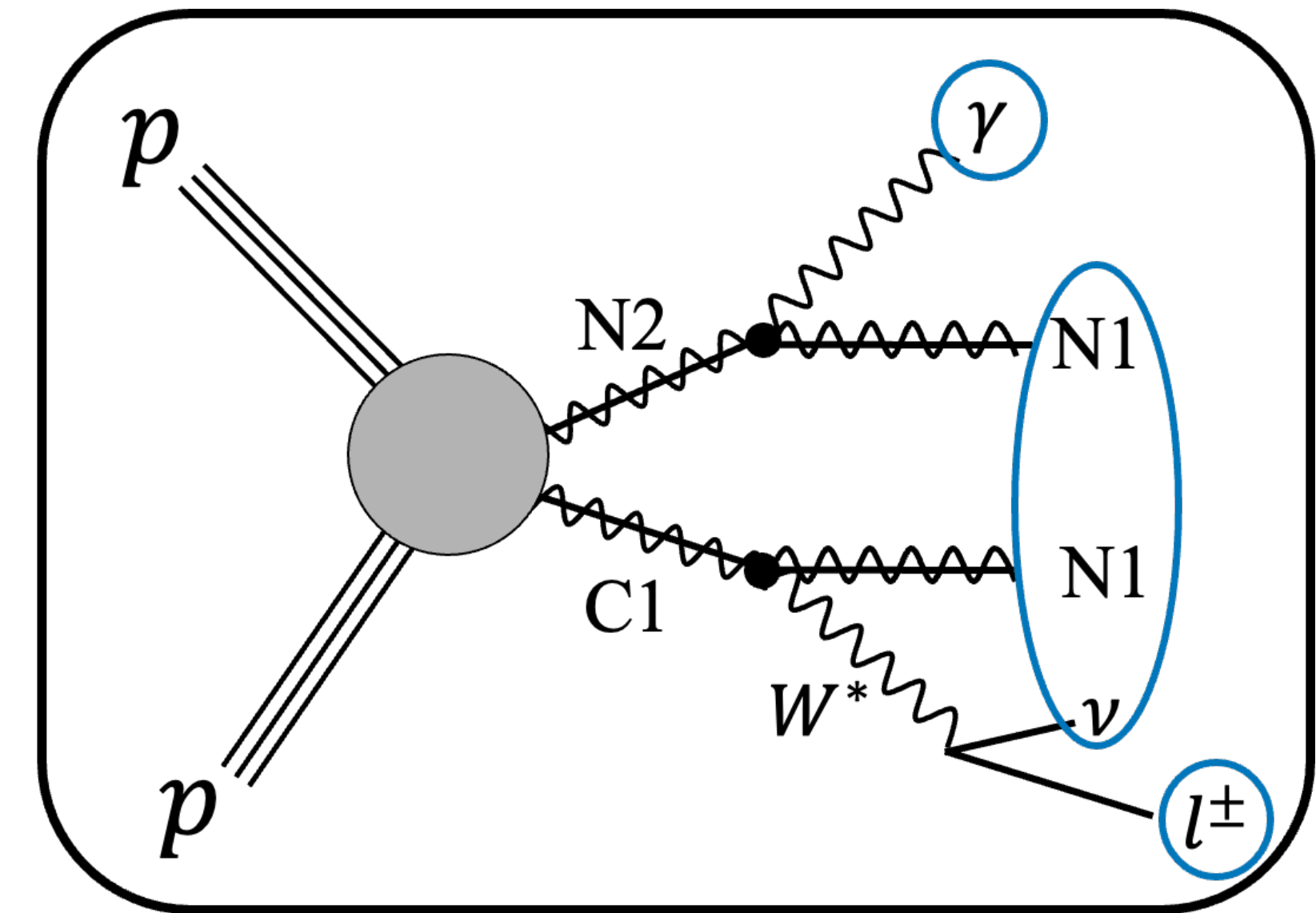
High MET and 0L領域

- γ + High MET + ISR jet



High MET and 1L領域

- γ + High MET + ISR jet +
レプトン



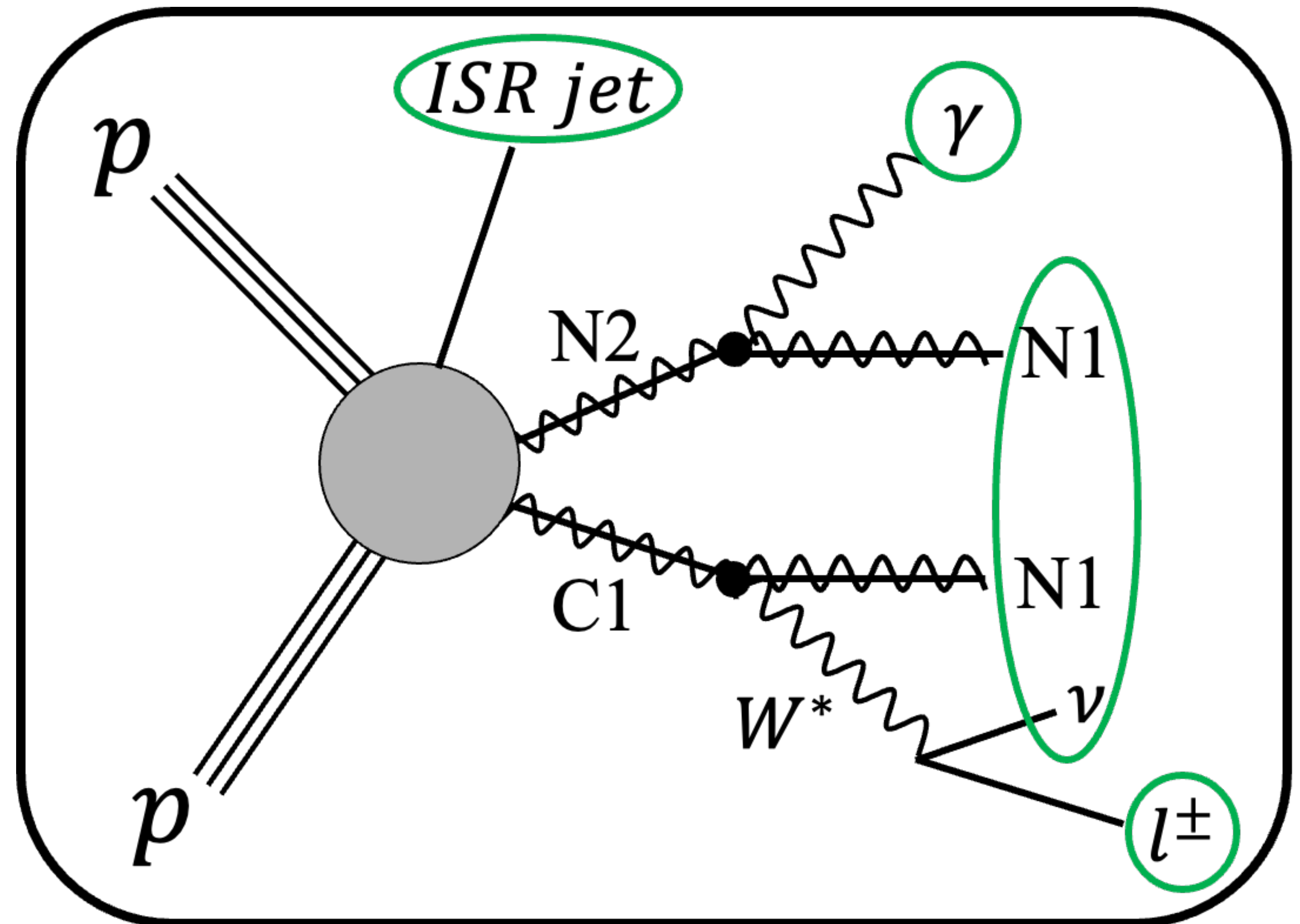
Low MET and 1L領域

- γ + Low MET + レプトン

High MET and 1L 領域 (1)

preselection

- $\text{MET} > 200 \text{ GeV}$
- Leading jet $p_T^{\text{jet}} > 150 \text{ GeV}$
