



ミューオン $g-2$ アノマリーに基づいた LHC-ATLAS実験における スレプトン探索

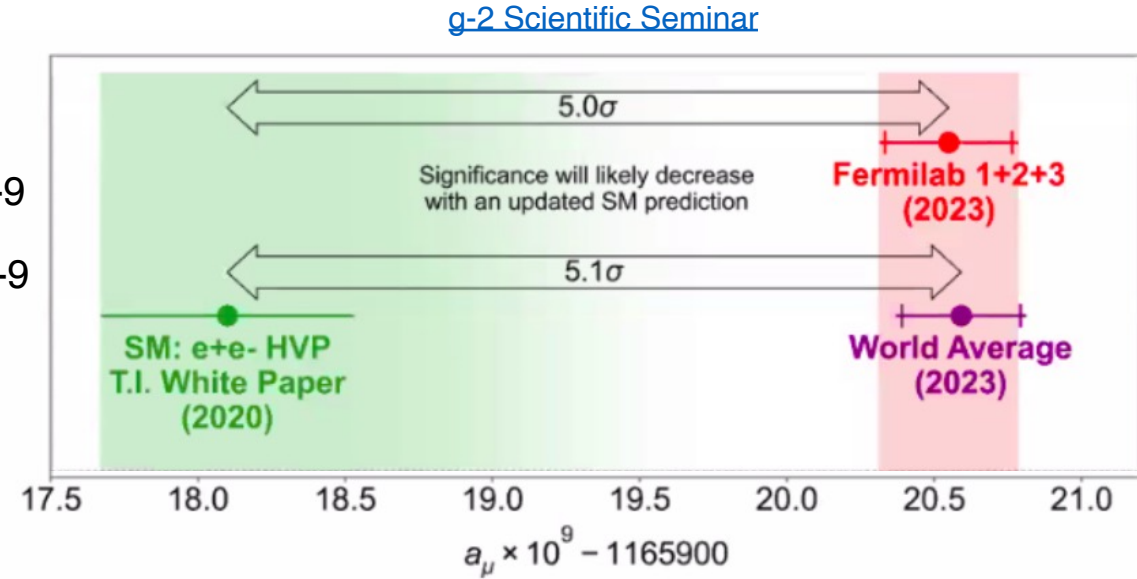
青木 匠,

石野 雅也^A, 奥村 恭幸^A, 陳 詩遠^B

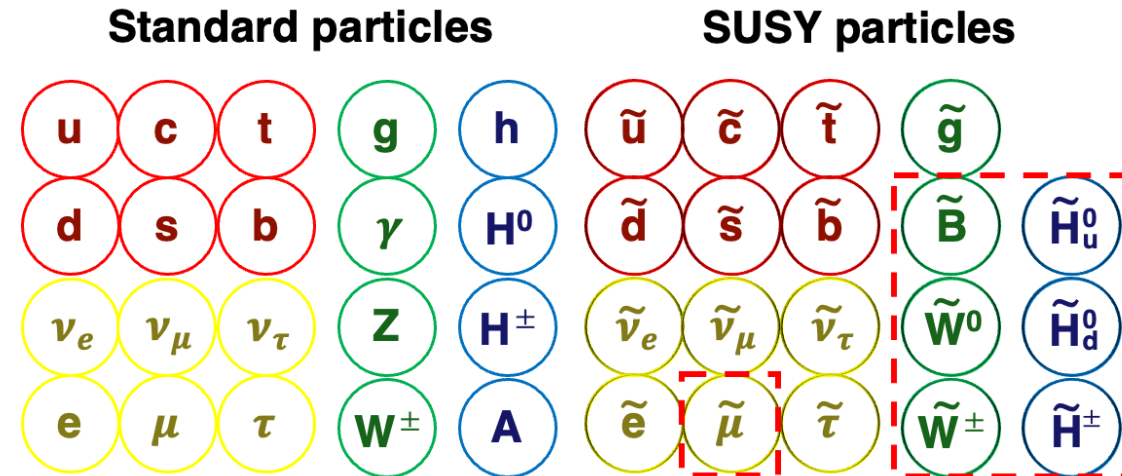
東大理, 東大素セ^A, 京大理^B

ミューオン $g-2$ アノマリーと超対称性

- ミューオン異常磁気能率: $a_\mu \equiv (g-2)_\mu/2$
標準模型で極めて高精度に計算できる
 - 理論値 $a_\mu(\text{SM}) = (1165918.10 \pm 0.43) \times 10^{-9}$
 - 実験値 $a_\mu(\text{exp}) = (1165920.59 \pm 0.22) \times 10^{-9}$
 $\rightarrow \Delta a_\mu = (2.49 \pm 0.50) \times 10^{-9}$
 $\rightarrow 5.0 \sigma$ の乖離 \rightarrow 新物理の兆候?

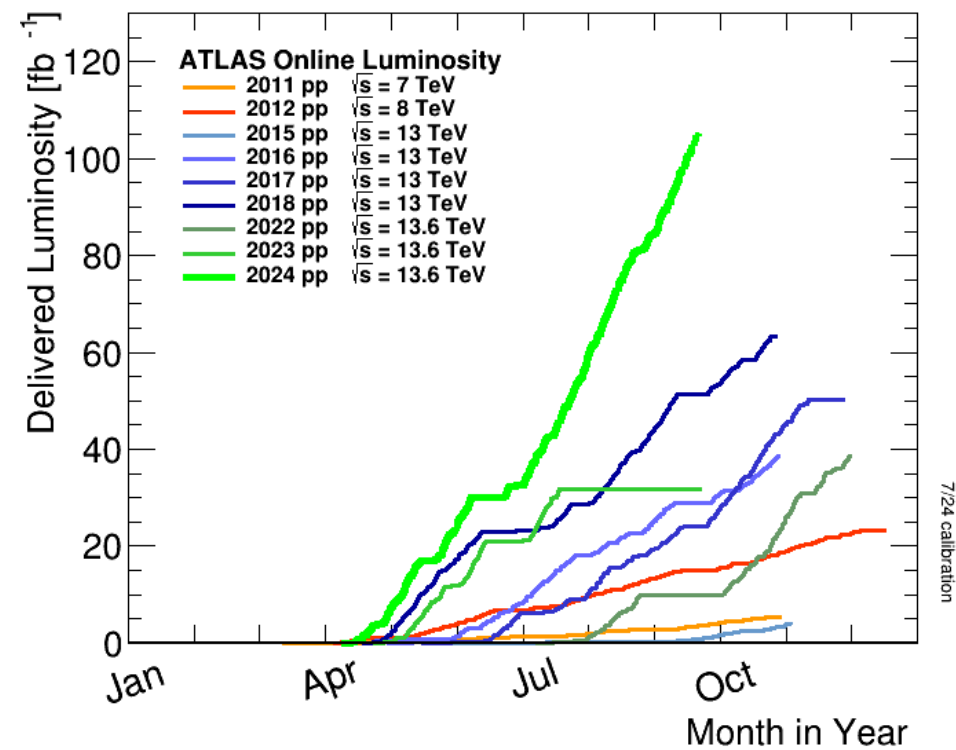
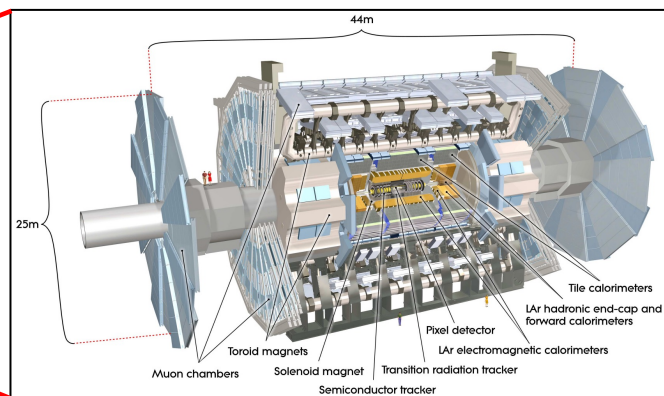
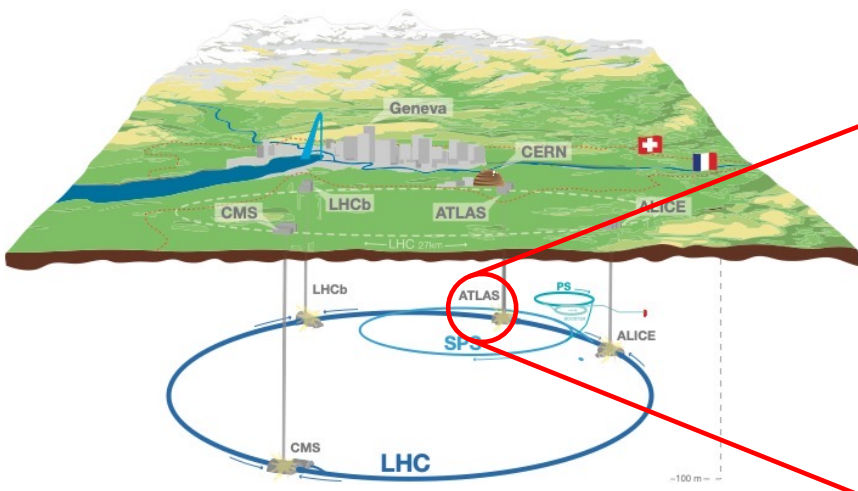


- 超対称性 (Supersymmetry, SUSY)
 - ボソンとフェルミオンを結びつける対称性
 - 標準模型粒子と対をなす超対称性粒子を導入
 - 暗黒物質の存在、階層性問題の解決
力の統一など、多くの標準模型の問題を解決し得る
 - ミューオン $g-2$ アノマリーを説明可能



