

LHC-ATLAS実験における低運動量 π^{\pm} を用いた 消失飛跡探索改善手法

早稲田大学 修士1年 鶴田 亮

概要

1. 導入
2. モチベーション
3. 信号事象の分布確認
4. ΔR & 3次元距離 matching
5. まとめ・今後

LHC/ATLAS検出器

- 欧州原子核研究機構(CERN)
 - 世界最大の陽子・陽子衝突型加速器(LHC)を用いて素粒子の性質測定・新物理探索を行っている。

運転状況

Run2 (2015-2018) : 重心系エネルギー 13 TeVで運用
 瞬間ルミノシティ: $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

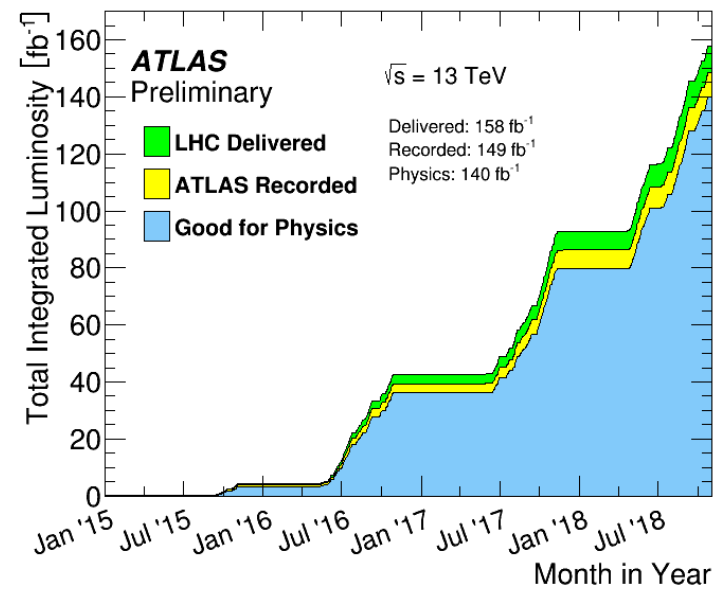
Large Hadron Collider



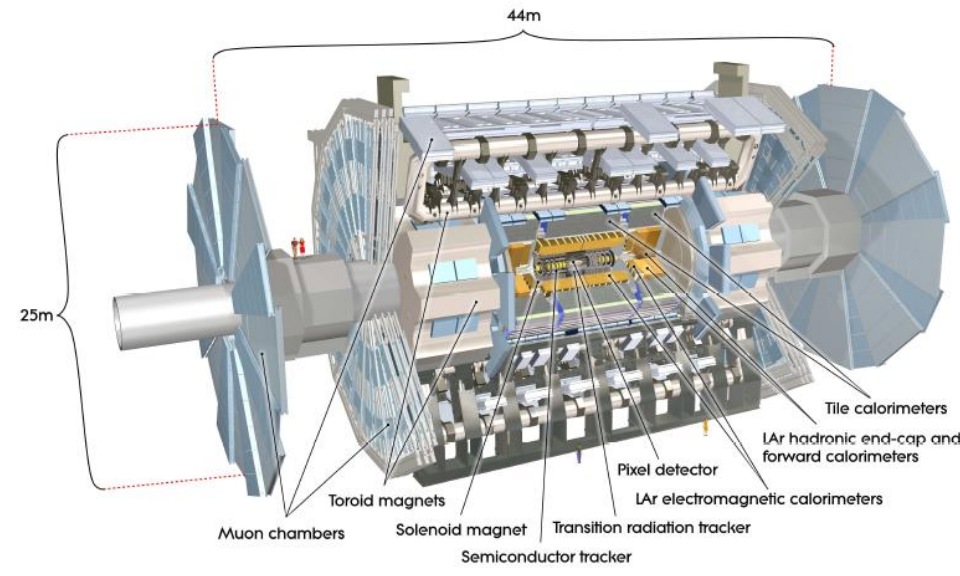
ATLAS検出器の構造

- 内部飛跡検出器
 - 飛跡・電荷測定・衝突点再構成
- カロリメータ
 - エネルギー測定
- ミューオン検出器

Run2積分ルミノシティ

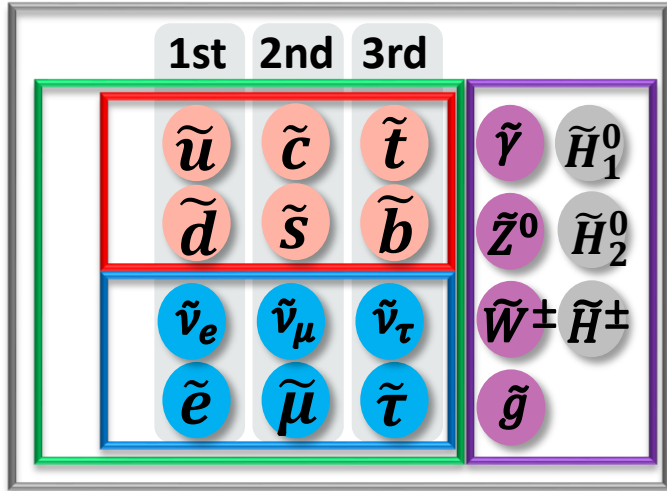
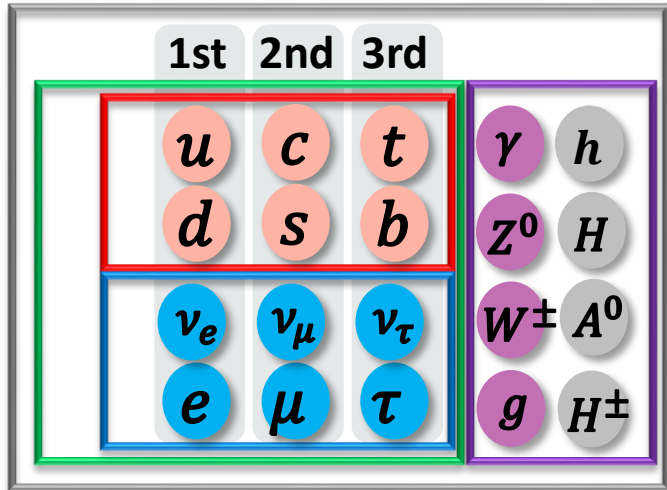


ATLAS検出器



超対称性粒子

スピン 1/2



$$\begin{matrix} \widetilde{W}^\pm & \widetilde{H}^\pm \end{matrix} \Rightarrow \widetilde{\chi}_1^\pm \text{ (Chargino)}$$

$$\begin{matrix} \widetilde{W}^0 & \widetilde{B}^0 \\ \widetilde{H}_1^0 & \widetilde{H}_2^0 \end{matrix} \xrightarrow{\text{mix}} \widetilde{\chi}_1^0 \text{ (Neutralino)}$$

様々なモデルが考えられているが、
モデルによってLSP (Lightest Supersymmetric Particle) となる
粒子が異なる。

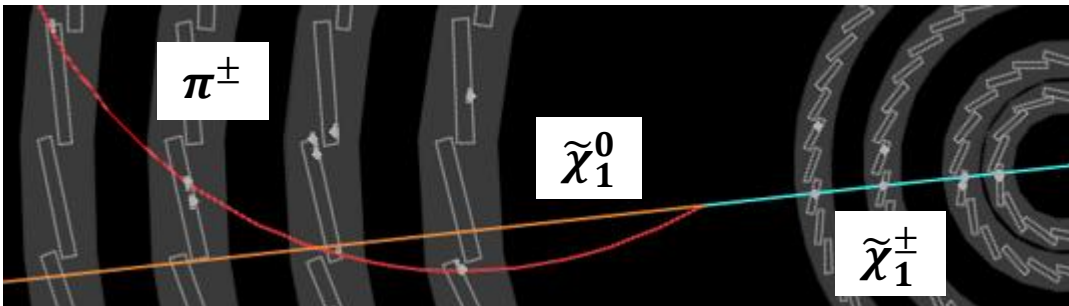
あるモデルでは...

- WinoがLSP
- 混合具合が非常に小さい
($\widetilde{\chi}_1^\pm$ は pure \widetilde{W}^\pm , $\widetilde{\chi}_1^0$ は pure \widetilde{W}^0)
➡ $\widetilde{\chi}_1^\pm$ と $\widetilde{\chi}_1^0$ の質量が縮退!
- 崩壊幅が短くなる. (Δm の3乗で効いてくる)
➡ $\widetilde{\chi}_1^\pm$ が長寿命!

消失飛跡(Disappearing track)

SCT検出器

IBL/Pixel検出器



長寿命 $\tilde{\chi}_1^\pm$ が検出器に飛跡を残す.

Disappearing track とは...

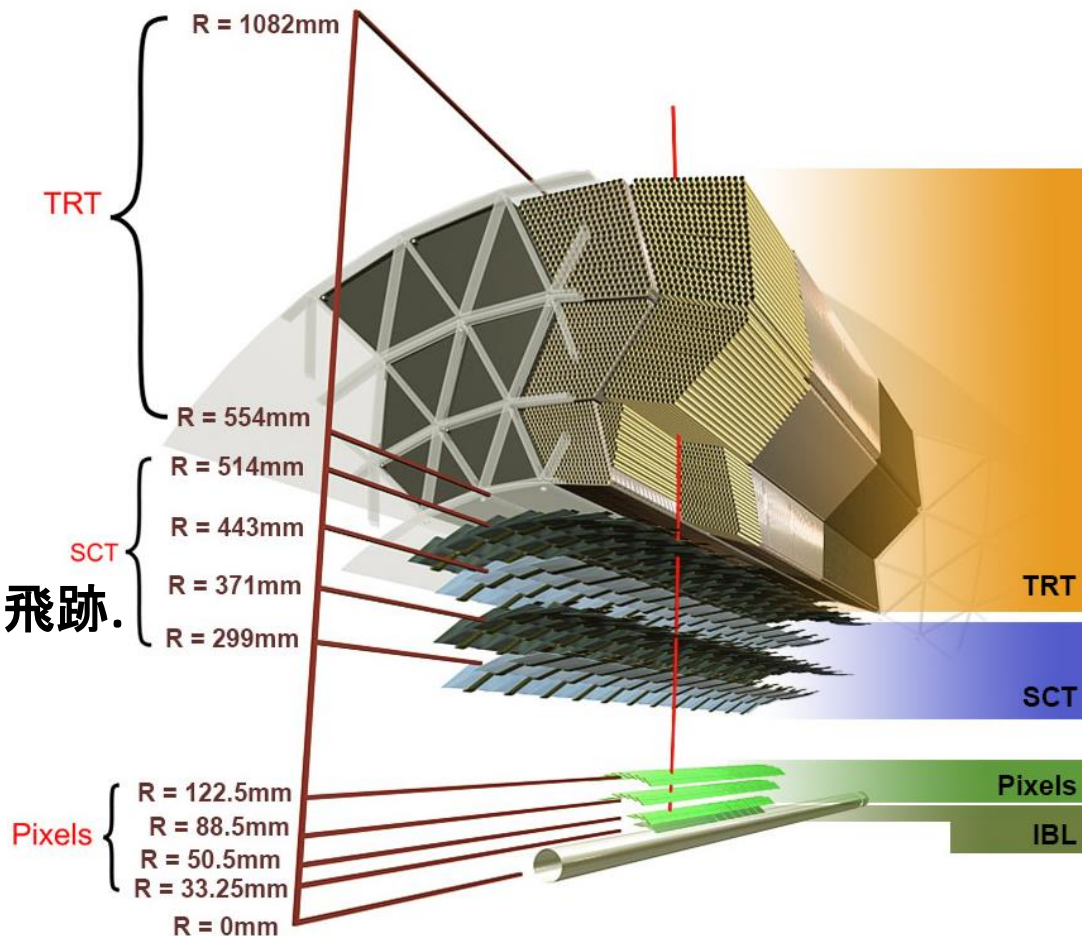
π^\pm が非常にsoftである為に、飛跡が途中で消えた様に見える飛跡.
飛跡の長さ $\sim o(10cm)$.

例

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \pi^\pm$$

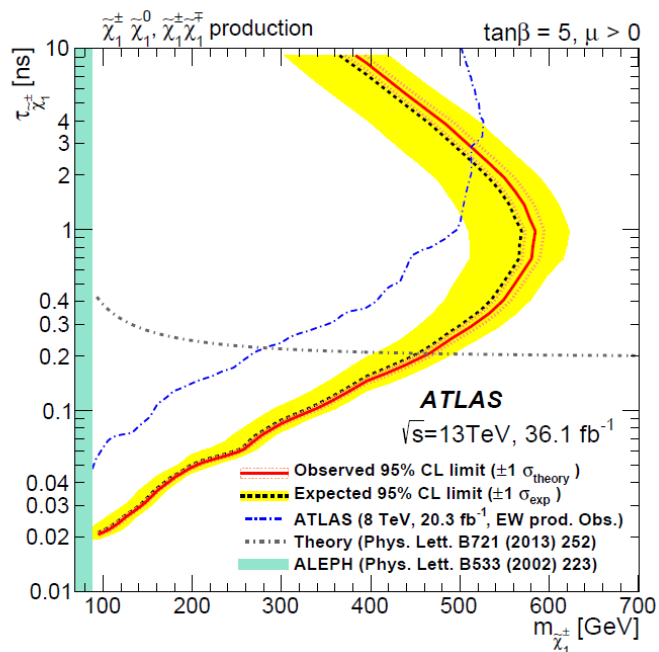
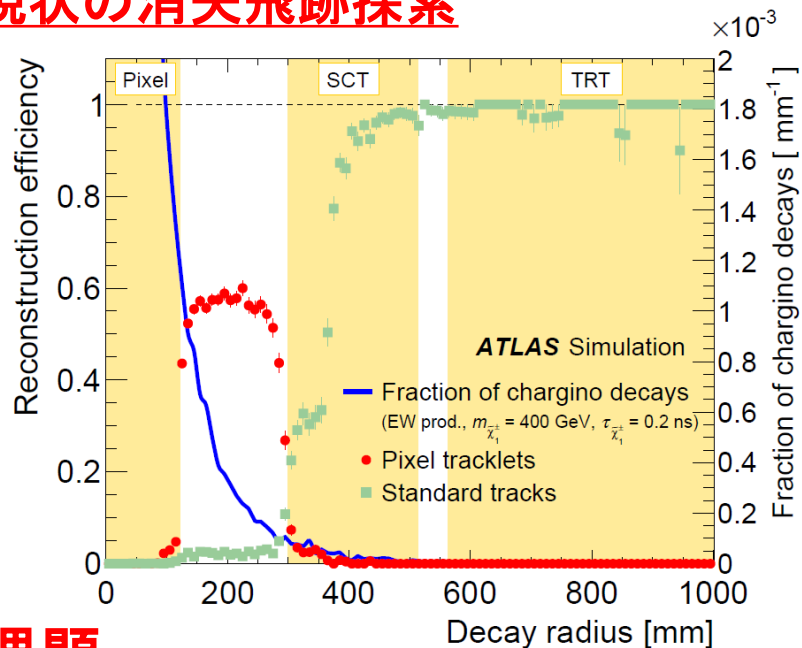
$p_T = 180\text{MeV}$
曲率半径: $R \sim \frac{p_T}{0.3B} = 300\text{mm}$

大きな消失横運動量(E_T^{miss})



研究動機

現状の消失飛跡探索



Wino由来の $\tilde{\chi}_1^\pm$
 $\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) \sim 160$ MeV
 $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} \sim 0.2$ ns

Higgsino由来の $\tilde{\chi}_1^\pm$
 $\Delta m(\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0) \sim 300$ MeV
 $\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} \sim 0.04$ ns

短い飛跡まで扱うことが重要

課題

ヒットの組み合わせが増える \Rightarrow fakeが増加

飛跡のパターン	BG reduction
4層(現状の解析に使用)	4×10^{-5}
3層	2×10^{-3}
2層	9×10^{-3}

より短い飛跡を使って解析を行うには、他の情報を用いてfake事象を取り除く必要がある。

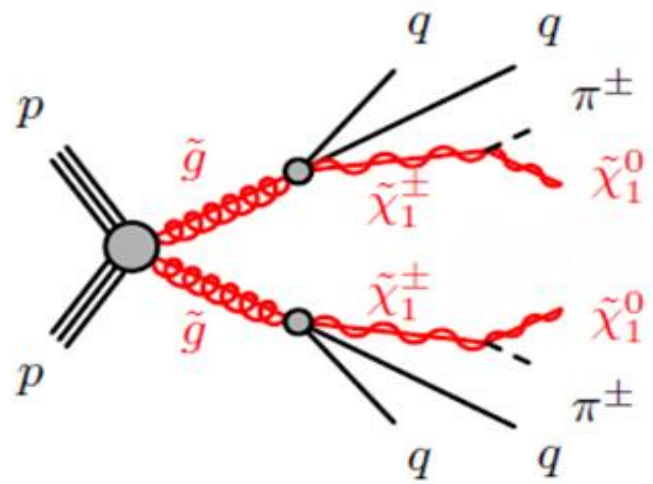
\Rightarrow 低運動量 π^\pm の再構成によるFake事象の除去。

まずはTruthレベルで低運動量 π^\pm の振る舞いを理解することが重要。

信号事象

使用したsample

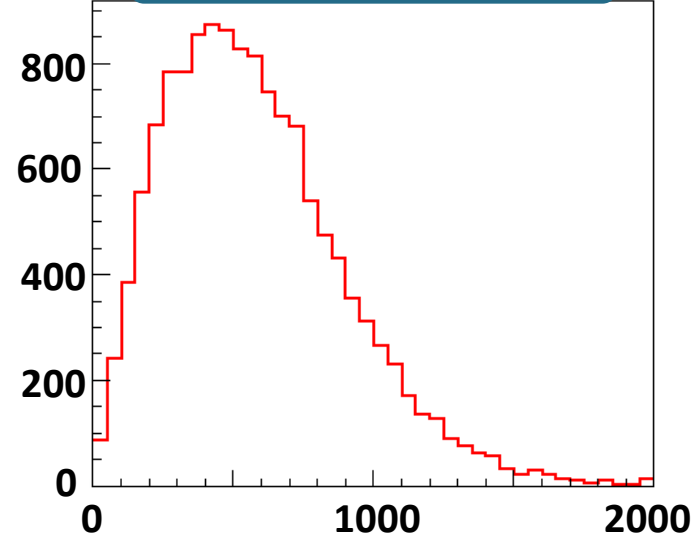
\tilde{g} の質量 : 1800 GeV , $\tilde{\chi}_1^0$ の質量 : 800 GeV
 イベント数 : 10000
 パイルアップ無し



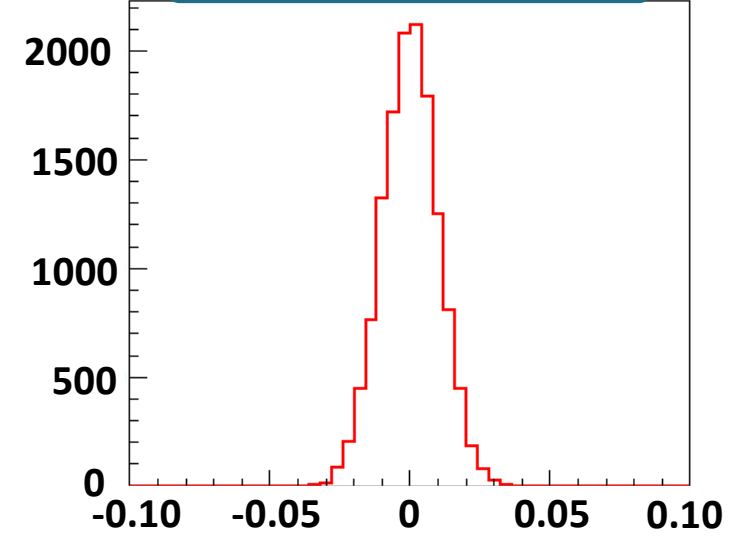
特徴

- High $p_T \tilde{\chi}_1^\pm$, Low $p_T \pi^\pm$
- Small $d_0 \tilde{\chi}_1^\pm$, Large $d_0 \pi^\pm$
- Large E_T^{miss}
- 4 jets