- Leading photon $p_T^\gamma > 10 \text{ GeV}$
- レプトンの数 == 1
- $p_T^{\text{lepton}} = \begin{cases} 4.5 \text{ GeV for } e \\ 3.0 \text{ GeV for } \mu \end{cases}$
 - 電子とミュオンで検出閾値が異なるため



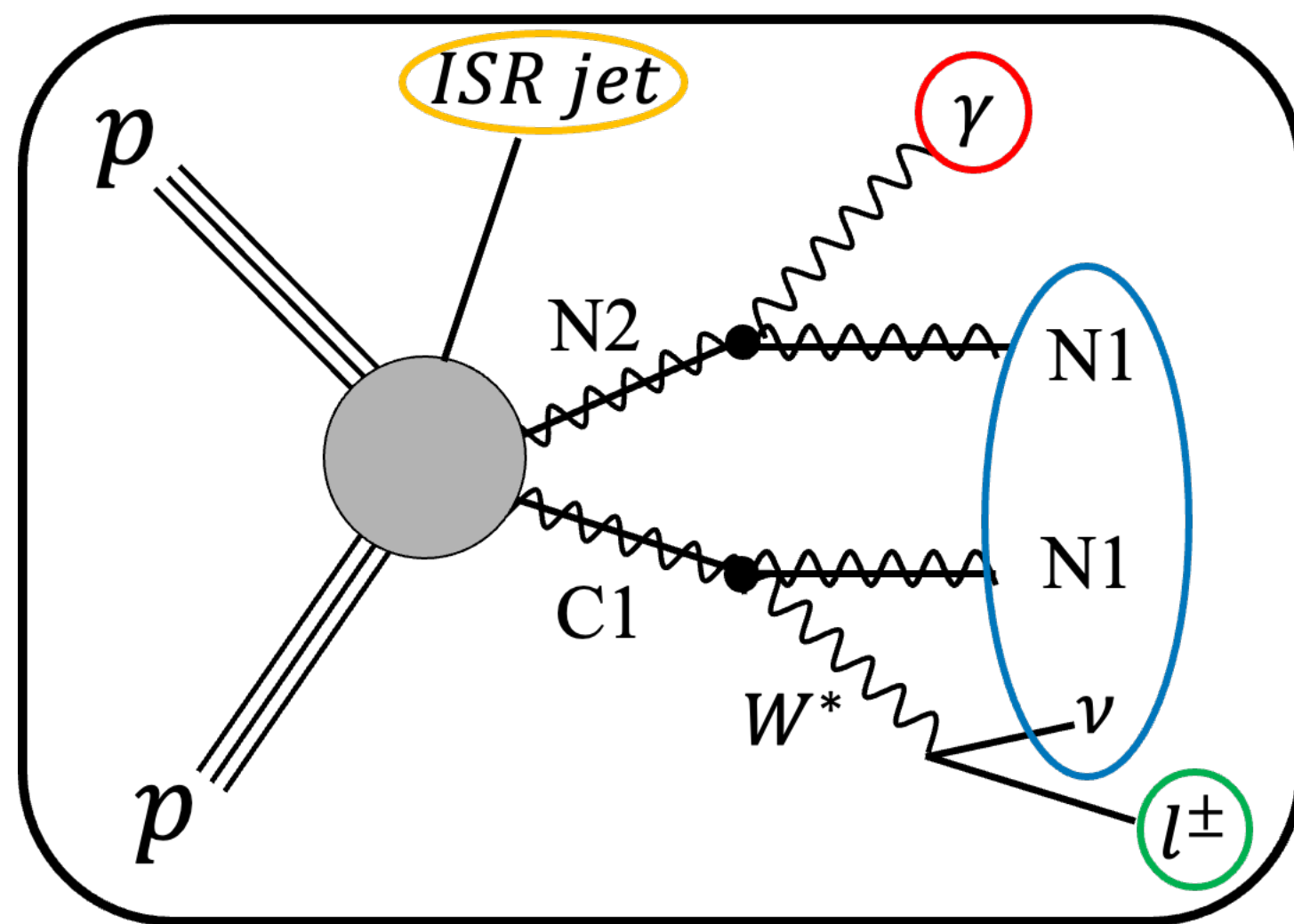
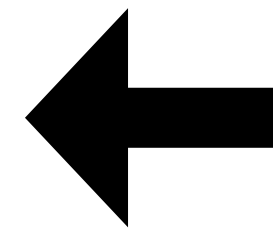
High MET and 1L領域がTargetとする信号事象

High MET and 1L 領域 (2)

