

LHC-ATLAS実験における 消失飛跡探索の感度向上に向けた 新しい解析手法の開発

2022/2/20

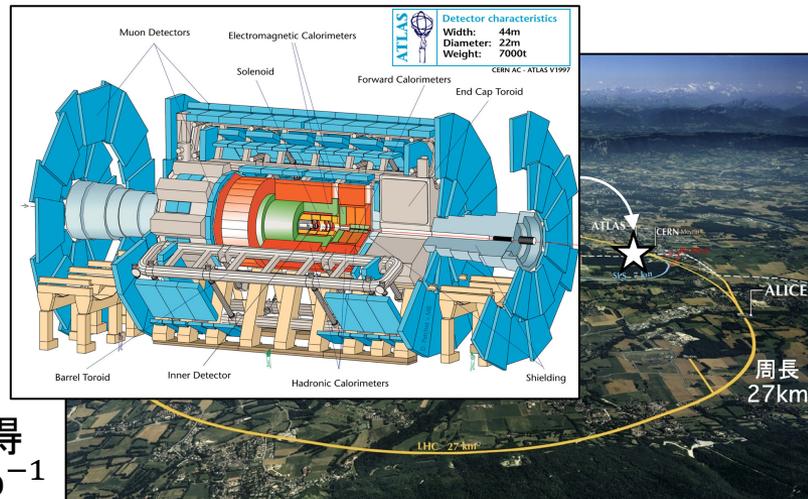
28th ICEPP Symposium

早稲田大学 秋山大也

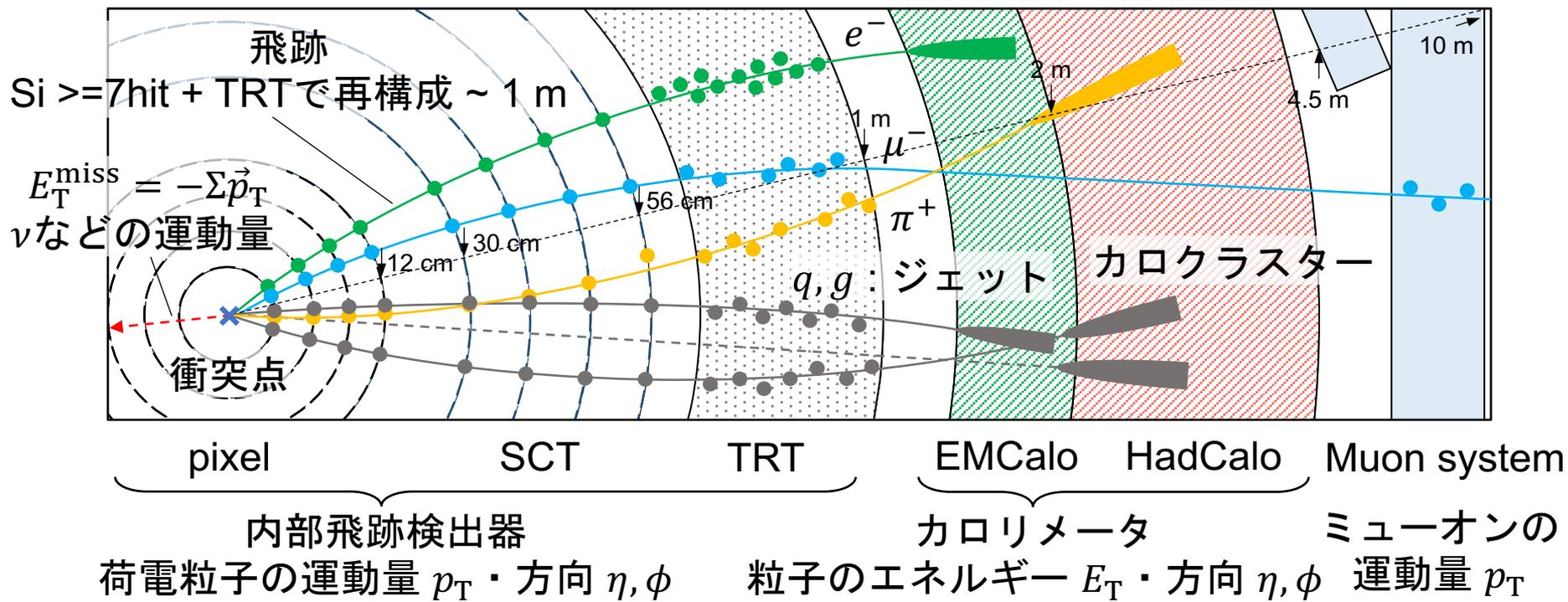
LHC-ATLAS実験

LHC : 陽子陽子衝突型円形加速器

- 標準模型の検証・新粒子探索が目的
 - ヒッグス粒子発見後も高統計データを取得
2015 ~ 2018年 Run2 : $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 139 \text{ fb}^{-1}$



ATLAS検出器 : 生成粒子を全て検出する汎用型検出器



超対称性-暗黒物質

超対称性：フェルミオンとボソンの対称性

- 標準模型の課題を解決

- 階層性問題、暗黒物質、ゲージ結合定数の統一、高次の理論との整合性

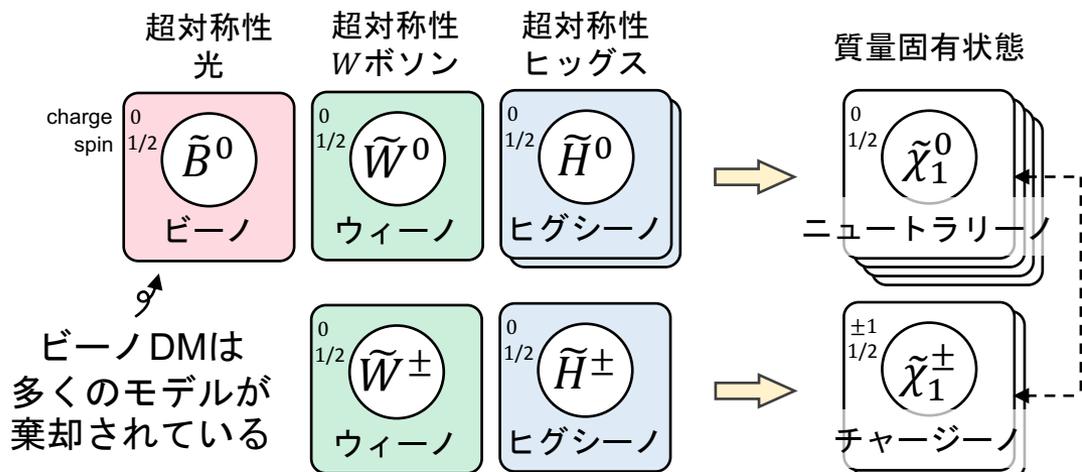
LHCによる超対称性粒子探索と制限

- 125 GeVのヒッグス → スカラーは重い

- スカラートップは1 TeV近くまで棄却

- ゲージーノ、ヒグシーノは可能性ある

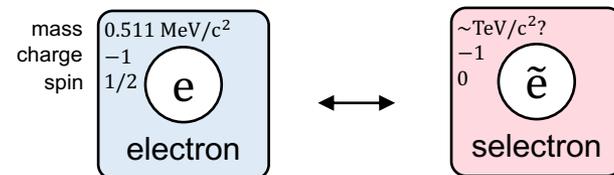
- ニュートラリーノは**暗黒物質(WIMP)の候補**



2022/2/20

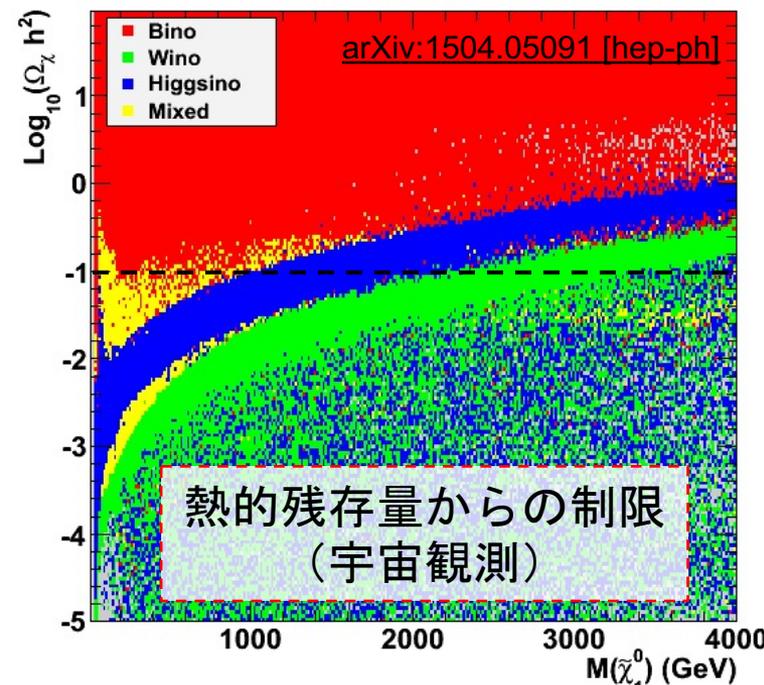
< 3 TeV < 1 TeV

28th ICEPP Symposium



物質を構成

力を伝える



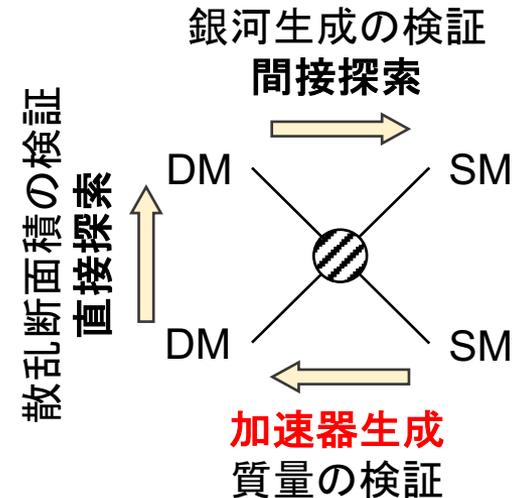
混合が弱く、 $\tilde{\chi}_1^0$ がほぼ \tilde{W} or \tilde{H}
 $\rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm$ も \tilde{W} or \tilde{H} : 未探索領域

