



ATLAS 実験オーバービュー +  
ATLAS 実験における消失飛跡を用いた  
長寿命チャージーノの探索

早稲田大学 助手  
加地 俊瑛 (D論執筆中)  
28th ICEPP Symposium

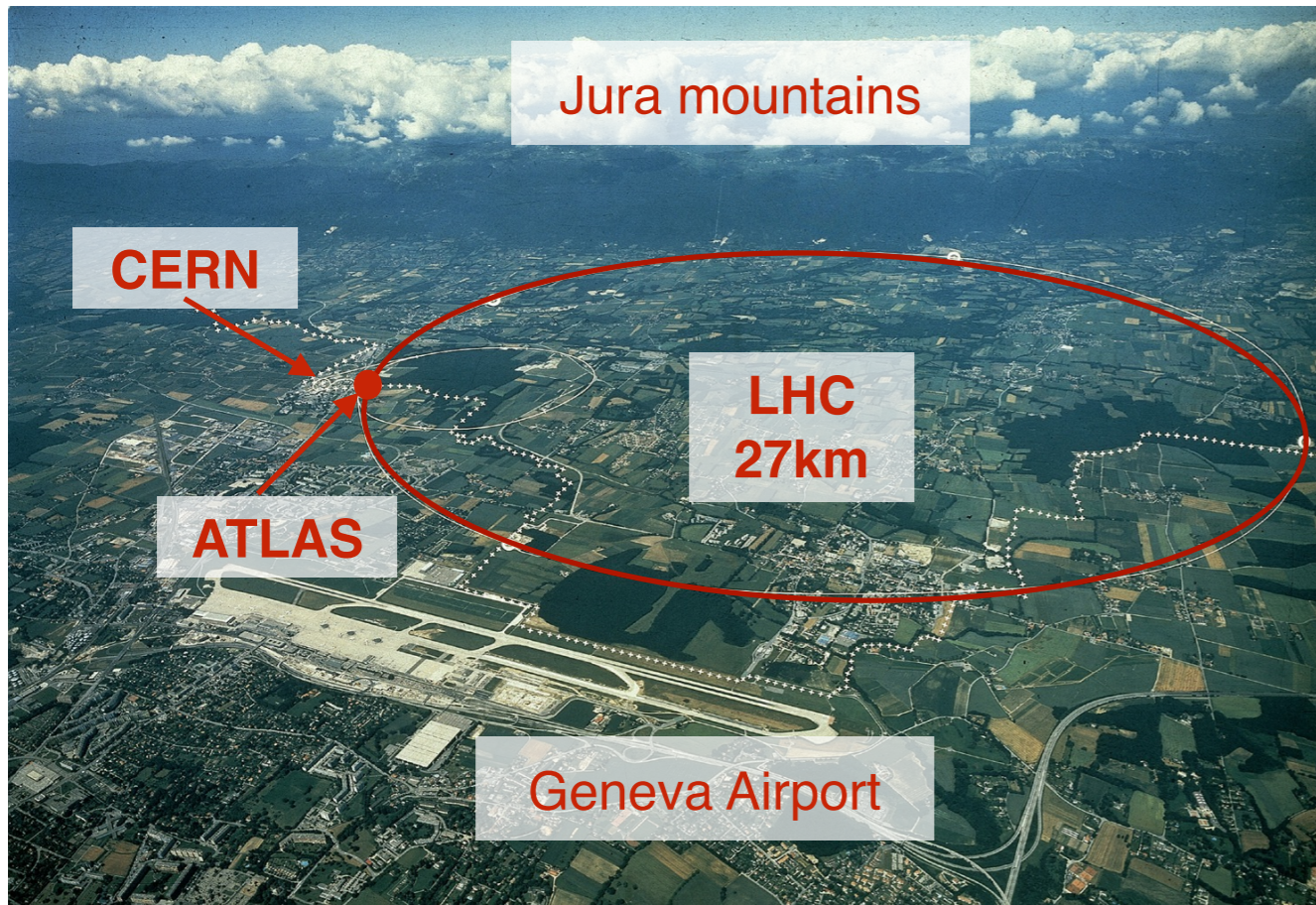
# ATLAS Overview

# LHC (Large Hadron Collider)

ジュネーブ近郊にある陽子-陽子衝突型円形加速器。

高エネルギー衝突によって重い既知・未知の粒子を作り出す。

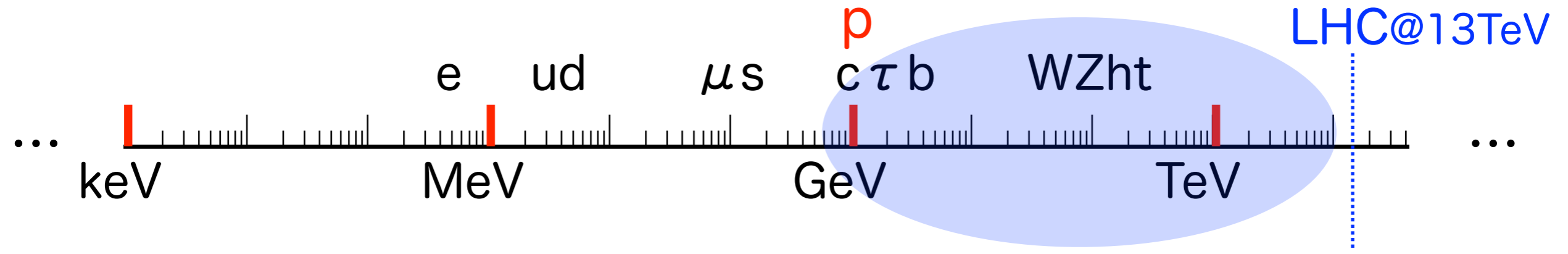
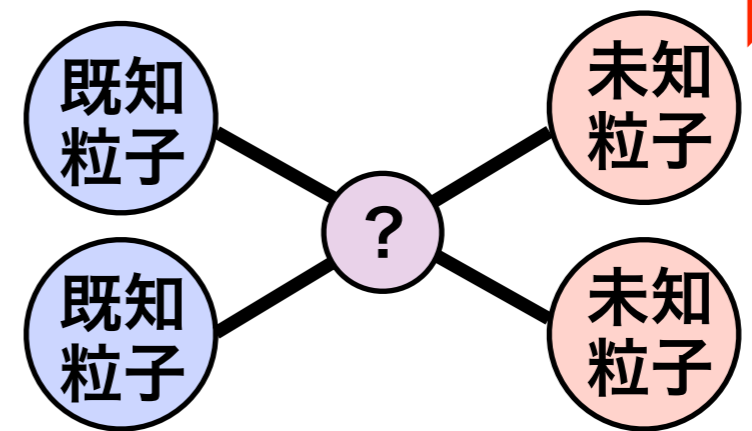
$$E = mc^2$$



## ATLAS 実験・CMS 実験

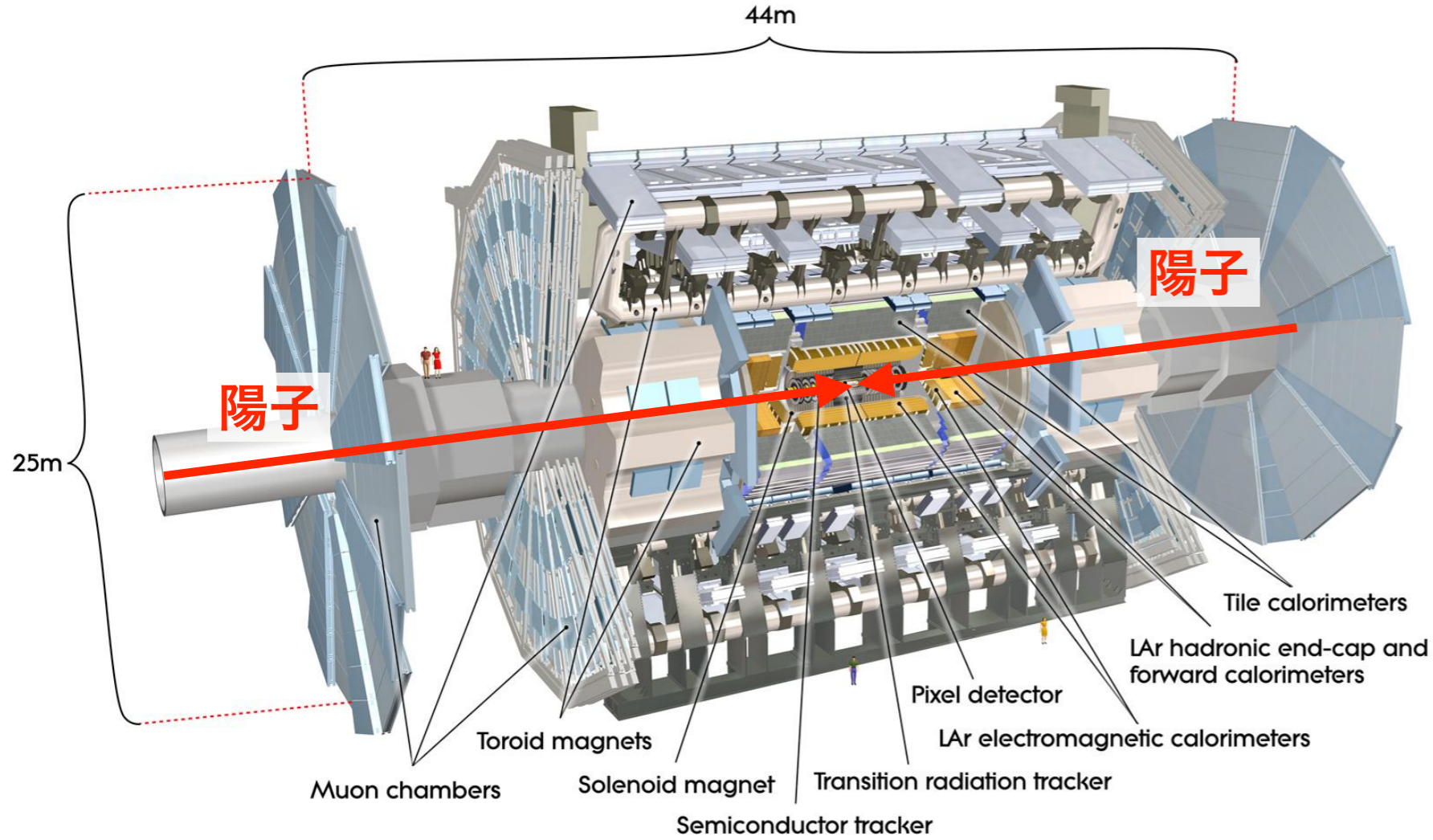
LHC によって作られた重い粒子の崩壊物を検出し元の粒子を辿ることで、標準模型の精密測定や新粒子発見を目指す。

加速器実験による新粒子探索

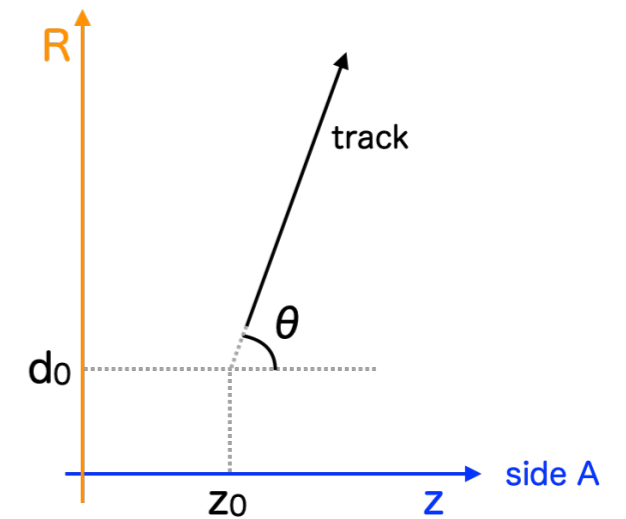
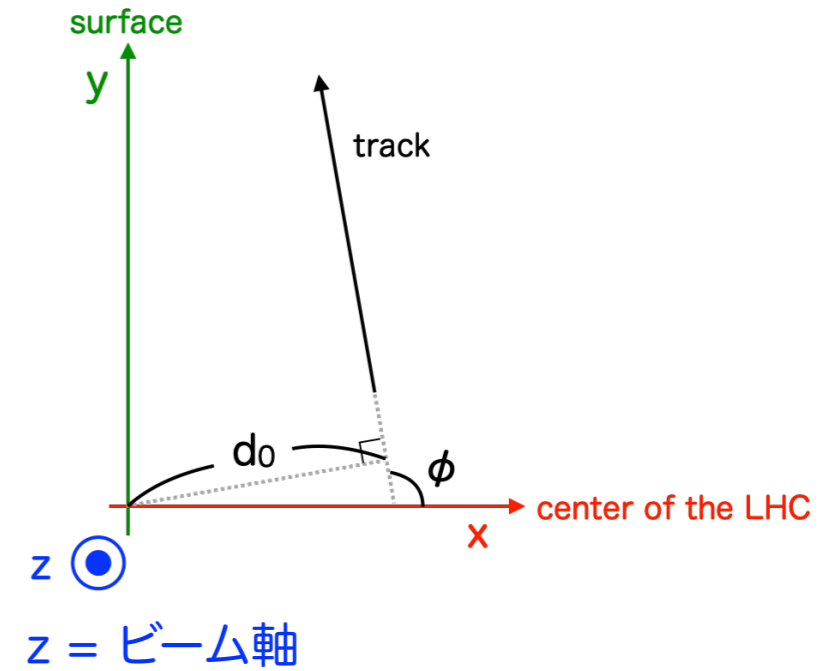


# ATLAS 検出器

## ATLAS 検出器 (全体像)



## ATLAS の座標系

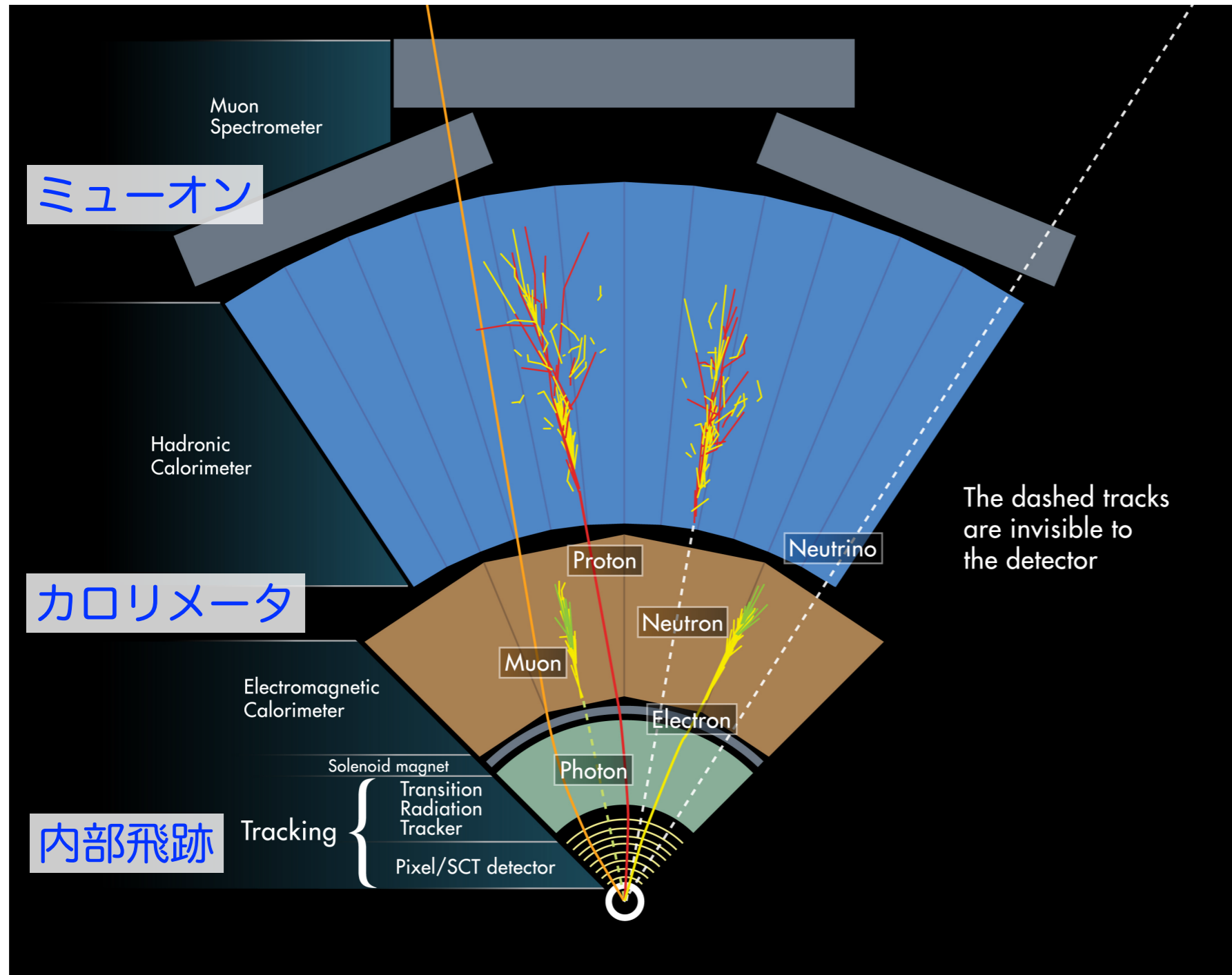


$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

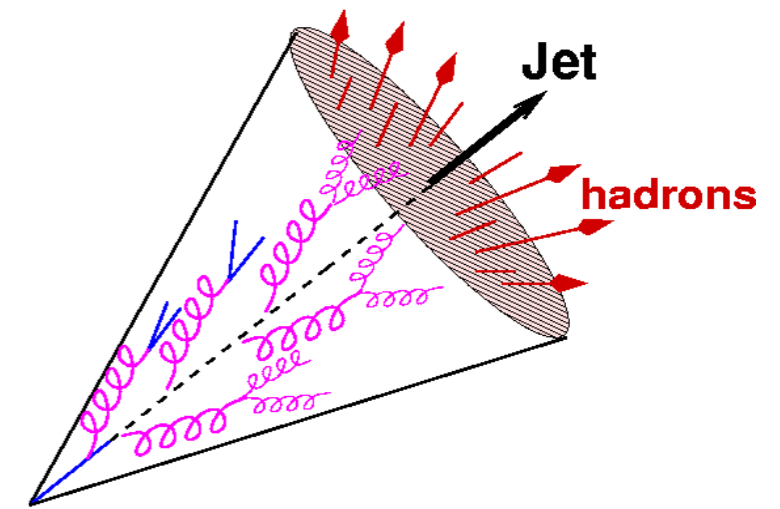
方向距離  $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$

ビーム衝突点からほぼ全方位をカバーする円筒形の検出器。

# ATLAS 検出器の構成と粒子識別



クォークやグルーオンは  
ジェット（粒子の束）  
として再構成する

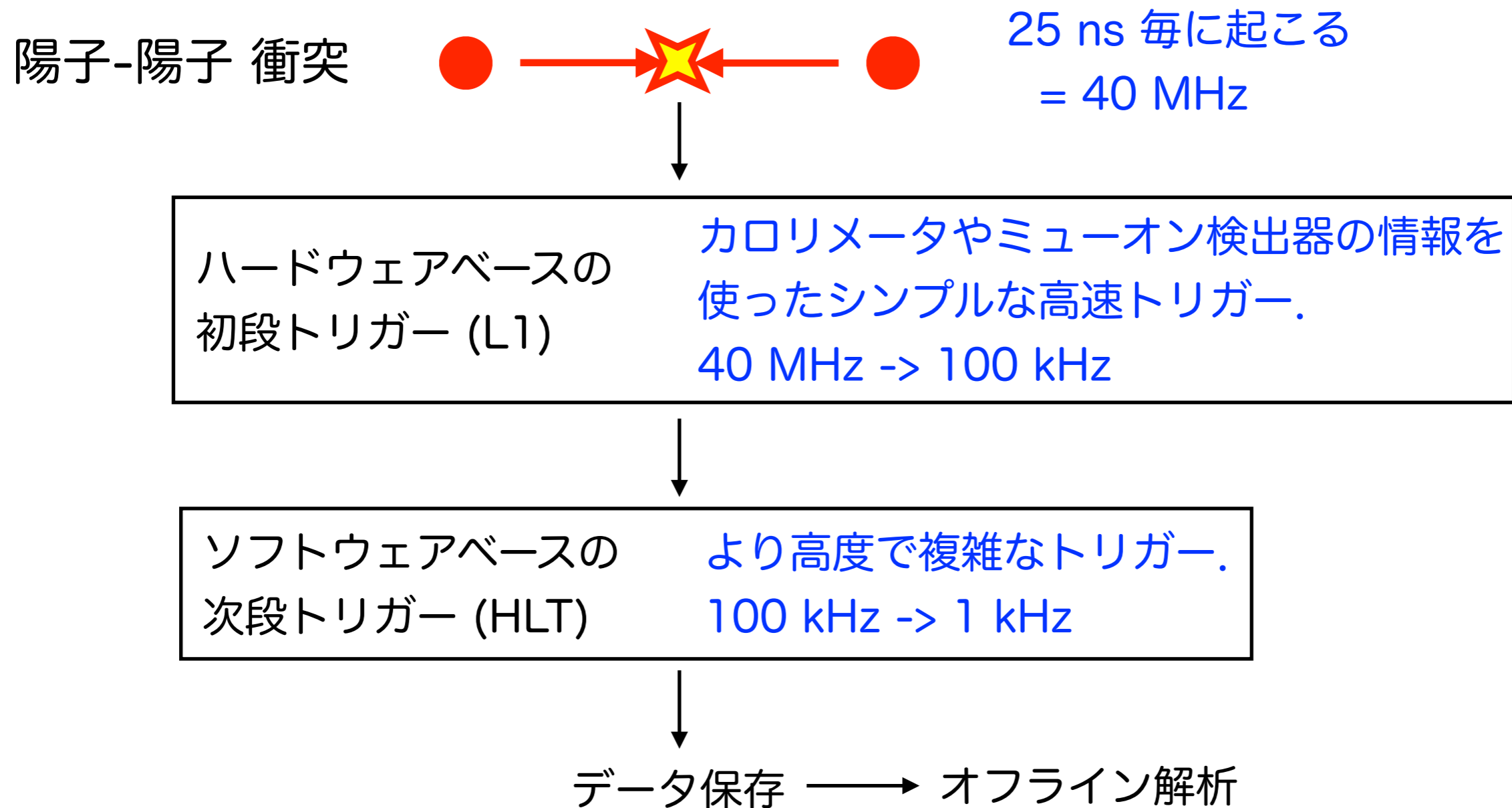


ニュートリノや DM は  
消失横運動量  $E_T^{\text{miss}}$   
として観測する。

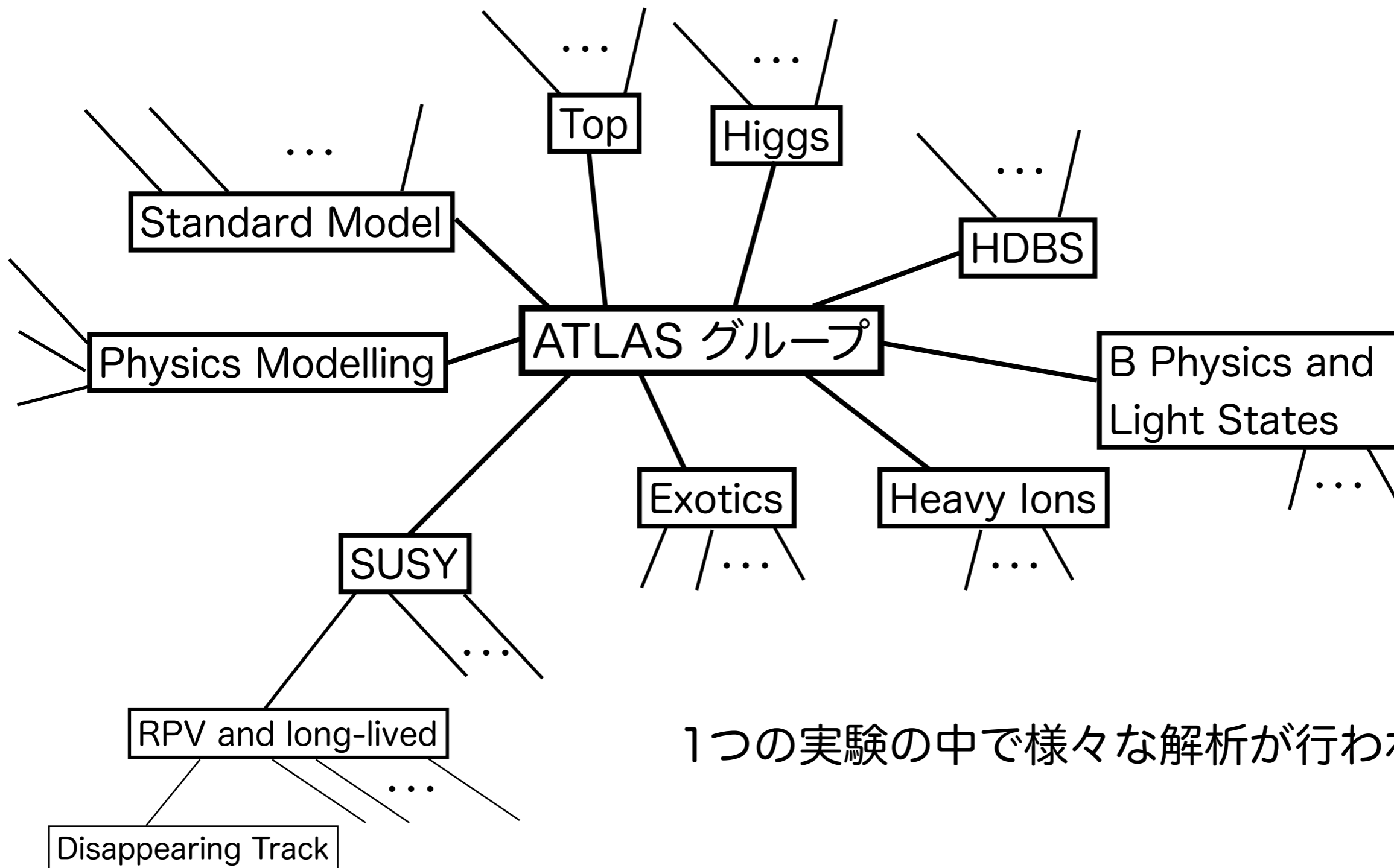


# トリガー

全事象を保存するにはリソースが足りないので、なるべくゴミだけの事象は落とし、興味深い事象は残す選別を行う。 -> トリガー  
ここで落とした事象は一生見れないので、トリガーはとても重要。



# 物理解析グループ



1つの実験の中で様々な解析が行われている。

↑ 僕の解析グループ

# 大雑把に加速器実験の要素

$$N_{\text{prod}} = \sigma \times \int \mathcal{L} dt$$

生成事象数      物理      加速器 (積分ルミノシティ  $\int \mathcal{L} dt$  fb<sup>-1</sup> ≡ 取得データ量)  
@ $\sqrt{s} = X$  TeV

$$N_{\text{obs}} = N_{\text{prod}} \times (\text{Acceptance}) \times (\text{Efficiency})$$

観測事象数      トリガー・検出器      解析



# LHC の運転スケジュールなど

## LHC

Run1 (2010 ~ 2012)

- 5 fb<sup>-1</sup> @7TeV + 20 fb<sup>-1</sup> @8TeV

- ヒッグス粒子発見 ← **ノーベル賞**

Run2 (2015 ~ 2018)

- 139 fb<sup>-1</sup> @13TeV

Run3 (2022 ~ 2025)

- ~300 fb<sup>-1</sup> @13.6TeV

## HL-LHC (High Luminosity LHC)

Run4, 5, ... (2029 ~ 2040)?

- ~3000 fb<sup>-1</sup> @14TeV?

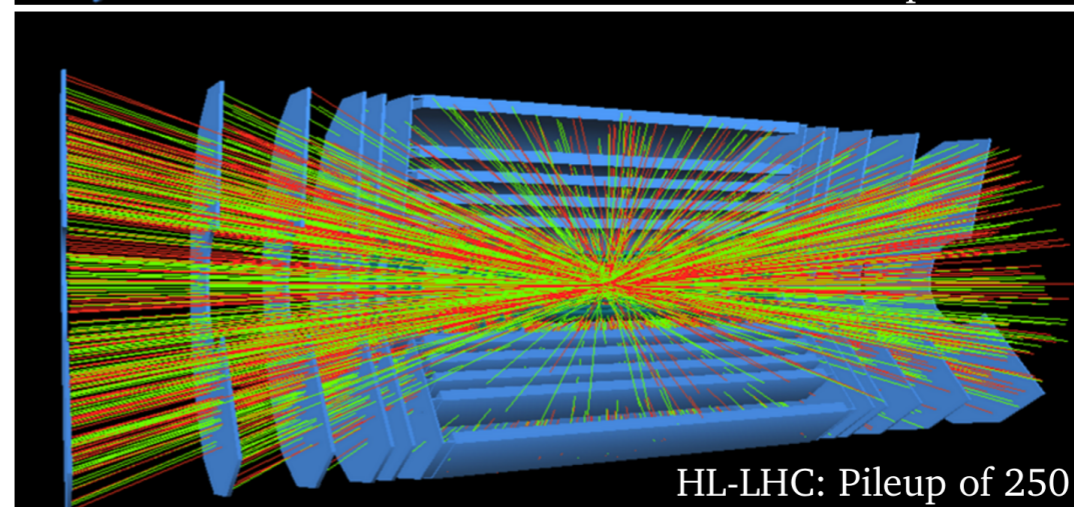
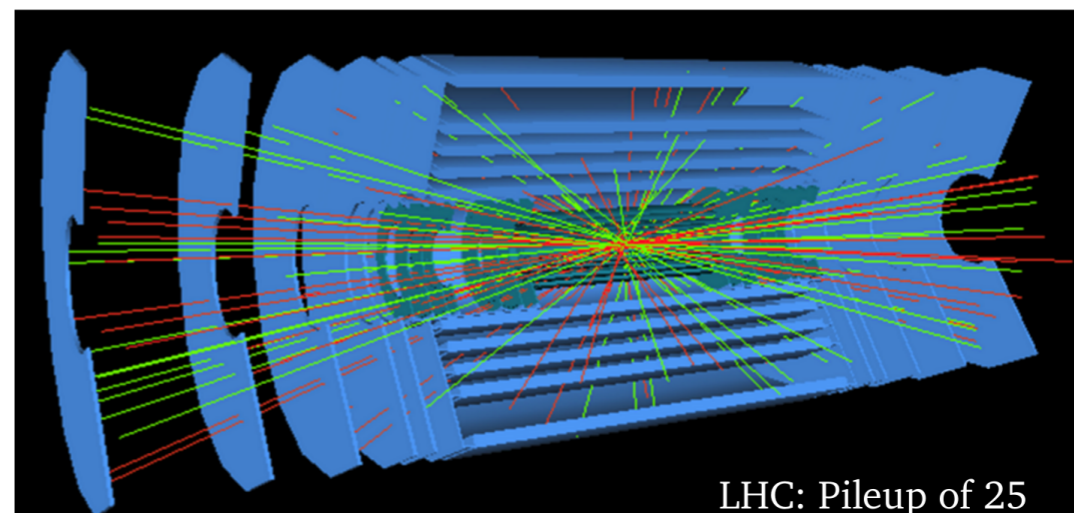
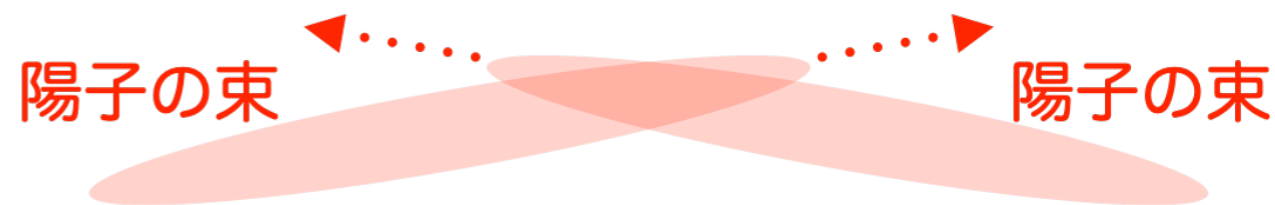
数年毎にデータ取得→加速器・検出器の増強

・メンテナンスを繰り返している。

現行の解析 → Run2

近未来の話 → Run3

将来の話 → HL-LHC



# ICEPP シンポジウム内での ATLAS トーク

## 解析

## トリガー・検出器

Run-2

加地(消失飛跡)

秋山(消失飛跡)

Lu(q-g識別)

Run-3

吉村(ミューオン)

Zang(カロリメータ)

林(ミューオン)

古川(カロリメータ)

HL-LHC

南(内部飛跡)

青木(ミューオン)

岡崎(ミューオン)

河本(ミューオン)

# My Analysis

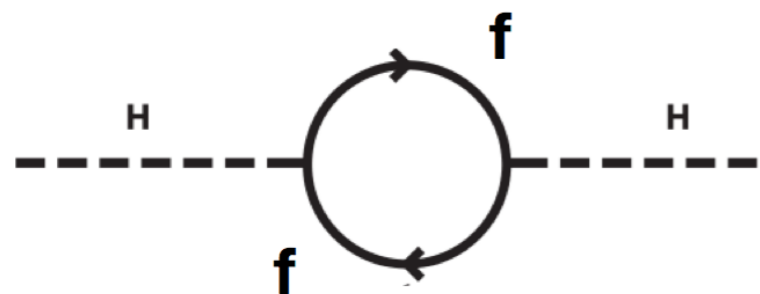
# Introduction

## 階層性問題


標準模型では higgs 質量は計算出来ない。

一方, higgs 質量の補正項  $\sim O(\Lambda^2)$  かつ higgs 質量 125 GeV.

$$m_h^2 = (m_h^{\text{bare}})^2 + (\Delta m_h)^2 \quad \Lambda = 10^{15\sim 19} \text{ GeV}$$



$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$



$$\Delta m_H^2 = +\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$

→ SUSY (supersymmetry) の導入

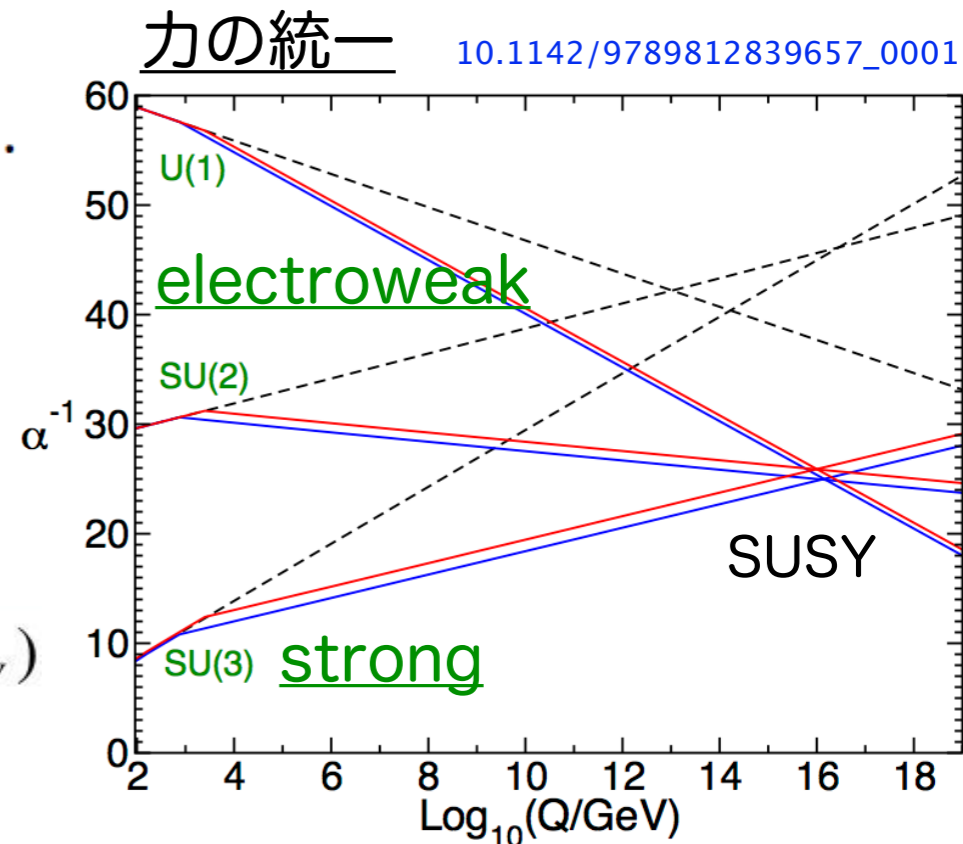
$$Q|\text{Fermion}\rangle = |\text{Boson}\rangle$$

$$Q|\text{Boson}\rangle = |\text{Fermion}\rangle$$

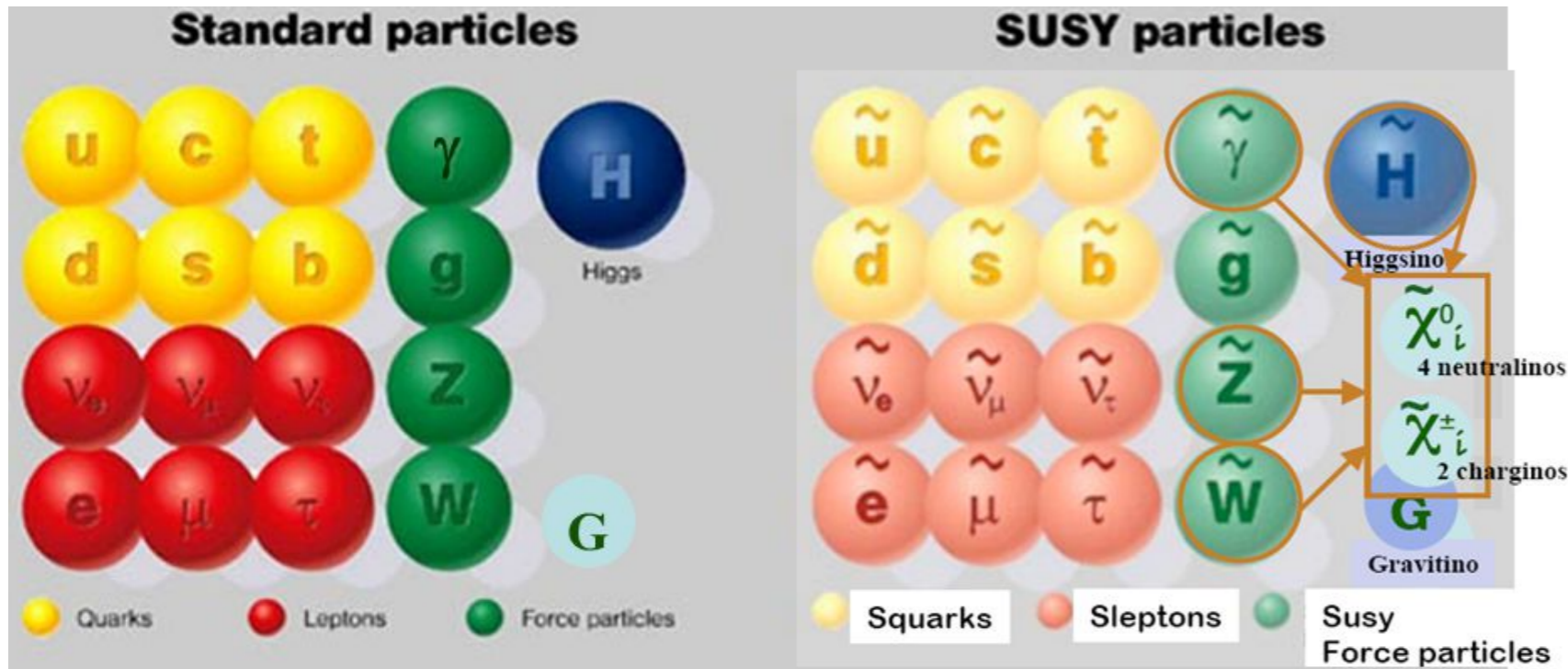
2 次の発散項を相殺することが可能

+ 力の統一具合も良くなる

$$\Delta m_H^2 \propto \log(\Lambda_{UV})$$



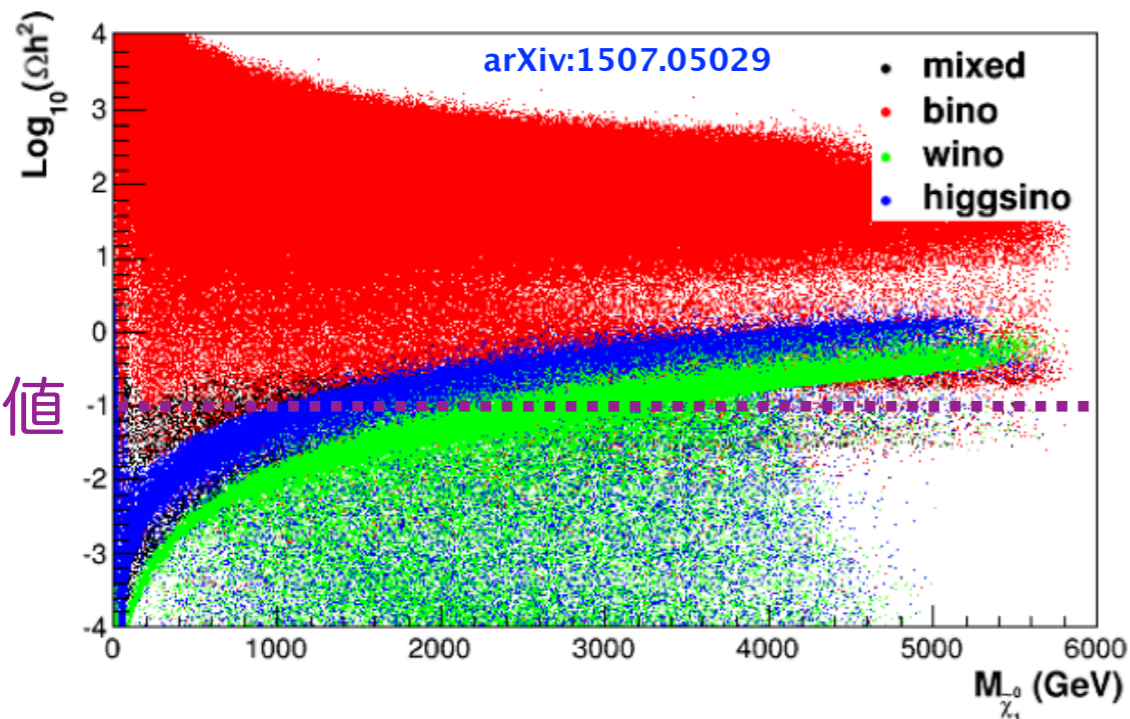
# SUSY - Neutralino Dark Matter?