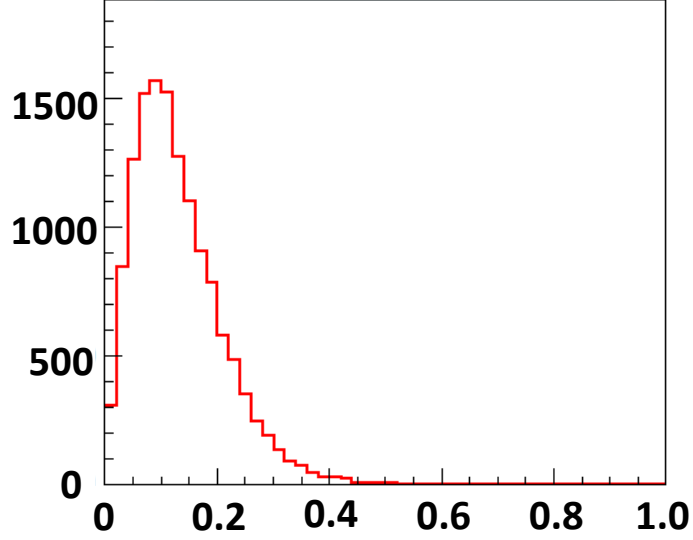
$\tilde{\chi}_1^\pm p_T [\text{GeV}]$



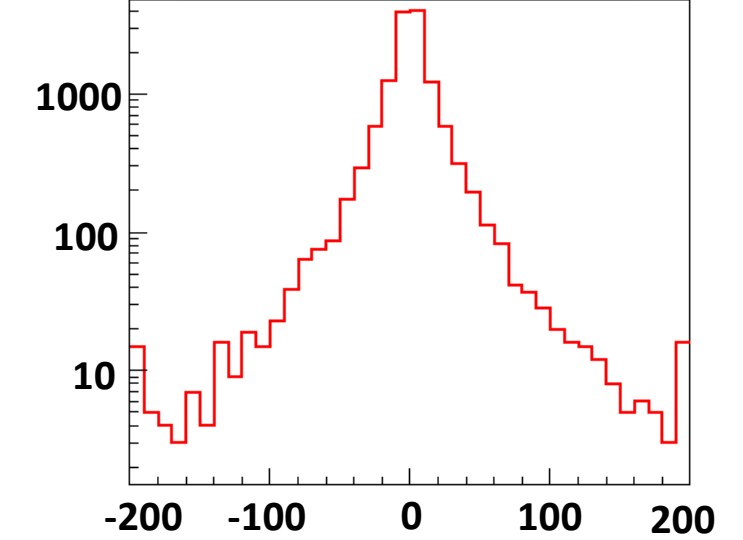
$\tilde{\chi}_1^\pm d_0 [\text{mm}]$



$\pi^\pm p_T [\text{GeV}]$



$\pi^\pm d_0 [\text{mm}]$

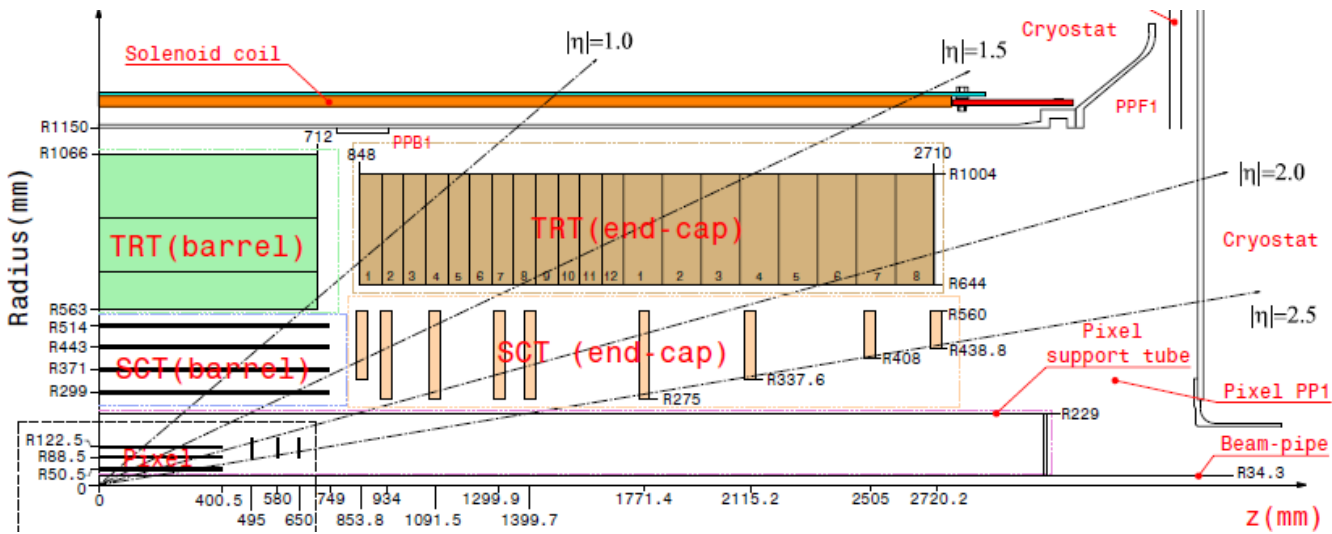


Soft Pion Cluster Hits

低運動量 π^\pm はどのようなクラスター情報を残すか。

➡ Truth情報を元にしたクラスターヒットを見る。

P ... Pixel S ... SCT B ... Barrel E ... End-cap



Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 > 50mm

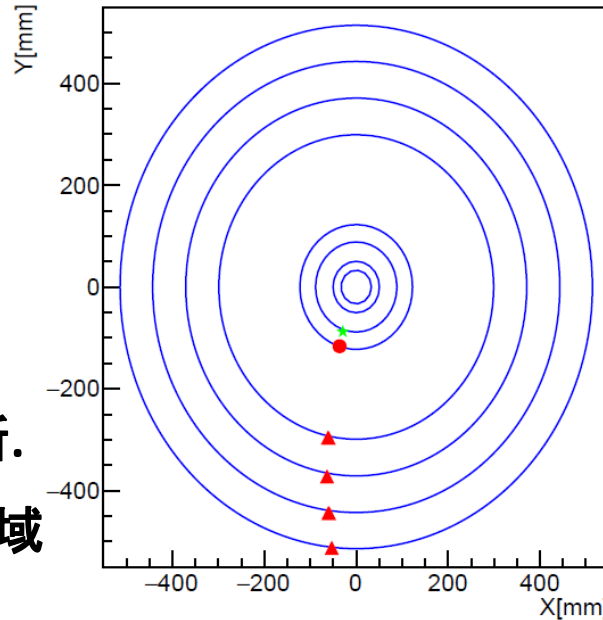
Truth $\pi^\pm p_T > 100\text{MeV}$ でみたヒットの割合

PB	PE	SB	SE	[%]
○		○	○	19
○		○		40
○				6.7
その他				35

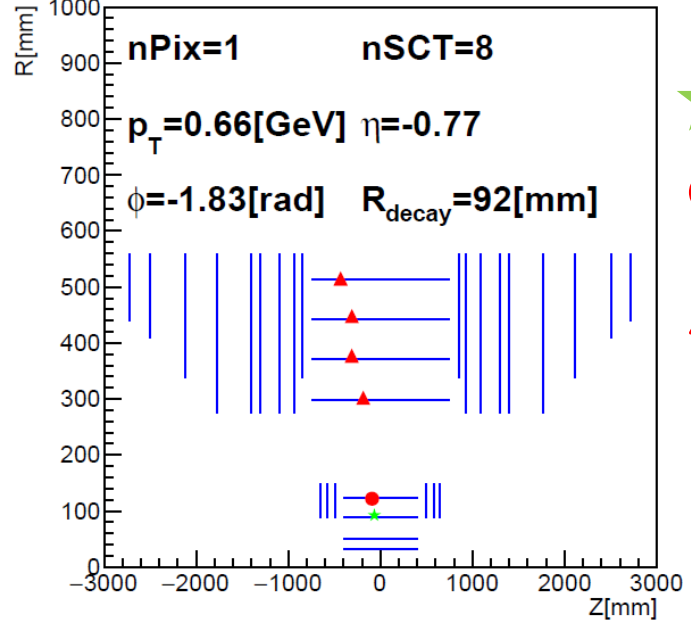
BarrelとEnd-capはClusterのz座標で判断。

Pixelだけ見れば、**半数(65%)**はBarrel領域にのみヒットを残している。

X-Y平面



Z-R平面

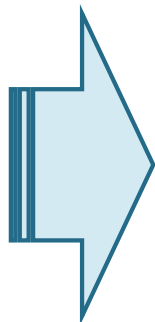


- ★ $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊点
- π^\pm ヒット (Pixel)
- ▲ π^\pm ヒット (SCT)

飛跡再構成

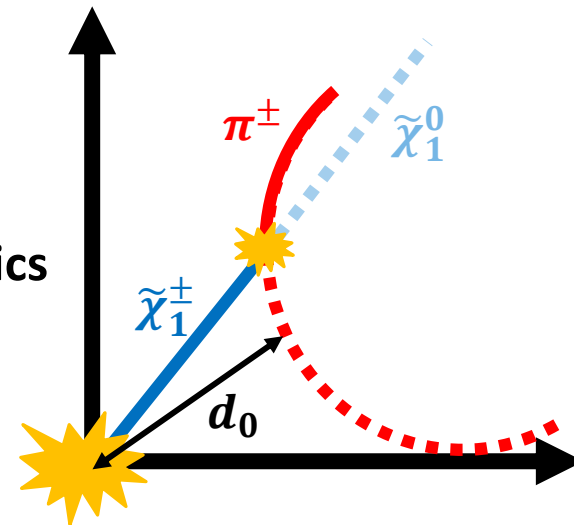
通常のATLAS飛跡再構成方法

- $p_T > 500\text{MeV}$
- $|d_0| < 10\text{mm}$

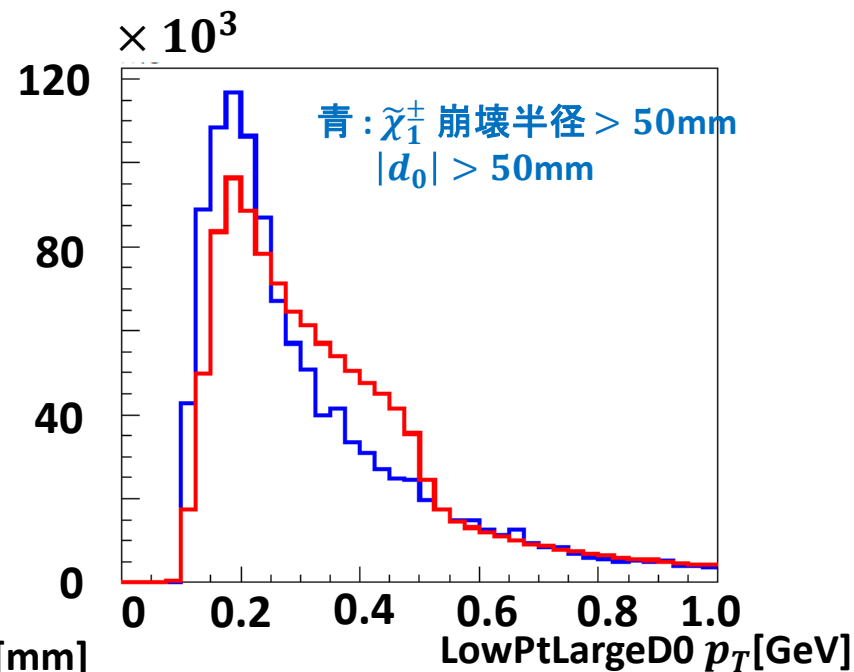
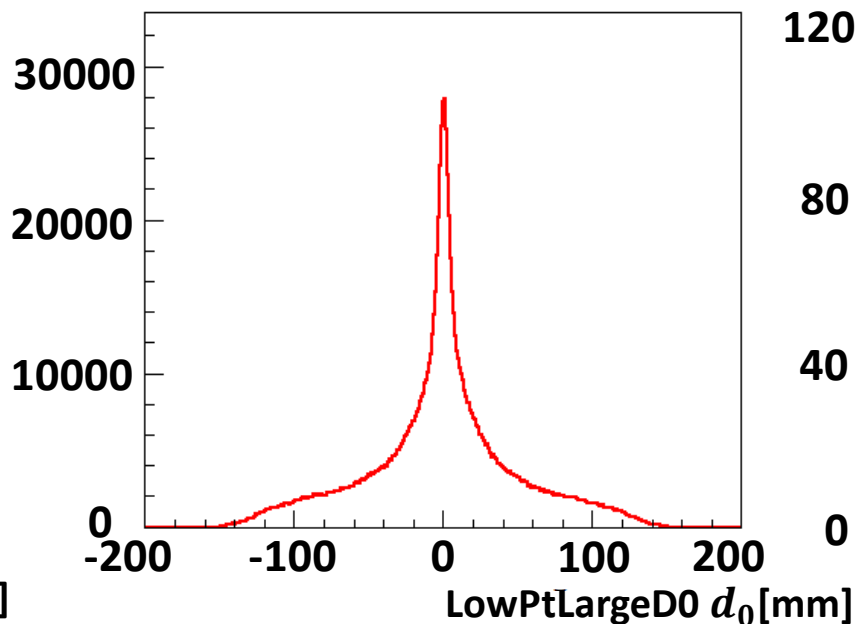
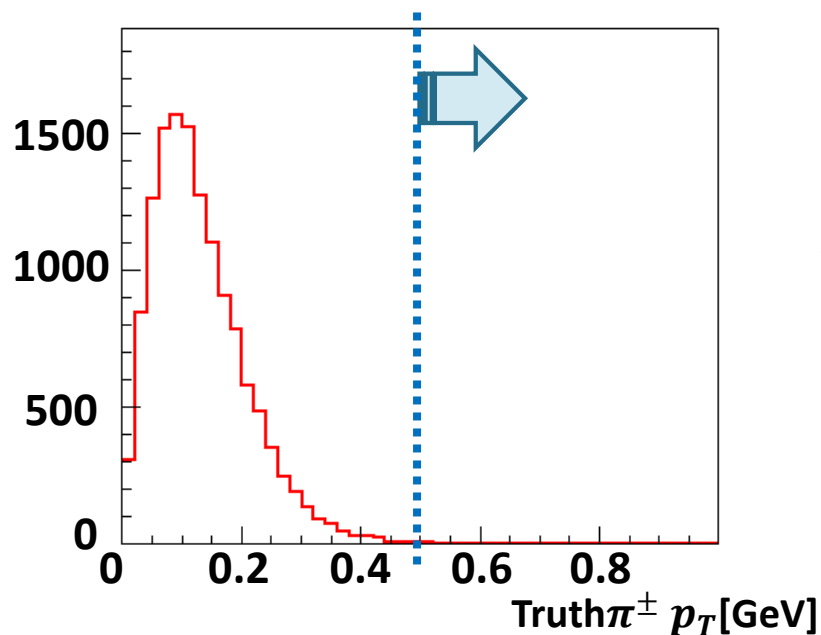


今回使用する LowPtLargeD0 Tracking

- $p_T > 100\text{MeV}$
 - $|d_0| < 300\text{mm}$
- } Soft pionのkinematicsに適している.



実際にATLASで利用する場合、リソースの問題により全領域でLowPtLargeD0 trackingを走らせるのは困難だが、消失飛跡周りに限定すれば可能.



ΔR matching

再構成されたトラックとtruth π^\pm のmatchingをとりたい。

Pre-selection

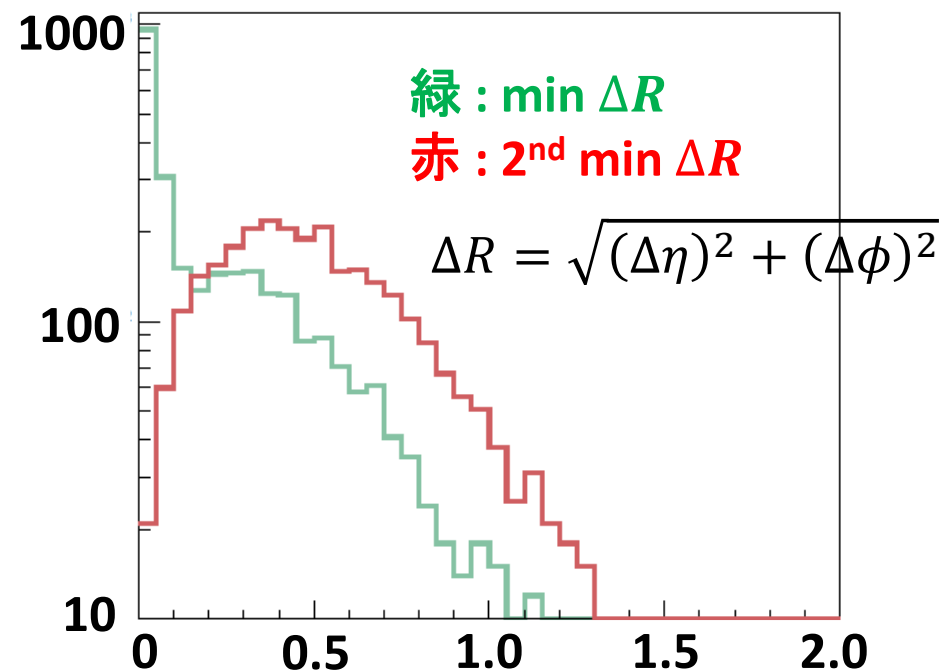
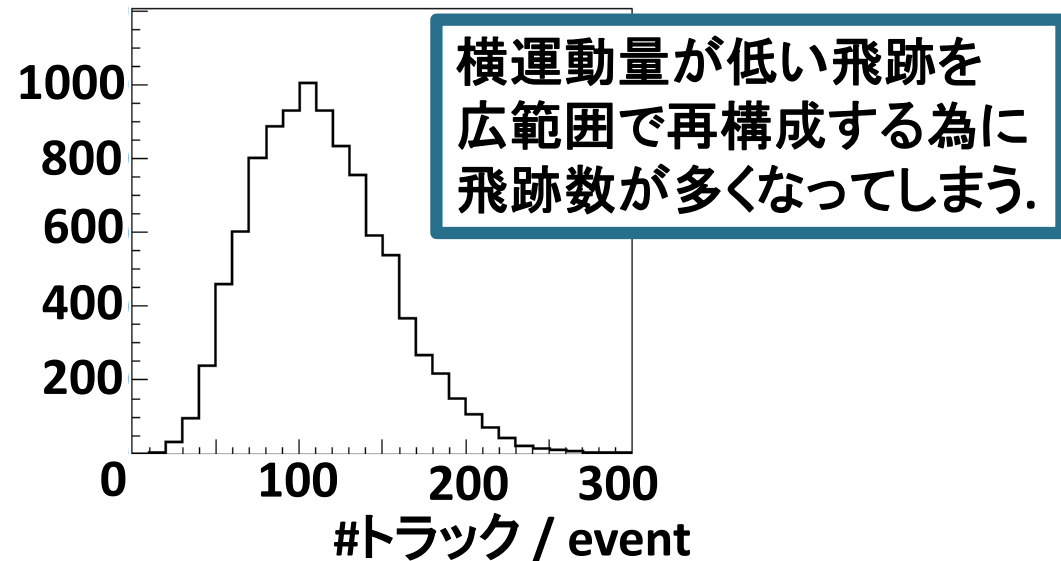
興味のあるphase spaceをみる為のカット

