

$\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ のAuAu衝突における
衝突に関与した核子数と関与しな
かった核子数との相関についての研究

奈良女子大学 4年

大前愛華



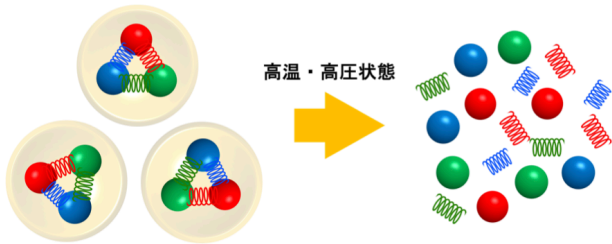
目次

1. 序章
2. 行なったことの概要
3. 解析手法(シミュレーションのセットアップ)
4. 結果
5. まとめ
6. 今後の課題

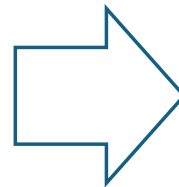
研究背景

QGP

- 核子を構成するクォークやグルーオンと呼ばれる素粒子が、高温高密度状態で核子の束縛から解放された状態。
- ビッグバンから数十 μ 秒後に存在したとされている。
- QGPの解明が宇宙の初期状態の解明につながる



QGPを生成して、その性質を調べたい

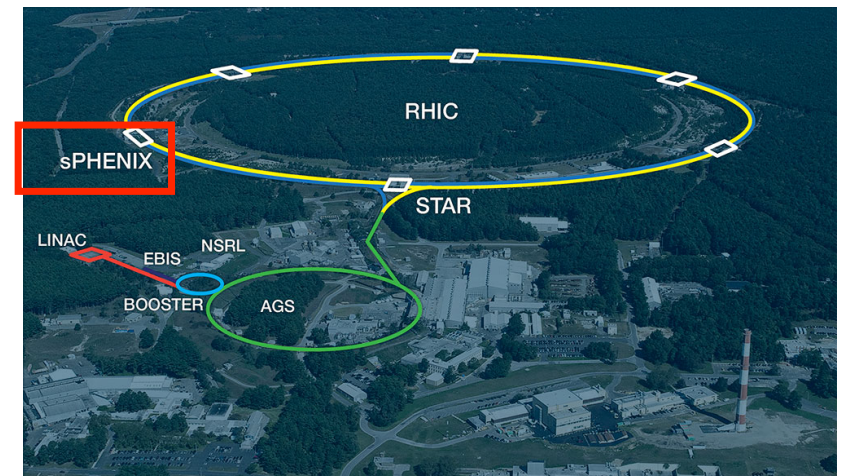


sPHENIX実験

ブルックヘブン国立研究所(BNL)にあるRHIC加速器を用いた実験。

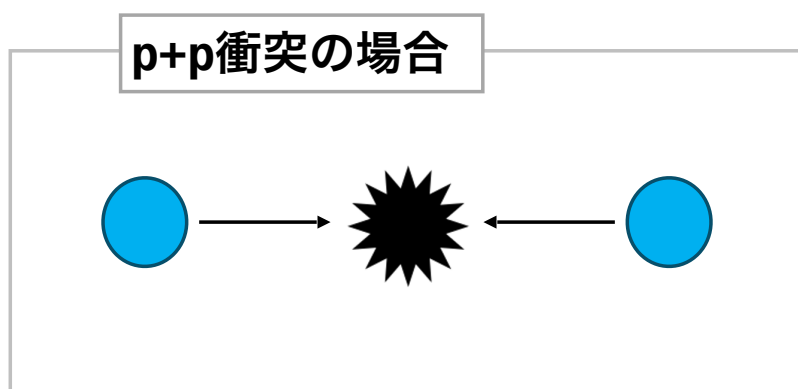
実験目的

金原子核や陽子などを加速器を用いて衝突させ、瞬間的にQGPを作り出し、その性質を解明すること。



pp衝突

反応に関与した核子数と発生粒子数の違い



反応に関与した核子数 (Npart) : 2

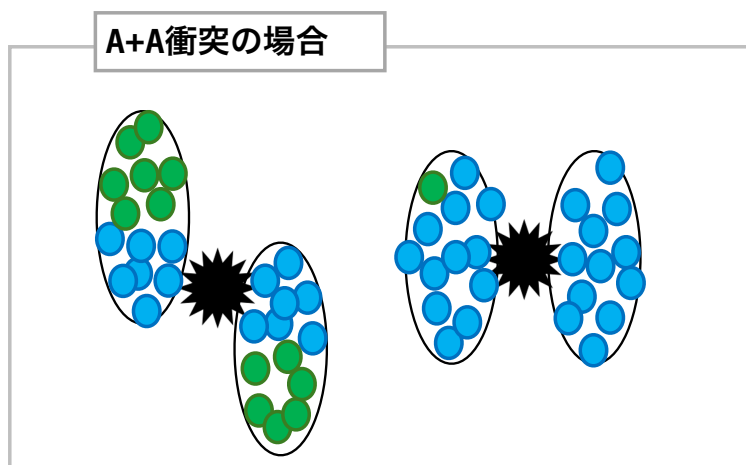
反応に関与した核子数 (Npart) が同じでも衝突によって発生粒子数が異なる。

発生粒子数が多いイベントのみを解析すると、発生粒子数でイベント選択を行わない時には見えない物理現象が見える。

引用元 : https://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/old_HP/thesis/master/2022takahama/2022takahama_master_presentation.pdf

原子核同士の衝突

反応に関与した核子数と発生粒子数の違い



反応に関与した核子数(N_{part})：イベントによって違う
 N_{part} が同じイベントでも発生粒子数が異なることで物理現象がどのように変わるのかを確認したい。

できるだけ正確に N_{part} を求めたい。

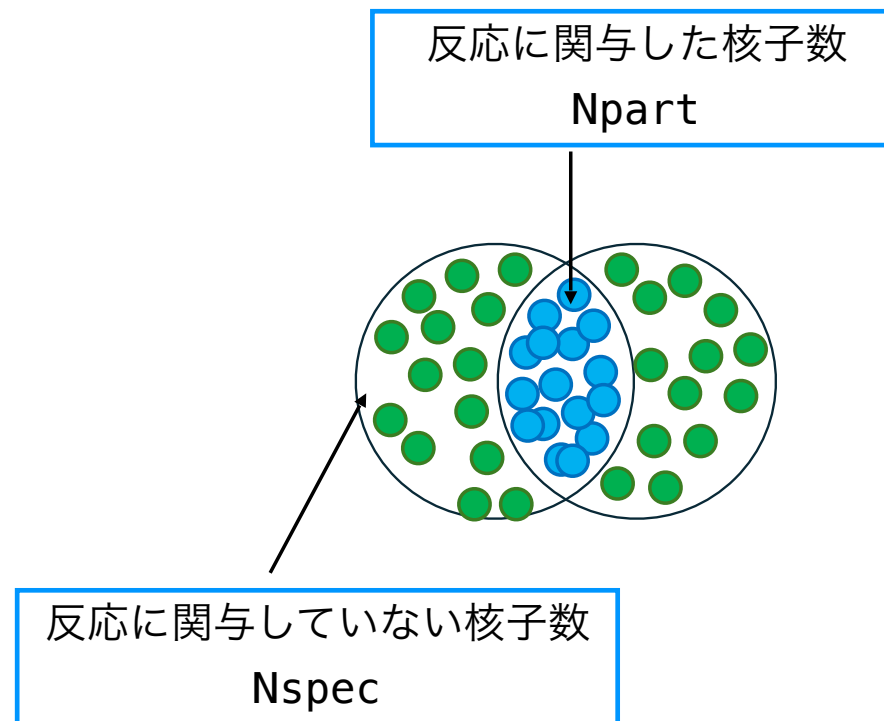
反応に関与した核子数 (N_{part}) と 反応に関与していない核子数 (N_{spec}) の関係