LHC-ATLAS 実験

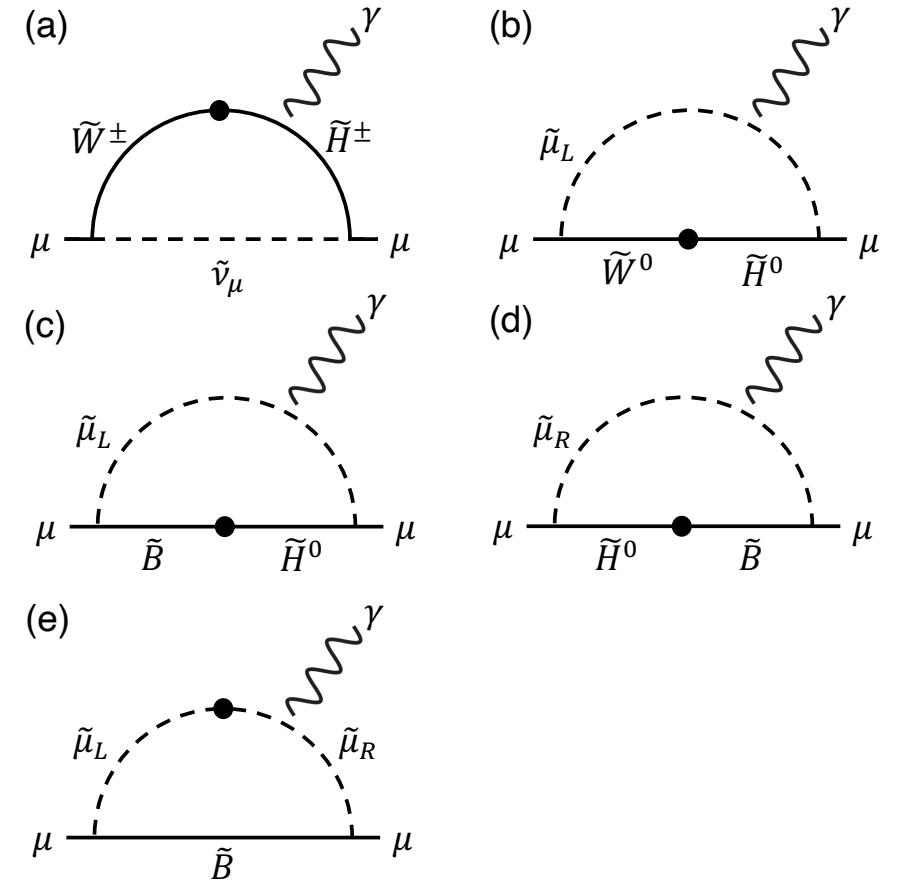
- 世界最高エネルギーの陽子陽子衝突から生じる粒子を観測し、標準模型を超える物理を探索する
- 第2期運転 (Run 2) では重心エネルギー 13 TeV でデータ解析に資するクォリティの物理データを積分ルミノシティにして 140 fb^{-1} 記録した
- 第3期運転 (Run 3) では重心エネルギー 13.6 TeV で、現在までに $\sim 165 \text{ fb}^{-1}$ の物理データを記録した



ミューオン $g - 2$ アノマリーと超対称性

- 超対称性粒子を3つ含んだ 1-loop が主にミューオン $g - 2$ に寄与する
- 超対称性粒子の質量が $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$, $\tan\beta$ が $\mathcal{O}(10)$ の時ミューオン $g - 2$ アノマリーをうまく説明することができる

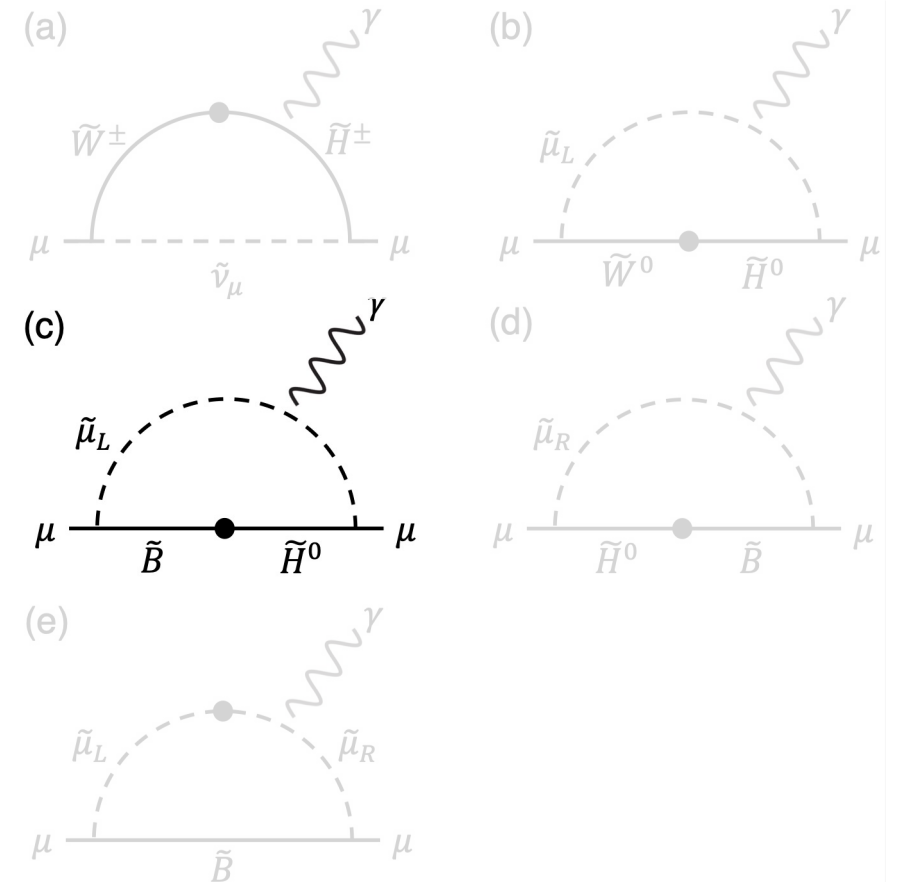
$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm, \tilde{\nu}_\mu) &\simeq 15 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10} \right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu} \right] \left[2 \cdot f_C \left(\frac{M_2^2}{m_{\tilde{\nu}_\mu}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\nu}_\mu}^2} \right) \right] \\
 \text{(b)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{W}^0, \tilde{H}^0, \tilde{\mu}_L^\pm) &\simeq -2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10} \right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu} \right] \left[6 \cdot f_N \left(\frac{M_2^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2} \right) \right] \\
 \text{(c)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{H}^0, \tilde{B}^0, \tilde{\mu}_L^\pm) &\simeq 0.76 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10} \right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_1\mu} \right] \left[6 \cdot f_N \left(\frac{M_1^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2} \right) \right] \\
 \text{(d)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{H}^0, \tilde{B}^0, \tilde{\mu}_R^\pm) &\simeq -1.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10} \right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu} \right] \left[6 \cdot f_N \left(\frac{M_1^2}{m_{\tilde{\mu}_R}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_R}^2} \right) \right] \\
 \text{(e)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{\mu}_L^\pm, \tilde{\mu}_R^\pm, \tilde{B}^0) &\simeq 1.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10} \right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2 m_{\tilde{\mu}_R}^2 / M_1\mu} \right] \left[6 \cdot f_N \left(\frac{m_{\tilde{\mu}_L}^2}{M_1^2}, \frac{m_{\tilde{\mu}_R}^2}{M_1^2} \right) \right]
 \end{aligned}$$



ミューオン $g - 2$ アノマリーと超対称性

- 超対称性粒子を3つ含んだ 1-loop が主にミューオン $g - 2$ に寄与する
- 超対称性粒子の質量が $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$, $\tan\beta$ が $\mathcal{O}(10)$ の時ミューオン $g - 2$ アノマリーをうまく説明することができる

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm, \tilde{\nu}_\mu) &\simeq 15 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10}\right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu}\right] \left[2 \cdot f_C\left(\frac{M_2^2}{m_{\tilde{\nu}_\mu}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\nu}_\mu}^2}\right)\right] \\
 \text{(b)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{W}^0, \tilde{H}^0, \tilde{\mu}_L^\pm) &\simeq -2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10}\right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu}\right] \left[6 \cdot f_N\left(\frac{M_2^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}\right)\right] \\
 \text{(c)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{H}^0, \tilde{B}^0, \tilde{\mu}_L^\pm) &\simeq 0.76 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10}\right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_1\mu}\right] \left[6 \cdot f_N\left(\frac{M_1^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2}\right)\right] \\
 \text{(d)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{H}^0, \tilde{B}^0, \tilde{\mu}_R^\pm) &\simeq -1.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10}\right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{M_2\mu}\right] \left[6 \cdot f_N\left(\frac{M_1^2}{m_{\tilde{\mu}_R}^2}, \frac{\mu^2}{m_{\tilde{\mu}_R}^2}\right)\right] \\
 \text{(e)} \quad \Delta a_\mu(\tilde{\mu}_L^\pm, \tilde{\mu}_R^\pm, \tilde{B}^0) &\simeq 1.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\tan\beta}{10}\right) \left[\frac{(100 \text{ GeV})^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2 m_{\tilde{\mu}_R}^2 / M_1\mu}\right] \left[6 \cdot f_N\left(\frac{m_{\tilde{\mu}_L}^2}{M_1^2}, \frac{m_{\tilde{\mu}_R}^2}{M_1^2}\right)\right]
 \end{aligned}$$



ミューオン $g - 2$ アノマリーと超対称性

- 超対称性粒子を3つ含んだ 1-loop が主にミューオン $g - 2$ に寄与する
- 超対称性粒子の質量が $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$, $\tan\beta$ が $\mathcal{O}(10)$ の時ミューオン $g - 2$ アノマリーをうまく説明することができる

本研究の目標

ミューオン $g - 2$ アノマリー 及び 暗黒物質の存在 からモチベートされる
超対称性モデルを整理し、未探索のモデルを LHC-ATLAS 実験 Run 2 データを用いて探索する

1. 未探索モデルの洗い出し
2. LHC-ATLAS 実験での探索方法
3. 将来の展望

質量階層への制約

3つの超対称性粒子を重い順に表記

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP	$\tilde{\nu}$ LSP	$\tilde{\ell}_R$ LSP
\tilde{H} NLSP		L-H-B R-H-B	L-H-W	W-H-L B-H-L	B-H-R
\tilde{B} NLSP	L-B-H R-B-H		共に含んだ 1-loop無し	H-B-L R-B-L	H-B-R L-B-R
\tilde{W} NLSP	L-W-H	共に含んだ 1-loop無し		H-W-L	共に含んだ 1-loop無し
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W-L-H B-L-H	H-L-B R-L-B	H-L-W		B-L-R
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	B-R-H	H-R-B L-R-B	共に含んだ 1-loop無し	B-R-L	

