Au-Au衝突データを用いた sPHENIX-INTT検出器のアライメント検証

高エネルギー物理学研究室　B4寺坂優里

目次

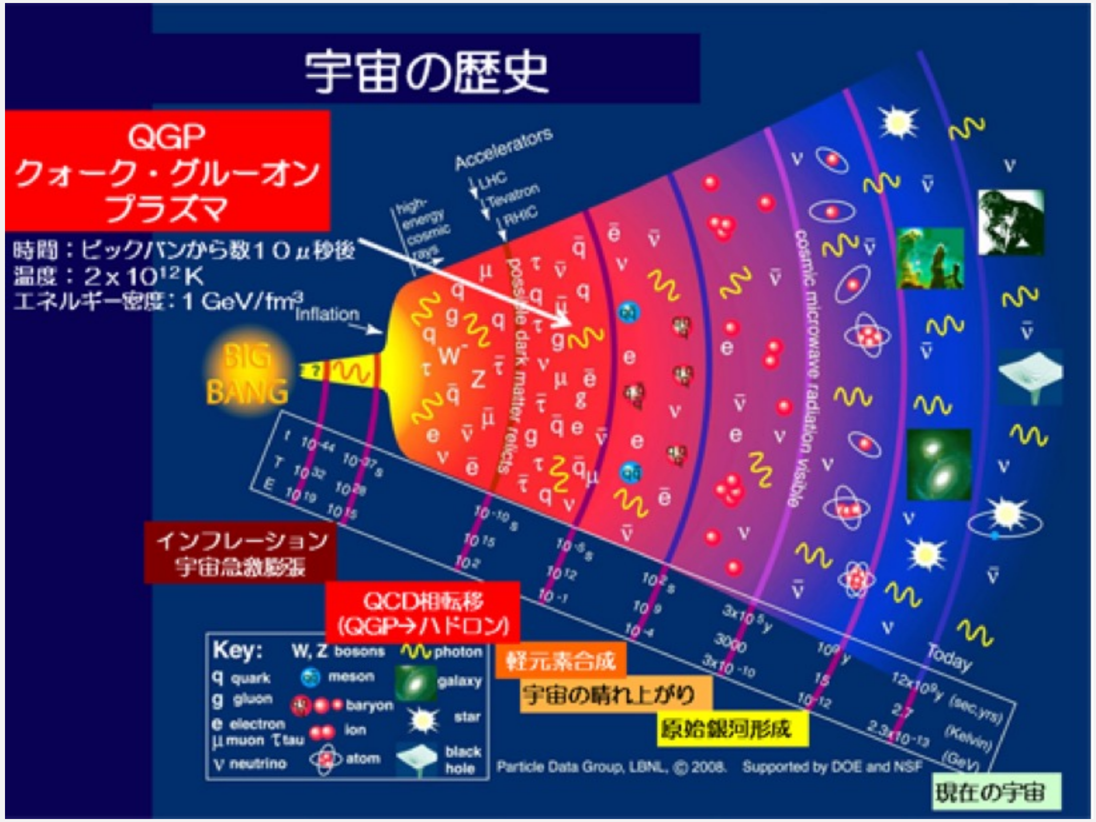
研究背景

QGP

・ビックバン直後の初期宇宙はクオークとグルーオンからなる超高温状態のクォーク・グルーオン・プラズマ(＝QGP)だった。

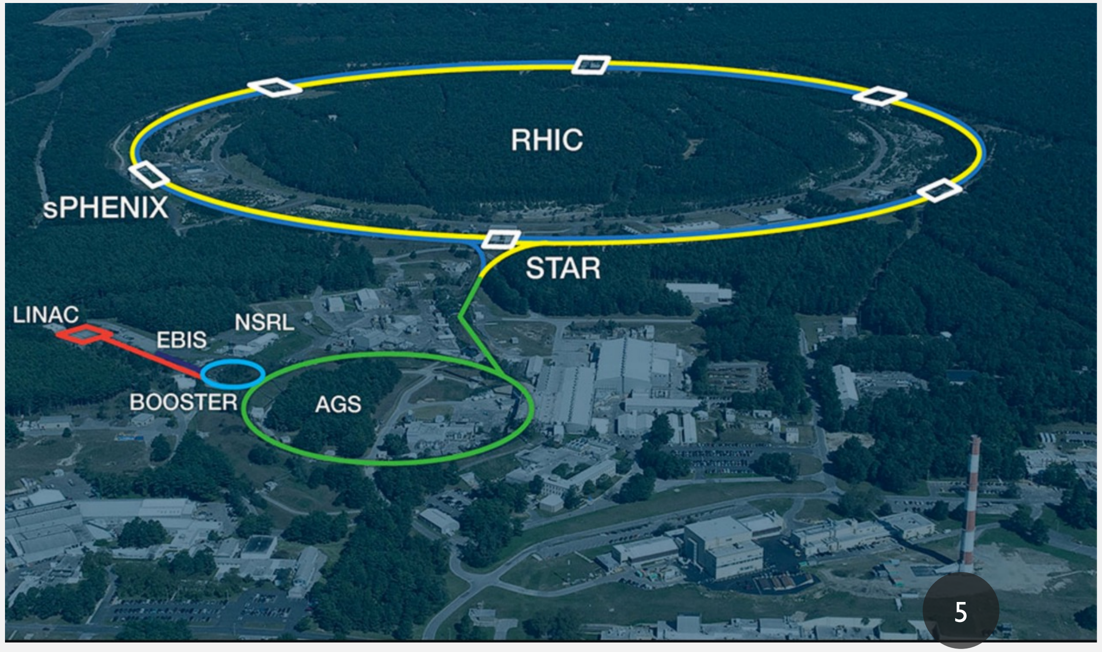
・重い原子核同士を高エネルギーで衝突させることでQGPができるような高温状態を再現することができる。

・宇宙初期に存在したQGPを再び作り出してその性質を調べる。



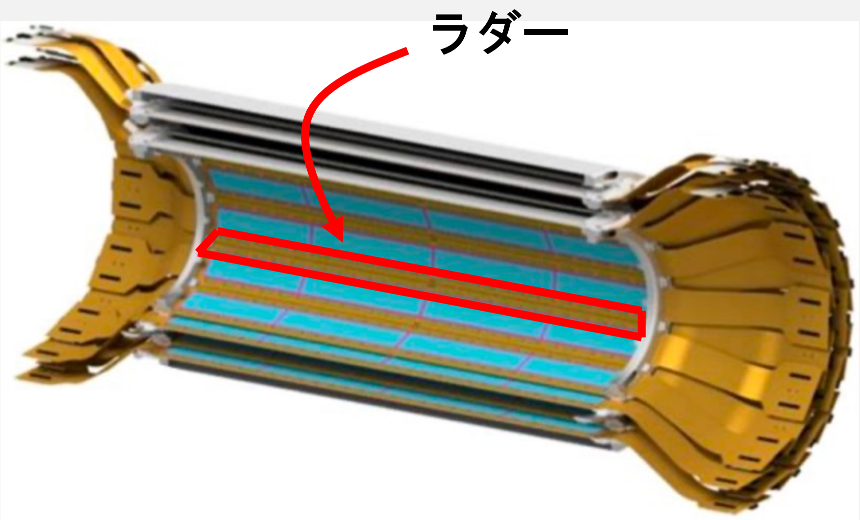
sPHENIX実験

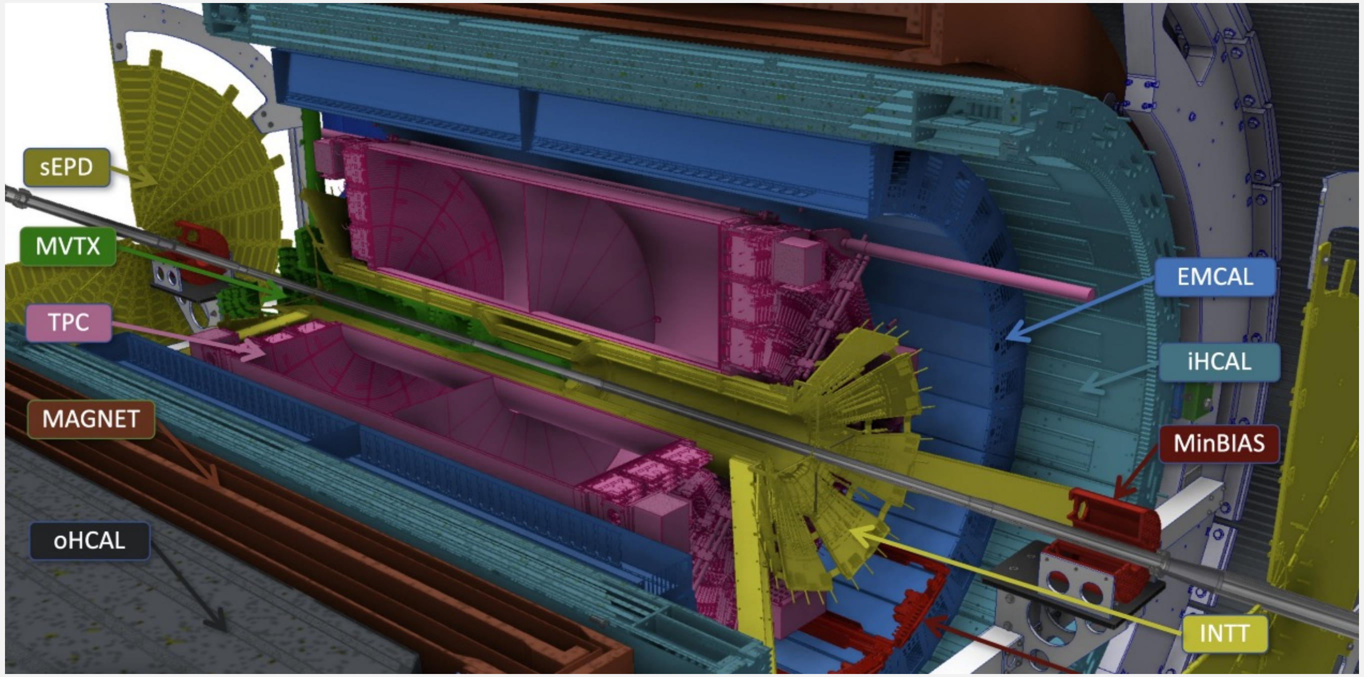
- 米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）で重イオン衝突加速器RHICを用いた実験
- 2000~2016年に行われたPHENIX実験を高度化。今年度より稼働。
- 衝突で生じるJet現象やUpsilon粒子を測定し、QGPの性質を決定する。
- 金原子核対(200GeV)と陽子対(200GeV)の衝突



中間飛跡検出器INTT

- sPHENIX実験で用いられる3つの飛跡検出器のうちの1つ
- 樽状の二層構造のストリップ型シリコン検出器
- ビームパイプから7~10cmに位置する
- 時間分解能・位置分解能が高く、
  飛跡再構成において重要な役割を果たす

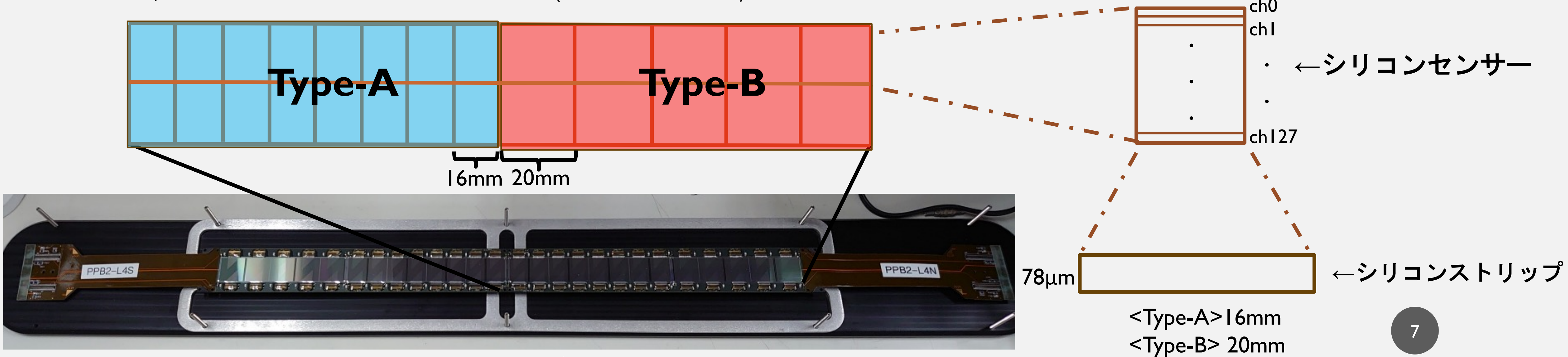




INTTシリコンセンサー

- INTTは二層構造になっており56本のラダーで構成されている。内側は24本、外側は32本である。
- シリコンセンサーモジュールは26個のシリコンセンサーがありType-A(16個),Type-B(10個)に分かれている
- シリコンストリップ128個で１つのシリコンセンサーを構成している
  （１ストリップの大きさ：78μm×16mm(Type-A),20mm(Type-B)×320μm）

↓シリコンセンサーモジュール(ハーフラダー)