$$N_{part} + N_{spec} = A(const)$$

$$\therefore N_{part} = A - N_{spec}$$

A: 衝突する2つの原子核の核子数

N_{part} を考えるために N_{spec} を考える。



Nspecについて

$$N_{spec} = N_{spec}(neu) + N_{spec}(pro)$$

$N_{spec}(neu)$: N_{spec} のうちの中性子の数

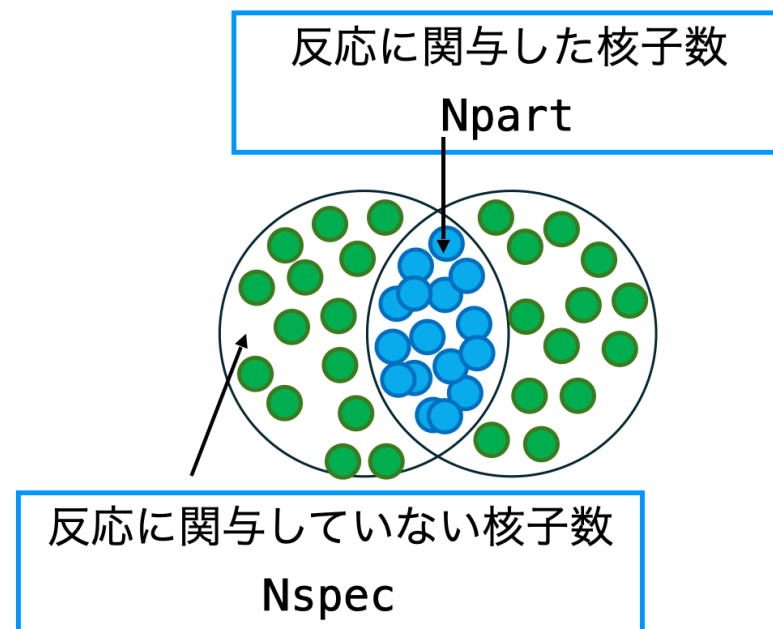
$N_{spec}(pro)$: N_{spec} のうちの陽子の数

N_{spec} を求めたいが、sPHENIXの検出器では

$N_{spec}(neu)$ しか測定できないため、 $N_{spec}(neu)$

がわかっても $N_{spec}(pro)$ 分のばらつきが生じる。

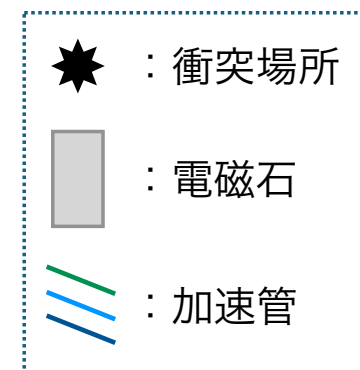
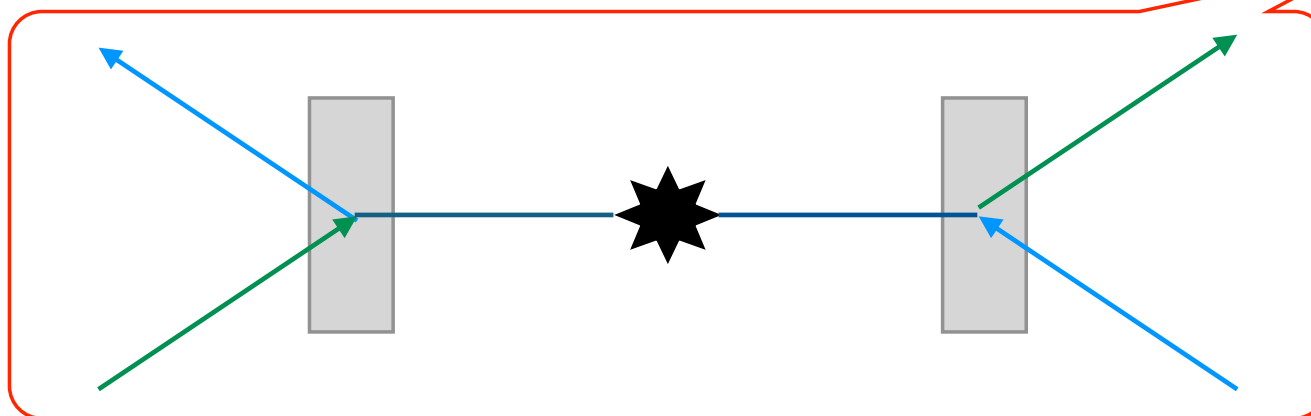
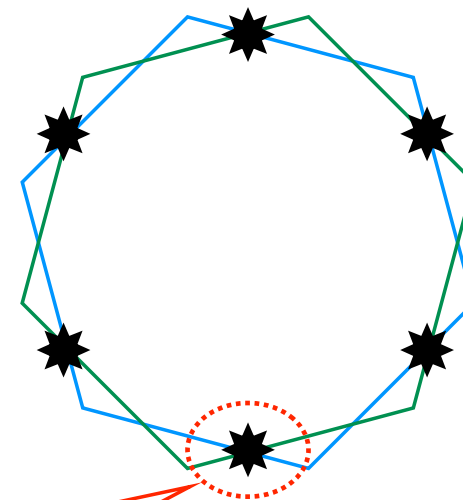
どれくらいばらつくのかを求めたい。



Nspec (neu) の測定方法

sPHENIXの検出器でNspec (neu) しか測定できない理由

- RHIC加速器は2つの加速リングを持ち、その加速リングはどちらも六角形の形をしている。
- 原子核はそのリング内を加速されながら回っている。
- 電磁石によって荷電粒子である原子核が曲げられている。
- 交差する6ヶ所で衝突。



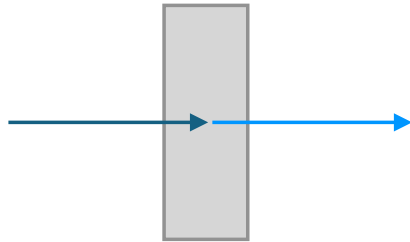
衝突後

衝突しなかった陽子と中性子はバラバラになる。



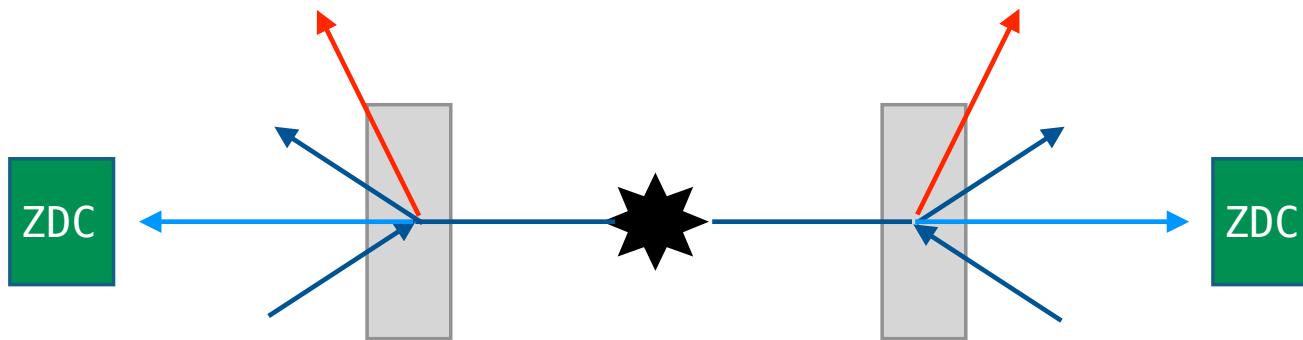
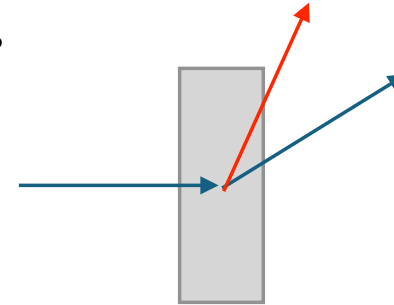
衝突後の中性子の電磁石に対する反応

電荷を持っていないため電磁石には反応せずまっすぐ進んでいく



衝突後の陽子の電磁石に対する反応

陽子は荷電粒子であるため電磁石によって曲げられるが、その電磁石は原子核がちょうど加速管を通るように設定しているため、原子核よりも電荷も質量も小さい陽子を通ると原子核が通ったときより曲げられてしまう。