質量階層への制約

3つの超対称性粒子を重い順に表記

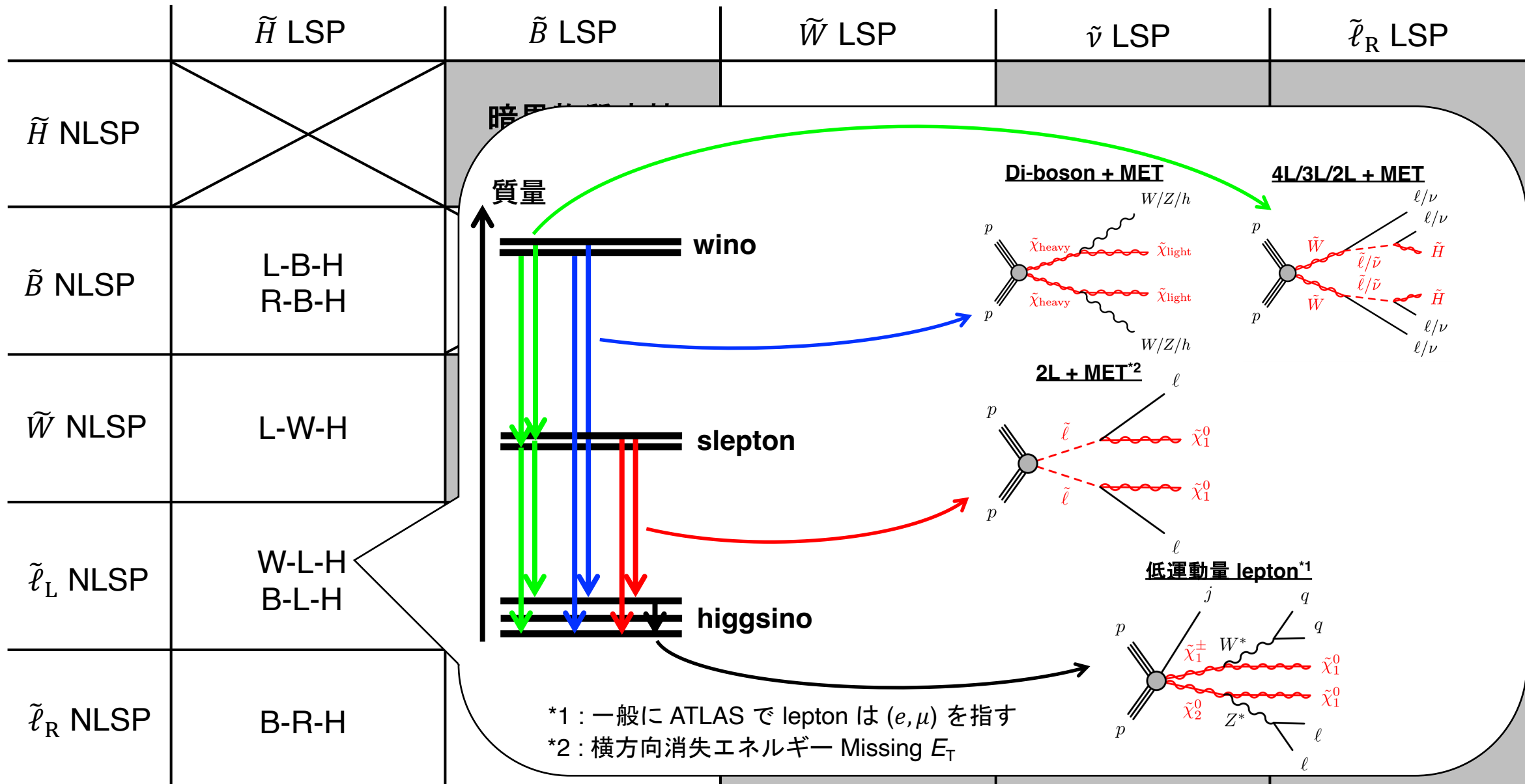
W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP	$\tilde{\nu}$ LSP	$\tilde{\ell}_R$ LSP
\tilde{H} NLSP		暗黒物質直接探索から棄却	L-H-W	暗黒物質直接探索から棄却	荷電暗黒物質より不適
\tilde{B} NLSP	L-B-H R-B-H		共に含んだ1-loop無し		
\tilde{W} NLSP	L-W-H	共に含んだ1-loop無し			
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W-L-H B-L-H	H-L-B R-L-B	H-L-W		
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	B-R-H	H-R-B L-R-B	共に含んだ1-loop無し		

質量階層への制約

3つの超対称性粒子を重い順に表記

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton



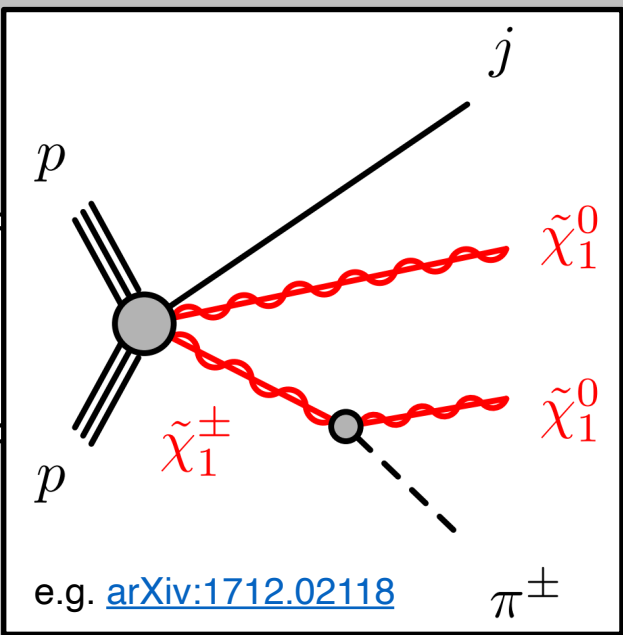
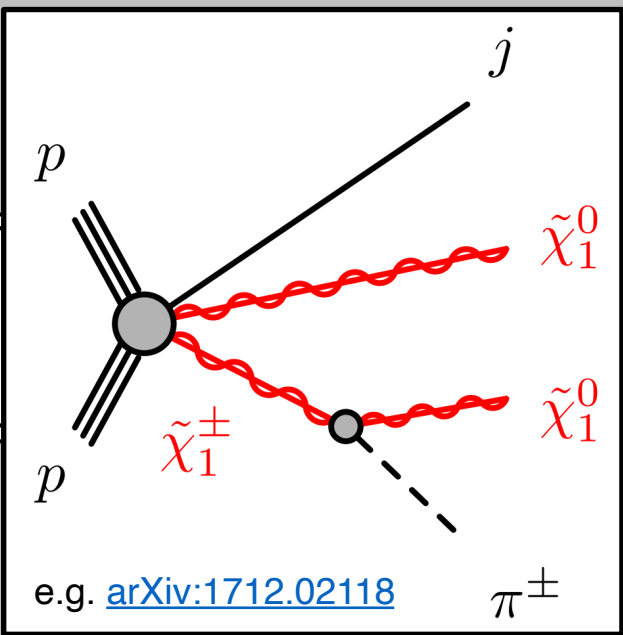
質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP
\tilde{H} NLSP		暗黒物質直接 探索から棄却	H \rightarrow W W
\tilde{B} NLSP	L \rightarrow B \rightarrow H R \rightarrow B \rightarrow H H		共に含んだ 1-loop無し
\tilde{W} NLSP	W \rightarrow H H	共に含んだ 1-loop無し	
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W \rightarrow L \rightarrow H L \rightarrow H H	H \rightarrow B R \rightarrow B L \rightarrow B	W
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	R \rightarrow H H	H \rightarrow B L \rightarrow B R \rightarrow B	共に含んだ 1-loop無し

質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP		
\tilde{H} NLSP	 <p>e.g. arXiv:1712.02118</p>		H \rightarrow W W 消失飛跡		
\tilde{B} NLSP			L \rightarrow B \rightarrow H R \rightarrow B \rightarrow H	H	共に含んだ 1-loop無し
\tilde{W} NLSP	W \rightarrow H	H	 <p>e.g. arXiv:1712.02118</p>		
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W \rightarrow L \rightarrow H L \rightarrow H	H			H \rightarrow B R \rightarrow B
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	R \rightarrow H	H	H \rightarrow B L \rightarrow B	R \rightarrow B	共に含んだ 1-loop無し

質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP
\tilde{H} NLSP		暗黒物質直接 探索から棄却	H \rightarrow W Di-boson + MET W 消失飛跡
\tilde{B} NLSP	L \rightarrow B \rightarrow H R \rightarrow B \rightarrow H		共に含んだ 1-loop無し
\tilde{W} NLSP	W \rightarrow H Di-boson + MET	共に含んだ 1-loop無し	
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W \rightarrow L \rightarrow H 4 / 3 / 2 lepton + MET	L \rightarrow H 2 lepton + MET	H \rightarrow B Di-boson + MET R \rightarrow B 2 lepton + MET
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	R \rightarrow H 2 lepton + MET	H \rightarrow B Di-boson + MET L \rightarrow B 2 lepton + MET	W 消失飛跡

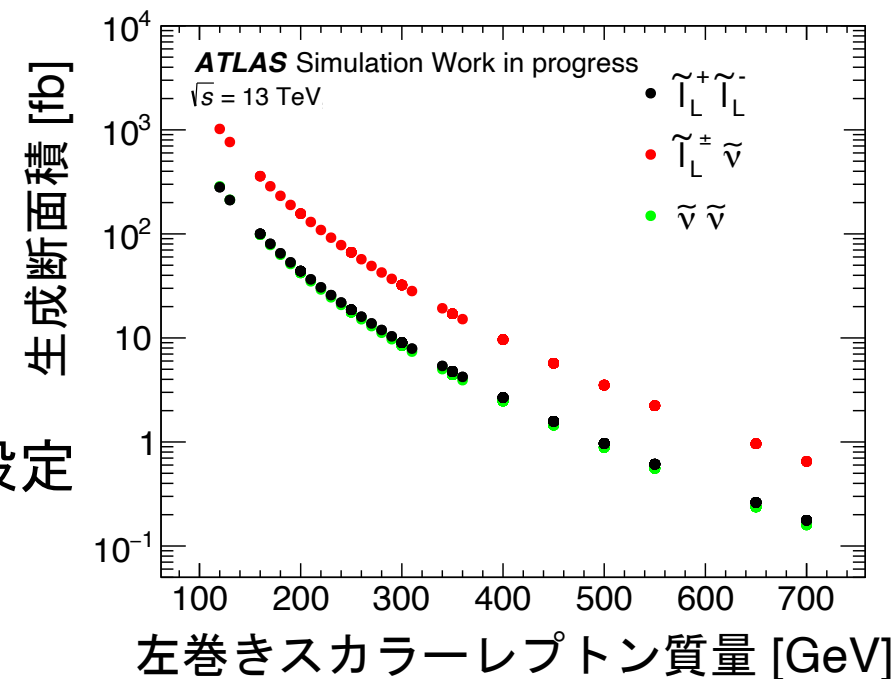
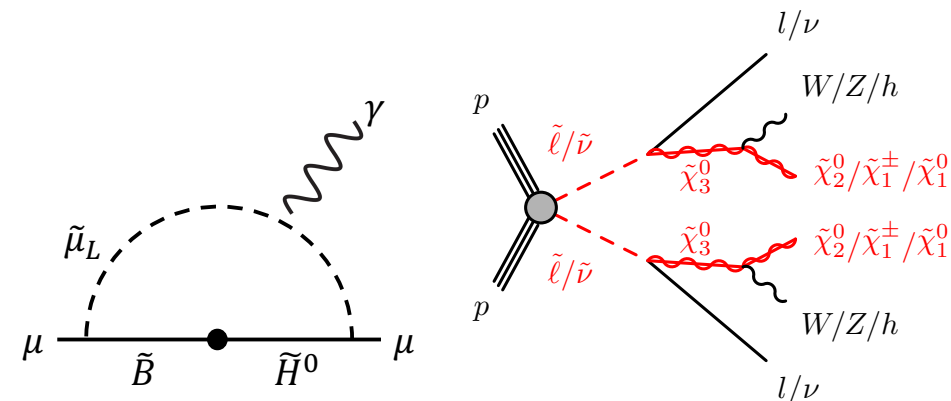
着目する信号事象と解析戦略

- 左巻きスカラーレプトン、ビーノ、ヒグシーノの順に軽くなる質量階層
 - 既存の解析が良い感度を持たない質量階層
 - 詳細 backup

- $\tilde{l}_L^+ \tilde{l}_L^-$ 生成 / $\tilde{l}_L^\pm \tilde{\nu}$ 生成
 - 生成断面積は $\tilde{l}_L^\pm \tilde{\nu}$ 生成が $\tilde{l}_L^+ \tilde{l}_L^-$ 生成に比べて 3 - 4 倍大きい