↑実際のラダー

研究目的

研究目的：アラインメント検証

アラインメントとは

☞検出器を置きたいと思っている場所と実際に置いている場所のずれを調べ
ソフトウェア上で正確に揃えること

アラインメント検証はなぜ必要なのか。

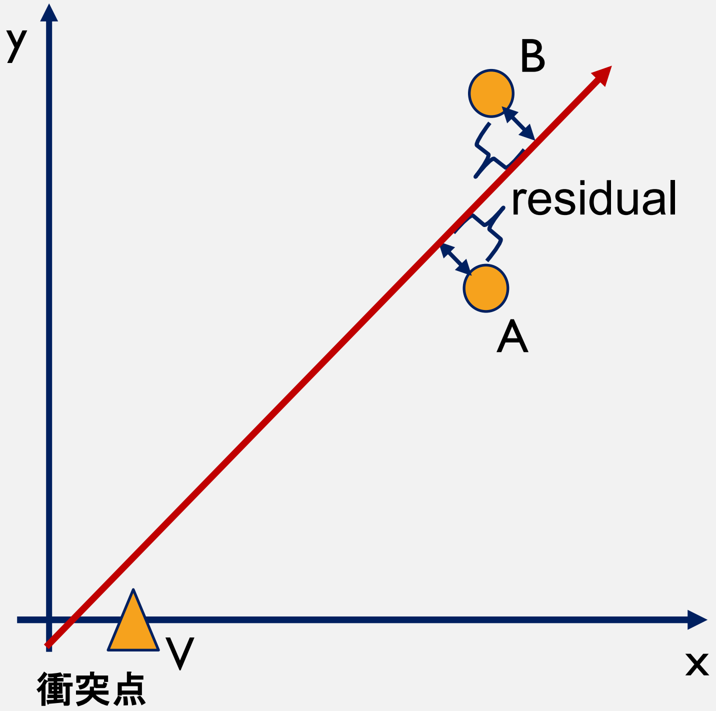
↓

INTT検出器では粒子の運動量などの性質を知りたい
運動量を求めるためには半径が必要

↓

アラインメントがずれると正しい曲率半径を求めることができないためこの検証が必要である。

研究目的：アラインメント検証



粒子が通った飛跡を再構成するため
検出器のヒット位置A, Bと衝突点の３点で
最小二乗法を使って線をひく

A：インナーレイヤーのヒット位置
B：アウターレイヤーのヒット位置

⇩

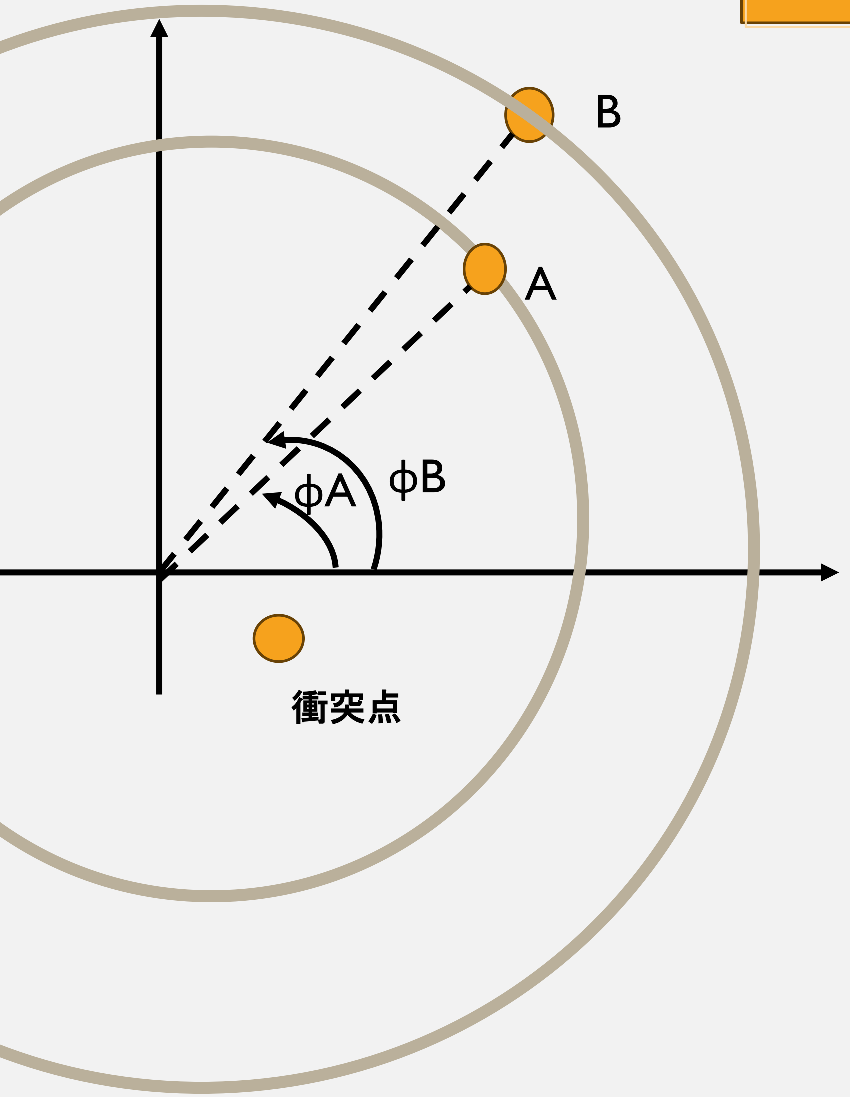
A, Bでズレ（residual）が生じる
residual　：点A, Bと再構成した飛跡の距離

⇩

<u>residualを解析し、INTTのラダーが</u>
<u>どれだけずれている位置にあるのか検証する</u>

研究方法

トラッキング



使用しているデータ：磁場なしAu-Au衝突(200GeV)の実験データ,イベント数2000
(磁場なしは粒子が曲がらないのでアラインメント検証しやすい)