LSP は暗黒物質候補  
(neutralino or gravitino)

LSP neutralino は  
pure-bino, pure-wino,  
pure-higgsino or mixed state?

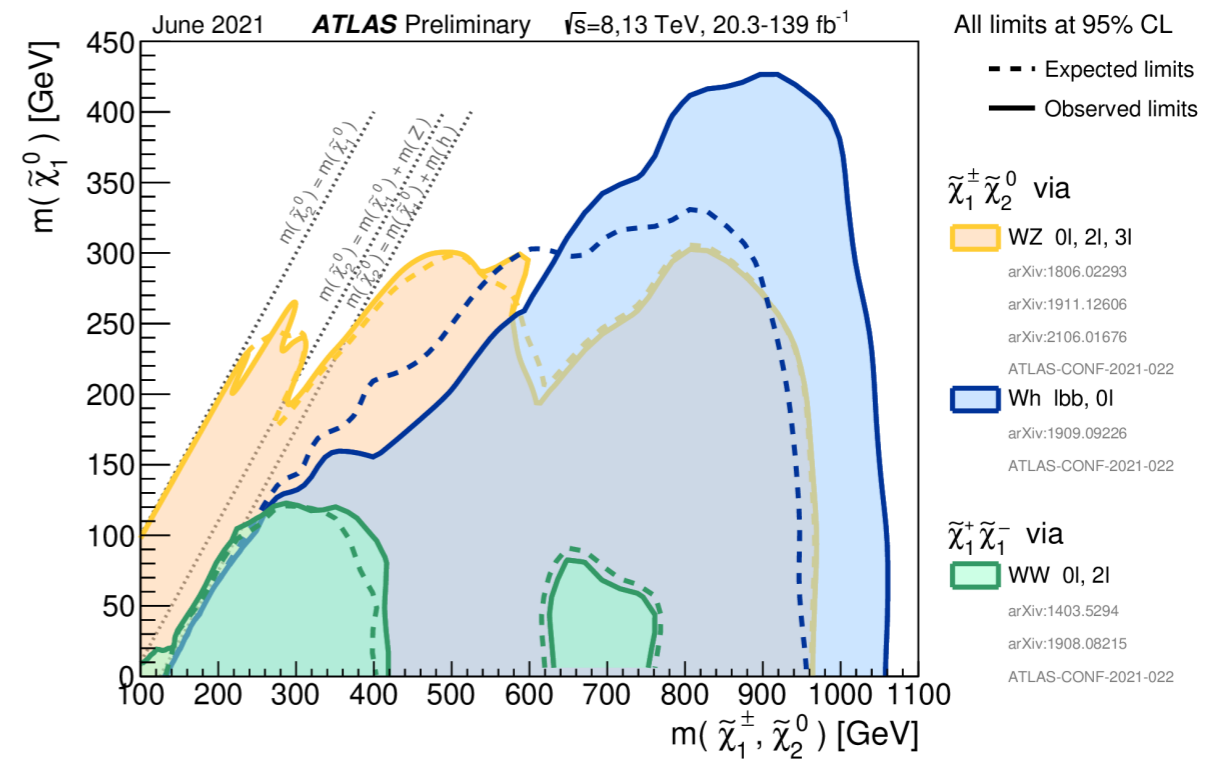
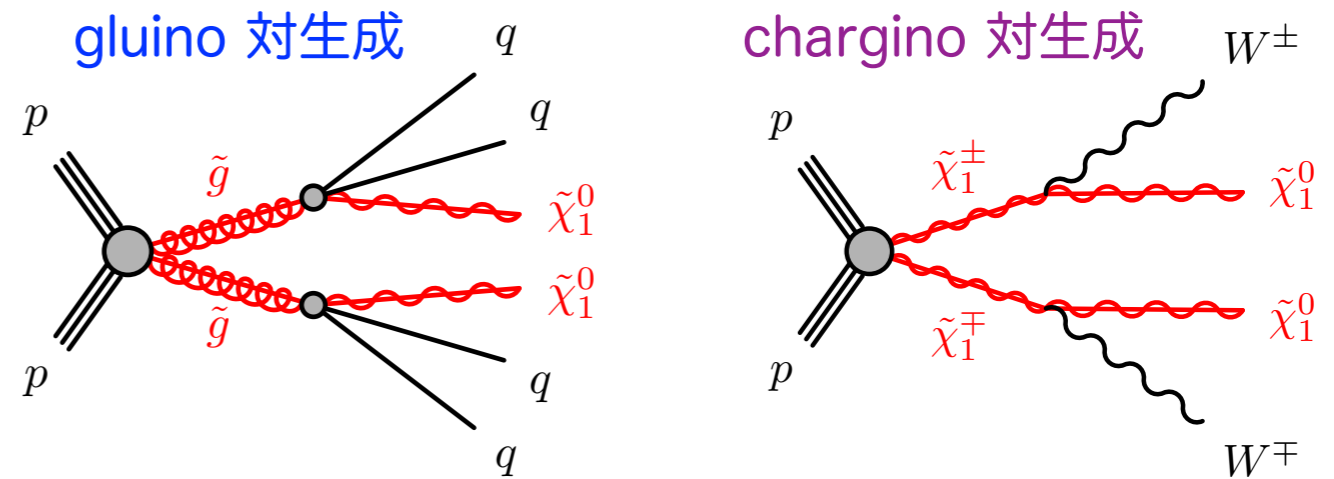
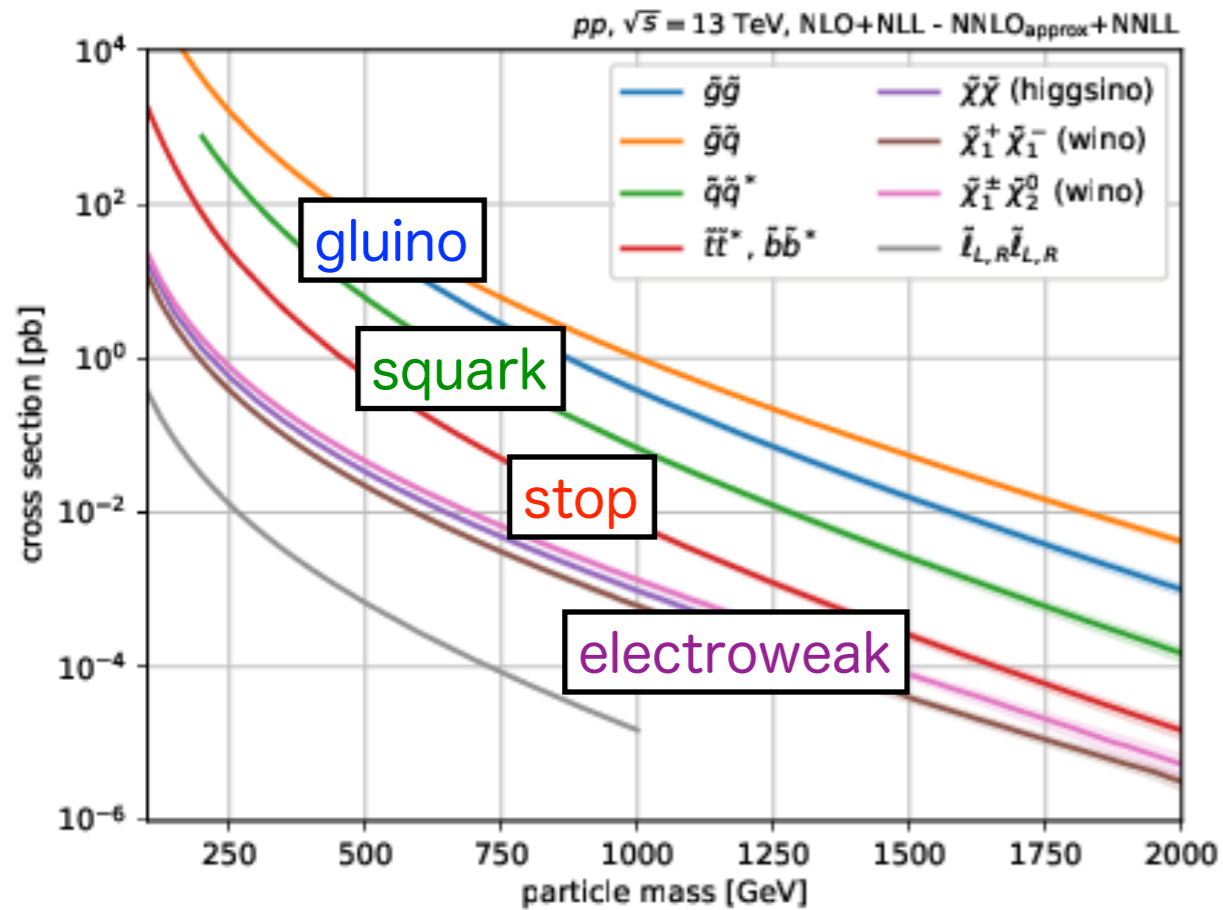
## Relic Density vs Neutralino Mass



Wino DM なら質量 約 3 TeV 以下  
Higgsino DM なら質量 約 1 TeV 以下

# SUSY Search

## SUSY 粒子の生成断面積



Strong SUSY 探索：複数の高エネルギージェット + 大きな MET

- gluino/squark 探索 ~ 2 TeV, stop 探索 ~ 1 TeV

EWK SUSY 探索：レプトンと MET.

生成断面積が低い分生成量が少ない。

特に縮退領域はハードなオブジェクトが無く探索が難しい。

# Disappearing Track

ATLAS 内部飛跡検出器

LSP : pure-wino (mass < ~3 TeV)

$$\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) : \sim 160 \text{ MeV}$$

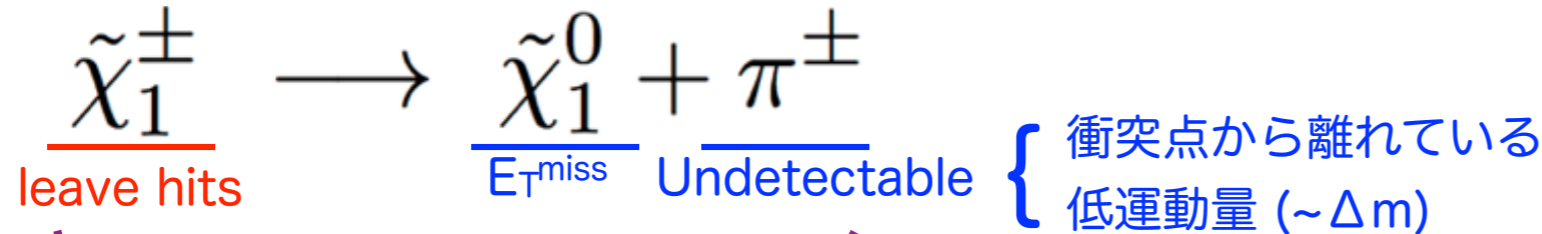
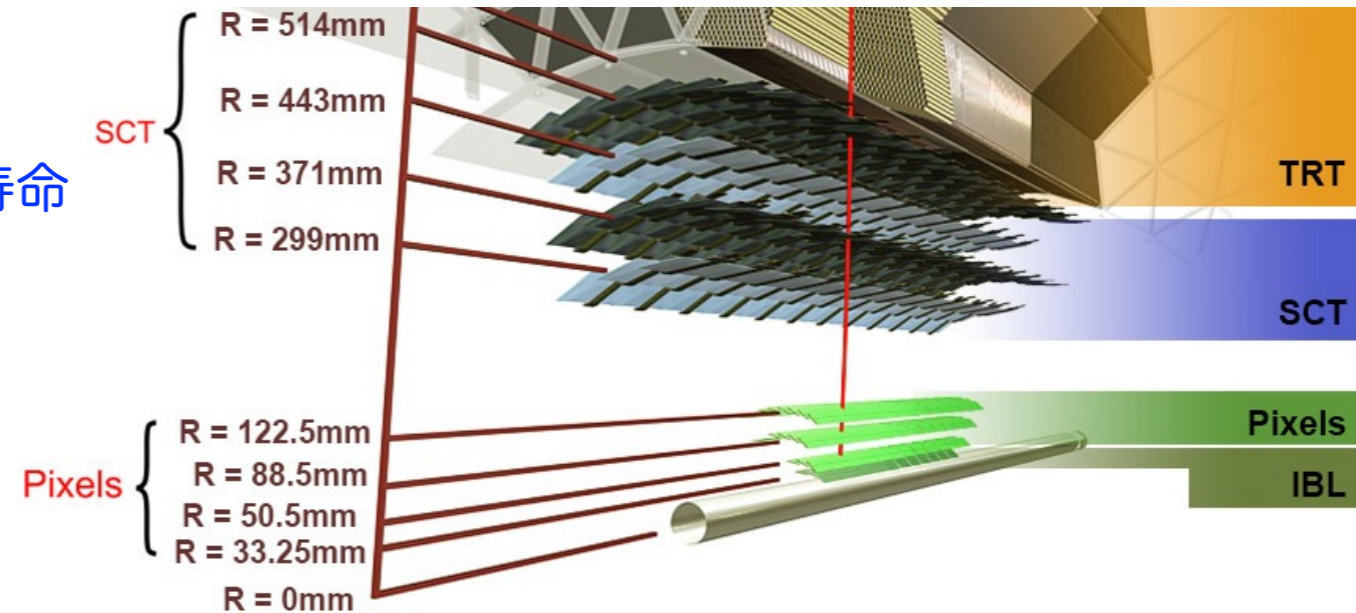
$c$  : 光速,  $\tau$  : 寿命

$$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} : \sim 0.2 \text{ ns} \quad (c\tau \sim 60 \text{ mm})$$

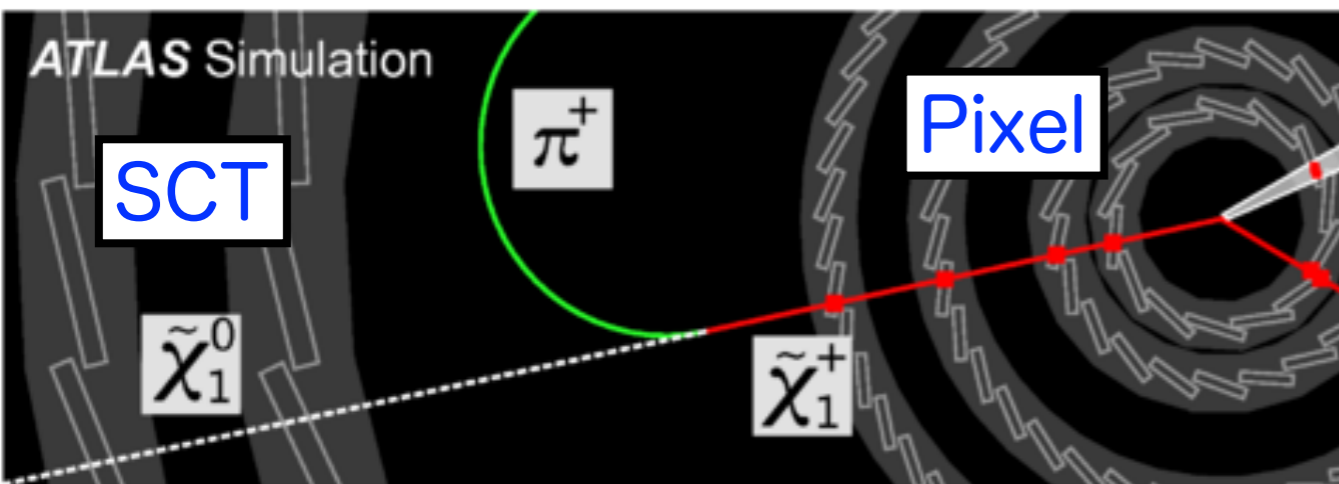
LSP : pure-higgsino (mass < ~1 TeV)

$$\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) : \sim 300 \text{ MeV}$$

$$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} : \sim 0.04 \text{ ns} \quad (c\tau \sim 12 \text{ mm})$$



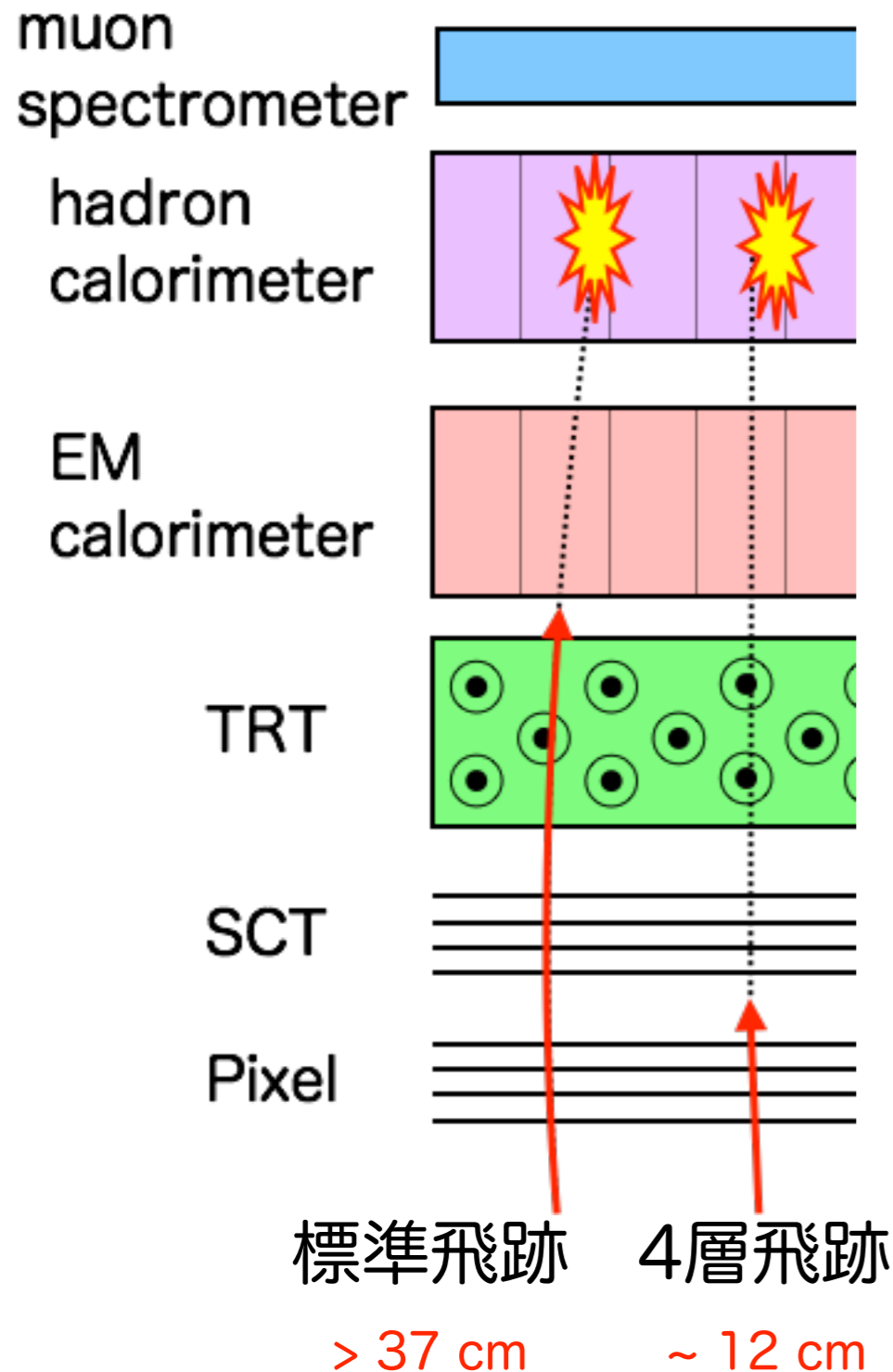
⇒ disappearing track



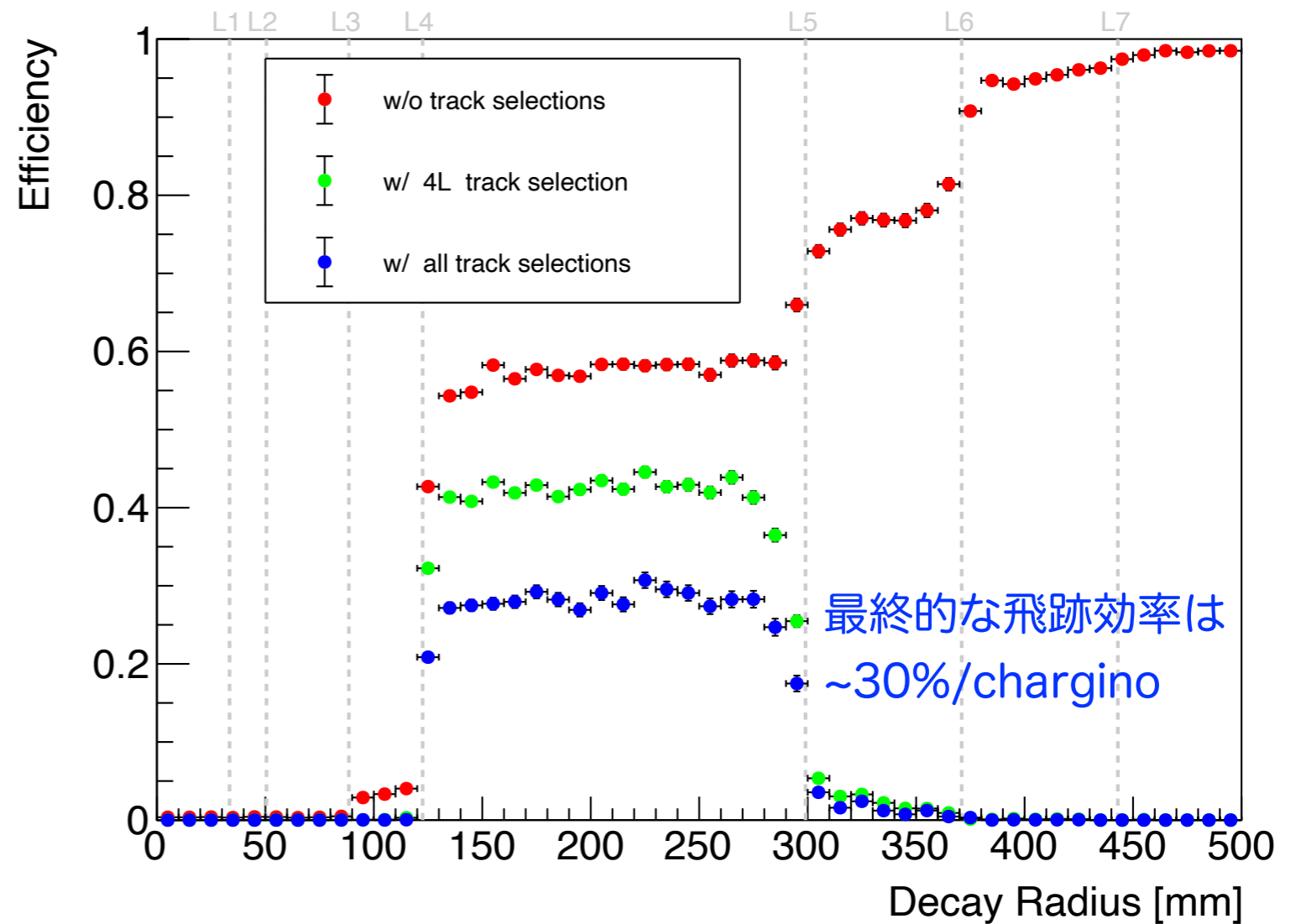
chargino の短い飛跡を再構成することが出来れば、暗黒物質候補として有力な EWK SUSY の縮退領域を探索することが出来る。

# 4-Layer Track Reconstruction

## ATLAS 検出器の構成



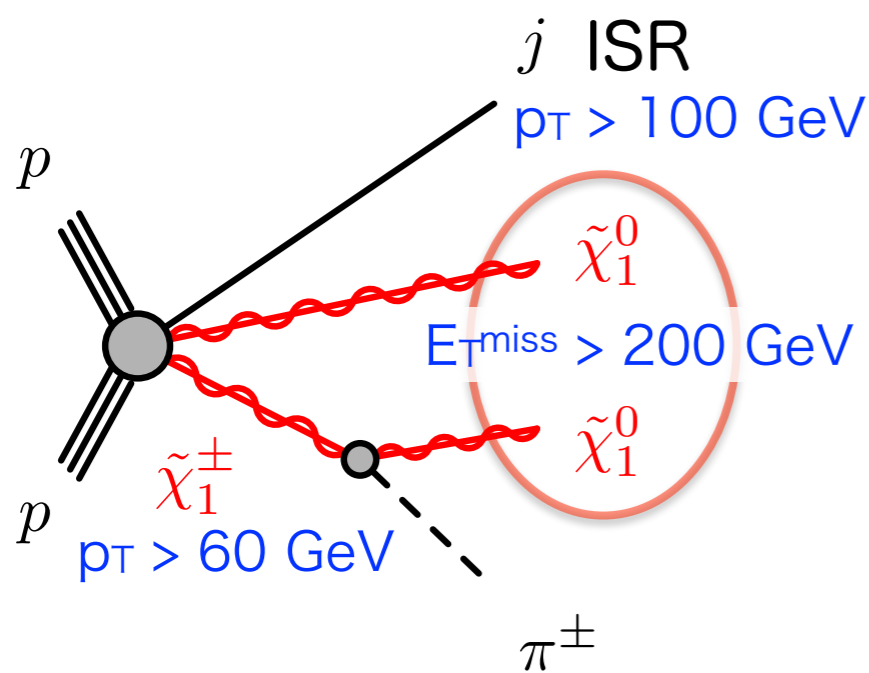
- ✓ 標準の飛跡再構成で使われなかったヒットのみを使い、条件を緩めて再構成
- ✓ Pixel 4 層目(12 cm) を通過し、SCT 2 層目まで到達しないような短い飛跡を再構成可能





# 信号の生成過程及び事象選択

## Electroweak(EWK) Production



## 事象選択

• Data : 2015 - 2018 (136 fb<sup>-1</sup>)

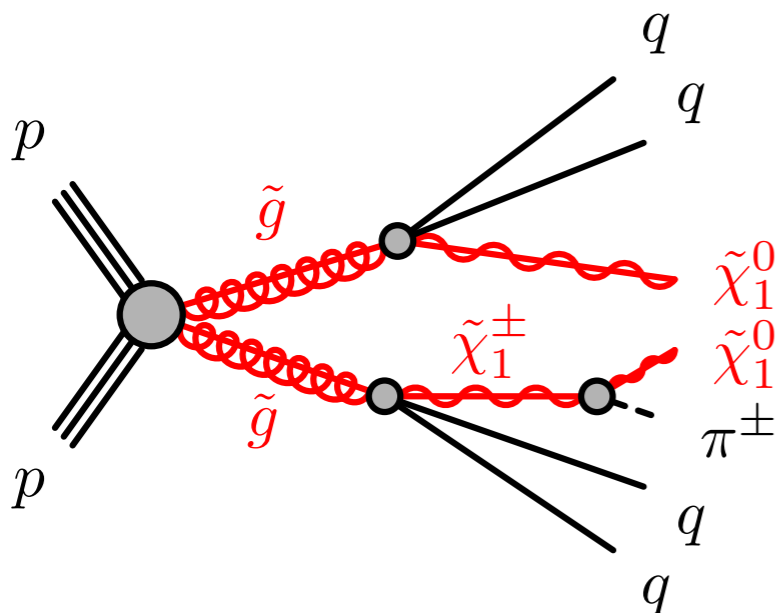
•  $E_T^{\text{miss}}$  トリガー

• Lepton VETO

• Kinematics

	EWK	Strong
$E_T^{\text{miss}} >$	200 GeV	250 GeV
leading Jet $p_T >$	100 GeV	100 GeV
2 <sup>nd</sup> and 3 <sup>rd</sup> Jet $p_T >$	-	20 GeV
$\Delta\phi_{\text{min}}(\text{Jet}_{1,2,3,4}, E_T^{\text{miss}}) >$	1.0	0.4

## Strong Production



• 消失飛跡候補:

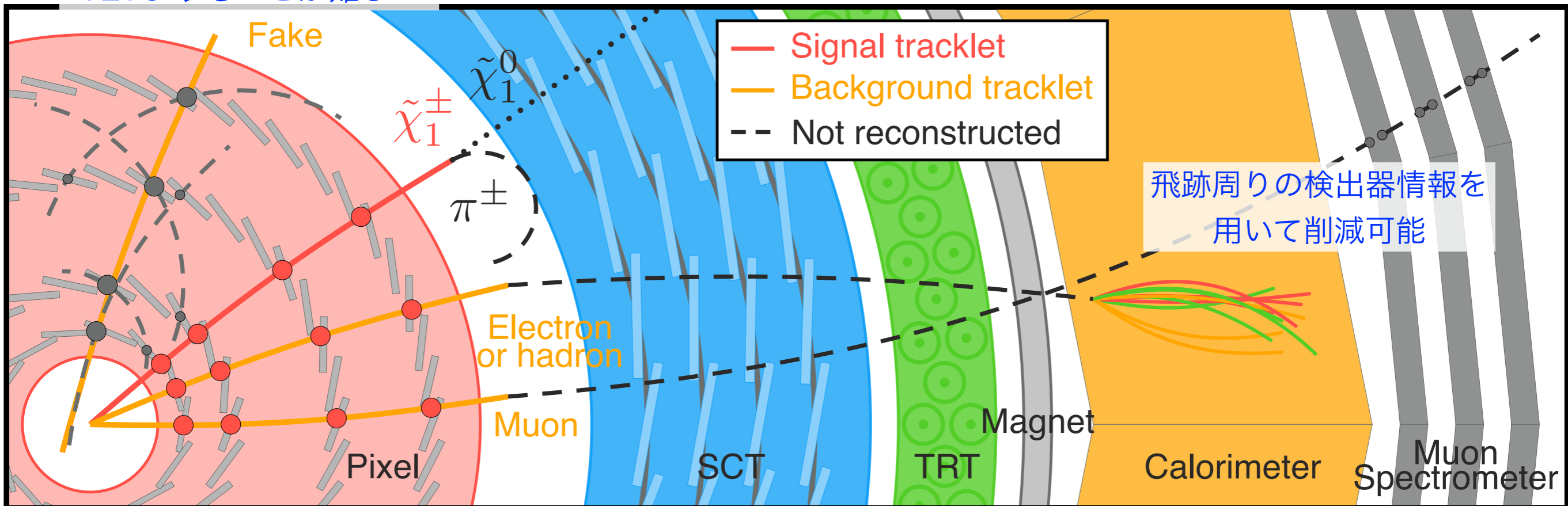
- 飛跡の質が良く他のオブジェクトから離れている
- high- $p_T$  (> 60 GeV for model-independent analysis)
- 4 層飛跡 (SCT VETO)
- カロリメータ VETO

↳ 背景事象削減のための新しい要求

# 信号及び BG(背景事象) の特徴

主な BG process :  $t\bar{t}$ ,  $W$ +jets ,  $Z \rightarrow \nu \nu$ +fake

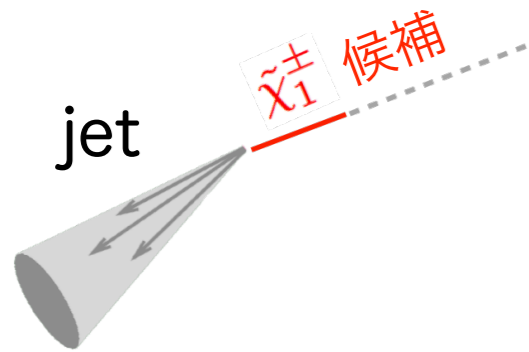
ランダムコンビネーション  
VETO することが難しい



散乱によって折れ曲がり,  
4 層飛跡として再構成される場合がある

# 背景事象推定の概要

## 信号事象のトポロジー

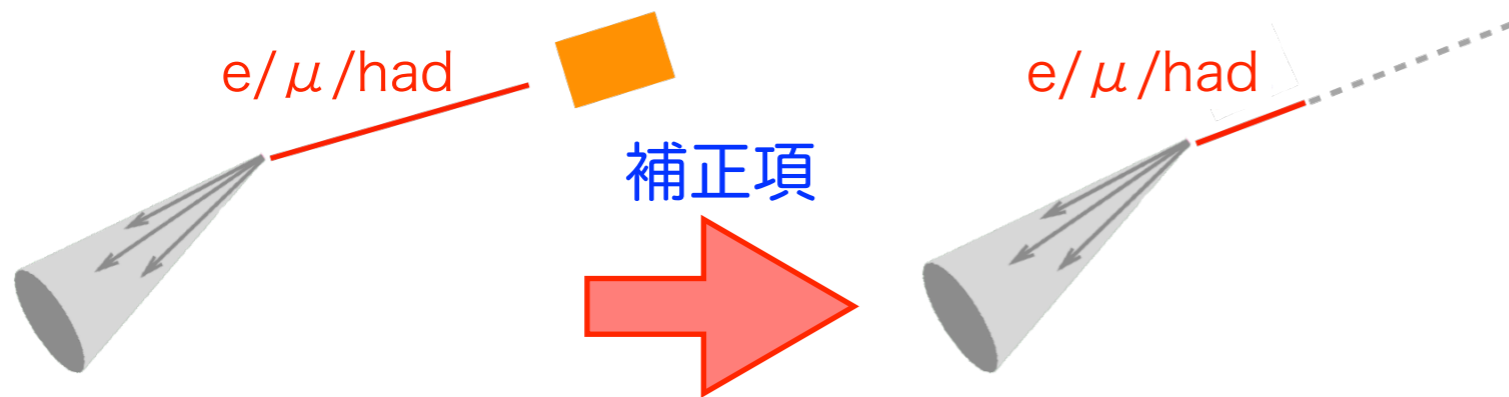


## 解析手法の概要

BG の  $p_T$  分布をデータドリブンで見積もり, low- $E_{T}^{\text{miss}}$  領域, high- $E_{T}^{\text{miss}}$  領域の  $p_T$  分布を同時にフィット(BG only).