2/13

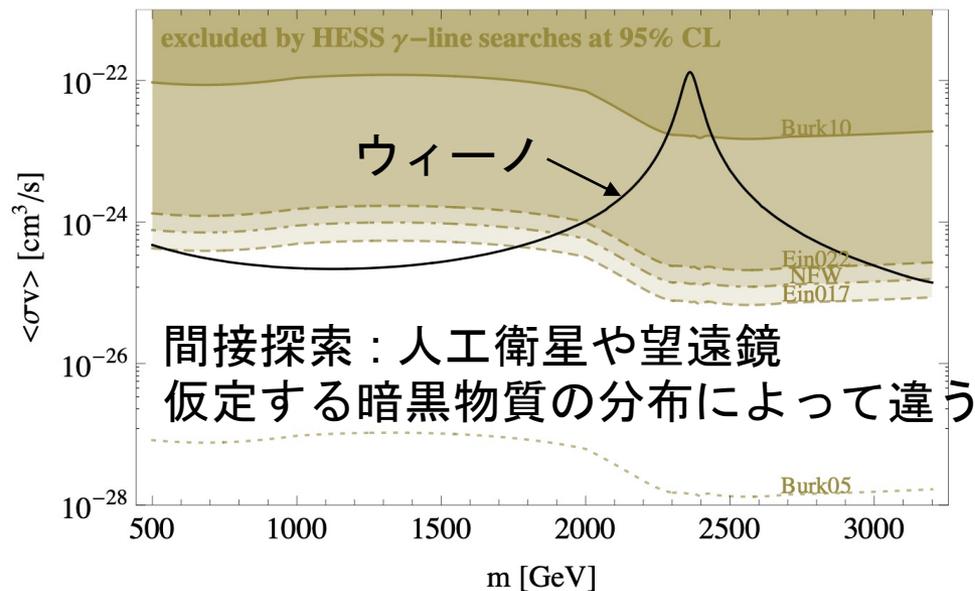
暗黒物質探索

相補的な3つの探索で発見を確実にする

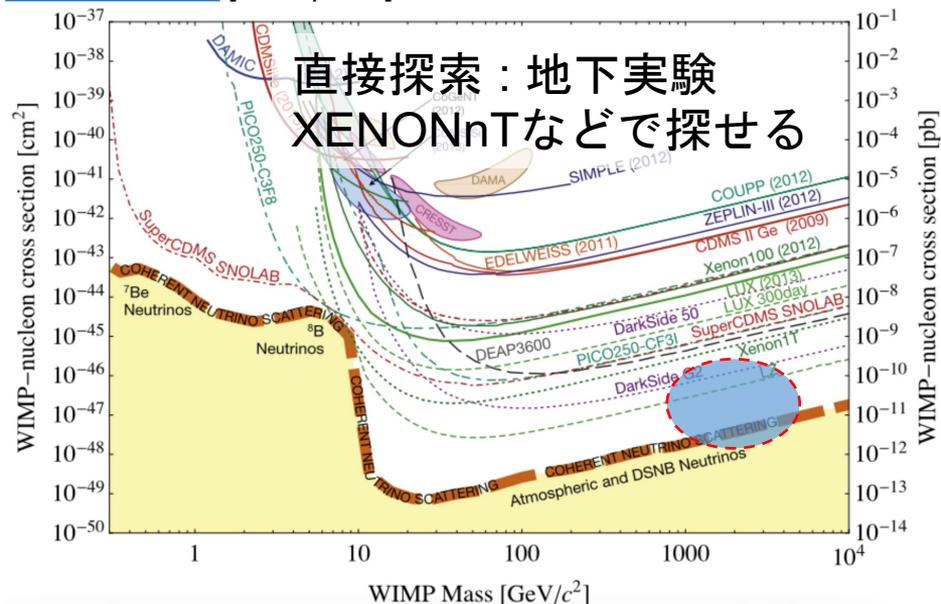
- 加速器では暗黒物質の対生成を行う
 - 質量を決めることができる
 - 直接探索の届かないニュートリノフロアの下も探せる
- DMより重い粒子からDMへの崩壊 + E_T^{miss} + ジェットで探す
 - ジェットでブーストしたDMを E_T^{miss} として観測



[arXiv:1401.6212](https://arxiv.org/abs/1401.6212) [astro-ph.HE]



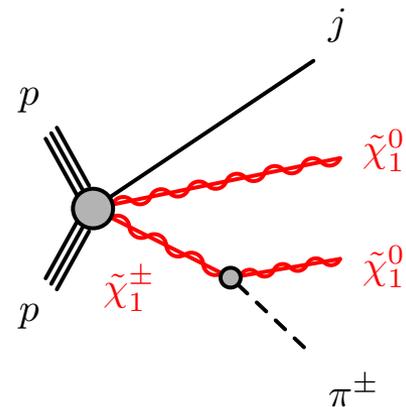
[arXiv:1410.4960](https://arxiv.org/abs/1410.4960) [astro-ph.IM]



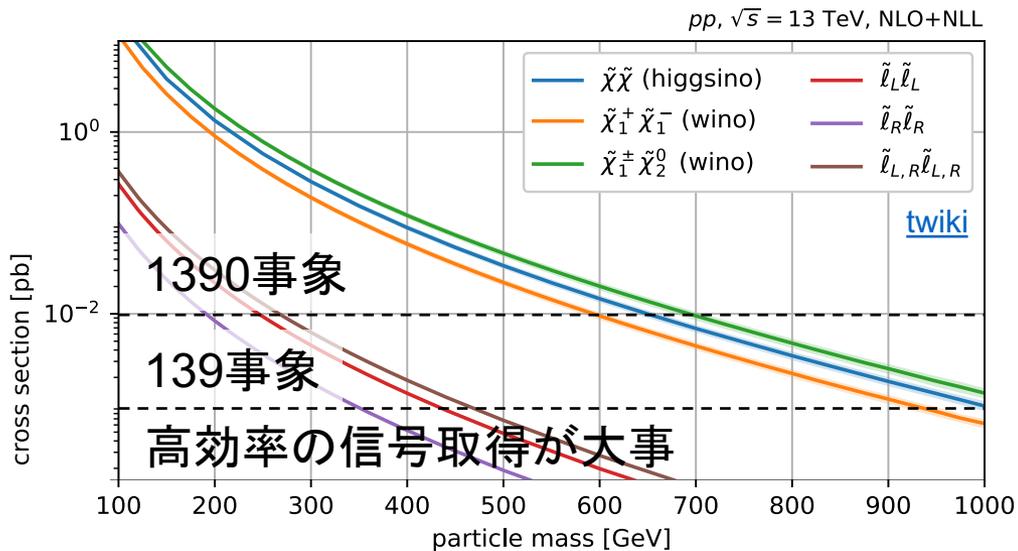
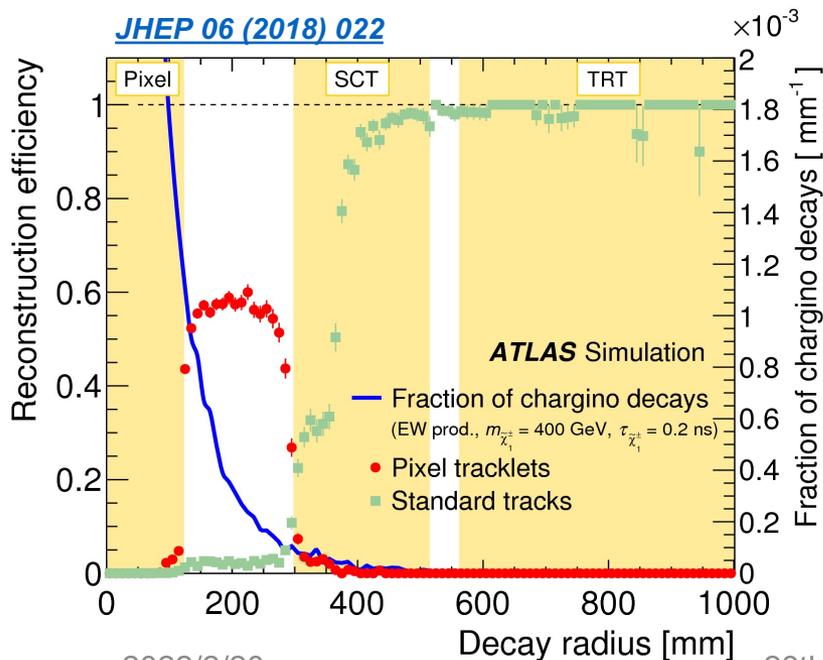
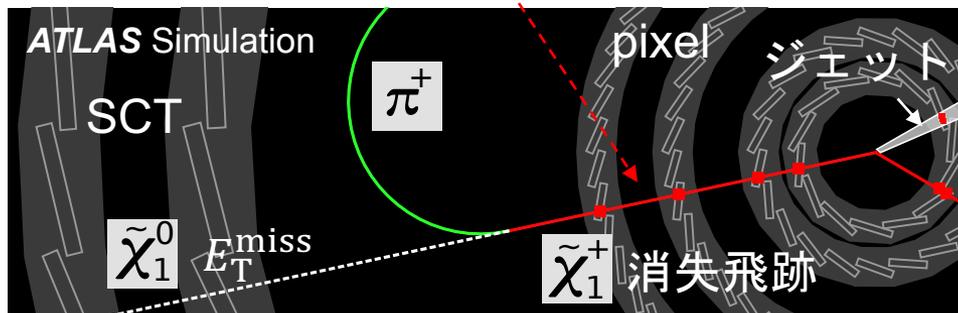
長寿命チャージーノ探索

- $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \pi^\pm$ の崩壊を見る
 - 縮退しているなので $\tilde{\chi}_1^\pm$ は長寿命

シナリオ	Δm	$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm}$
$\tilde{\chi}_1^\pm \sim \tilde{\chi}_1^0 \sim \tilde{W}$	~ 160 MeV	0.2 ns
$\tilde{\chi}_1^\pm \sim \tilde{\chi}_1^0 \sim \tilde{H}$	~ 340 MeV	0.03 ns



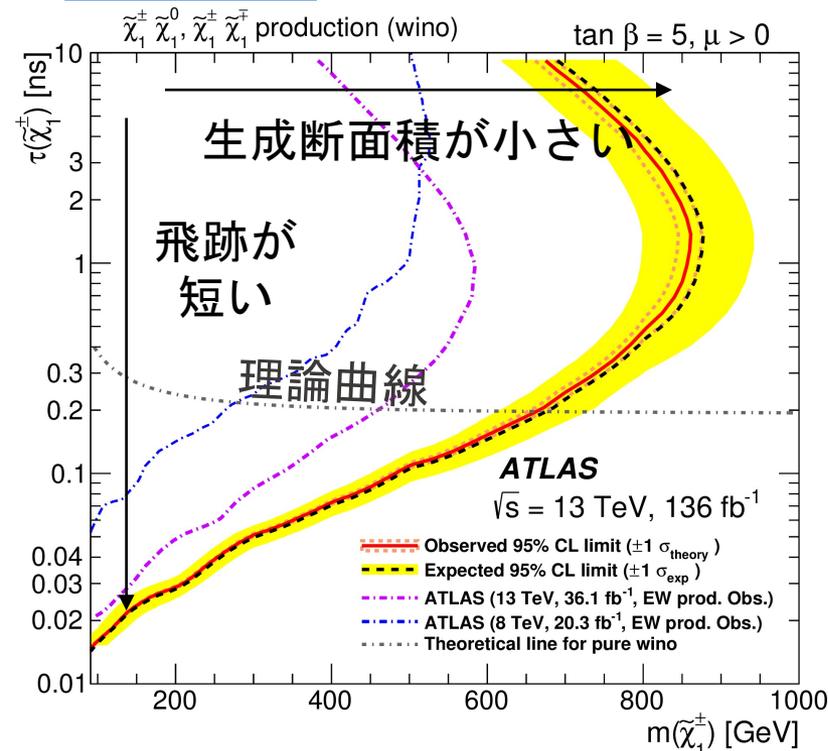
pixelとSCTの間で崩壊したチャージーノを pixelだけで再構成



発見に向けた取り組み

- Run2全データ解析1回目では $m_{\tilde{W}} < 660 \text{ GeV}$, $m_{\tilde{H}} < 210 \text{ GeV}$ を棄却
- 現在はデータや検出器の理解が進み、挑戦的な解析が可能
→ 同じRun2データでも探索感度が向上する

[arXiv:2201.02472](https://arxiv.org/abs/2201.02472)