- $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 $> 50\text{mm}$
pixel 2層目より手前で崩壊した場合は飛跡を引けない。
- truth $\pi^\pm p_T > 100\text{ MeV}$
LowPtLargeD0 trackingの下限値に揃える。

Truthとのmatchingをとる為のカット(accidental matchingを防ぐ)

- $100\text{MeV} < \text{offline } p_T < 1\text{GeV}$
非物理的な飛跡を除く。
- 電荷が一致
今回はTruth情報を持っているのでTruth π^\pm とLowPtLargeD0 track の電荷が同じであることを要求。

ΔR が十分近い所に飛跡が集中している。



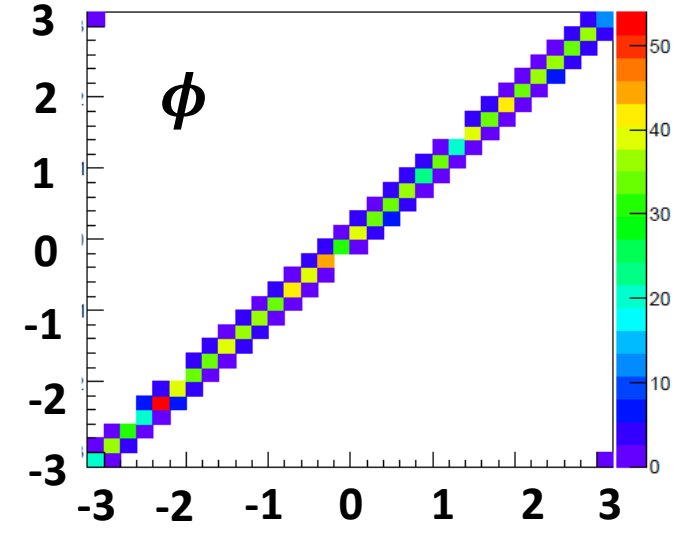
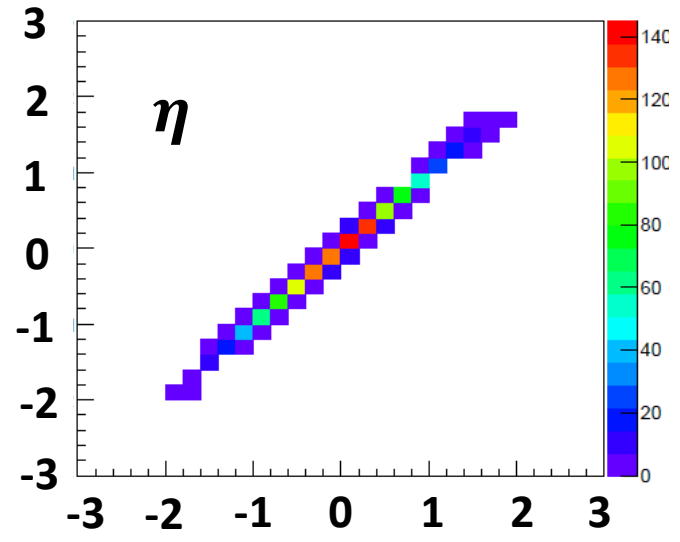
ΔR matching 後の分布

正しくmatchingがとれているか確認.

条件: **minimum $\Delta R < 0.1$**
におけるTruthとOfflineの違いをみる.

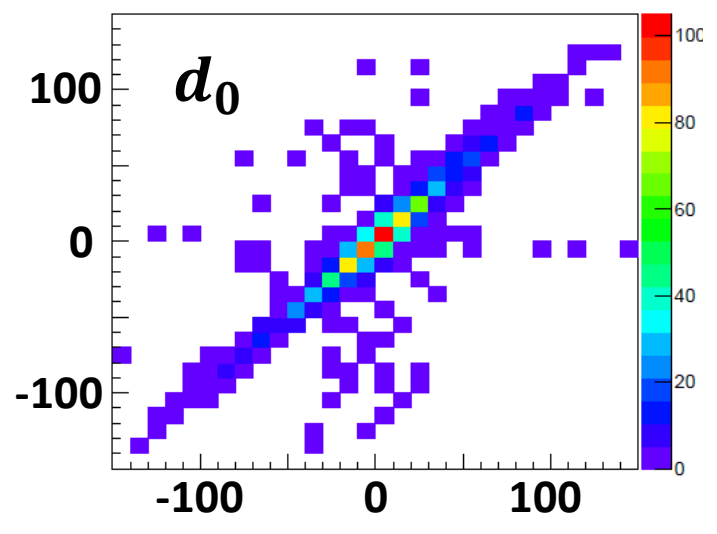
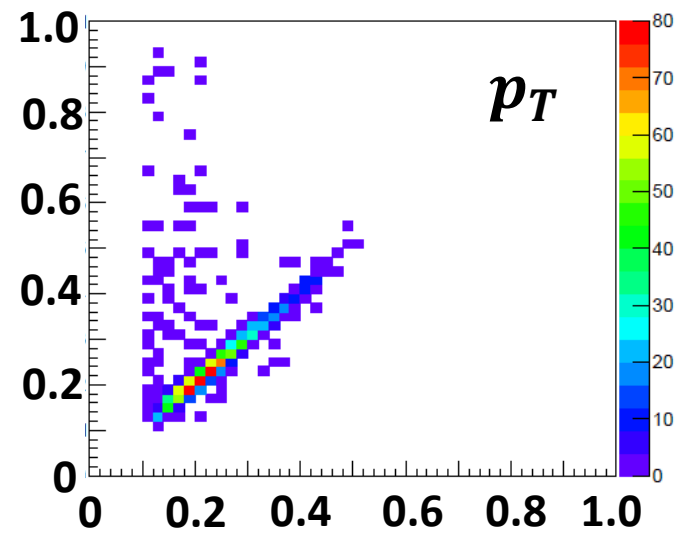
方向に関する分布: η, ϕ

➡ Truthとofflineでよく一致している.



それ以外の分布: p_T, d_0

➡ Truthとofflineで大きくずれることがある.



ΔR (方向の情報)のみではAccidental
matchする可能性がある.

3次元空間の距離(d_{3D})

Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ と offline π^\pm の3次元距離を考える。(右図における青点と赤曲線の距離)

π^\pm がXY平面でみた時に円軌道で動くと仮定。

ある時刻 t における π^\pm の x, y, z 座標.(PVとの最近接点を $t = 0$ での位置とする)

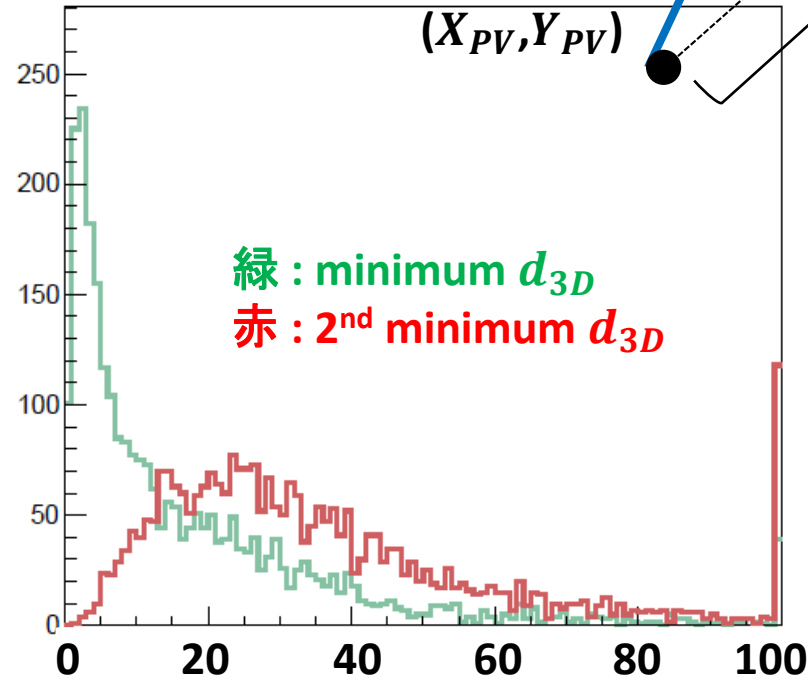
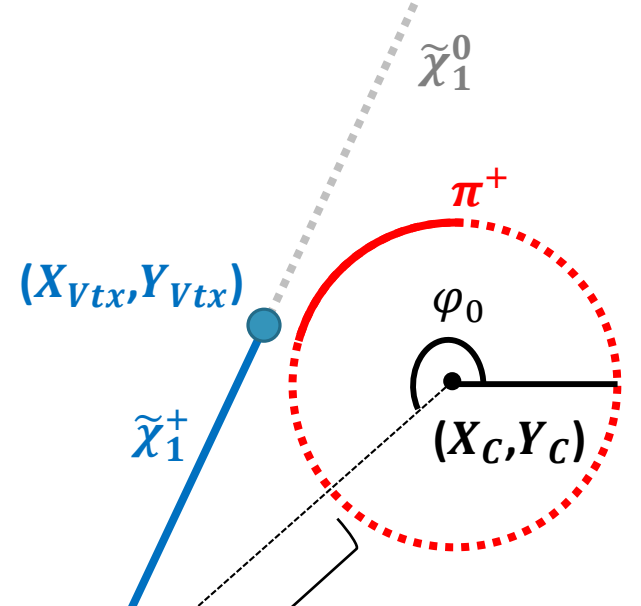
$$(X_\pi, Y_\pi, Z_\pi) = (X_C + R \cdot \cos \varphi(t), Y_C + R \cdot \sin \varphi(t), z_0 + v_z \cdot t)$$

$$\begin{aligned} \text{距離 } d_{3D}^2 = & \{X_C + R \cdot \cos(\pm 2\pi \frac{t}{T} + \varphi_0) - X_{Vtx}\}^2 \\ & + \{Y_C + R \cdot \sin(\pm 2\pi \frac{t}{T} + \varphi_0) - Y_{Vtx}\}^2 \\ & + \{z_0 + v_z \cdot t - Z_{Vtx}\}^2 \end{aligned}$$

$$\text{XY平面で1回転する時間 } T = \frac{2\pi R}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}$$

φ_0 : 最初に π^\pm がいる位置の角度。

π^\pm の電荷で符号が分かれる。



緑 : minimum d_{3D}
赤 : 2nd minimum d_{3D}

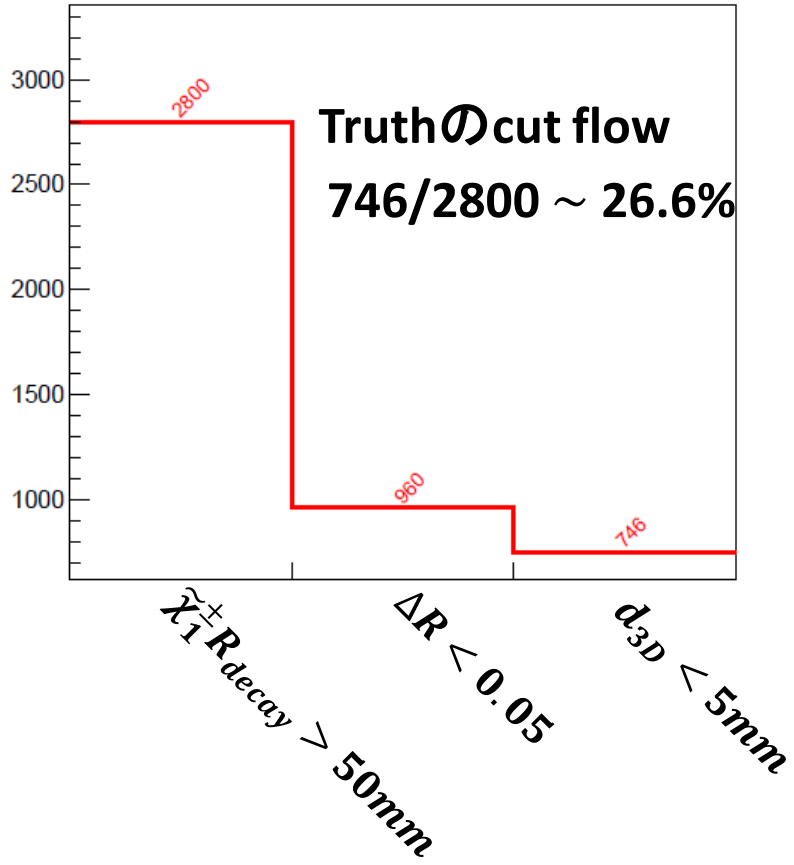
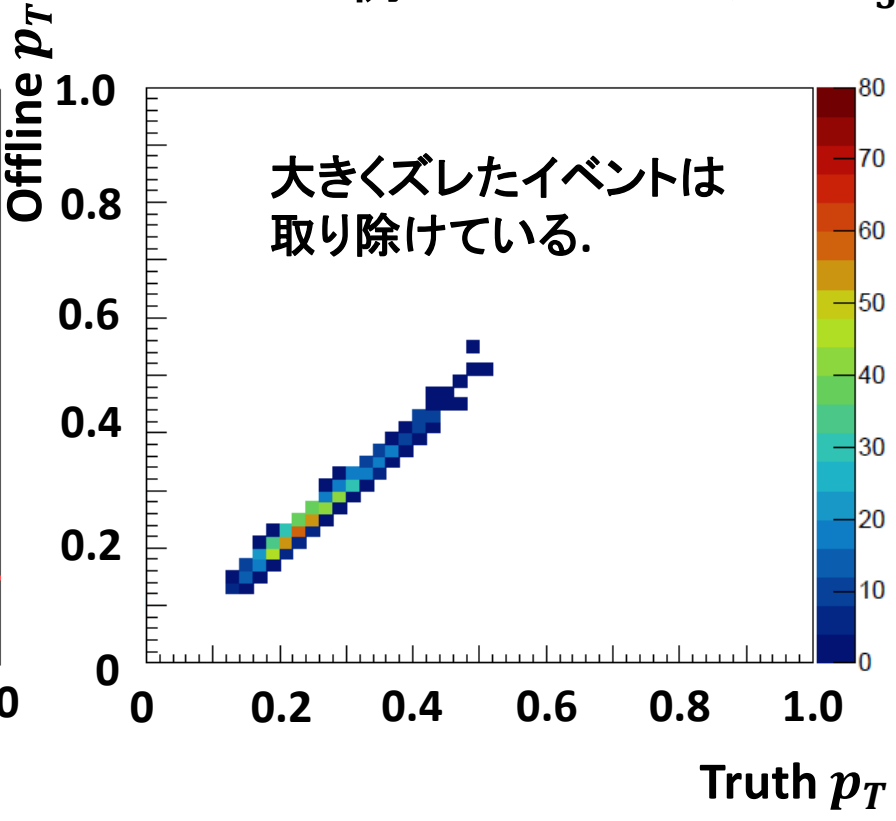
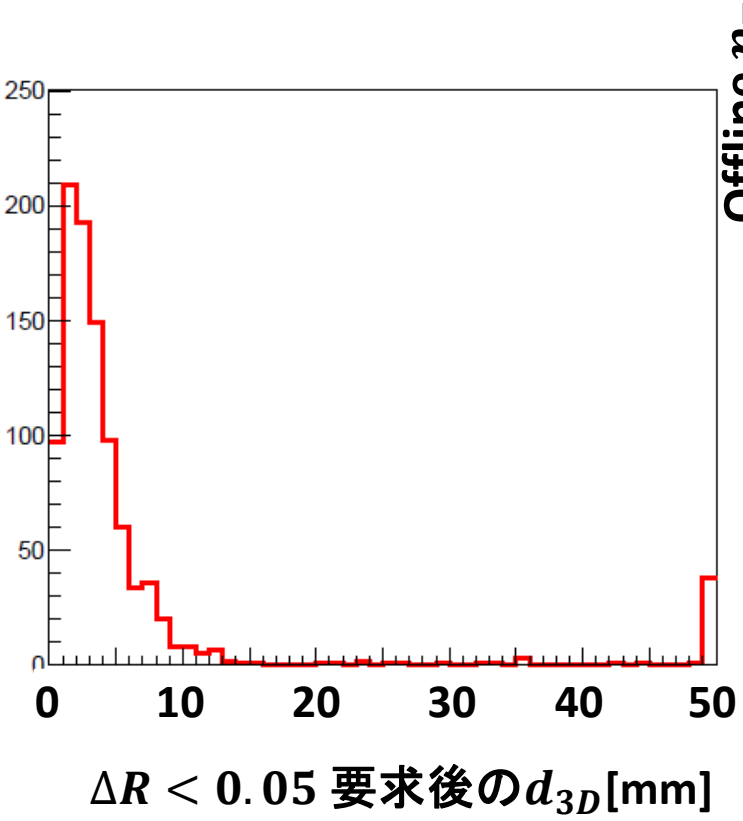
$o(10\text{mm})$ の値になることを確認。