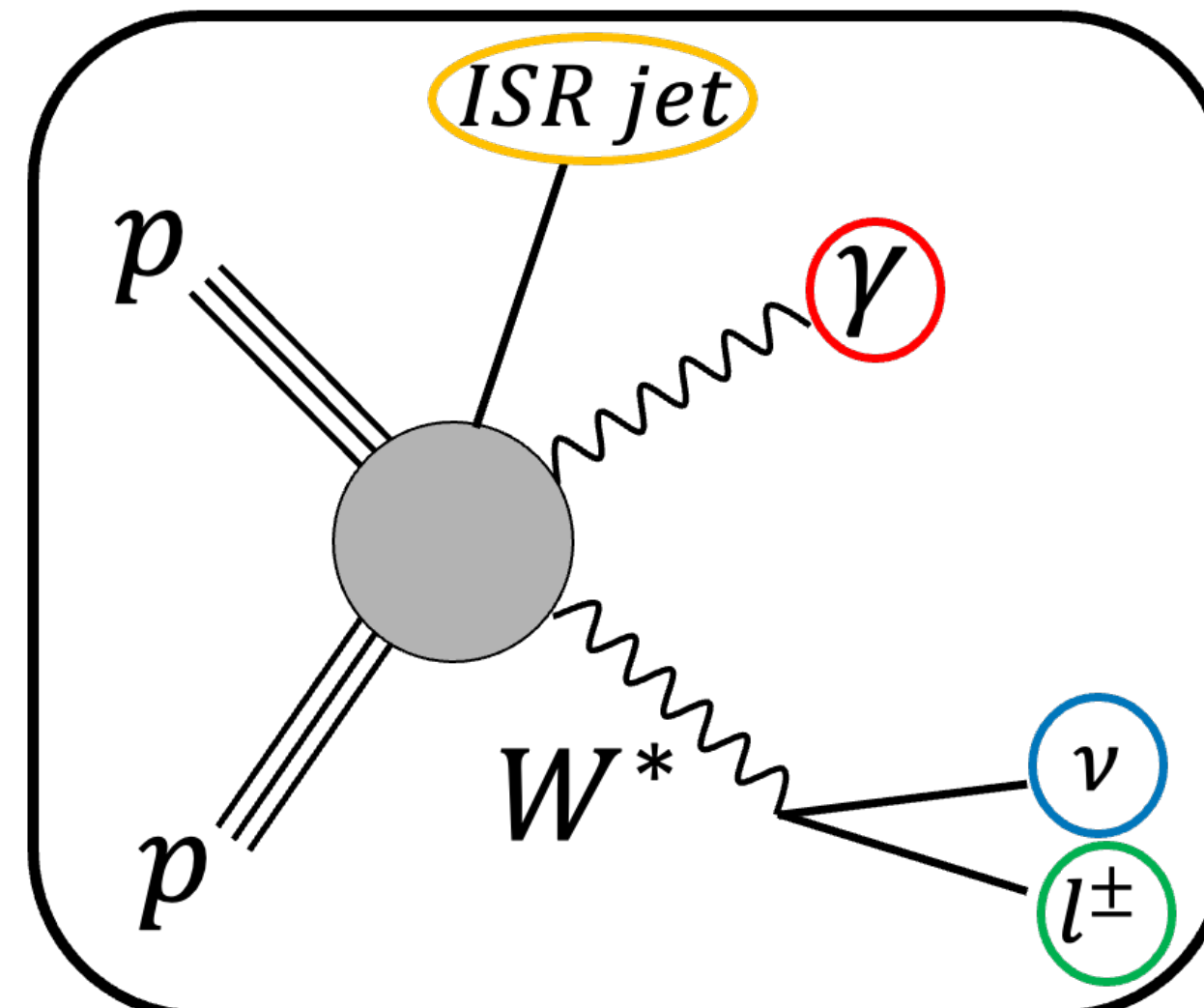
preselection後の主要な背景事象

- $W(\rightarrow e\nu) + \gamma$
- $W(\rightarrow \mu\nu) + \gamma$
- $W(\rightarrow \tau\nu) + \gamma$

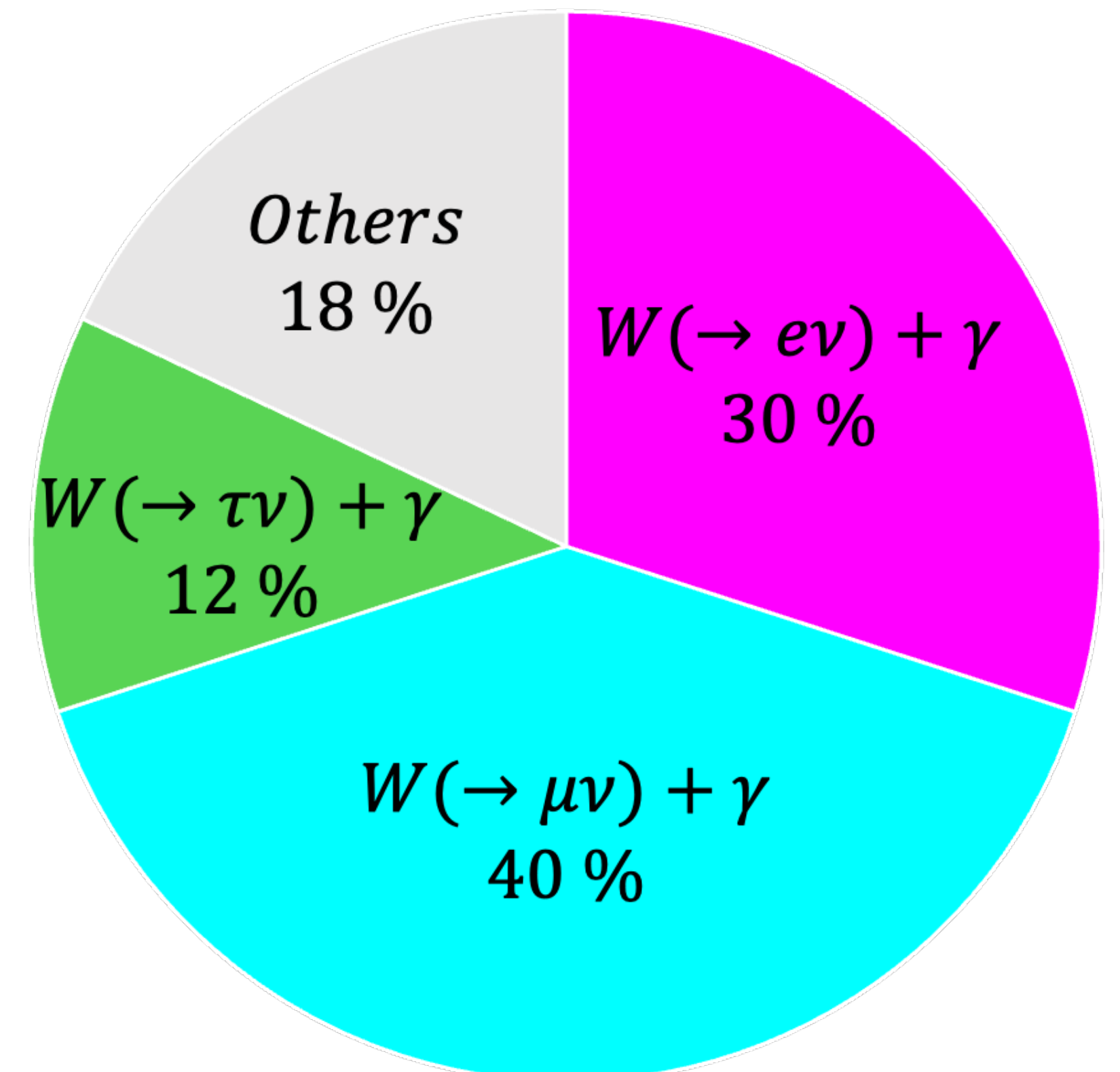
終状態が信号事象と全く同じ(irreducible background)
であるため, kinematicsから信号事象との分離を試みる