解析戦略

- 3レプトン終状態
- 終状態に現れるレプトン (e/μ) の数、フレーバー、電荷で分類し 2 つの信号領域 (SR) を設定
- 全ての信号領域のデータ数を同時フィットすることにより信号を抽出



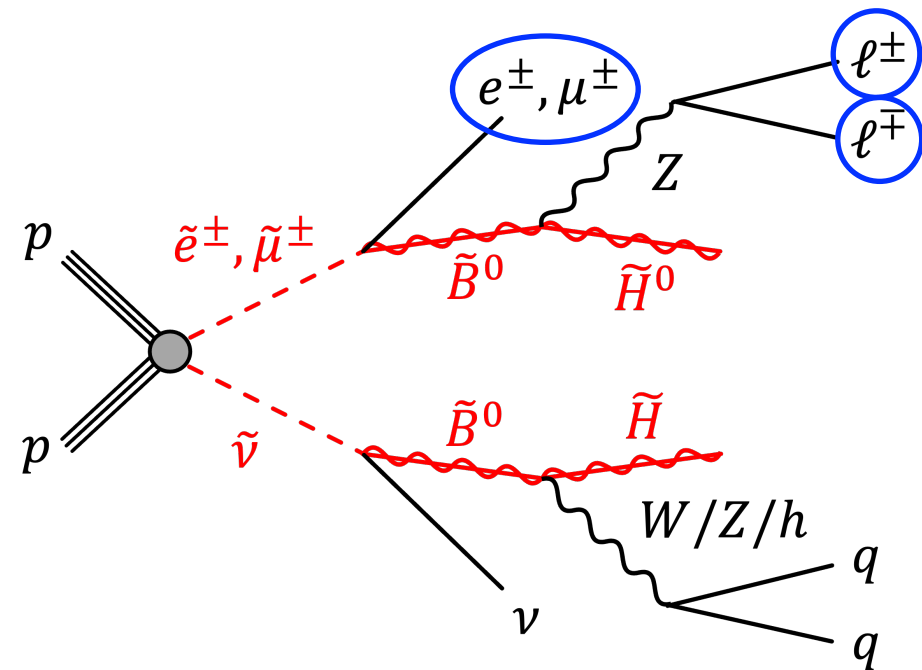
信号領域 (1)

1. SR SFOS (3 Lepton Same-Flavor Opposite-Sign)

- 3つのレプトンの中に SFOS 対を要求 (e.g. $e^+e^-e^-$, $e^+\mu^+\mu^-$)
- SFOS 対の不変質量 m_{ll} の内、 $|m_{ll} - m_Z| < 10 \text{ GeV}$ となる組合せの有無で分類
- 主な背景事象：**WZ** \rightarrow $lvll$

• 事象選別

- シングルレプトントリガー
<レプトン選別>
- 横運動量： $> 28 \text{ GeV}$, $> 20 \text{ GeV}$, $> 10 \text{ GeV}$
<イベントの性質>
- 消失横エネルギー： 150 GeV 以上
- 横方向質量： 125 GeV 以上
- b-jet 数： 0 本



信号領域 (1)

1. SR SFOS (3 Lepton Same-Flavor Opposite-Sign)

- 3つのレプトンの中に SFOS 対を要求 (e.g. $e^+e^-e^-$, $e^+\mu^+\mu^-$)
- SFOS 対の不変質量 m_{ll} の内、 $|m_{ll} - m_Z| < 10$ GeVとなる組合せの有無で分類

• 主な背景事象：**WZ** \rightarrow $lvll$

• 事象選別

- シングルレプトントリガー

<レプトン選別>

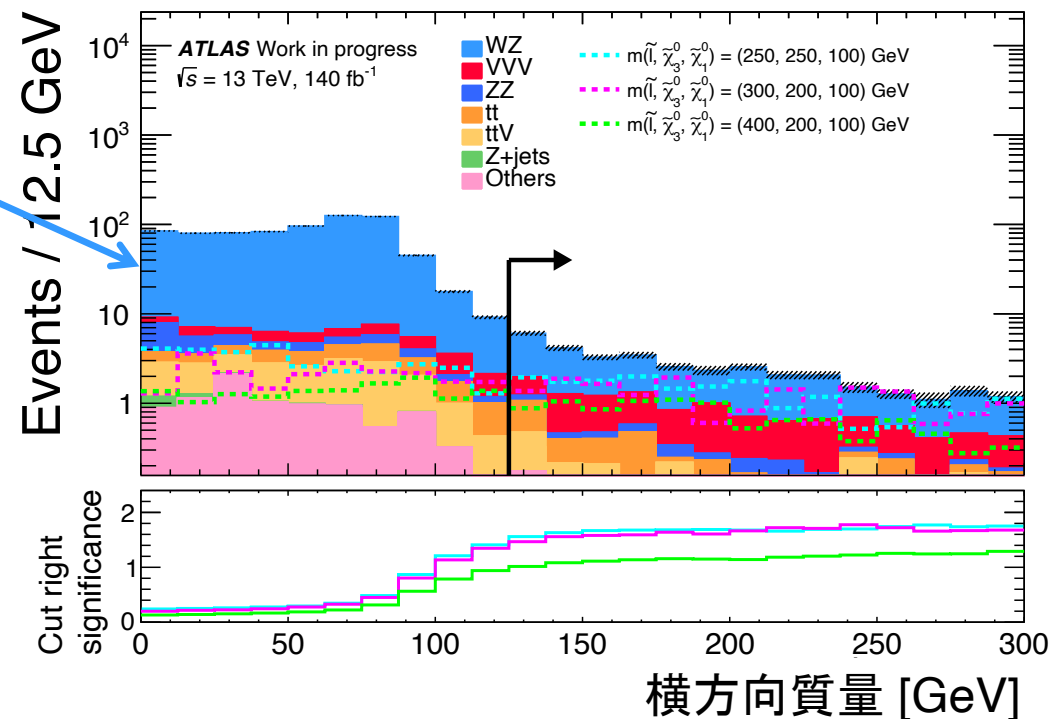
- 横運動量： > 28 GeV, > 20 GeV, > 10 GeV

<イベントの性質>

- 消失横エネルギー： 150 GeV 以上

- **横方向質量： 125 GeV 以上**

- b-jet 数： 0 本



信号領域 (2)

2. SR SS (3 Lepton Same-Sign)

- 3つのレプトンが全て同じ電荷を持つ事象 (e.g. $e^+e^+e^+$, $e^-\mu^-\mu^-$)
- ATLAS では未探索の phase space (cf. [b-jetを含むもの](#) → b-jetを要求するため本信号に適さない探索)
- レプトンフレーバーの組み合わせで分類 : $eee, ee\mu, e\mu\mu + \mu\mu\mu$
- 主な背景事象 : $WZ \rightarrow l\nu ll$ における電荷同定ミス, フェイクレプトン事象

事象選別

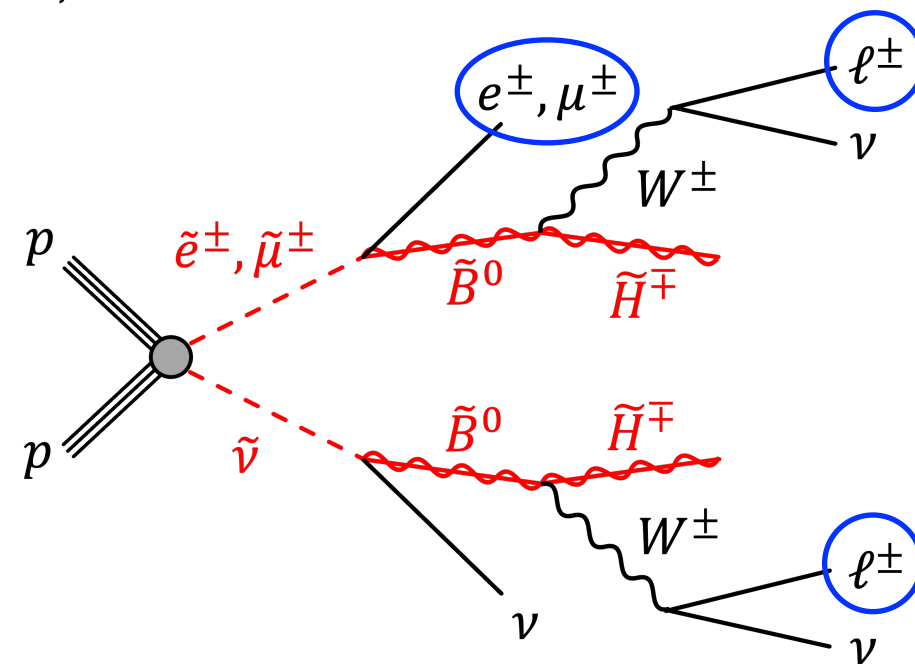
- シングルレプトントリガー

<レプトン選別>

- 横運動量 : $> 28 \text{ GeV}, > 20 \text{ GeV}, > 10 \text{ GeV}$

<イベントの性質>

- 消失横エネルギー : 50 GeV 以上
- b-jet 数 : 0 本



信号領域 (2)

2. SR SS (3 Lepton Same-Sign)

- 3つのレプトンが全て同じ電荷を持つ事象 (e.g. $e^+e^+e^+$, $e^-\mu^-\mu^-$)
- ATLAS では未探索の phase space (cf. [b-jetを含むもの](#) → b-jetを要求するため本信号に適さない探索)
- レプトンフレーバーの組み合わせで分類 : $eee, ee\mu, e\mu\mu + \mu\mu\mu$
- 主な背景事象 : **WZ → $lvll$ における電荷同定ミス**, **フェイクレプトン事象**

事象選別

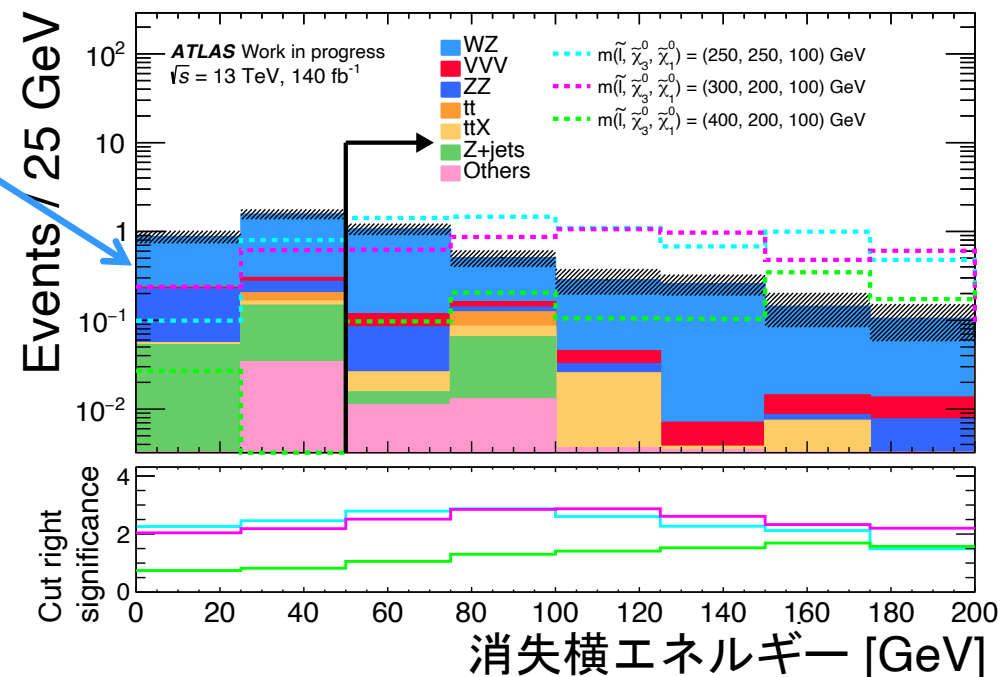
- シングルレプトントリガー

<レプトン選別>

- 横運動量 : > 28 GeV, > 20 GeV, > 10 GeV

<イベントの性質>

- **消失横エネルギー : 50 GeV 以上**
- b-jet 数 : 0 本



背景事象推定

- 主要な背景事象の推定方法を確立

- 電荷同定ミス背景事象

- MC と実データでの電荷同定ミスの確率の違いを $Z \rightarrow ee$ を用いて測定し、scale factor (SF) としてMC の補正に用いる