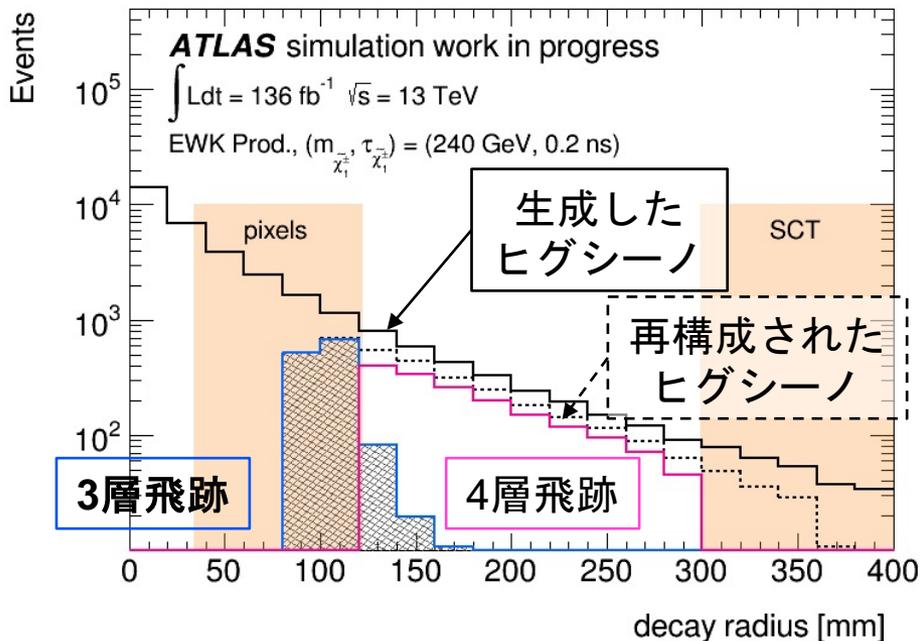


目的	解析技術	これまで	これから
短い飛跡	pixel 4層飛跡	○	○
	pixel 3層飛跡	×	○
信号取得効率増加	全ヒット再構成	×	○
	Vertex Constraint	△	○
背景事象の抑制	カロリメータの利用	○	○
	背景事象の詳細な理解	△	○
	pixel dE/dx 測定	×	○
	低運動量 π 粒子再構成	×	△

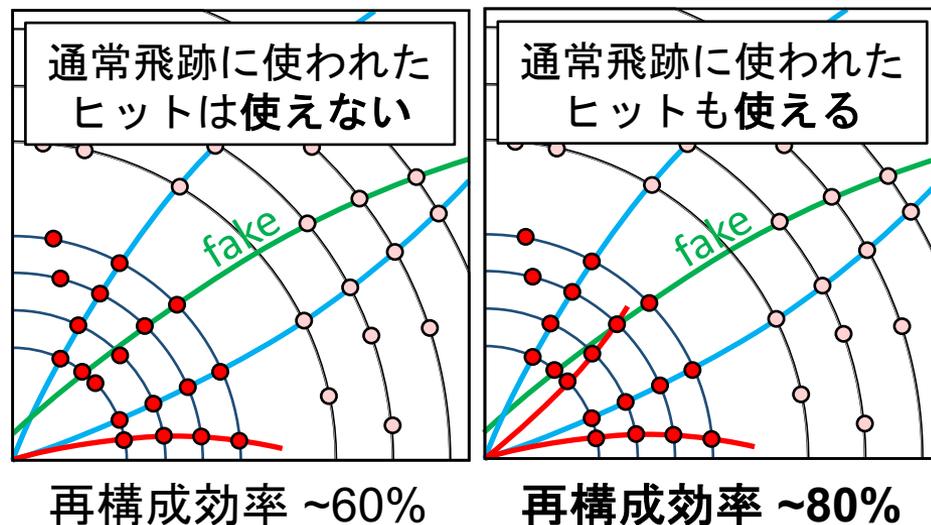
本発表内容：これらの技術による感度向上

新しい消失飛跡再構成

3層飛跡



全ヒット再構成



3層飛跡も4層飛跡も約1.4倍になる

3層飛跡の導入で \tilde{H} は4倍になる

\tilde{H} の再構成効率は5.6倍

3層飛跡は低運動量として再構成される
 → 信号領域($p_T > 60$ GeV)に入る信号事象数は1.9倍

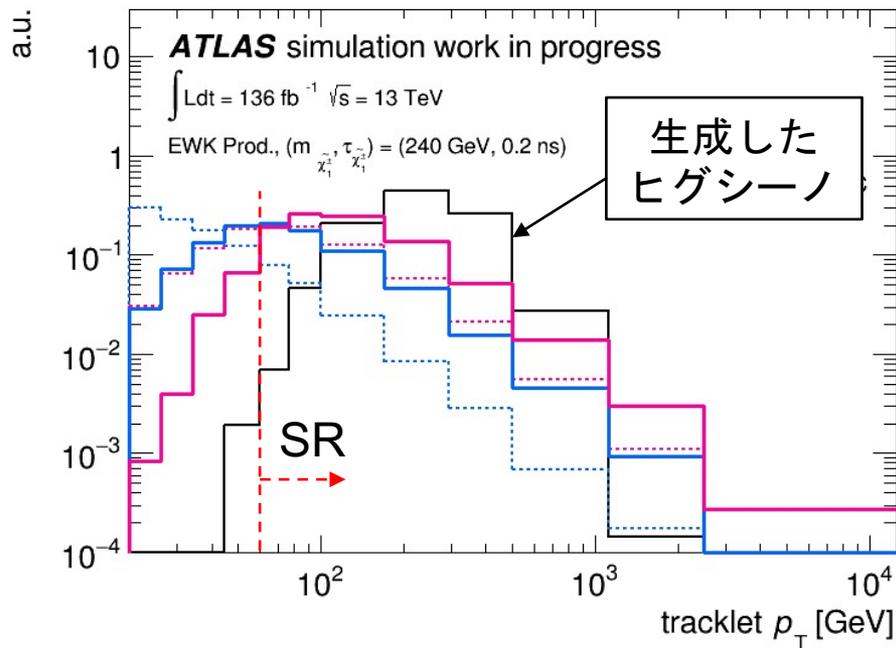
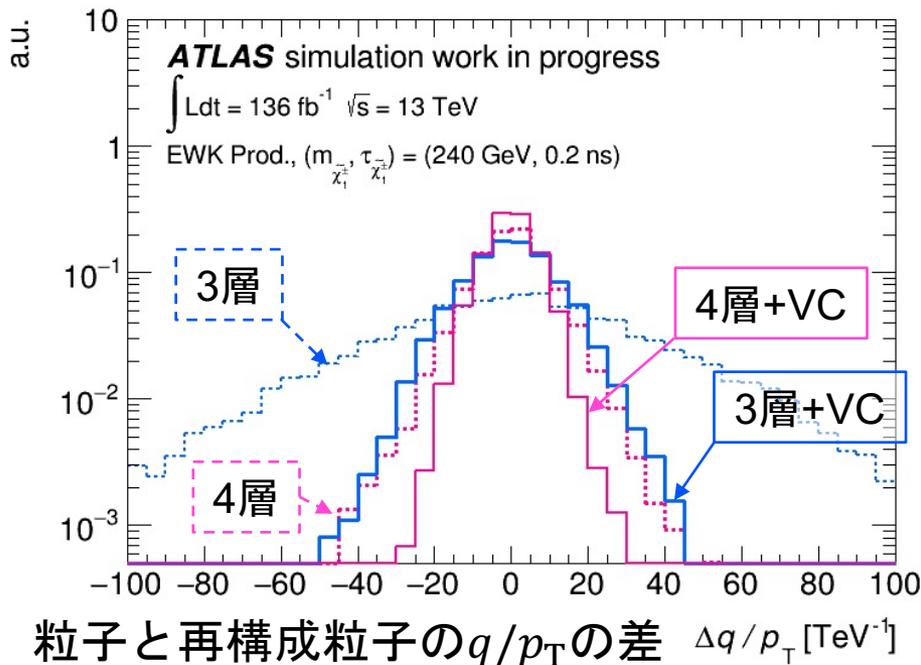
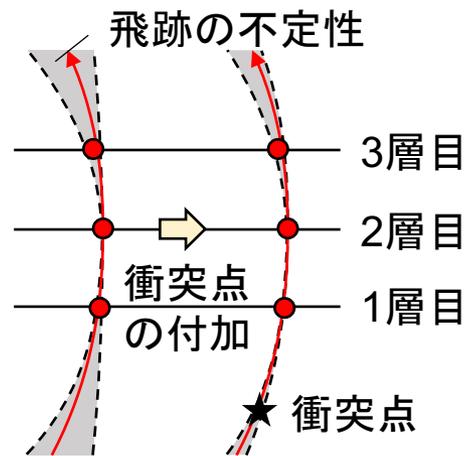
再構成できるけど
 信号として使えない

Vertex Constraint (VC)

- 消失飛跡は運動量分解能が悪い
 - 運動量のピークが低運動量にシフト
 - 信号領域に入る高運動量飛跡が減る
- 衝突点を使って飛跡を延長
 - 3層飛跡は4層飛跡と同程度の運動量分解能となる

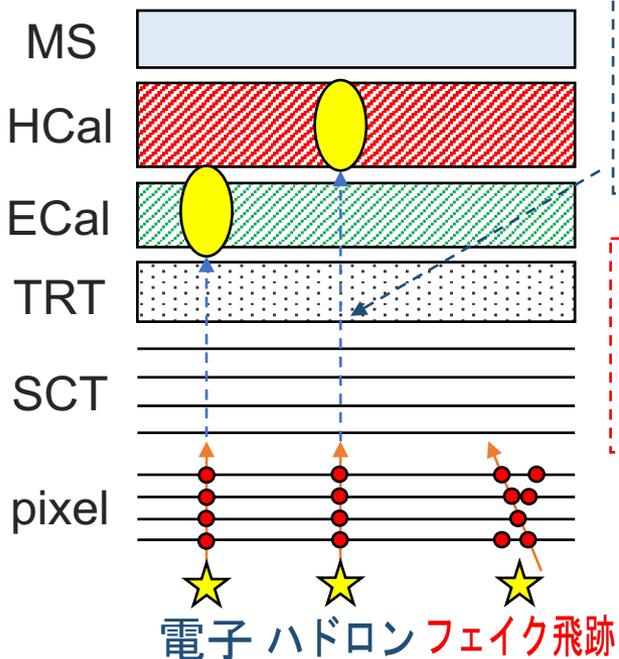
$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T}{BL^2}$$

↑
飛跡長



3層飛跡+全ヒット再構成+VCによって \tilde{W} は2.4倍, \tilde{H} は4.4倍

背景事象



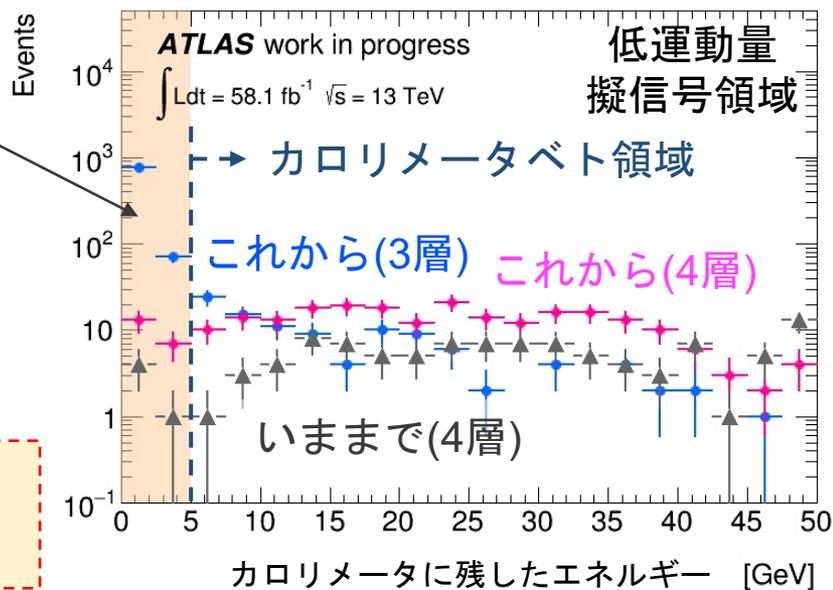
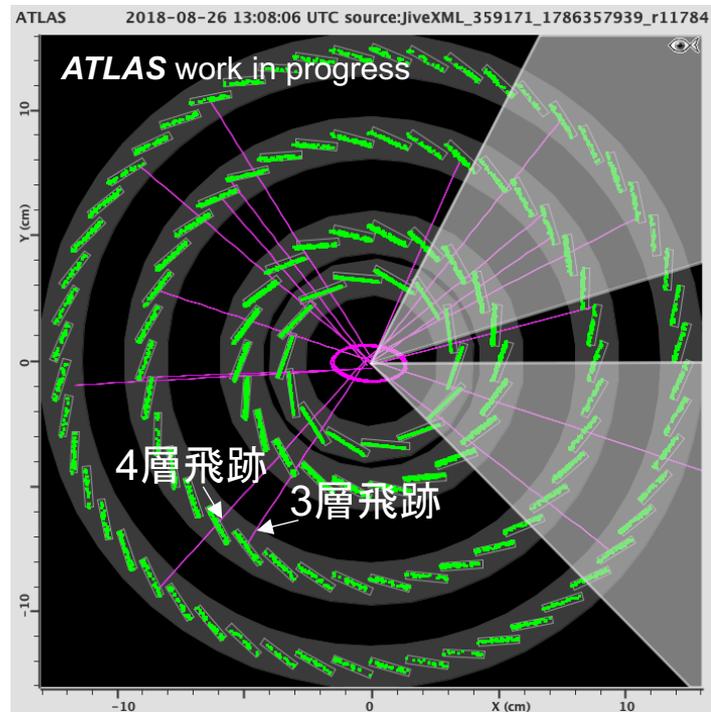
物理由来の背景事象
途中の散乱や制動放射
で再構成できなかった
→ カロリメータベト ○