信号事象



preselection後の主要な背景事象



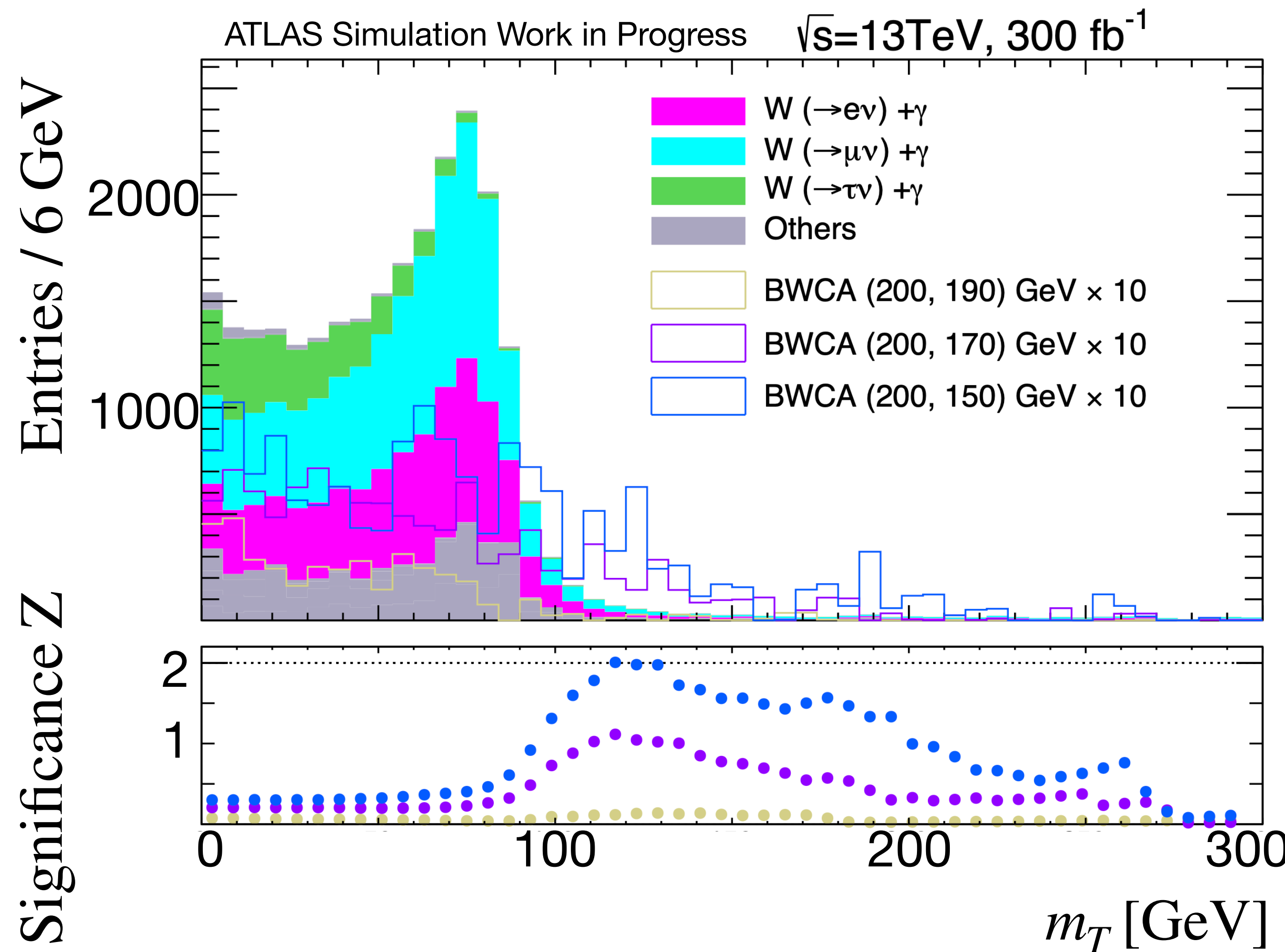
preselection後の主要な背景事象の割合

METと p_T^{lepton} で構成したTransverse mass

- LHC実験Run 2とRun 3一部のデータ量に相当する, 300 fb^{-1} に規格化
- 下のパネルは, 各点でlower cutをかけた時のsignificanceの値
 - おおよそどこでカットをかけると良いかを示している
- Significance Z の定義

$$Z = \sqrt{2(n \ln[\frac{n(b + \sigma^2)}{b^2 + n\sigma^2}] - \frac{b^2}{\sigma^2} \ln[1 + \frac{\sigma^2(n - b)}{b(b + \sigma^2)}])}$$

- n : 信号事象数 + 背景事象数
- b : 背景事象数
- σ : 背景事象数の不確かさ
($\sigma = 0.2 \times b$ を仮定)