ZDC

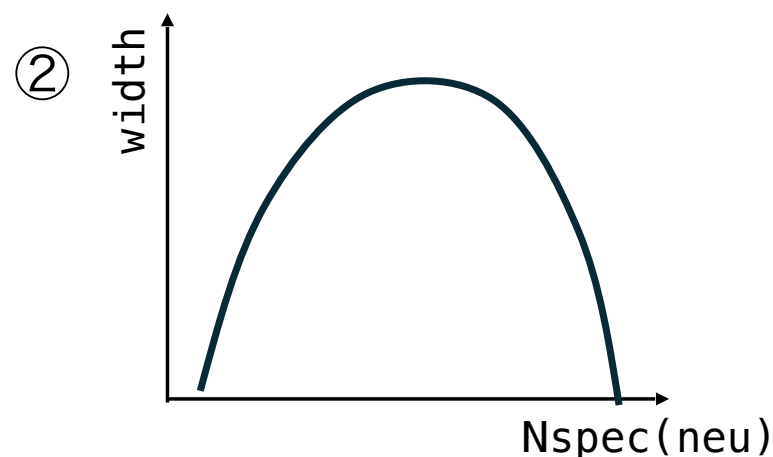
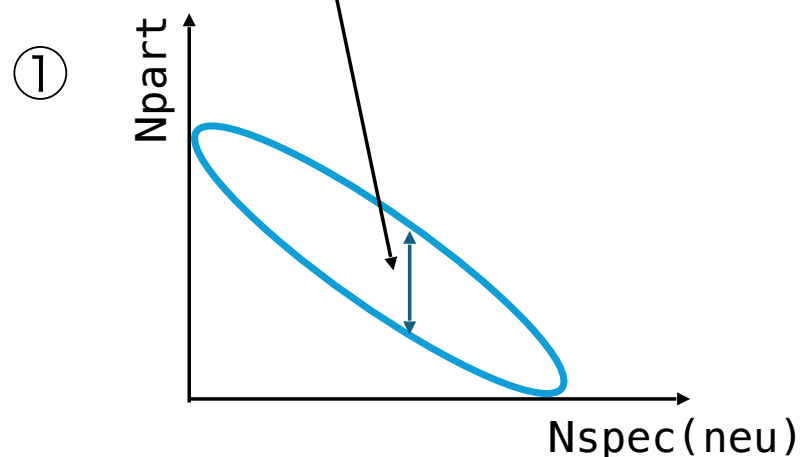
(Zero Degree Calorimeter)

- ハドロンカロリメータ
- 反応に関与しない中性子のエネルギーを測定する($\propto N_{spec}$)

Nspec (pro)分のばらつきを求めるために行なったこと

1. シミュレーションで縦軸がNpart、横軸がNspec (neu)の二次元ヒストグラムをつくる
2. 横軸がNspec (neu)、縦軸がNspec (neu)が一意に決まったときのNpartのばらつき具合のグラフの作成。

$N_{spec}(neu)$ = 衝突しなかった中性子数
 N_{part} = 衝突した核子数



解析手法(シミュレーションのセットアップ)

1. 今回の解析では金金衝突を考えている。(1つの原子核の核子数197個、陽子数79個、中性子数118個)

2. 原子核を作成するとき核子分布半径は半径Rでシャープに落ちるような分布ではなく、一定の厚さの部分がぼやけた分布になっている。(Woods-Saxon型関数に従う)

$$\rho(w) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(w-R)/a}} \quad : \text{Woods - Saxon型関数}$$

$$w = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad R = 1.18 \times A^{1/3} - 0.48 [fm] = 6.386 [fm]$$

$$a = 0.54 fm, \quad \rho_0 = 1$$

x, y, z は $-15 fm$ から $15 fm$ の範囲で発生させた乱数, A は核子数(現在は $A=197$)

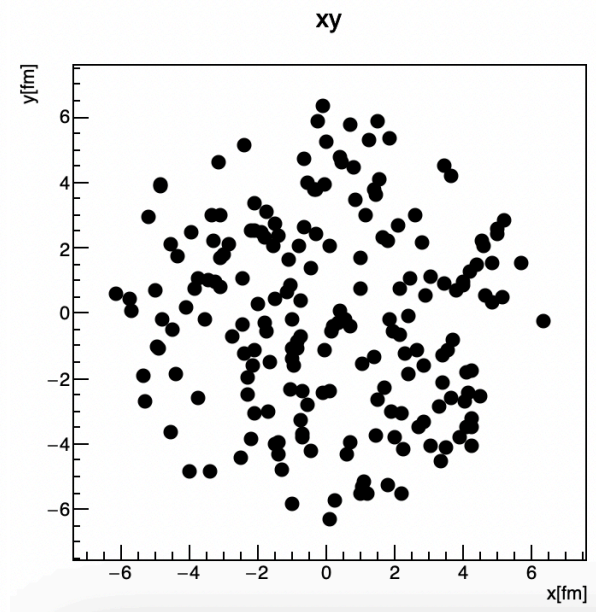
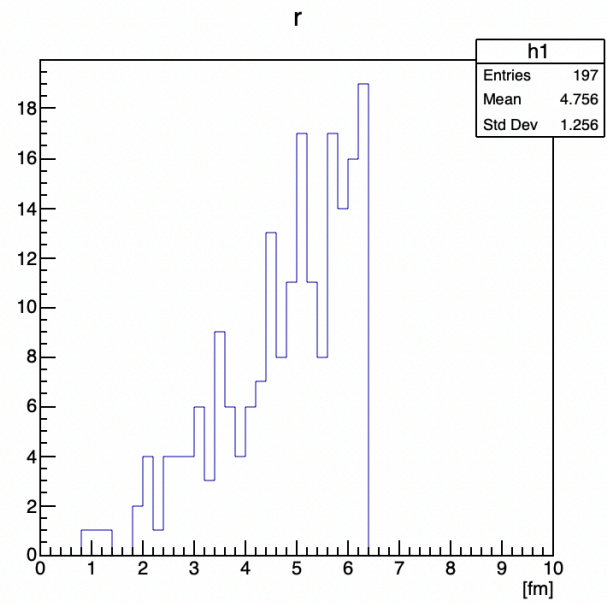
上記の式から求めた $\rho(w)$ と新たに発生させた乱数 $r(0 < r < 1)$ が $r < \rho$ となるときの値を採用する。

Woods-saxon型関数なし

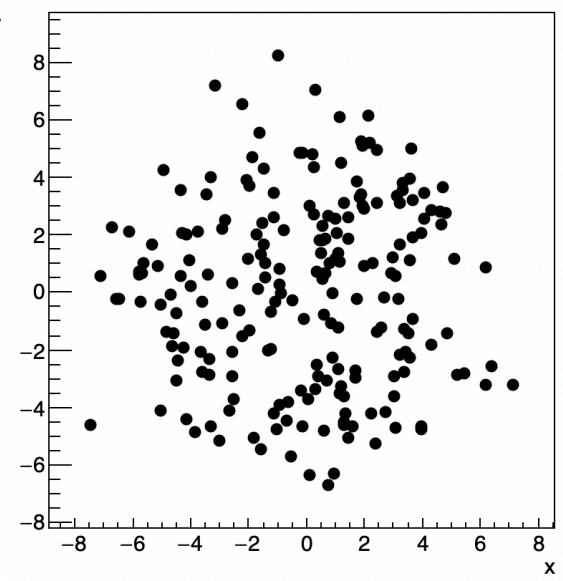
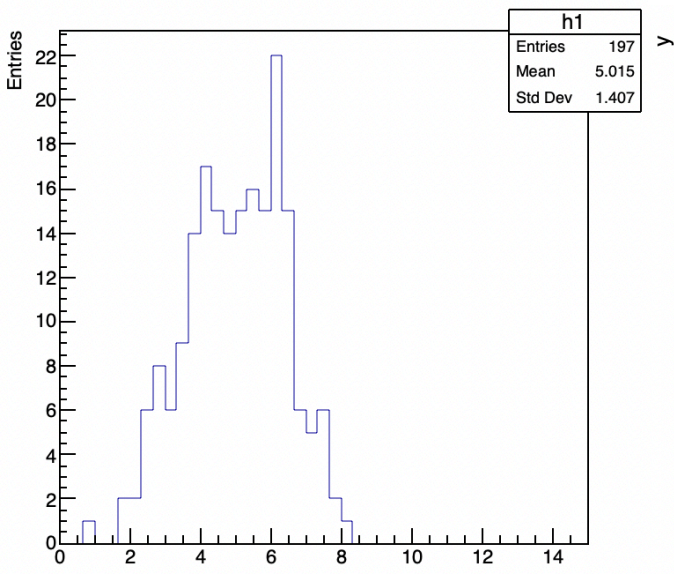
0から半径 $R = 6.386[fm]$ の範囲で一様に核子を生成