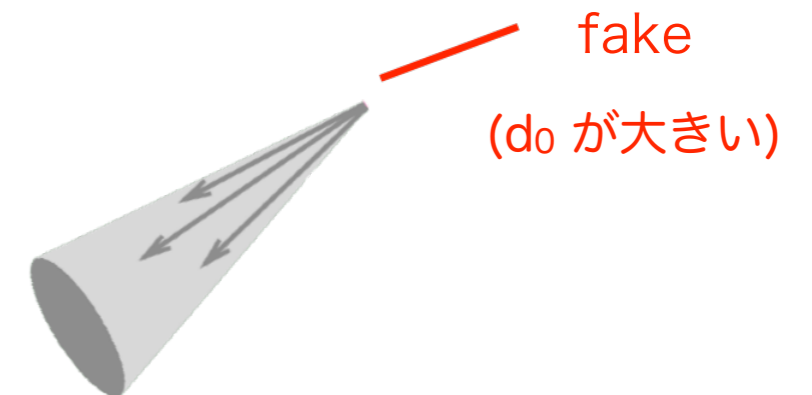
各 BG の内訳及び [SR\(信号領域\)](#) の BG 数を見積もる.

## e/ $\mu$ /hadron BG の見積もり



データドリブンで見積もった補正項を適用し, smearing function で 4 層飛跡の  $p_T$  分布を推測

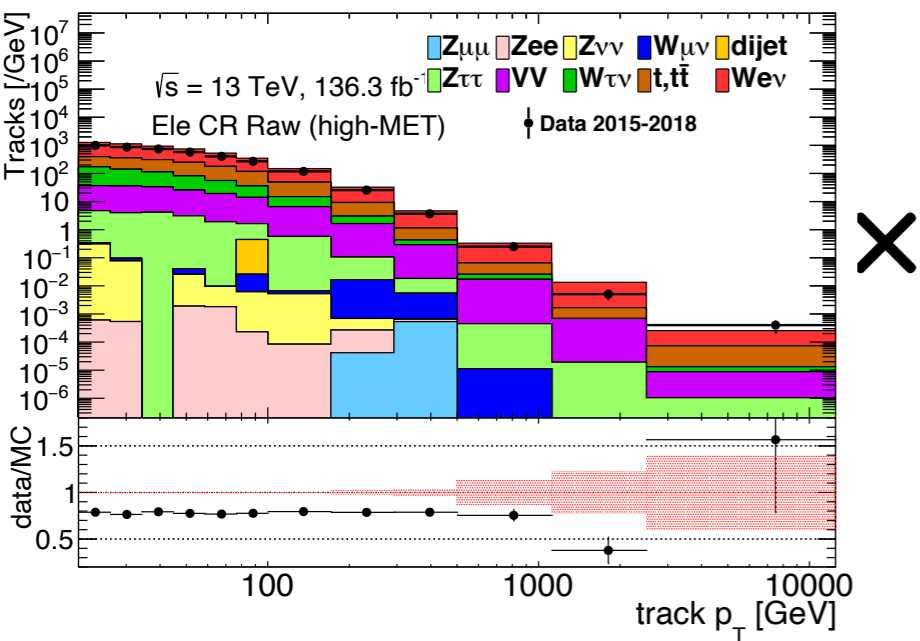
## fake BG の見積もり



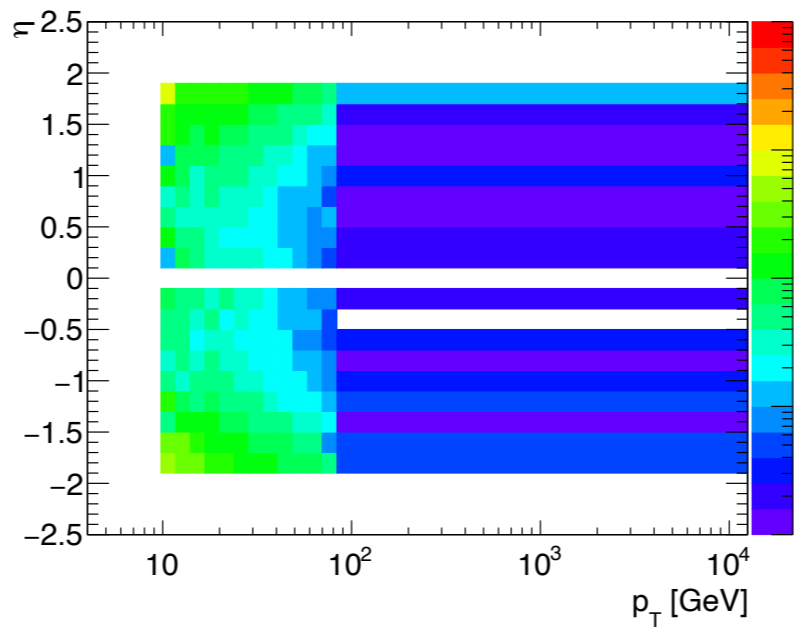
4層飛跡の  $p_T$  分布を直接見積もる

# 例) Electron BG の見積もり

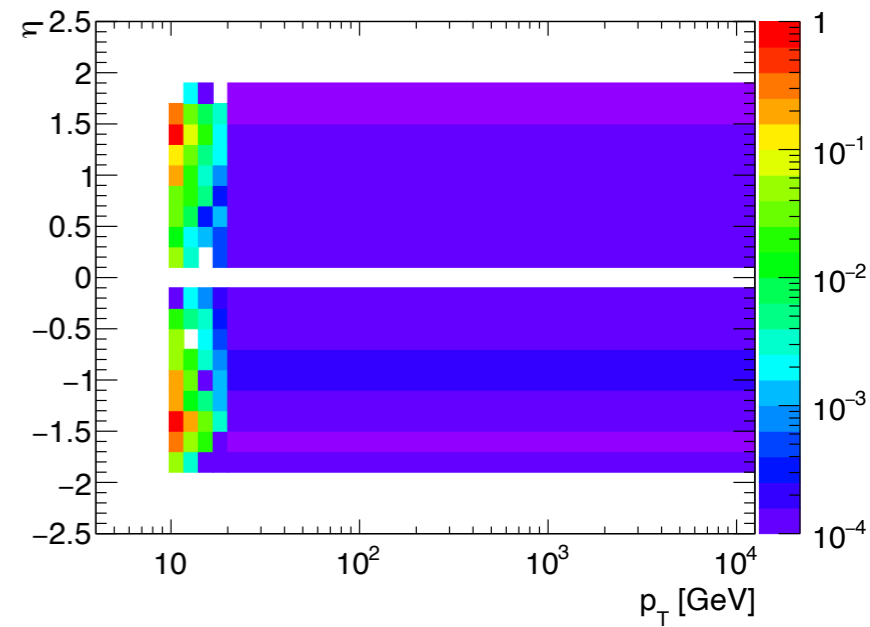
Track pT in BG-CR



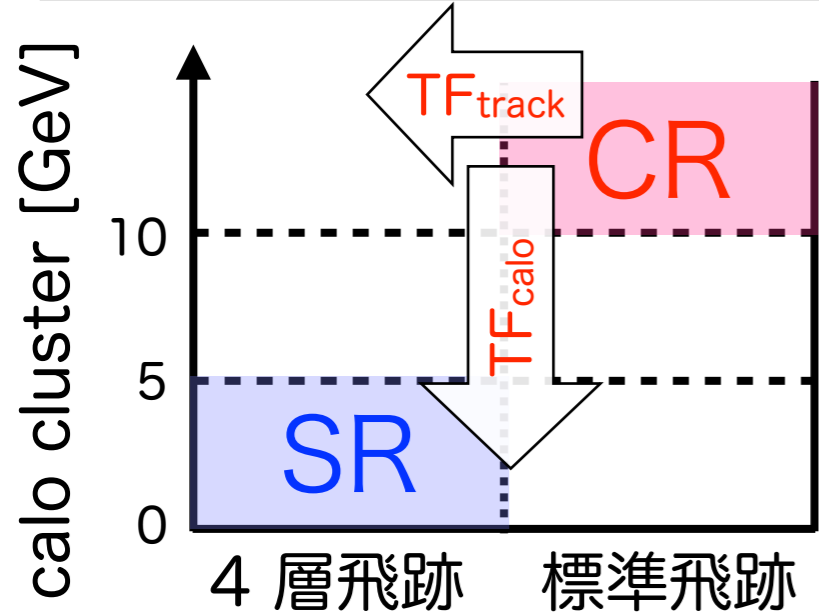
TF(e, disap)



TF(e, calo)



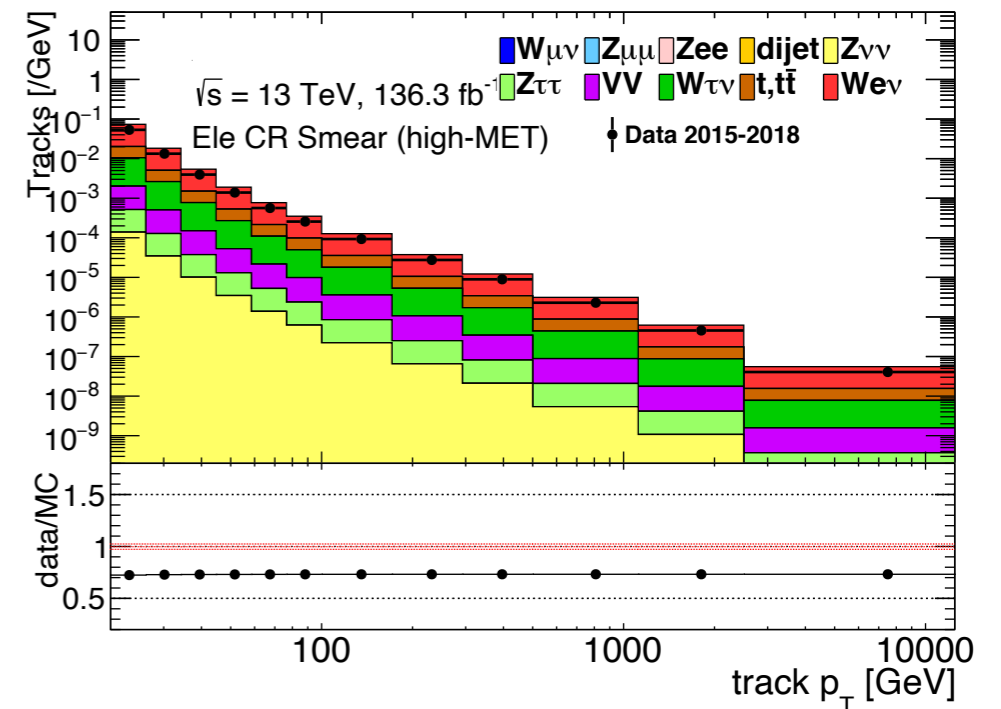
electron BG の見積もり方法



smearing

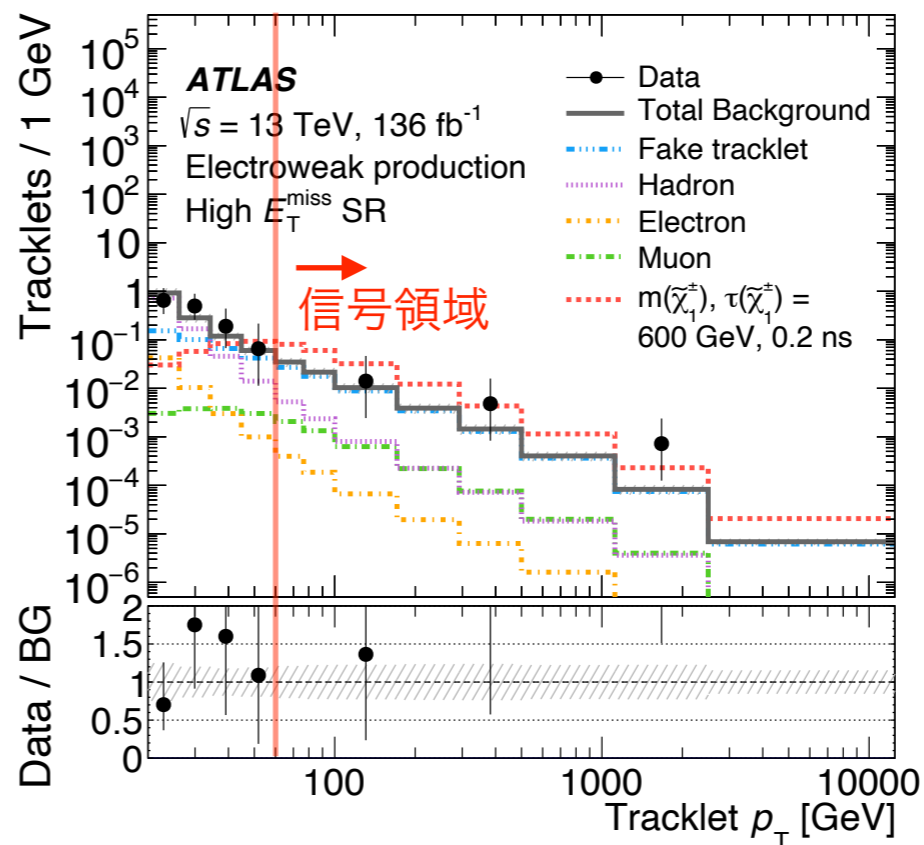
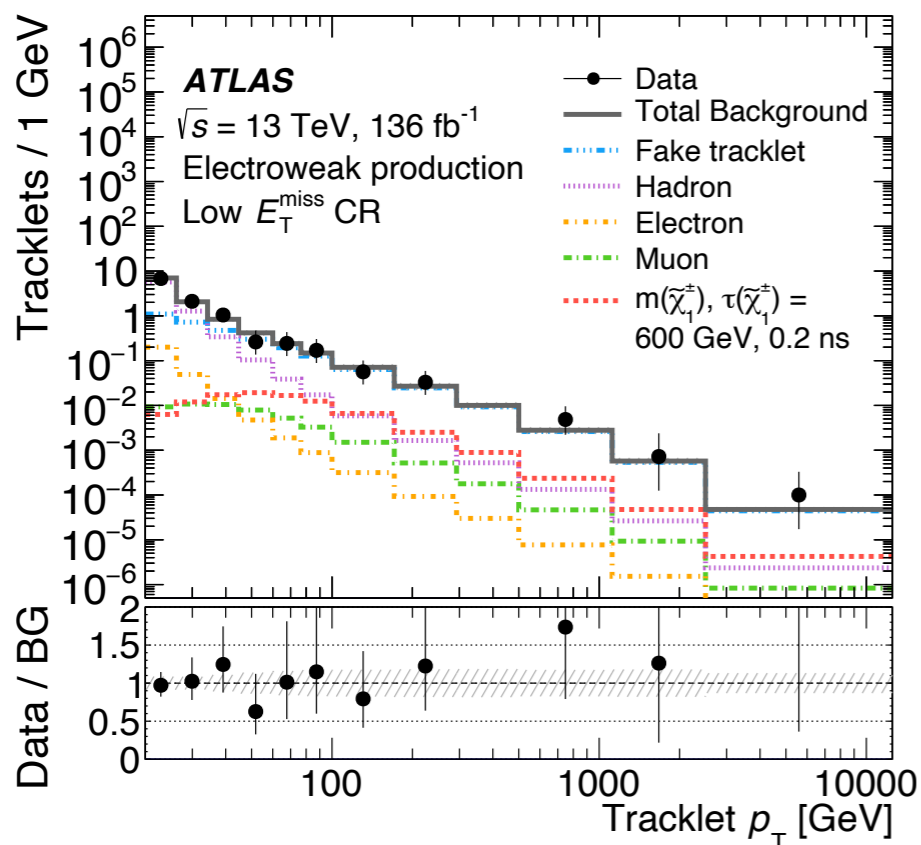


normalization は TF,  
shape は smearing  
function の  
寄与が支配的.



# 信号領域

## EWK channel



### high- $p_T$ ( $p_T > 60 \text{ GeV}$ )領域における予測・観測事象数

	Electroweak channel	Strong channel
Total Expected	$3.0 \pm 0.7$	$0.84 \pm 0.33$
Observed	3	1
$p_0 (Z)$	0.5 (0)	0.38 (0.30)
Observed $\sigma_{\text{vis}}^{95\%}$ [fb]	0.037	0.028
Expected $\sigma_{\text{vis}}^{95\%}$ [fb]	$0.038^{+0.014}_{-0.009}$	$0.024^{+0.009}_{-0.003}$

- ✓ 信号領域に有意な超過は見られない
- ✓ 増加統計以上の感度改善を達成
- UL on  $\sigma_{\text{vis}}^{95\% \text{CL}} \sim 1/5$
- ✓ 共通の 1 事象がある

# 信号領域に残った事象の詳細

Entry は飛跡の  $p_T$  順

## Meta & Kinematics

EWK

- $E_{T^{miss}} > 200 \text{ GeV}$
- leading Jet  $p_T > 100 \text{ GeV}$
- $\Delta\phi_{\min}(\text{Jet}_{1,2,3,4}, E_{T^{miss}}) > 1.0$

Strong

- $E_{T^{miss}} > 250 \text{ GeV}$
- leading Jet  $p_T > 100 \text{ GeV}$
- 2nd, 3rd Jet  $p_T > 20 \text{ GeV}$
- $\Delta\phi_{\min}(\text{Jet}_{1,2,3,4}, E_{T^{miss}}) > 0.4$

# Entry	Year	$\langle\mu\rangle$	$E_{T^{miss}}$	1st Jet Pt	$\Delta\phi$
1	2017	25	211 GeV	206 GeV	3.11
2	2017	30	201 GeV	101 GeV	2.38
3	2016	19	536 GeV	498 GeV	3.06

閾値

## 飛跡情報

# Entry	$p_T$	Eta	Phi	$ \text{do sig} $	$ \text{zosin}\theta $	飛跡の質 悪 0 ~ 1 良	(周辺飛跡の $p_T$ 総和)/(自身の $p_T$ )	$E_{T^{calo}}$
1	103 GeV	-1.19	1.07	0.66	0.25	0.26	0.000	3.7 GeV
2	334 GeV	1.01	-0.82	1.31	0.01	0.12	0.000	0.5 GeV
3	1184 GeV	1.52	0.37	0.89	0.00	0.58	0.001	1.1 GeV

$> 60 \text{ GeV}$

$< 1.5$

$< 0.5$

$> 0.10$

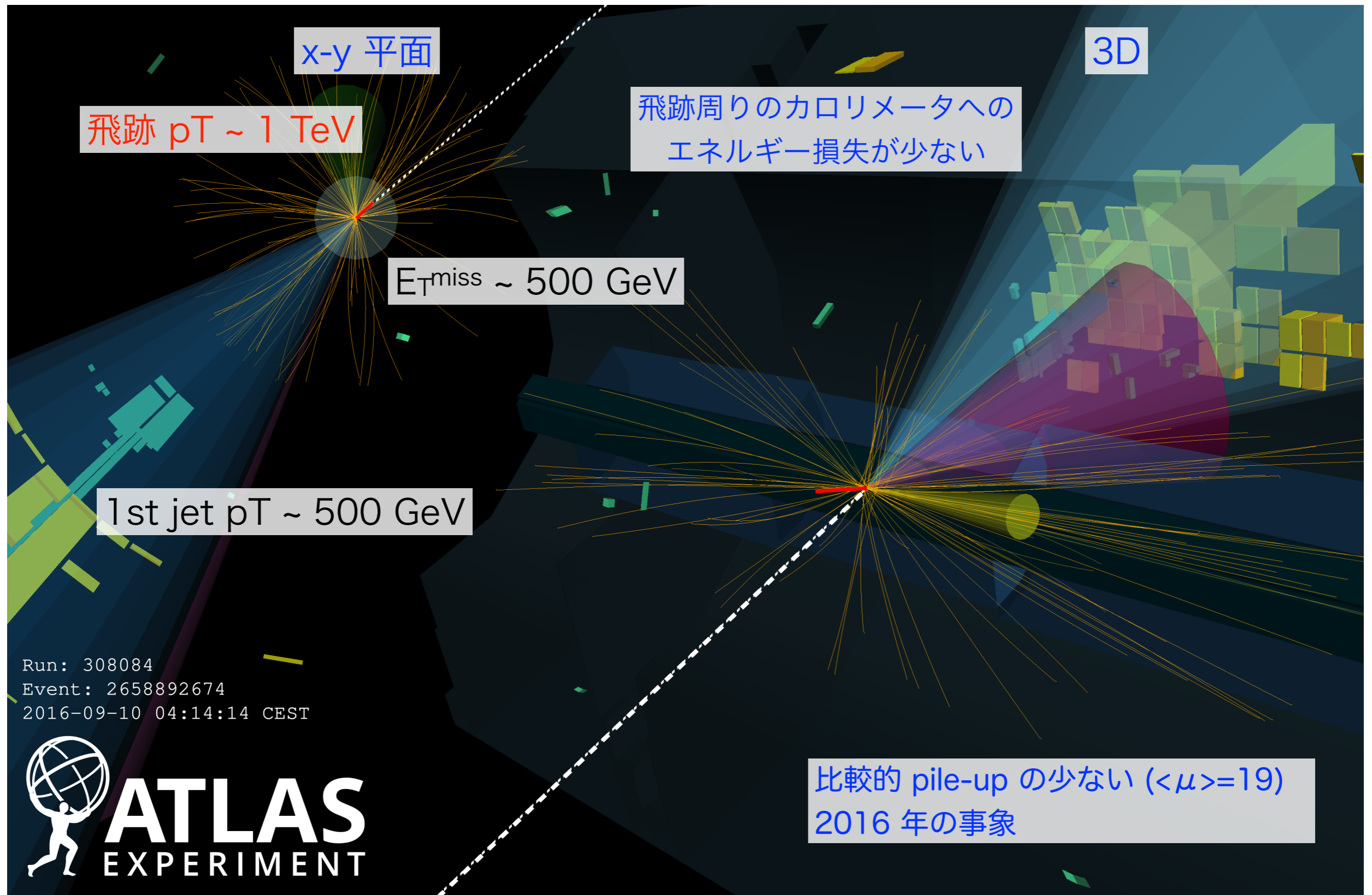
$< 0.04$

$< 5 \text{ GeV}$

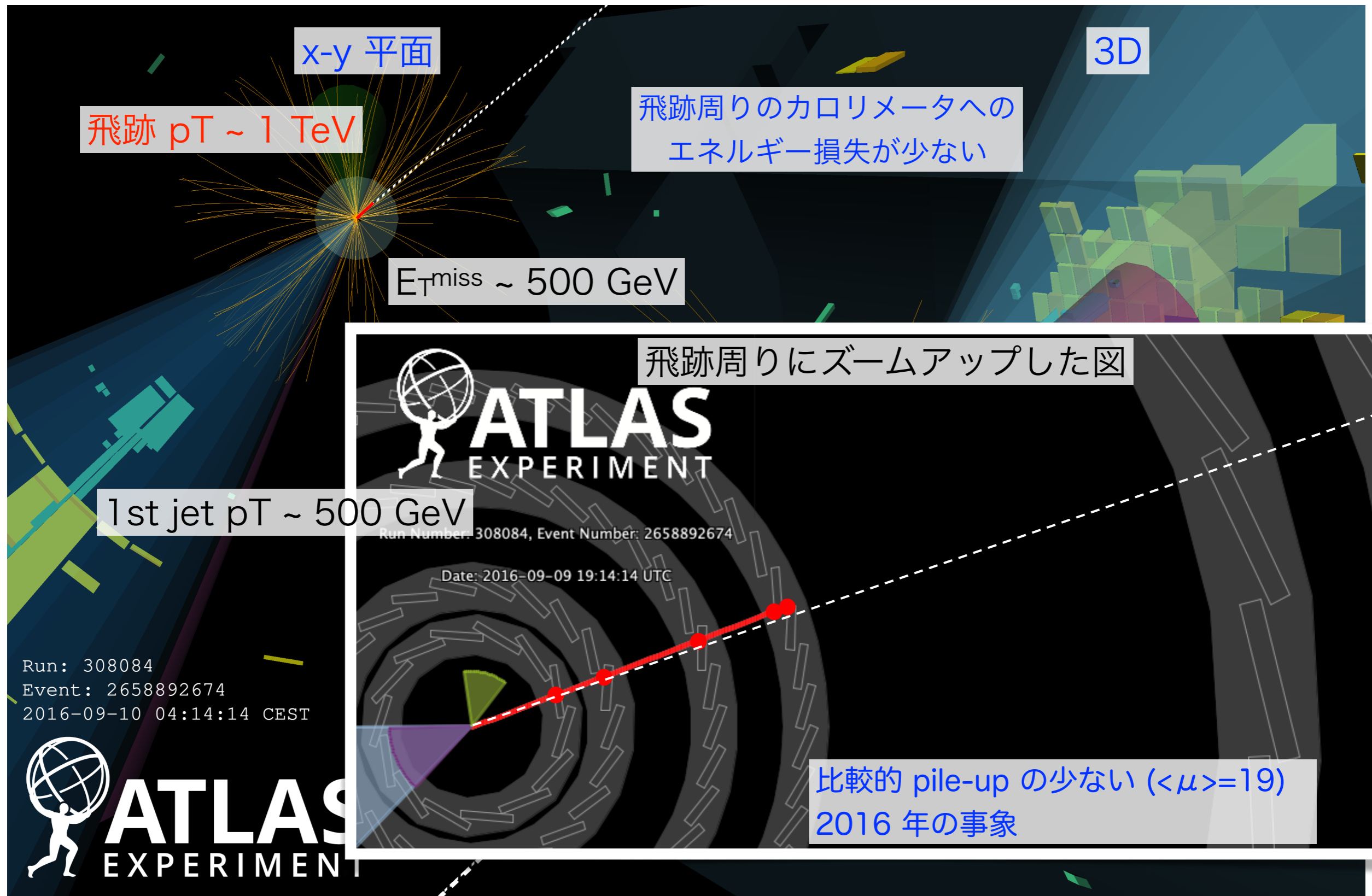
インパクトパラメータ

隔離パラメータ

# 信号領域に残った事象の絵



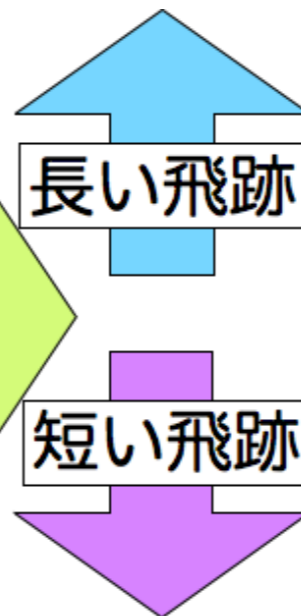
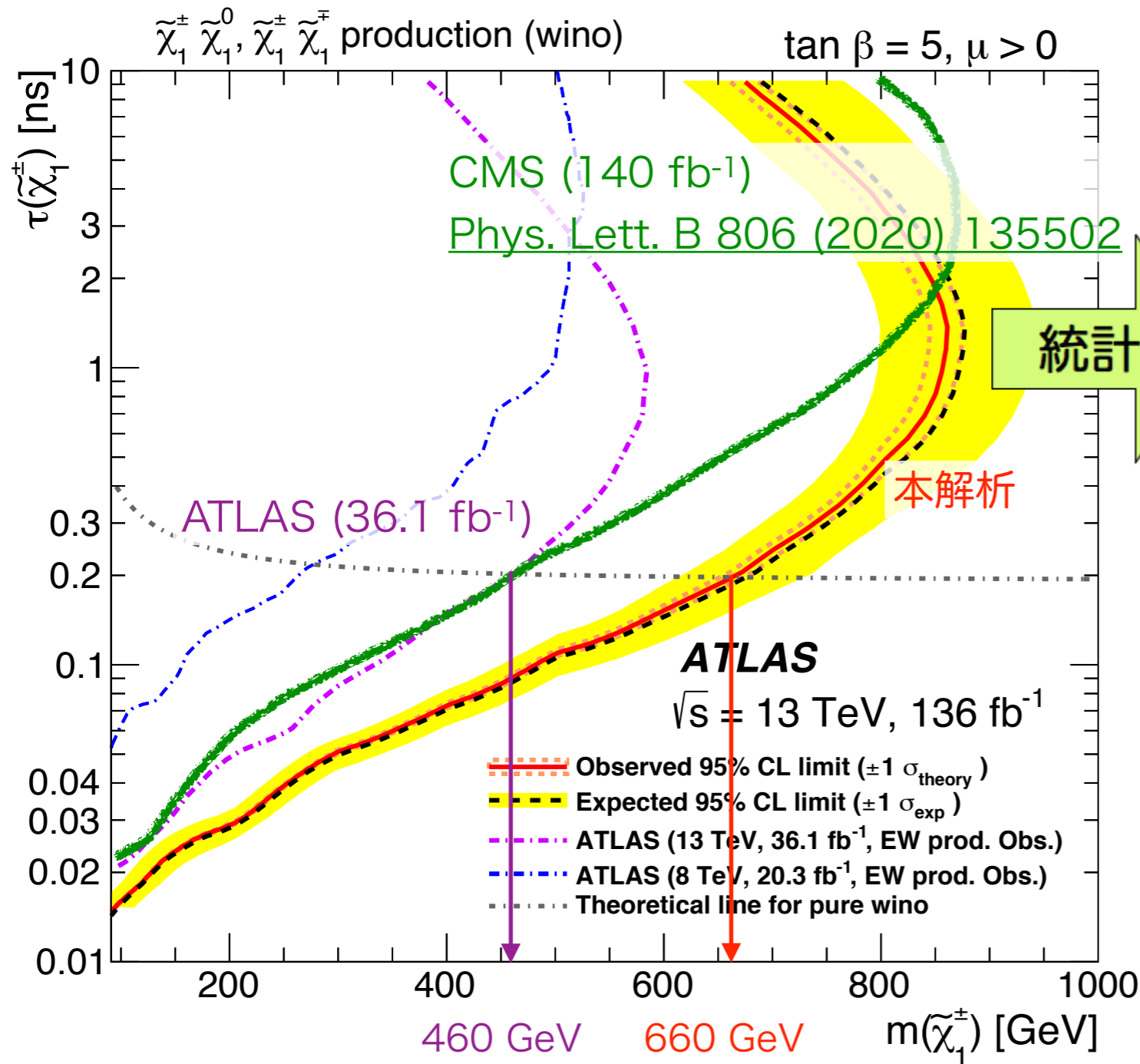
# 信号領域に残った事象の絵





# 到達感度 (EWK channel, Wino 探索)

先月 arXiv に投稿 ([arXiv:2201.02472](https://arxiv.org/abs/2201.02472)).  
EPJC にも投稿中.



長い飛跡 SCT を含む消失飛跡

短い飛跡 3層, 4層飛跡

到達感度 @  $\tau = 0.2 \text{ ns}$

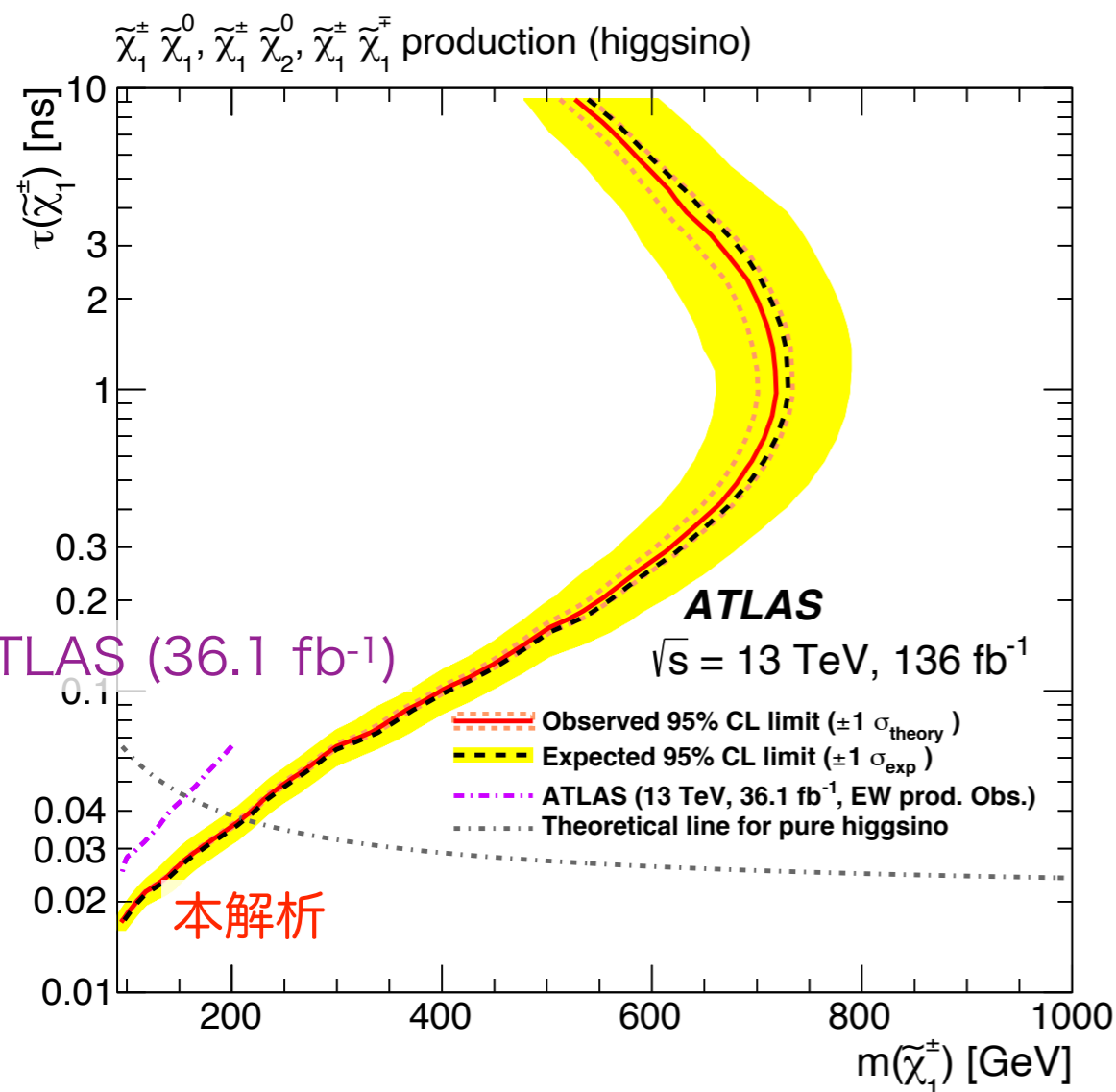
前回解析 (36.1 fb<sup>-1</sup>) : 460 GeV

**本解析 (136 fb<sup>-1</sup>) : 660 GeV**

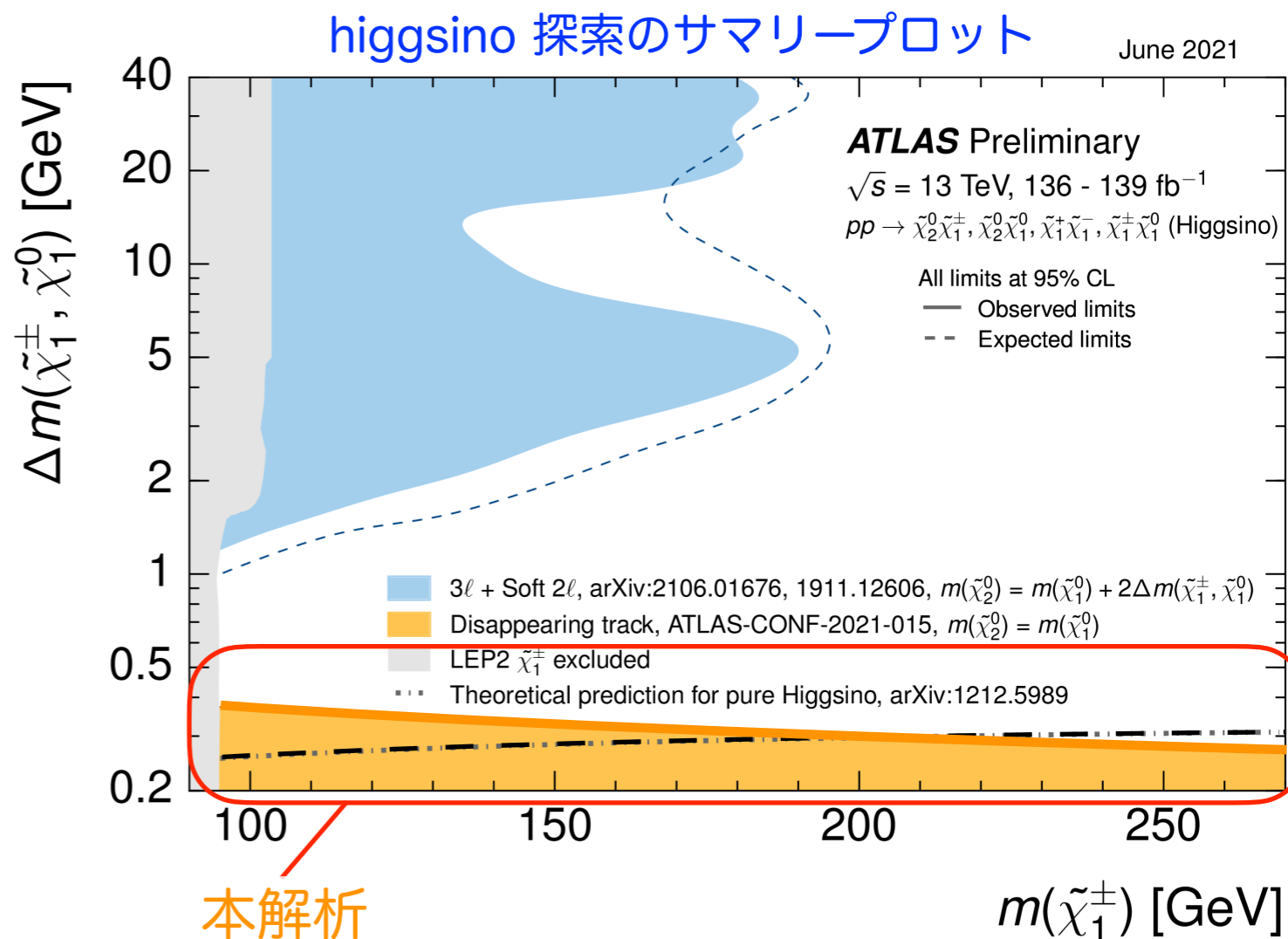
短寿命領域において CMS より良い感度  
(CMS の 4 層飛跡は 16 cm)