1.インナーレイヤー、アウターレイヤーの
クラスターのペアを決める（A,Bとする）

2.トラックごとにA,Bを線で繋ぐ（トラックレットとする）

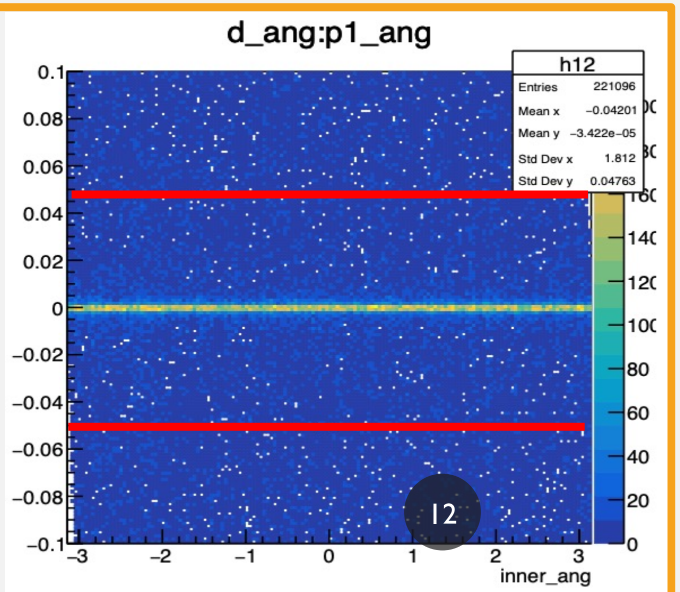
3.平均衝突点を決める

4.3点で最小二乗法を用いて飛跡を再構築

トラックレットを選ぶ際にカットする条件

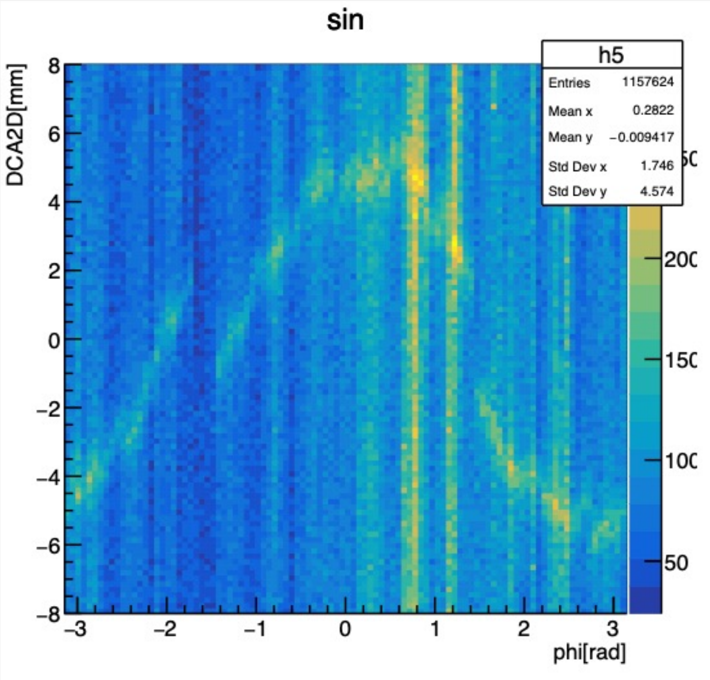
$|\phi A-\phi B|<0.05[\mathrm{rad}]$

ϕA-ϕBとϕAの相関→



平均衝突点の求め方

衝突点(0,0)でのdca2dとϕAの相関

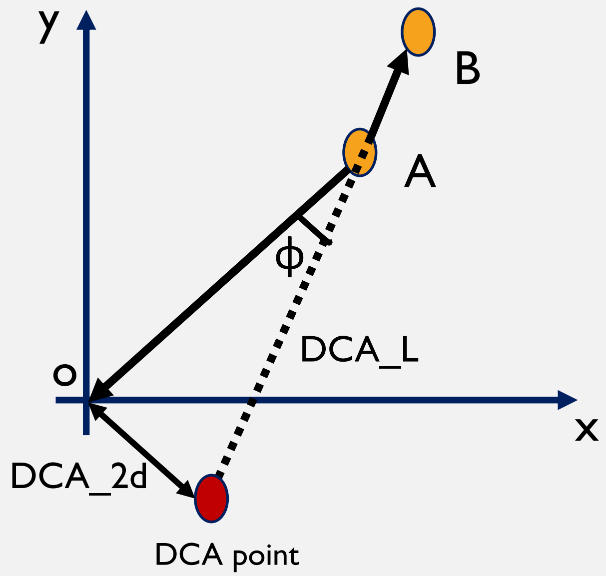


- rsin(x-α)とおいてsinカーブをfitting
- **平均衝突点(x,y)は**
  x＝rcos(α), y=-rsin(α)で求められる

DCA_2dとは

原点とそれぞれのトラックレットの最近接距離
→ 衝突点がわかっていないため原点との距離を計算

xy平面



$$\vec{u} = \frac{AB}{|AB|}, \vec{v} = AO$$

$$DCA\_2d = \vec{v} \times \vec{u} = \vec{v} sin\phi$$

カット

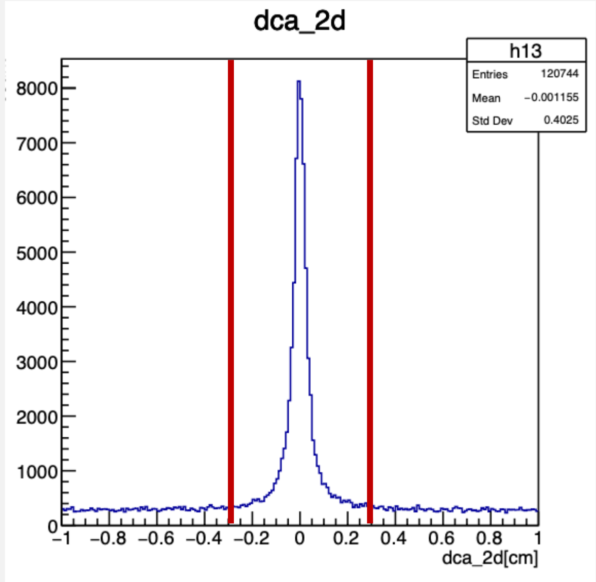
residual分布を解析するのに以下の３つのカットを行った

1.クラスター数のカット

クラスター数が1000以上
のものをカット

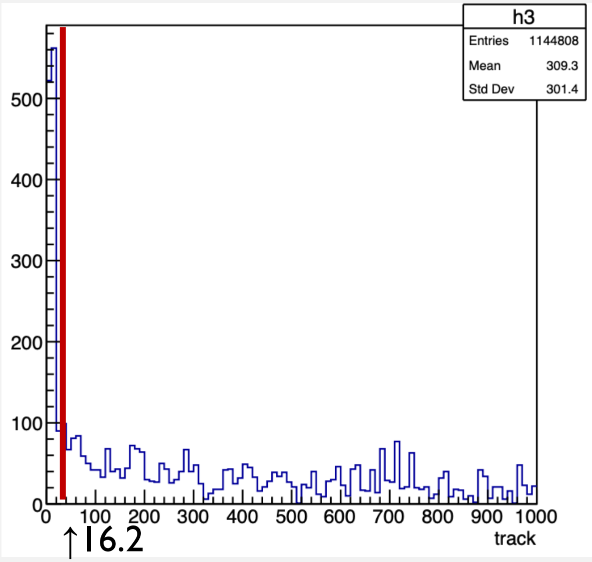
2. dca_2dのカット

σ=0.3023
赤線のように
±σ以上のものはカットした



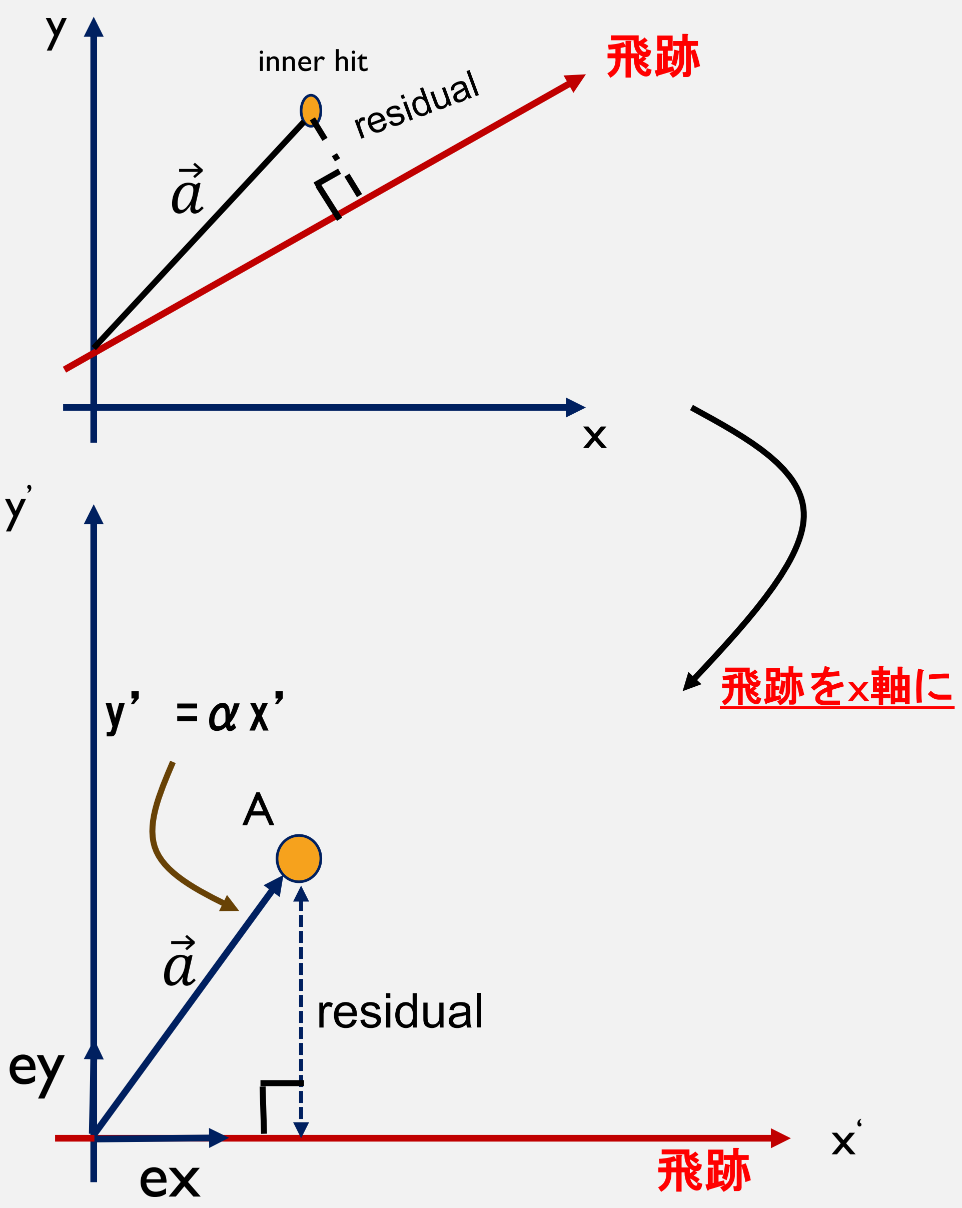
3. イベント毎のトラック数の少ない方から20%のみ

トラック数の多いイベントは
トラック数の少ないイベントより
も精度の悪いトラックが含まれる可能性が高いため



イベント毎のトラック数のヒストグラム

residualを計算



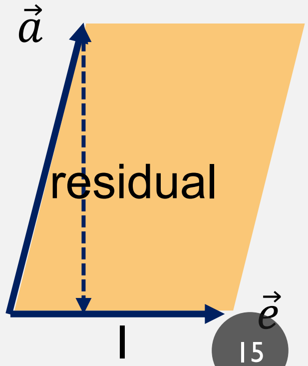
residualはaベクトルの垂直方向の射影である
residual = $\vec{a} \times \vec{e}$

衝突点からの飛跡をy' =αx' とし単位ベクトル$\vec{e}$を求める

$$\vec{e} = \frac{1}{\sqrt{(1^2 + \alpha^2)}}(1, \alpha)$$

$$ex = \frac{1}{\sqrt{(1^2 + \alpha^2)}}, \quad ey = \frac{\alpha}{\sqrt{(1^2 + \alpha^2)}}$$

外積は黄色の面積を表すが
単位ベクトルにすることで
面積とaベクトルの射影が等しくなる



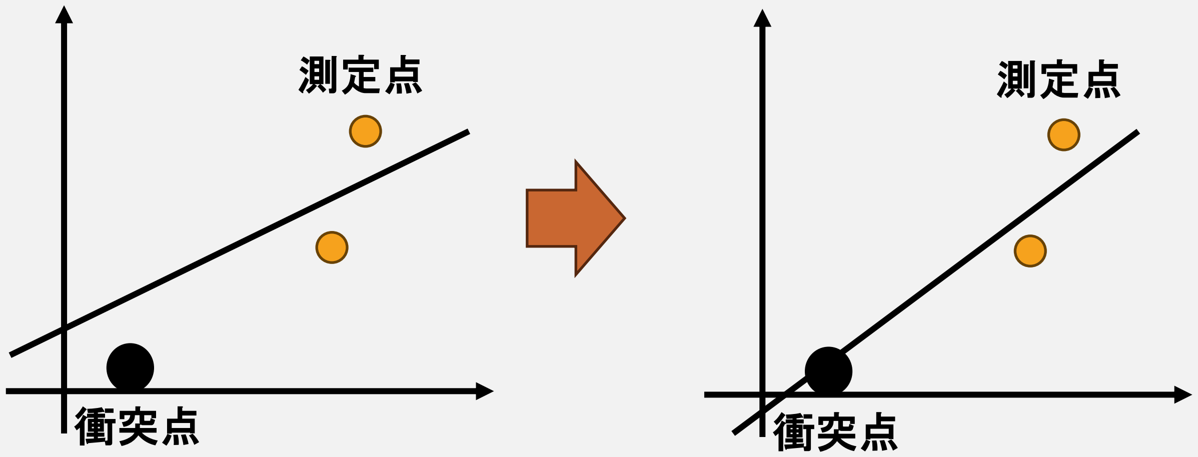
研究結果

誤差の重みなしresidual分布

最小二乗法に誤差を重み付け

重み付けの目的

**測定点の誤差を衝突点より大きく設定して
衝突点を固定し、測定点のresidualを調べたい**



$$L = \sum \left(\frac{y_i - (ax_i + b)}{\Delta s_i}\right)^2 \quad \Delta s_i\text{: 誤差}$$

a,bでLを偏微分しLが最小となるa,bを求めたいので0とする

$$\frac{\partial \mathrm{L}}{\partial a} = \sum \left(-\frac{2y_i x_i}{\Delta {s_i}^2} + \frac{2ax_i^2 + 2bx_i}{\Delta {s_i}^2}\right) = 0 \qquad \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial b} = \sum \left(-\frac{2y_i}{\Delta {s_i}^2} + \frac{2ax_i + 2b}{\Delta {s_i}^2}\right) = 0$$

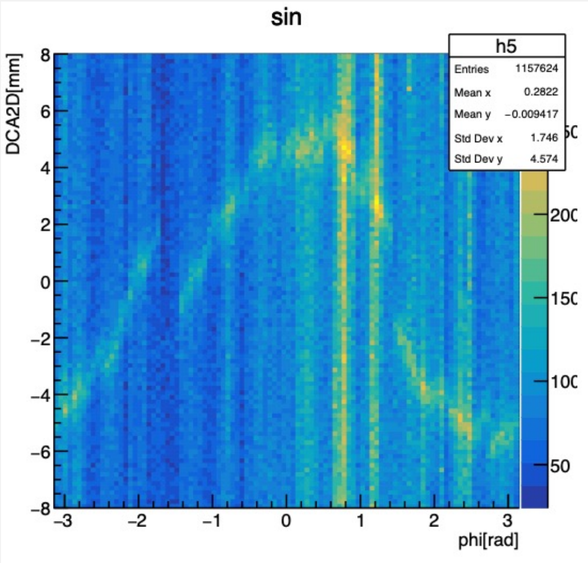
$$\boxed{\begin{pmatrix} \sum \frac{x_i^2}{\Delta {s_i}^2} & \sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2} \\ \sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2} & \sum \frac{1}{\Delta {s_i}^2} \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \frac{x_i y_i}{\Delta {s_i}^2} \\ \sum \frac{y_i}{\Delta {s_i}^2} \end{pmatrix}$$

色のついた行列の逆行列を両辺に左からかけると
a,bを求めることができる(a:飛跡の傾き,b:飛跡のy切片)

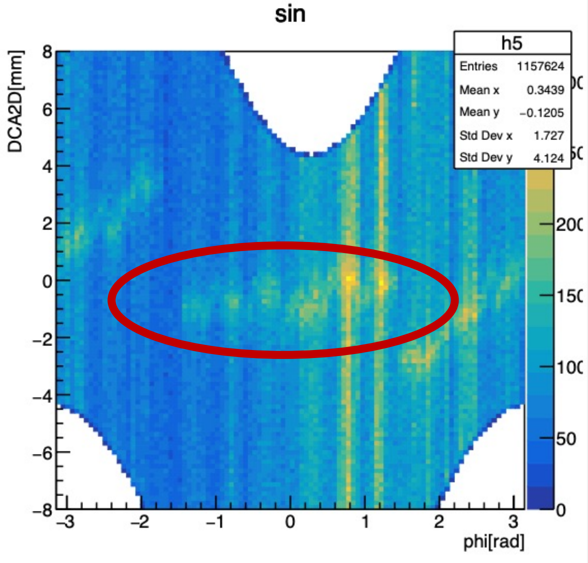
$$a = \frac{\sum \frac{1}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{x_i y_i}{\Delta {s_i}^2} - \sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{y_i}{\Delta {s_i}^2}}{\sum \frac{{x_i}^2}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{1}{\Delta {s_i}^2} - \left(\sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2}\right)^2} \qquad b = \frac{-\sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{x_i y_i}{\Delta {s_i}^2} + \sum \frac{x_i^2}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{y_i}{\Delta {s_i}^2}}{\sum \frac{{x_i}^2}{\Delta {s_i}^2} \sum \frac{1}{\Delta {s_i}^2} - \left(\sum \frac{x_i}{\Delta {s_i}^2}\right)^2}$$

衝突点の誤差を求める方法

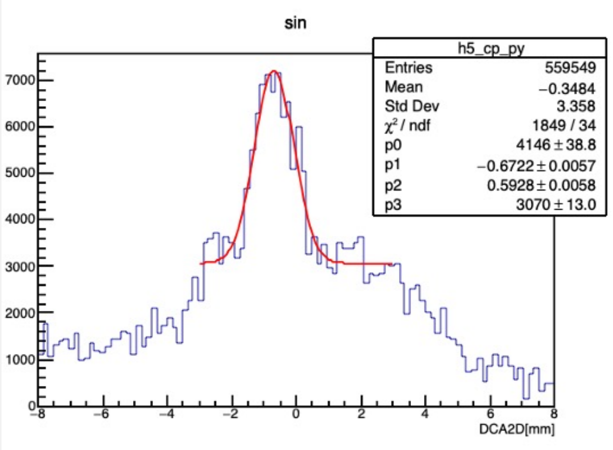
衝突点(0,0)でのdca2dとphiの相関



平均衝突点(-0.780972,5.62854)での dca2dとphiの相関



左図をy軸に射影



- sinカーブをfitting
- sinカーブをrsin(x-α)で求める
- 平均衝突点(x,y)は
  x＝rcos(α), y=-rsin(α)

- 左図の赤い印のところにgausをフィッティング
- 衝突点の誤差→0.5928[mm]

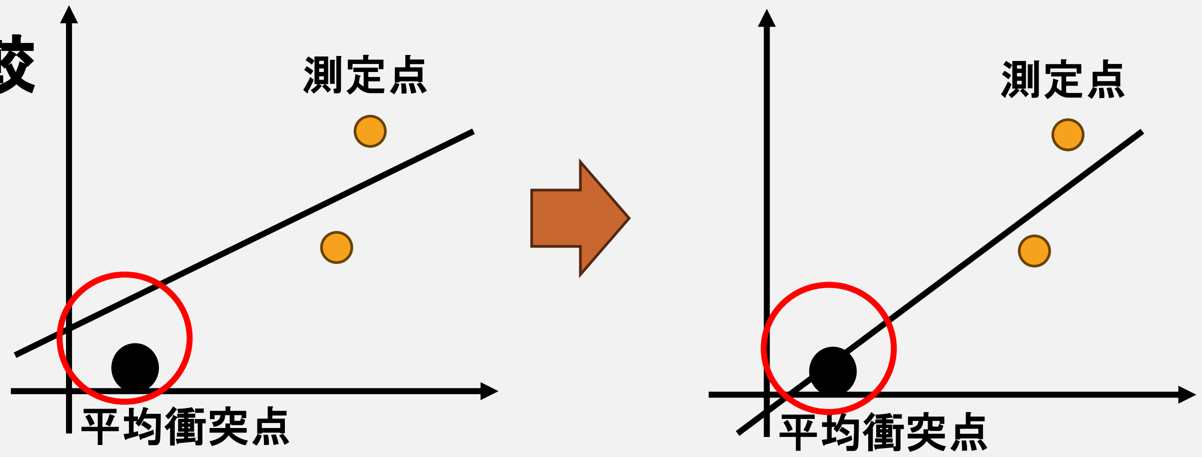
$$a = \frac{\sum \frac{1}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{x_i y_i}{\Delta s_i{}^2} - \sum \frac{x_i}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{y_i}{\Delta s_i{}^2}}{\sum \frac{x_i{}^2}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{1}{\Delta s_i{}^2} - \left(\sum \frac{x_i}{\Delta s_i{}^2}\right)^2} \qquad b = \frac{-\sum \frac{x_i}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{x_i y_i}{\Delta s_i{}^2} + \sum \frac{x_i^2}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{y_i}{\Delta s_i{}^2}}{\sum \frac{x_i{}^2}{\Delta s_i{}^2} \sum \frac{1}{\Delta s_i{}^2} - \left(\sum \frac{x_i}{\Delta s_i{}^2}\right)^2}$$

Δs_iに以下の誤差を代入

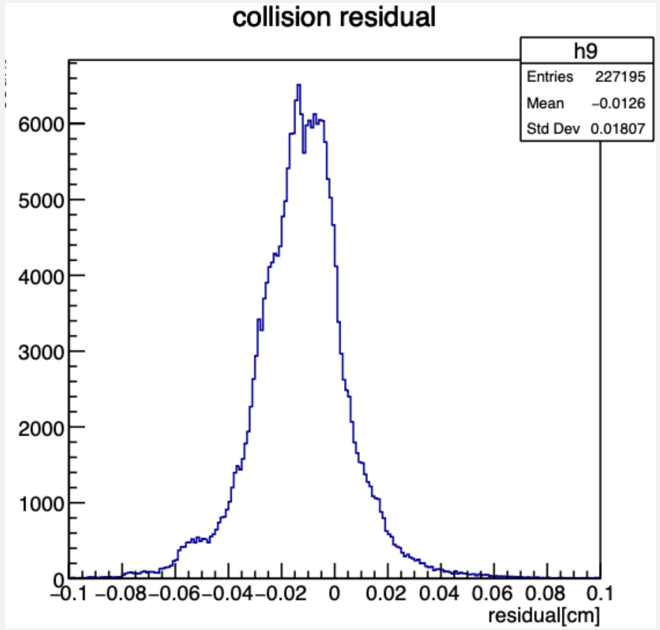
測定点の誤差：$\frac{78}{\sqrt{12}}[\mu m] \rightarrow 1[cm]$