- $WZ \rightarrow lvll$ 背景事象

- $WZ \rightarrow lvll$ の purity が高い ($> 90\%$) 制御領域 (CRWZ) を用いて Normalization Factor (NF) を見積もる

- フェイクレプトン背景事象

- レプトンの isolation カット等を逆転させ、フェイクレプトン事象を enhance した制御領域 (anti-ID 領域) を用いて推定する。 $Z \rightarrow ll +$ フェイクレプトン事象を用いてフェイクレプトンが信号事象に入る確率を求める

- $t\bar{t}$ 背景事象

- $t\bar{t}$ 事象は MC を用いて推定する

背景事象推定

- 主要な背景事象の推定方法を確立

- 電荷同定ミス背景事象

- MC と実データでの電荷同定ミスの確率の違いを $Z \rightarrow ee$ を用いて測定し、scale factor (SF) としてMC の補正に用いる

背景事象推定

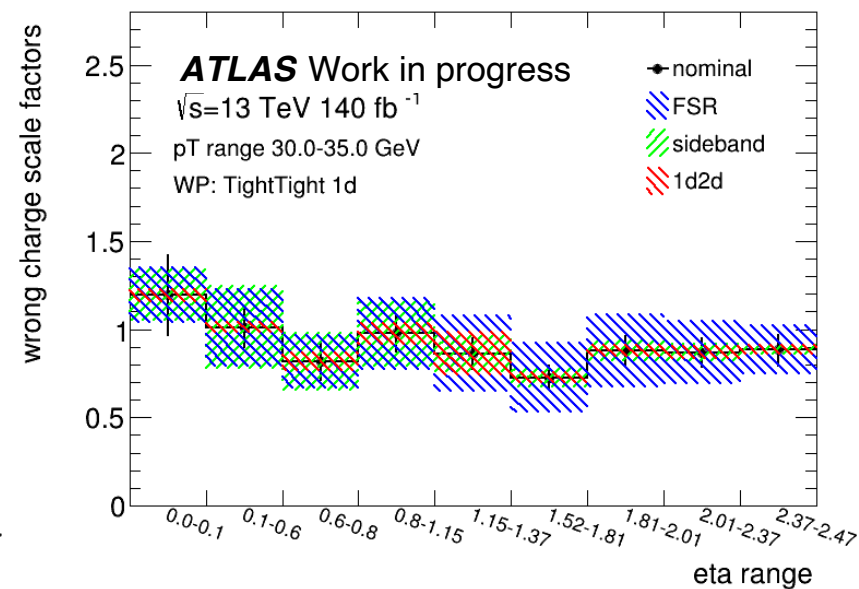
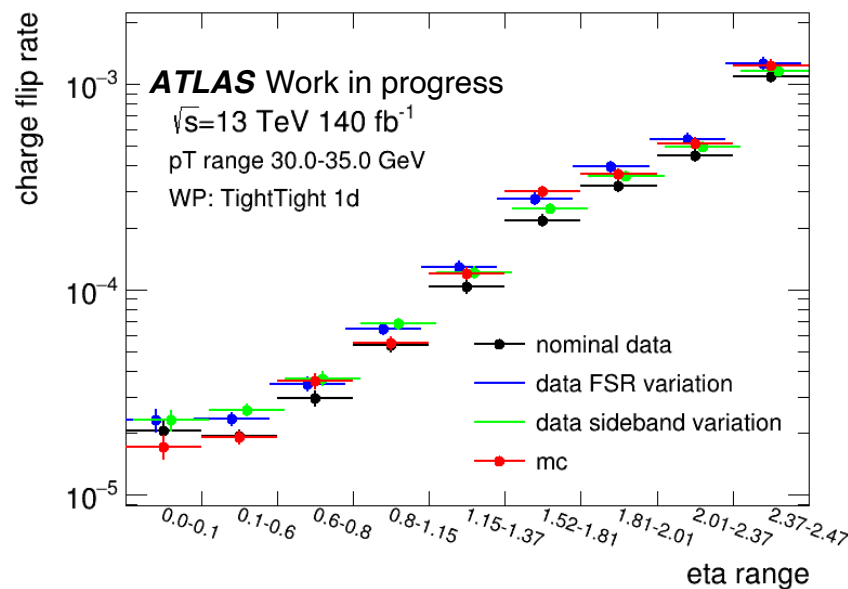
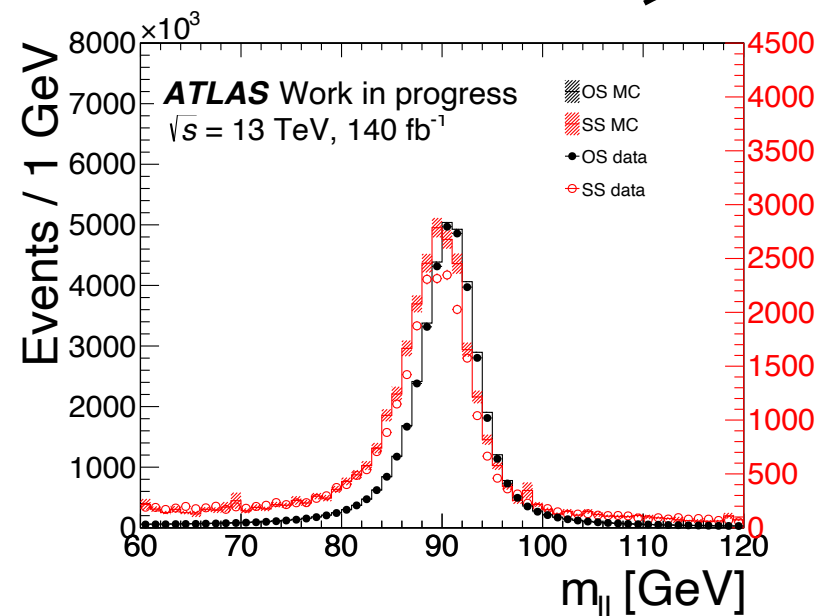
- 主要な背景事象の推定方法を確立

- 電荷同定ミス背景事象

- MC と実データでの電荷同定ミスの確率の違いを $Z \rightarrow ee$ を用いて測定し、scale factor (SF) としてMC の補正に用いる

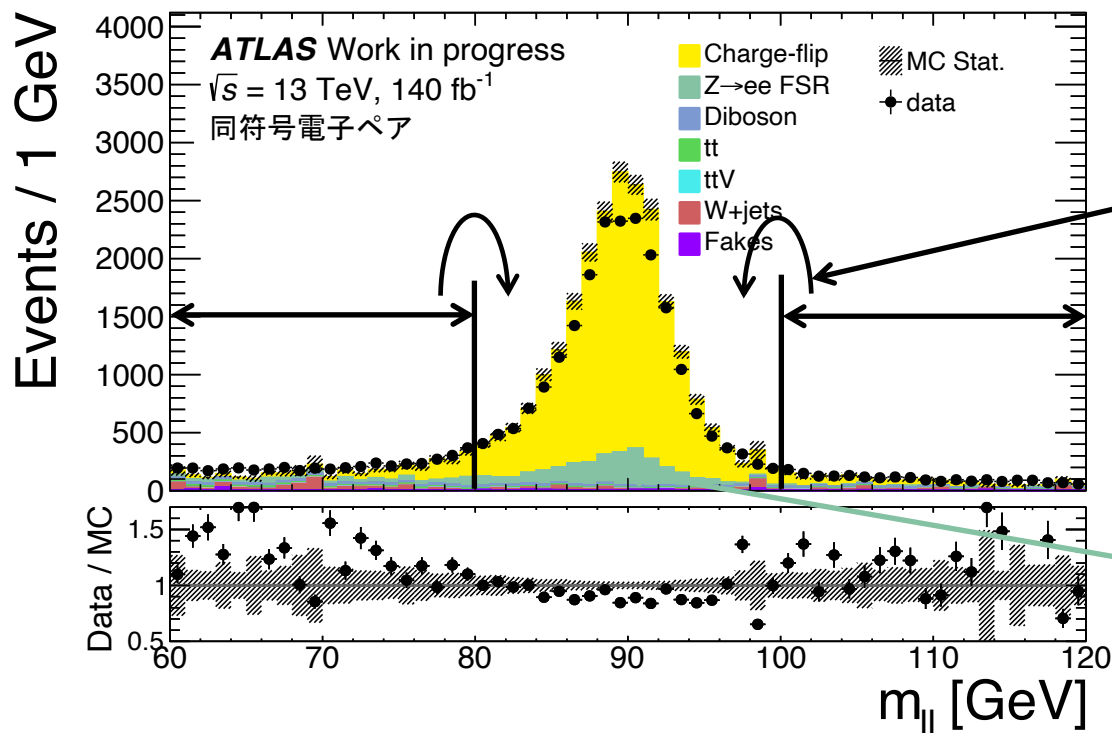
電荷同定ミスの確率をデータ及び
MCのフィットにより抽出

データとMCの確率の比を求める



系統誤差の見積り

- 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
 - 本解析特有の誤差
 - Data-driven な背景事象推定方法の限界に由来する誤差
 - 電荷同定ミス背景事象
 - $Z \rightarrow ee$ 以外の寄与をデータから除去する際に付く誤差



(2) $Z \rightarrow ee$ 以外の物理過程やフェイク電子による寄与は質量サイドバンドの平均を使って差し引く
差し引きをする時としない時のSFの差を系統誤差として計上