左図：核子のr分布

右図：原子核のxy平面での散布図



nucleon



Woods-saxon型関数あり

左図：核子のr分布

右図：原子核のxy平面での散布図

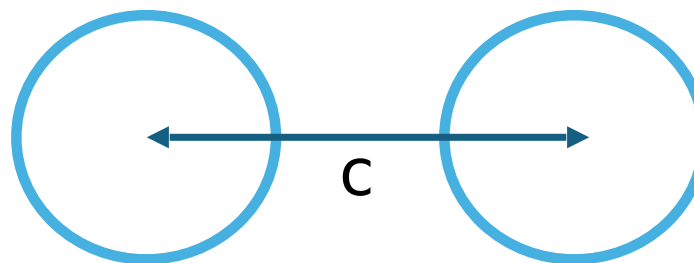
核子が衝突したとみなす条件

3. xy 平面に投影した核子と核子の中心座標の距離： c

$$\pi \times c_{max}^2 = 42 [mb]$$

$42 [mb]$ ：高エネルギー核子・核子衝突での全断面積

$$\begin{cases} c \leq c_{max} & \text{衝突した} \\ c > c_{max} & \text{衝突しない} \end{cases}$$



2つの原子核の中心座標の距離の決定方法

4. Impact parameter (2つの原子核の中心座標の距離) : b

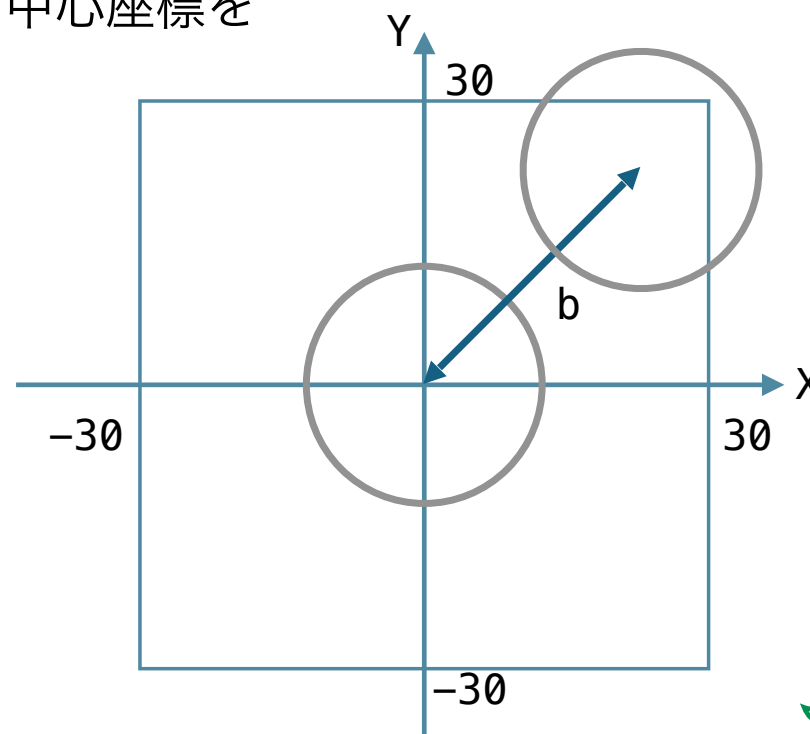
一つの原子核を原点に固定しもう一つの原子核の中心座標を

$$-30 \leq x \leq 30$$

$$-30 \leq y \leq 30$$

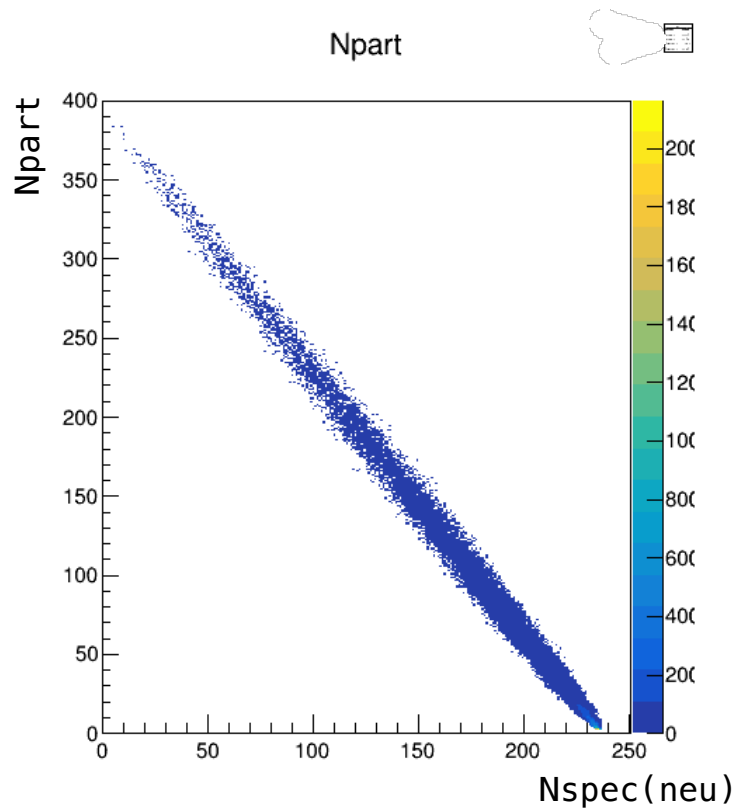
の範囲でランダムに設定している。

5. 衝突しなかったイベントは除いている。



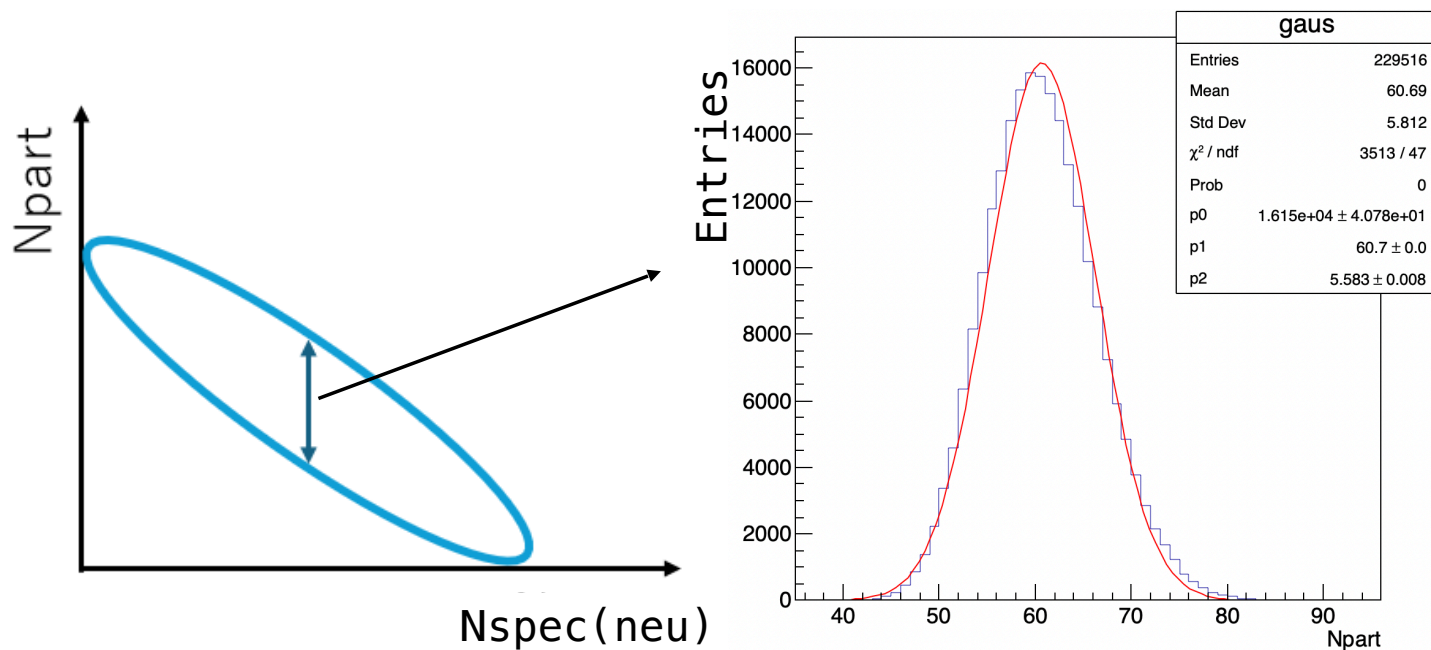
結果

縦軸がNpart、横軸がNspec(neu)の二次元ヒストグラム



1. 陽子分のばらつきが確認できる。
2. Nspec(neu)が小さくNpartが大きいとき、つまり、原子核が正面衝突することが少なく、逆に少ししかする程度の衝突が多いことが確認できる。