フェイク飛跡
たまたまヒットが並んで
飛跡になった
→ カロリメータベト ×

信号領域
フェイク飛跡
が支配的

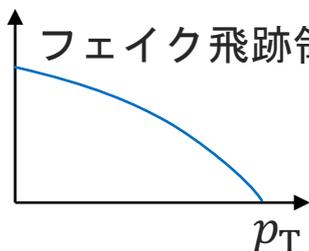
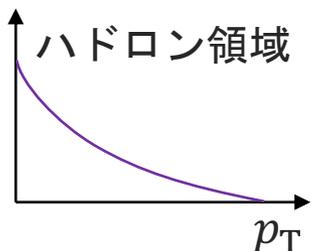
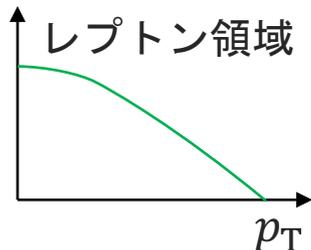
いずれの背景事象も増加
4層飛跡は数倍、
3層飛跡は100倍程度増加が予想

- 1) より効率的で厳しい事象選択が必要
- 2) 統計の増加を使った背景事象の理解



背景事象の見積もり

現状の背景事象見積もり



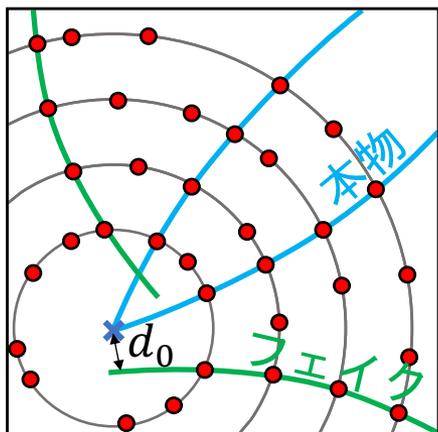
p_T の形と数の両方を見積もることができる

p_T の形のみ見積もる

数はフィットで推定
→ 複雑・不定性大

フェイク飛跡領域

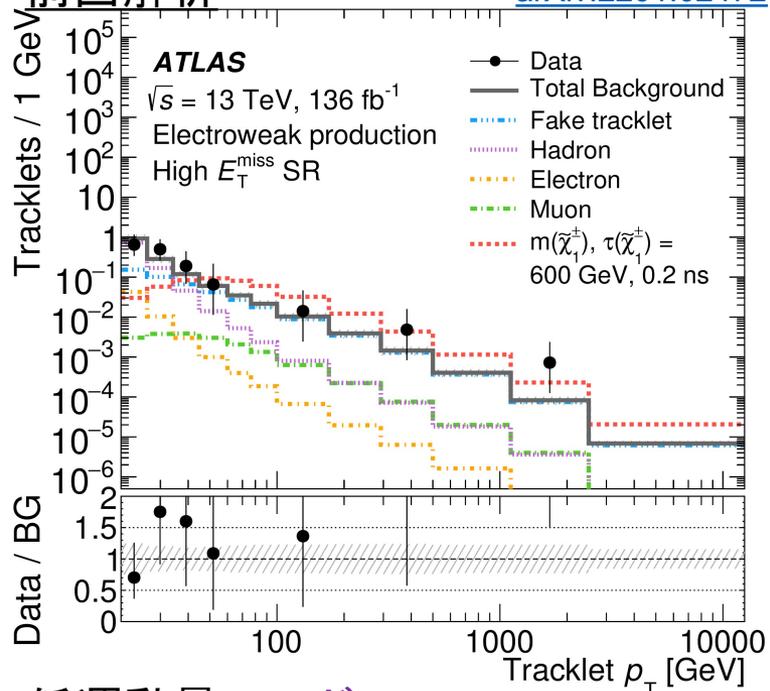
フェイク飛跡は衝突点から出ることがない
(d_0 が大きい)



特殊なのでシミュレーションは使いにくい
→ dataで見積もるが、統計が少なく難しい

前回解析

[arXiv:2201.02472](https://arxiv.org/abs/2201.02472)

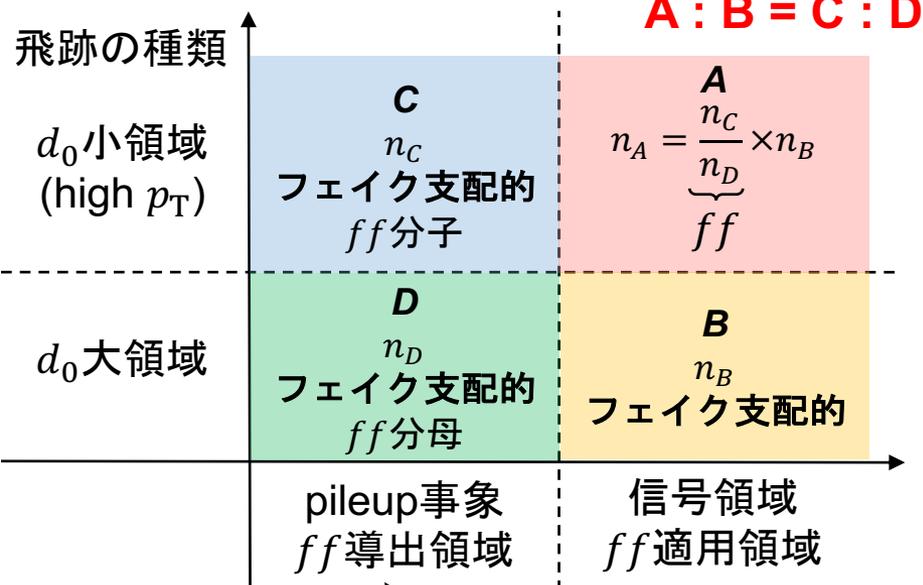


低運動量：ハドロン
高運動量：フェイク飛跡が支配的

増えた統計で単純な手法を検討

新しい背景事象見積もり

フェイク飛跡の見積もり

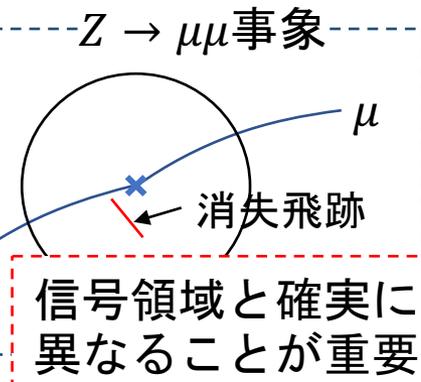


pileup事象

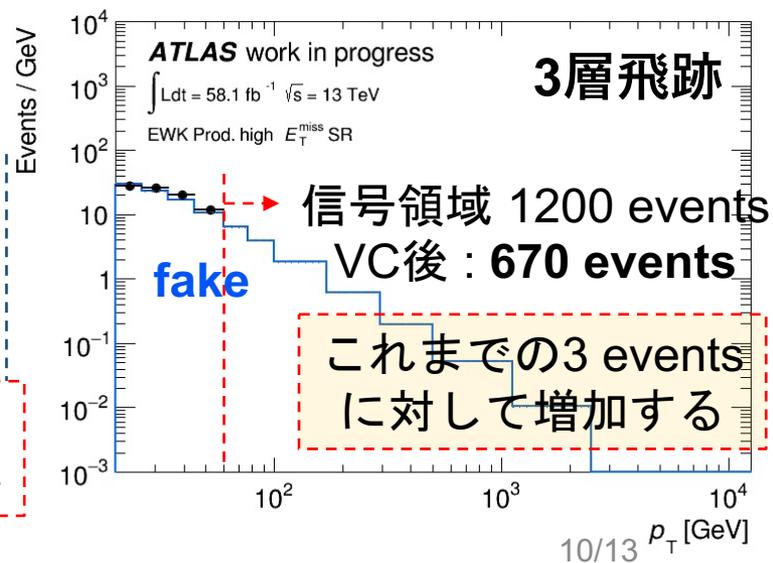
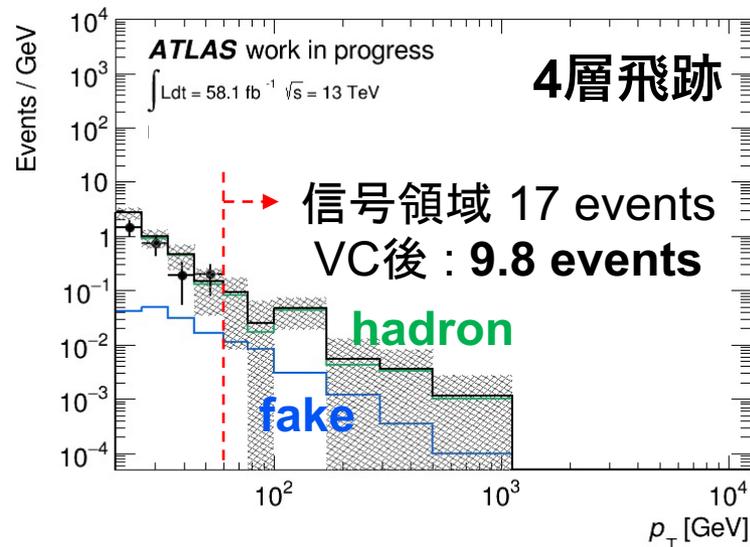