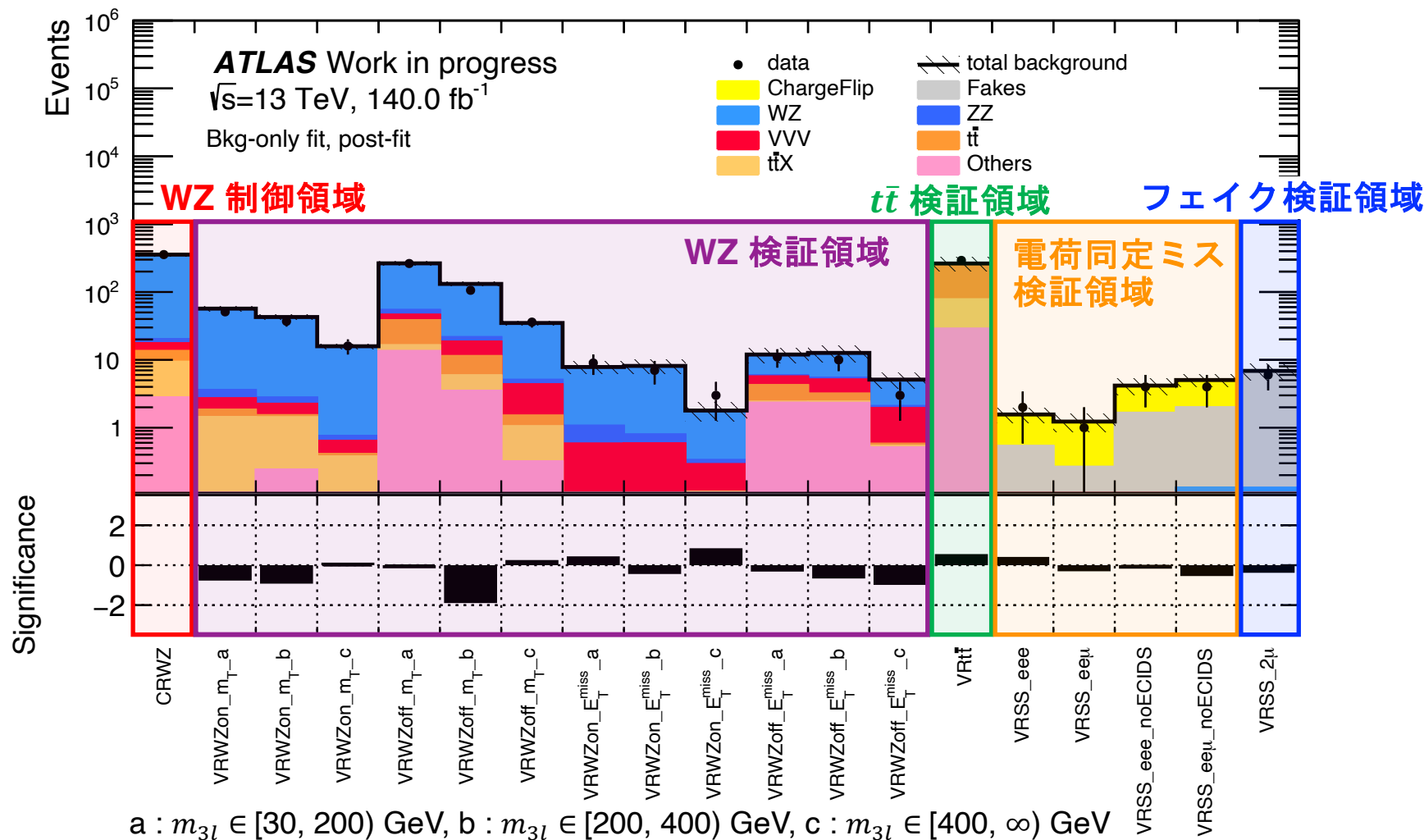
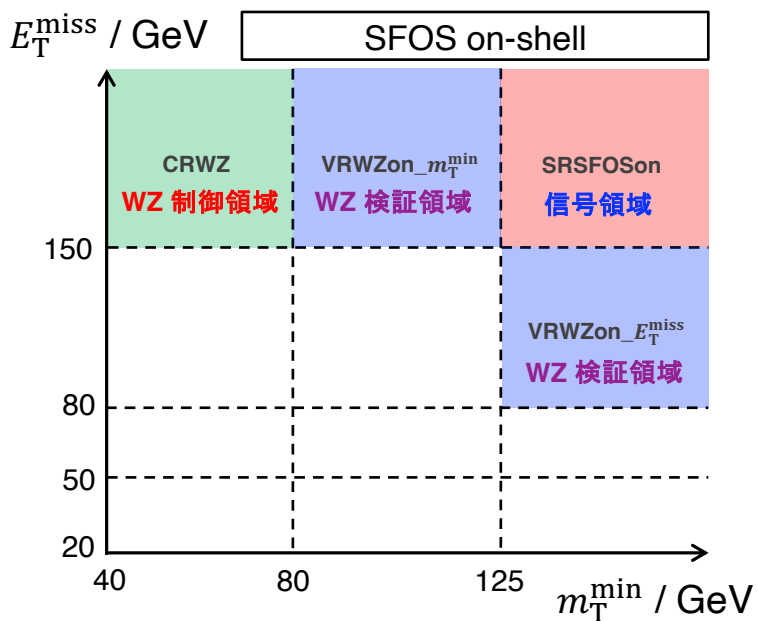
(1) 終状態輻射光子による同符号電子ペアはMCを使って差し引く
差し引きをする時としない時のSFの差を系統誤差として計上

系統誤差の見積り

- 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
 - 本解析特有の誤差
 - Data-driven な背景事象推定方法の限界に由来する誤差
 - 電荷同定ミス背景事象
 - $Z \rightarrow ee$ 以外の寄与をデータから除去する際に付く誤差
 - 電荷同定ミスの確率の parametrization に関する誤差
 -
 - 理論誤差
 - 生成断面積、 α_S 、PDF 等
 - 実験誤差
 - MC 較正に関する誤差

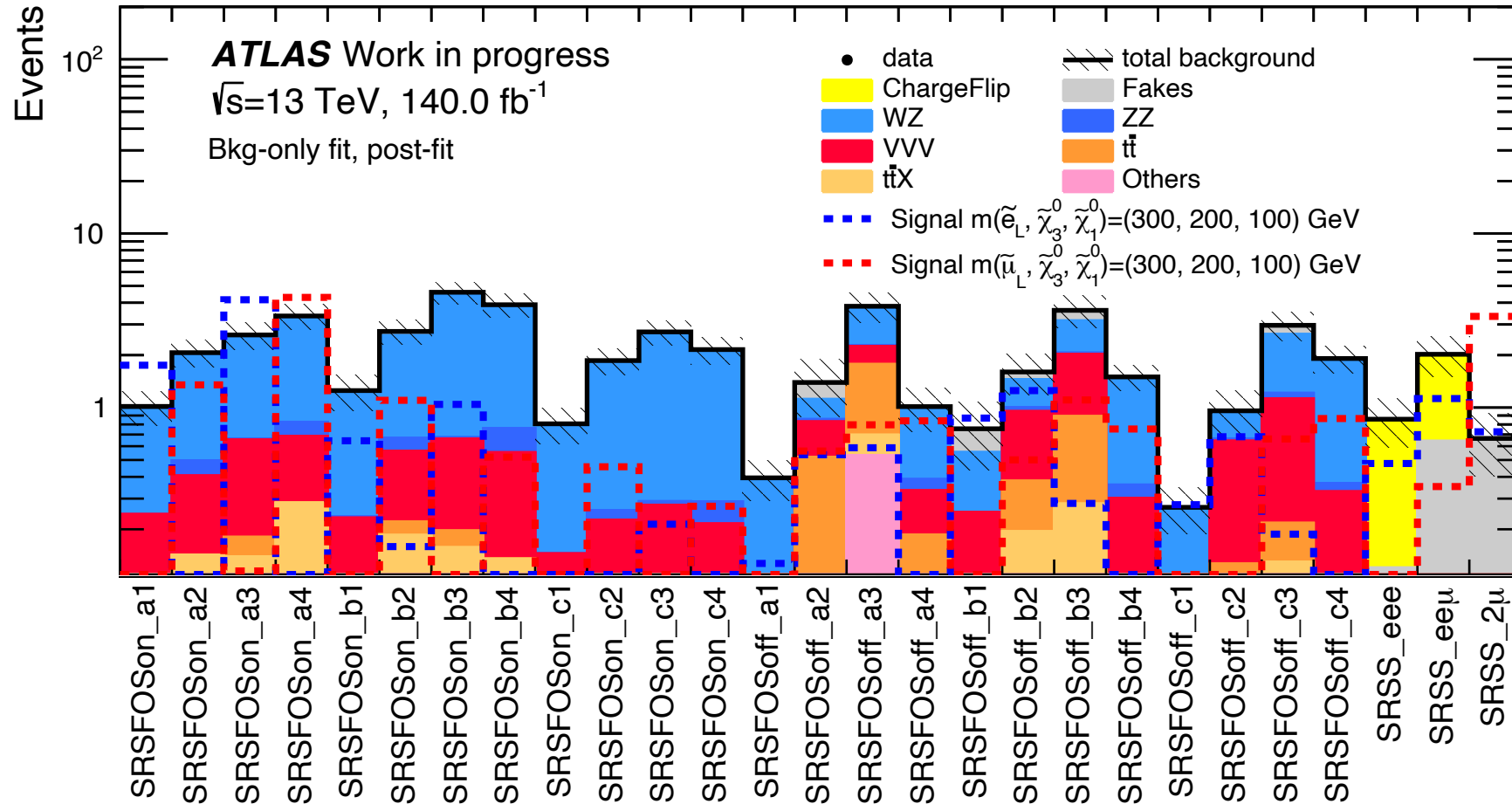
背景事象推定結果

- 背景事象を正しく推定できているか確認するために信号領域の周りに検証領域を設定
- 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



信号領域において期待されるイベント数

a : $m_{3l} \in [30, 200)$ GeV, b : $m_{3l} \in [200, 400)$ GeV, c : $m_{3l} \in [400, \infty)$ GeV, 1 : eee , 2 : $ee\mu$, 3 : $e\mu\mu$, 4 : $\mu\mu\mu$