あるNspec (neu) のときのNpartがどれくらいばらつくのかを求める

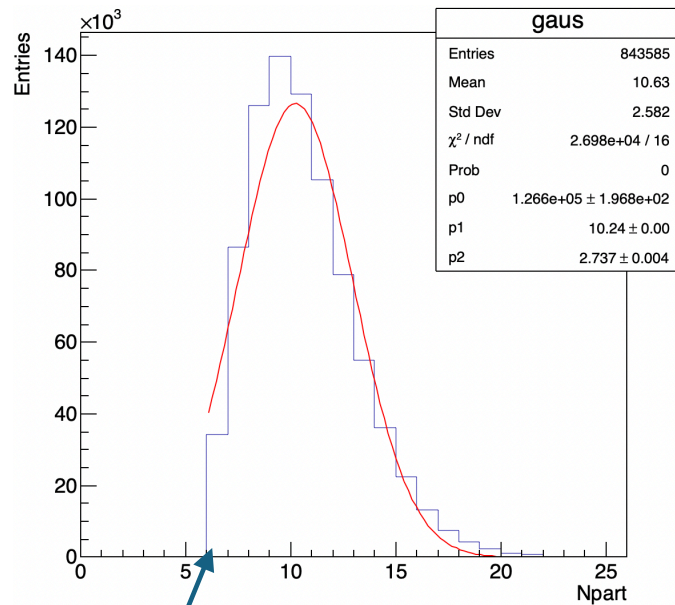


•あるNspec (neu) のとき (今は200) のNpartを横軸としているヒストグラム

•ガウシアンでフィッティングして、このときのシグマを幅として使用したい。

Npartの下限

$N_{\text{spec}}(\text{neu})=230$



$N_{\text{spec}}(\text{neu})=230$ のとき、エントリーがNpart=6から始まっている

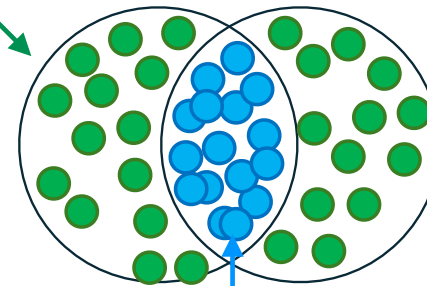
2つの金原子核の中性子数の合計：236

$N_{\text{spec}}(\text{neu})=230$ のとき、 $236-230=6$ よりNpartには必ず中性子6個が含まれる。

Npartはその中性子6個といくつかの陽子の足し算となるため $N_{\text{part}} \geq 6$

$$N_{\text{spec}} = \boxed{N_{\text{spec}}(\text{neu})} + N_{\text{spec}}(\text{pro})$$

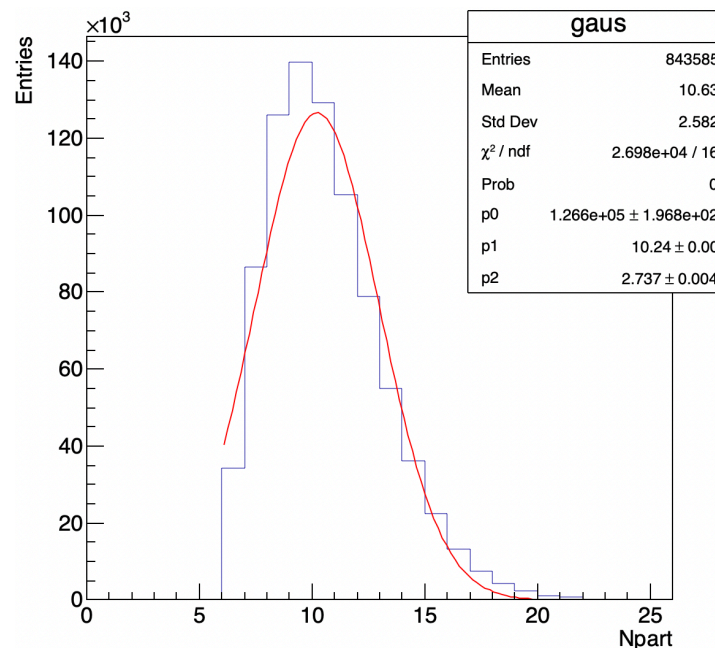
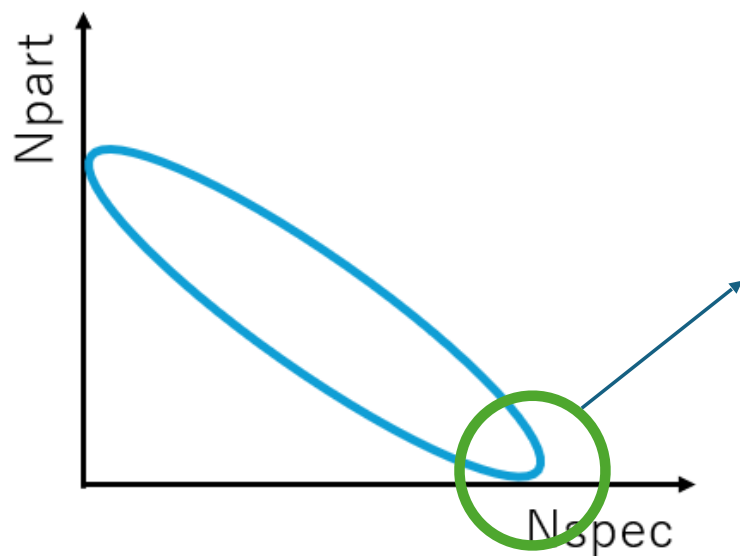
230個



$$N_{\text{part}} = \boxed{N_{\text{part}}(\text{neutron})} + N_{\text{part}}(\text{proton}) \geq 6$$