衝突点の誤差：0.05298[cm]

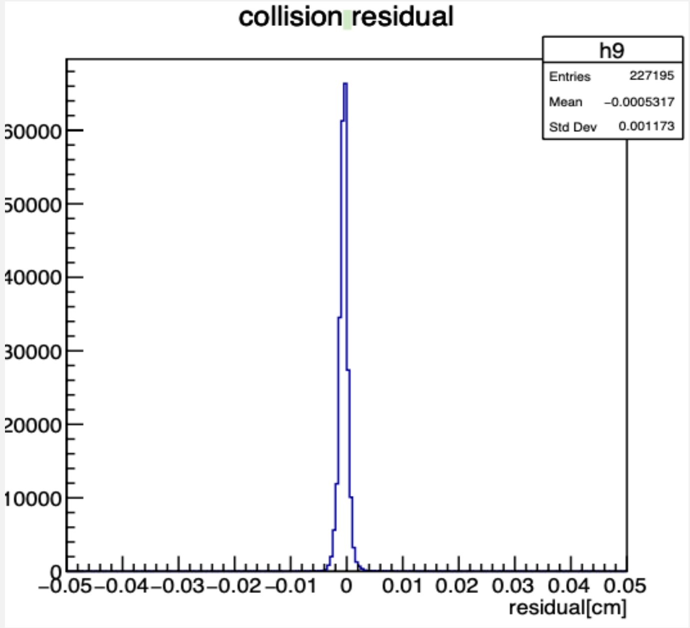
重み付け前後の平均衝突点のresidualを比較



before



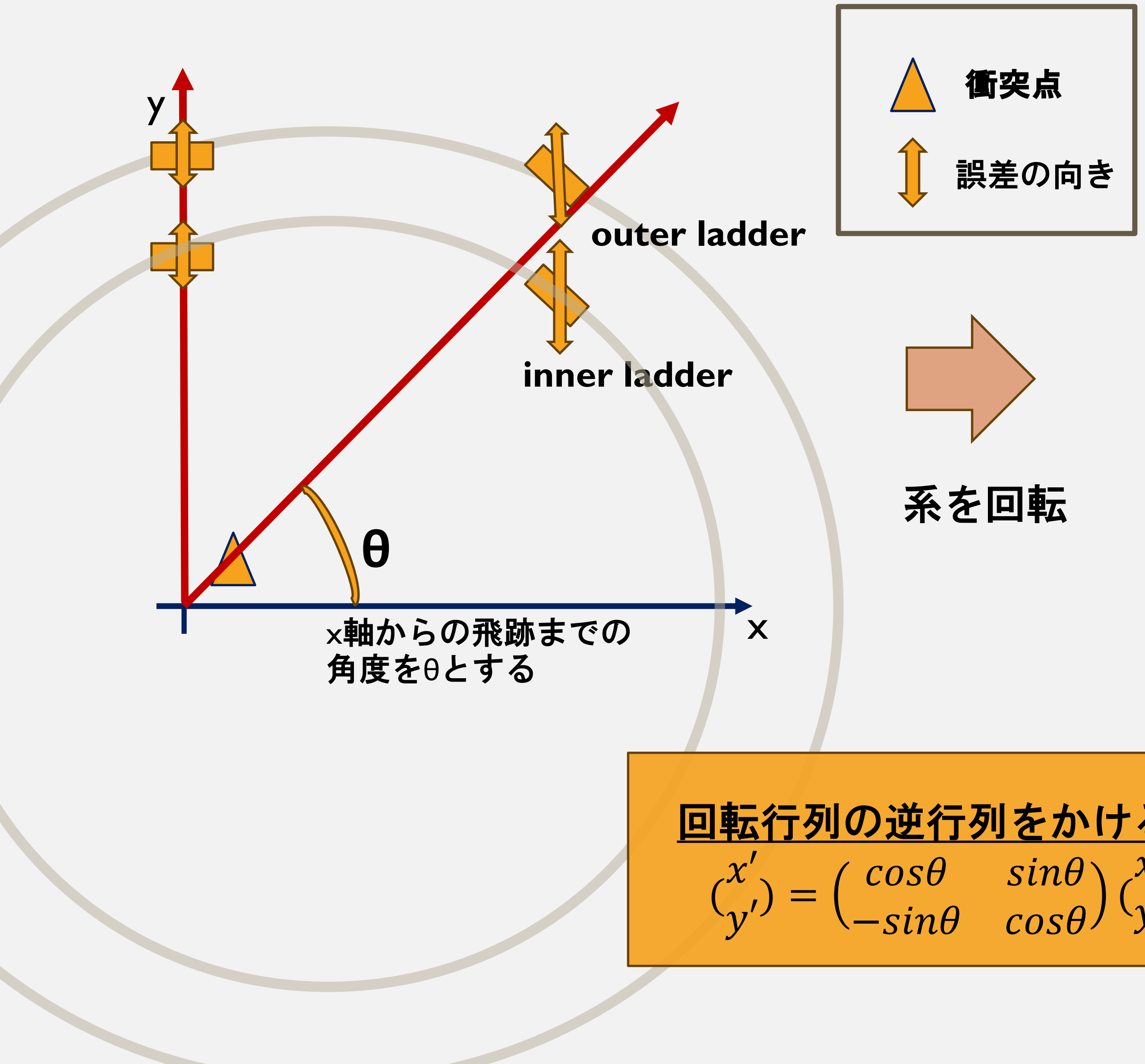
after



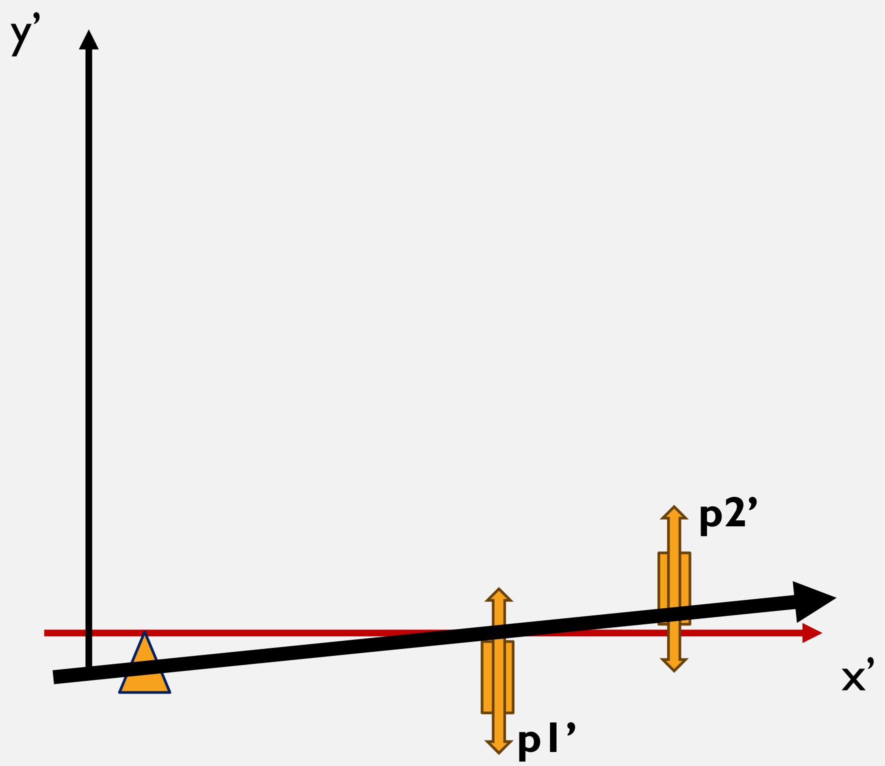
値が小さくなっており
衝突点を固定できている

座標変換

課題：y方向にしか誤差がないので垂直方向の飛跡の誤差正しく評価できていない



系を回転

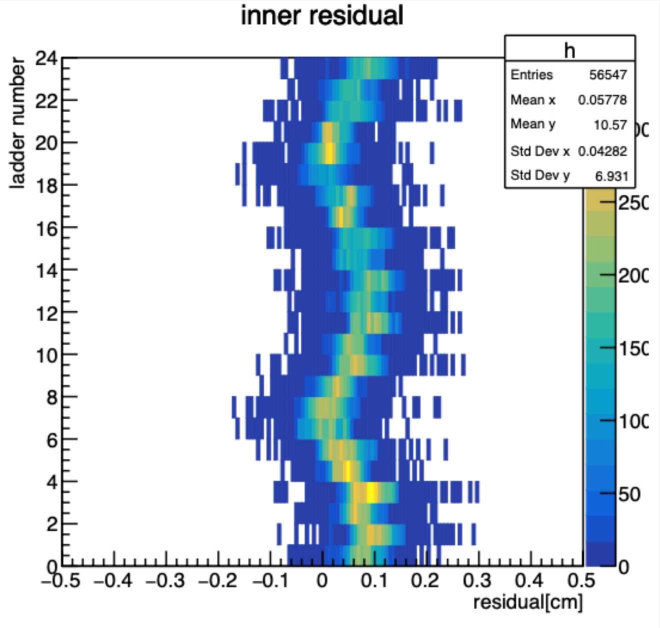


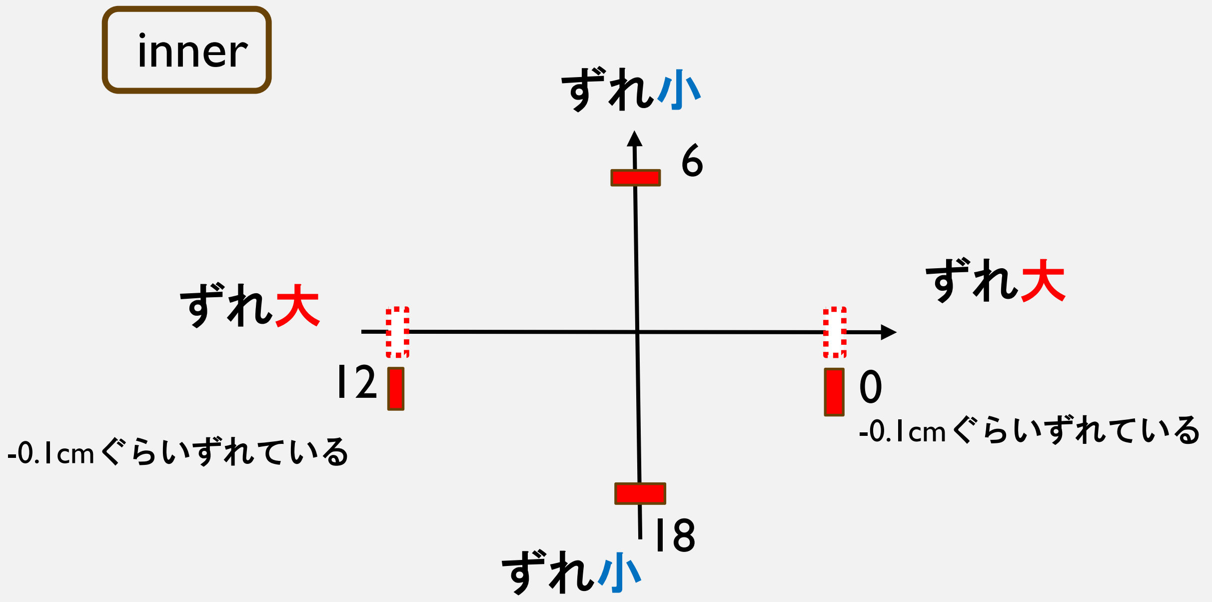
回転行列の逆行列をかける

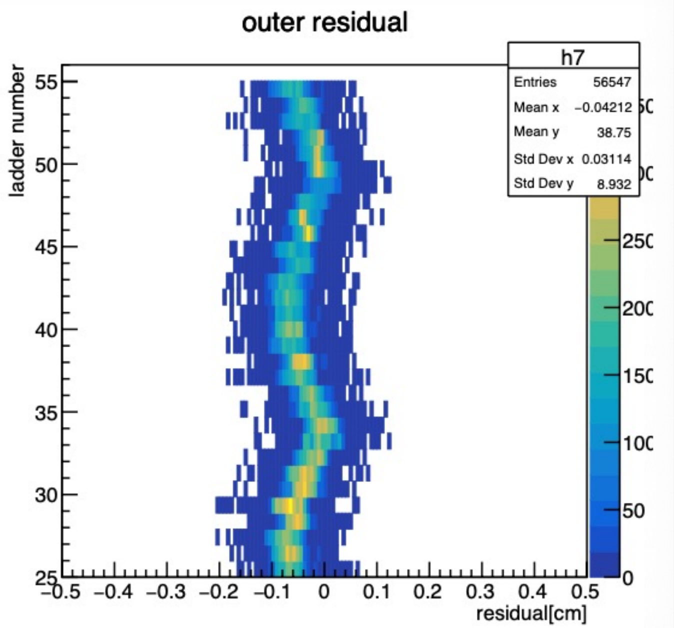
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