ΔR & d_{3D} による matching

方向・距離ともに近い飛跡を選びたい。

暫定的なカットで matching efficiency を確認。

例： $\Delta R < 0.05$ かつ $d_{3D} < 5mm$



ΔR & d_{3D} の最適化

Efficiencyの定義

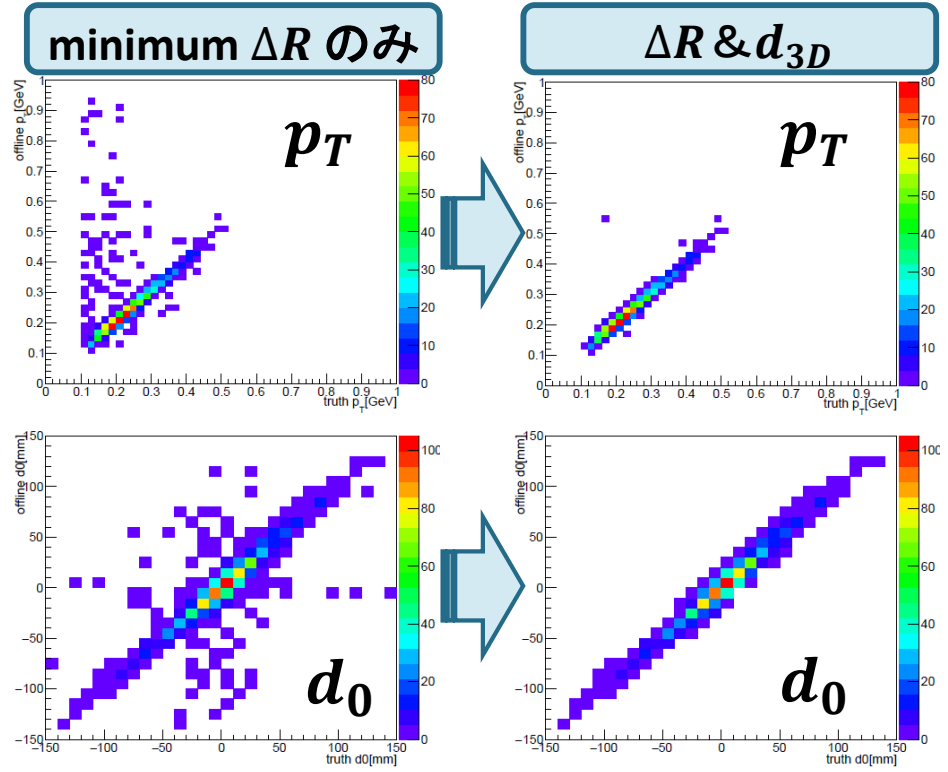
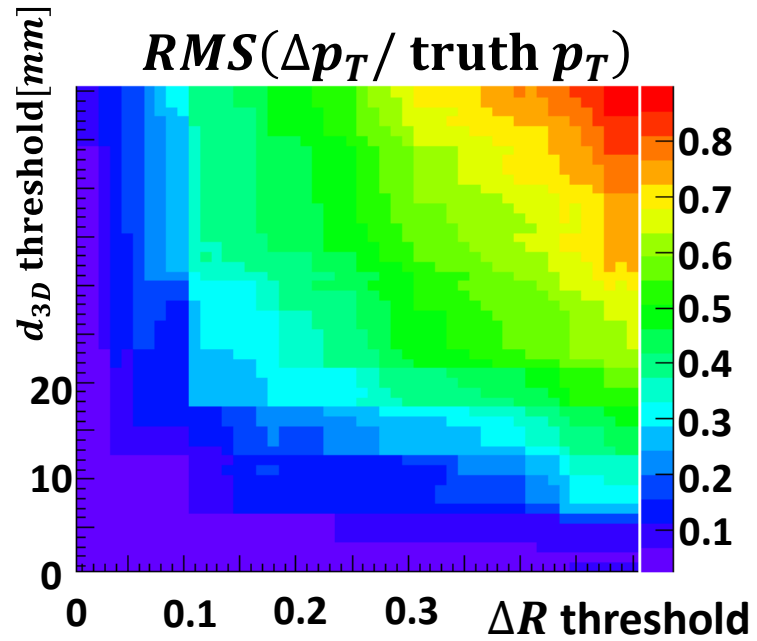
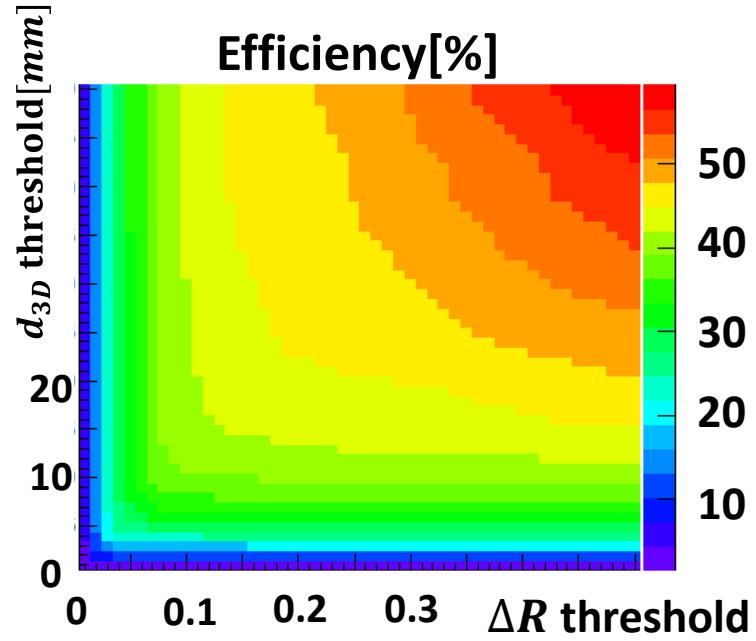
$$\frac{\Delta R \text{ と } 3\text{次元距離の要求をpassしたoffline trackが1本でもいたtruth数}}{\text{base cut後のtruth数}} \times 100 [\%]$$

Base cut
 $\pi^\pm p_T > 100\text{MeV}$
 $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 $> 50\text{mm}$

妥当性の指標としてRMSを使用する。

各 $(\Delta R, d_{3D})$ のカット値をpassした offline track と truth track の $\Delta p_T / \text{truth } p_T$ からRMSを算出。
 $\min(|\Delta p_T / \text{truth } p_T|)$

$RMS(\Delta p_T / \text{truth } p_T) < 0.1$ という条件では
 $(\Delta R, d_{3D}) = (0.1, 15\text{mm})$ でEfficiency41%が最大。



短い飛跡の再構成

短い飛跡として今回は**3-Layer track**を採用する。

3-Layer track : 内側から3層にヒットを残す飛跡

3-Layer trackは90mm以上の飛跡しか再構成できない

➡ 信号事象のphase spaceとして
Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 $> 90\text{mm}$, Truth $\pi^\pm p_T > 100\text{MeV}$ を要請。

この時、**Disappearing track事象の再構成率**の算出を考える。

- $\tilde{\chi}_1^\pm$ 再構成率

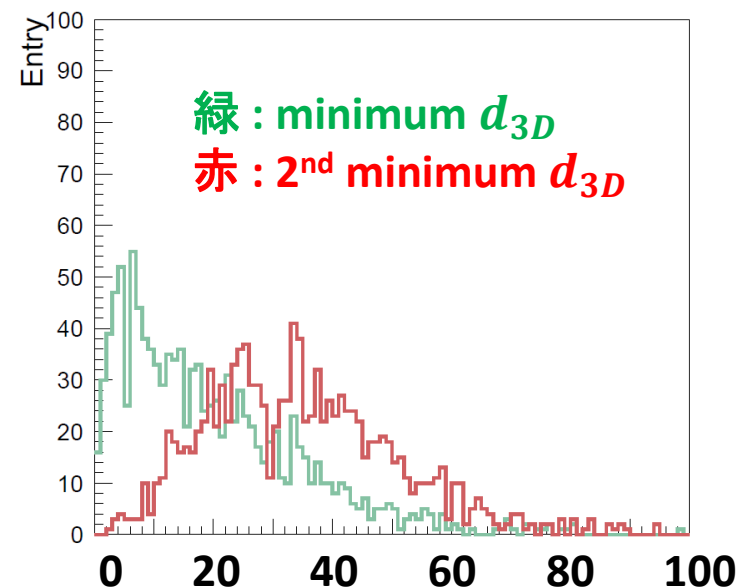
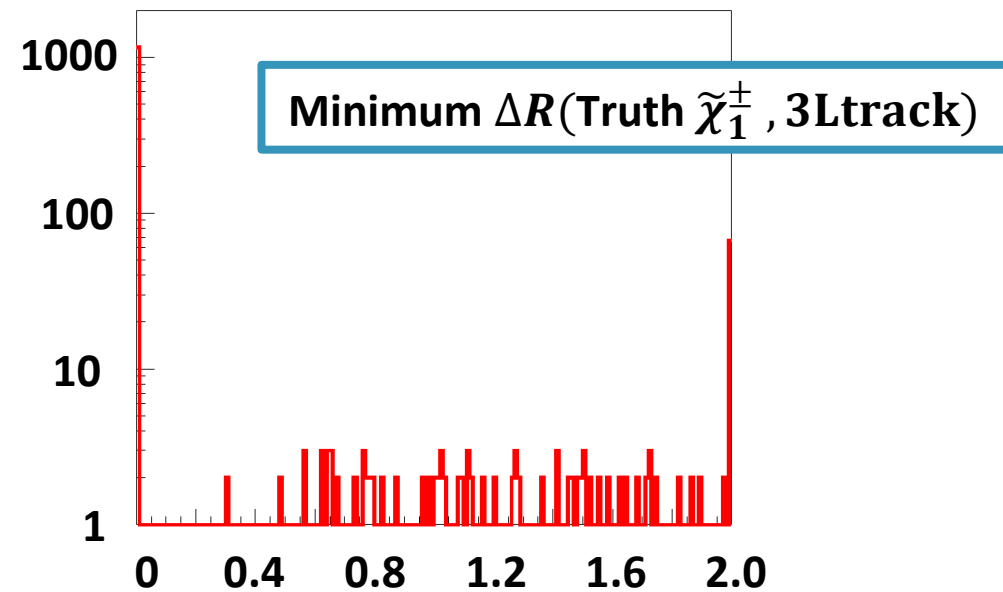
Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ と3-Layer trackの ΔR 分布を確認。

➡ $\Delta R < 0.01$ の要求で**Efficiency 82%**

- 3-Layer track周りにLowPtLargeD0 trackを探す

3-Layer trackとLowPtLargeD0 trackの d_{3D} を確認。

➡ $d_{3D} < 10\text{mm}$ の要求で**Acceptance 33%**



短い飛跡の再構成

短い飛跡として今回は**3-Layer track**を採用する。

3-Layer track : 内側から3層にヒットを残す飛跡

3-Layer trackは90mm以上の飛跡しか再構成できない



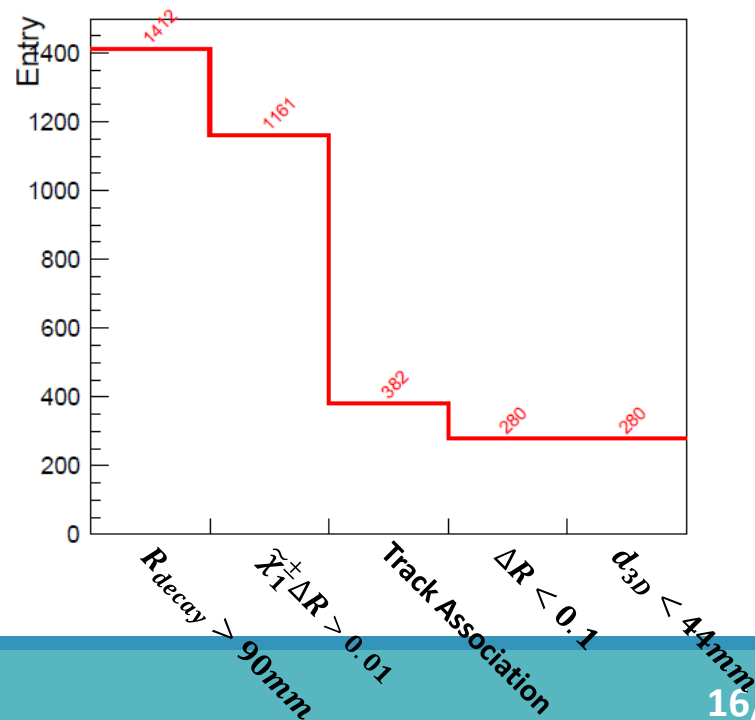
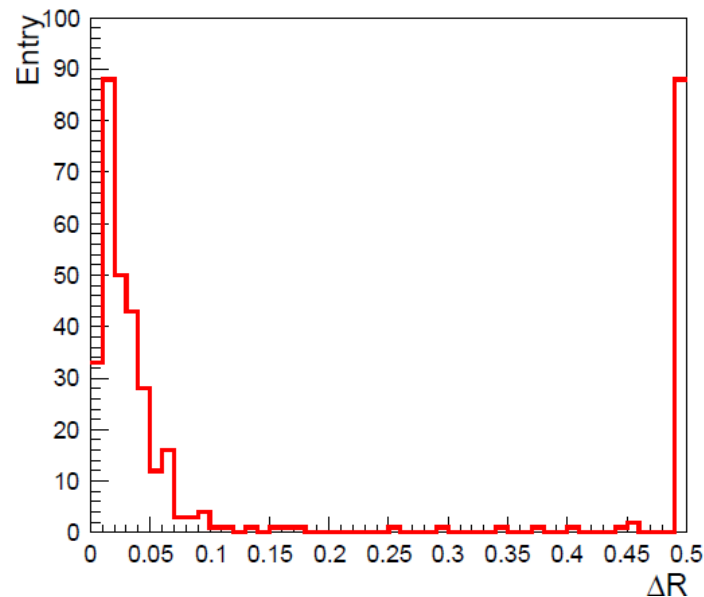
信号事象のphase spaceとして

Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 > 90mm, Truth $\pi^\pm p_T > 100\text{MeV}$ を要請。

この時、**Disappearing track事象の再構成率**の算出を考える。

- 3-Layer trackに付随したLowPtLargeD0 trackが π^\pm 由来だったかを確認
 - p.14の最適化をTruth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 > 90mmで行った場合
($\Delta R, d_{3D}$) = (0.1, 44mm)でEfficiency最大(47%).
 - π^\pm のTruth matchingとして $\Delta R < 0.1$ & $d_{3D} < 44\text{mm}$ を採用。
 - 付随したLowPtLargeD0 trackの73%が本当の π^\pm 由来だった。

カットフローをまとめたのが右下図。
見たい事象の**約20%**を再構成できた。



まとめ

- 消失飛跡探索は, LSPが暗黒物質の候補となり得ることからも非常に重要な解析である.
 - $\tilde{\chi}_1^\pm$ の崩壊で生じる低運動量 π^\pm を解析に利用できれば, より短い飛跡探索が可能となる.
- Truth情報を用いて低運動量 π^\pm の振る舞いを確認した.
- LowPtLargeD0 trackingで再構成した飛跡から, 何とか低運動量 π^\pm らしい飛跡を抽出したい.
 - ΔR だけでなく, X,Y,Z方向の距離まで考慮することで, 膨大な飛跡の中から, より $\tilde{\chi}_1^\pm$ の崩壊生成物らしい飛跡を選択し, その最適化を行った.
- 3-Layer trackと組み合わせた事象再構成率は約20%と分かった.

今後

- アルゴリズムの精査
- サンプルによる違いの確認

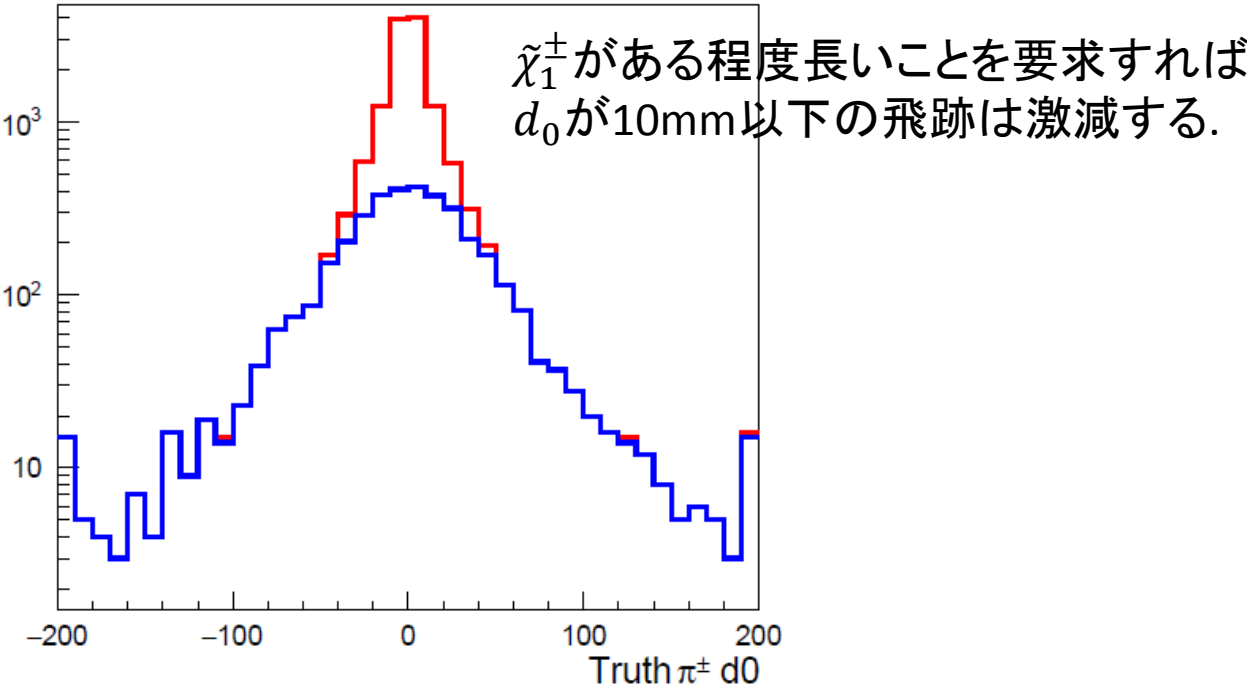
backup

LowPtLargeD0 track p_T

分布に不自然な段差が見られたことに関して

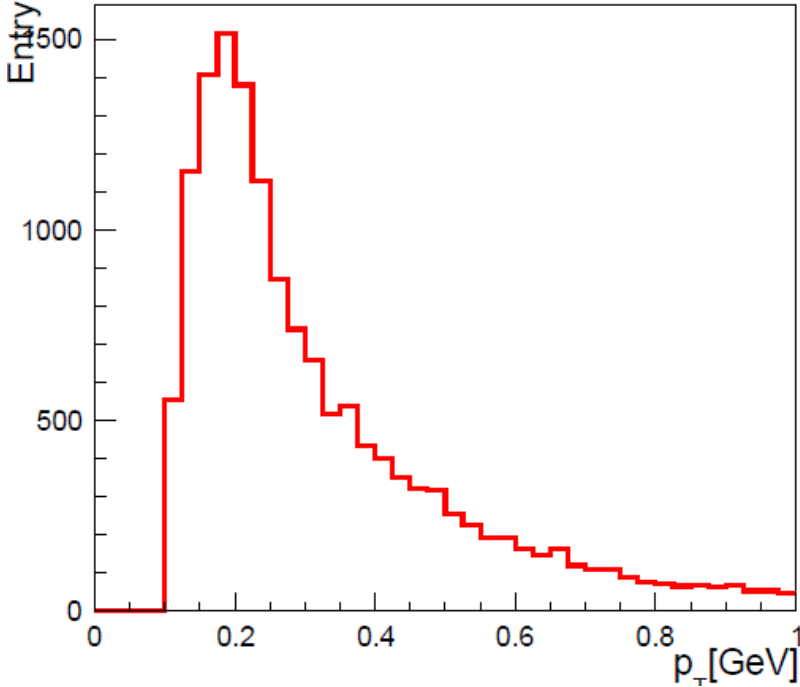
赤 : カット無し

青 : Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径が50mm以上



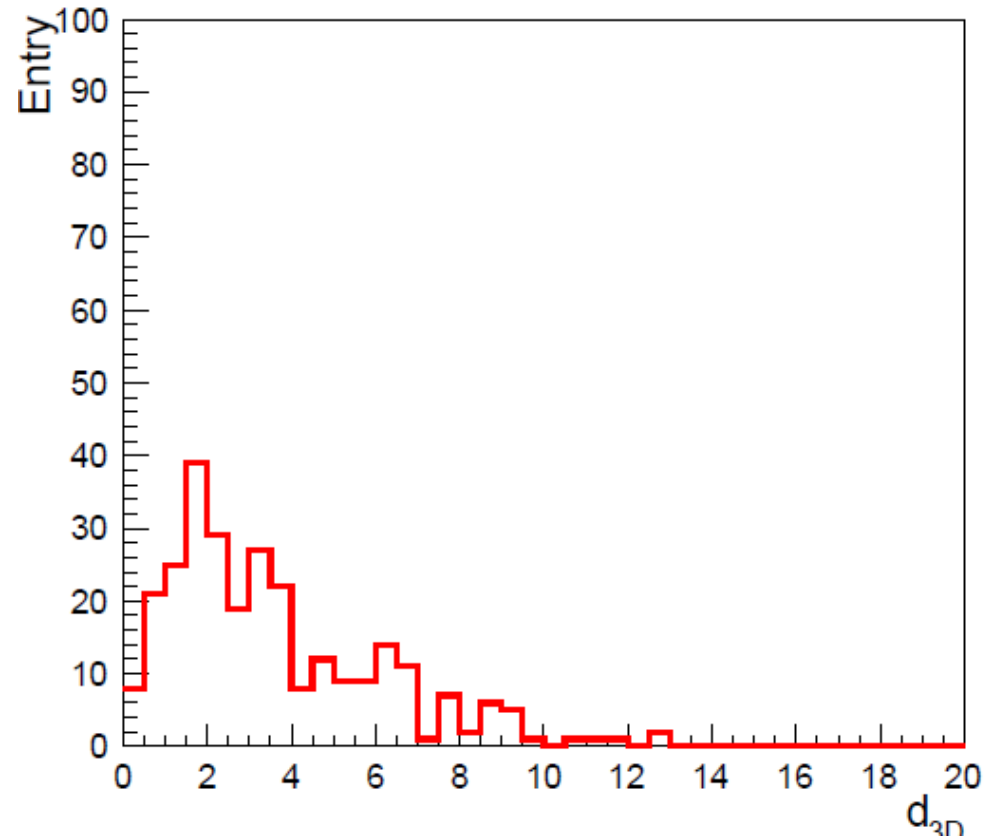
例として

Truth $\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径が50mm以上
LowPtLargeD0 track $|d_0|$ が50mm以上
を要求すると段差は消える.