# 到達感度 (EWK channel, Higgsino 探索)

## Lifetime vs Mass



## $\Delta M$ vs Mass



到達感度 @ 理論線

前回解析 (36.1 fb<sup>-1</sup>) : 155 GeV

**本解析 (136 fb<sup>-1</sup>) : 210 GeV**

pure-higgsino LSP 領域に高い感度

# 到達感度 (Strong channel)

@ 0.2 ns (1.0 ns)

$m(\tilde{\chi}_1^\pm)$  [TeV]

$m(\tilde{g})$  [TeV]

前回解析 (36.1 fb<sup>-1</sup>)

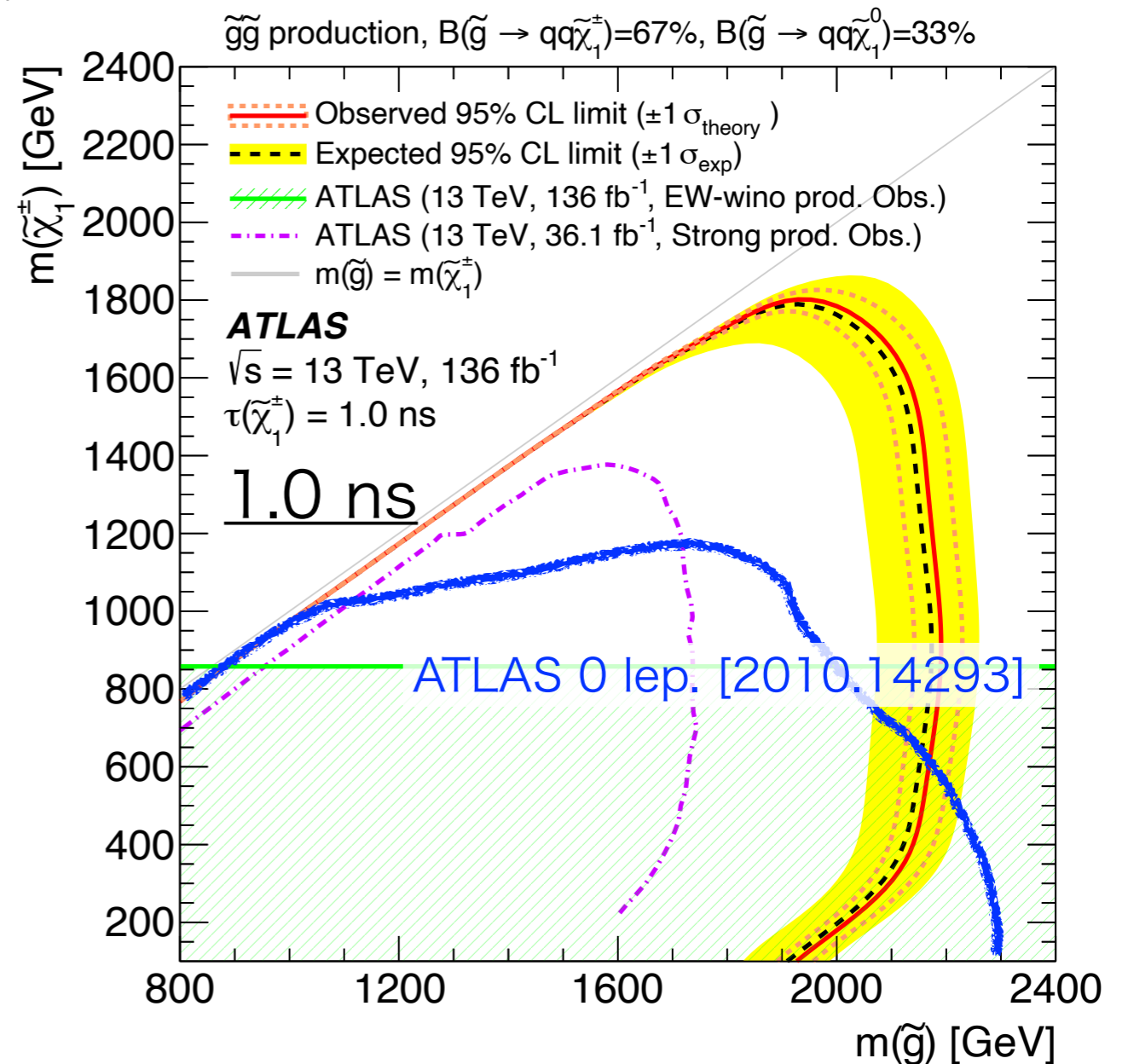
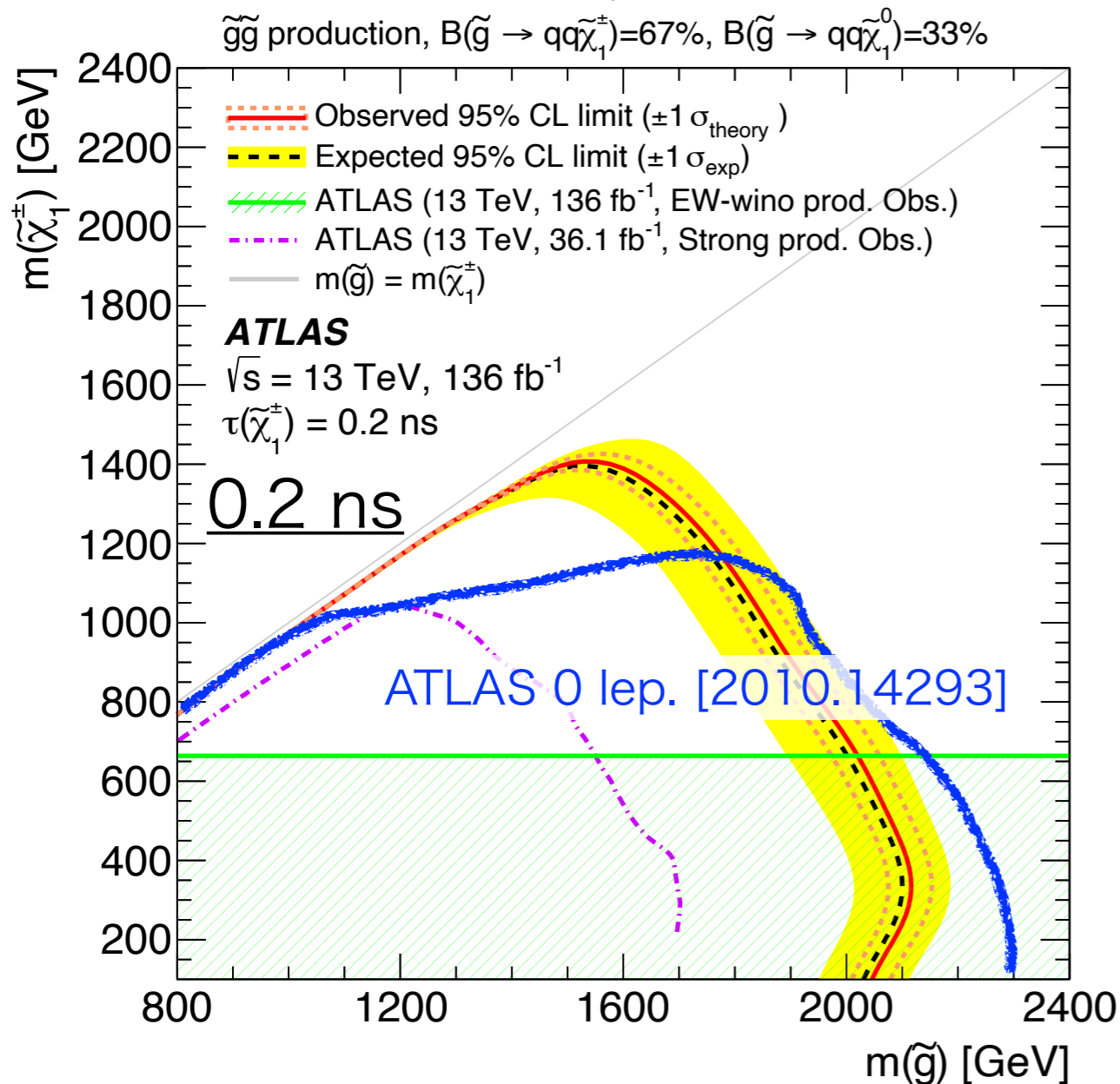
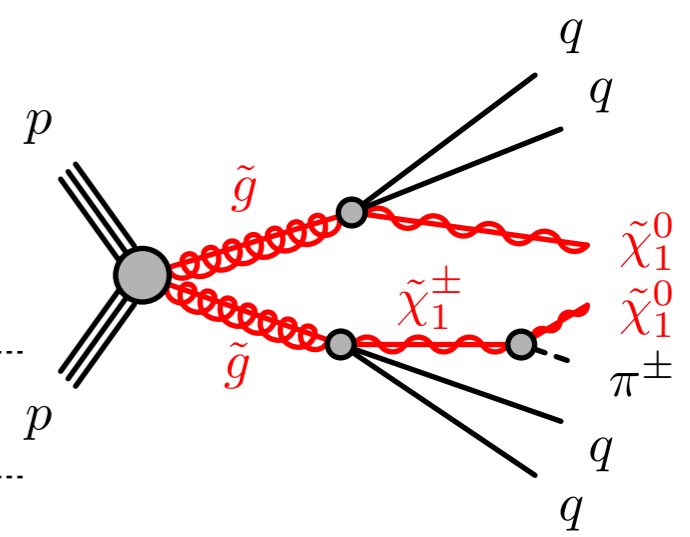
1.05 (1.35)

1.70 (1.75)

**本解析 (136 fb<sup>-1</sup>)**

**1.40 (1.80)**

**2.10 (2.18)**



# Future Study

EWK サンプルで chargino 2 本要求 (大統計が必要)

-> 数学的に chargino の運動量が解ける

条件は緩めにかける. 飛跡1本で BG 分離  $O(10^{-5})$

Trigger	$E_{T}^{\text{miss}}$
$E_{T}^{\text{miss}}$	$> 100 \text{ GeV}$
leading Jet $p_T$	$> 100 \text{ GeV}$
$\Delta\phi_{\text{min}}(\text{Jet}_{1,2,3,4}, E_{T}^{\text{miss}})$	$> 0.4$
Track	4L ~ 7L

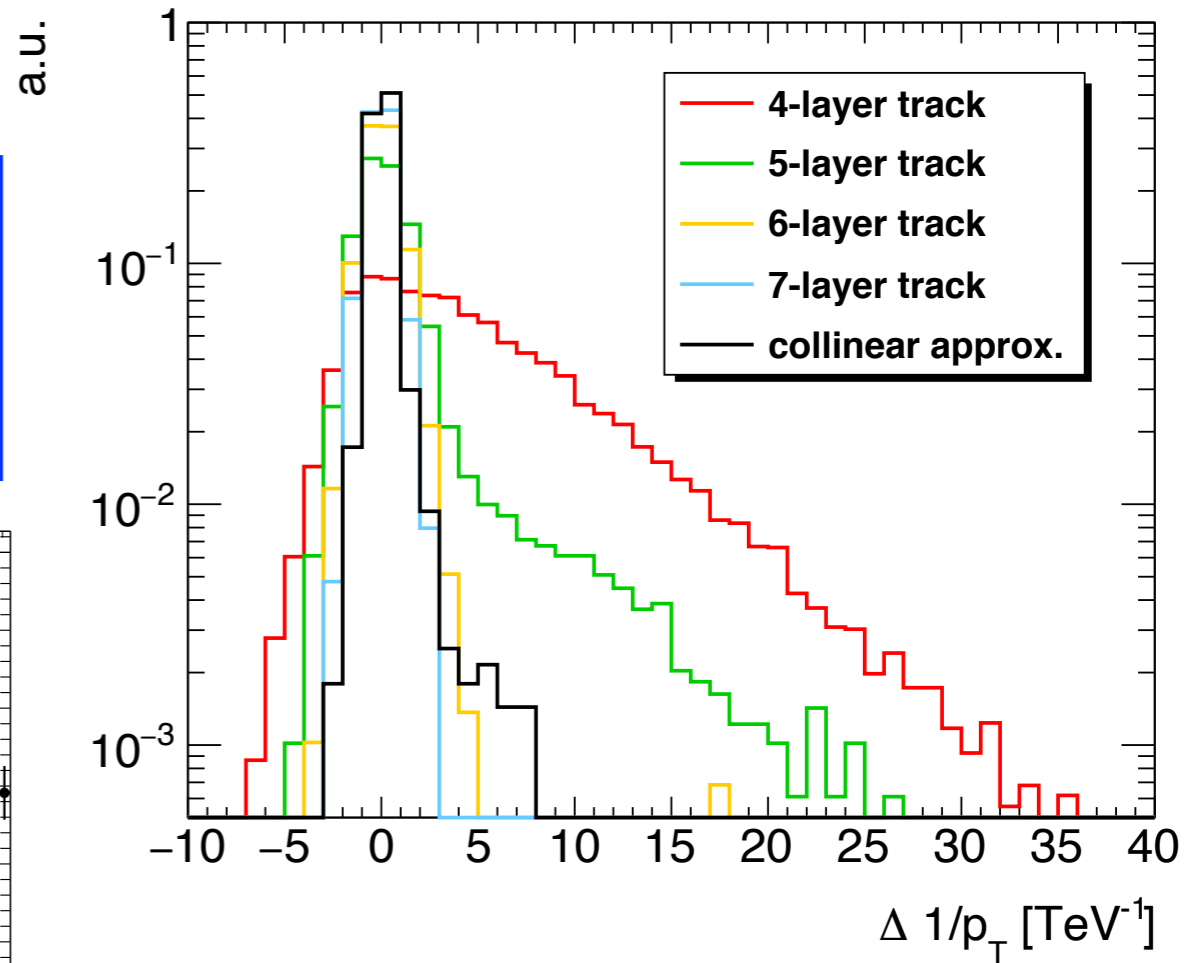
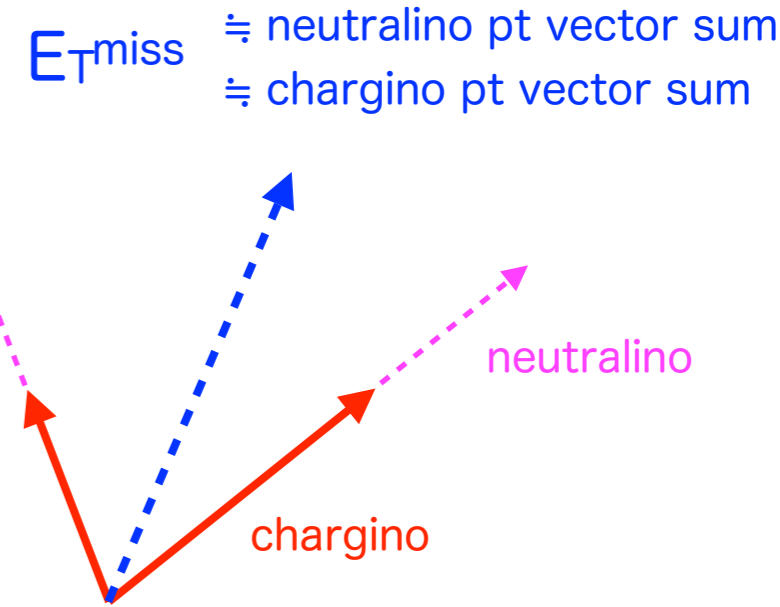
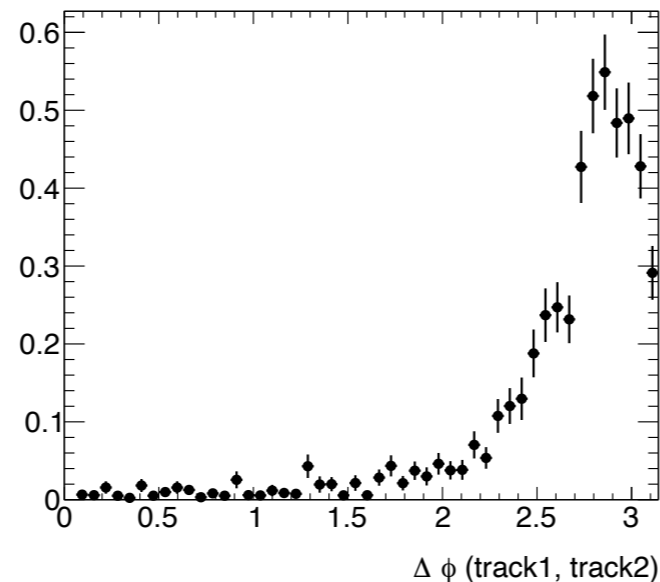
様々な理由  
 - サンプル  
 - dE/dx  
 - BG

## 信号数

600 GeV	0.2 ns	1.0 ns
4L 1本	11.6	36.9
4L~7L 2本	0.2	5.0

purity : 100 %

$p_T$  reco efficiency : 98%

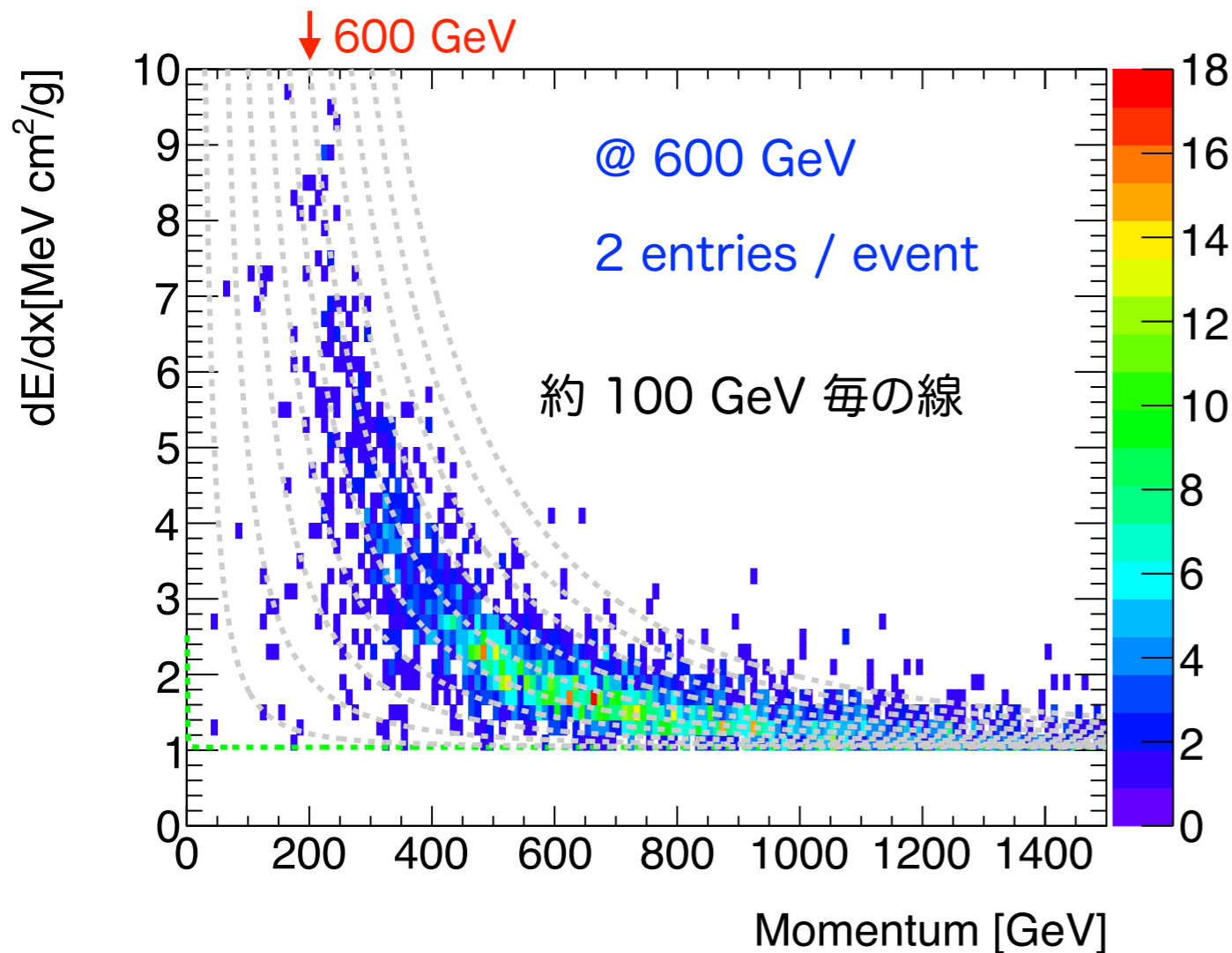


長い飛跡よりも良い分解能

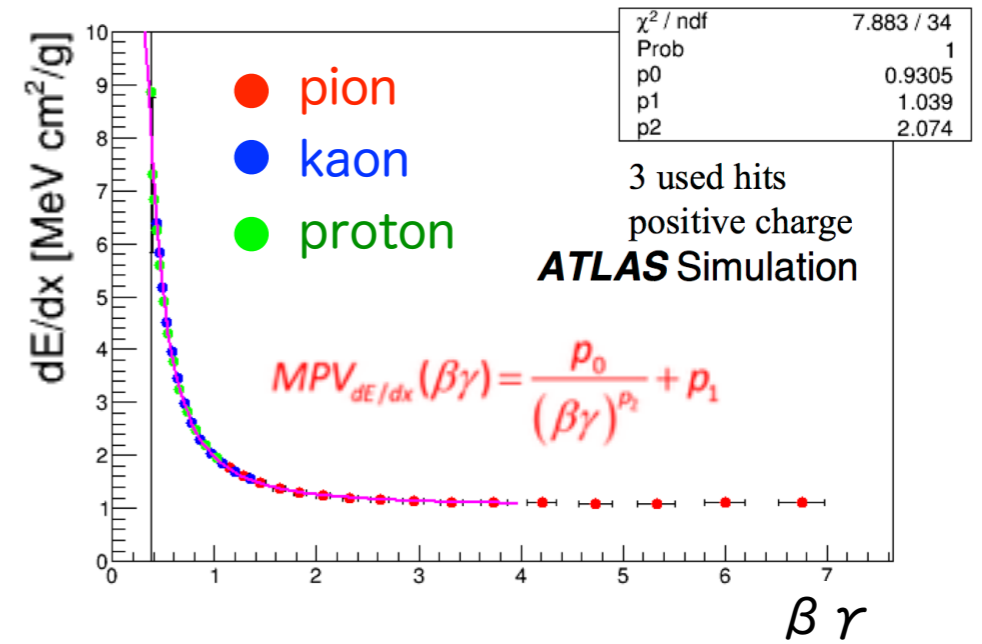
# Chargino 質量再構成

信号発見後は chargino 質量 (≡ DM 質量) が重要.

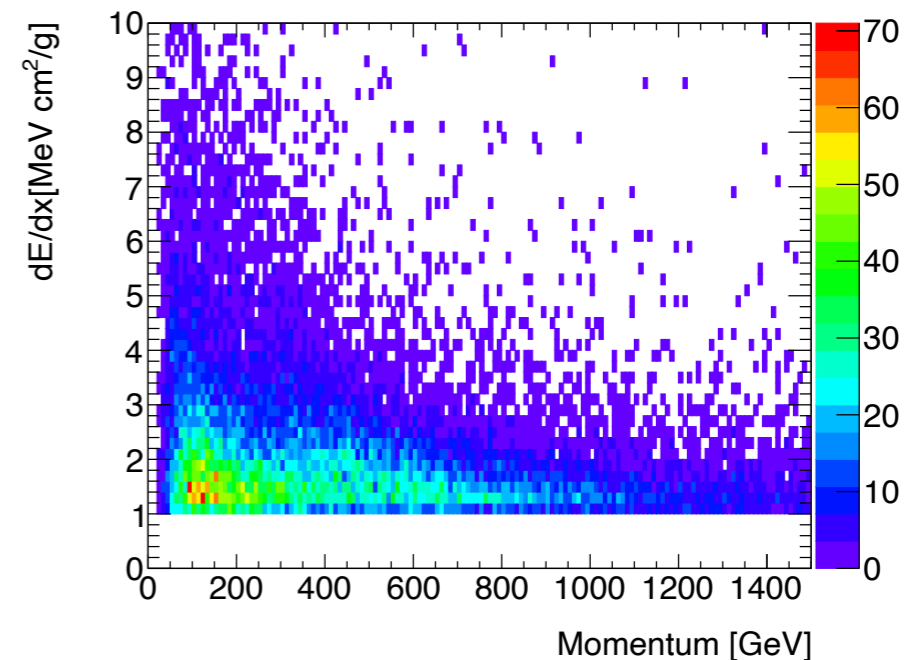
$m = p/(\beta \gamma)$  かつ  $dE/dx$  から ' $\beta \gamma$ ' を推測することが出来るので、chargino の質量も再構成することが可能。



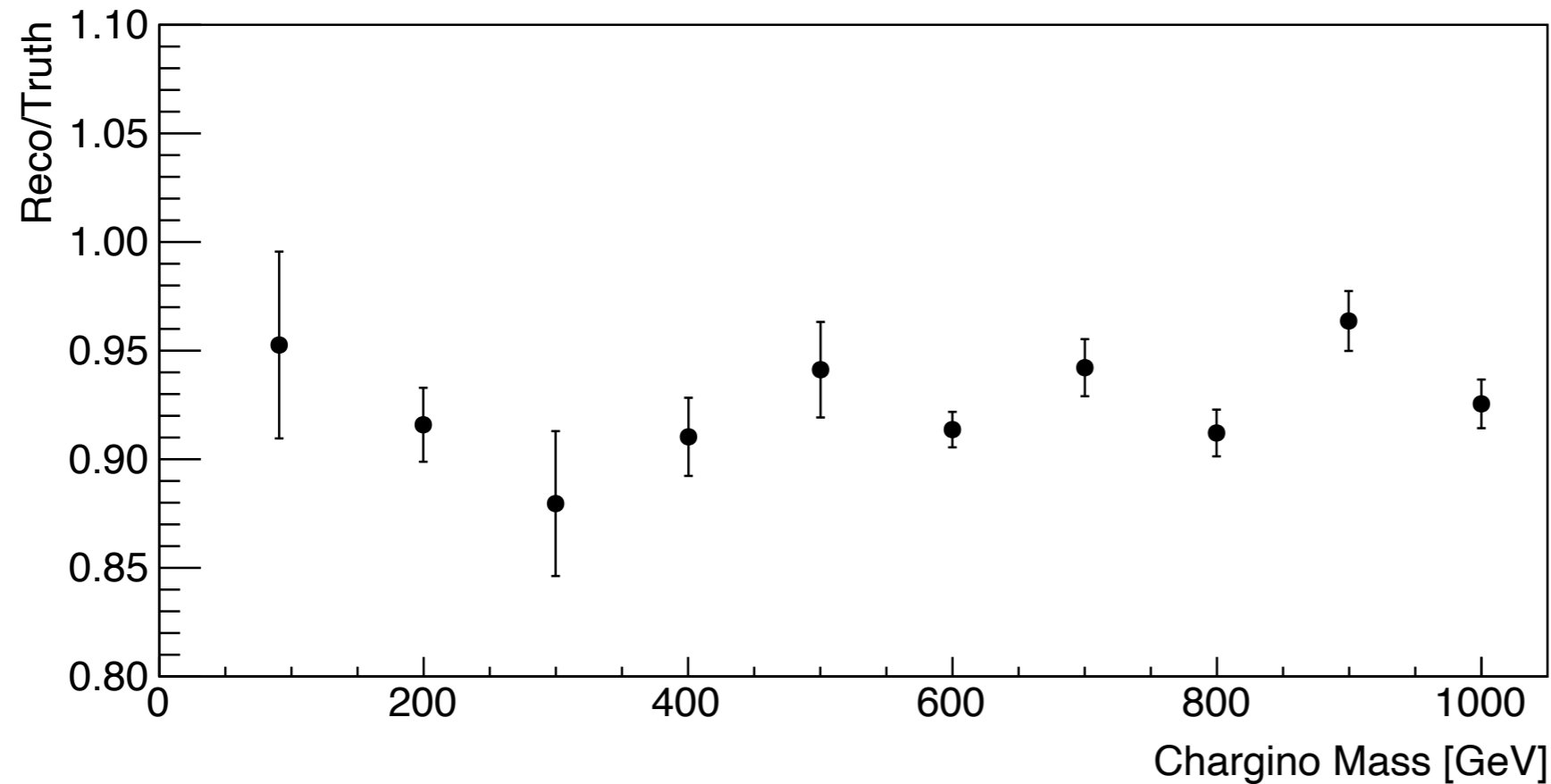
通常 Track における  
質量換算関数の較正結果



短い寿命領域だと  
4L ~ 7L 1本では出来ない



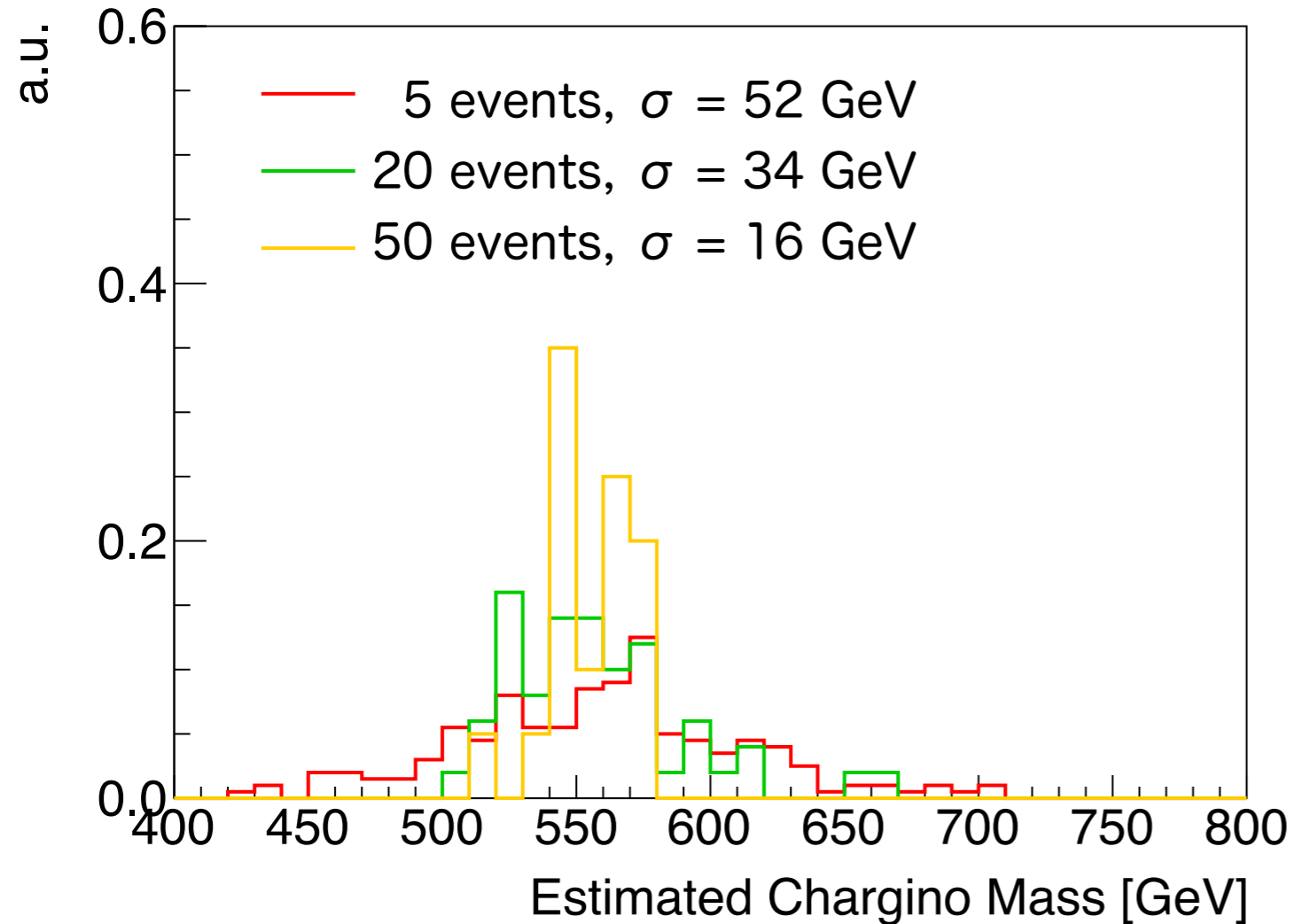
# Chargino 質量再構成の結果



- ※ MC のサンプル数分だけ使った結果で Int. Lumi. とは紐づいていない
- 全体的に低め (~93%) に見積もられており, ~1 TeV まで大きな違いは見られない.
- dE/dx 算出方法(truncated mean)によるバイアスの可能性

# 事象数に応じた Chargino 質量の精度

元の分布 : 1309 events = 2618 tracks



N events 毎に 1 entry

Mean は改善できると仮定

5 events だと 100 GeV 程度の広がり

予想観測事象数 @ 3000 fb<sup>-1</sup>

	600 GeV	1000 GeV
0.2 ns	5	0.4
1.0 ns	116	9

+3L track -> 信号効率 2 倍 / track -> 4 倍

+2L track -> 信号効率 4 倍 / track -> 16 倍

今後 ITK ジオメトリでの見積もりが必要.

(実際は dE/dx の算出と BG の削減についても)

# Summary

- ・ 消失飛跡を用いることで探索の難しい EWK SUSY の縮退領域 (pure-wino DM, pure-higgsino DM シナリオ) の探索が可能.
- ・ LHC-ATLAS 実験 Run2 全データ (~136 fb<sup>-1</sup>) を用いた 4 層飛跡検出による消失飛跡探索を行った結果, 解析手法の改善により統計以上の感度改善を達成 (到達断面積 ~1/5) [arXiv:2201.02472](https://arxiv.org/abs/2201.02472)
- ・ chargino を 2 本再構成することで短い飛跡に対しても高い運動量分解能を持ち, Pixel dE/dx 情報と併用することで chargino (≡ DM) 質量を再構成することが出来る.
- ・ 5 events 観測すると ~100 GeV 程度の精度で質量がわかる.