主要ではない
衝突による飛跡
→ 統計大

2022/2/20



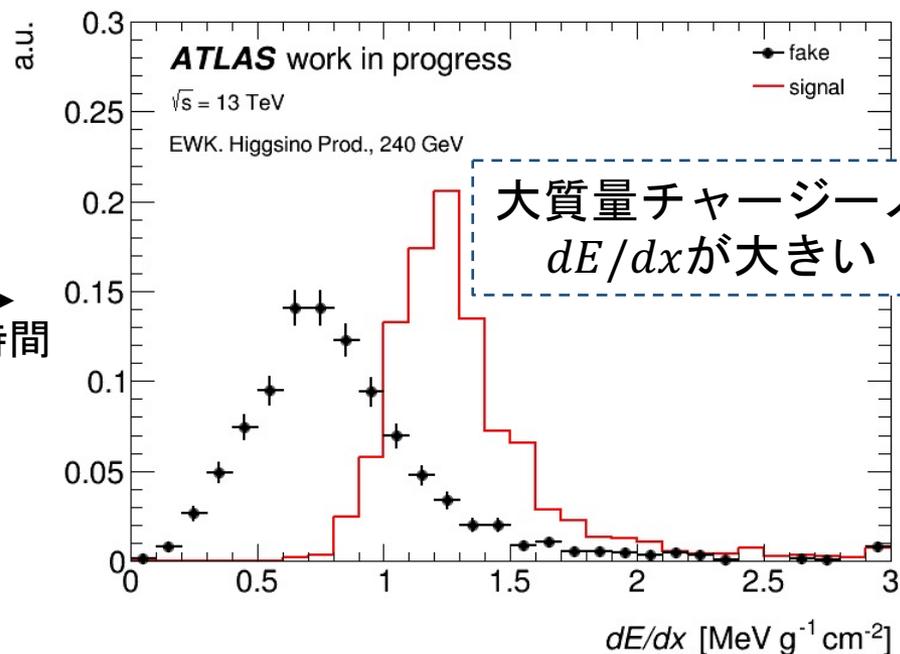
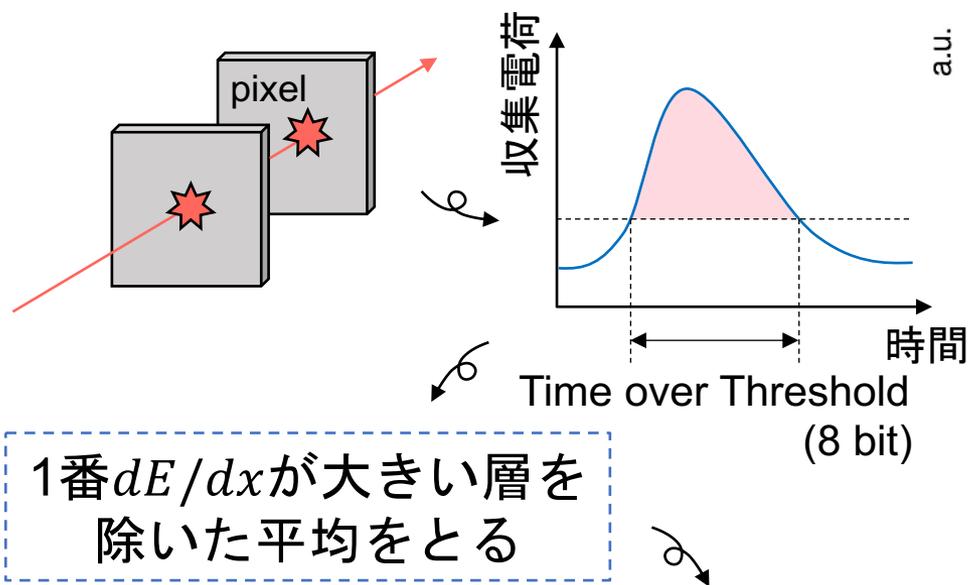
28th ICEPP Symposium



10/13 p_T [GeV]

背景事象分離の新手法

- 長寿命チャージーノの持つ消失飛跡の特徴を使う
 - 低運動量 π 粒子の再構成 → 信号取得効率を保つことが課題
 - ベーテブロッホの式から、検出器におけるエネルギー損失(dE/dx)が大きい

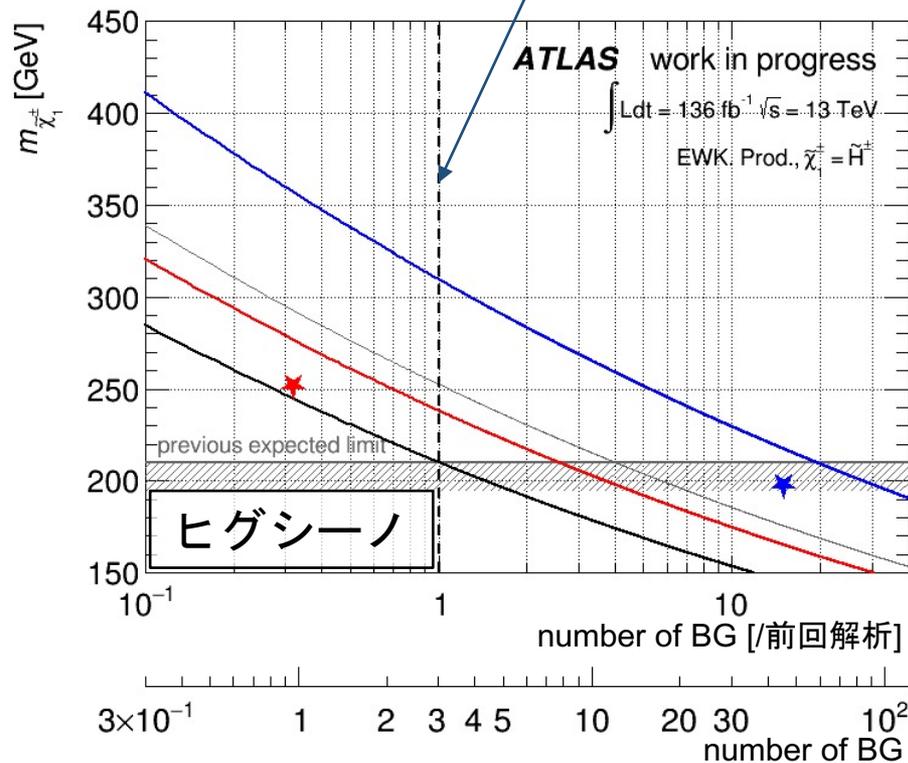
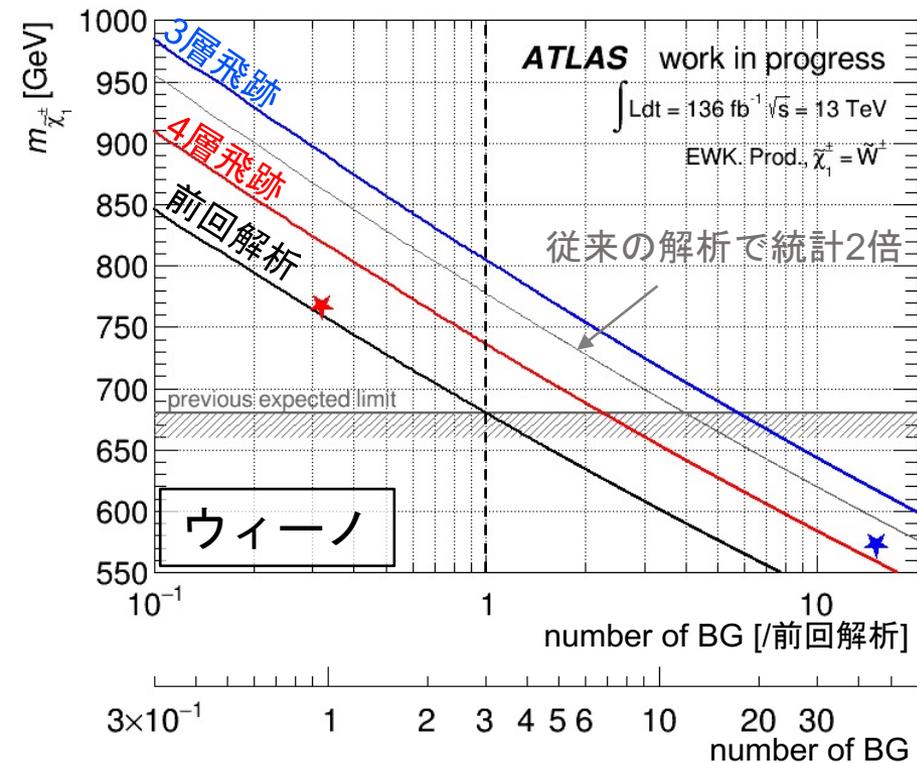


位置や時間依存性を補正
MIPを $1 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ に規格化
→ dE/dx

信号取得効率は90%を確保しつつ
背景事象(フェイク飛跡)は70%削減

探索感度の向上

背景事象数を今までと同程度に抑えればより探索感度が向上



現状でわかっている特徴を用いて簡単に事象選択

- 消失飛跡と E_T^{miss} の間の角度が小さい
 - pixelのエネルギー損失 (dE/dx) が大きい
- 背景事象 ~ 0.1倍
信号事象 ~ 0.7倍

4層	3層
1 event	46 events
★	★

$m_{\tilde{W}} \sim 770 \text{ GeV}$, $m_{\tilde{H}} \sim 250 \text{ GeV}$: 宇宙観測からの上限質量値の1/4まで迫ることができる

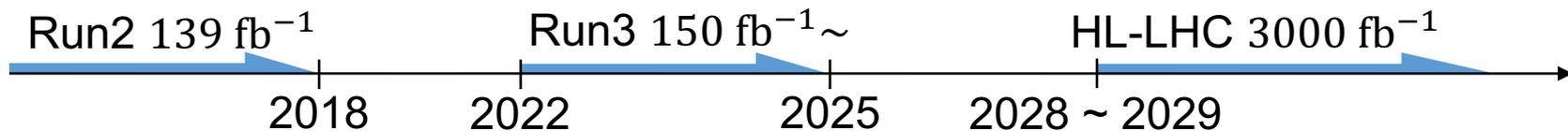
まとめと今後の展望

- ATLAS実験 Run2全データによる長寿命チャージーノ探索
 - 先行解析では発見できなかったが、新しい解析技術の導入によりさらに探索感度を向上し発見を目指す
- 新しい飛跡再構成によって取得できる信号事象数が増えた
 - 信号領域内の信号事象数はウィーノ2.4倍、ヒグシーノ4.4倍
- 新しい事象選択によって背景事象を抑えて感度を向上させた
 - 4層飛跡によって $m_{\tilde{W}} = 770 \text{ GeV}$ 、 $m_{\tilde{H}} = 250 \text{ GeV}$ まで感度が向上

今後の展望

- 不定性の少ない背景事象の見積もり
 - 背景事象自体の理解をデータとシミュレーション合わせて進めている
- 事象全体の特徴を利用した事象選択の開発 (最終的に機械学習)
 - 3層飛跡で背景事象を抑えれば大きく探索感度が向上

HL-LHC以降は検出器の構造が不利になるのであと数年が勝負

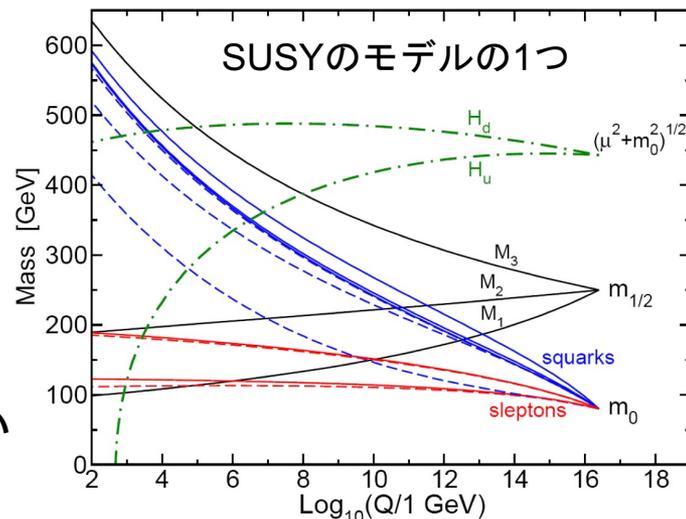


back up

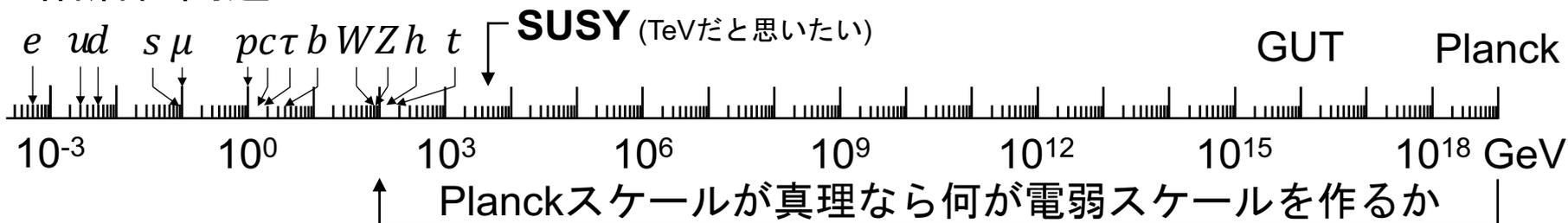
超対称性 (SUSY)