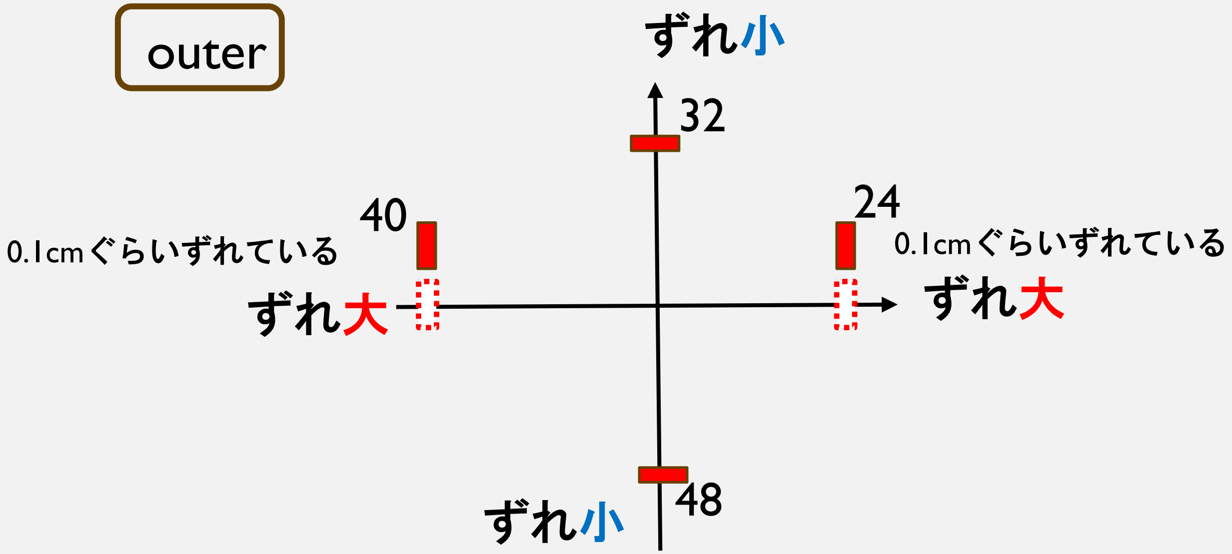
それぞれ回転させてx'軸に揃えることで誤差の範囲が等しいかつ最大になる

結果







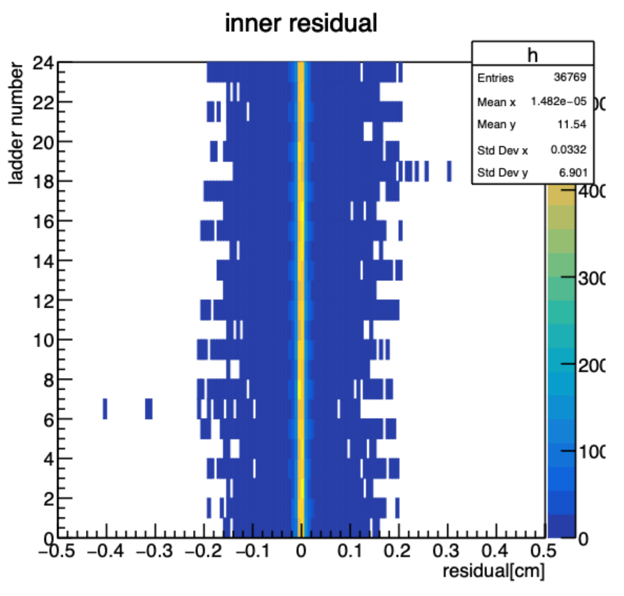


y軸に近いラダーはresidualが小さく、x軸に近いラダーはresidualが大きくなる

シミュレーション　衝突点(0,0)で正しいときと衝突点がずれている(0.5,0),(0,0.5)の場合のresidual分布を比較

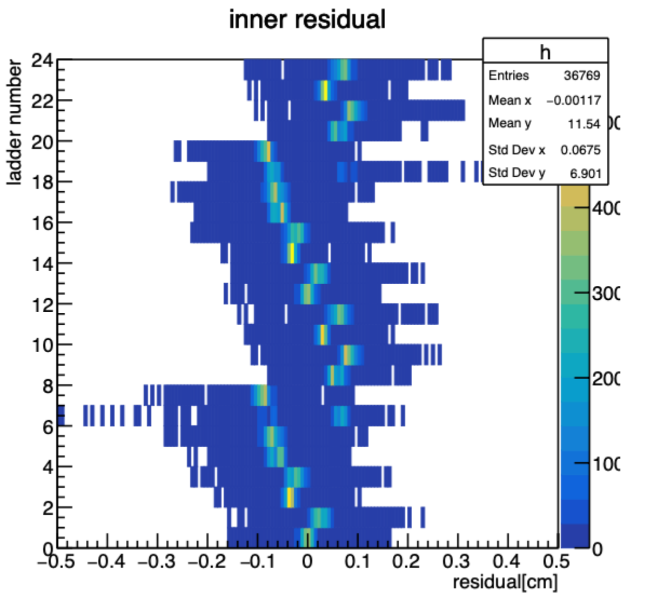
衝突点

衝突点(0,0)



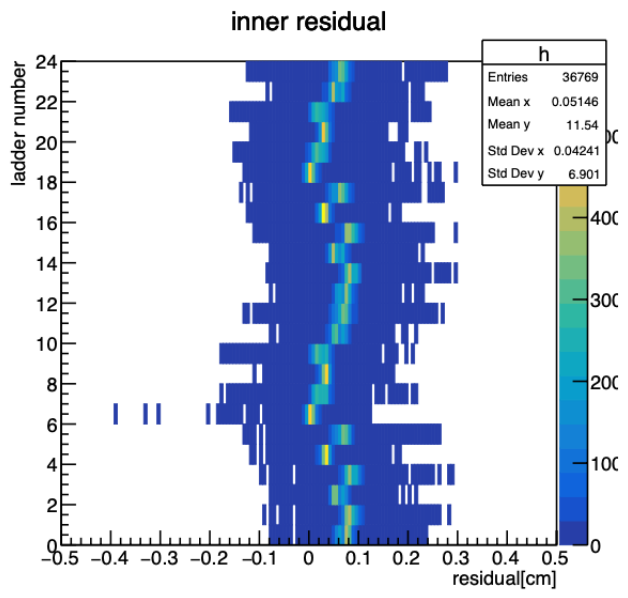
ずれがない

衝突点(0.5,0)
（x方向にずらした）



斜めにずれている

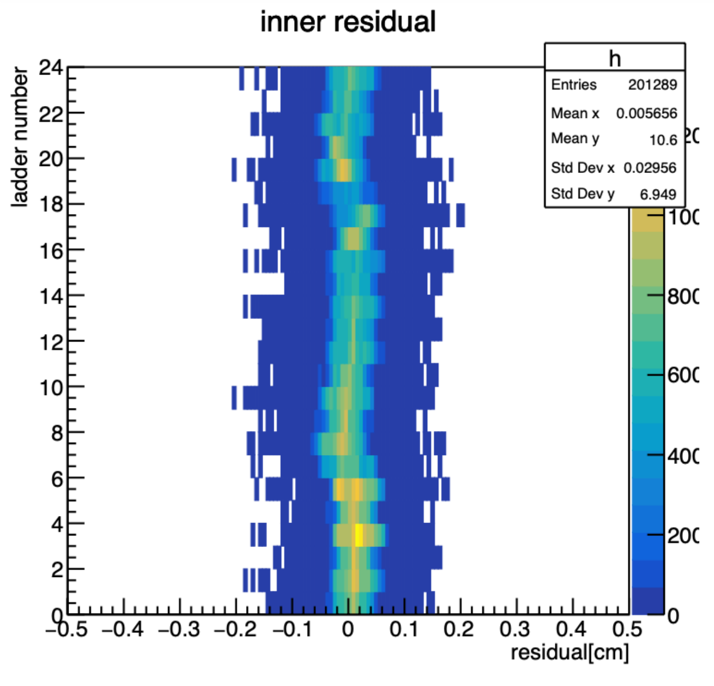
衝突点(0,0.5)
（y方向にずらした）

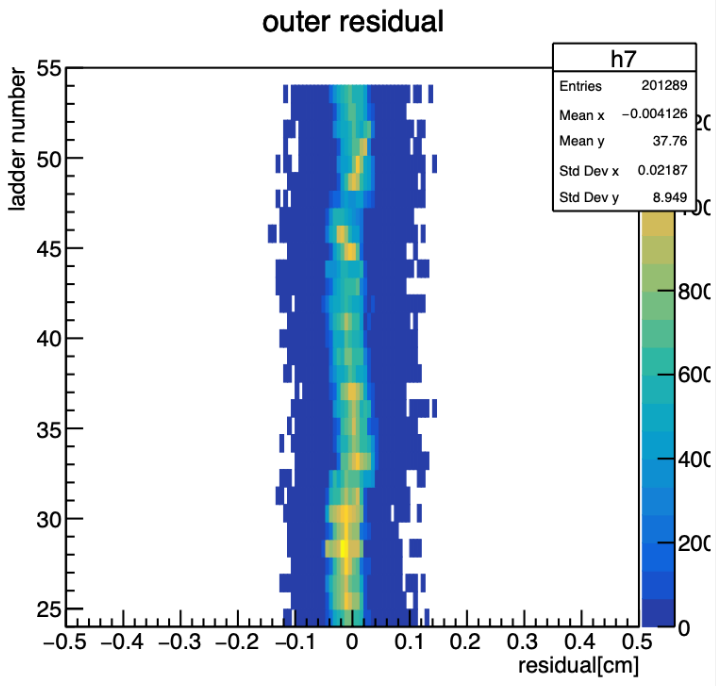


yに衝突点がずれている場合に
sinカーブが現れる

衝突点をy方向にずらす

衝突点(-0.0780972,0.062854)　←y座標を-0.5





sinカーブがなくなった

まとめ・今後の課題

まとめ・今後の課題

- 最小二乗法に誤差を重み付けをして測定点のresidualを調べることができた。

- ラダーはx軸に近づくほどresidualが大きくなっており、y軸に近づくほどresidualが小さい

- 検出器を置きたいと思っている場所と実際に置いている場所にどれだけずれがあるのか正確に知る必要がある
  →residualを正しく求めなければいけない
  →sinカーブの要因はy方向の衝突点がずれていると分かった