信号事象と無関係な誤った飛跡による段差だったことが分かる.

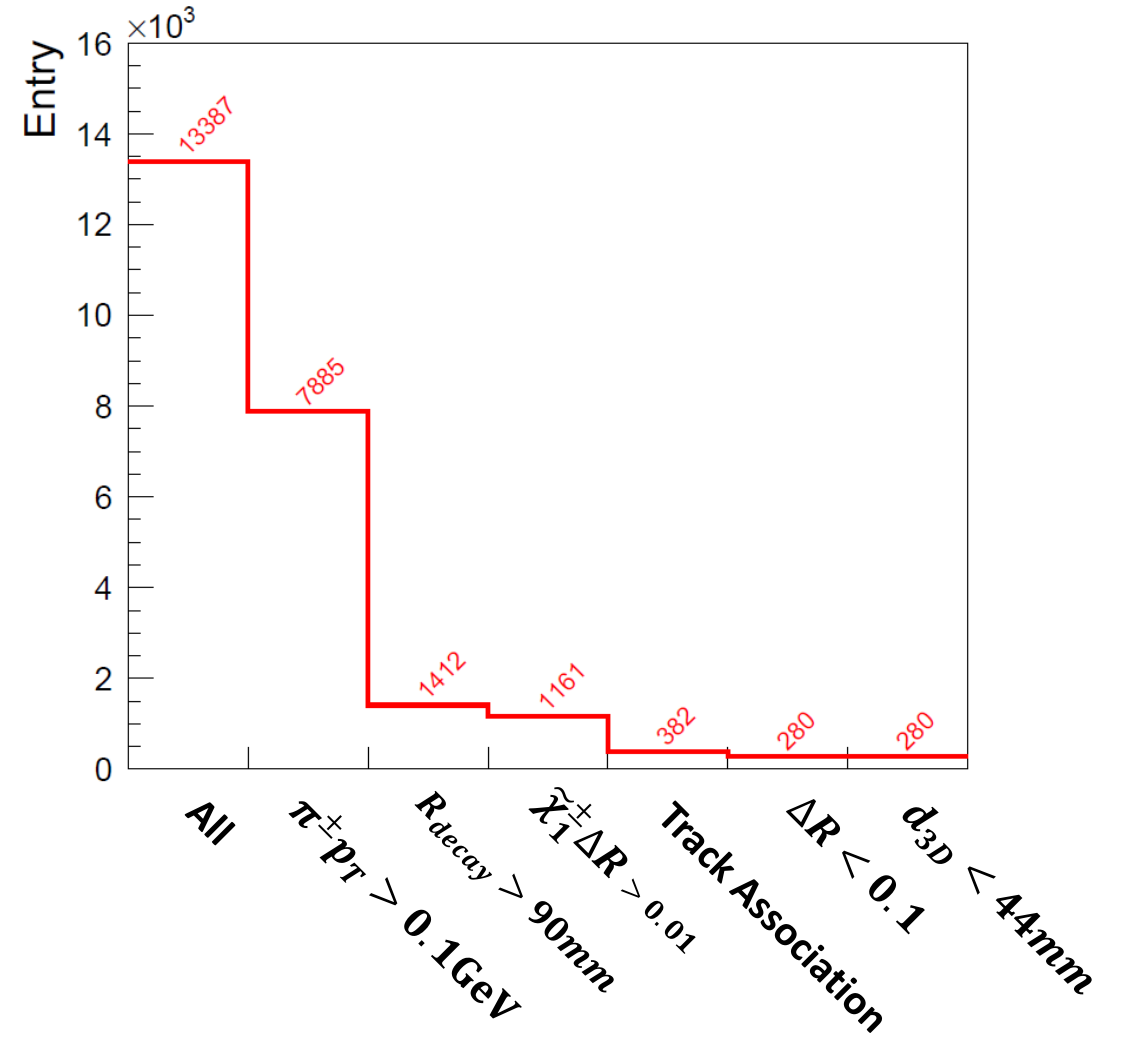
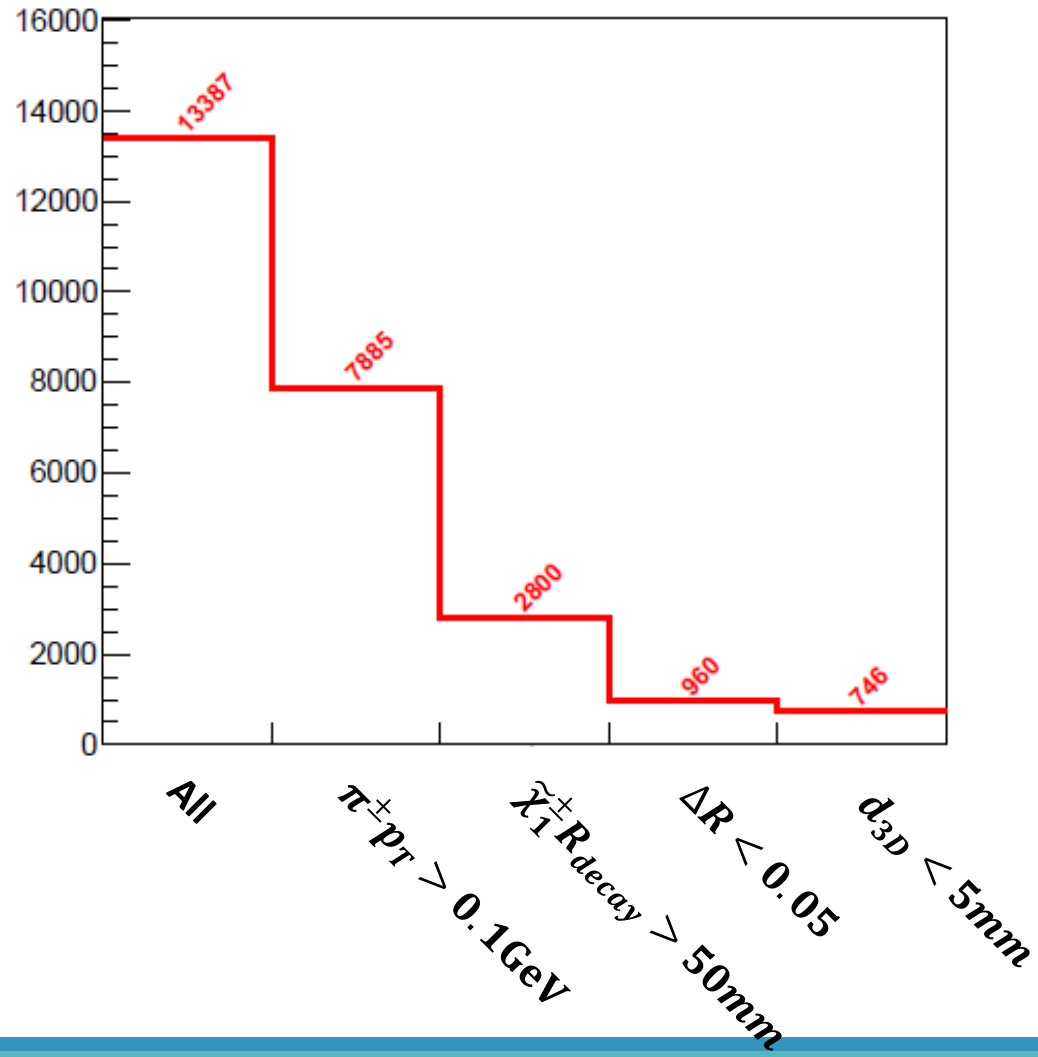
p.16 $\Delta R < 0.1$ を要求後の d_{3D} 分布



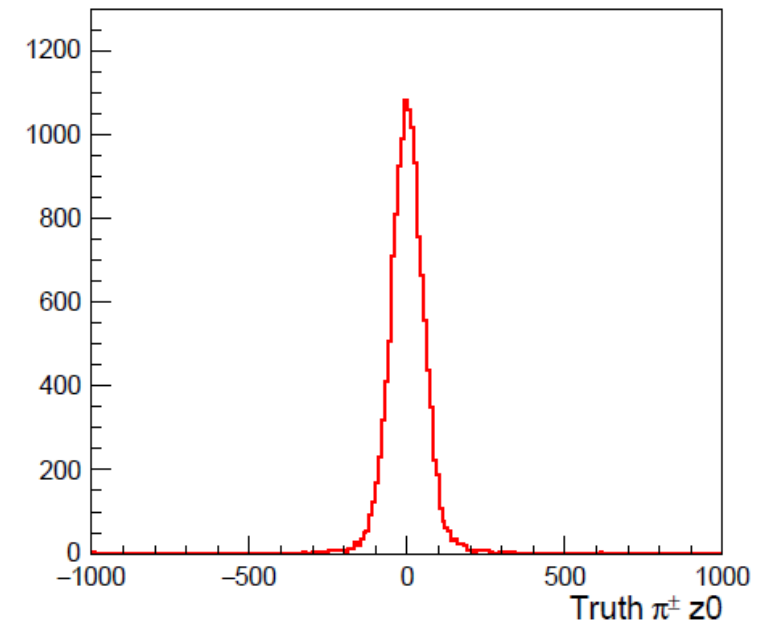
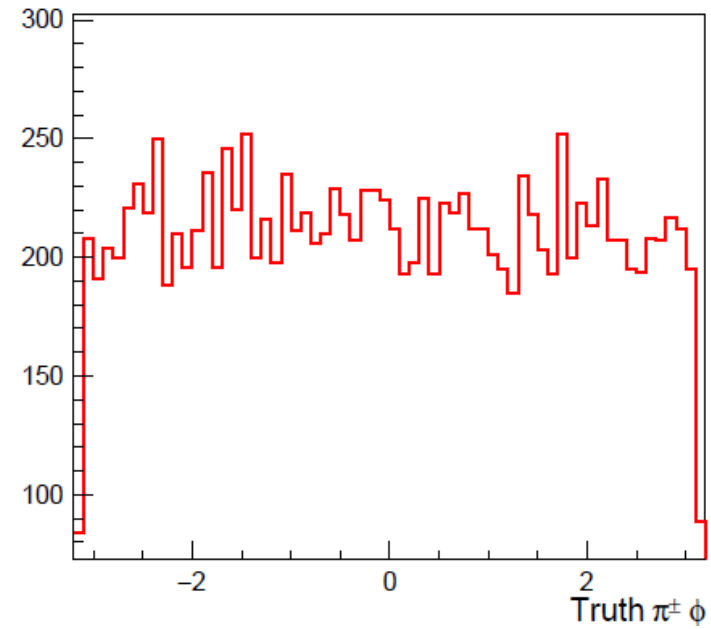
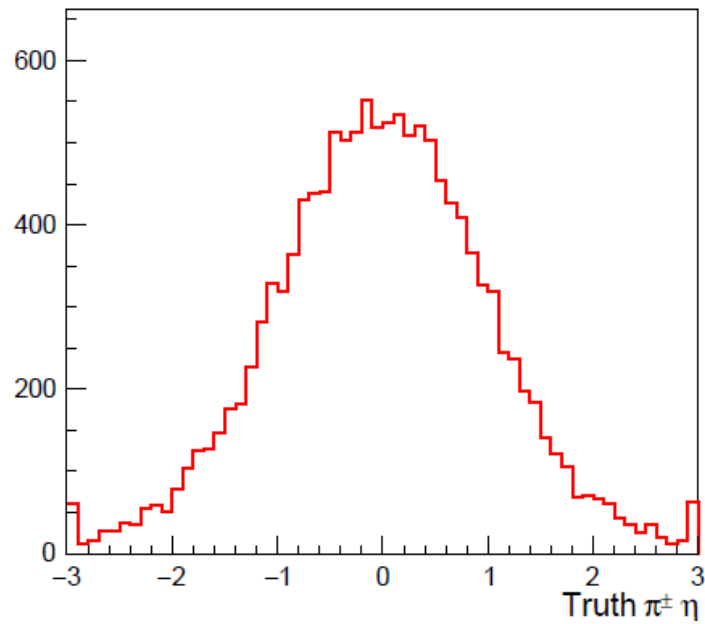
崩壊半径別のヒット割合

Decay Radius cut無し					Decay Radius 30mm cut					Decay Radius 50mm cut					Decay Radius 90mm cut				
PB	PE	SB	SE	[%]	PB	PE	SB	SE	[%]	PB	PE	SB	SE	[%]	PB	PE	SB	SE	[%]
○	○	○	○	0.65	○	○	○	○	0.66	○	○	○	○	0.55	○	○	○	○	0.25
	○	○	○	0.45		○	○	○	0.14		○	○	○	0.23		○	○	○	0.30
○		○	○	22	○		○	○	21	○		○	○	19	○		○	○	11
○	○		○	0.52	○	○		○	0.34	○	○		○	0.20	○	○		○	0.0071
○	○	○		2.6	○	○	○		2.1	○	○	○		1.6	○	○	○		0.76
○	○			0.47	○	○			0.28	○	○			0.14	○	○			0.039
	○	○		0.15		○	○		0.37		○	○		0.52		○	○		0.78
		○	○	3.1			○	○	5.9			○	○	8.7			○	○	17
○			○	2.3	○			○	2.0	○			○	1.7	○			○	0.84
○		○		47	○		○		43	○		○		40	○		○		25
	○		○	0.091		○		○	0.16		○		○	0.21		○		○	0.18
○				14	○				9.4	○				6.7	○				2.9
	○			0.019		○			0.066		○			0.078		○			0.050
		○		6.6			○		12			○		18			○		36
			○	0.17				○	0.37				○	0.57				○	1.2
				1.2					1.4					1.8					2.9

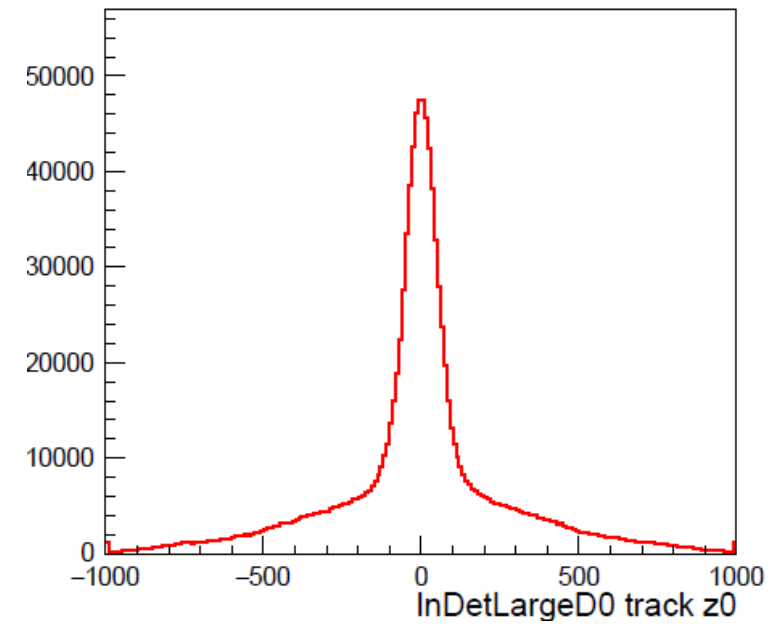
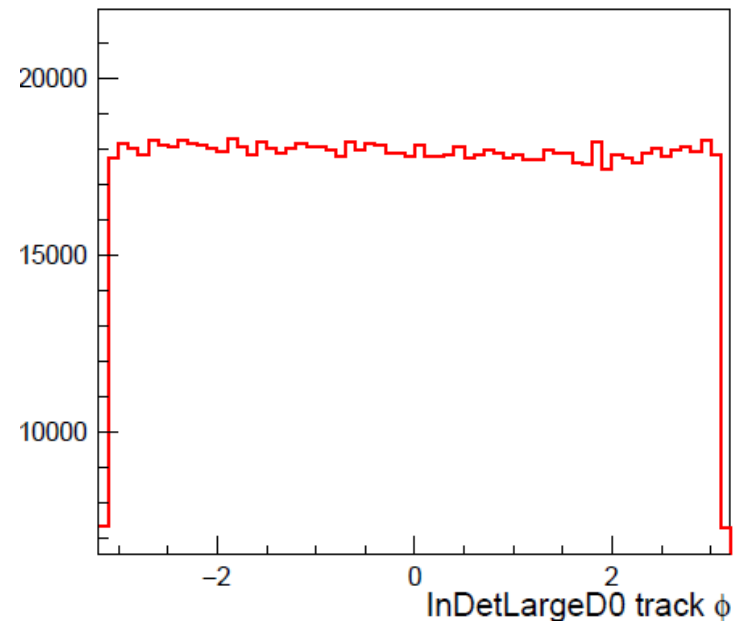
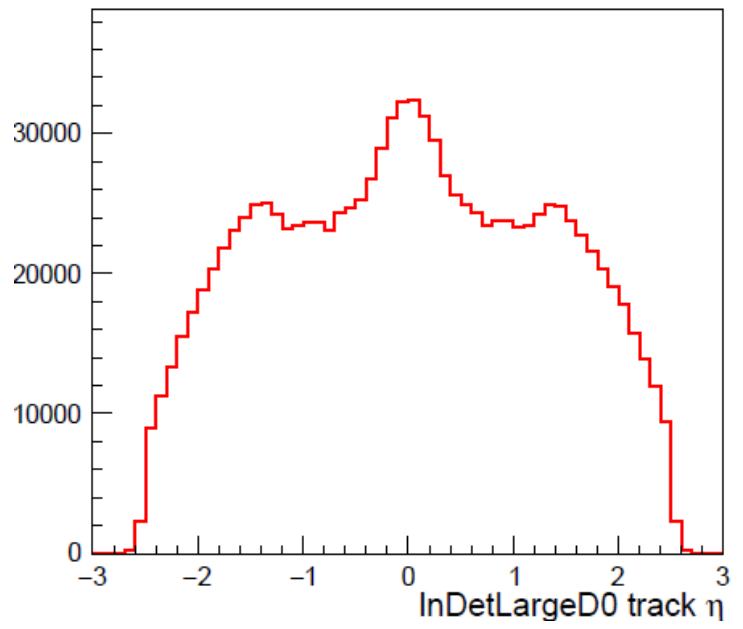
Truth CutFlow