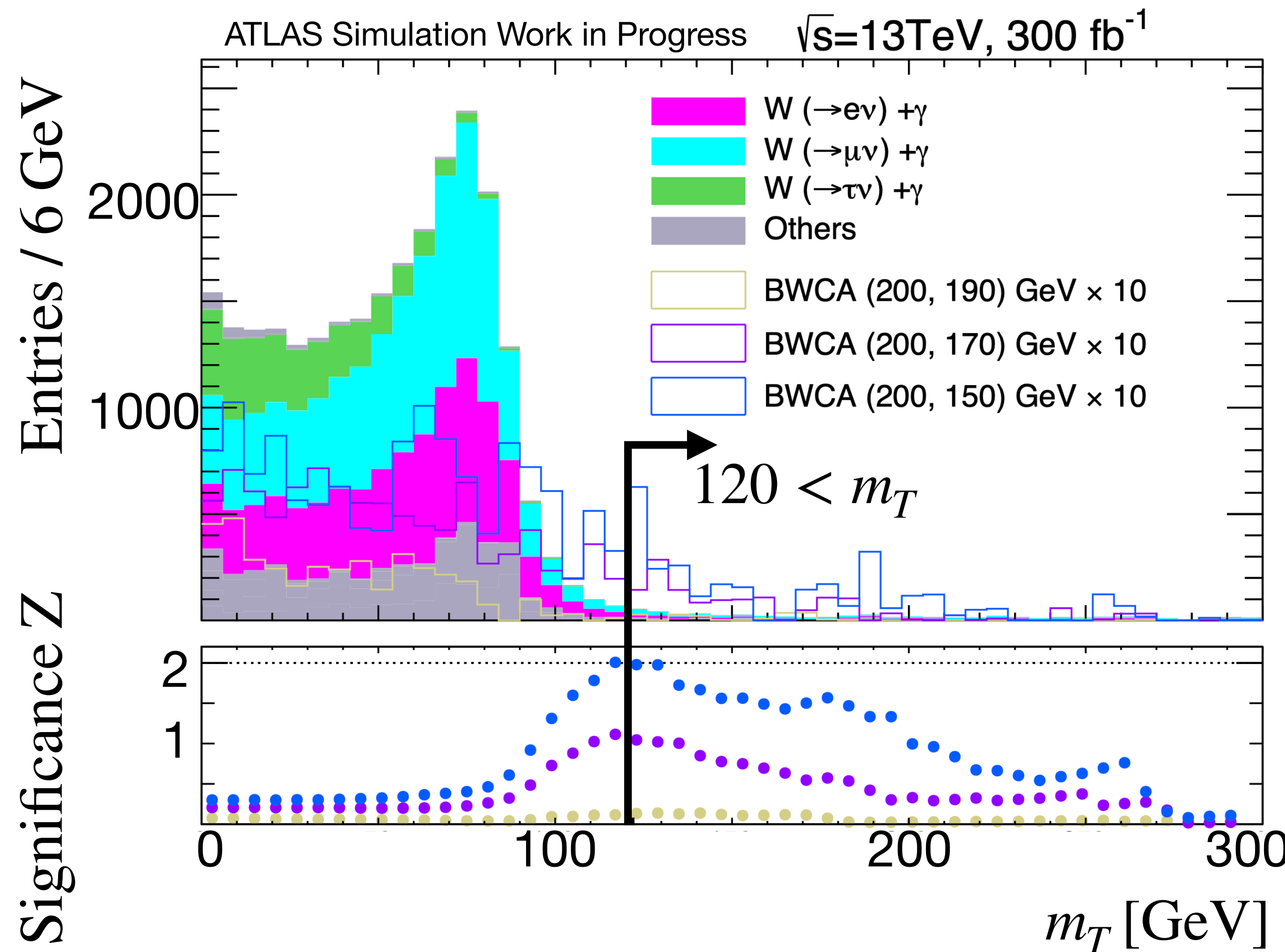
METと p_T^{lepton} で構成したTransverse mass

- 背景事象のレプトンとMETは
 W 由来のため, レプトンとMETで
transverse massを組むと
ヤコビアンピークが見られる

- Transverse mass:

$$m_T = \sqrt{2(MET \times E_T^{lepton} - \mathbf{p}_T^{miss} \cdot \mathbf{p}_T^{lepton})}$$