- residualを０にするために各ラダーごとのresidualを求める

BACK UP

クラスタリング

荷電粒子がシリコンセンサー内を斜めに通過した場合を考える

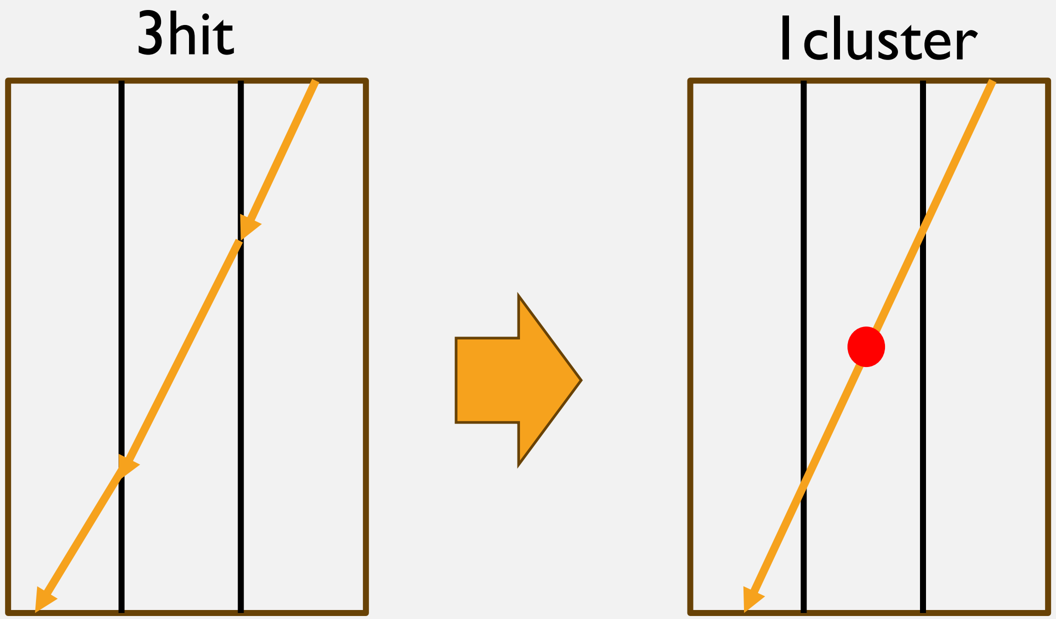
・斜めに通過した各channelにおいてそれぞれhitとして記録される

↓

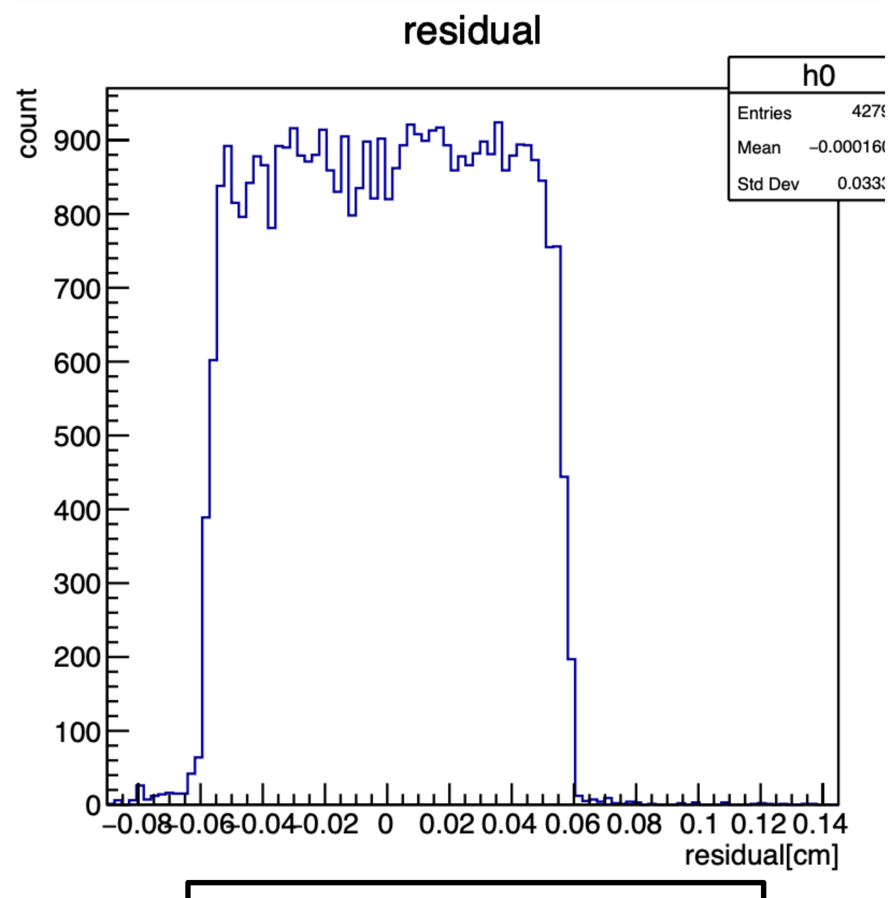
同じタイミングで同じラダーを通過したhitを１クラスターとして扱う

・損失エネルギー(ADC)で重みをつけクラスターの位置を求める

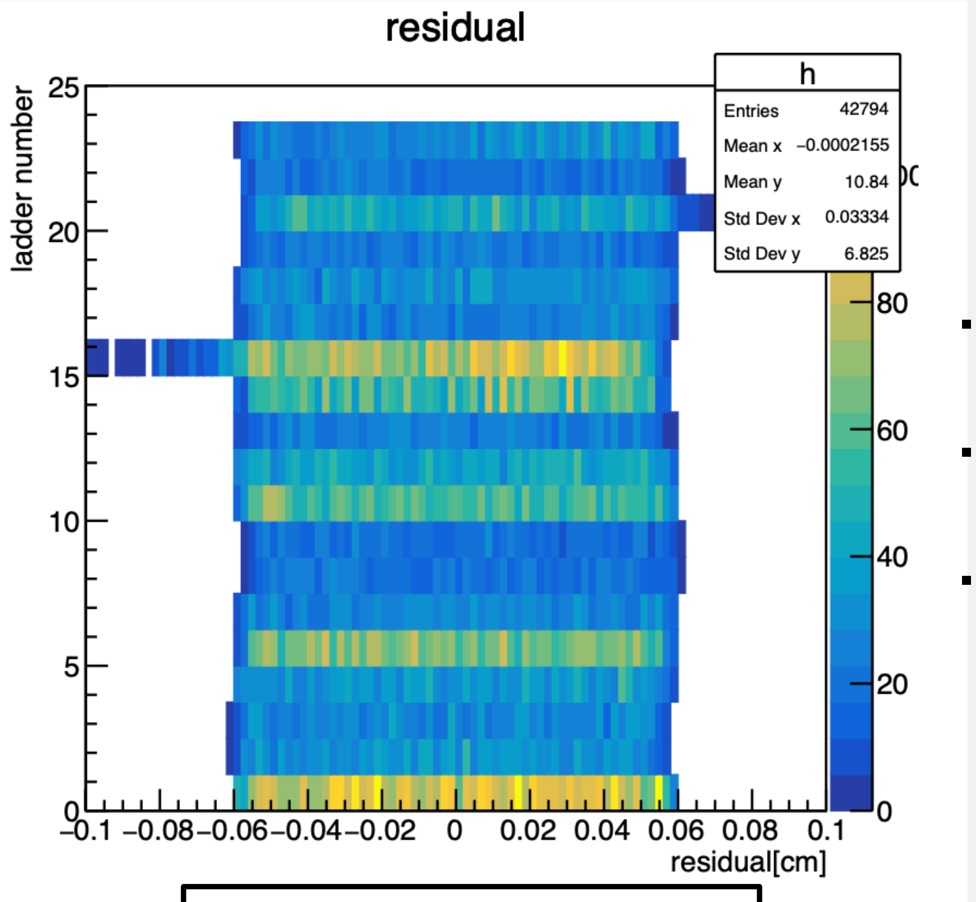
$$\text{クラスター位置} = \frac{\sum(ADC_i \times \text{ヒット位置})}{\sum ADC_i}$$



ヒストグラムに描画



residual分布
（一次元ヒストグラム）



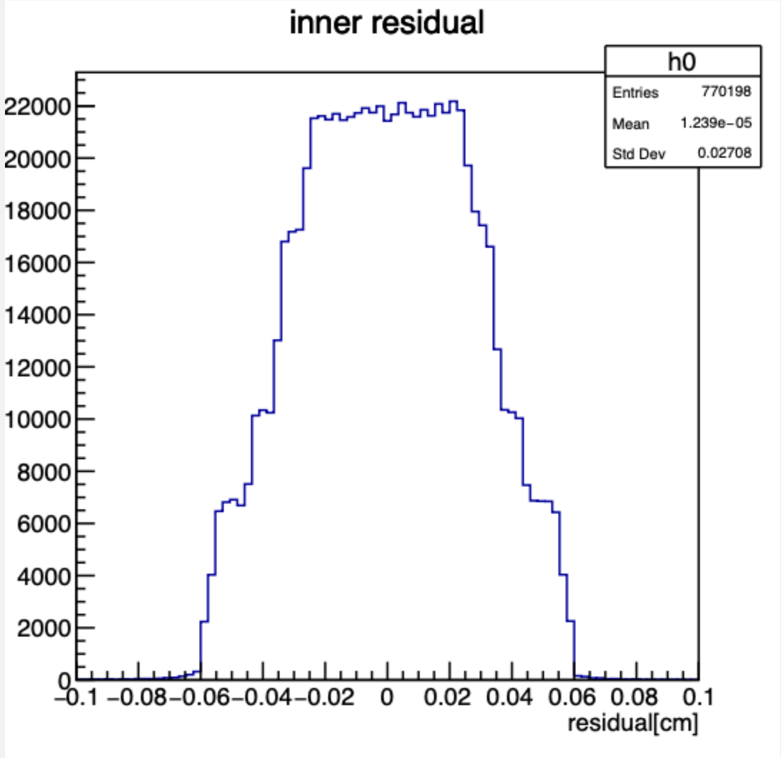
ラダーごとのresidual
(二次元ヒストグラム）

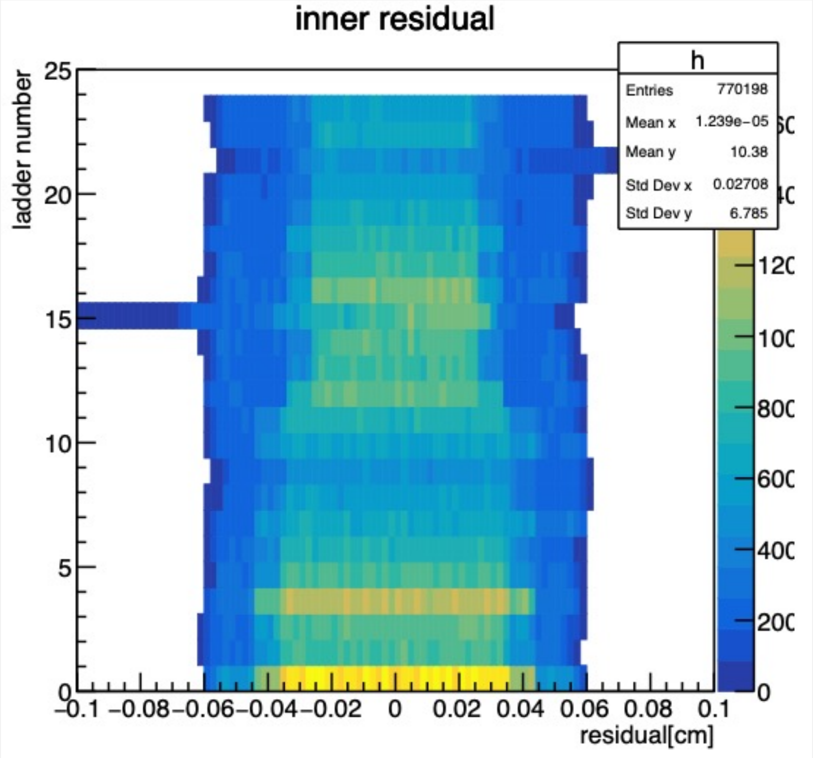
- ガウス分布になっていない
- Event数が少ない
- 0.06cmで値が切れている

residual分布

衝突点(0,0)

インナーレイヤー上のヒットと飛跡のresidualをヒストグラムに描画

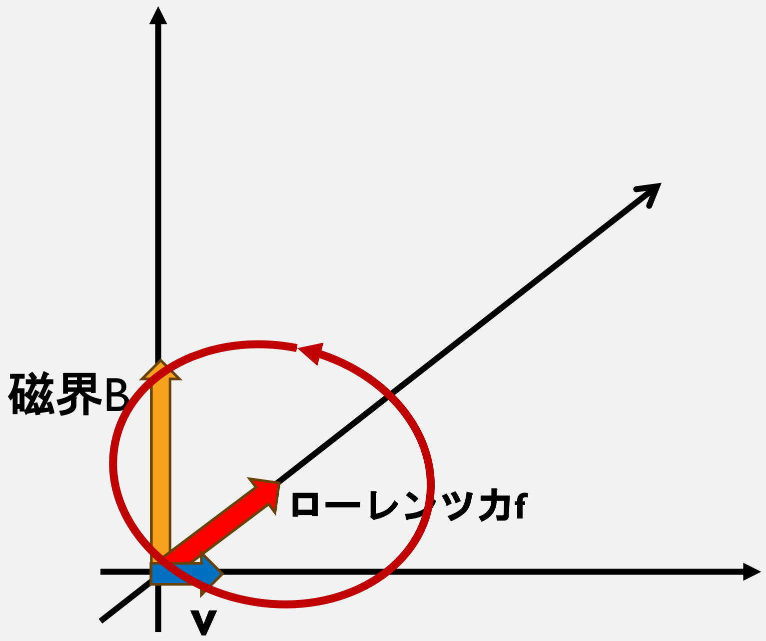




全イベントでの
residual分布

ラダーごとのresidual分布

運動量



遠心力＝ローレンツ力

$$m\frac{v^2}{r} = \mathrm{qvB}$$

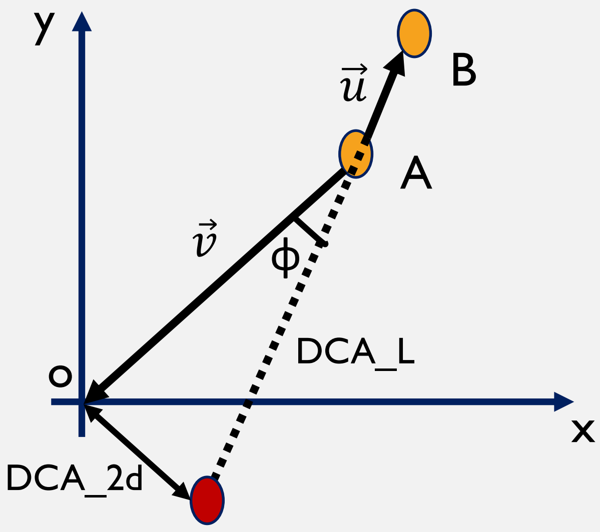
$$\mathrm{pc} = \mathrm{mvc} = \mathrm{qBrc}$$

運動量はrが分かれば求められる

DCAについて

DCA_2d：原点とそれぞれのトラックレットの最近接距離
→ 衝突点がわかっていないため原点との距離を計算
DCA_L：DCAとインナーレイヤー上のクラスターAとの距離