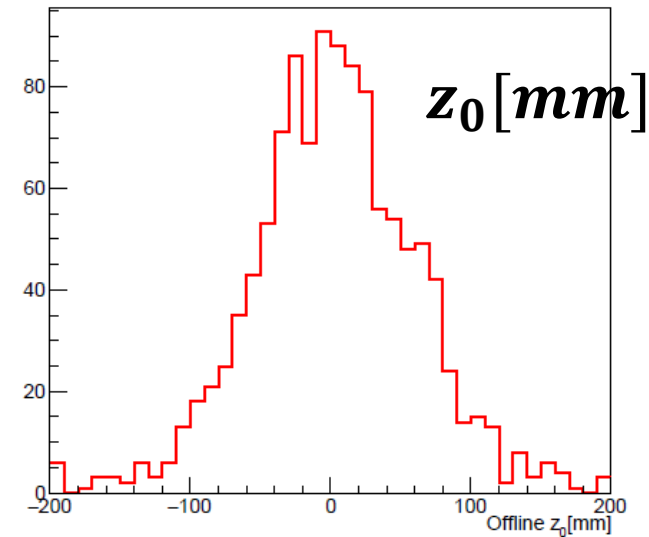
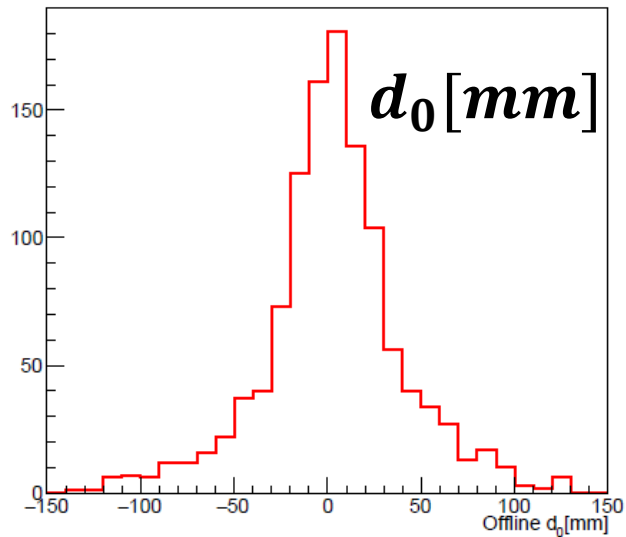
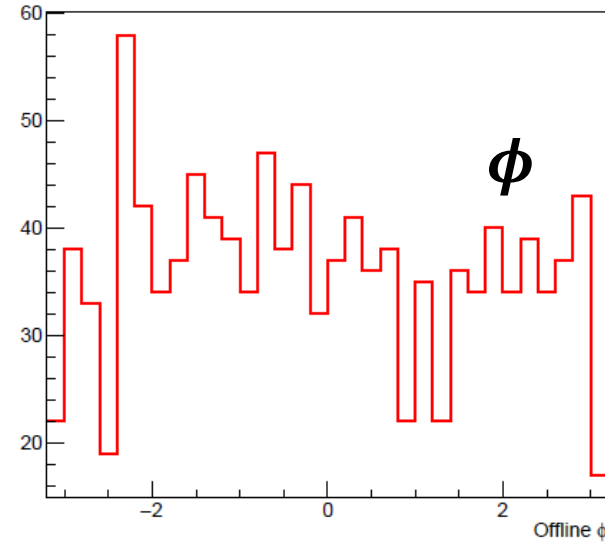
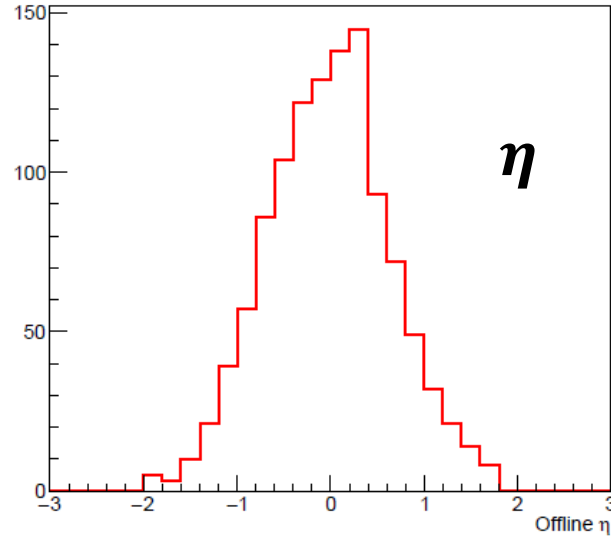
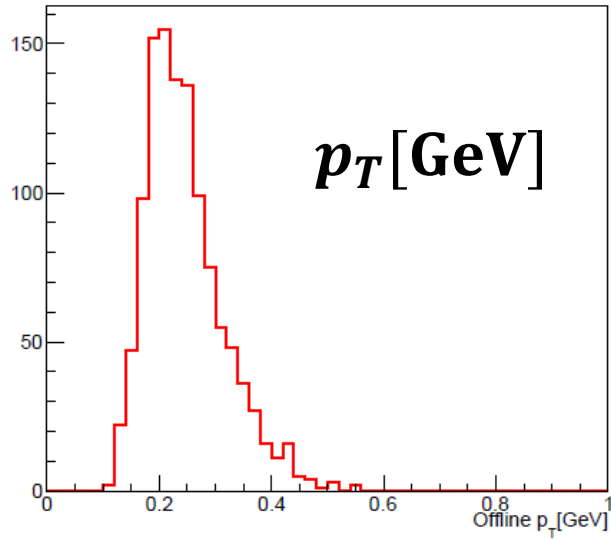
Truth π^\pm 分布(その他)



LowPtLargeD0分布(その他)



Matched Offline track



$(\Delta R, d_{3D}) = (0.10, 15\text{mm})$ をpassした
offline track分布.

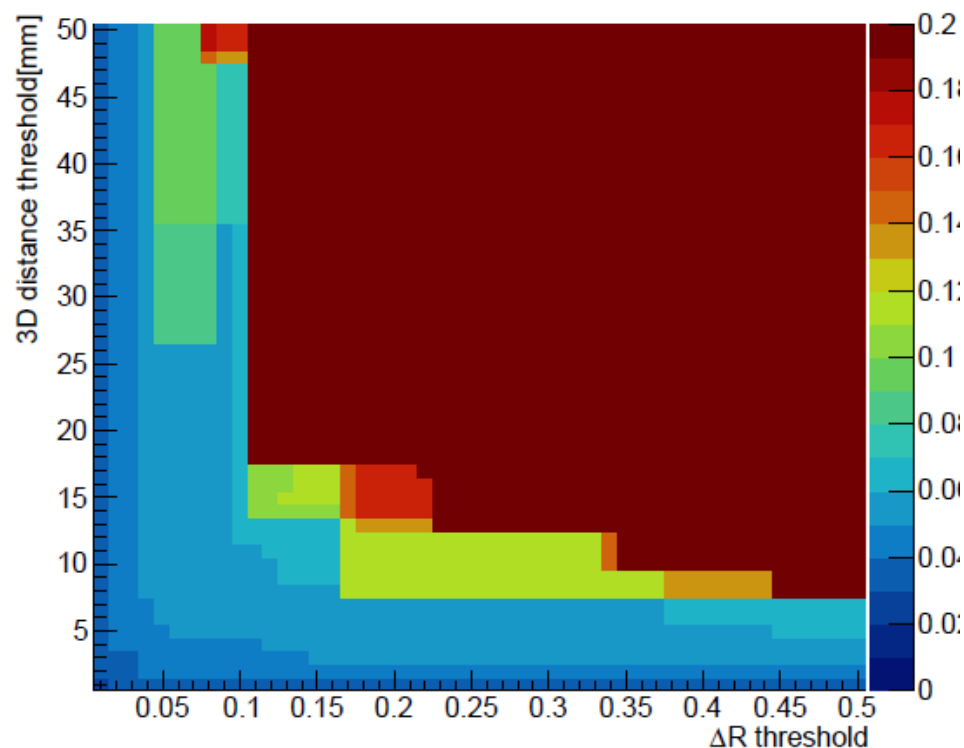
各truthに対して複数matchした場合は
 $|\Delta p_T / \text{truth } p_T|$ が最小となるoffline trackを選択.

Entry数 : 1148

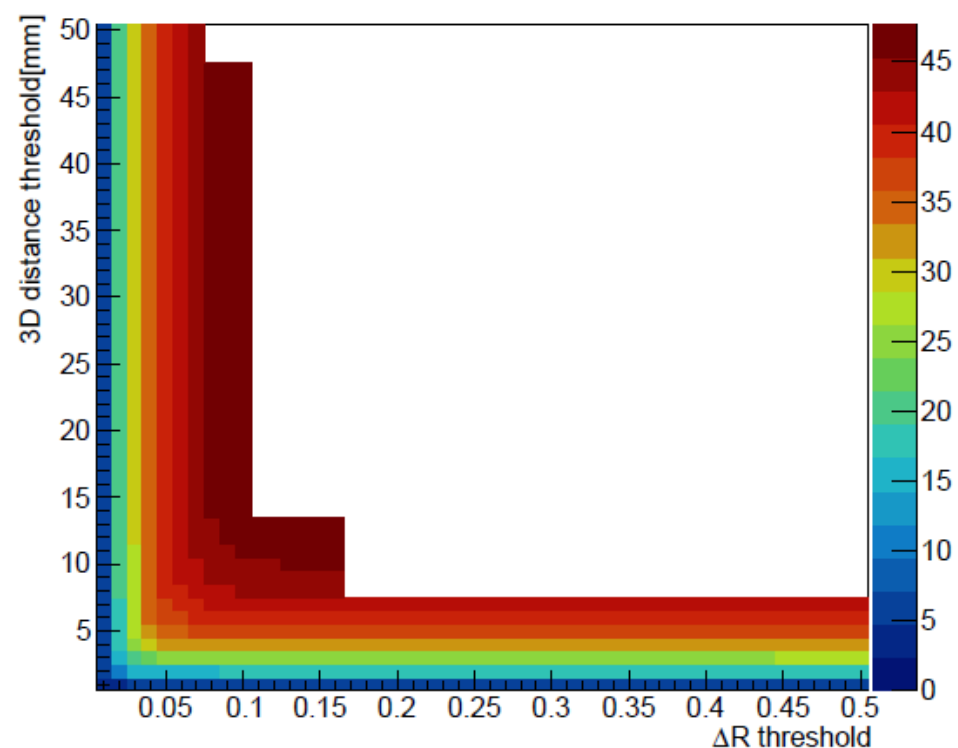
$\tilde{\chi}_1^\pm$ 崩壊半径 $> 90\text{mm}$ における最適化

$RMS(\Delta p_T / \text{truth } p_T) < 0.1$ という条件では
 $(\Delta R, d_{3D}) = (0.1, 44\text{mm})$ でEfficiency48%が最大.

$RMS(\Delta p_T / \text{truth } p_T)$



Efficiency[%]



Impact Parameter

今回のsampleでは
ビームスポット≈PVの位置

d_0 : ビームスポットと飛跡の最近接距離(XY平面)

z_0 : XY平面最近接でのz座標とPVのz座標の距離

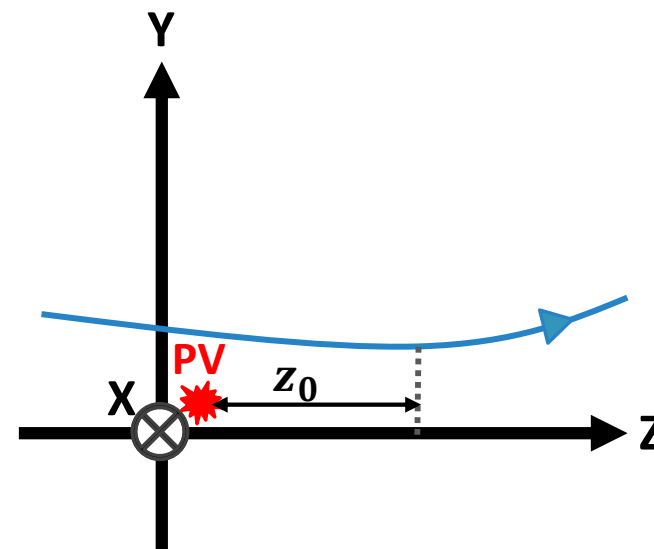
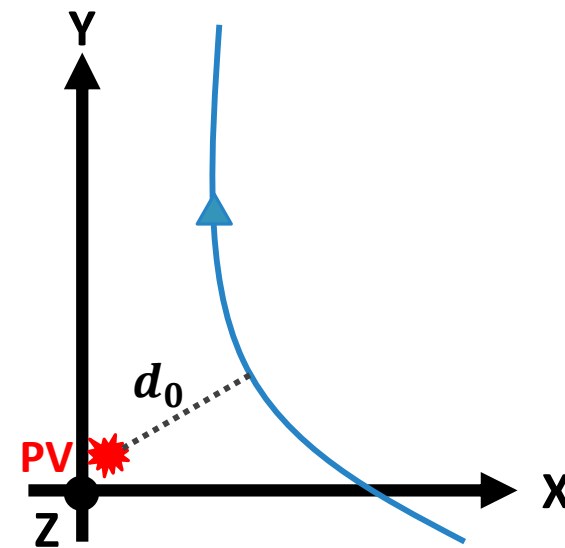
PV : $\sum |p_T^{track}|^2$ が最大となるVertex

d_0 の符号は外積で決まる.

$$(\vec{n}_{d_0} \times \vec{n}_{p_T})_z > 0 \Rightarrow d_0 < 0$$

$$(\vec{n}_{d_0} \times \vec{n}_{p_T})_z < 0 \Rightarrow d_0 > 0$$

右上図の場合, $d_0 < 0$.



通常 of 飛跡再構成方法(inside-out)

1. Space point の作成

検出器のhit情報を元に荷電粒子が通過した3次元位置(space point)を推定する.

Pixel検出器 : 反応した複数の検出器の位置情報・電荷情報を用いて高精度で決められる.

SCT検出器 : ストリップなので重なった2個のモジュールから決められる.

2. Track seed の作成

いきなりtrackを作るのではなく、まずは3点のspace pointからtrackの種を作成する.

- vertexのz座標を制限して高速化.
- (Run2以降)4点目のhitを要求することでfake track seedを抑制.

対応するhitをfitしてtrackを作成する.

3. Ambiguous resolver

2. で作成したtrackにはfakeがたくさんあるので、検出器ごとにhit数・ p_T ・hole数などでscoreをつける. scoreがとても低ければfakeとみなされる. また, shared hitはscoreが低い方のtrackにカウントされる.

4. TRT extension

Si検出器のhitのみで作ったtrackにTRT hitを加える作業. 先ほどと同じ様にfitを行い, scoreをつける. Si検出器のhitのみのtrackに比べてscoreが高くなるならばTRT hitを加える.

場合分け(4通り)

(X_{PV}, Y_{PV})

(X_C, Y_C)

R

d_0

ϕ

π^+

- $d_0 < 0$

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{PV} \\ Y_{PV} \end{pmatrix} + (R - d_0) \begin{pmatrix} \sin\phi \\ -\cos\phi \end{pmatrix}$$

(X_{PV}, Y_{PV})

(X_C, Y_C)

R

d_0

ϕ

π^-

- $d_0 > 0$

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{PV} \\ Y_{PV} \end{pmatrix} + (R + d_0) \begin{pmatrix} -\sin\phi \\ \cos\phi \end{pmatrix}$$

(X_{PV}, Y_{PV})

(X_C, Y_C)

R

d_0

ϕ

π^+

- $d_0 > 0$

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{PV} \\ Y_{PV} \end{pmatrix} - (R - d_0) \begin{pmatrix} -\sin\phi \\ \cos\phi \end{pmatrix}$$

(X_{PV}, Y_{PV})

(X_C, Y_C)

R

d_0

ϕ

π^-

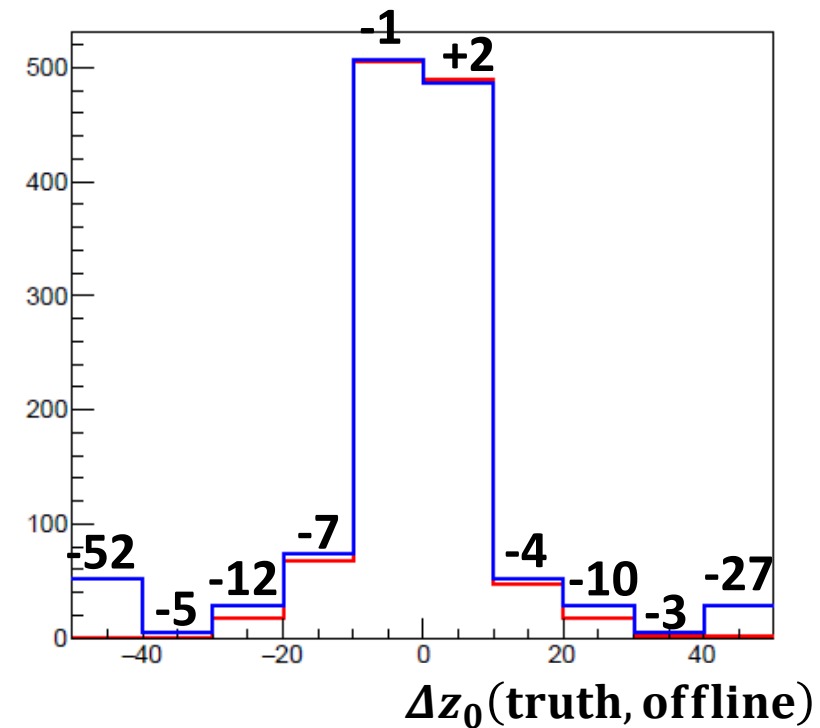
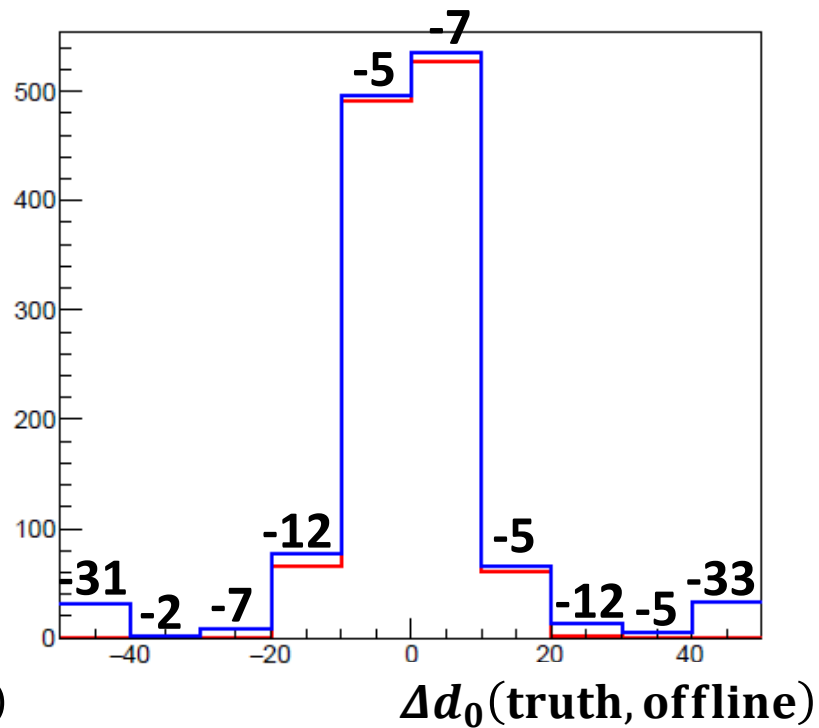
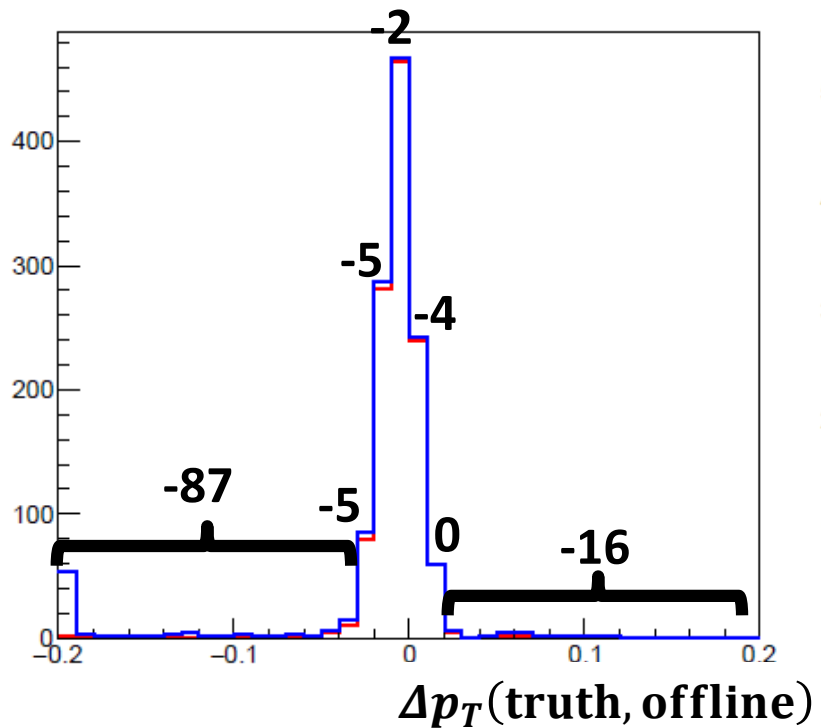
- $d_0 < 0$