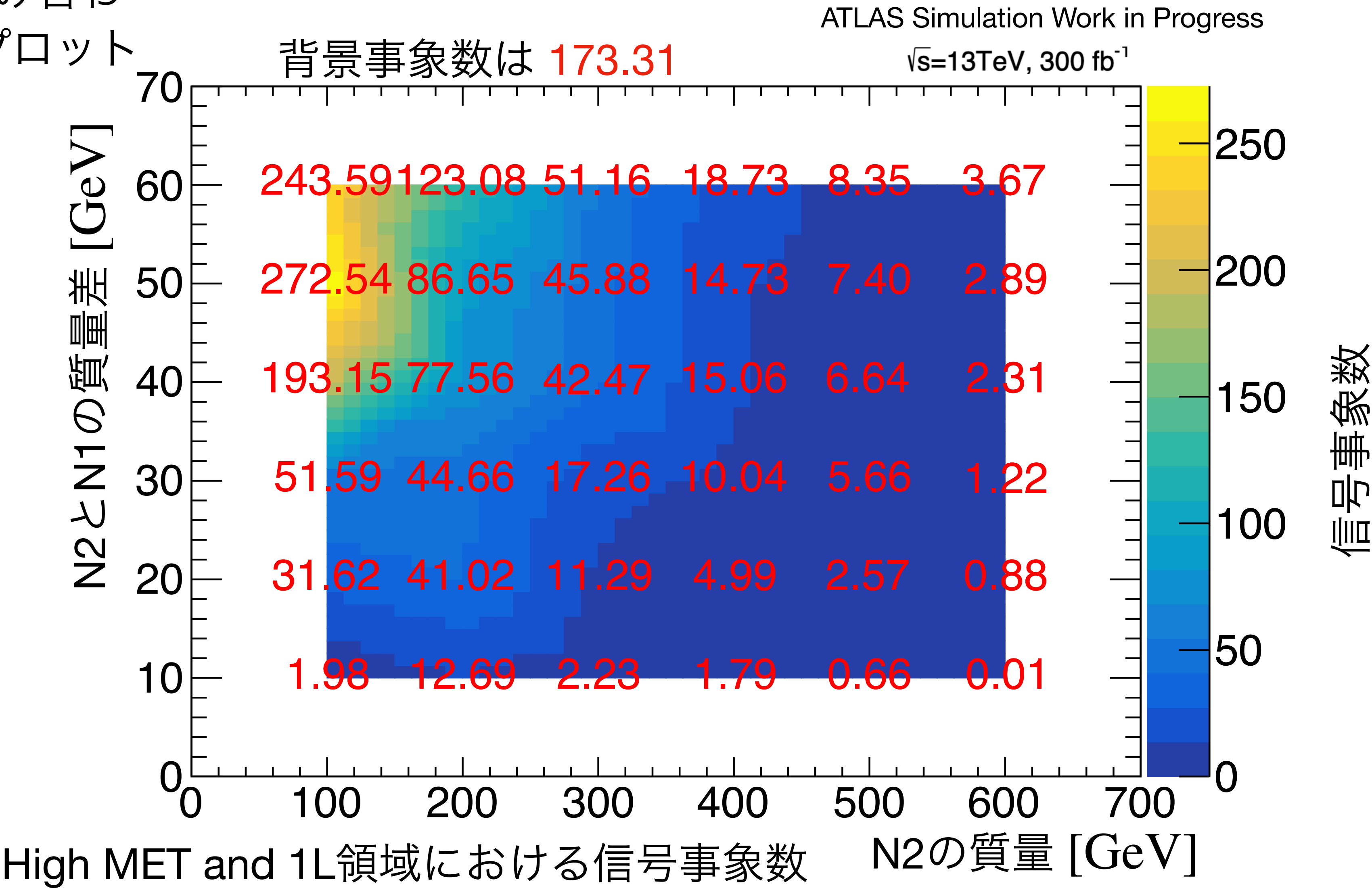
✓ $W + \gamma$ 事象を効果的に削減することができる



High MET and 1L 領域における信号事象数

- 異なるN2とN1の質量の組み合わせにおける信号事象数をプロット
- 300 fb^{-1} に規格化

✓カット後でも多くの信号事象が残っており, 更なる感度向上が期待できる

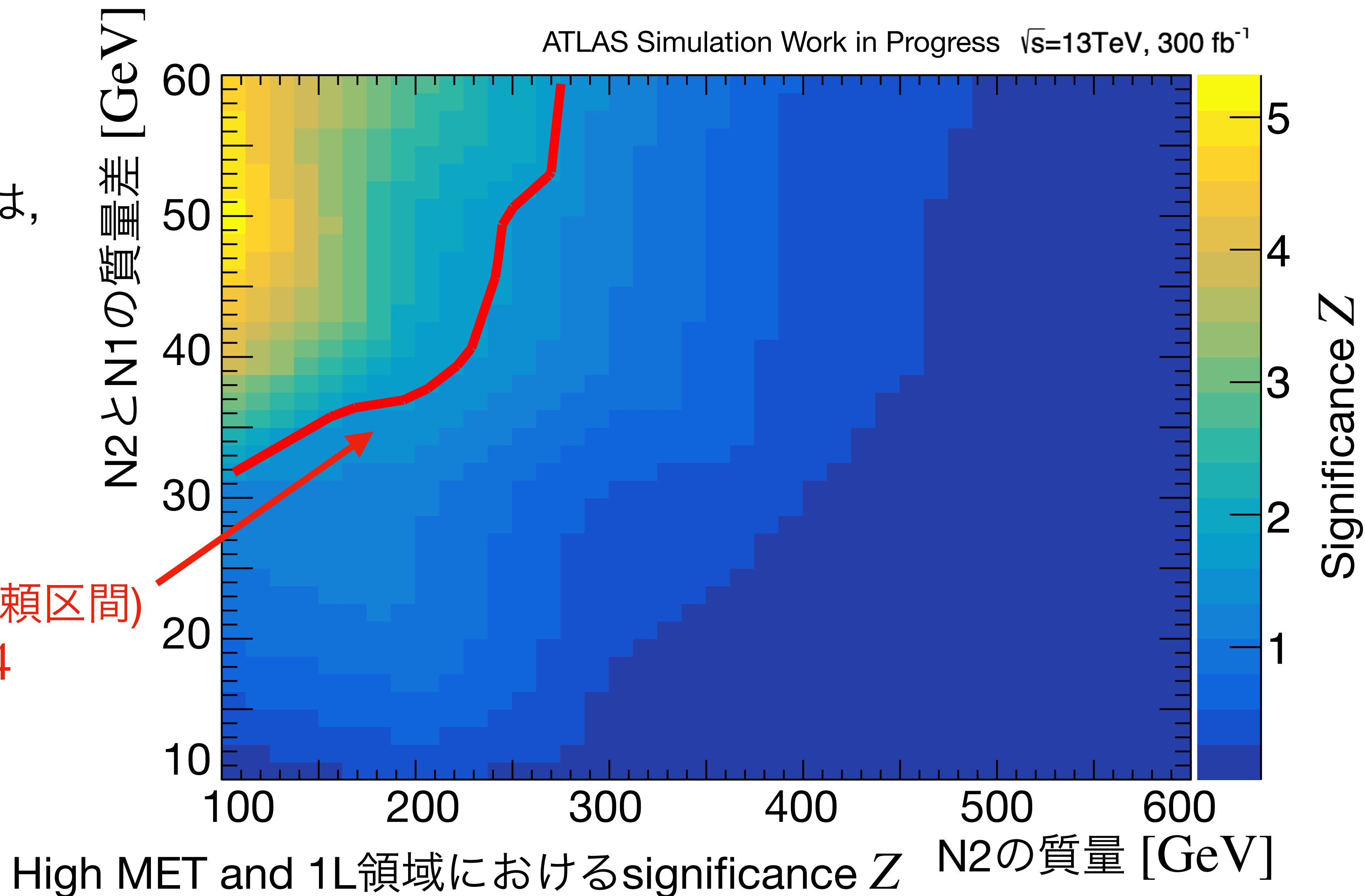