xy平面

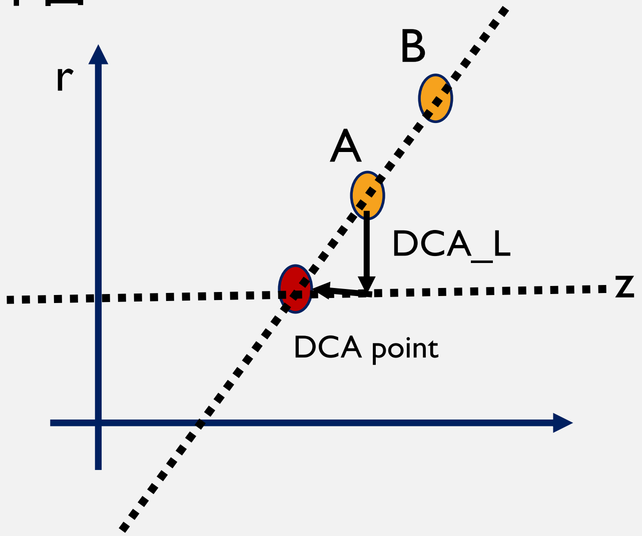


$$\vec{u} = \frac{AB}{|AB|}, \vec{v} = AO$$

$$DCA\_2d = \vec{v} \times \vec{u} = \vec{v} sin\phi$$

$$DCA\_L = \vec{v} \cdot \vec{u} = \vec{v} cos\phi$$

rz平面

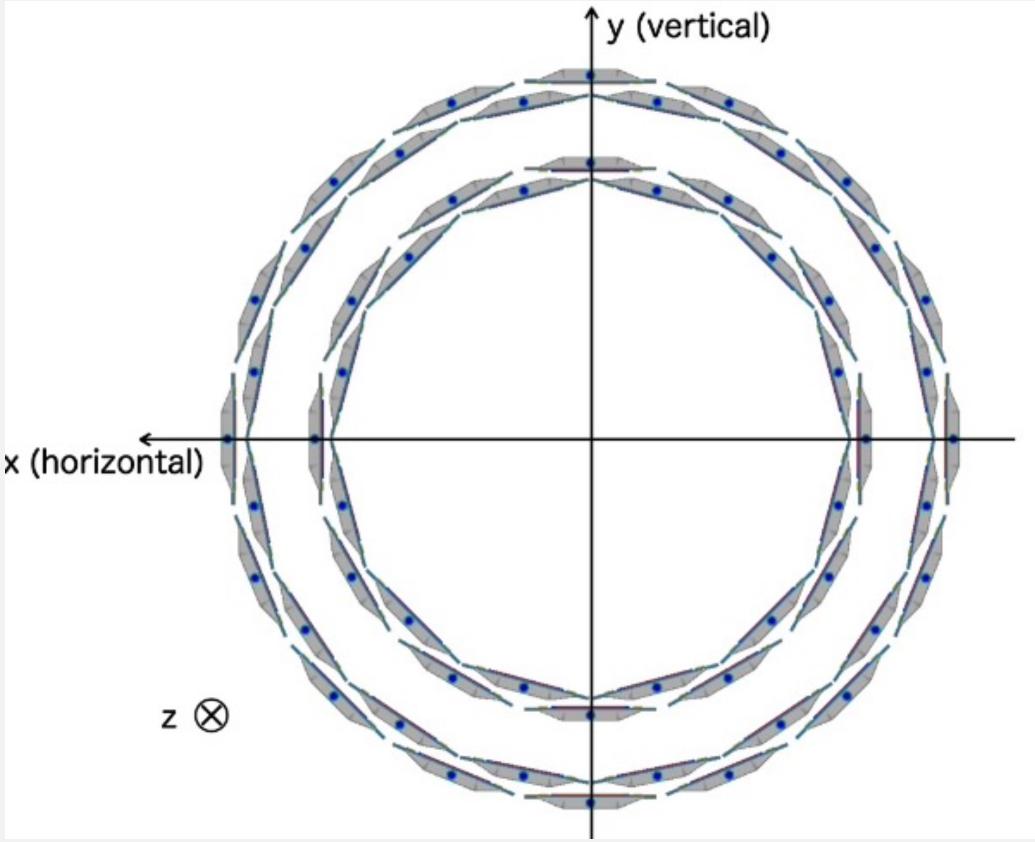


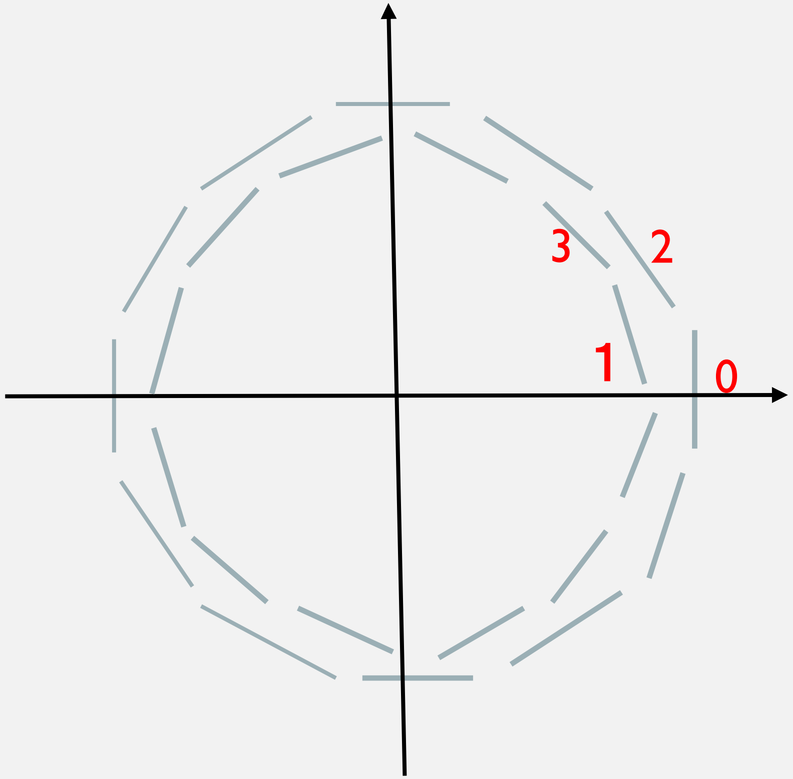
DCA point (x,y,z)
DCA_Lを用いてx,y,z座標を求める

$$x = DCA_L \cdot ux + Ax$$

$$y = DCA_L \cdot uy + Ay$$

ラダー番号



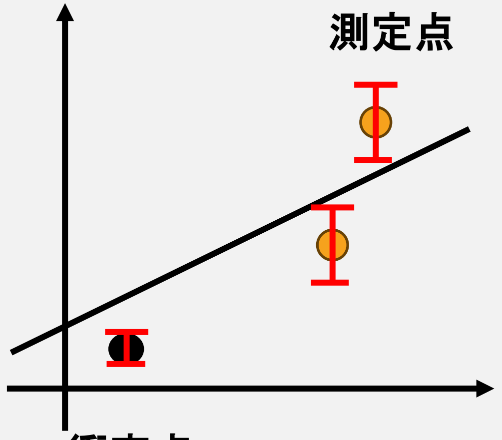


inner ladderを拡大した図

y方向の誤差のみ重み付け

最小二乗法

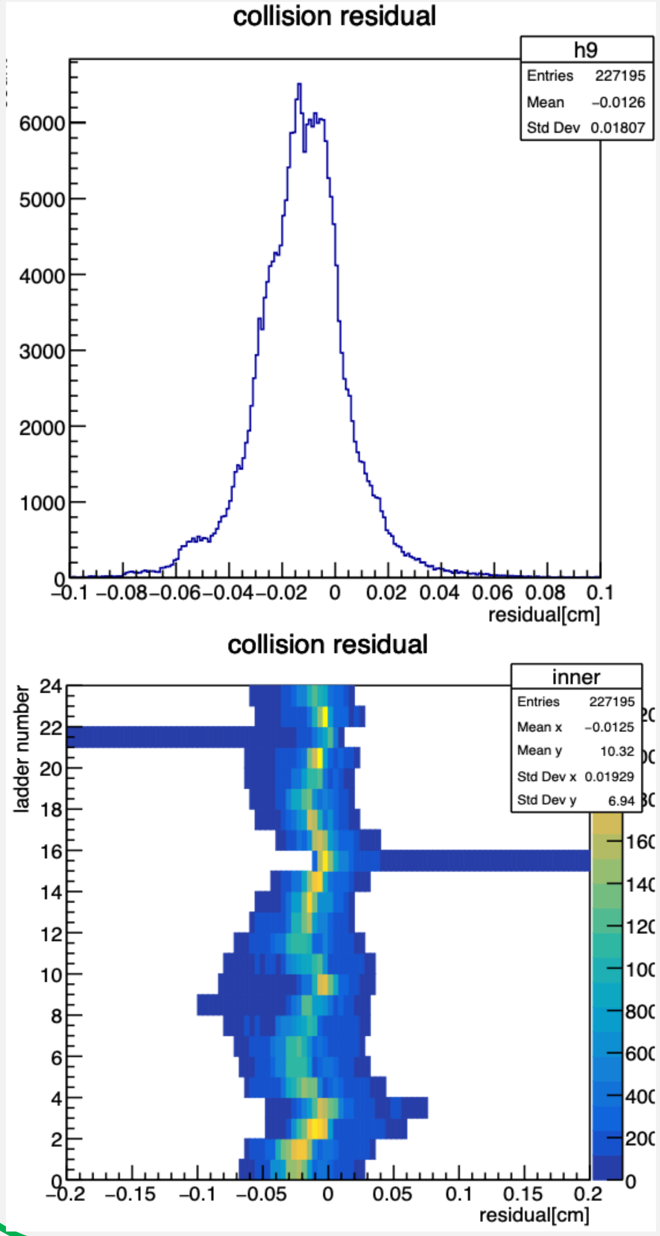
$$L = \sum \left(\frac{y_i - (ax_i + b)}{\Delta s_i}\right)^2$$