6個

Nspec (neu) が大きい場合 (Npart が小さい場合) の Npart の幅を確認したとき、ガウスからフィットがずれている。



ピーク位置と右のテールを考慮した関数に変更

Nspec (neu) = 230 のとき

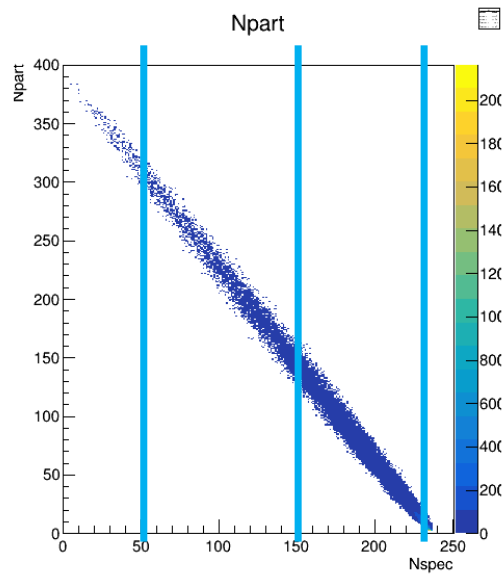
フィット関数の見直し

ガウス+ランダウとポアソン分布を選んだ理由

$N_{spec}(neu) = 230, 150, 50$ の3か所で

- ・ガウス
- ・ガウス+ランダウ
- ・ポアソン

の3つのフィットをおこない、比較する

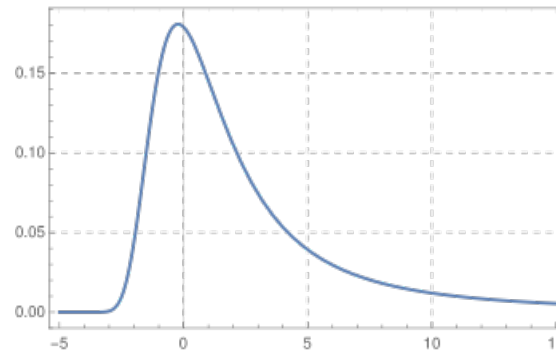


ガウス+ランダウ

$$aP_{gaus}(x) + bP_{landau}(x)$$

それぞれの確率密度関数 ($P_{gaus}(x)$,

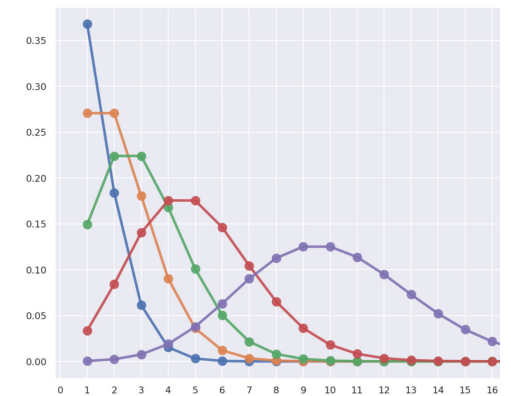
$P_{landau}(x)$) に任意の定数 (a, b) をかけた



ランダウは0付近にピークを持ち右にテールを持つため

問題点：物理的な背景を考慮できていない

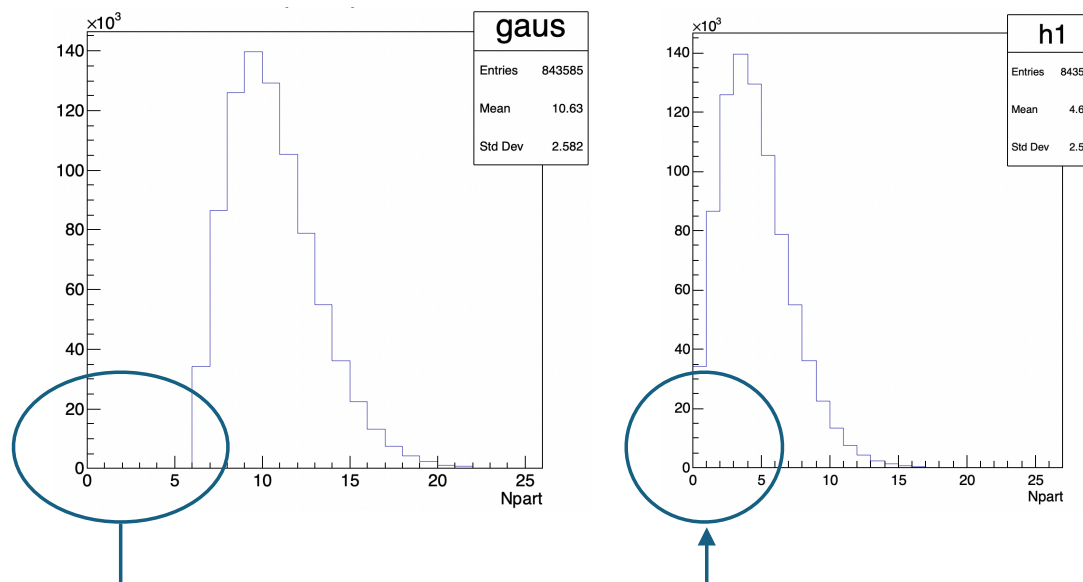
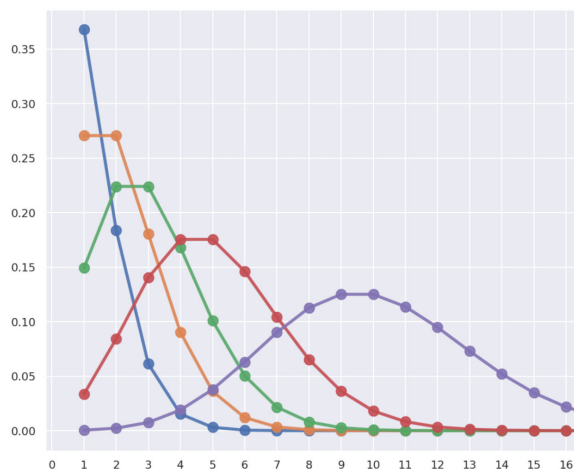
ポアソン分布



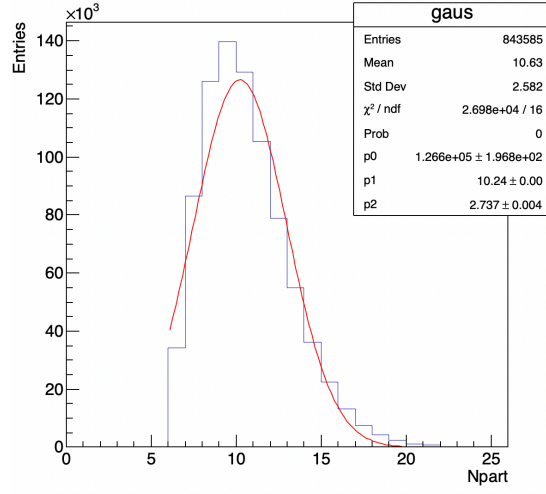
ポアソン分布はピーク位置が横軸方向に大きくなるにつれてガウスになるため

ポアソン分布を用いたフィットの注意点

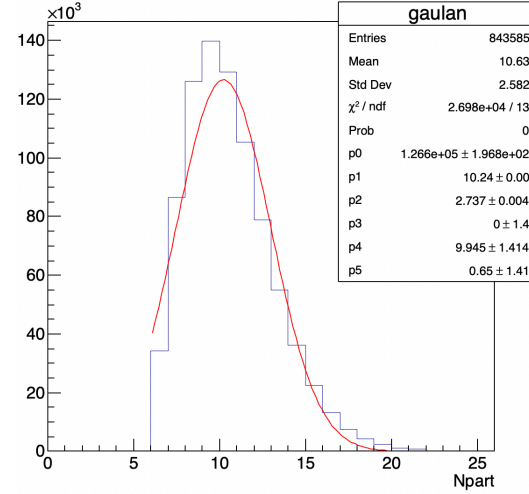
ポアソン分布はピーク位置が横軸方向にどれだけ0から離れているかで関数の形が変わるため、エントリーがあるNpartのうち最も値が小さいものを0として横軸をずらす。