超対称性：フェルミオンとボソンの対称性

- フェルミオンとボソンは元々同じもの
 - 物理として自然な考え方、“2倍になる”ではない
- 標準模型の重要な課題を解決する
 - 階層性問題・暗黒物質・ゲージ結合定数の統一・高次の理論との整合性

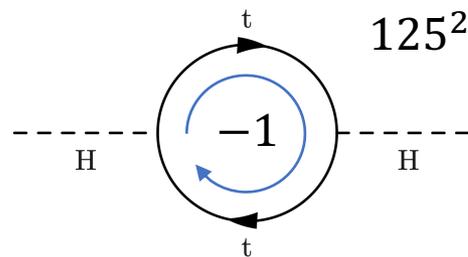


階層性問題



ヒッグス質量で言えば

観測質量は中間状態を含む(量子補正)



$$125^2 = \mu_0^2 + \Delta\mu^2 = 10^{38} - 10^{38}$$

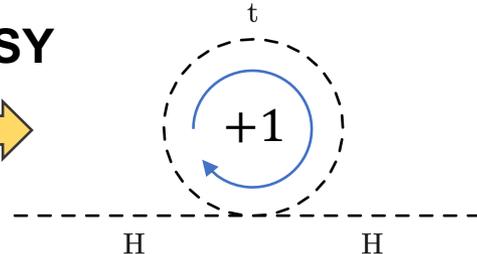
$$-\int_0^\Lambda p dp \sim -10^{38} \text{ GeV}$$

naturalness 🤖

SUSY

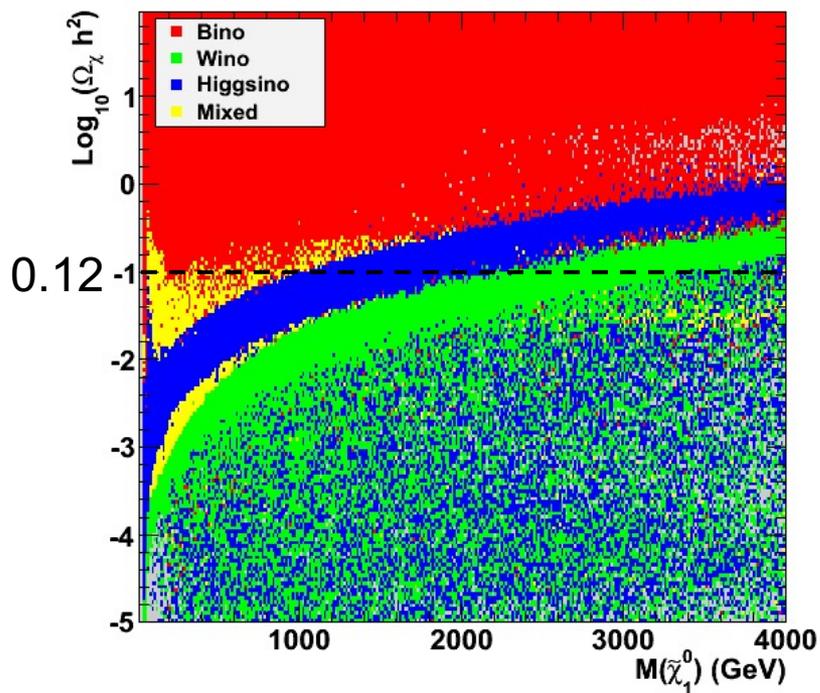
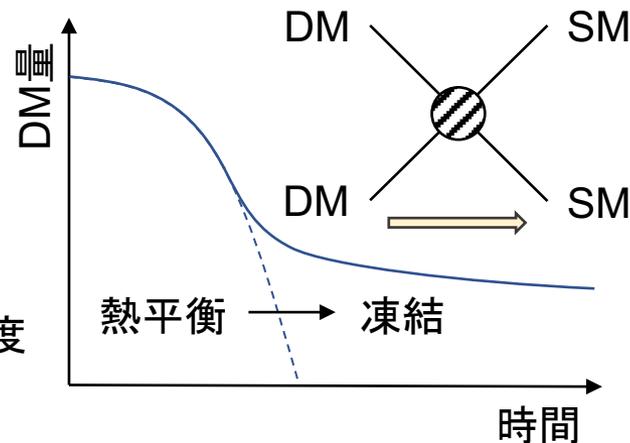


打ち消し合う

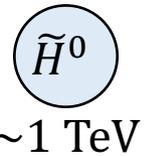


暗黒物質

- 観測事実からほぼ確実に存在
 - 強い/電磁相互作用しない・安定・非相対論的速度
- WIMPは最有力候補
 - 相互作用の強さと今の熱的残存量が一致
 - 最も軽いSUSY粒子(LSP)はWIMPDMになれる

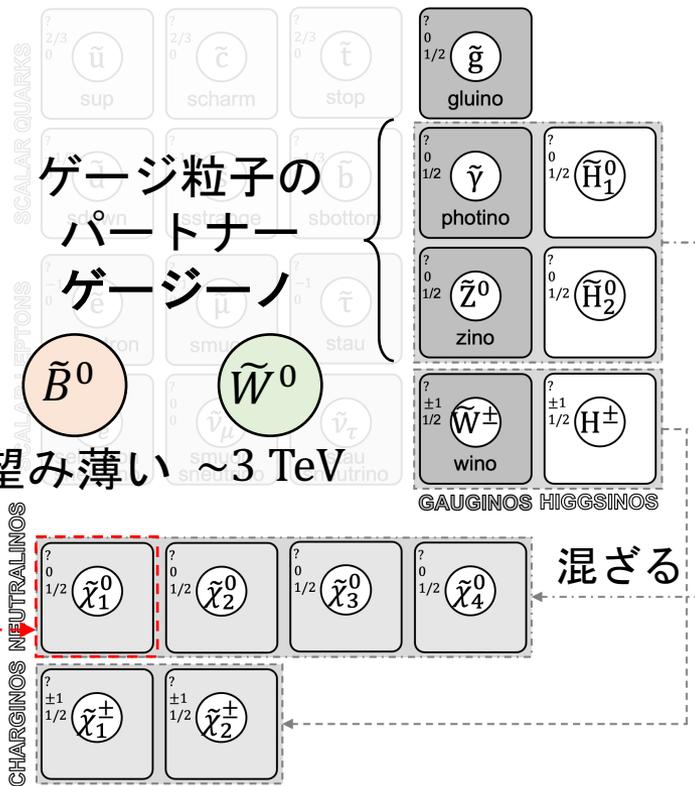


ヒッグス粒子の
パートナー
ヒグシーノ



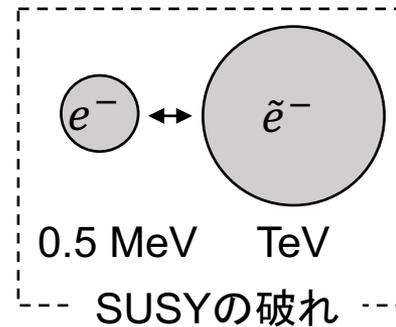
どれなのか \nearrow
LSPになれる

ゲージ粒子の
パートナー
ゲージーノ



SUSYの有力モデル

- SUSYはパラメーターを大量にもち、たくさんのモデルを生む
 - あの世でのSUSYの破れを何がこっちに伝えるか
 - 質量階層が決まり、LSPが何かも左右される
- 今までの観測からSUSYのパラメーターに多くの制限
 - ヒッグス重い → scalarが重い
 - 有力モデルは絞られている → 方向性ははっきりしている
 - 数TeVゲージノ・ヒグシーノDMはまだまだ可能性がある



ニュートラリーノ ($\tilde{\chi}^0$) 混合

$$\begin{pmatrix}
 M_1 & 0 & -m_Z \sin \theta_W \cos \beta & m_Z \sin \theta_W \sin \beta \\
 0 & M_2 & m_Z \cos \theta_W \cos \beta & -m_Z \cos \theta_W \sin \beta \\
 -m_Z \sin \theta_W \cos \beta & m_Z \cos \theta_W \cos \beta & 0 & -\mu \\
 m_Z \sin \theta_W \sin \beta & -m_Z \cos \theta_W \sin \beta & -\mu & 0
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \tilde{B}^0 \\
 \tilde{W}^0 \\
 \tilde{H}_1^0 \\
 \tilde{H}_2^0
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 \\
 \\
 \text{ほとんど} \\
 \text{混ざらない}
 \end{matrix}$$

AMSB 3:1 \rightarrow $M_1 \leftarrow 0$ $\rightarrow M_2$ $\sim 1 \text{ TeV}$
 ~ 0 $\sim 100 \text{ GeV}$

チャージーノ ($\tilde{\chi}^\pm$) 混合

$$\begin{pmatrix}
 M_2 & \sqrt{2} m_W \sin \beta \\
 \sqrt{2} m_W \cos \beta & \mu
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \tilde{W}^\pm \\
 \tilde{H}^\pm
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 \text{ほとんど} \\
 \text{混ざらない}
 \end{matrix}$$

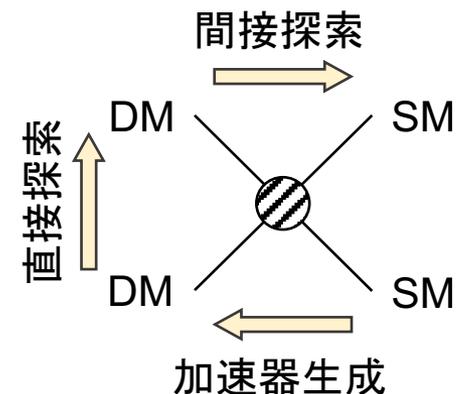
$\sim 100 \text{ GeV}$ $\sim \text{TeV}$

条件	$\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_1^\pm$	Δm
$M_2 < M_1, \mu$	\tilde{W}^0	\tilde{W}^\pm	160 MeV
$\mu < M_2$	\tilde{H}^0	\tilde{H}^\pm	340 MeV