High MET and 1L信号領域によるBWCAシナリオの探索感度

✓N2とN1の質量差が, γ 及び, レプトンの識別閾値に近くなると顕著に探索感度を失う

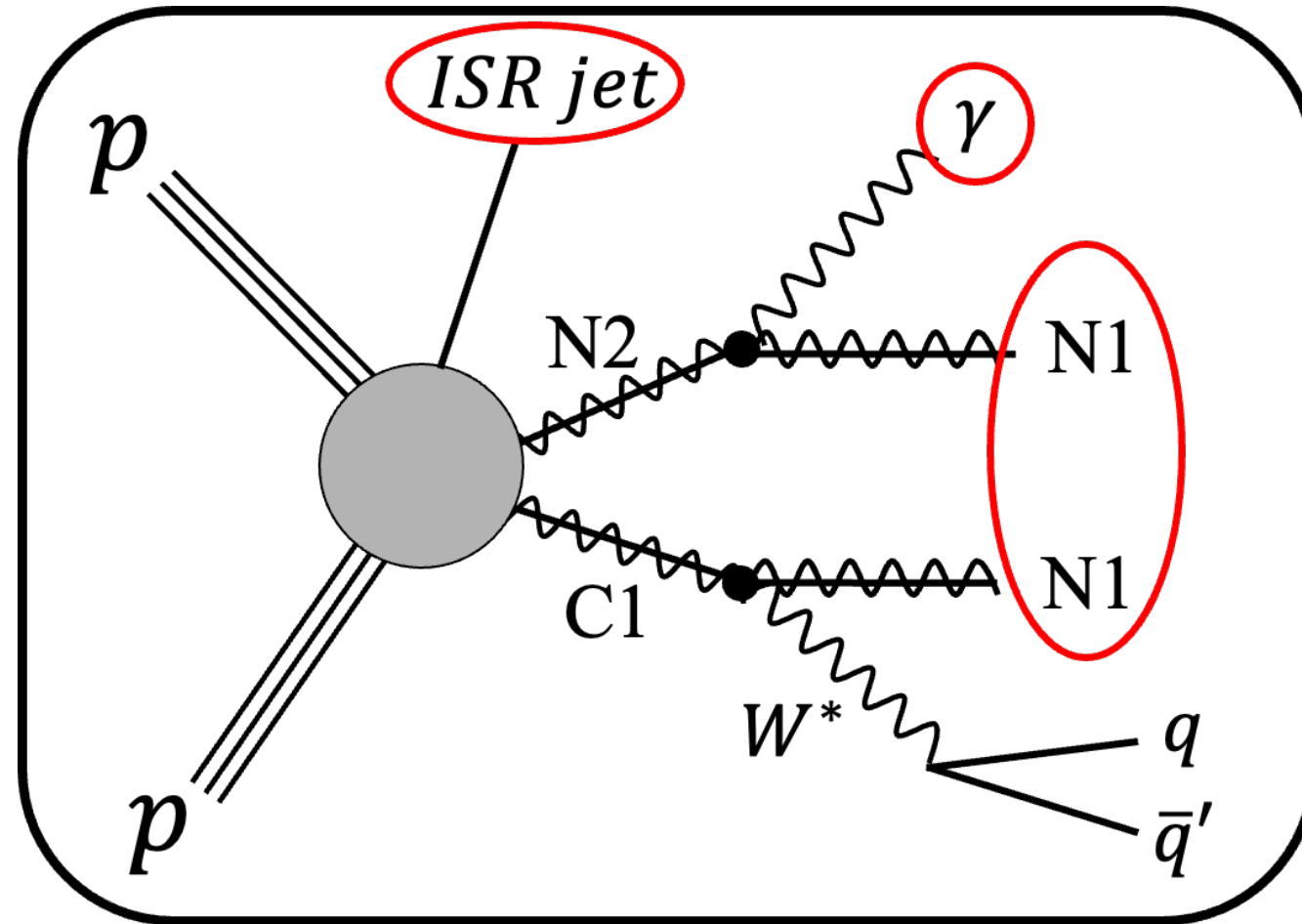
- γ の識別閾値 = 10 GeV
- e の識別閾値 = 4.5 GeV
- μ の識別閾値 = 3.0 GeV
- 本研究が特に興味のある領域は, 質量差が10 - 30 GeVの領域