# Backup

# Disappearing Track (消失飛跡)

LSP : pure-wino (mass < ~3 TeV)

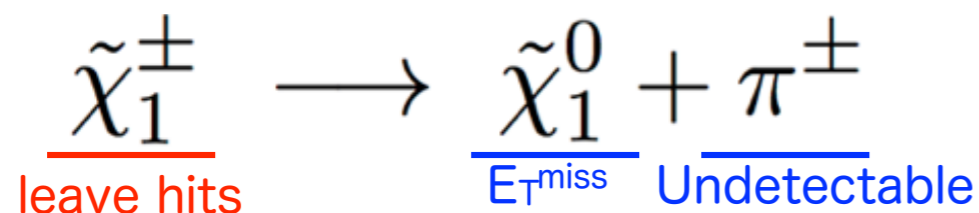
$$\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) : \sim 160 \text{ MeV}$$

$$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} : \sim 0.2 \text{ ns} \quad (c\tau \sim 60 \text{ mm})$$

LSP : pure-higgsino (mass < ~1 TeV)

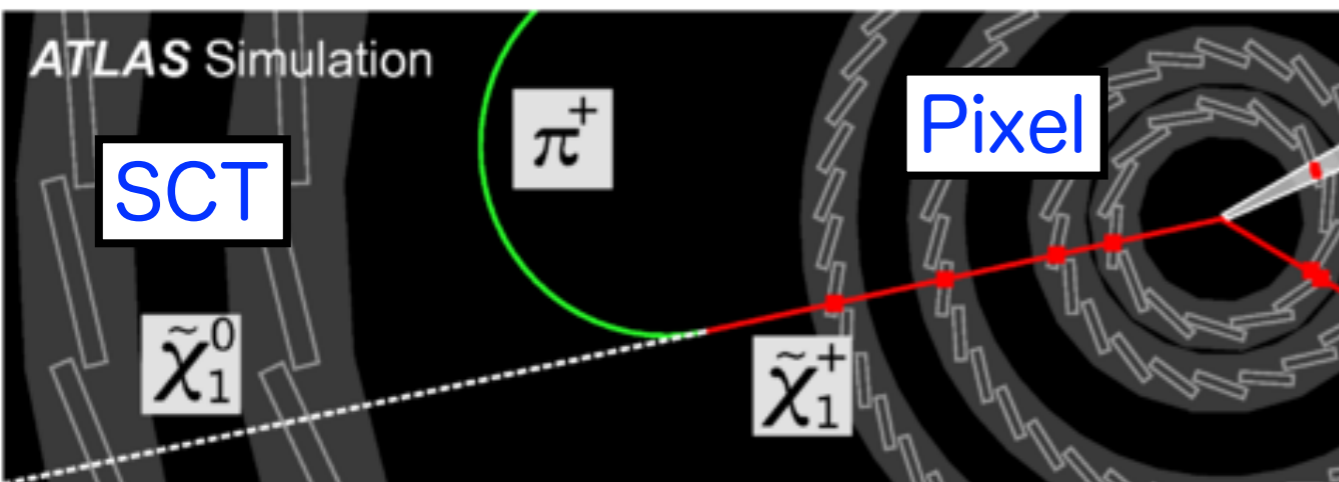
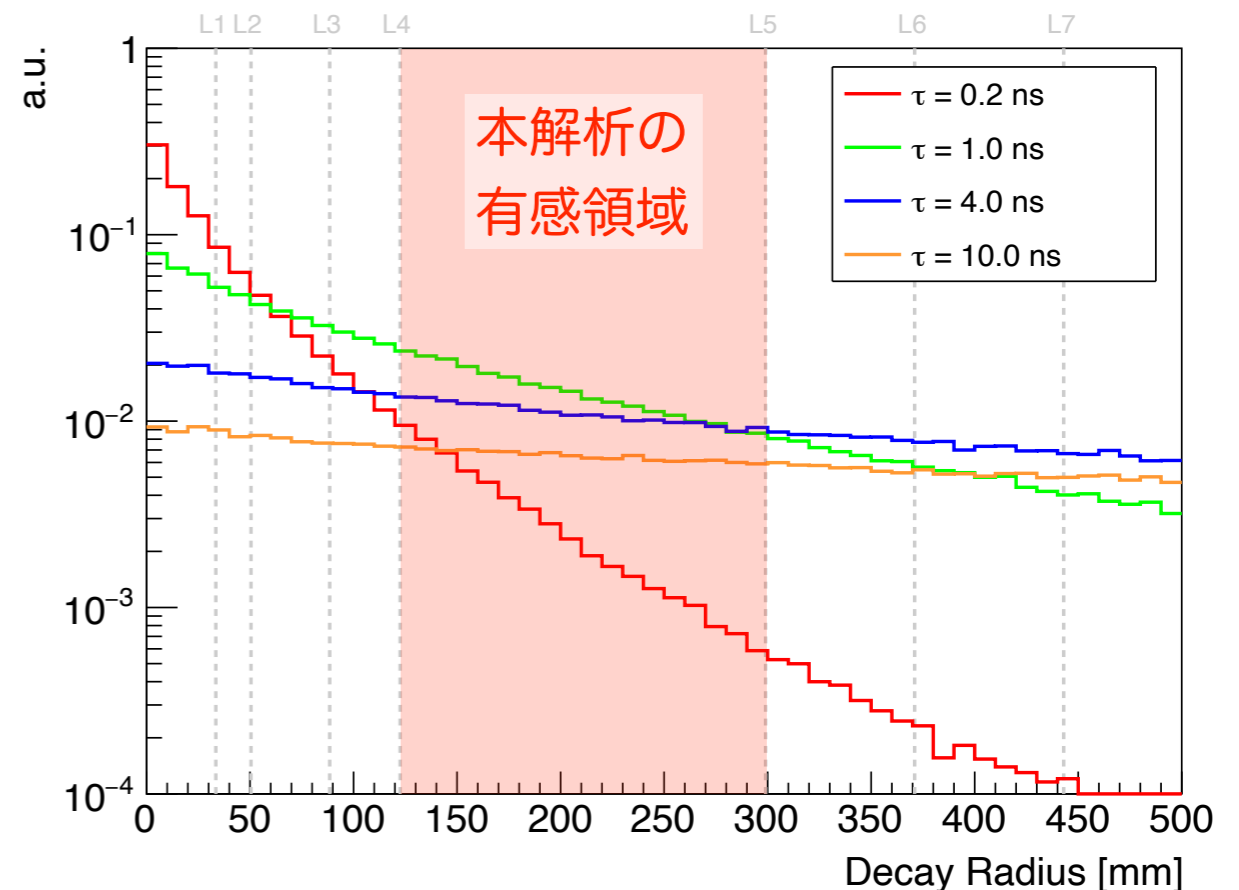
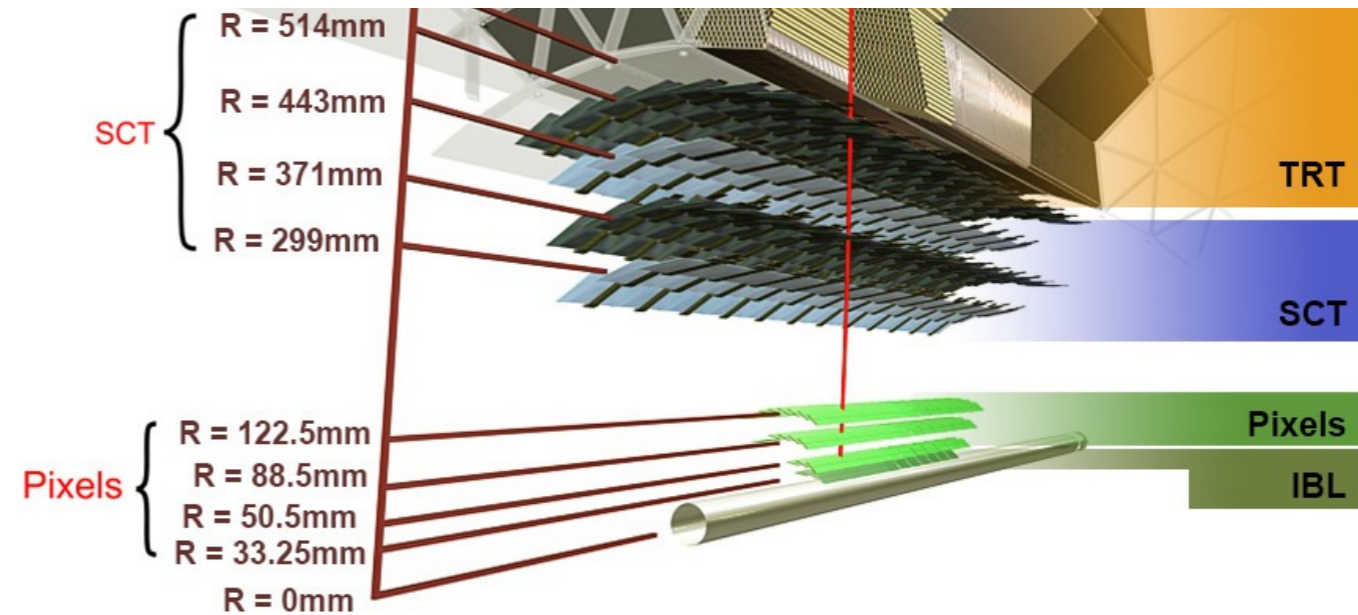
$$\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) : \sim 300 \text{ MeV}$$

$$\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} : \sim 0.04 \text{ ns} \quad (c\tau \sim 12 \text{ mm})$$



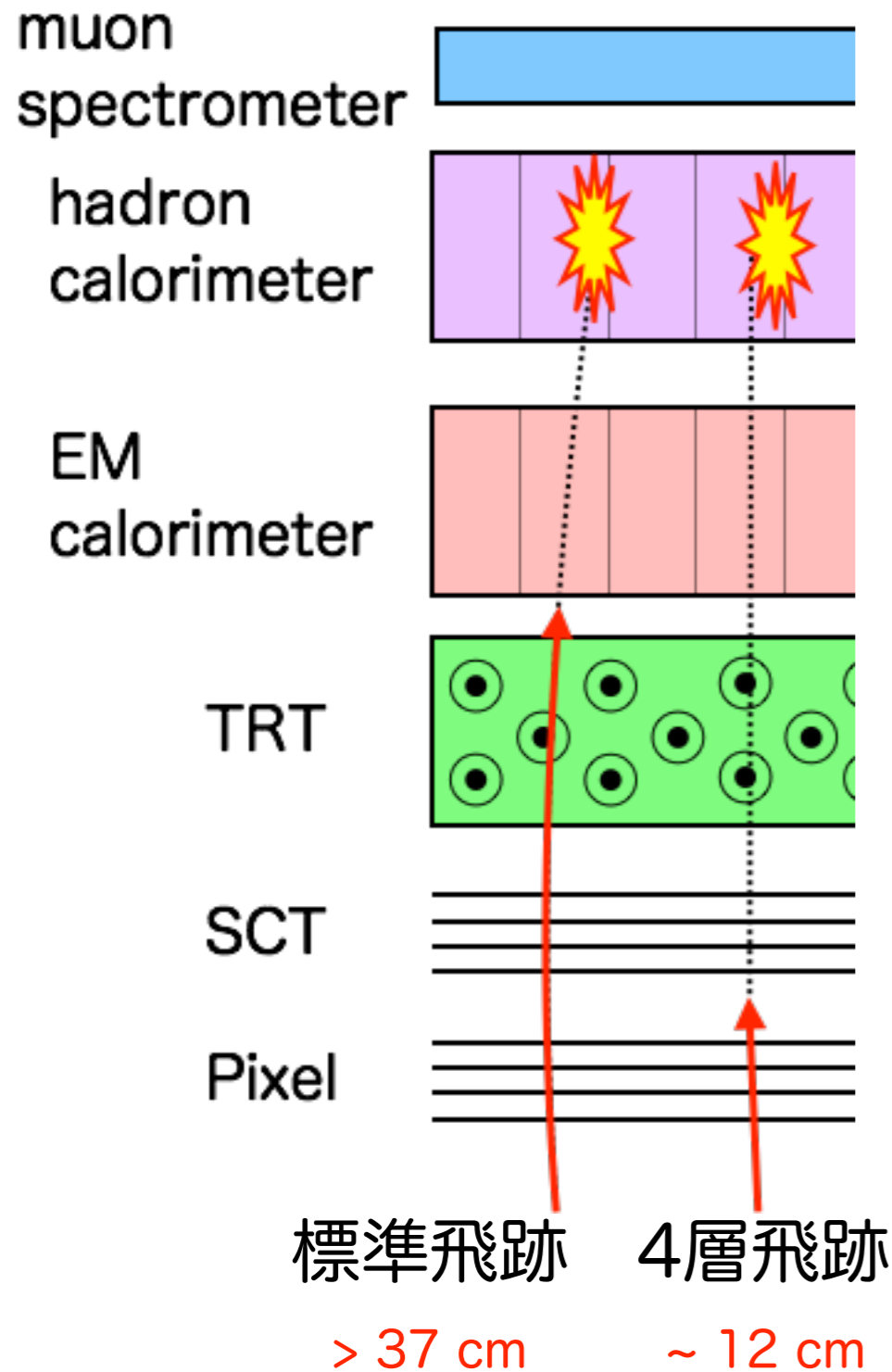
⇒ disappearing track

ATLAS 内部飛跡検出器



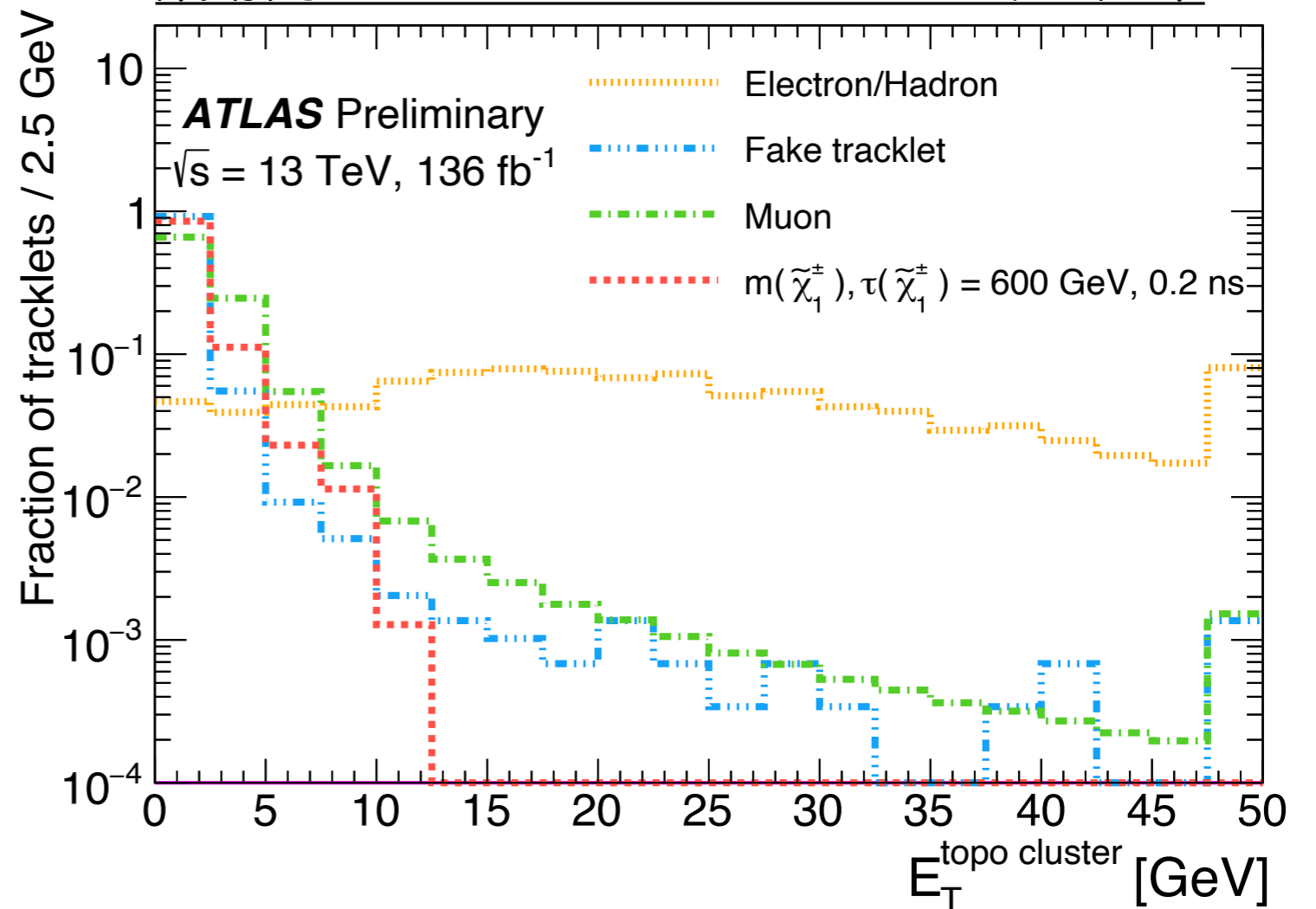
# 4層飛跡と付随するカロリメータ情報

## ATLAS 検出器の構成



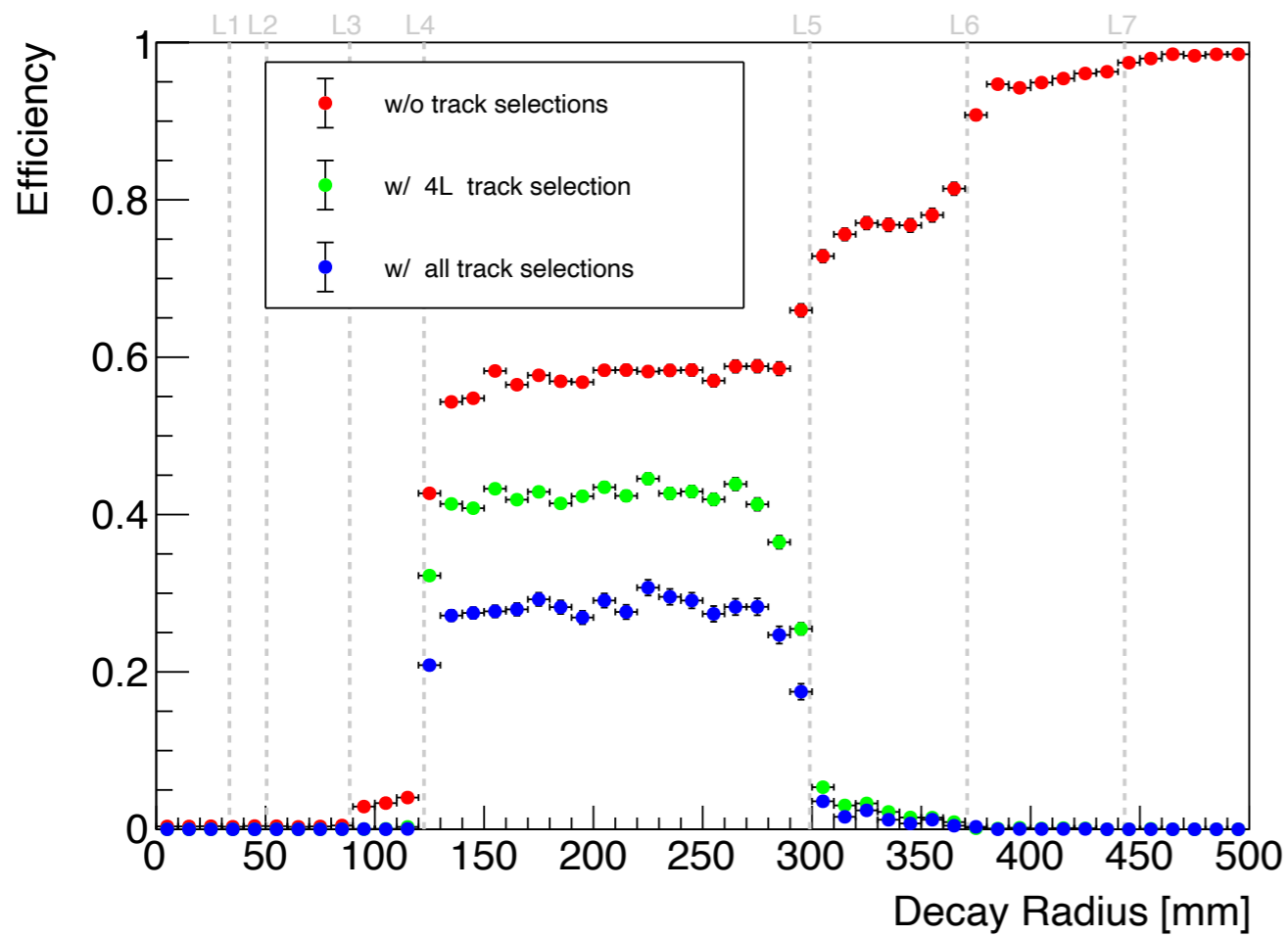
- ✓ 標準の飛跡再構成で使われなかったヒットのみを使い, 条件を緩めて再構成
- ✓ Pixel 4 層目(12 cm) を通過し, SCT 2 層目まで到達しないような短い飛跡を再構成可能

## 飛跡周辺のカロリメータのエネルギー分布



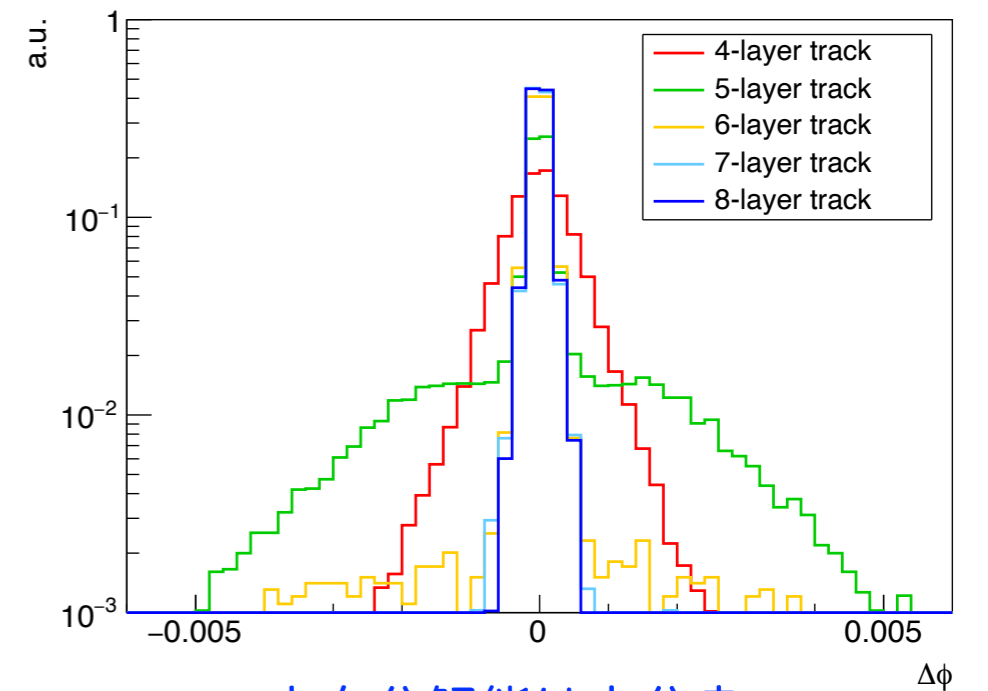
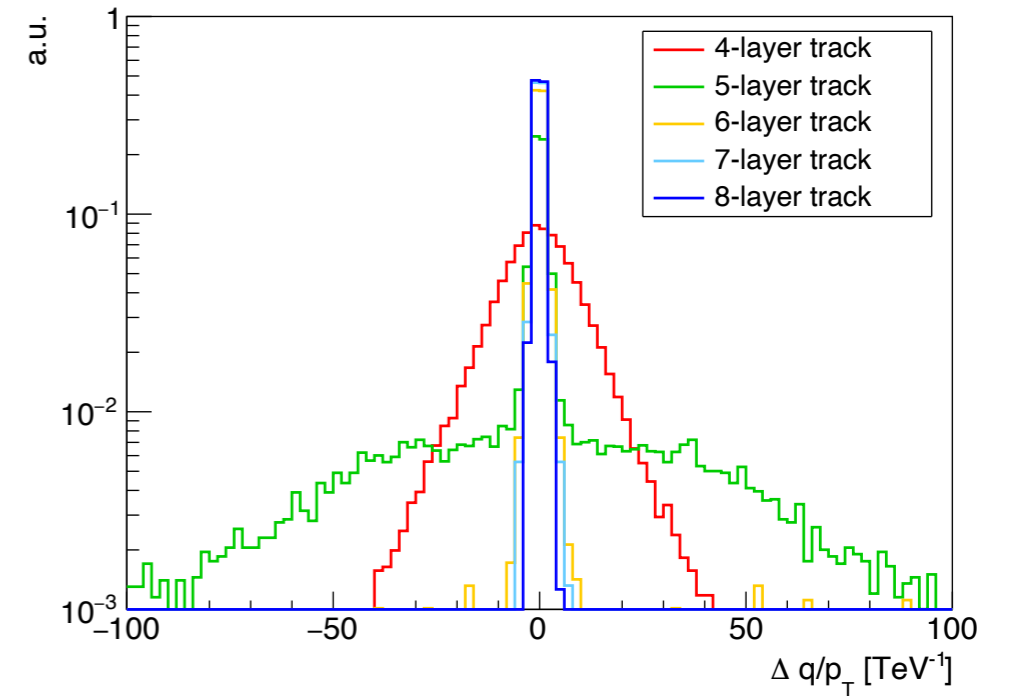
# 4層飛跡の基本性能

飛跡再構成率と選択効率



最終的な飛跡効率は ~30%/chargino

飛跡パラメータの真値との差分



方向分解能は十分良い

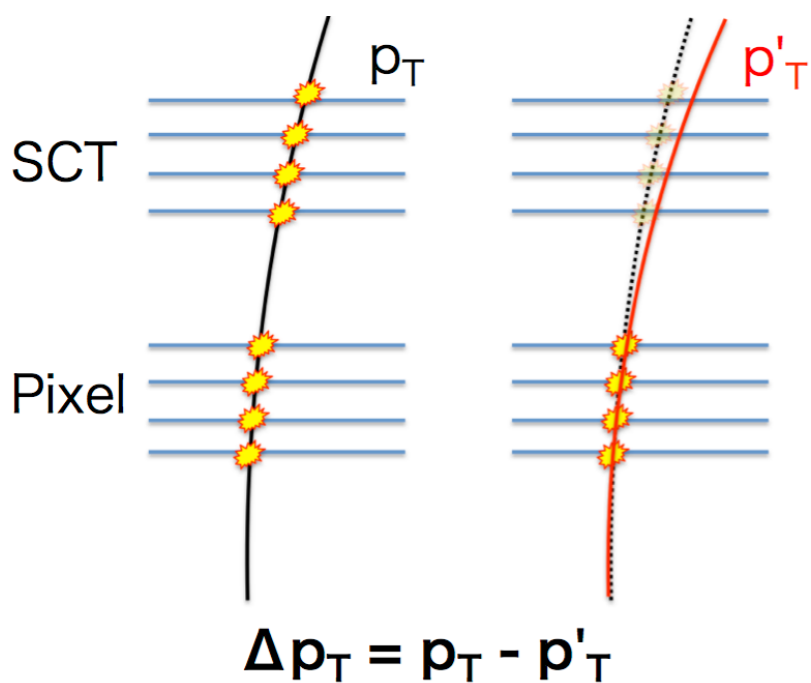
# Smearing Function の作成

標準飛跡の  $p_T$  分布から 4 層飛跡の  $p_T$  分布に焼き直すために 'smearing function' を用意する。

## Smearing Function の作り方

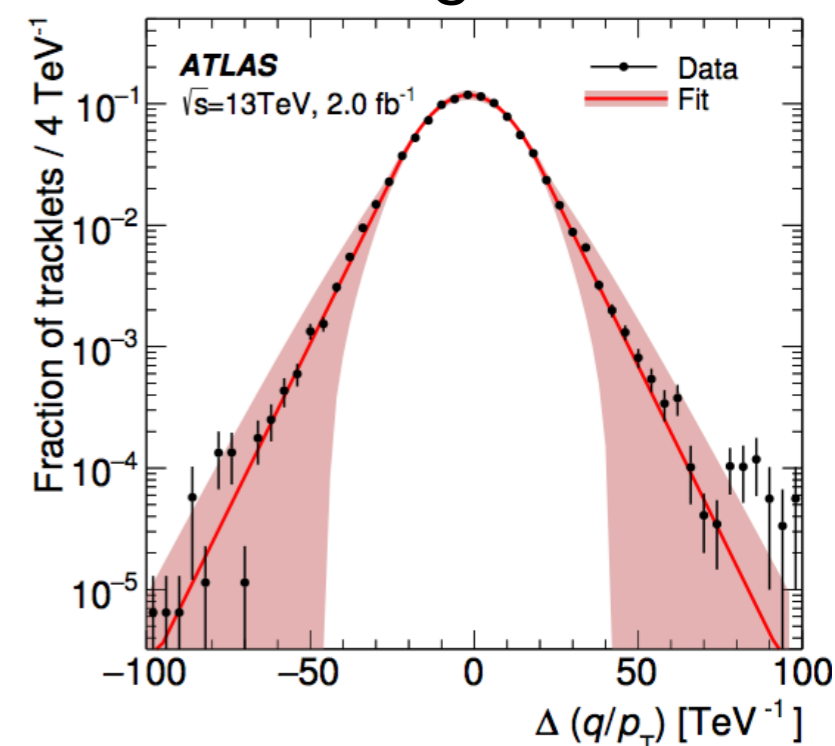
良く ID された lepton 2 本で  $Z \rightarrow \ell\ell$  events を選ぶ。  
 $\mu/e$  飛跡を pixel 4 層のみで飛跡再構成し直すことで 4 層飛跡を得て、元の飛跡からの  $(q/p_T)$  差分を見る。

original track    new track

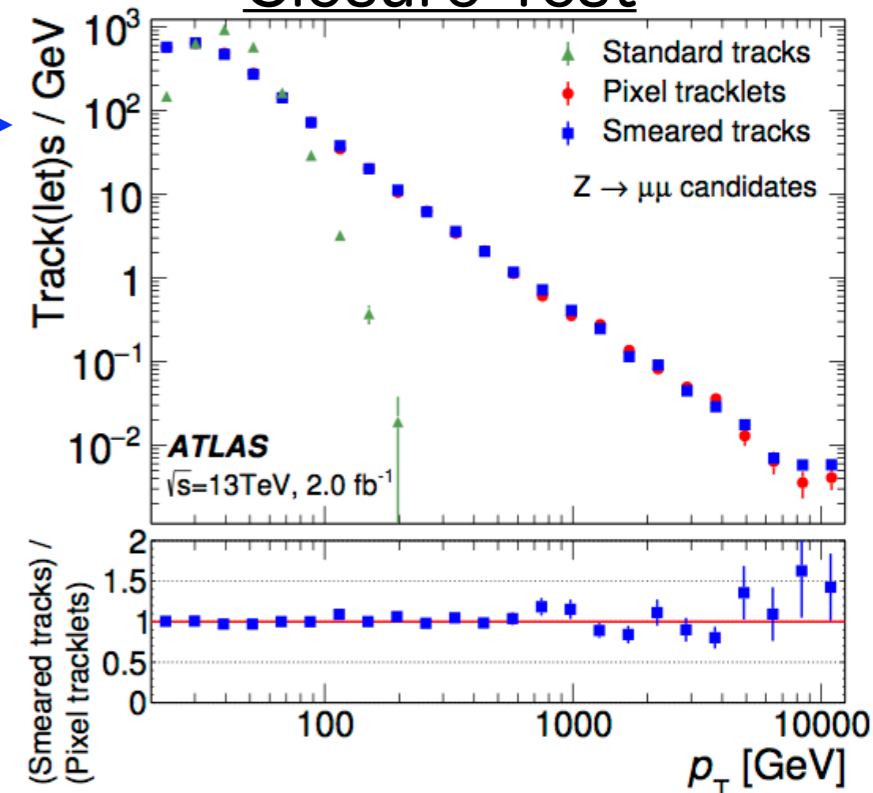


- ・ 原理的に 4 層飛跡の  $p_T$  分布を再現可能であることは確認済み
- ・  $p_T, \eta$  依存は negligible.
- ・ pile-up 依存性があり, systematic uncertainty に含まれる (最大~10%).

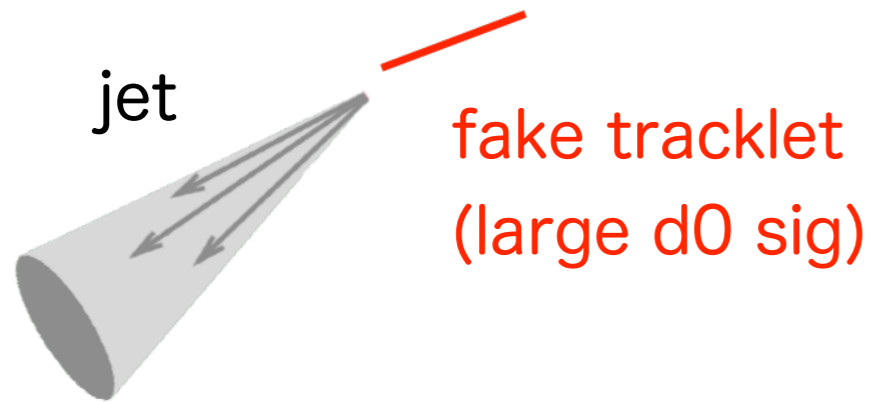
## Smearing Function



## Closure Test



# Fake BG の見積もり



Fake CR の事象選択

- $|d_0|/\sigma(d_0) > 10$
- without  $E_{T}^{\text{miss}}$  requirement

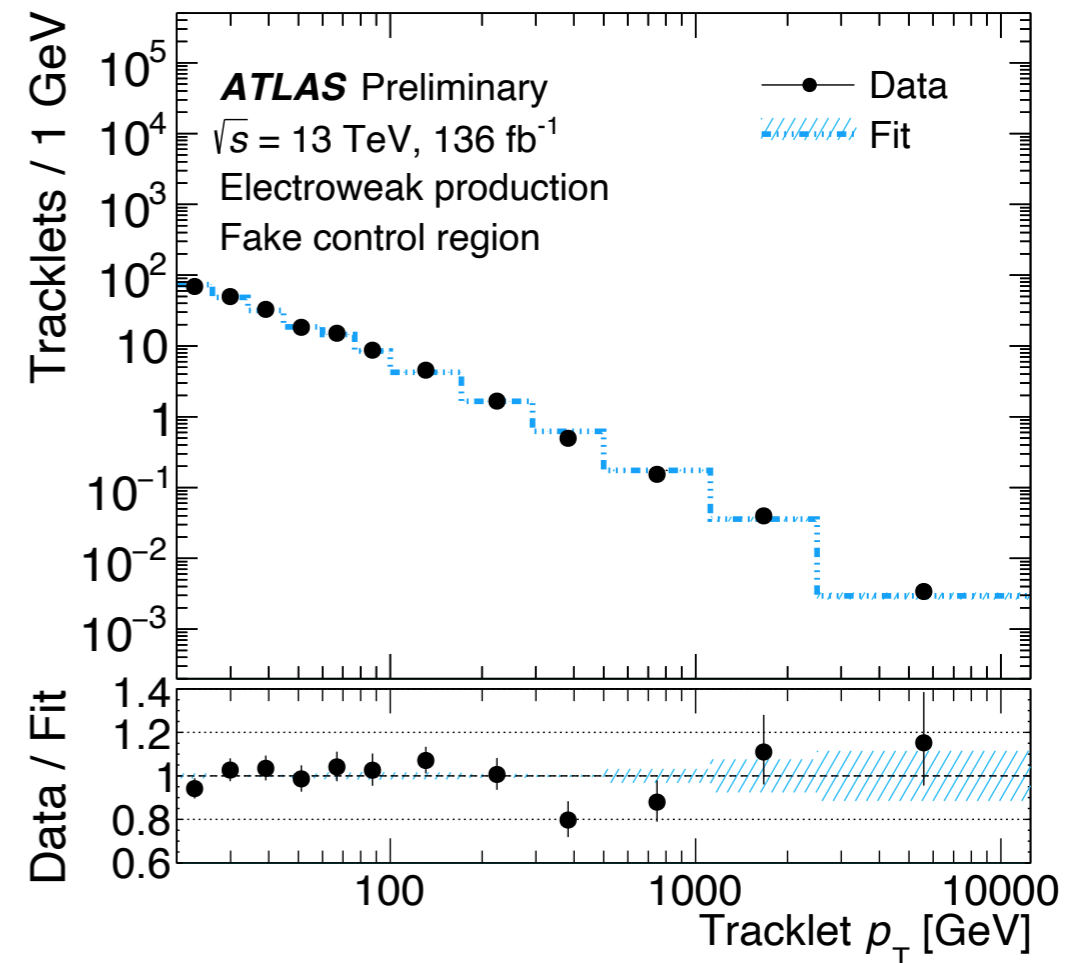
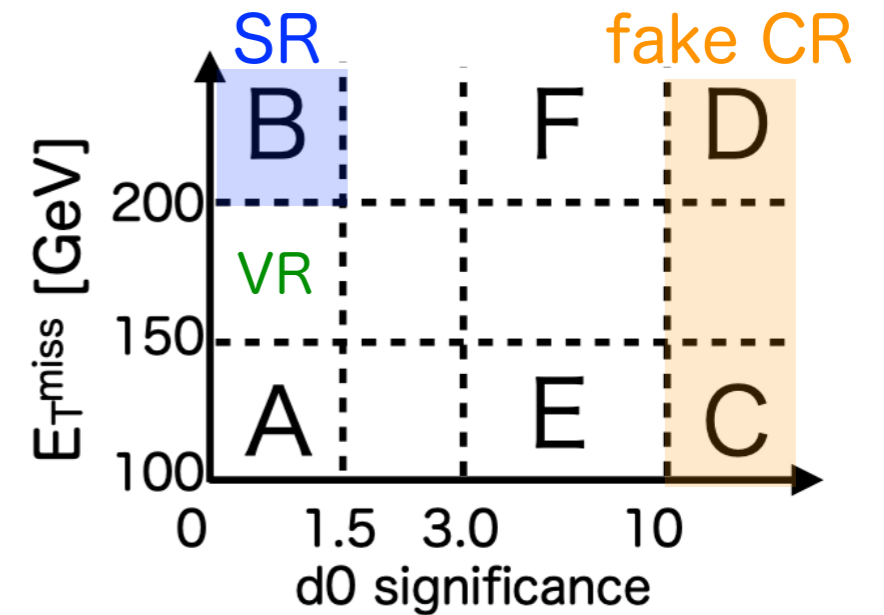
以下の関数でフィット

$$f(p_T) = \exp\left(-p_0 \cdot \log(p_T) - p_1 \cdot (\log(p_T))^2\right)$$

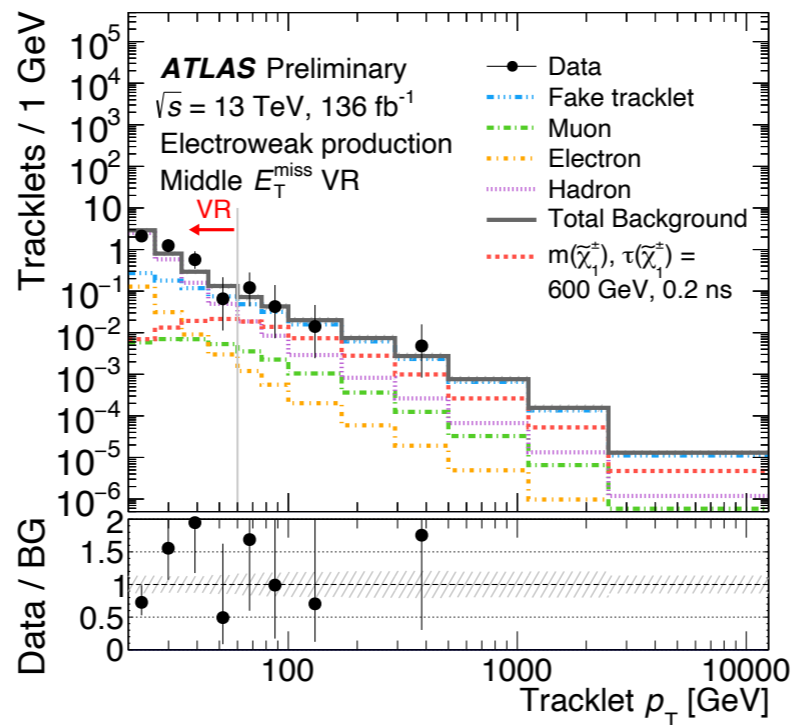
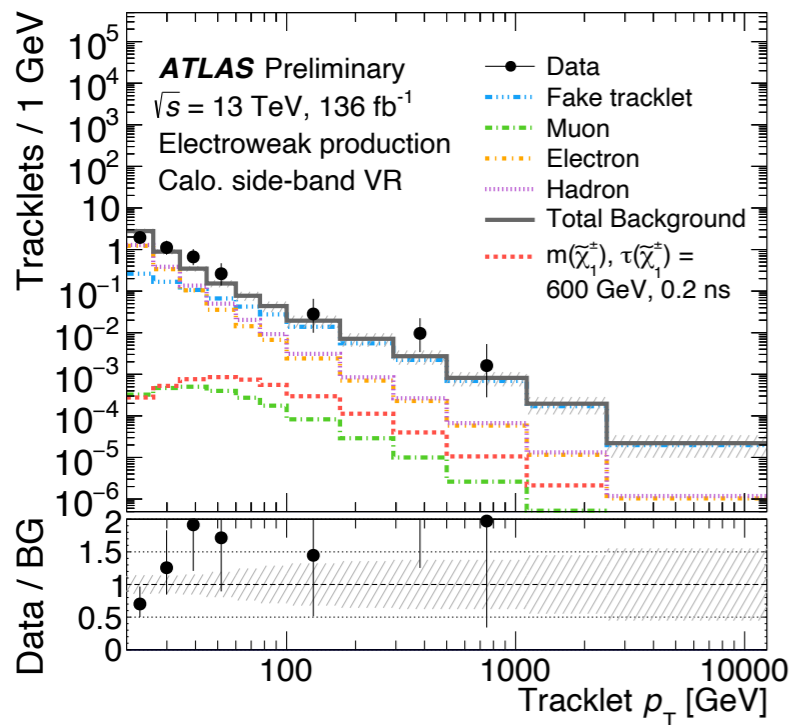
SR における fake BG のスケール B

$$\rightarrow A \times (D/C)$$

d0 依存性は F/E と D/C を比較することで評価.