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{PV} \\ Y_{PV} \end{pmatrix} - (R + d_0) \begin{pmatrix} \sin\phi \\ -\cos\phi \end{pmatrix}$$

d_{3D} による改善

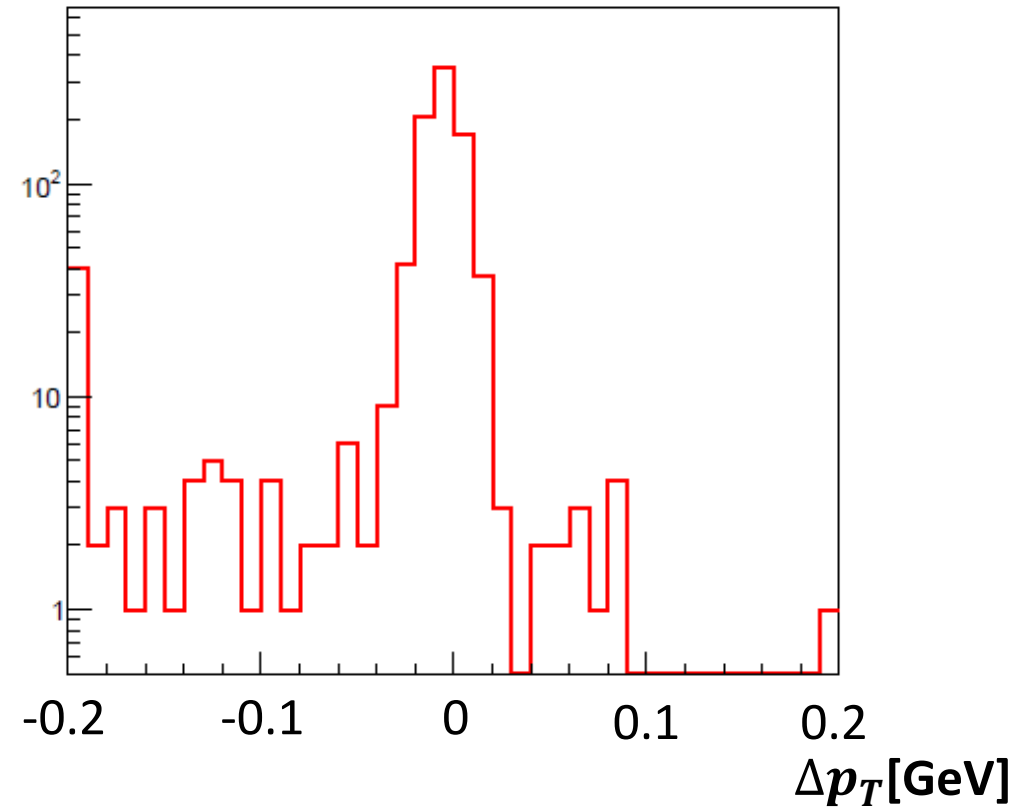
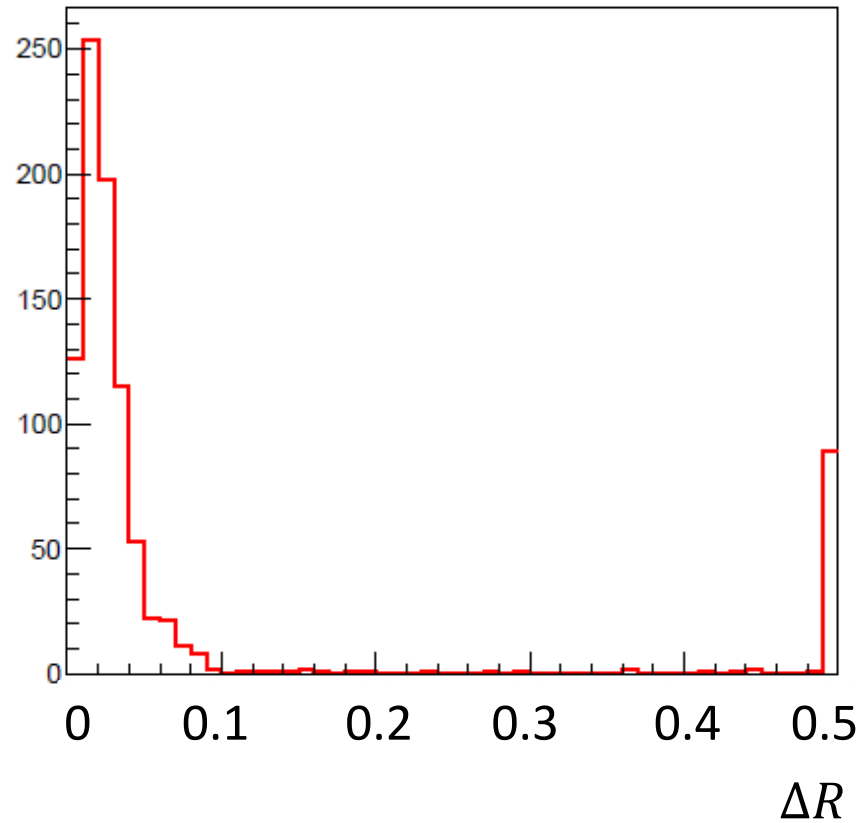
青 : minimum $\Delta R < 0.1$

赤 : $\Delta R < 0.1$ & $d_{3D} < 15\text{mm}$ $\min(|\Delta p_T / \text{truth } p_T|)$



d_{3D} のみを要求した場合

$d_{3D} < 5\text{mm}$ 要求後の ΔR 分布と Δp_T 分布を確認.



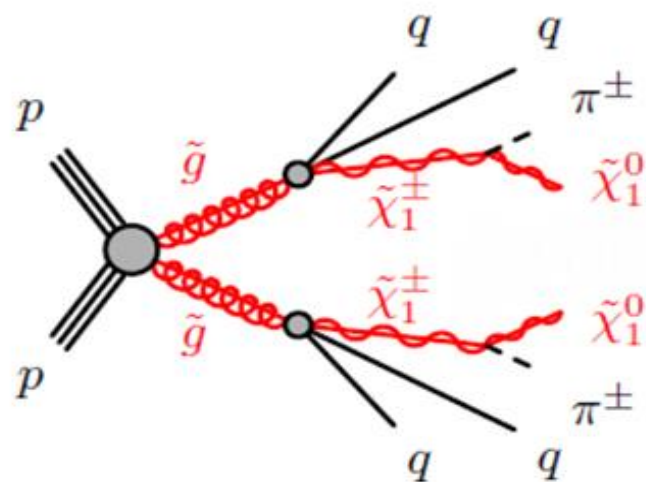
距離の情報のみではAccidentalに近い飛跡を選択してしまう.

$\tilde{\chi}_1^\pm$ と崩壊生成粒子間の角度

使用したsample

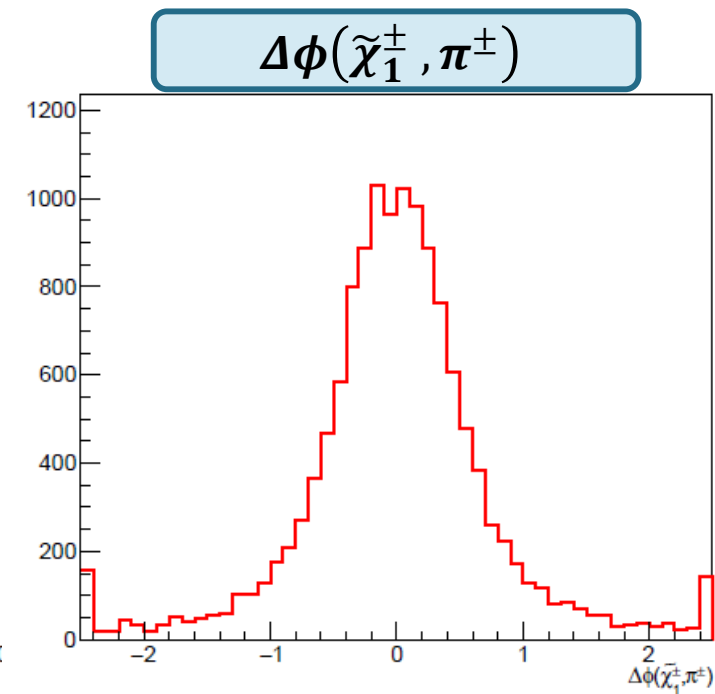
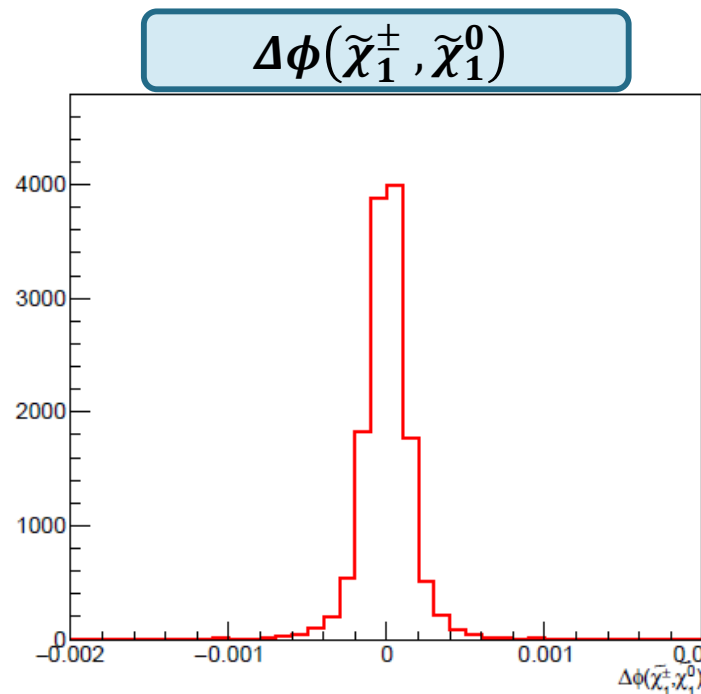
\tilde{g} の質量 : 1800 GeV , $\tilde{\chi}_1^0$ の質量 : 800 GeV

イベント数 : 10000



特徴

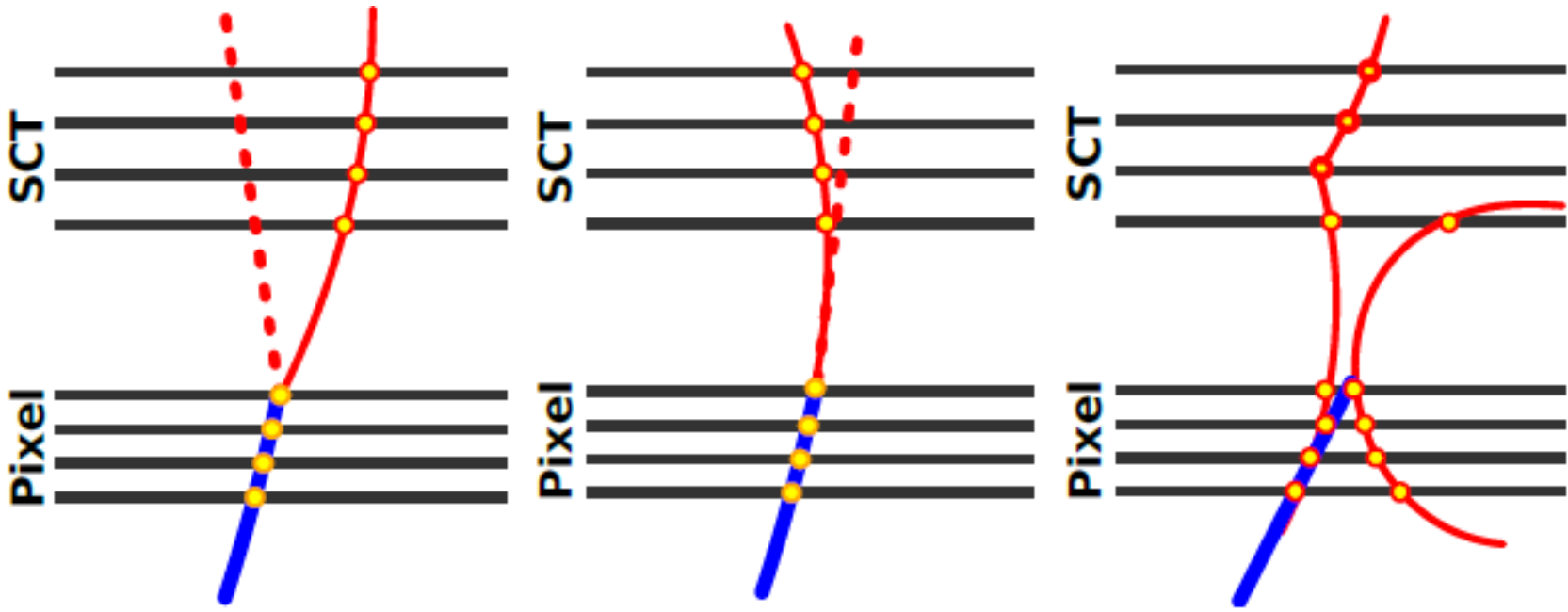
- High $p_T \tilde{\chi}_1^\pm$, Low $p_T \pi^\pm$
- Small $d_0 \tilde{\chi}_1^\pm$, Large $d_0 \pi^\pm$
- Large E_T^{miss}
- 4 jets



$\tilde{\chi}_1^0$ が $\tilde{\chi}_1^\pm$ のほぼ全てのエネルギーを得て
ほぼ同じ方向に飛ぶ.

消失飛跡の背景事象

標準模型からくるトラックでも背景事象になり得る。

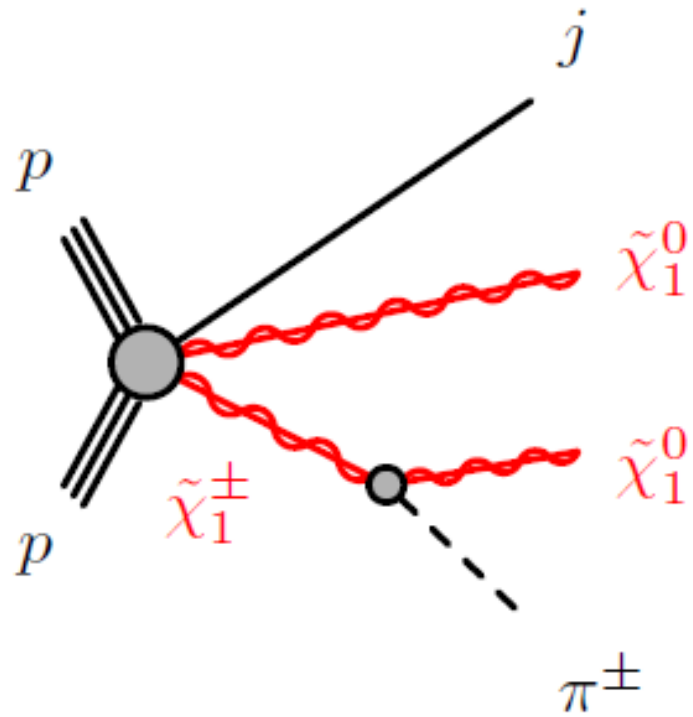


- (a) 飛跡検出器内で散乱
- (b) レプトンが強い制動放射
- (c) 誤った点を結ぶ



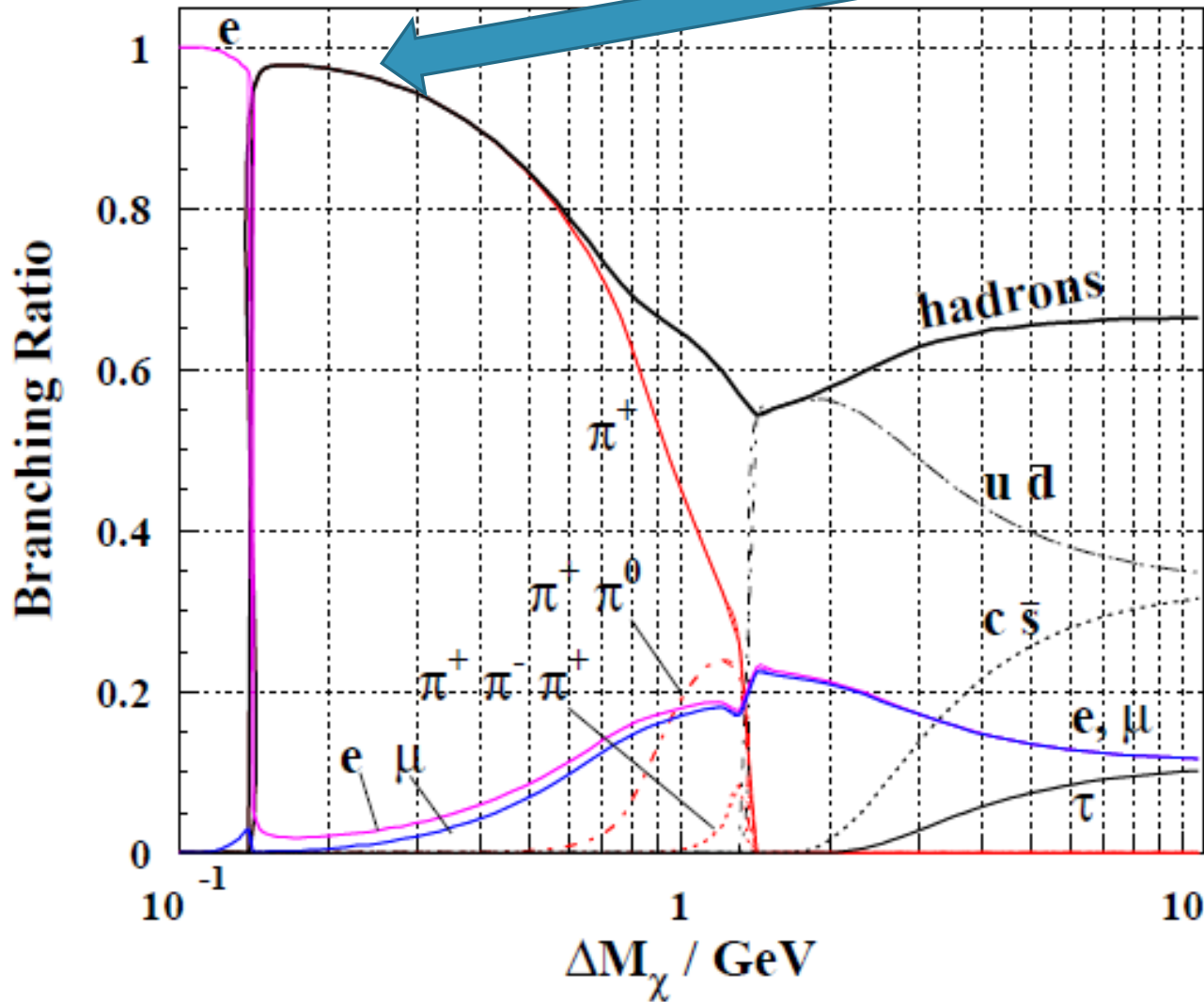
実際にはトラックが続いているが、
同一トラックとして認識されずに消失飛跡となる。