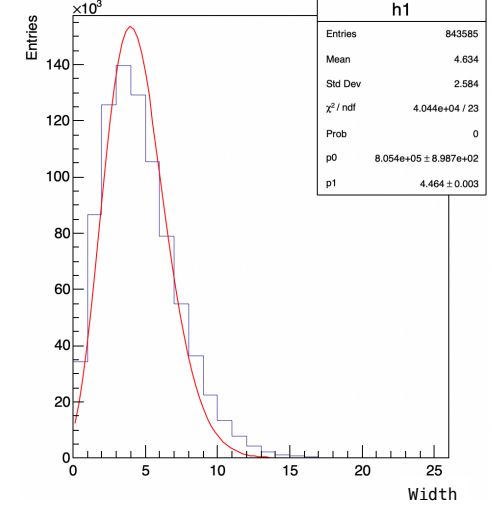
ガウス



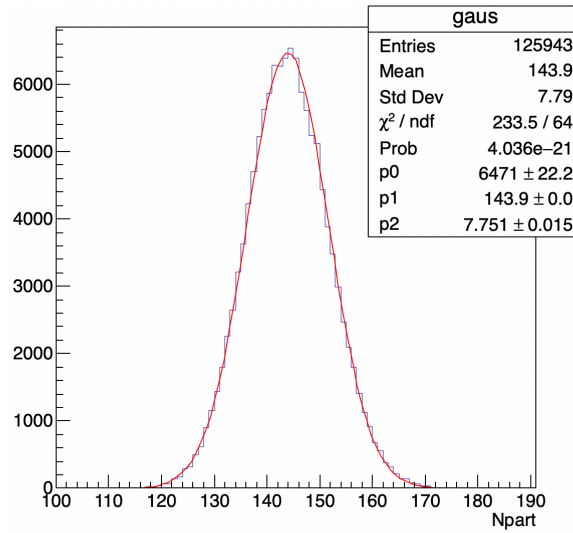
ガウス+ランダウ



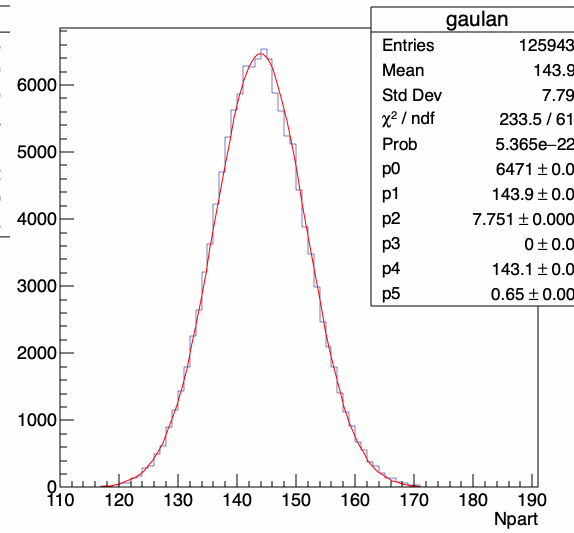
ポアソン



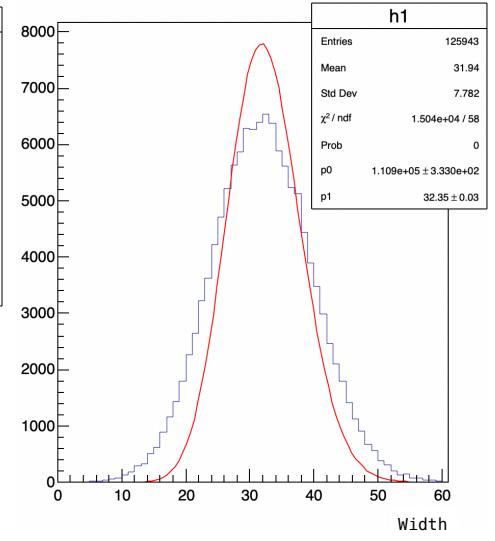
ガウス



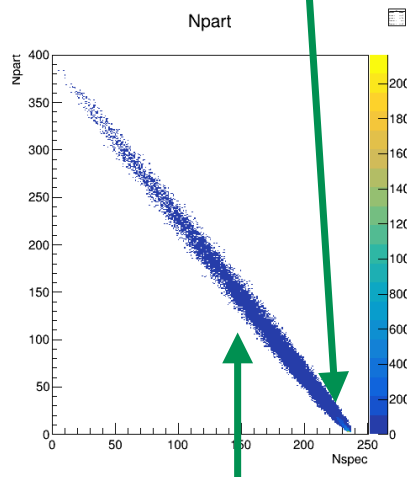
ガウス+ランダウ



ポアソン



Nspec(neu)=230



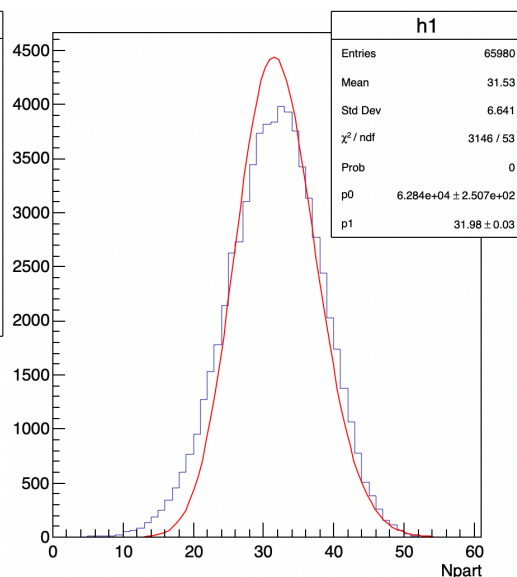
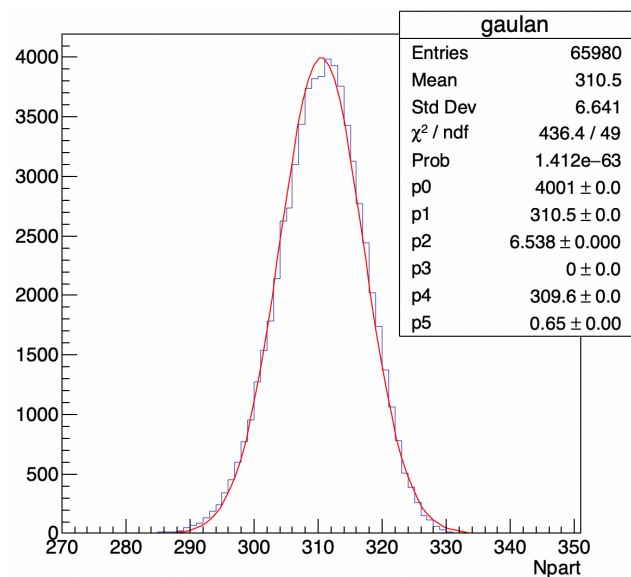
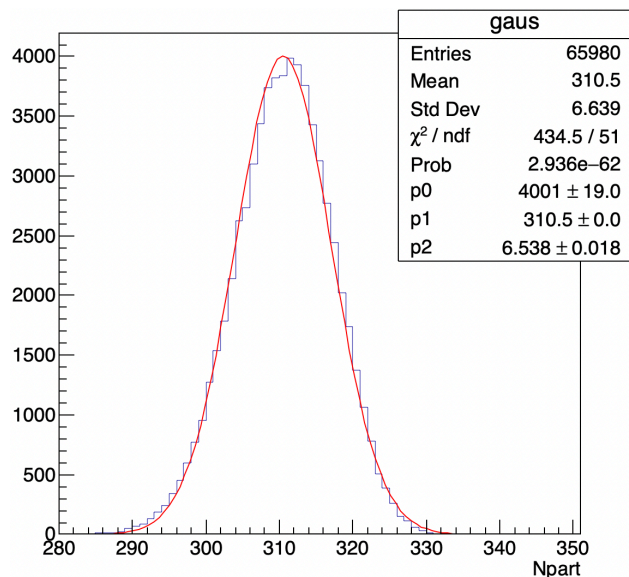
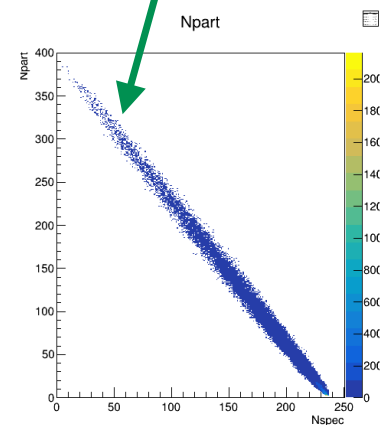
Nspec(neu)=150