# 背景事象見積もりの検証



信号事象の割合が少ない領域  
を用いて背景事象見積もりの  
正当性を検証.

Electroweak channel

Strong channel

Middle- $E_T^{\text{miss}}$  VR

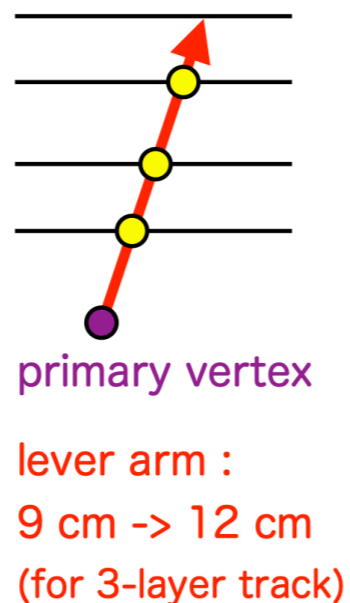
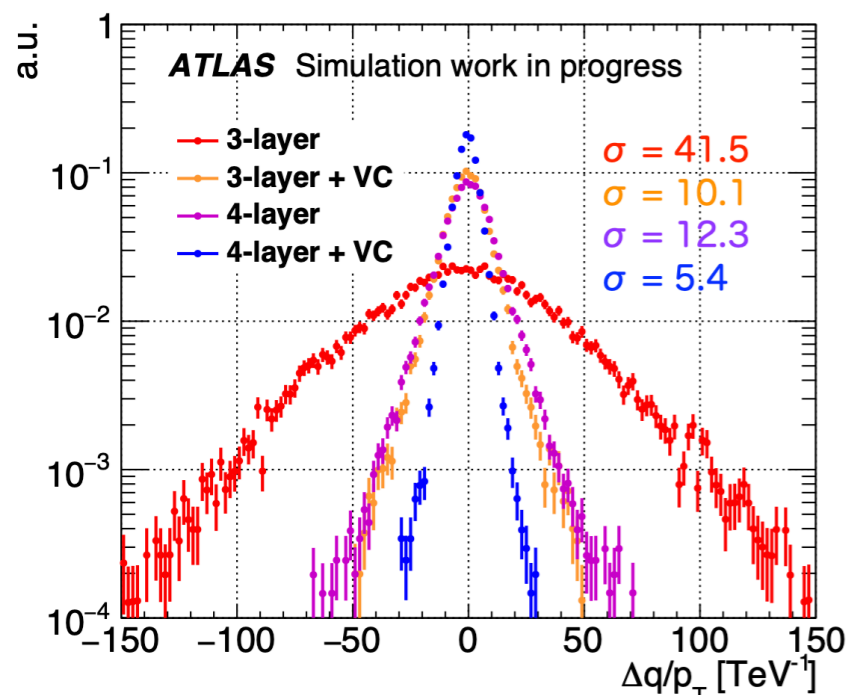
	Calo side-band $p_T > 60$ GeV	Low $p_T$ $p_T < 60$ GeV	Calo side-band $p_T > 60$ GeV	Low $p_T$ $p_T < 60$ GeV
Fake	$4.3 \pm 2.2$	$5.5 \pm 1.5$	$3.2 \pm 1.5$	$3.5 \pm 1.0$
Hadron	$1.0 \pm 0.8$	$23 \pm 6$	$0.36 \pm 0.23$	$13 \pm 4$
Electron	$0.8 \pm 0.5$	$1.2 \pm 1.3$	$0.29 \pm 0.20$	$0.5 \pm 0.5$
Muon	$0.023 \pm 0.007$	$0.25 \pm 0.06$	$0.012 \pm 0.004$	$0.129 \pm 0.032$
Total Expected	$6.1 \pm 1.9$	$29 \pm 5$	$3.8 \pm 1.5$	$17 \pm 4$
Observed	5	30	3	18

予想事象数と観測事象数  
は誤差の範囲内で一致.

signal contami. | 1.6% | 2.3% | < 0.1% | 4.5%

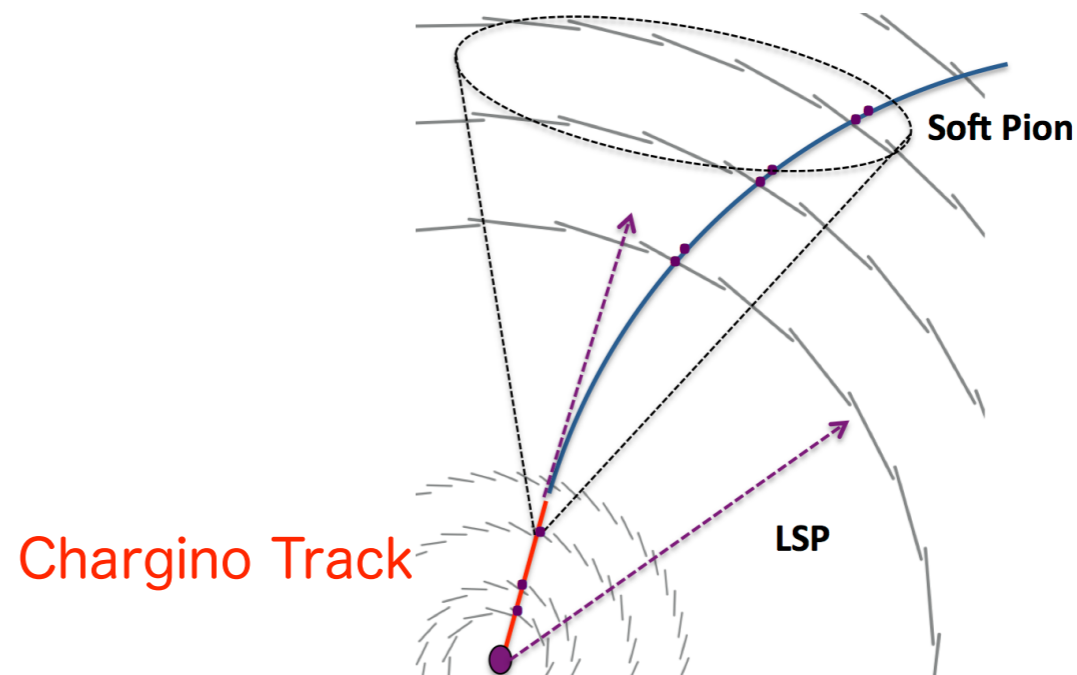
# Future Prospect

## 3層飛跡の再構成と 衝突点を用いた運動量分解能の改善

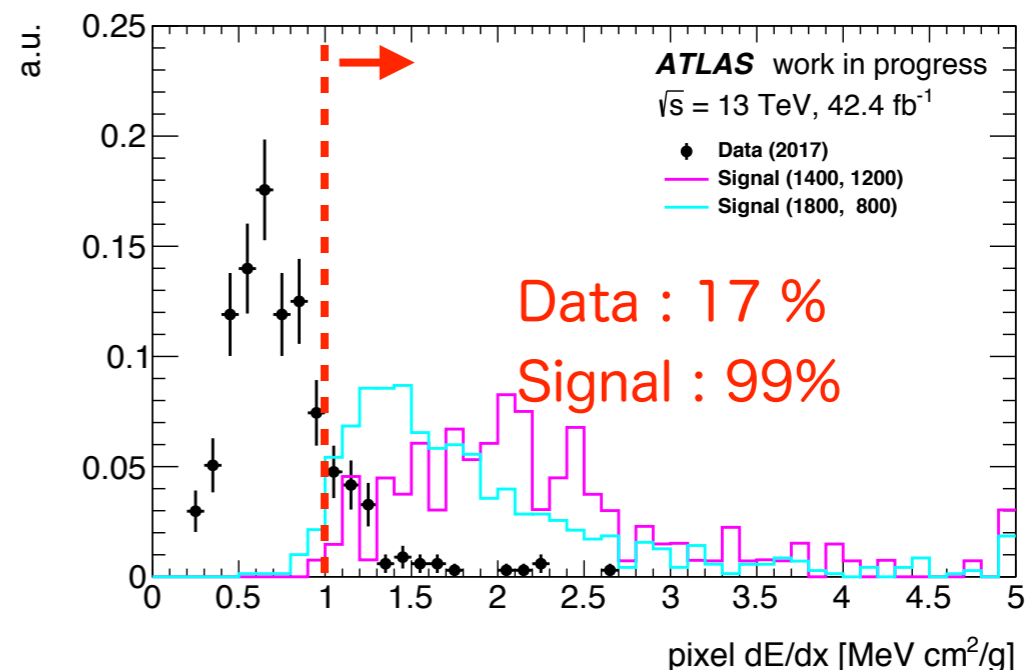


今のデータだけでも  
やれることがまだまだある。

## Soft pion 飛跡の再構成



## dE/dx の利用



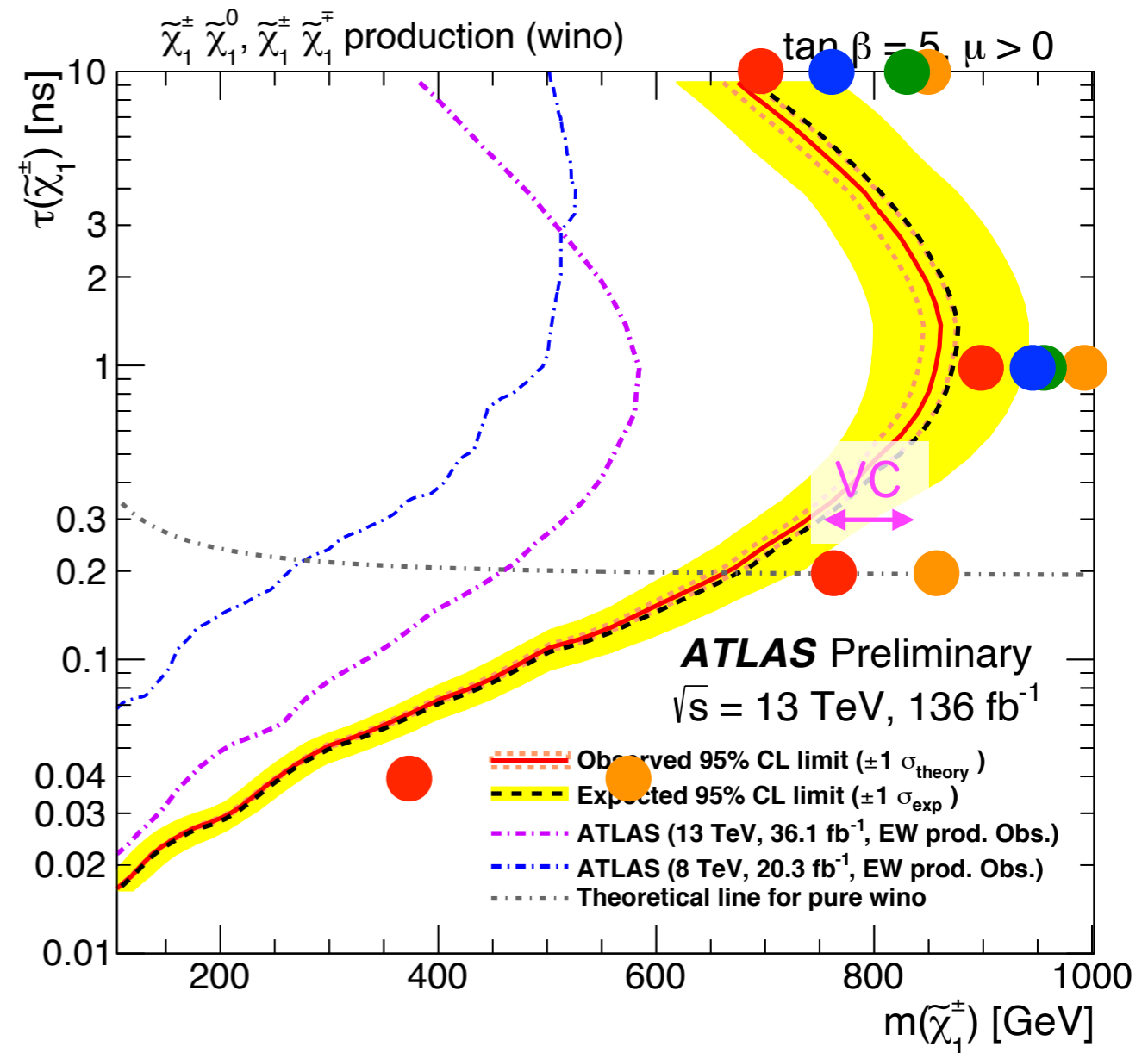
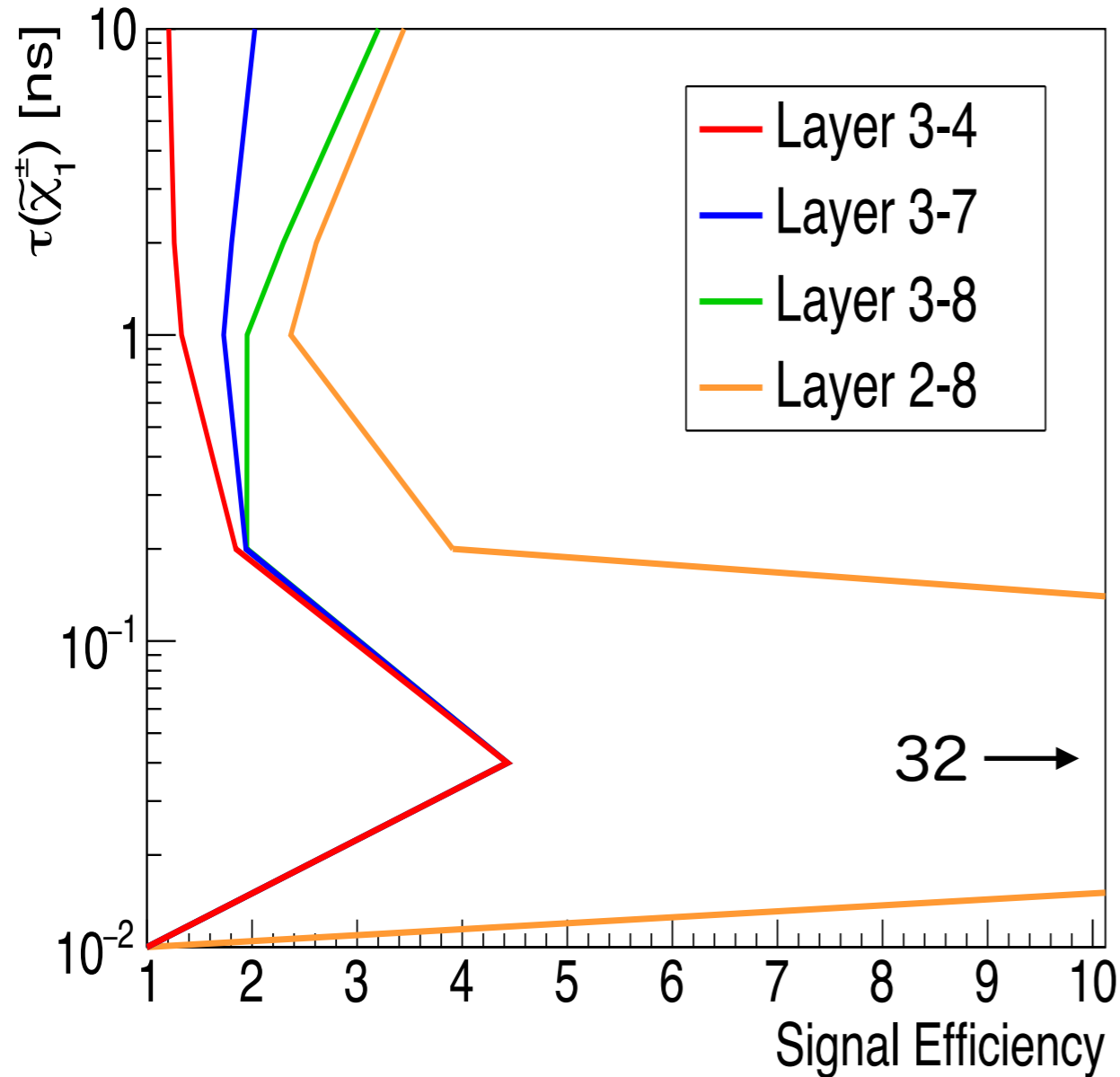


# Expectation

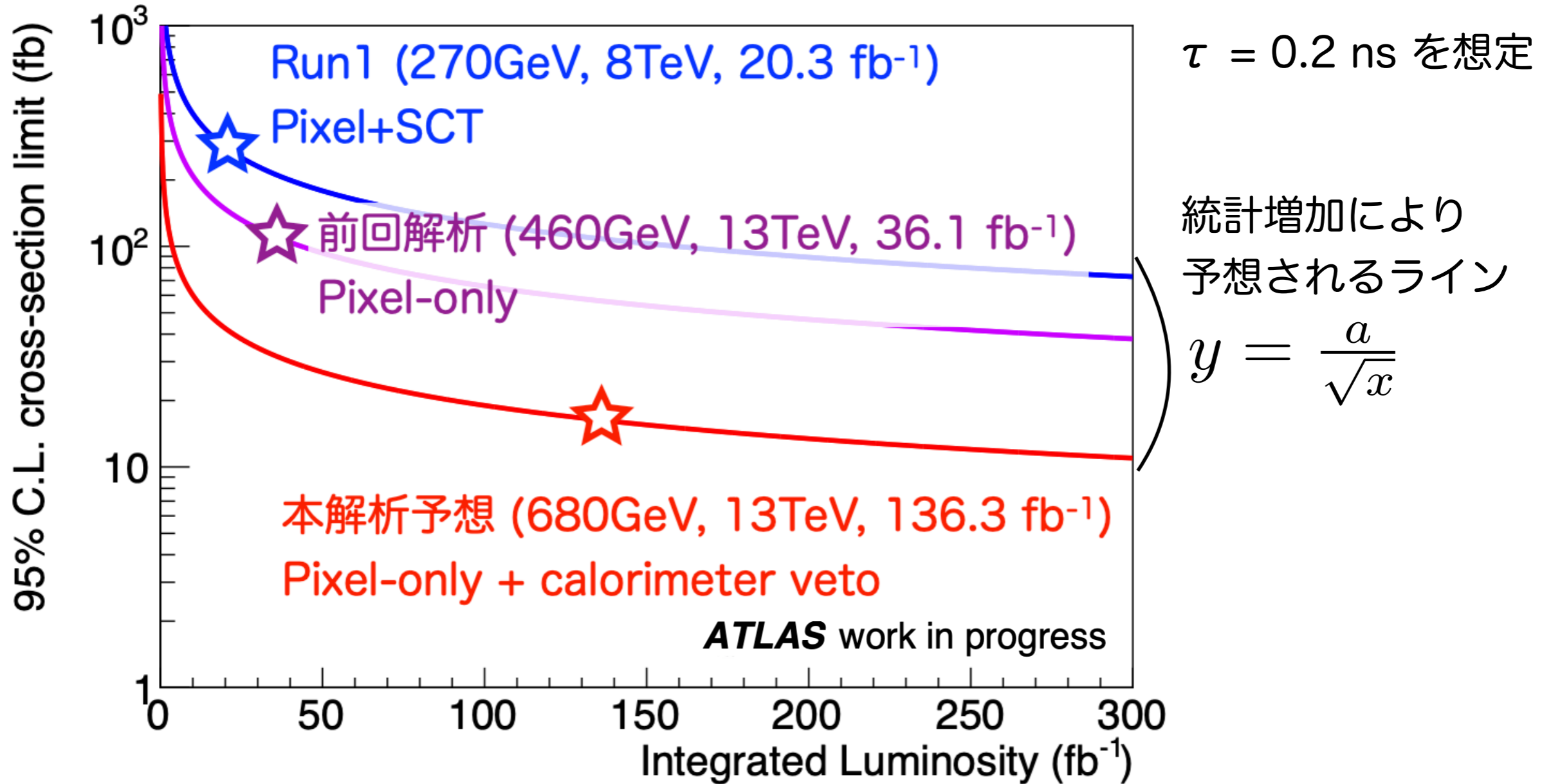
track reconstruction + selection efficiency = 50 % に仮定.

barrel track を前提とした acceptance cut 有り.

pT resolution や BG は考慮していない.



# ATLAS における消失飛跡を用いた Wino 探索感度の推移



解析手法の改善により毎回 統計以上の感度改善を達成。  
今後の解析でも新たな改善を予定している。

# LHC-ATLAS 実験

陽子-陽子衝突型円形加速器 LHC で行なわれている主要 4 実験の内の 1 つであり、標準模型の精密測定や新物理の発見が目的。

## これまでの運転状況及び計画

### Run1 (2010 ~ 2012)

- 5 fb<sup>-1</sup> @7TeV + 20 fb<sup>-1</sup> @8TeV
- **ヒッグス粒子発見**

### Run2 (2015 ~ 2018)

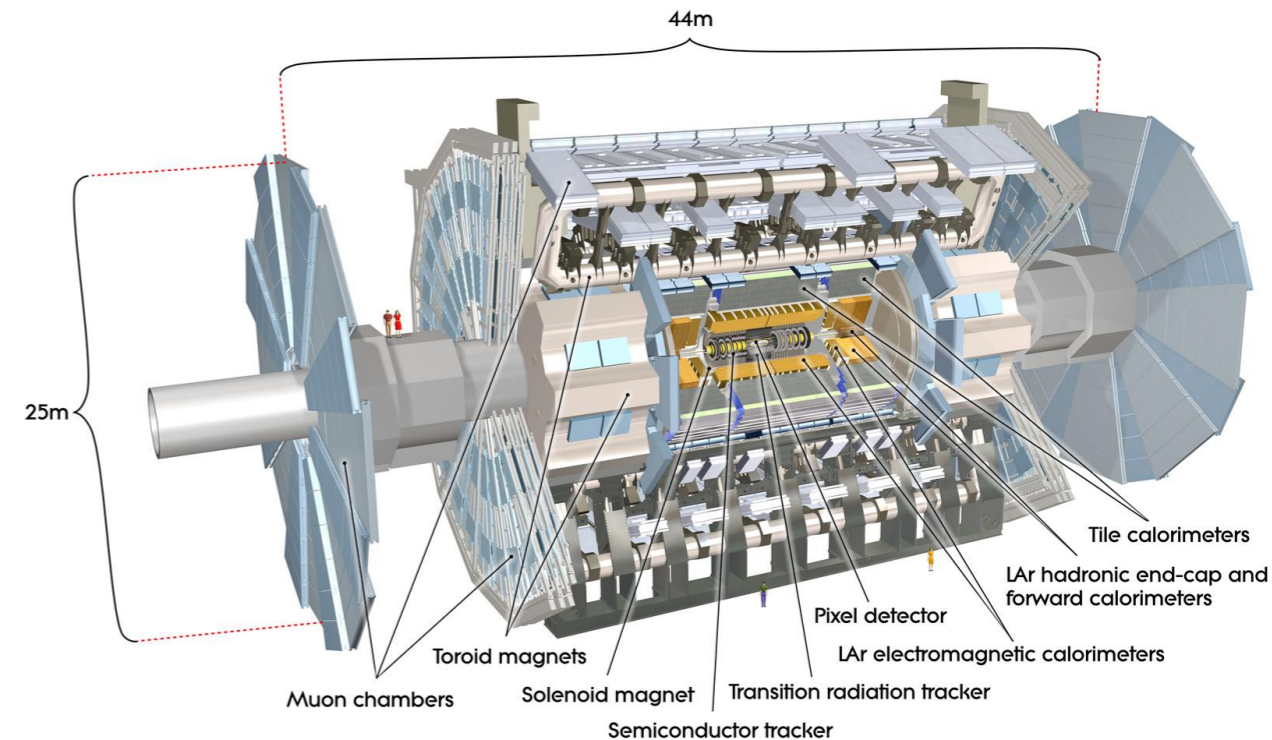
- 139 fb<sup>-1</sup> @13TeV
- <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

### Run3 (2021 ~ 2023)

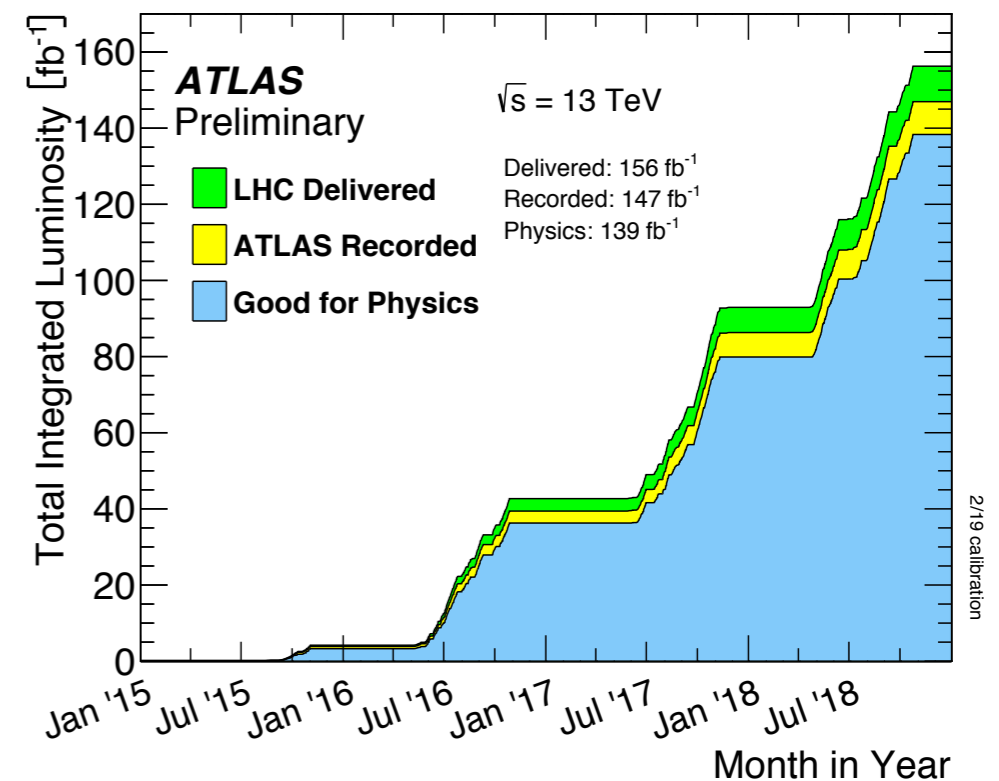
- ~300 fb<sup>-1</sup> @14TeV?

ヒッグス粒子発見以降、  
その他の新粒子は見つかっていない。

## ATLAS 検出器



## Run2 におけるデータ取得量の推移



# Natural SUSY

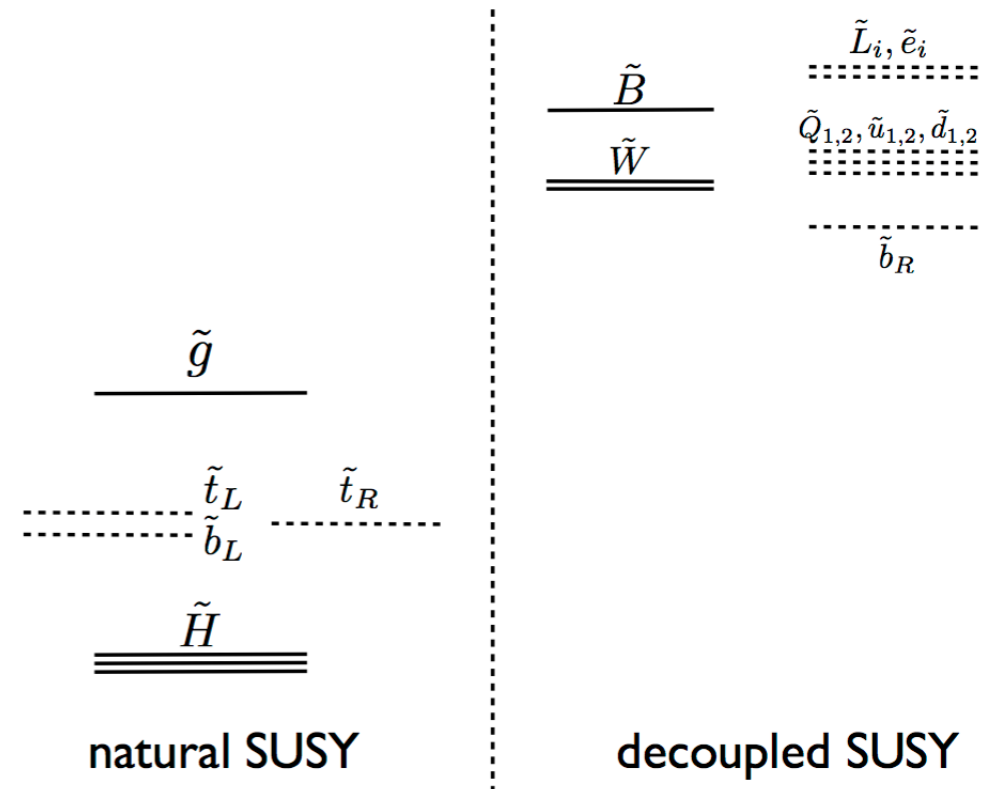
階層性問題を解決するために SUSY を導入したのだから、新たに別の fine tuning が必要になっては本末転倒。

→ higgs 質量の補正項は小さいのが自然。

10.1007/JHEP09(2012)035

$$-\frac{m_Z^2}{2} \simeq \underbrace{|\mu|^2}_{\text{higgsinos}} + m_{H_u}^2 - \frac{3y_t^2}{8\pi^2} \underbrace{m_{\tilde{t}}^2}_{\text{stop}} \log\left(\frac{\Lambda^2}{m_{\tilde{t}}^2}\right)$$

- Higgsinos:  $\delta m_H^2 = \mu^2$
- Stops:  $\delta m_H^2 \sim -\frac{3}{8\pi^2} y_t^2 m_{\text{stop}}^2 \log \frac{\Lambda}{Q}$
- Gluinos:  $\delta m_H^2 \sim -\frac{g_3^2 y_t^2}{4\pi^4} |M_3|^2 \left(\log \frac{\Lambda}{Q}\right)^2$  ↖ 2-loop eff.



Higgsino-LSP を示唆

higgsino, stop, gluino は軽いかもしれない。

→ LHC で到達出来るエネルギー領域に well-motivated な物理があるのは面白い。

# LLP (Long-Lived Particle)

## ✓ BSM 粒子が長寿命になるケースは多々ある

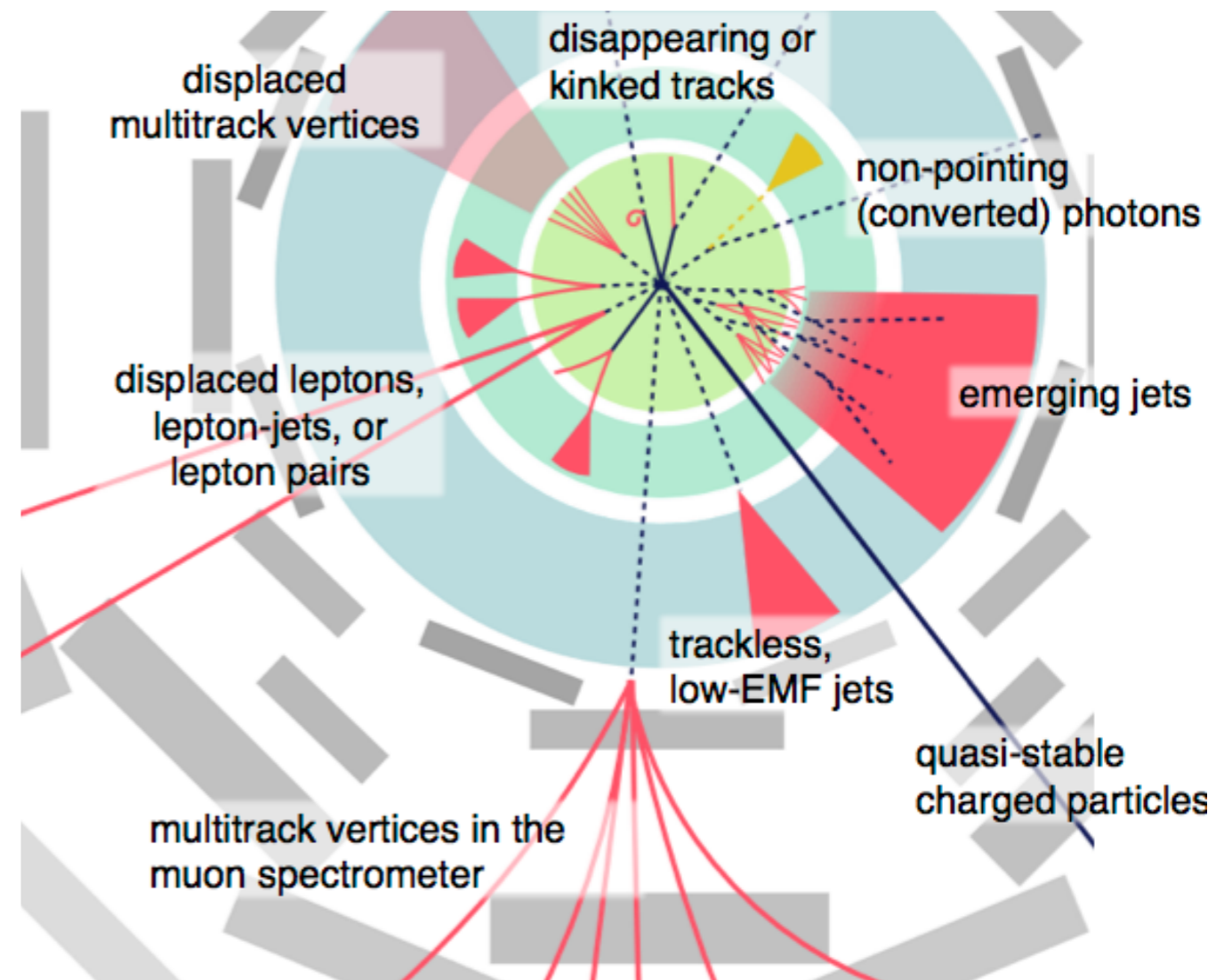
- 媒介粒子が重い (SM :  $\mu \rightarrow e \nu \nu$ )
- 質量差が小さい (SM :  $n \rightarrow p e \nu$ )
- 結合定数が小さい

## ✓ 特殊なオブジェクトを伴う場合が多い

- 通常の解析では捉えられず, 見逃してしまう可能性がある.
- 解析技術・手法の発展により探索可能領域が拡張.
- 技術面・リソース面の問題に直面することもしばしば.

-> まだまだ発展途上であり,  
工夫次第で飛躍的に進展する  
可能性のある面白い分野!