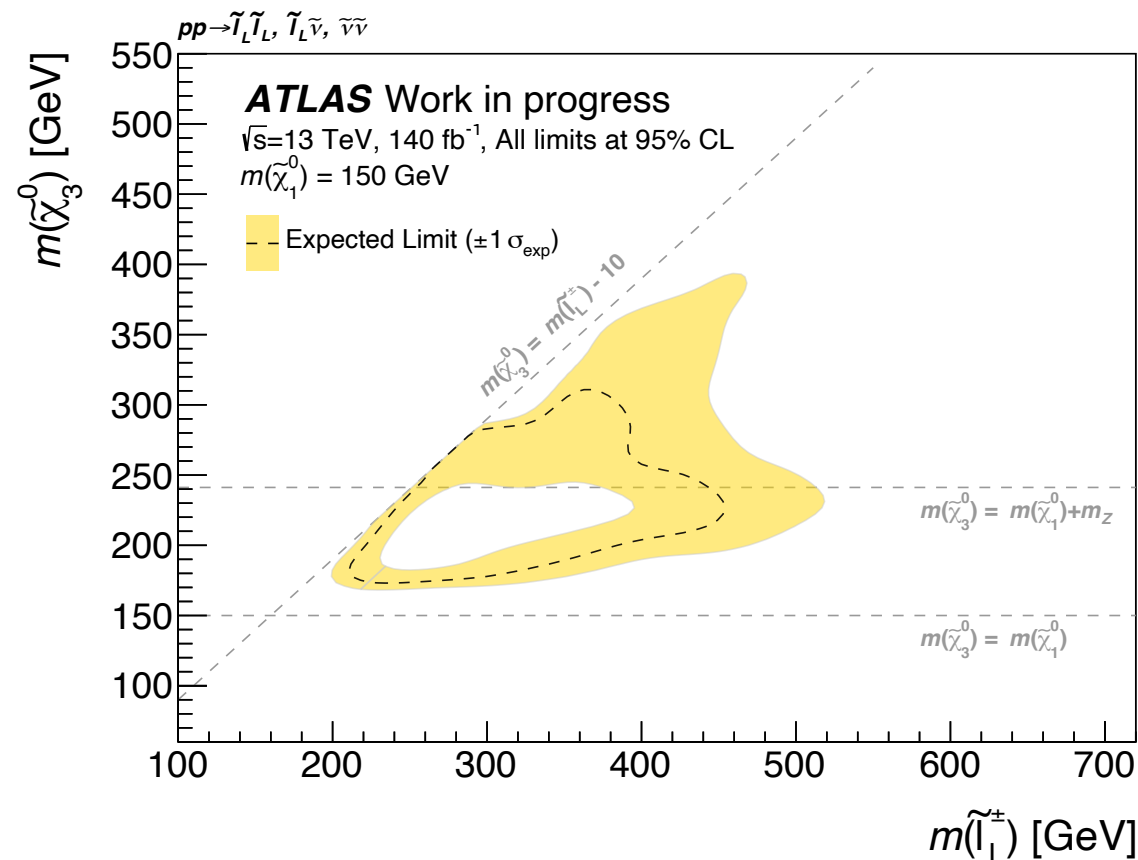
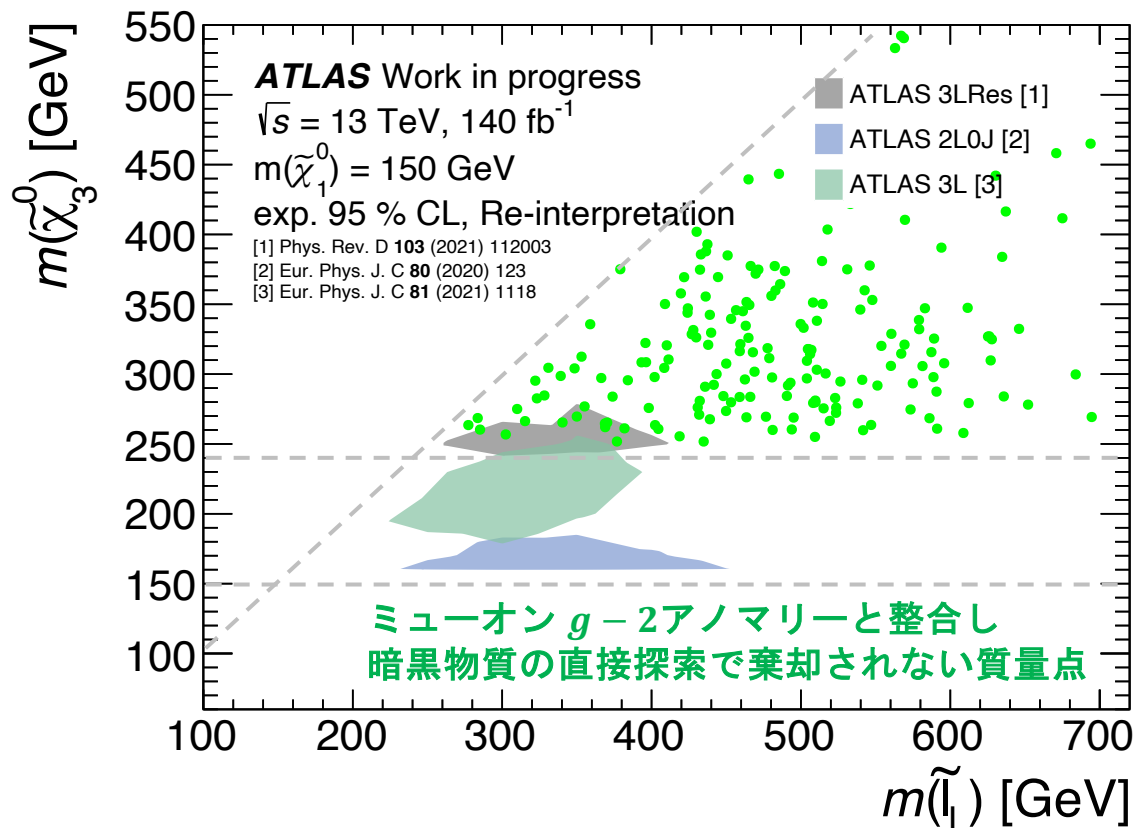


- 各信号領域における予想背景事象数の見積りも完了
- SRSS_2μ は smuon の信号に対して非常に良い感度を持つ

予想される探索感度

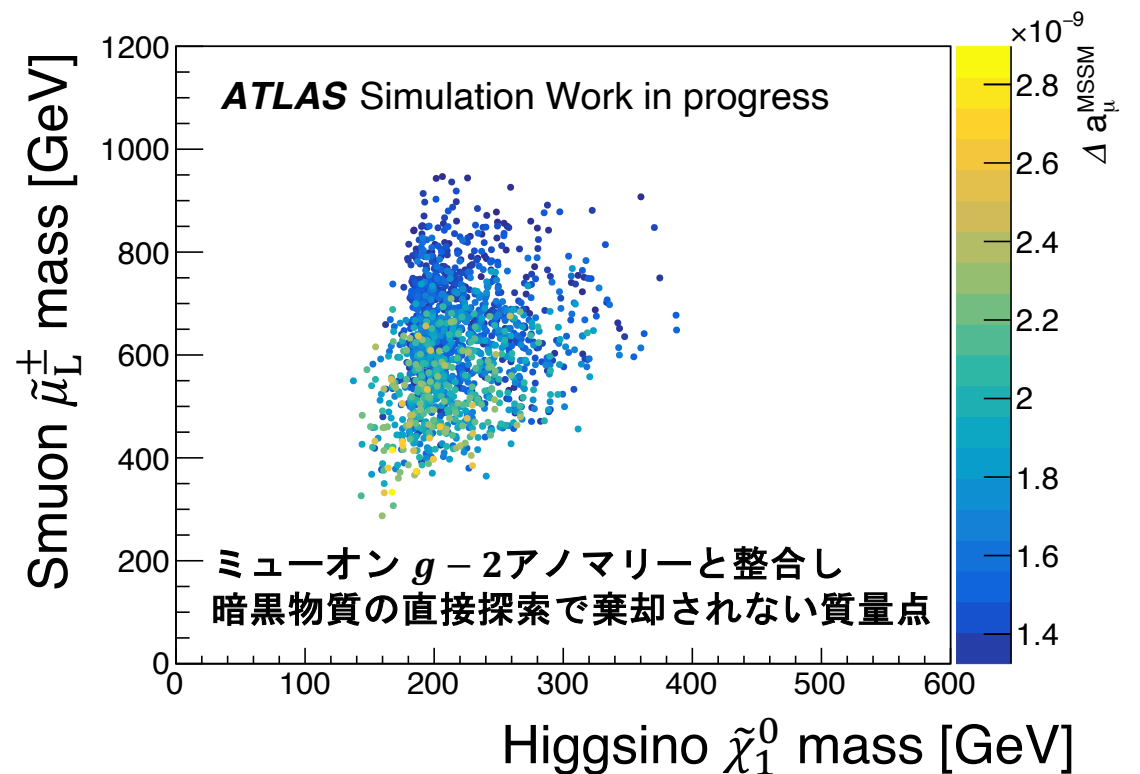
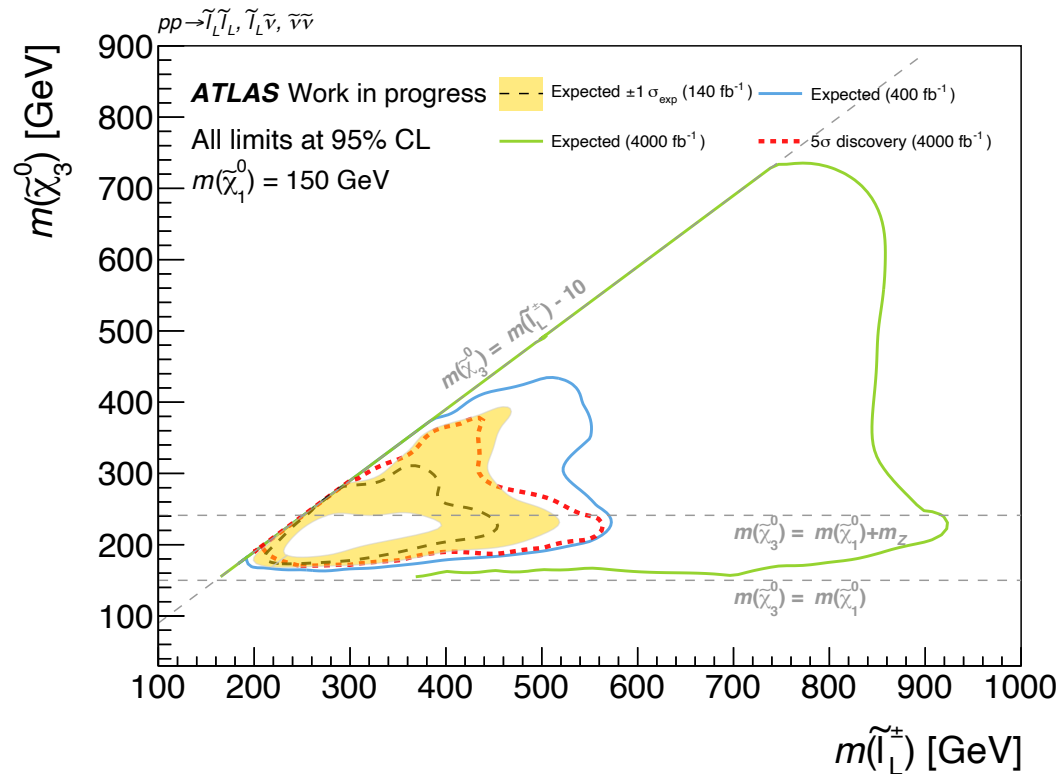
- 世界で初めて slepton-bino-higgsino モデルに対する直接的な探索
- LSP質量が 150 GeV の時、最大 450 GeV slepton まで感度を持つ
- 暗黒物質の直接探索が現在感度を持たない $\Delta m(\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_1^0) > 90$ GeV に感度を伸ばす

* LZ (2022)



将来の展望

- 高輝度 LHC 後に期待される統計量 (4000 fb^{-1}) において解析を再度最適化
 - SR SFOS : $E_T^{\text{miss}} > 300 \text{ GeV}$
 - SR SS : SR SS_2 μ を SR SS_e $\mu\mu$, SR SS_ $\mu\mu\mu$ に分離
- 現在のミュオン $g - 2$ の値を説明する質量領域に感度を大幅に伸ばすことを期待