暗黒物質探索@LHC

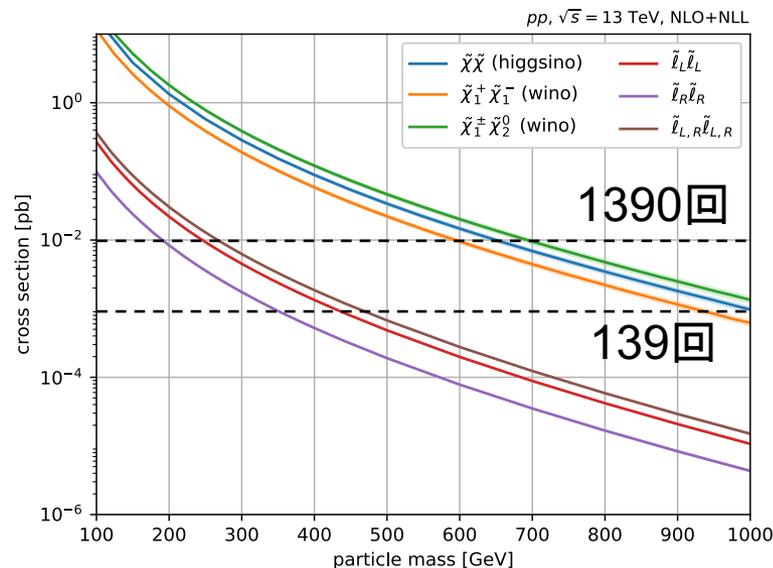
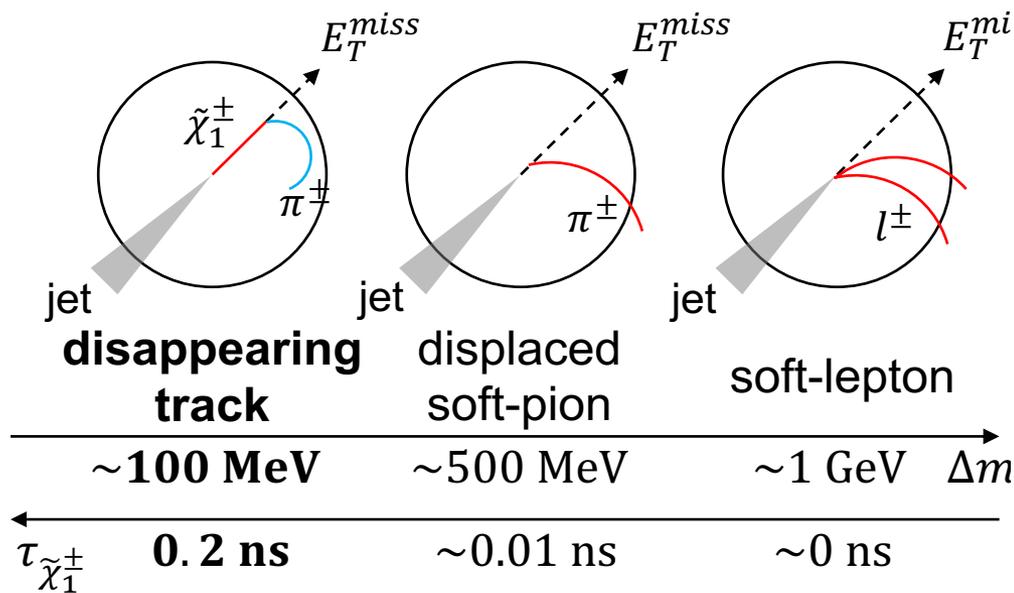
• 他の探索と相補的

- 直接探索における反応断面積が小さい領域を探せる
 - 電弱ゲージノが探せる
 - 作れるけど検出器で直接捉えられない
- 作れる質量は加速器のエネルギーに依存
 - LHCは13 TeV = TeVスケールのSUSY-DMを作れる



• DMより重いSUSY粒子からDMへの崩壊 · E_T^{miss} · jetで探す

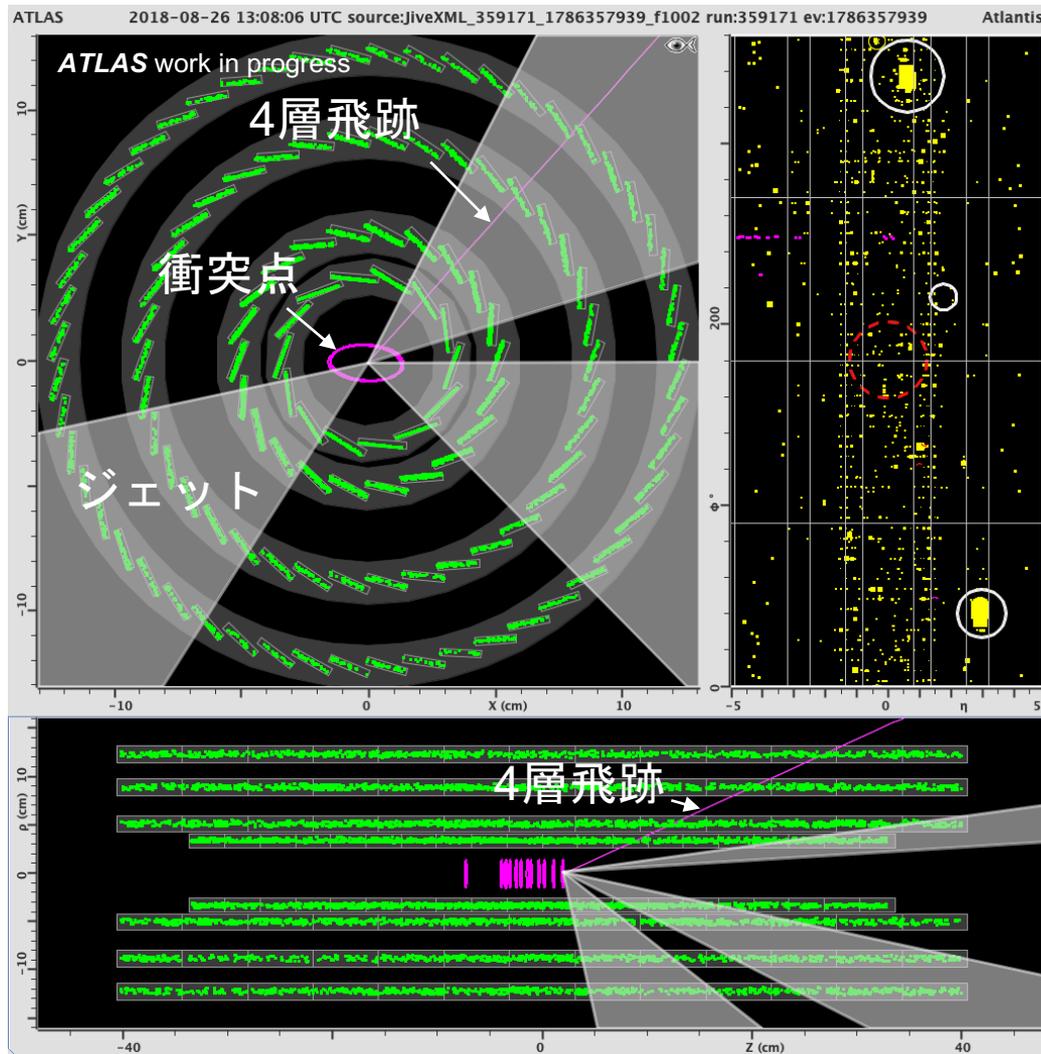
質量差によって特徴が出るのでBGと分離でき



$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ 0.2 ns

2022/2/20

新しい再構成による変化



イベントディスプレイ

run : 2018年, 359171

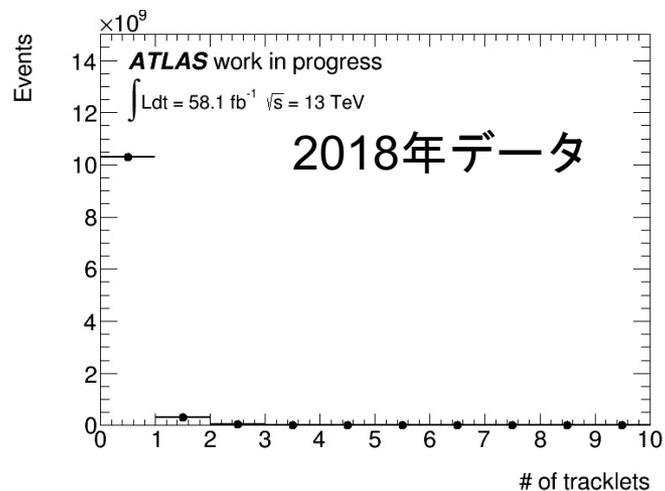
event : 1786357939

信号領域内の4層飛跡

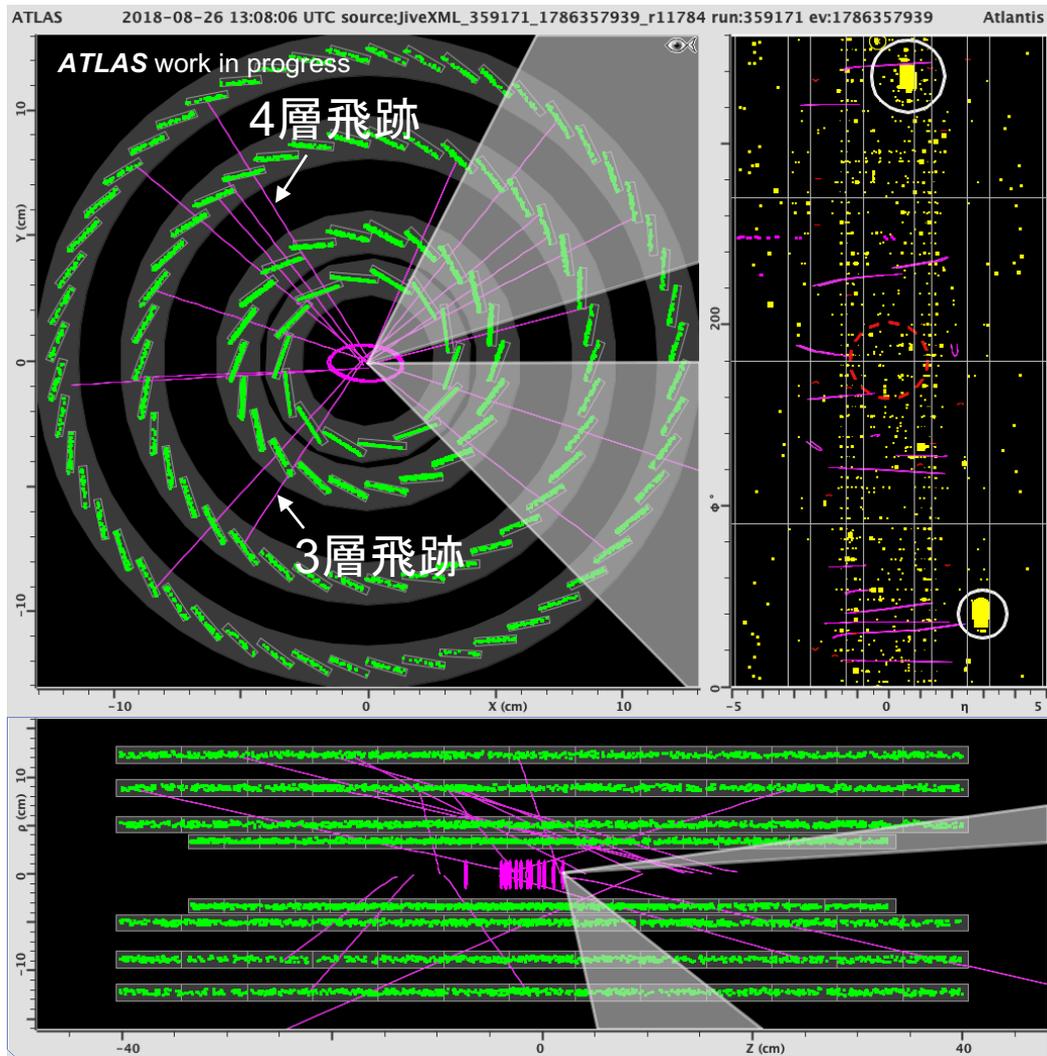
(低運動量)