## 長寿命粒子が残すであろう様々な実験的特徴

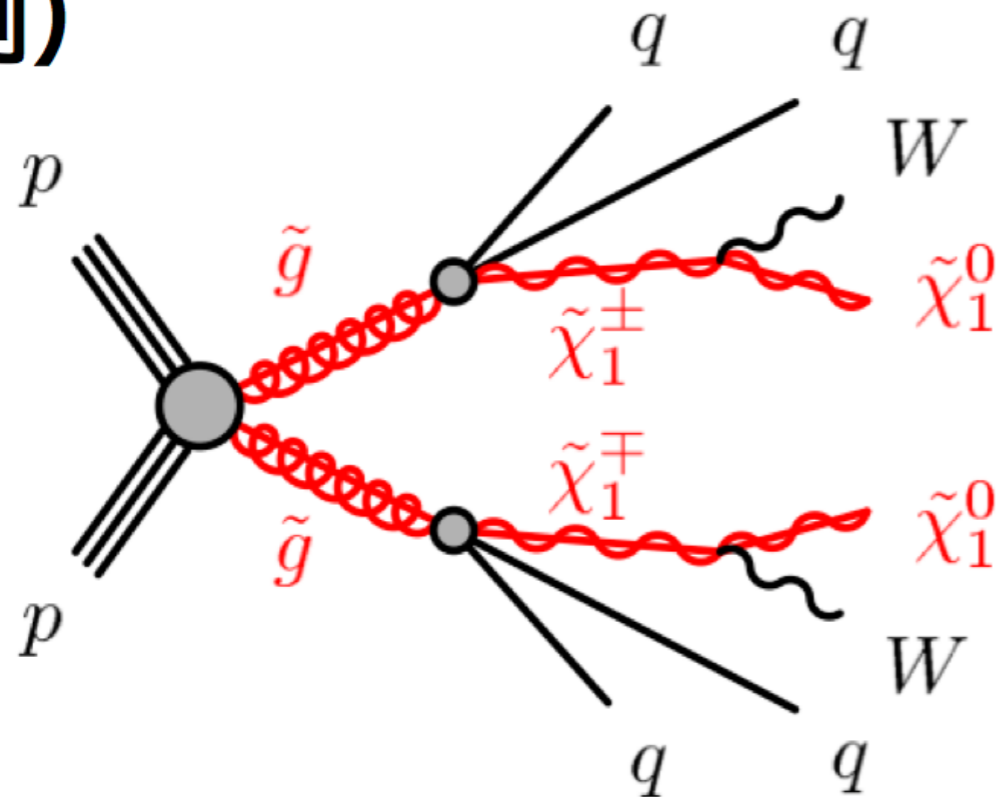


[arXiv:1903.04497](https://arxiv.org/abs/1903.04497)

# Simplified Model

最小限の粒子, 質量関係, BRのみを考慮

(例)



$m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{\chi}_1^0}$  ← パラメータ

$$m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = (m_{\tilde{g}} + m_{\tilde{\chi}_1^0})/2$$

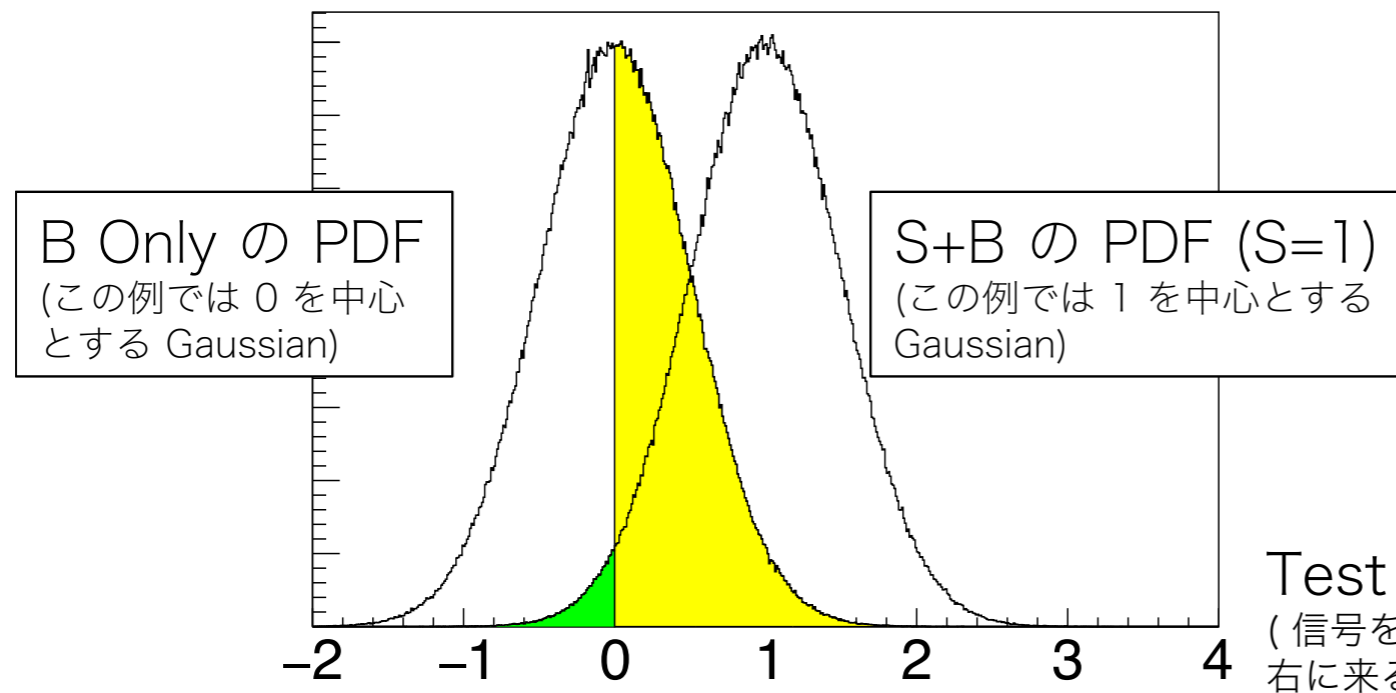
$$\text{BR}(\tilde{g} \rightarrow qqW\tilde{\chi}_1^0) = 1$$

特定の topology, kinematics に対し共通の尺度で解釈可能.

ATLAS, CMS では 2011 年より推奨.

# CLs method について

- CLs method とか、95 % 信頼度ってなに？
  - 取り決めた「test statistic」を使った統計処理



ところで。どんな分布になるかは、どの「test statistic」を使うかで違う。LHC は negative log likelihood ratio (B-only の分布が chi2 分布に従うので、確率分布関数を準備するのに便利)

$$CL_S = 1 - \frac{P(x < obs | \mu \times S + B)}{P(x > obs | B)}$$

- 緑 / 黄色 > 0.05 となるような信号数を棄却
- あとは、信号の検出効率とルミノシティを考慮すれば、「断面積」の上限値になる

# Run-1 pMSSM-19 Scan Parameters 6

- Using a 19 parameter pMSSM as basis model
  - No CP violating parameters
  - Minimal flavor violation
  - Degenerate 1st and 2nd generations sfermions
  - Lightest sparticle (LSP) is a neutralino
  - R-parity is exactly conserved (LSP is stable)
- Sample parameters uniformly over wide range (up to 4TeV)

Flavor physics  
constraints

## Higgs sector parameters:

$$1 < \tan \beta < 60$$

$$0.1 \text{ TeV} < M_A < 4 \text{ TeV}$$

## Neutralino/chargino mass parameters:

$$-4 \text{ TeV} < \mu < 4 \text{ TeV}, \quad |\mu| > 80 \text{ GeV}$$

$$-4 \text{ TeV} < M_1 < 4 \text{ TeV}$$

$$-4 \text{ TeV} < M_2 < 4 \text{ TeV}, \quad |M_2| > 70 \text{ GeV}$$

## Slepton mass parameters:

$$0.09 \text{ TeV} < m_{eL} = m_{\mu L} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.09 \text{ TeV} < m_{eR} = m_{\mu R} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.09 \text{ TeV} < m_{\tau L} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.09 \text{ TeV} < m_{\tau R} < 4 \text{ TeV}$$

## Squark/gluino mass parameters:

$$0.2 \text{ TeV} < M_3 < 4 \text{ TeV}$$

$$0.2 \text{ TeV} < m_{q1L} = m_{q2L} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.2 \text{ TeV} < m_{uR} = m_{cR} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.2 \text{ TeV} < m_{dR} = m_{sR} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.1 \text{ TeV} < m_{q3L} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.1 \text{ TeV} < m_{tR} < 4 \text{ TeV}$$

$$0.1 \text{ TeV} < m_{bR} < 4 \text{ TeV}$$

## Trilinear coupling parameters:

$$-4 \text{ TeV} < A_b < 4 \text{ TeV}$$

$$-8 \text{ TeV} < A_t < 8 \text{ TeV}$$

$$-4 \text{ TeV} < A_\tau < 4 \text{ TeV}$$



# Run-1 Non-ATLAS Search Constraints 8

- For each point evaluate whether it is a “viable” model
  - Model has to be theoretically “sound”
  - Model should not already be excluded by other measurements

## Low energy constraints:

$g_\mu - 2$	$[-1.77 : 4.38] \times 10^{-9}$	} $\pm 2\sigma$ union of theory and exp. meas.
$BF(b \rightarrow s\gamma)$	$[0.269 : 0.387] \times 10^{-3}$	
$BF(B_s \rightarrow \mu\mu)$	$[1.6 : 4.2] \times 10^{-9}$	} $\pm 3\sigma$ union of theory and exp. meas.
$BF(B^+ \rightarrow \tau\nu_\tau)$	$[64 : 161] \times 10^{-6}$	

## LEP constraints:

$\Gamma_{invis.}(Z)$	$< 2 \text{ MeV}$	Invisible width in addition to neutrinos
$\Delta\rho$	$[-0.0005 : 0.0017]$	
Charged sparticles	$> 100 \text{ GeV}$	Raised to 103 GeV for $\tilde{\chi}_1^+$ in most cases

## Higgs mass constraints:

$m(h)$	<b>124–128 GeV</b>	Higgs mass range was set at end of 2013 Uncertainty is set by theory prediction
--------	--------------------	--

## Dark matter constraints:

Relic density	$\Omega h^2 < 0.1221$	Relic dark matter density from Planck only used as upper limit (use $+2\sigma$ ) Allow other DM component than LSP
Direct SI	$< 4 \times \text{LUX}$	
Direct SD, p	$< 4 \times \text{COUPP}$	For direct detection use factor 4 looser limit to account for nuclear form factor uncertainties (also scale down by LSP relic density/DM density)
Direct SD, n	$< 4 \times \text{Xenon}$	

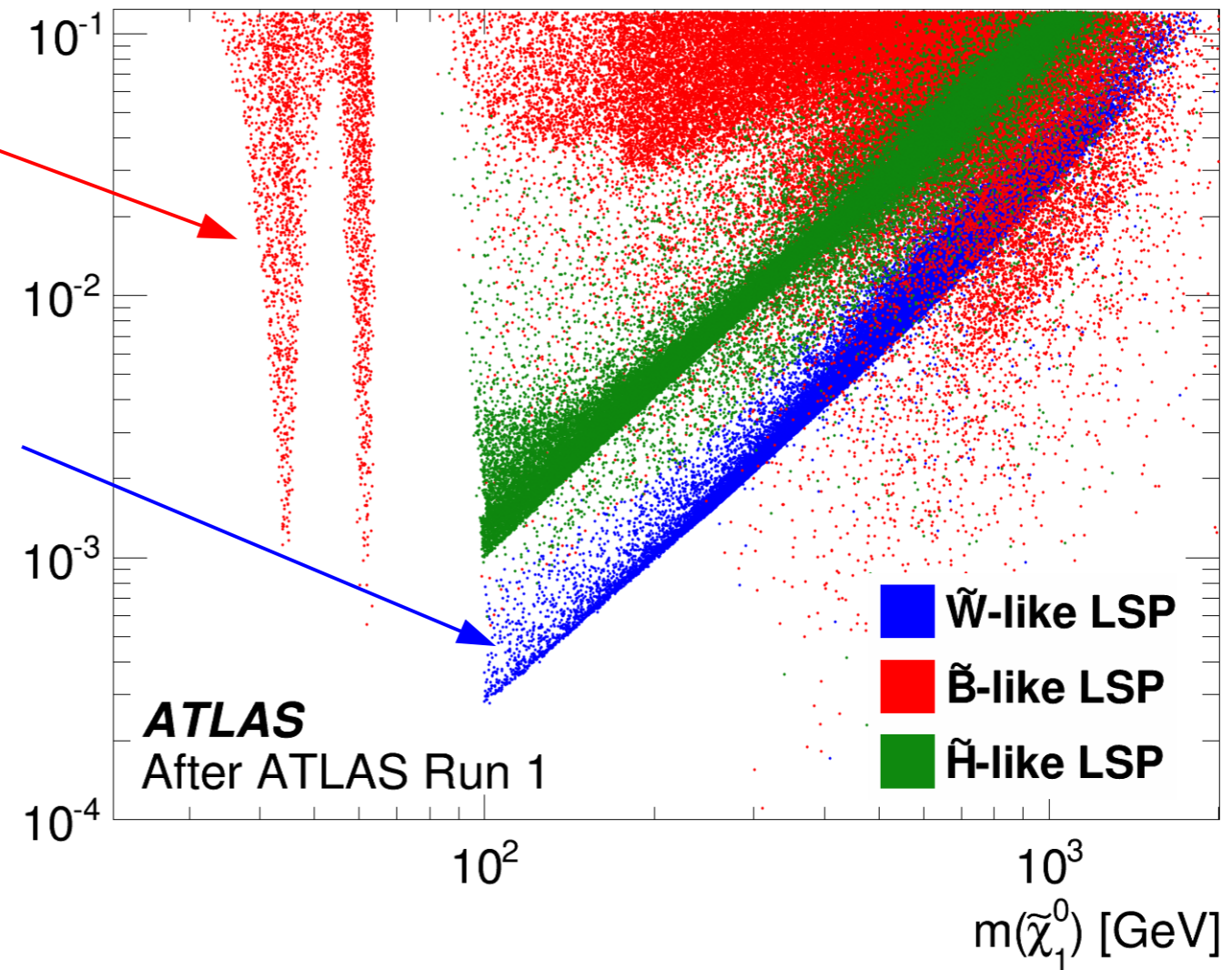
# Run-1: Dark Matter Relic Abundance

Dark Matter relic abundance only applied as an upper bound

2/3 of models in Z and H funnel excluded

80% of Wino LSP models excluded for  $m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$  GeV by disappearing track analysis

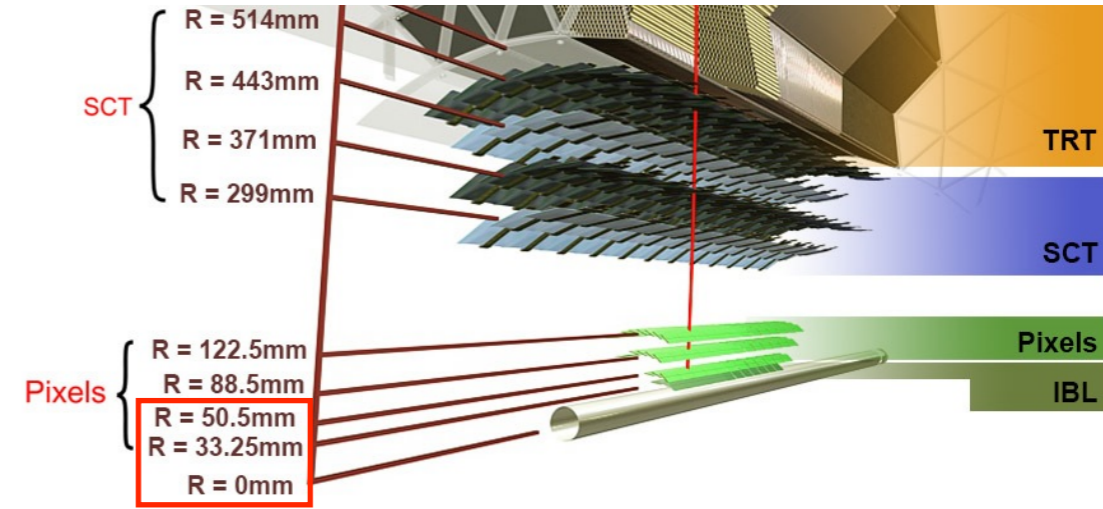
Higgsino LSP harder to exclude as chargino too short lived



# 2-Layer Tracking

To reconstruct shorter tracks, considering about tracks consist of IBL cluster, B-layer cluster and primary vertex.

Radius Position of Pixel/SCT

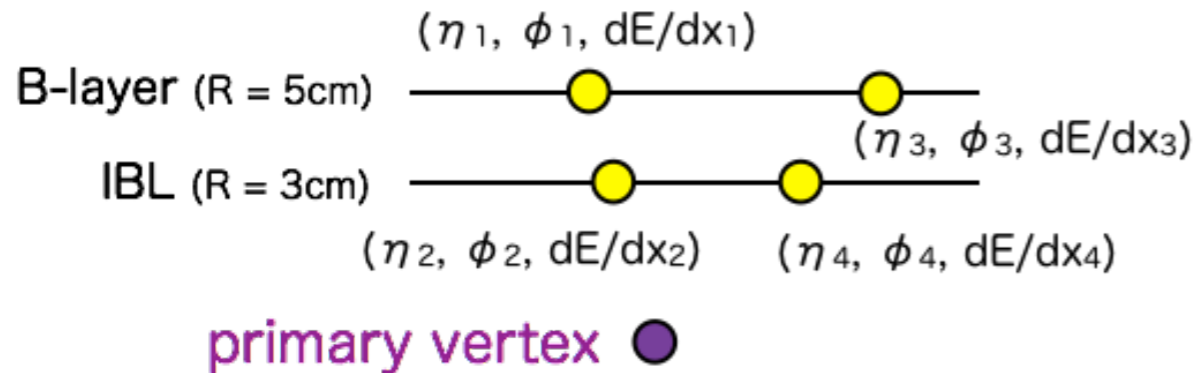


Current Algorithm need to make more reliable (ToDo)

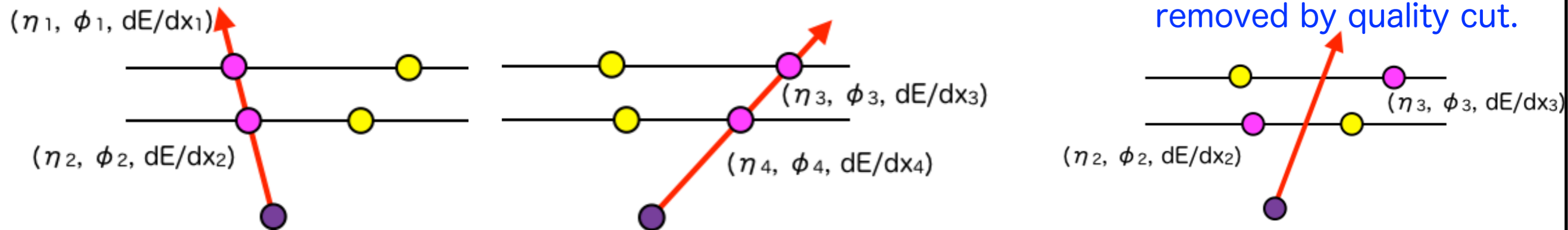
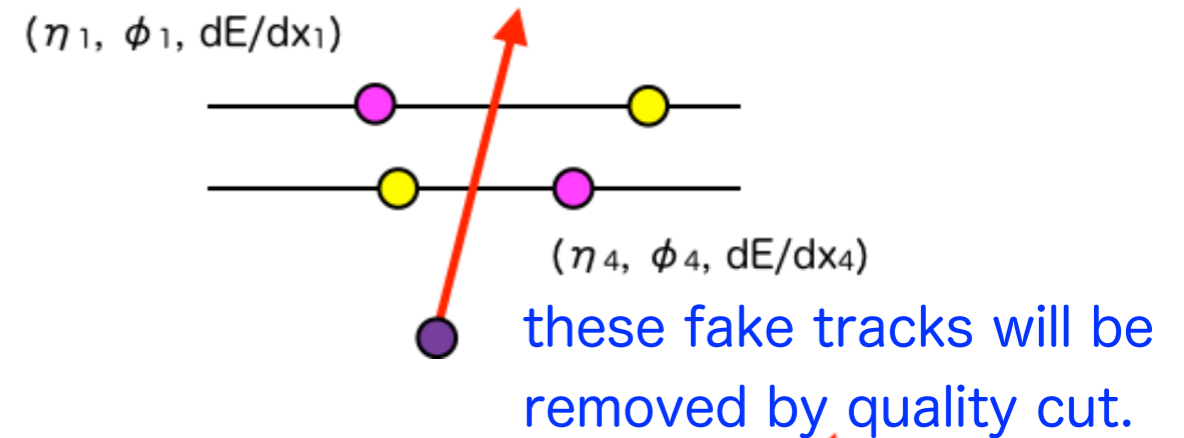
bad clusters :  $dE/dx$  can not be measured correctly due to geometrical reason

(1) Use only good clusters in barrel region.

(2) Define  $\eta, \phi, dE/dx$  w.r.t. primary vertex for each cluster.

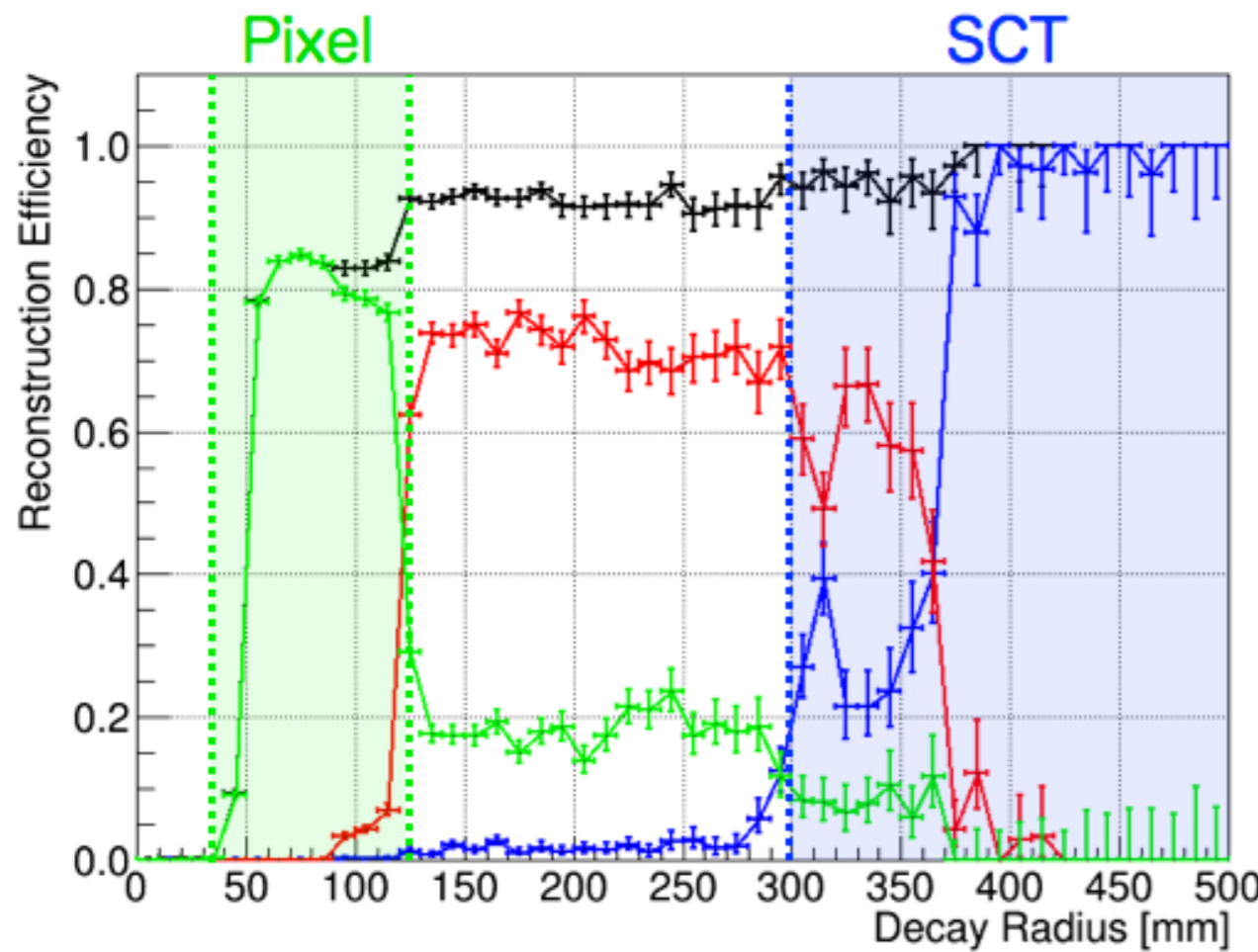
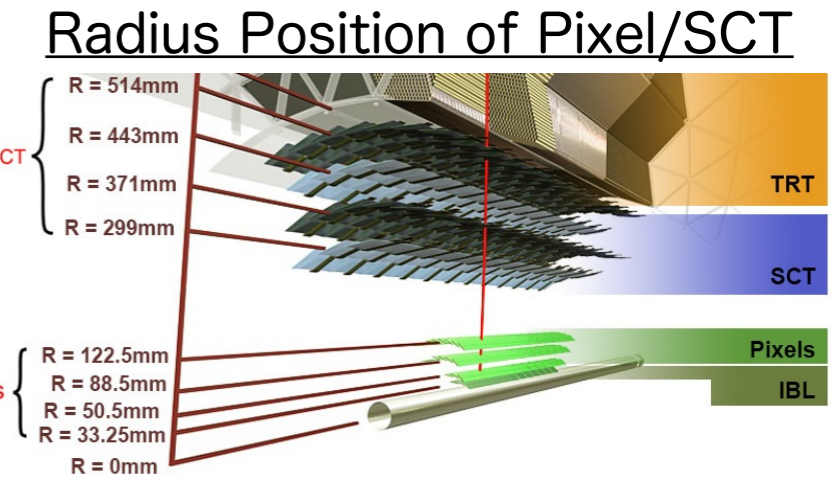


(3) Make 2-Layer tracks by connecting clusters between each IBL and B-layer.



# 2-Layer Tracking Efficiency

Reconstruction Efficiency vs Decay Radius(Sample B)



Total  
 ATLAS Standard Track  
 Pixel Tracklet  
 2-layer Track

Sample A : low  $\beta$  sample

$$(m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{\chi}_1^\pm}, \tau_{\tilde{\chi}_1^\pm}) = (1600 \text{ GeV}, 1400 \text{ GeV}, 0.2 \text{ ns})$$

Sample B : high  $\beta$  sample

$$(m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{\chi}_1^\pm}, \tau_{\tilde{\chi}_1^\pm}) = (2000 \text{ GeV}, 600 \text{ GeV}, 0.2 \text{ ns})$$

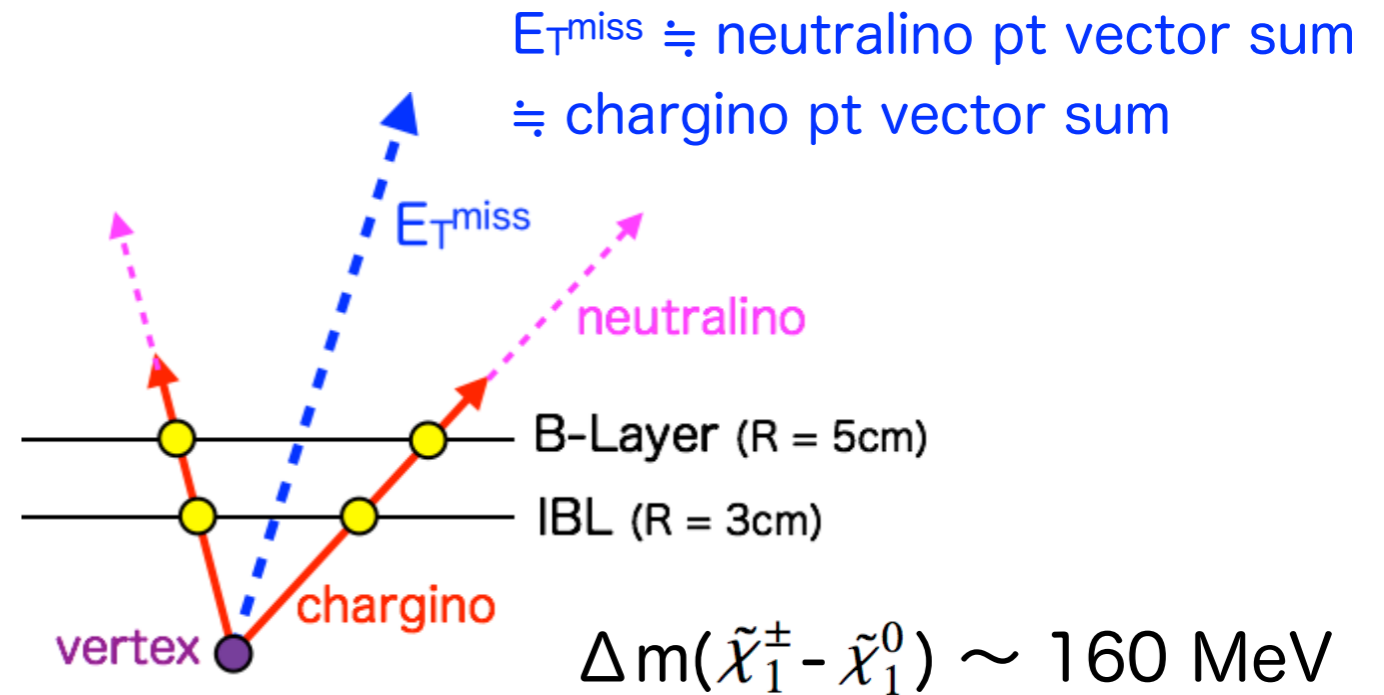
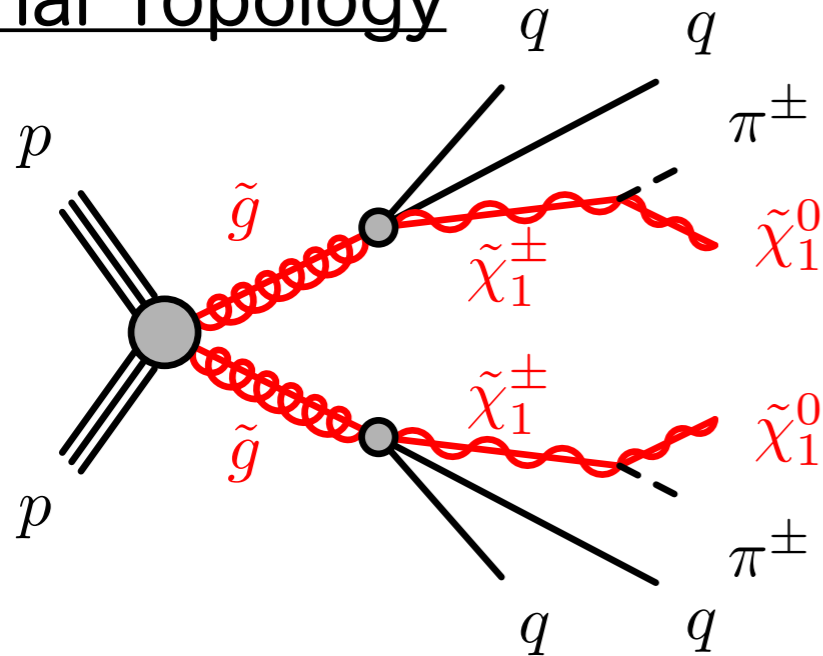
Reconstruction Efficiency w.r.t. All Generated Charginos

	Sample A	Sample B
ATLAS Standard Track	0.1%	1.5%
Pixel Tracklet	1.8%	10.1%
2-layer Track	11.3%	23.4%

Improve efficiency for short tracks region.

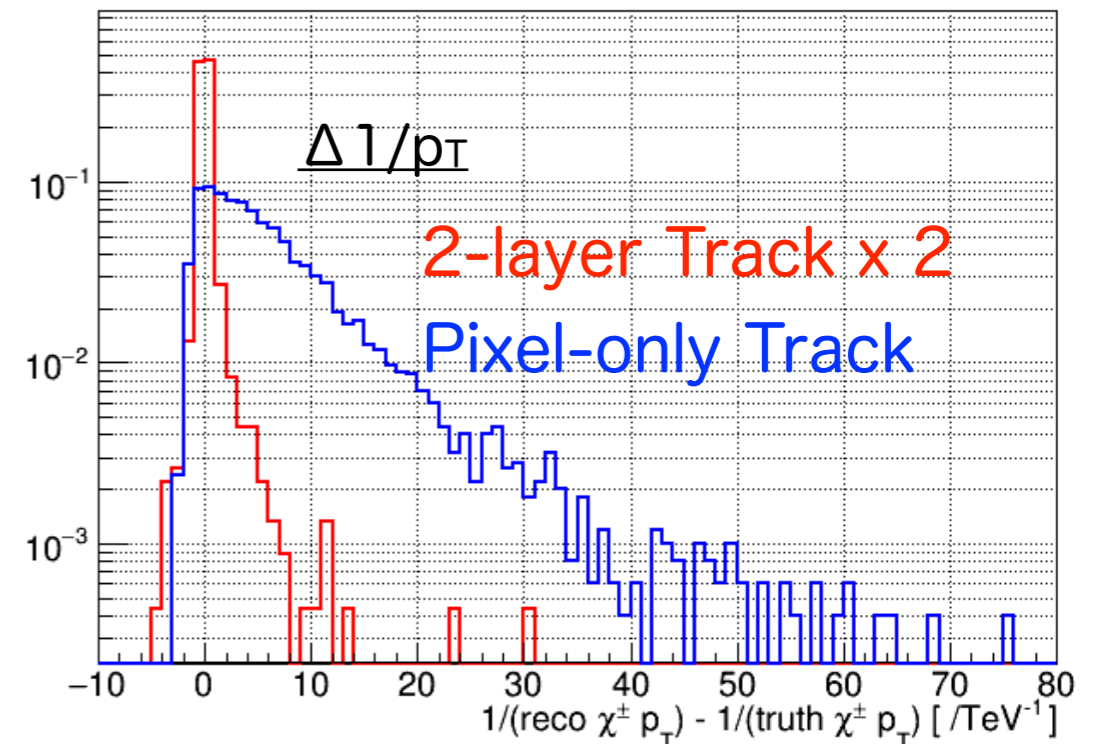
# Chargino $p_T$ Reconstruction by Two 2-Layer Tracks

## Signal Topology



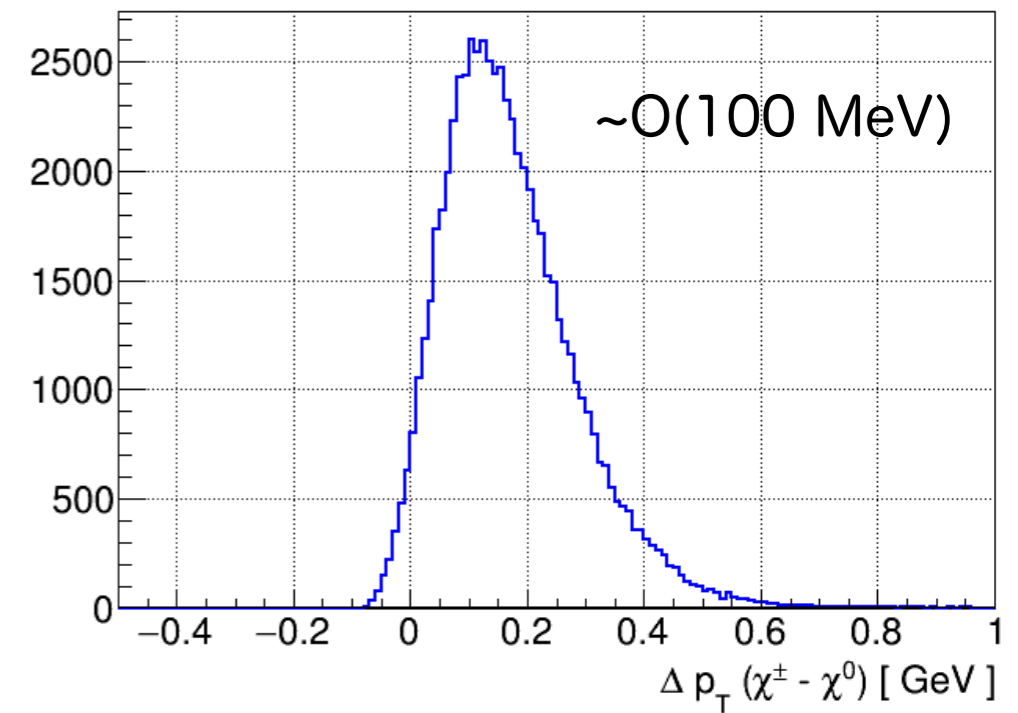
There is no  $p_T$  resolution for 2-layer tracks.

If we require two chargino tracks, chargino  $p_T$  can be calculated from track  $\phi_i$  ( $i=1,2$ ) and  $E_T^{\text{miss}}$  with high resolution.