まとめ

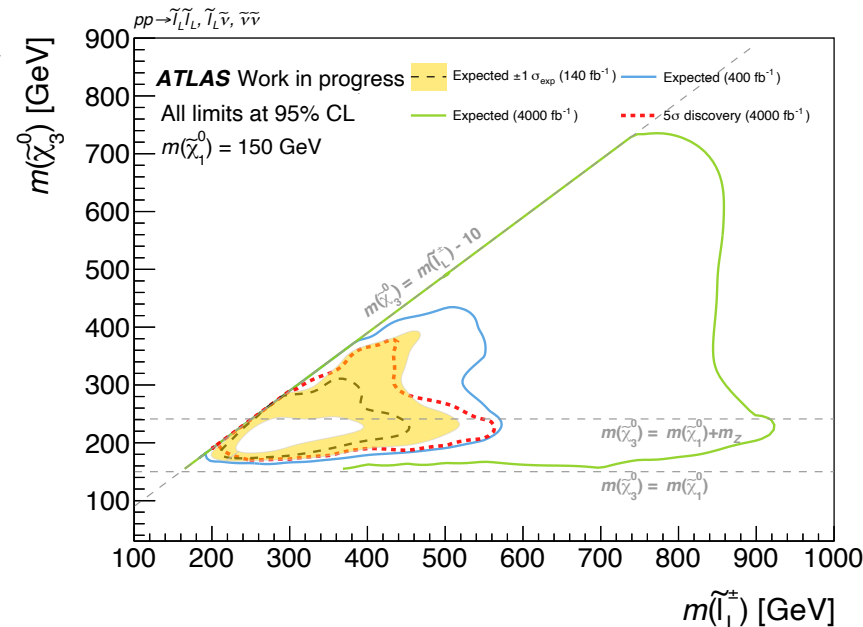
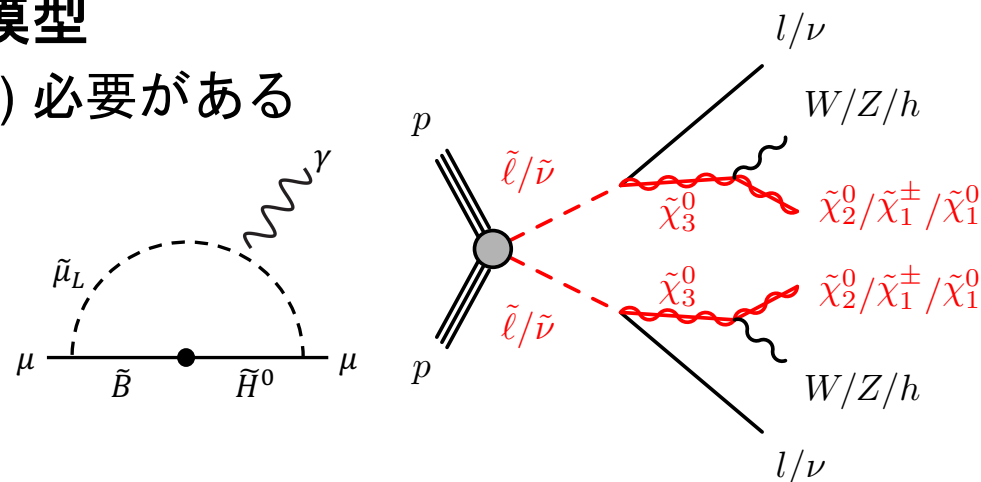
- ミューオン $g - 2$ アノマリーを説明する超対称性模型

- Loop 内の3種類の超対称性粒子が全て軽い ($\lesssim 1$ TeV) 必要がある
- 既存の解析でカバーされていない質量階層に着目
 - (2 lepton / 1 lepton) + di-boson + MET のトポロジー

- 解析概要

- 信号領域 SR SS, SR SFOS
- $WZ \rightarrow l\nu ll$, 電荷同定ミス背景事象, フェイクレプトン事象について実データによる correction factor を見積もる手法を開発
- 見積り方法を検証領域を用いて確認
- 暗黒物質の直接探索が現在感度を持たない領域に感度を伸ばすことを達成

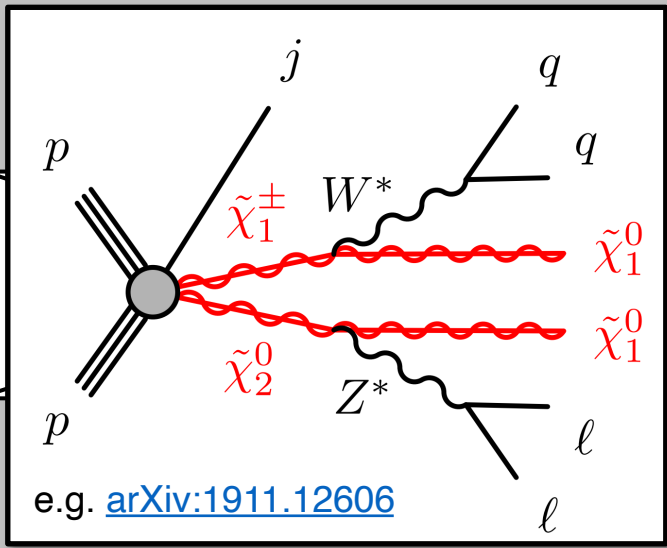
- 140 fb⁻¹での結果公表を目指す



Backup

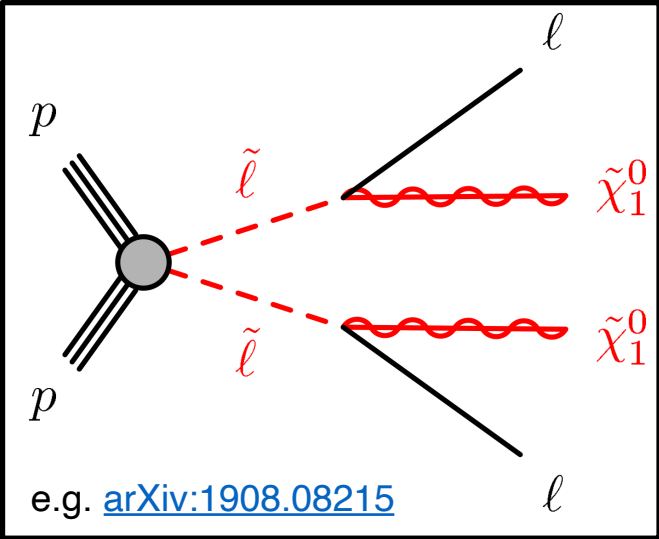
質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP		\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP	
\tilde{H} NLSP	X		 <p>e.g. arXiv:1911.12606</p>	H→W	W 消失飛跡
\tilde{B} NLSP	L→B→H R→B→H	H 低運動量 lepton		共に含んだ 1-loop無し	
\tilde{W} NLSP	X		X		
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	W→L→H	L→H	H→B R→B	L→B	W 消失飛跡
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	X		H→B L→B	R→B	共に含んだ 1-loop無し

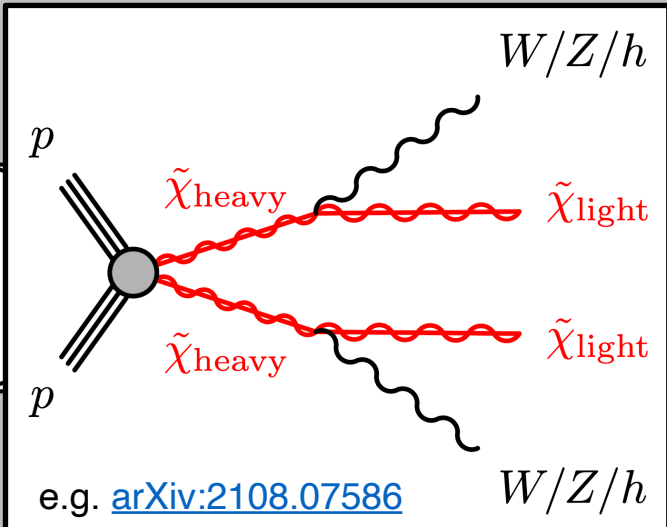
質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP		\tilde{B} LSP		\tilde{W} LSP
\tilde{H} NLSP	$L \rightarrow B \rightarrow H$ $R \rightarrow B \rightarrow H$		 <p>e.g. arXiv:1908.08215</p>		$H \rightarrow W$ W 消失飛跡
\tilde{B} NLSP					共に含んだ 1-loop無し
\tilde{W} NLSP	$W \rightarrow H$ H 低運動量 lepton		$H \rightarrow B$ L \rightarrow B $R \rightarrow B$ 2 lepton + MET		W 消失飛跡
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	$W \rightarrow L \rightarrow H$ L \rightarrow H 2 lepton + MET H 低運動量 lepton				
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	$R \rightarrow H$ H 2 lepton + MET H 低運動量 lepton		$H \rightarrow B$ R \rightarrow B $L \rightarrow B$ 2 lepton + MET		共に含んだ 1-loop無し

質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP		\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP		
\tilde{H} NLSP	X		 <p>e.g. arXiv:2108.07586</p>	$H \rightarrow W$ Di-boson + MET	W 消失飛跡	
\tilde{B} NLSP	$L \rightarrow B \rightarrow H$ $R \rightarrow B \rightarrow H$	H 低運動量 lepton		共に含んだ 1-loop無し		
\tilde{W} NLSP	X		$H \rightarrow B$ Di-boson + MET	H 低運動量 lepton	X	
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	$W \rightarrow L \rightarrow H$	$L \rightarrow H$ 2 lepton + MET	H 低運動量 lepton	$H \rightarrow B$ Di-boson + MET	$L \rightarrow B$ 2 lepton + MET	W 消失飛跡
$\tilde{\ell}_R$ NLSP		$R \rightarrow H$ 2 lepton + MET	H 低運動量 lepton	$H \rightarrow B$ Di-boson + MET	$R \rightarrow B$ 2 lepton + MET	共に含んだ 1-loop無し

質量階層への制約

W : Wino, B : Bino, H : Higgsino, L(R) : Left (Right) handed slepton
 Bino 対生成は無視できる, 生成断面積, 崩壊分岐比が小さいものは無視

	\tilde{H} LSP	\tilde{B} LSP	\tilde{W} LSP			
\tilde{H} NLSP	X		$H \rightarrow W$ W Di-boson + MET 消失飛跡			
\tilde{B} NLSP	$L \rightarrow B \rightarrow H$ $R \rightarrow B \rightarrow H$	H 低運動量 lepton	共に含んだ 1-loop無し			
\tilde{W} NLSP	$W \rightarrow H$ Di-boson + MET	H 低運動量 lepton	X			
$\tilde{\ell}_L$ NLSP	$W \rightarrow L \rightarrow H$ 4 / 3 / 2 lepton + MET	$L \rightarrow H$ 2 lepton + MET	H 低運動量 lepton	$H \rightarrow B$ Di-boson + MET $R \rightarrow B$ 2 lepton + MET	$L \rightarrow B$ 2 lepton + MET	W 消失飛跡
$\tilde{\ell}_R$ NLSP	$R \rightarrow H$ 2 lepton + MET	H 低運動量 lepton	$H \rightarrow B$ Di-boson + MET $L \rightarrow B$ 2 lepton + MET	$R \rightarrow B$ 2 lepton + MET	共に含んだ 1-loop無し	