Electroweak production

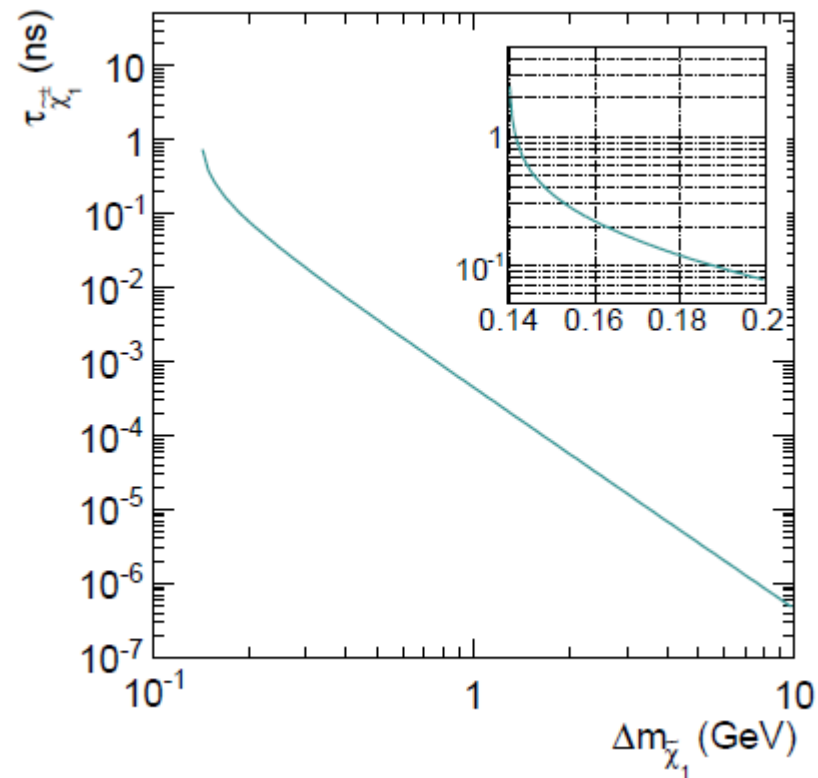
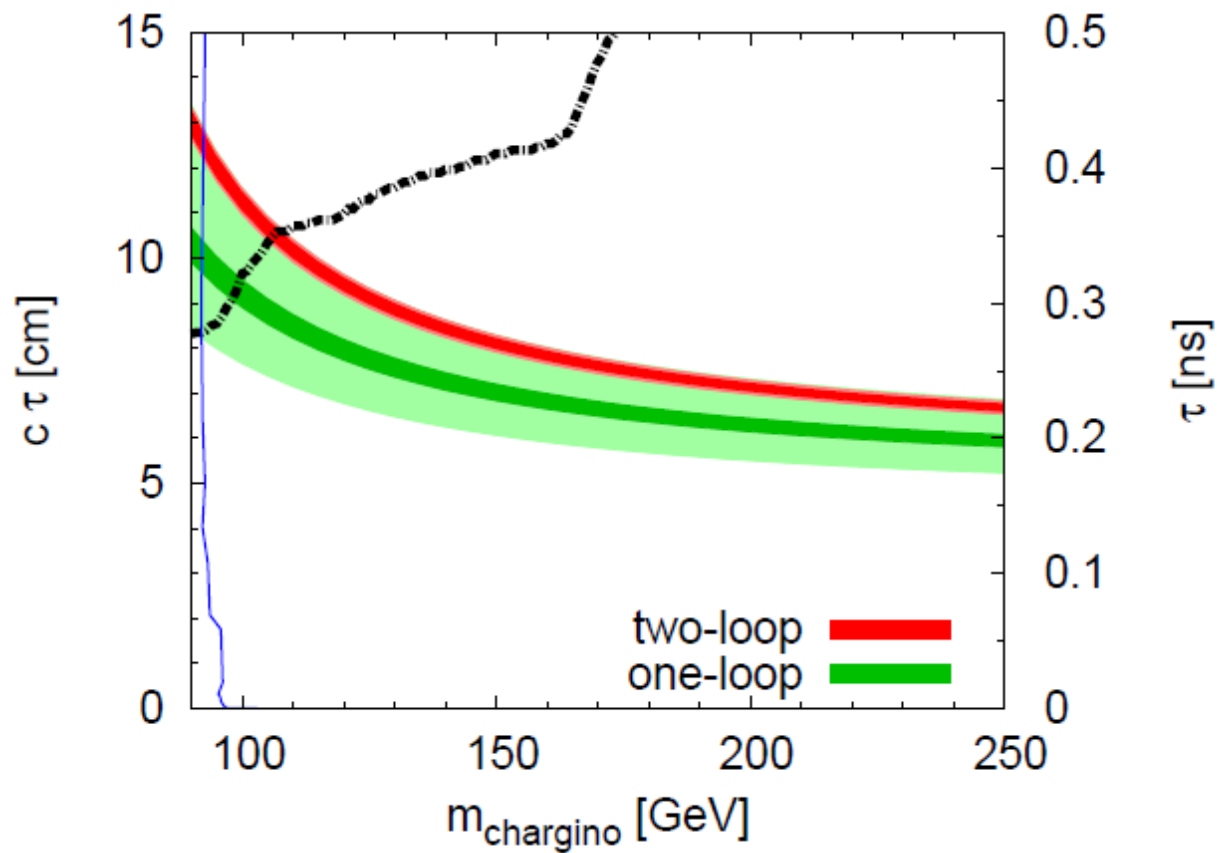


質量差と崩壊分岐比

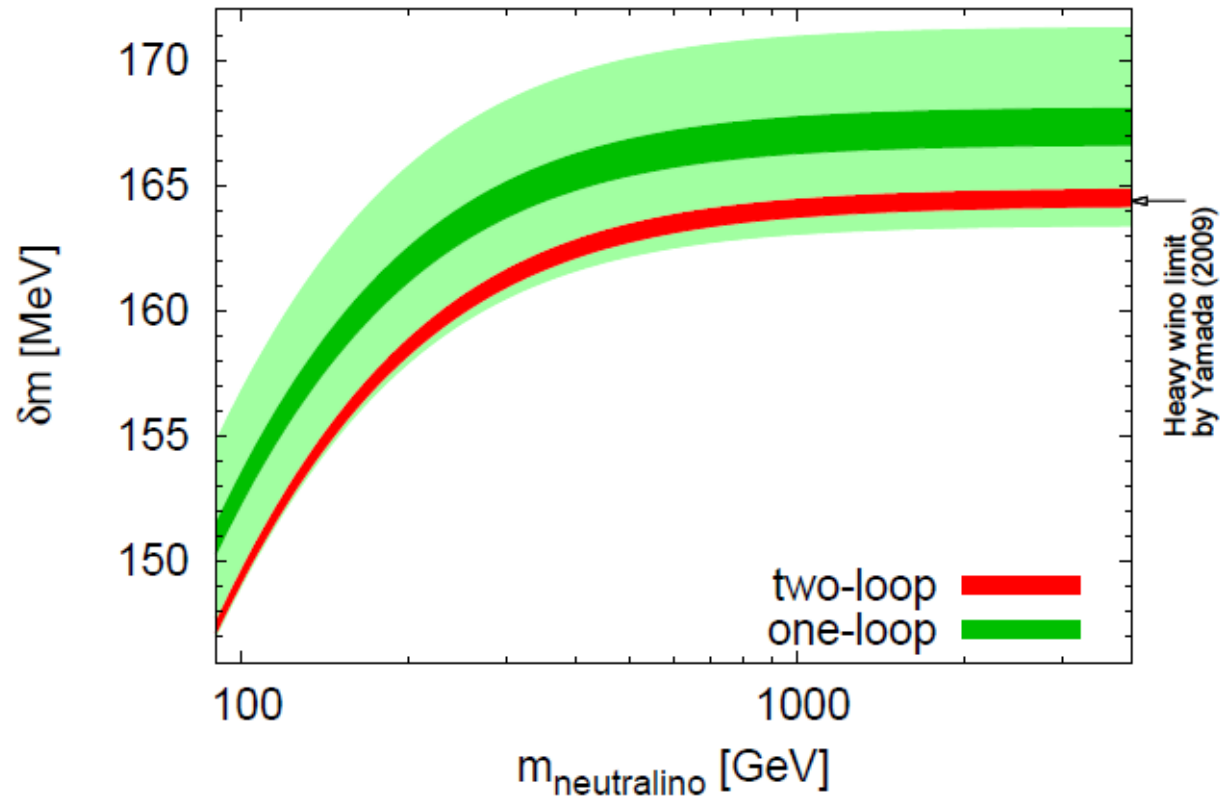
質量差が pion の質量付近だと 1 pion への崩壊が 支配的



$\tilde{\chi}_1^\pm$ 寿命

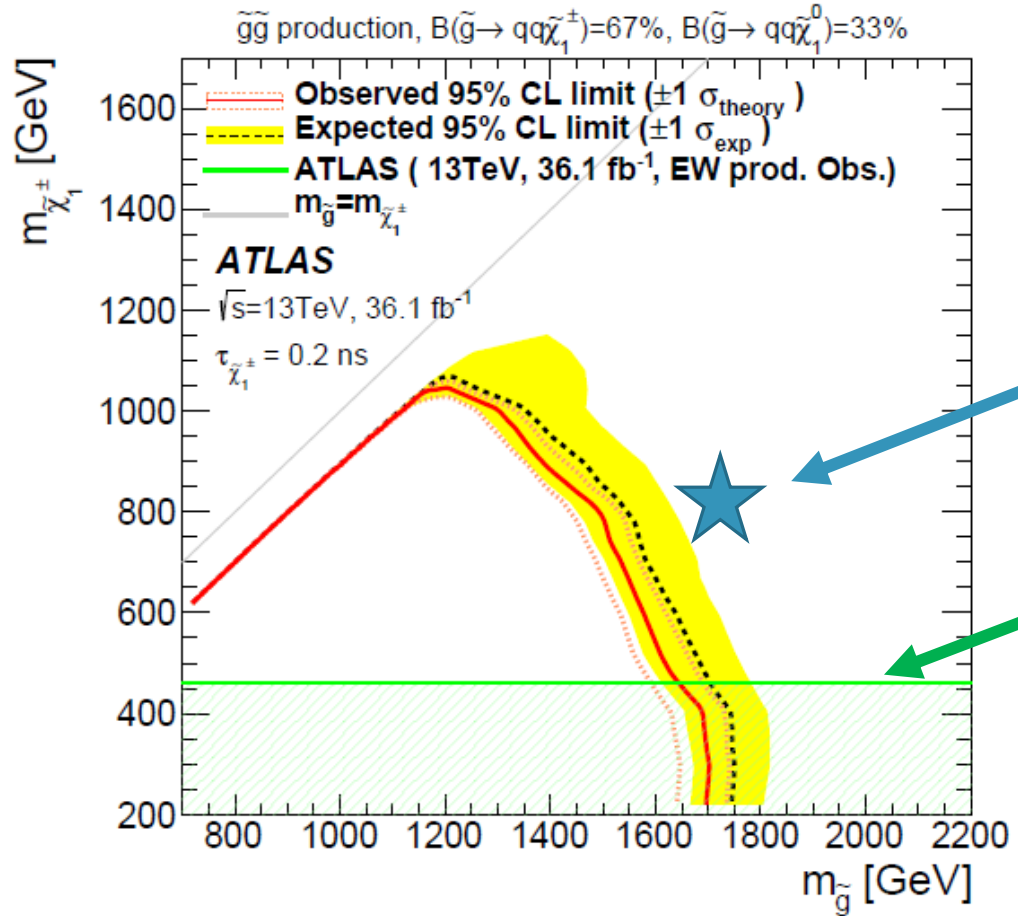


$\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^0$ の質量差



Neutralino (今回はneutral wino)の質量が大きくなると質量差はほぼ一定になる。

Strong Production limit

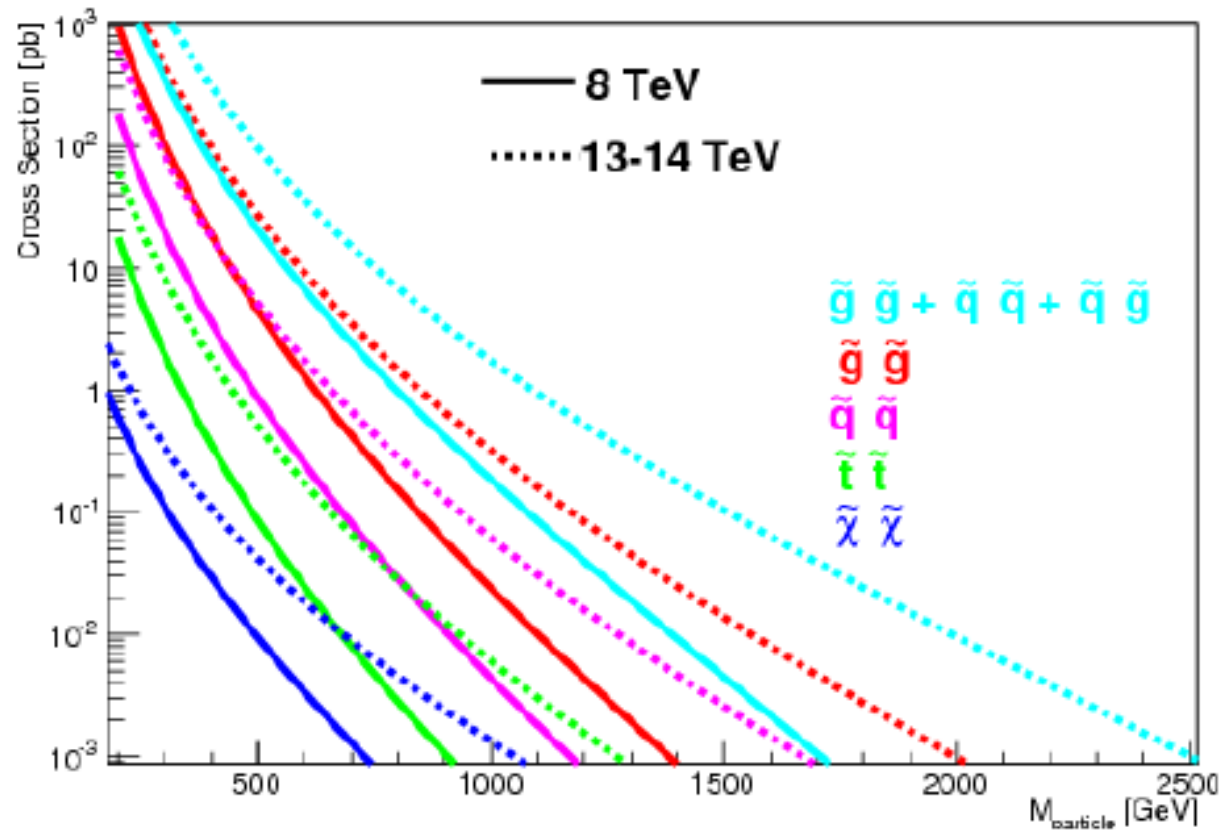


$\tilde{\chi}_1^\pm$ の寿命を0.2nsと仮定した場合のリミット.

今回使用したsampleのmass point.

緑はEW channelのリミット
($\tau_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 0.2\text{ns}$ あたりの $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ リミット)

LHCにおける生成断面積



R-parity保存

➤ Rパリティ

標準粒子と超対称粒子を区別する量子数

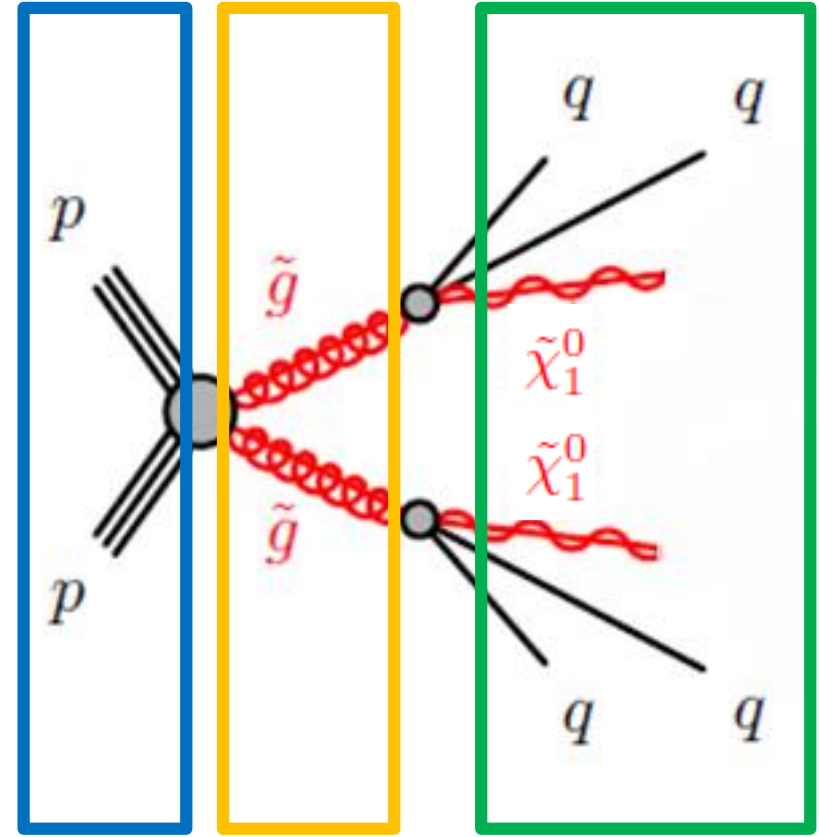
$$R \equiv (-1)^{3B+L+2S} \quad \begin{array}{l} B: \text{バリオン数} \quad L: \text{レプトン数} \\ S: \text{スピン} \end{array}$$

標準粒子: +1, 超対称粒子: -1

Rパリティが保存していると仮定すると,

- 超対称粒子はペアで生成される.
- 超対称粒子の中で最も軽い粒子は安定であるべき.

また, 最も軽い超対称粒子が中性粒子ならば,
 $\tilde{\chi}_1^0$ がダークマターの良い候補となる!!



$$R = (+1)^2 \quad R = (+1)^2 \quad R = (+1)^2(-1)^2$$