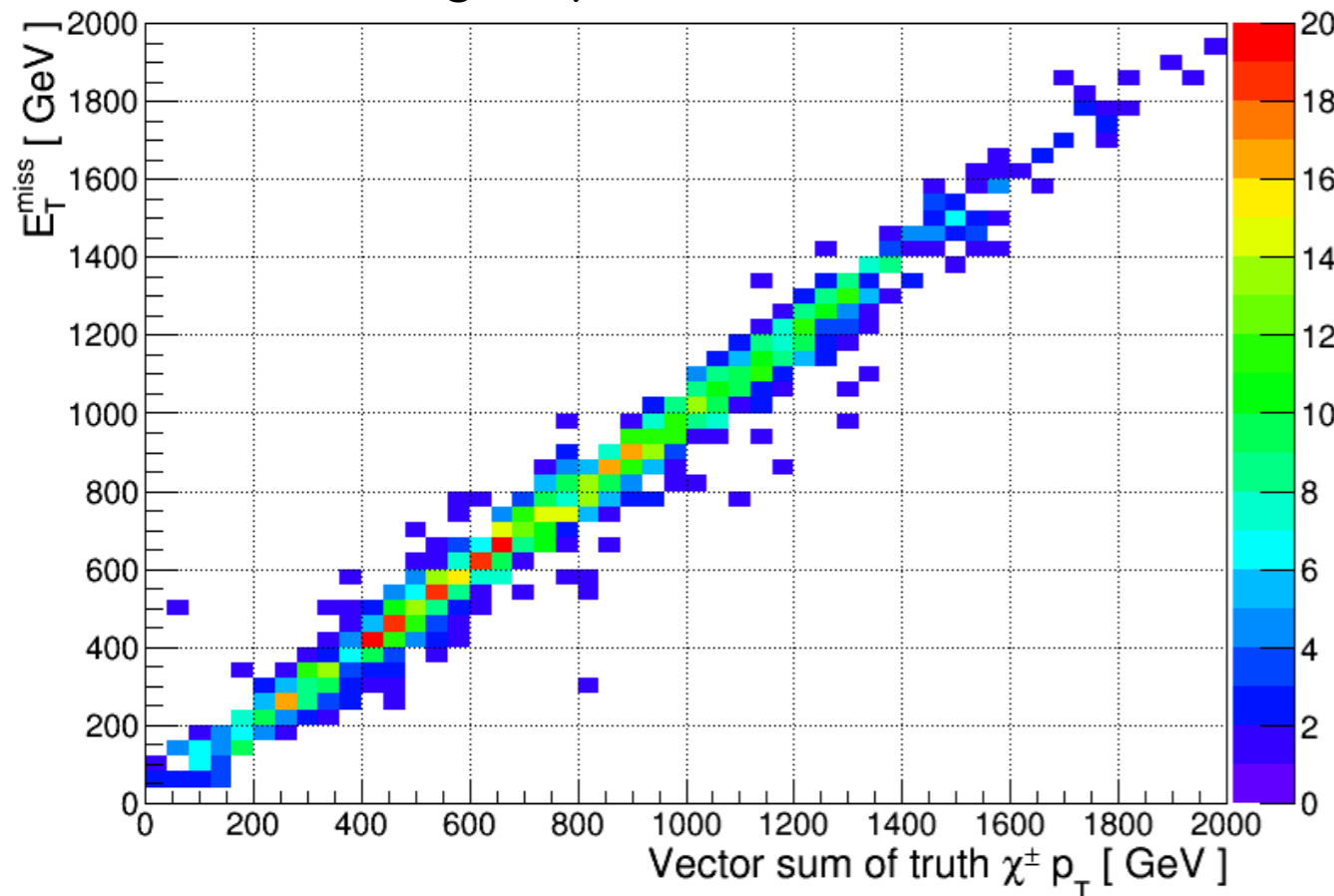


# Some Checks

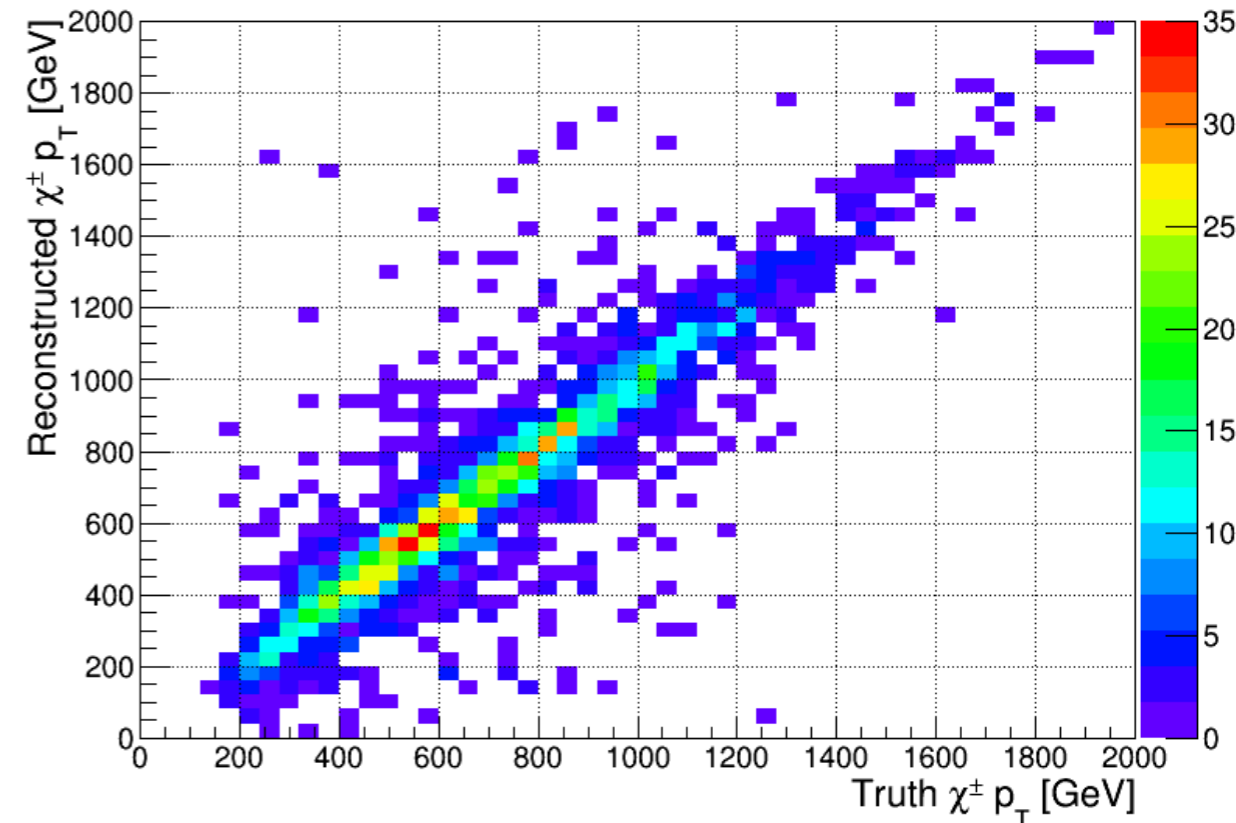
$\Delta p_T$  between chargino and neutralino



chargino  $p_T$  vs  $E_T^{\text{miss}}$



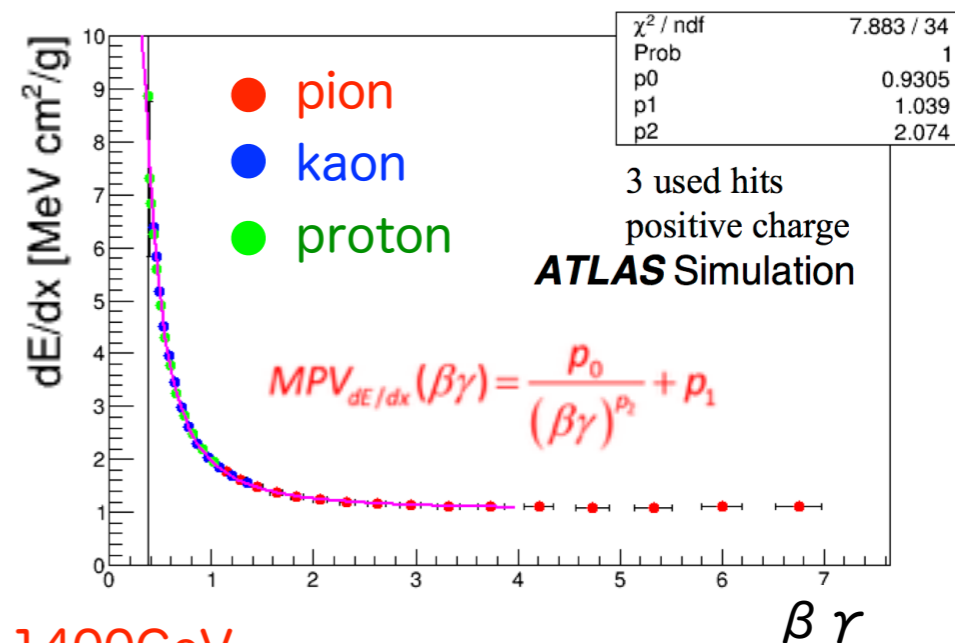
Truth  $p_T$  vs Reconstructed  $p_T$



# Chargino 質量再構成

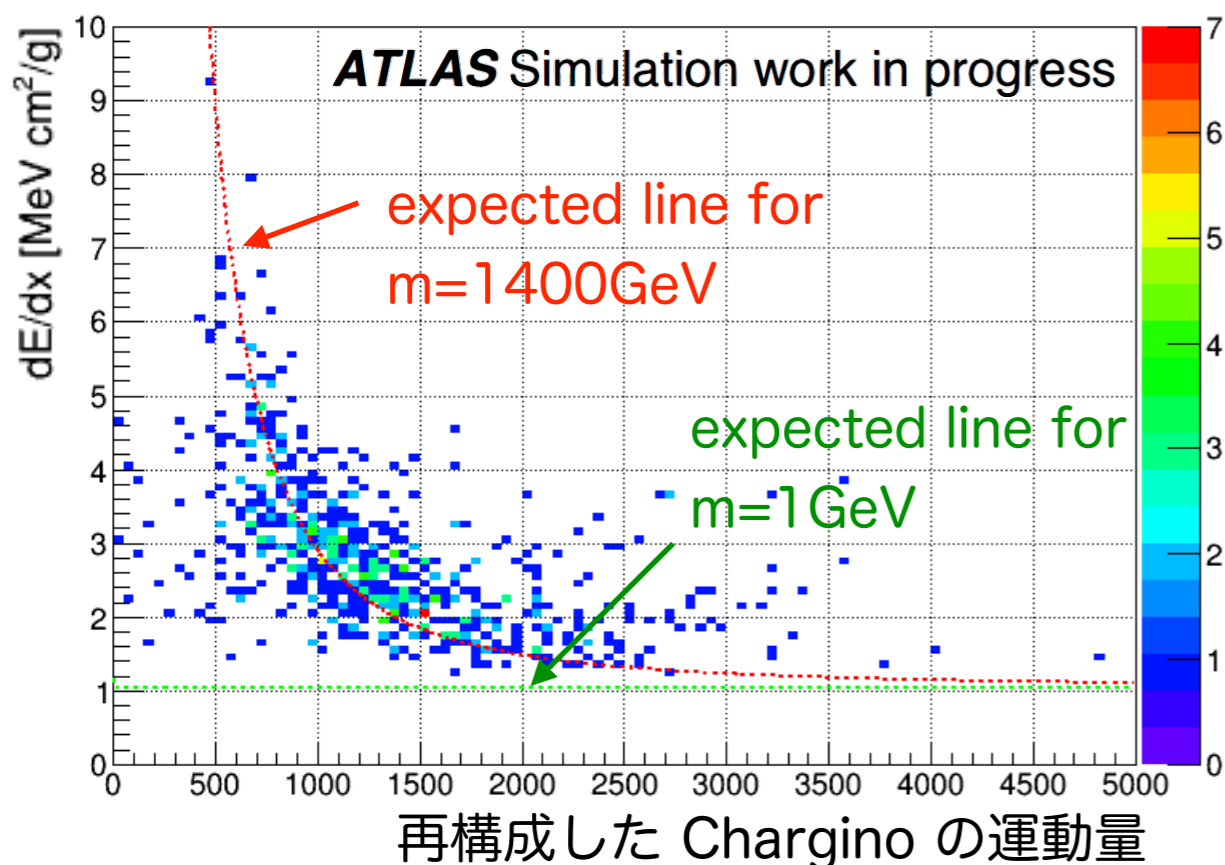
$m = p/(\beta r)$  かつ  $dE/dx$  から ' $\beta r$ ' を推測することが出来るので、  
chargino の質量も再構成することが可能。

通常 Track における  
質量換算関数の較正結果

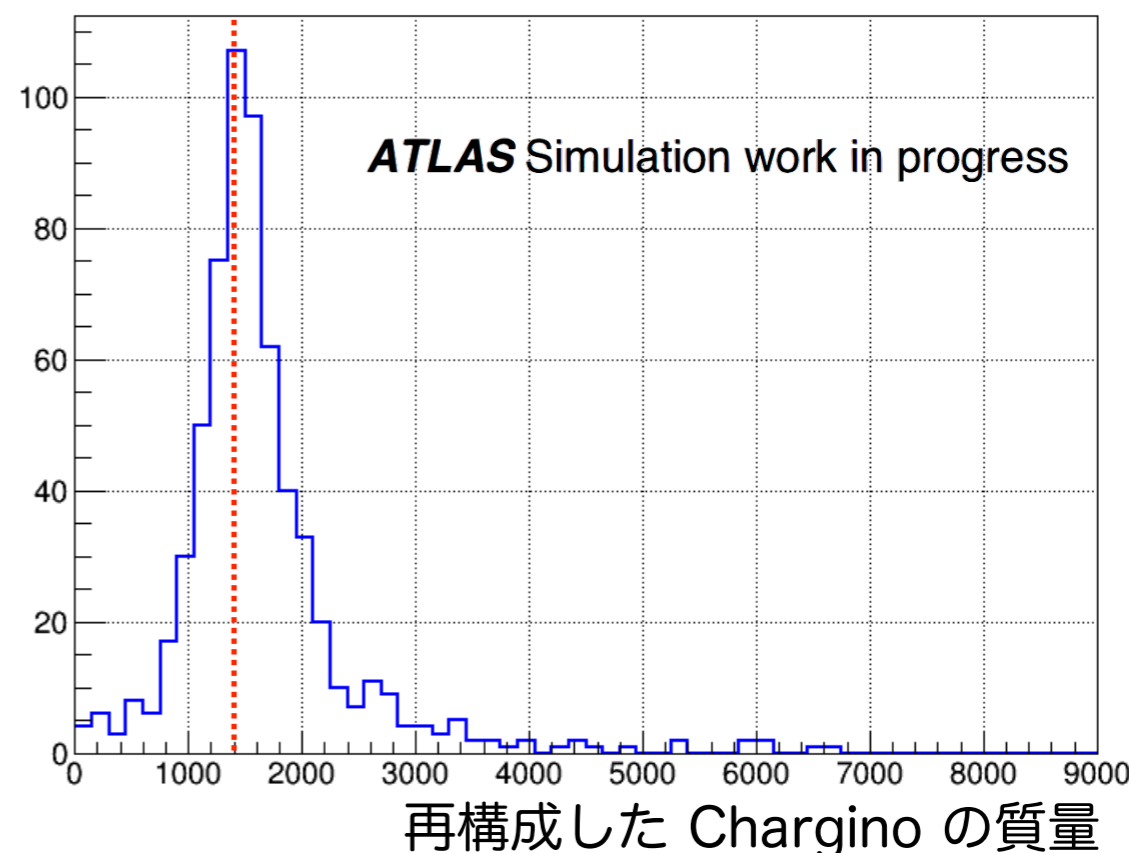


Sample A :

$$(m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{\chi}_1^+}, \tau_{\tilde{\chi}_1^+}) = (1600 \text{ GeV}, 1400 \text{ GeV}, 0.2 \text{ ns})$$



$m=1400\text{GeV}$



※ 2 層 Track の  $dE/dx$  値は通常の Track と算出方法が異なるので、別途較正が必要

# Pixel dE/dx

charge は ToT で測定 (1 ToT = 25 ns)

- IBL 4-bit (FE-I4) overflow bin あり
- Pixel 8-bit (FE-I3) overflow はロスト

1 hit あたりなので、  
例えば IBL でも ToT  
16 は超え得る

MIP に相当する ToT の値

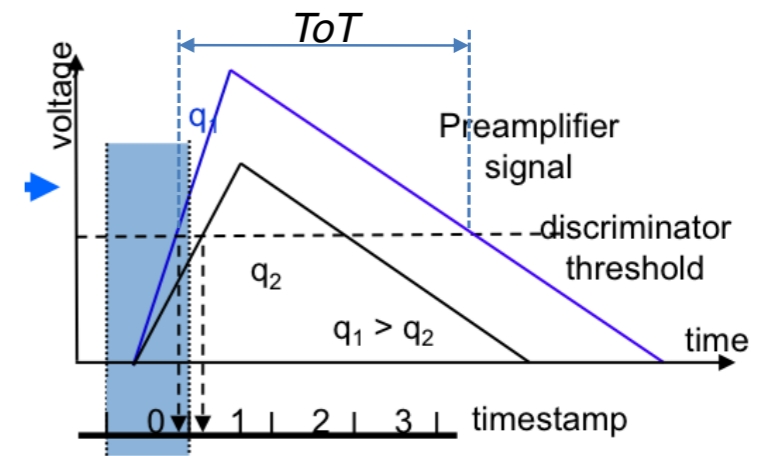
- 30 (2015, 2016 の外側 pixel)
- 18 (2016 の B-layer)
- 10 (2015 の IBL)
- 8 (2016 の IBL)

track dE/dx は個々の good cluster の平均値で定義。  
good cluster は geometrical に正しく charge を収集  
出来ているであろう cluster. (確率 91%)

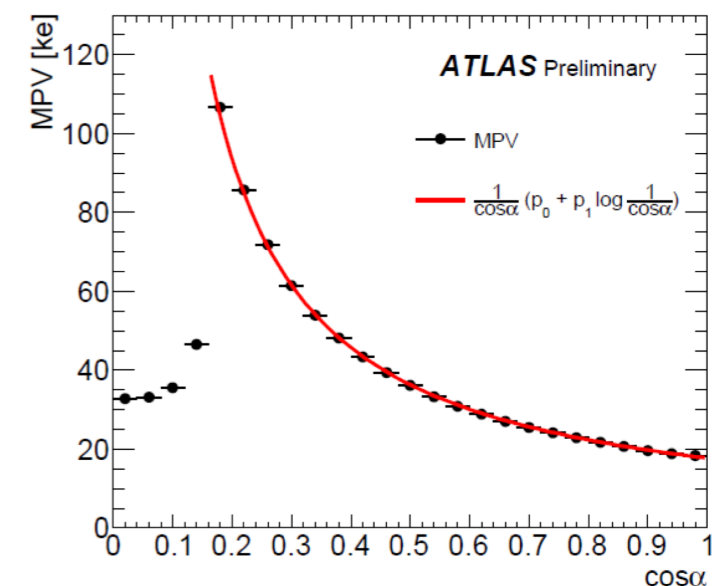
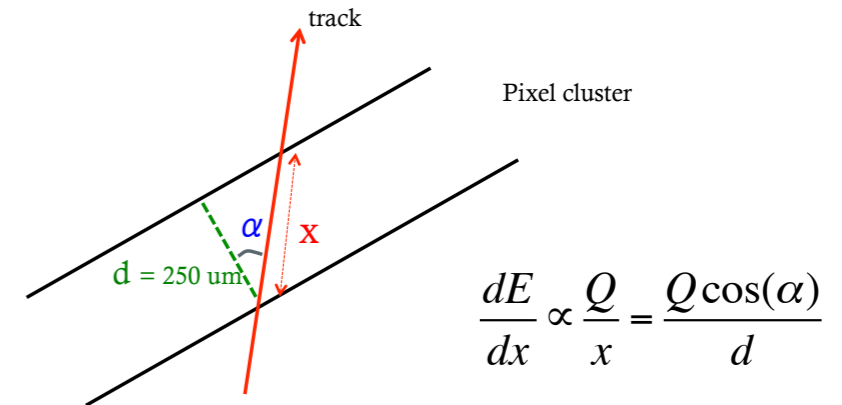
local coordinate と  $\cos(\alpha)$  に制限. (前者がメイン)

通常の track dE/dx を計算するときは Landau のテール  
を除くために highest charge cluster を除外して平均値  
を計算する. (truncated mean)

## ToT で charge を測定



## 飛跡方向から層を通過した距離を算出





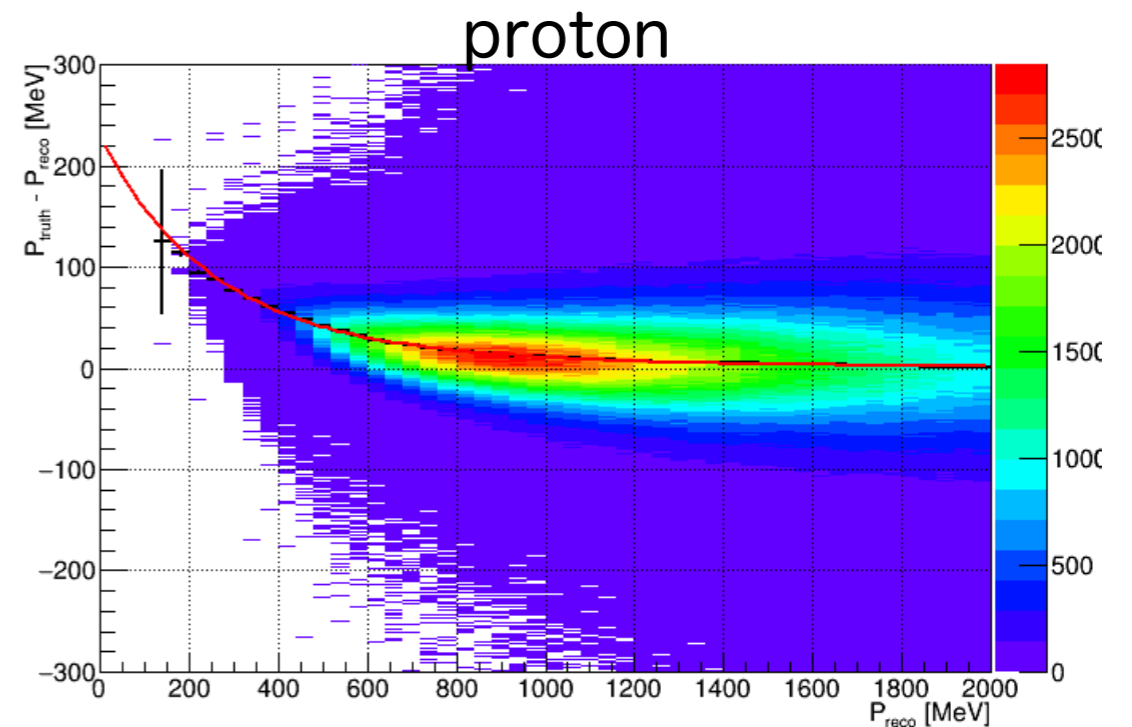
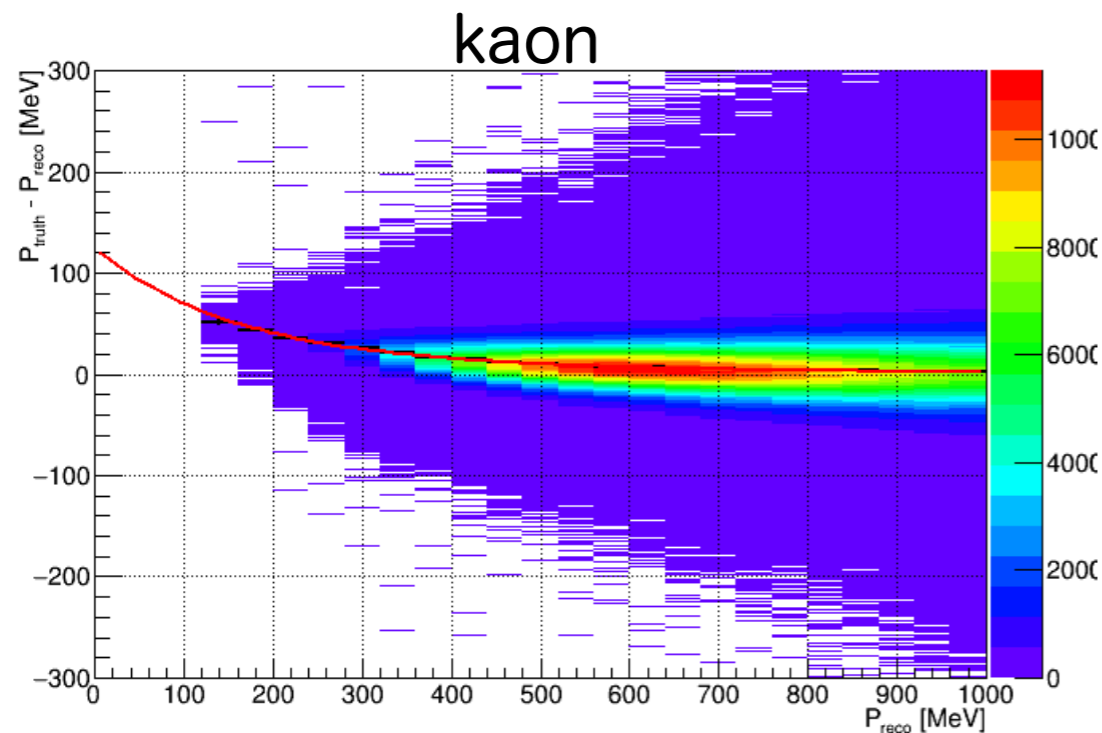
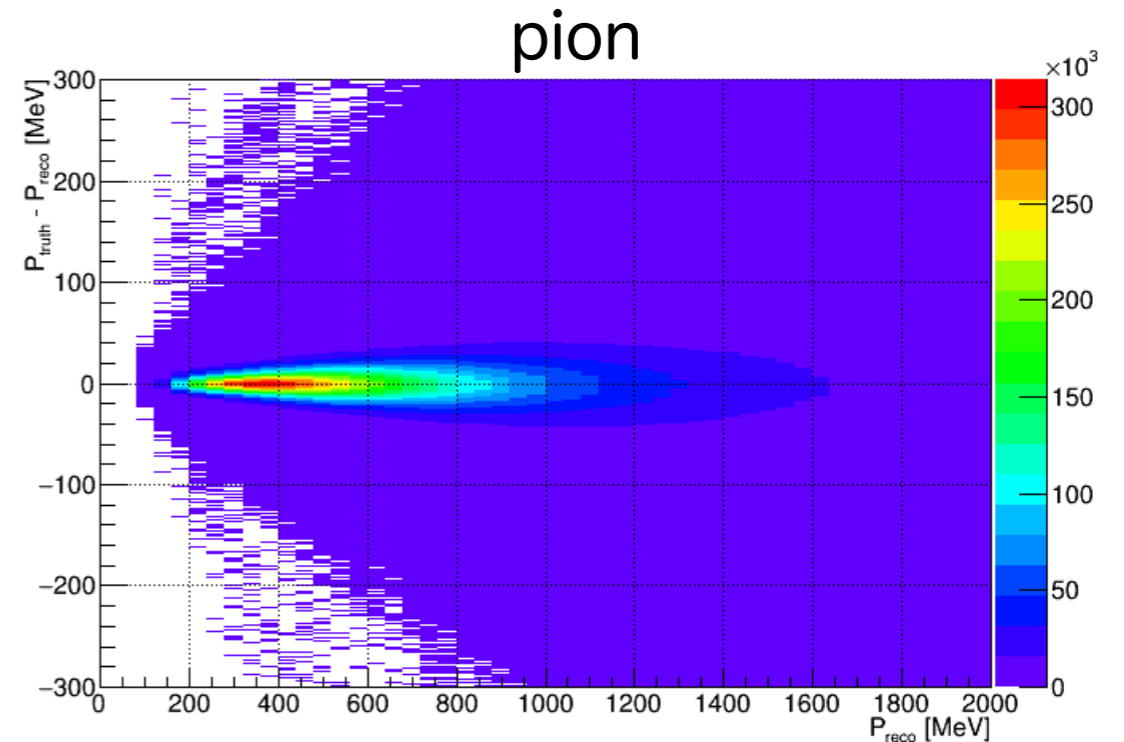
# Bias @ Low Momentum Region

$$f(p_{rec}) = Ae^{-Bp_{rec} - Cp_{rec}^2}$$

	A	B	C
kaon	$1.242 \times 10^2$	$5.939 \times 10^{-3}$	$-1.934 \times 10^{-6}$
proton	$2.288 \times 10^2$	$3.798 \times 10^{-3}$	$-7.378 \times 10^{-7}$

ref :

	A [MeV]	B [MeV <sup>-1</sup> ]	C [MeV <sup>-2</sup> ]
Kaon	$1.418 \cdot 10^2$	$6.352 \cdot 10^{-3}$	$-1.804 \cdot 10^{-6}$
Proton	$3.592 \cdot 10^2$	$5.201 \cdot 10^{-3}$	$-1.562 \cdot 10^{-6}$

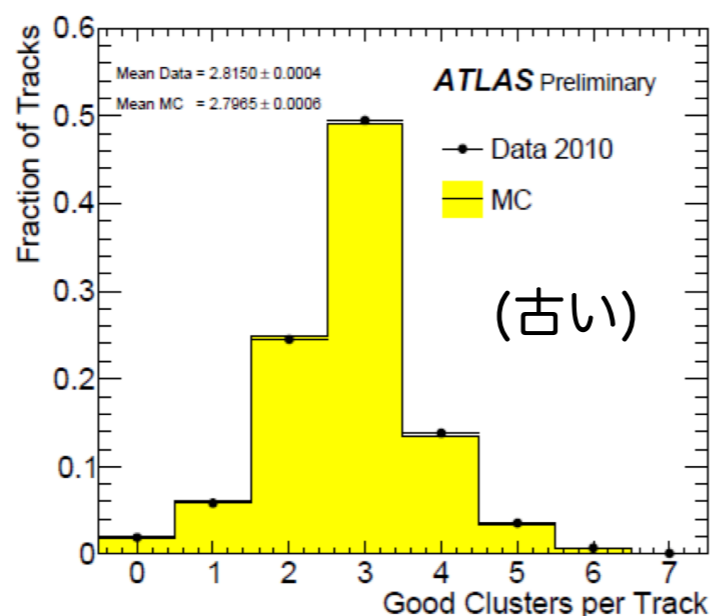
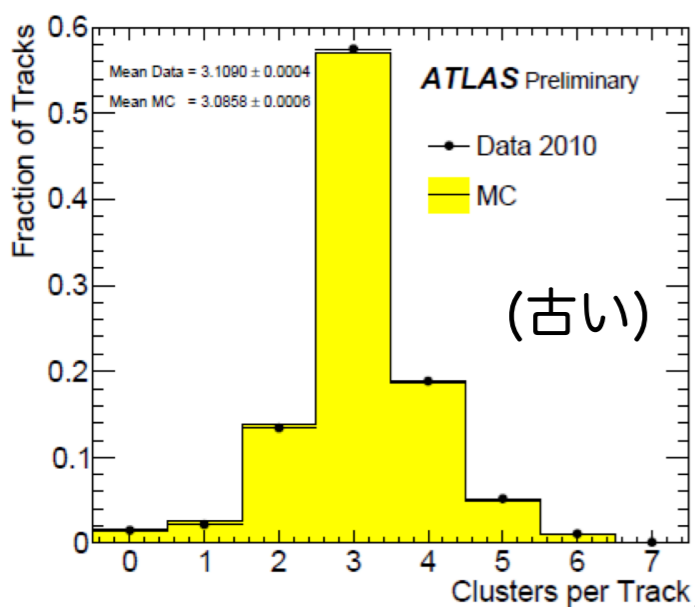


bias の原因は multi-scatter の散乱角を考慮するときに pion を仮定しているため。

# dE/dx Calculation

補正した dE/dx を使って適切な dE/dx 計算方法を模索する. (ToDo)  
 standard track では truncated mean が用いられている.

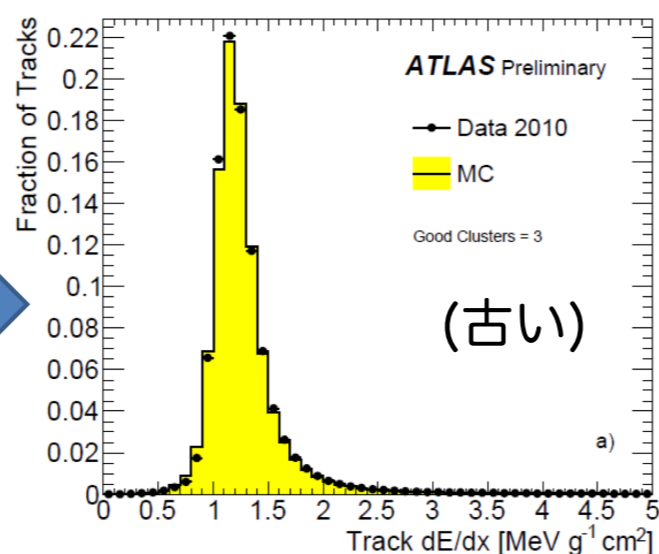
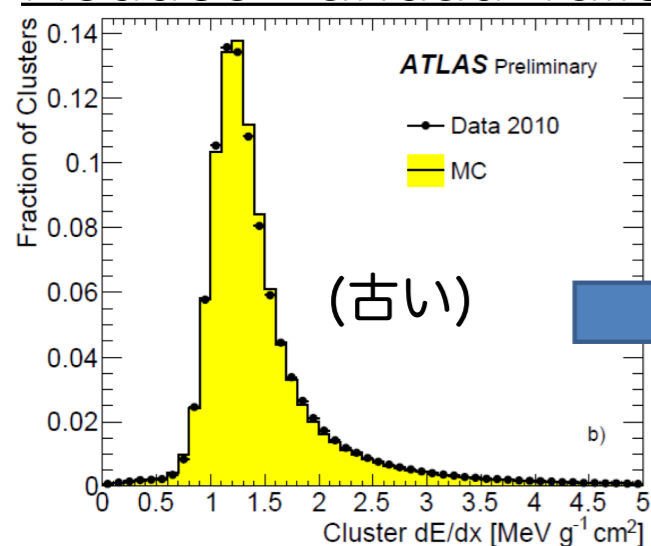
## Distribution of Clusters/Good Clusters



Track dE/dx with IBL Overflow Case

# Good Clusters	Removed Clusters	Truncated dE/dx
1	-	IBL Overflow Value
2	$C_{IBL}$	$C_0$
3,4	if $C_0 > C_{IBL} \rightarrow C_{IBL}$ and $C_0$ if $C_0 < C_{IBL} \rightarrow C_{IBL}$	Average of remaining
$\geq 5$	$C_0$ and $C_{IBL}$	Average of remaining

## Reduce Landau Tails

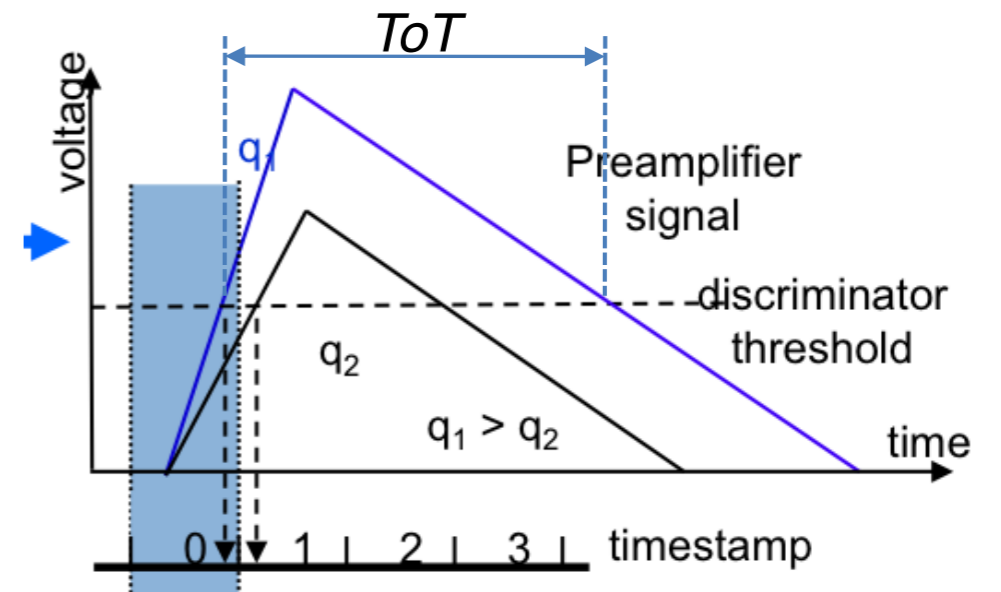


# of Good Clusters	# of GC excluded	Mean (MeV g <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> )	Resolution %
1	0	1.253 ± 0.004	16.2 ± 0.4
2	0	1.169 ± 0.001	13.9 ± 0.1
3	1	1.202 ± 0.001	10.9 ± 0.1
4	1	1.230 ± 0.001	10.1 ± 0.1
$\geq 5$	2	1.256 ± 0.001	9.5 ± 0.1

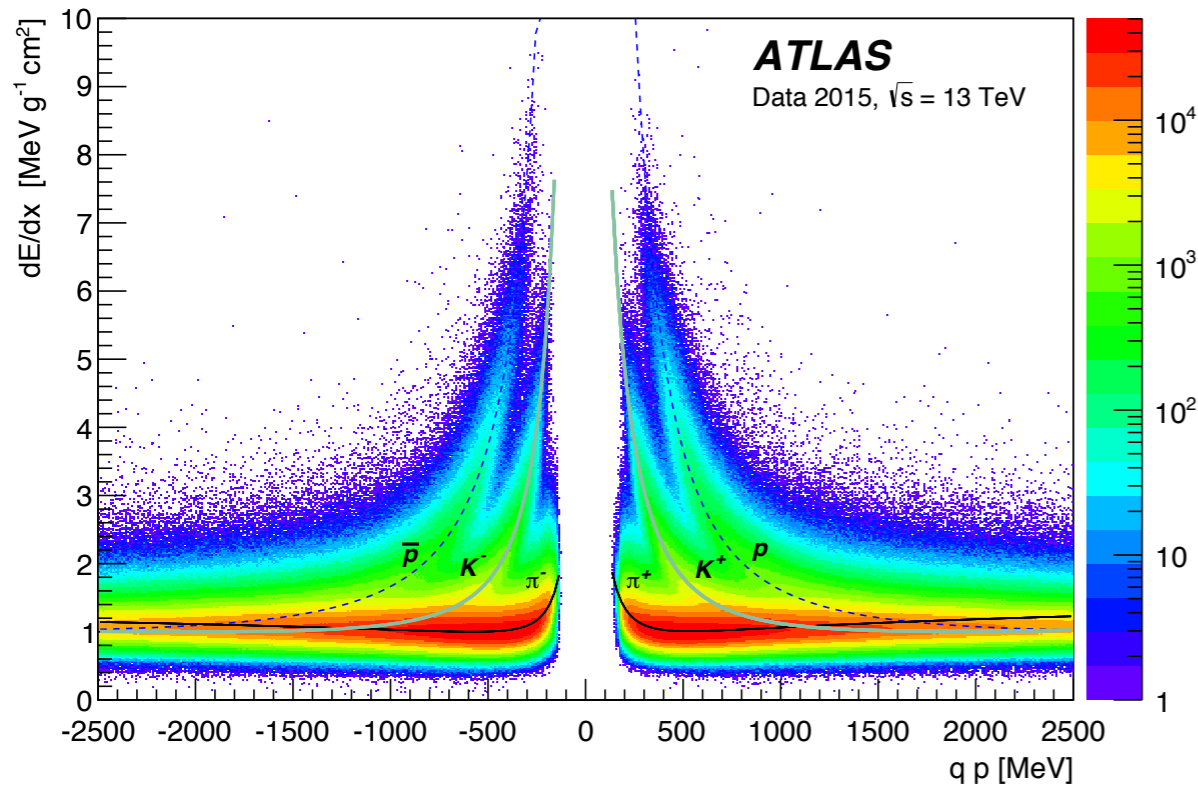
# dE/dx @ Pixel Detector

Pixel 検出器では ToT を使って cluster charge を見積もっている。ToT と飛跡情報から、飛跡に付随する 1 つ 1 つの cluster に対し、dE/dx を計算できる。

ToT で損失エネルギーを測定



Pixel 検出器の dE/dx を使った粒子識別



$$(dE/dx)_{MPV}(\beta\gamma) = \frac{p_1}{\beta p^3} \ln(1 + [p_2 \beta \gamma]^{p_5}) - p_4$$

飛跡方向から層を通過した距離を算出