いままで

- 1 eventに4層飛跡はほとんどない
 - あっても1本

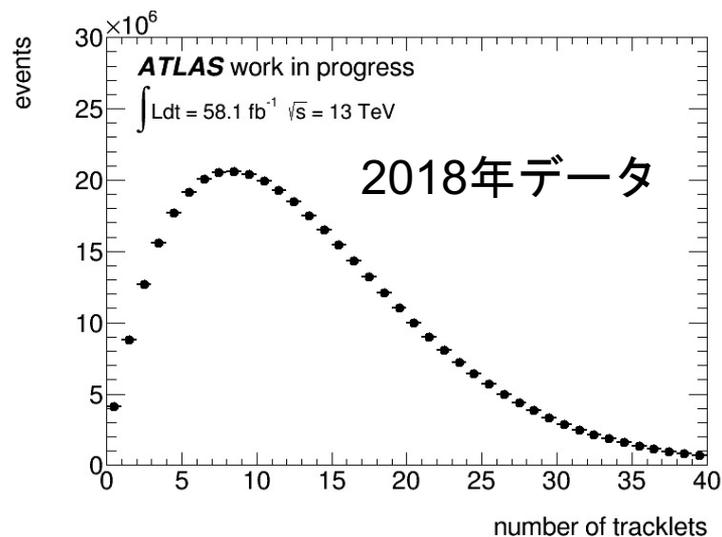


新しい再構成による変化



これから

- 1 eventに3・4層飛跡は
~10本 (最大100本以上)
➤ ただしpileupも多い

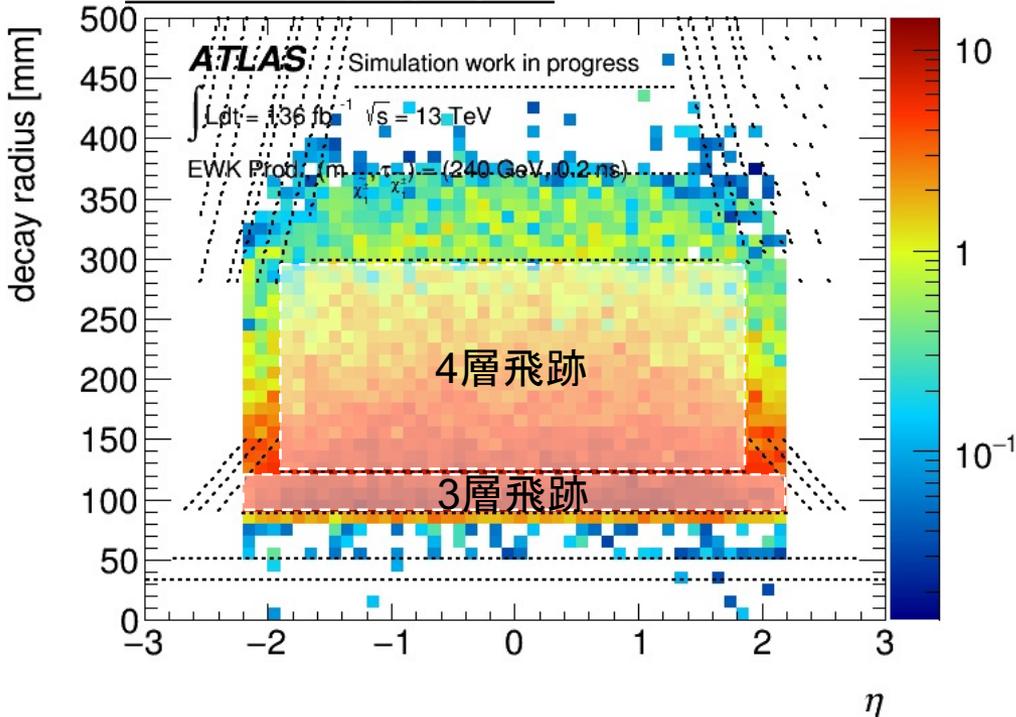


背景事象が劇的に
増えることが
予想される

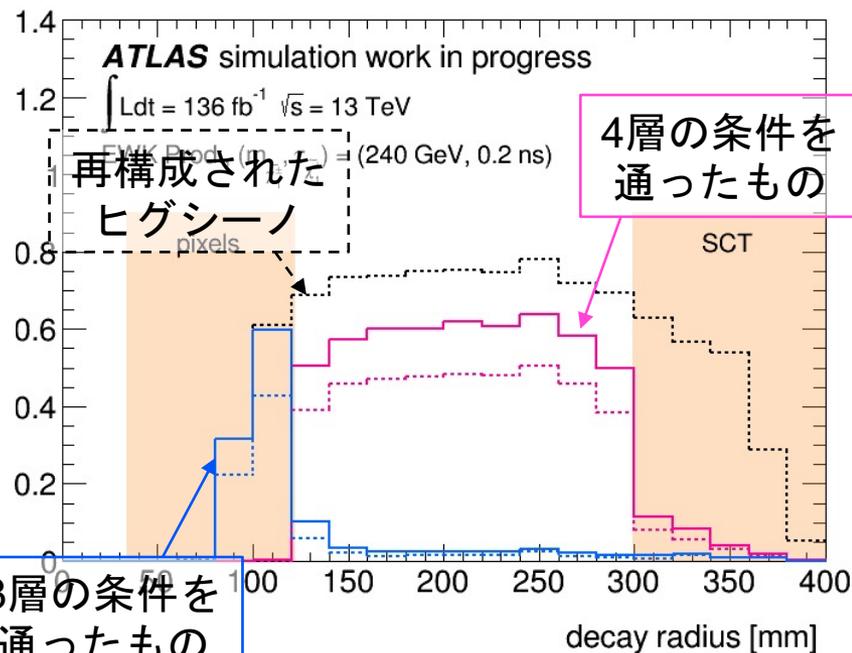
3層と4層の条件

検出器	4層飛跡	3層飛跡
pixel 1層目	○	○
pixel 2層目	○	○
pixel 3層目	○	○
pixel 4層目	○	×
pixel endcap	×	×
SCT	×	×

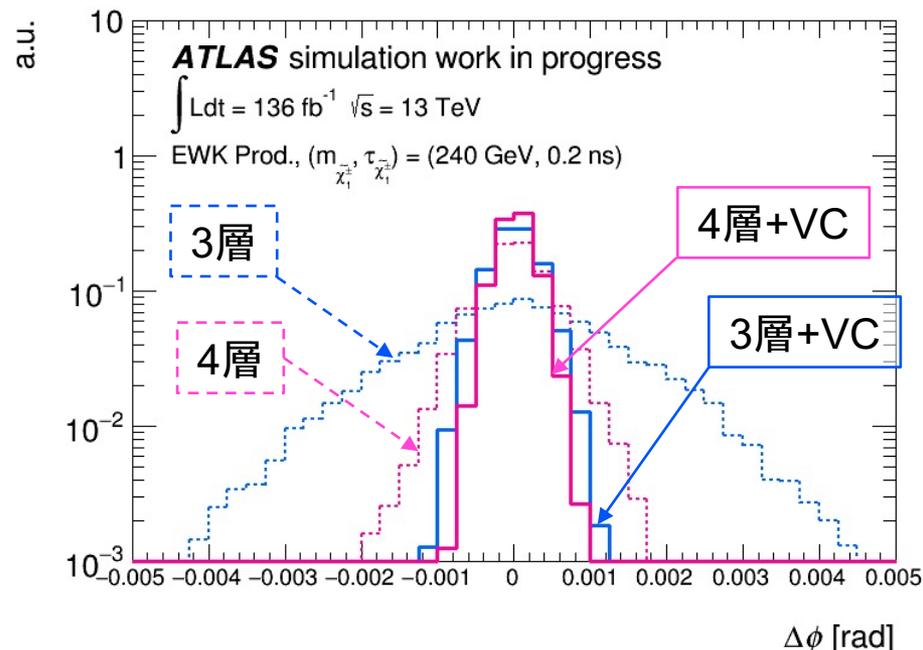
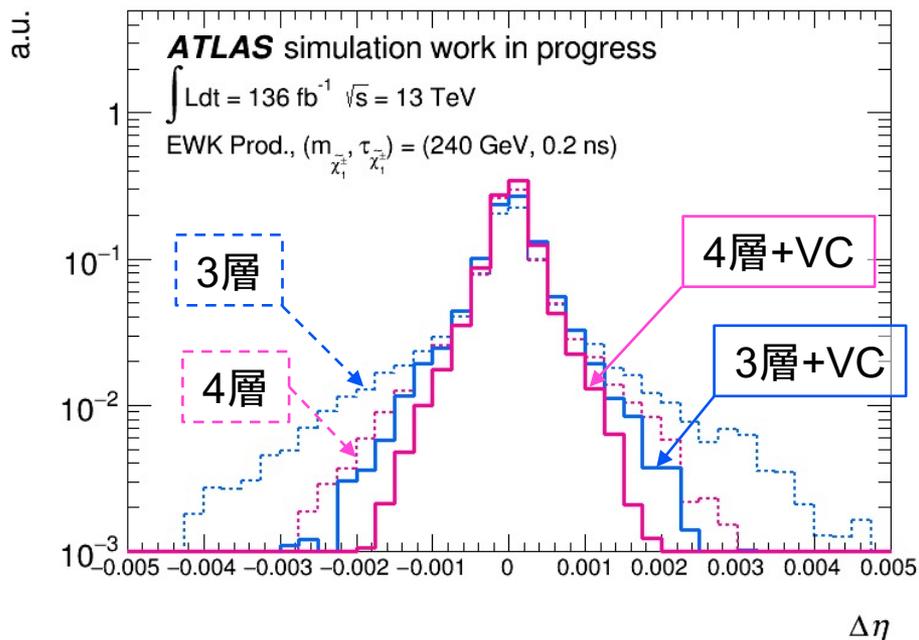
matchした再構成粒子



4層の条件を課すと途中抜け、
endcapに行ったもの、
SCTヒットがたまたま付加したもの
が落ちる

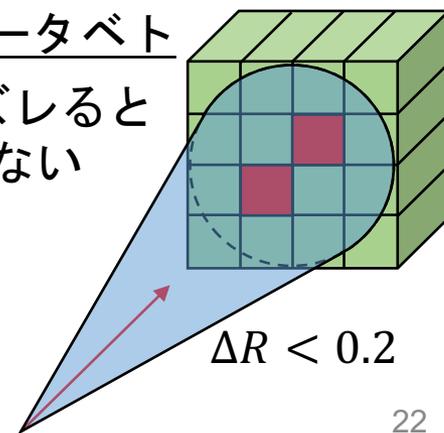


短い飛跡の方向分解能



3層飛跡であっても方向分解能はよい
 VCによってさらに改善する
 ズレても $\Delta\eta, \Delta\phi \sim O(0.001)$
方向を使った変数は今まで通り機能する

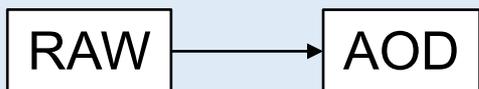
カロリメータバット
 方向がズレると
 使えない



RPVLLフィルター

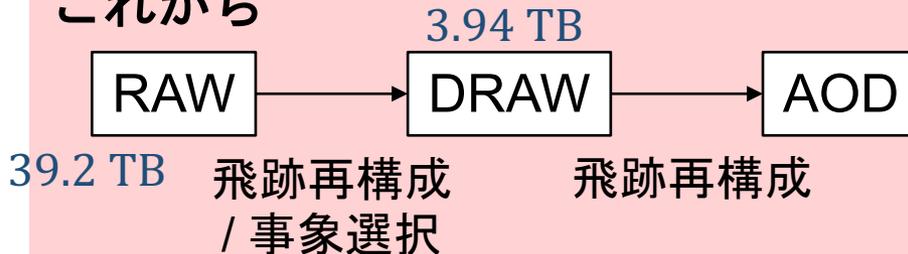
いままで

解析用にtreeが生データ 詰まったファイル



run 364292 飛跡再構成 9.06 TB
39.2 TB

これから



RPVLL フィルター

各事象に以下の選択を満たす飛跡が1本でもあればフィルターを通る

トポロジー

事象選択

ある程度運動量を持つ

$$p_T > 20 \text{ GeV}$$

質の高い飛跡

pixelに3つ以上ヒット
フィットの質が高い
大きく外れたヒットがない

バレル部に出る

$$0.1 < |\eta| < 1.9$$

他の粒子から離れている

$$\Delta R_{jet} > 0.3$$

衝突点近くから出る

$$|z_0 \sin \theta| < 5 \text{ mm}$$

信号事象候補を上流で探しておくことで下流での計算時間や容量を落とした

- 3層飛跡
- 全ヒット再構成を実装できた