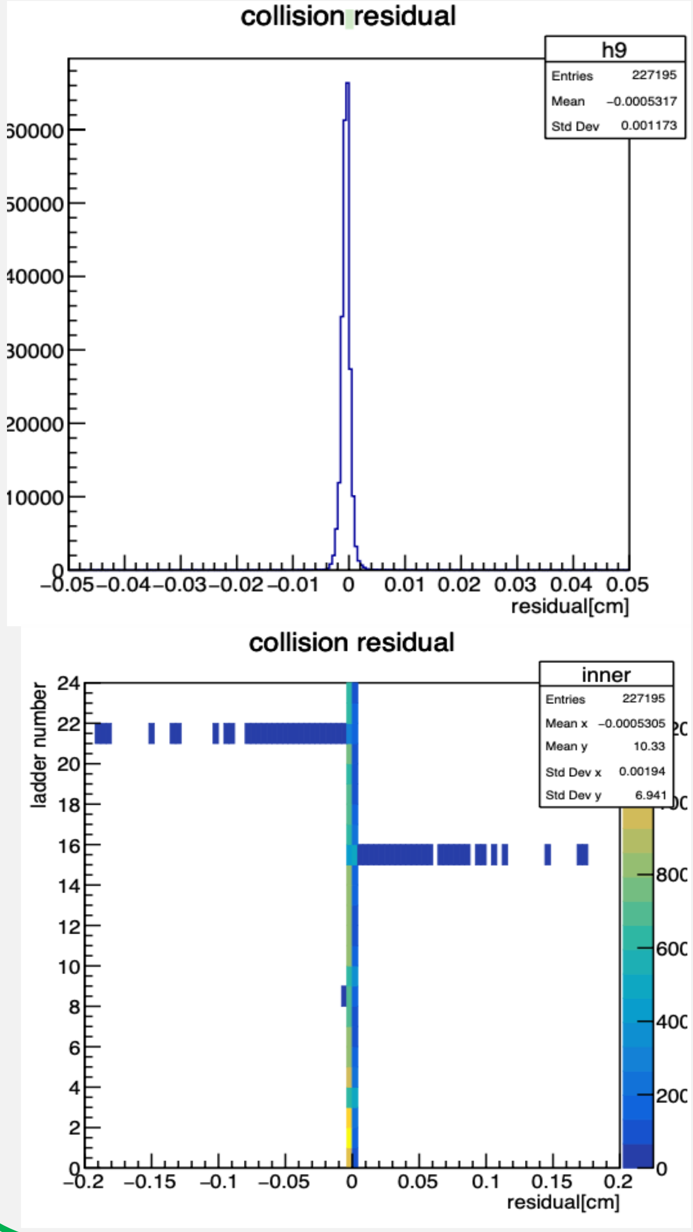
点と飛跡の距離Lはy座標の差で求まるので
重み付けする誤差もy方向につける

重み付け前後の衝突点のresidualを比較

before



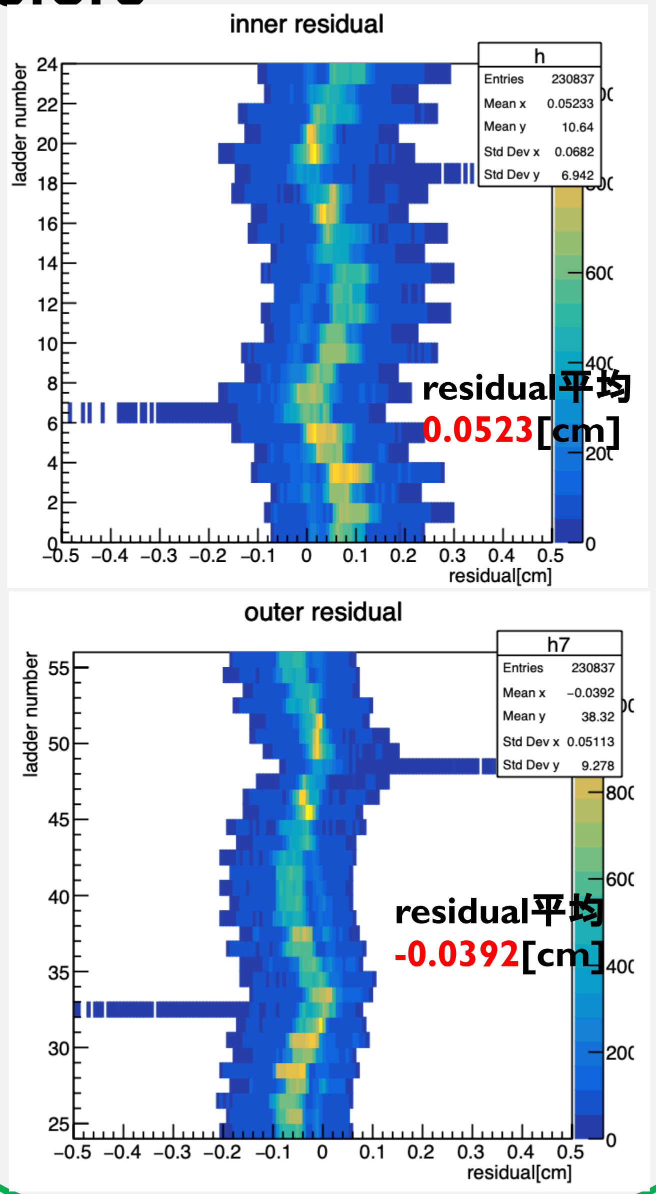
after



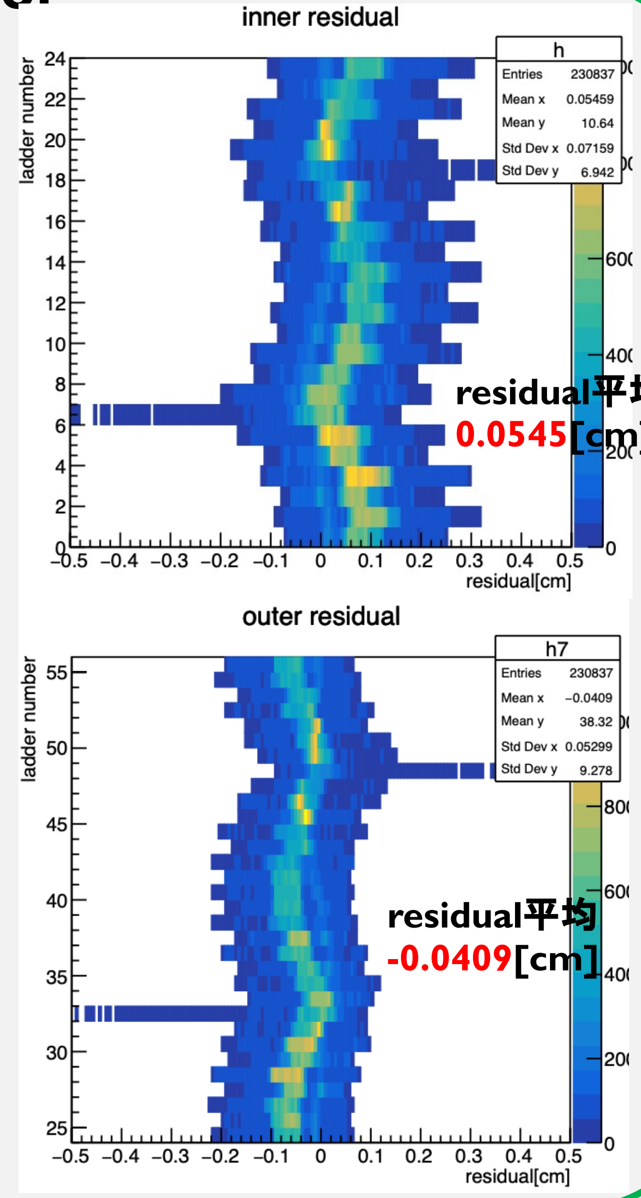
値が小さくなっており
衝突点を固定できている

重み付け前後のresidual分布の比較

before



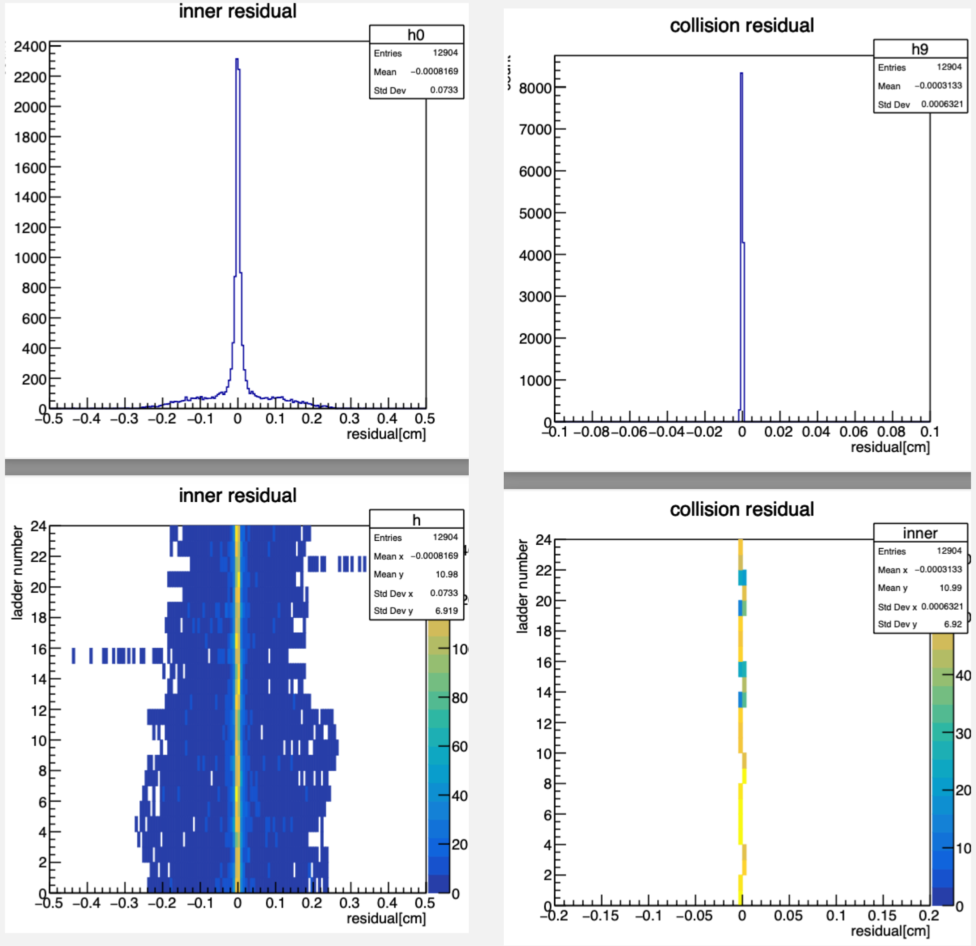
after



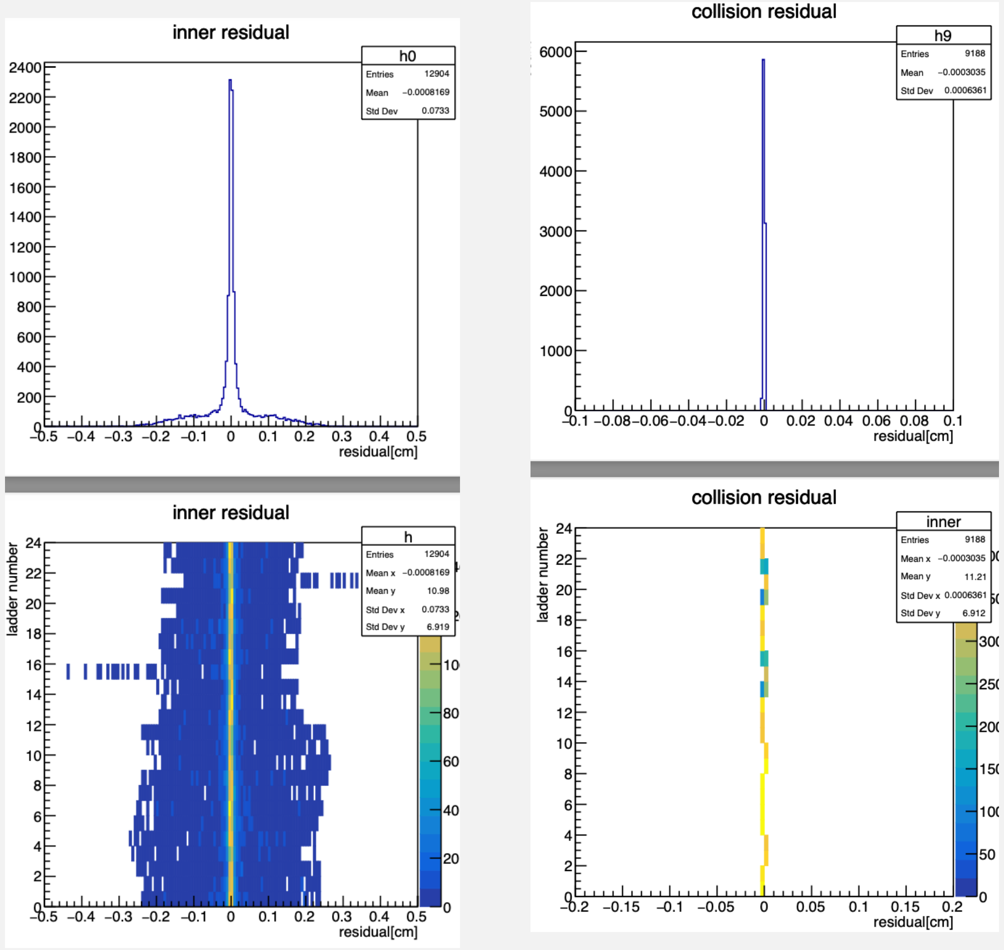
- あまり変化が見られない
- 重み付けの方が少し値が大きい
- sinカーブが見られる

シミュレーションで確認

重み付け前

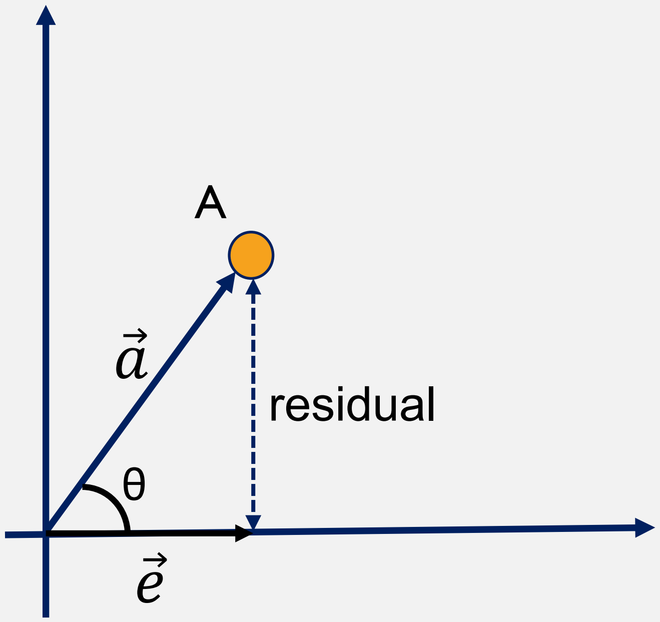


重み付け後



0付近に分布が集まっており計算コードは合っている

residualの値　＜正・負の区別＞



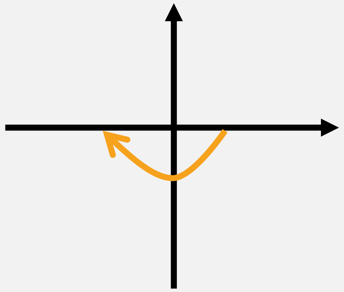
$\vec{a}\times\vec{e}$を計算しているのでθの向きは**反時計回り**になる

$$residual = a sin\theta$$

$$residual > 0, 0 \leq \theta \leq \pi$$

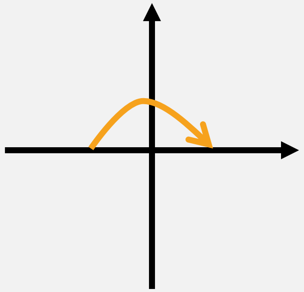
$$residual < 0, \pi \leq \theta \leq 2\pi$$

$0 \leq \theta \leq \pi$



residual>0

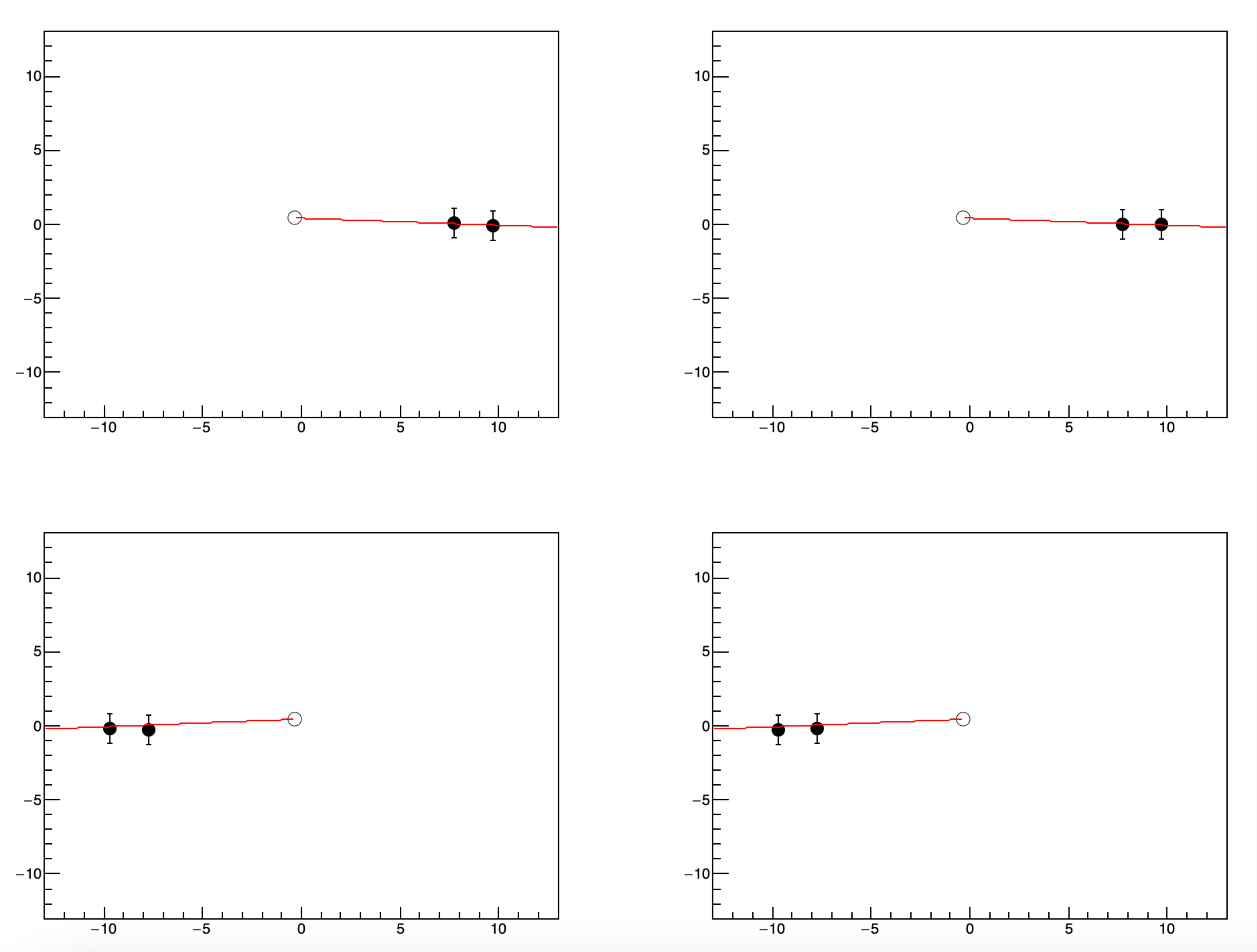
$\pi \leq \theta \leq 2\pi$



residual<0

座標変換後の重み付けfitting

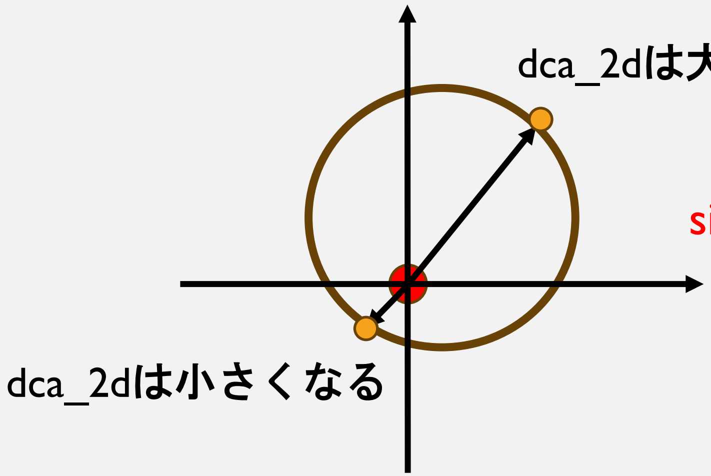
xy平面



sinカーブが見られる要因

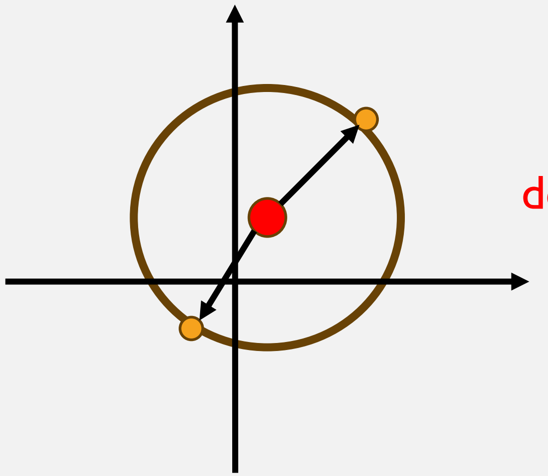
・衝突点の誤差の場合

衝突点がずれていると・・
(衝突点を原点としている)



sinカーブが現れる

正しい衝突点では・・



dca_2dは常に一定になる

・測定点のresidualの場合

dcaにsinカーブが出ないようにしているため
測定点のresidualの時にsinカーブが現れる