棄却域 (95 %信頼区間)
 $Z = 1.64$



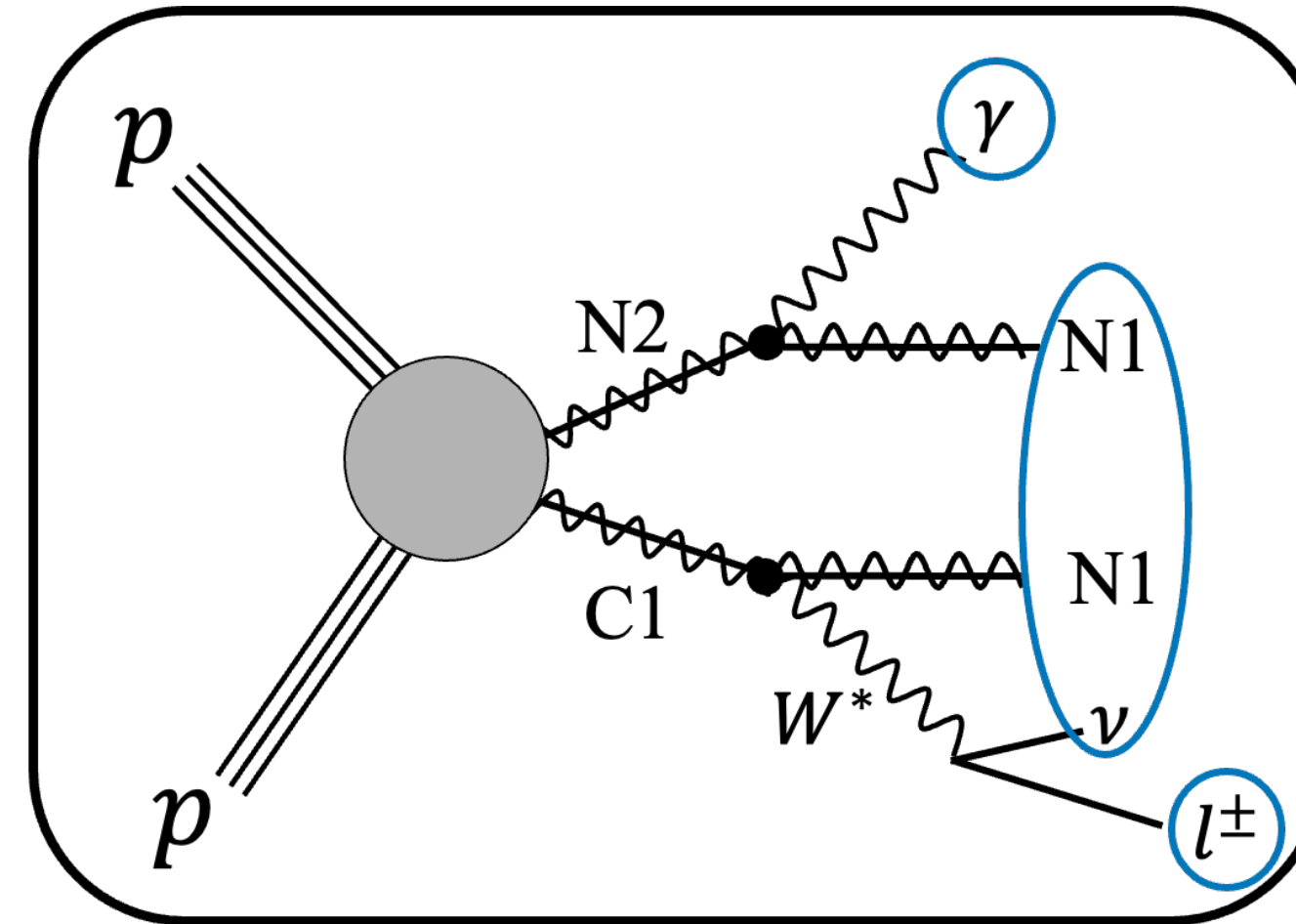
その他の領域に対するpreselectionとkinematicsカット

- Significanceを最大化するように, 以下のように定義



High MET and 0L領域

- $\text{MET} > 200 \text{ GeV}$
- Leading $p_T^{\text{jet}} > 150 \text{ GeV}$
- Leading $p_T^\gamma > 10 \text{ GeV}$
- レプトンの数 == 0
- $m_T(\text{MET}, p_T^\gamma) > 120 \text{ GeV}$
- Leading $p_T^{\text{jet}}/\text{MET} < 0.55$



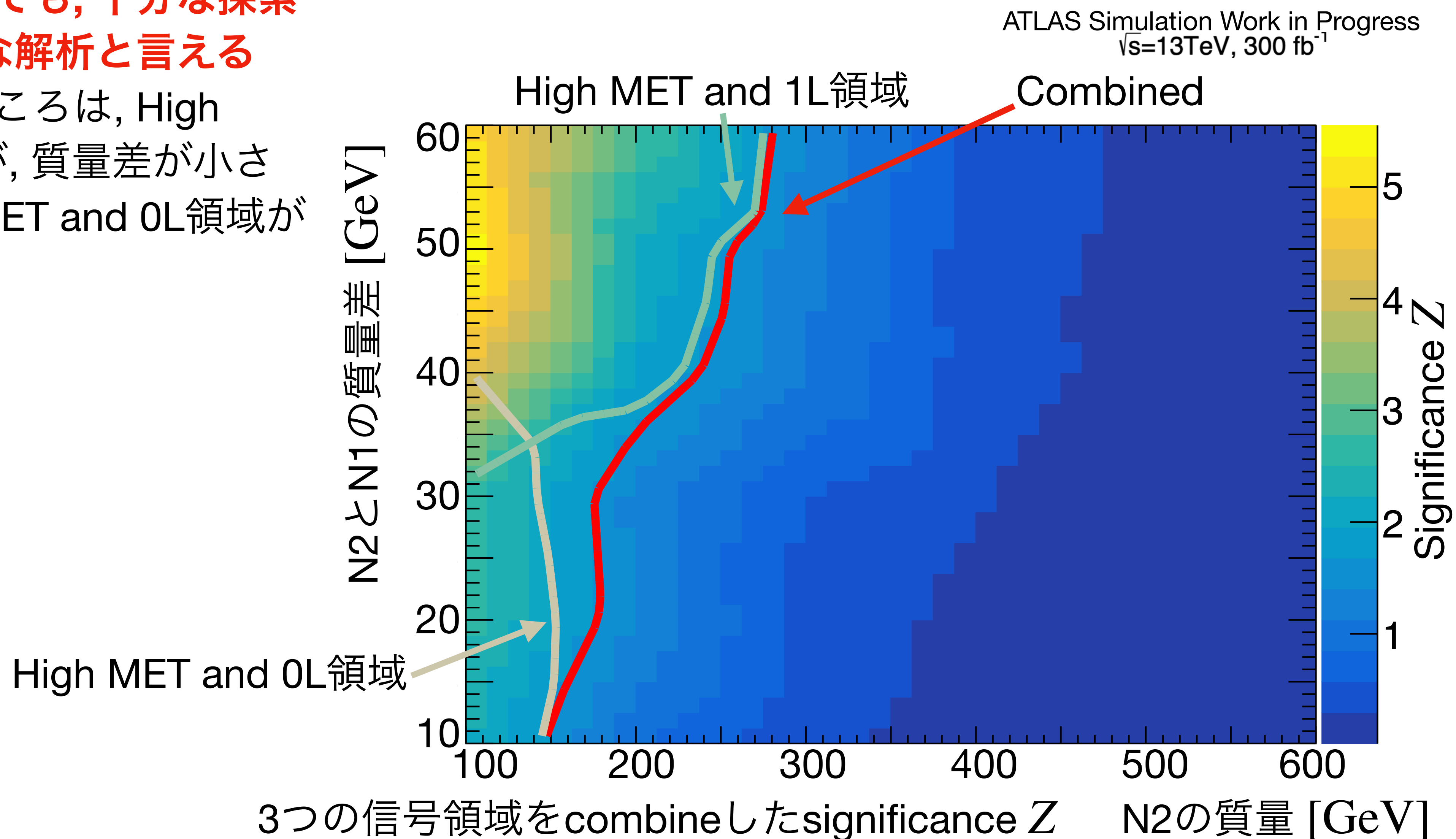
Low MET and 1L領域

- $100 \text{ GeV} < \text{MET} < 200 \text{ GeV}$
- Leading $p_T^\gamma > 10 \text{ GeV}$
- Leading $p_T^{\text{lepton}} > 28 \text{ GeV}$
- レプトンの数 == 1
- $m(\gamma, \text{lepton}) < 75 \text{ GeV}$
or $105 \text{ GeV} < m(\gamma, \text{lepton})$

3つの信号領域をcombineした結果

✓ 基本的な事象選別でも, 十分な探索
感度が見え, 有望な解析と言える

- 質量差が大きいところは, High MET and 1L領域が, 質量差が小さいところはHigh MET and 0L領域が支配的である



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支配的である可能性が明らかになった<-十分に直す
- BWCAシナリオに対する感度評価
 - 3つの信号領域の結果を合わせて, 探索感度を評価
 - ✓基本的なkinematicsカットでも, 十分な探索感度が見える
 - より質量差が小さい領域の探索感度を最大化するためには, High MET and 0L領域が重要になってくる

今後の展望

- より詳細な信号/背景事象の識別手法を開発し感度を最大化した上で, LHC Run 2とRun 3のデータを用いて探索を行う
 - High MET and 0L領域の信号感度の最大化に加え, より低運動量の γ やレプトンを識別する技術の開発が重要である