Nspec(neu)=50

ガウス

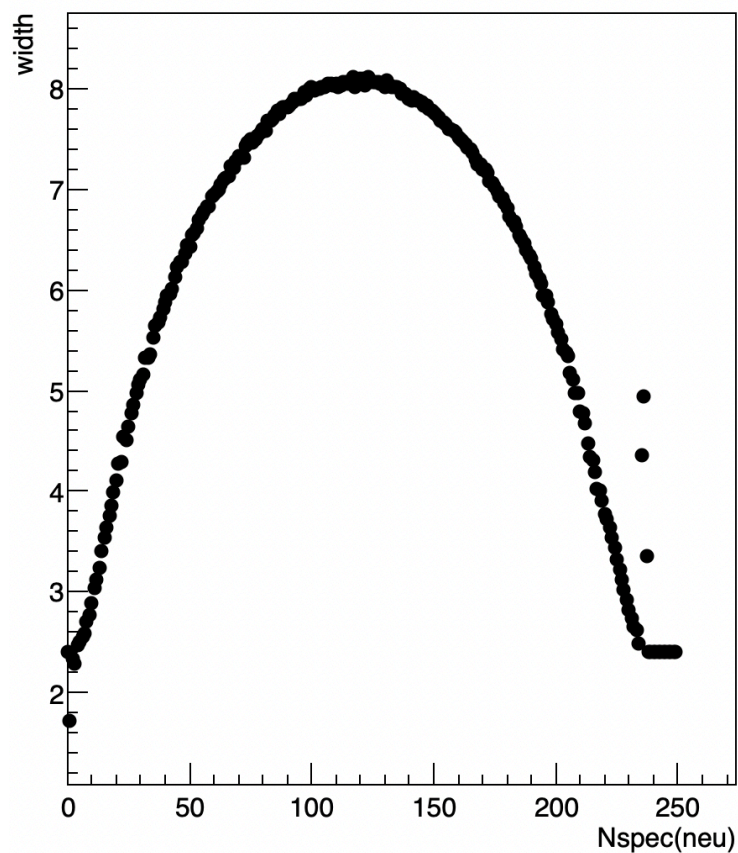
ガウス+ランダウ

ポアソン



- Nspec(neu)=230ではポアソンは期待していた形をとっていたが、どのNspec(neu)でもフィットがポアソンからずれていた。
- ガウスとガウス+ランダウではNspec(neu)=230ではフィットがそれぞれのフィット関数からずれていたが、Nspec(neu)=150, 50のときはうまくフィットできていた。
- ガウスとガウス+ランダウに大きな違いは見受けられないため、ガウスを用いる。

Nspec(neu)が一意に決まったときのNpartのばらつき



縦軸：ガウシアンでフィッティングした時のシグマ

横軸：Nspec(neu)

期待していた様に上に凸のグラフとなっている。

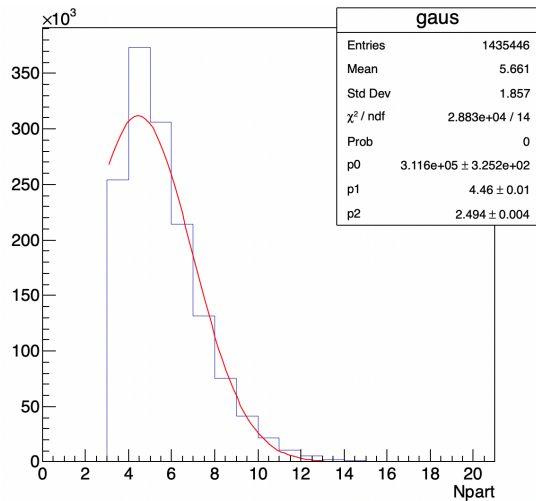
Nspec(neu)=234, 235, 236のときのシグマの値が大きい。



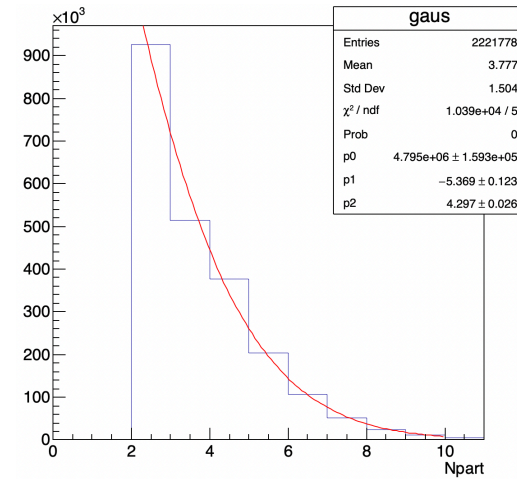
Nspec(neu)=234, 235, 236とNspec(neu)=233のときのヒストグラムを確認する。

Nspec (neu)=233, 234, 235, 236のヒストグラム の確認

Nspec (neu)=233

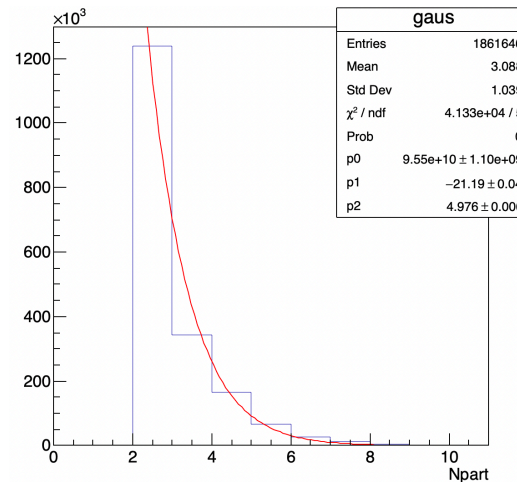


Nspec(neu)=233ではヒストグラムは山型
Nspec(neu)=234,235,236のヒストグラム
では山型になっていないため、シグマが
大きくなっていたと考えられる。

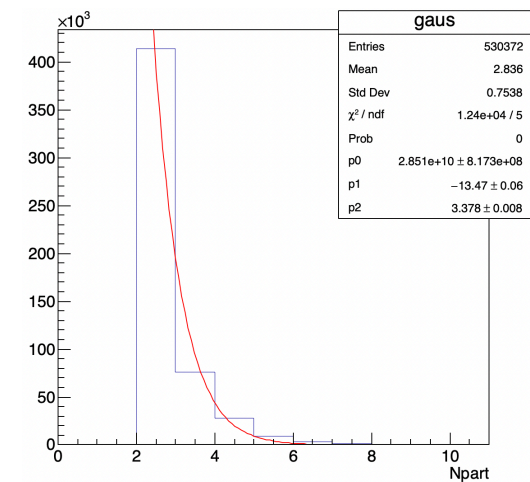


234

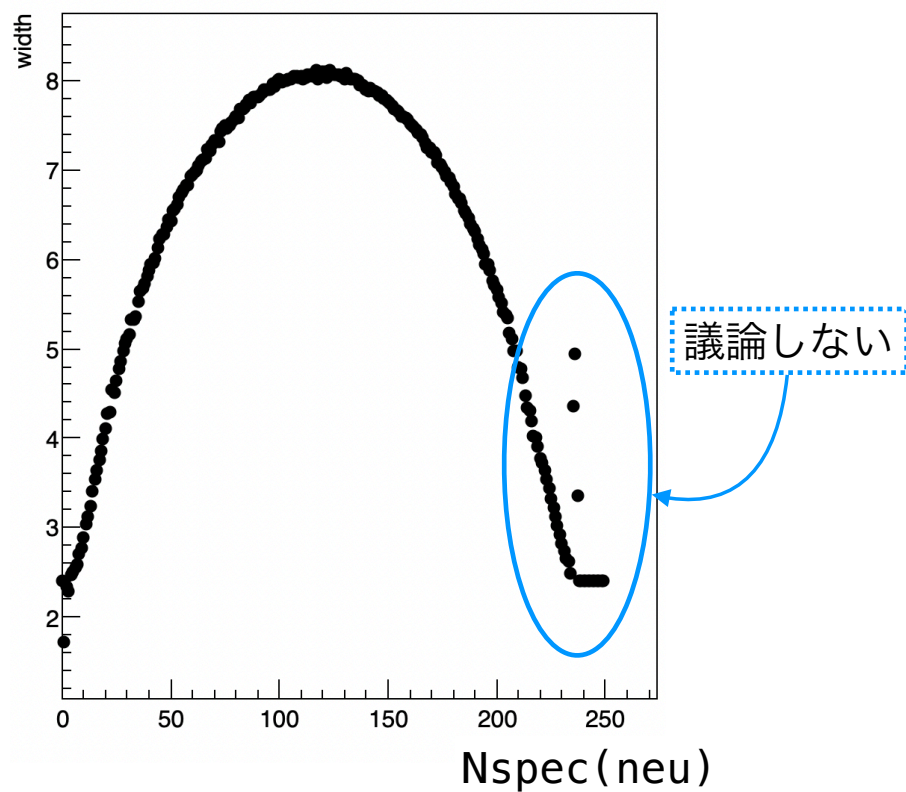
235



236



結果



ガウスからフィットがずれている範囲は議論しないことにする。

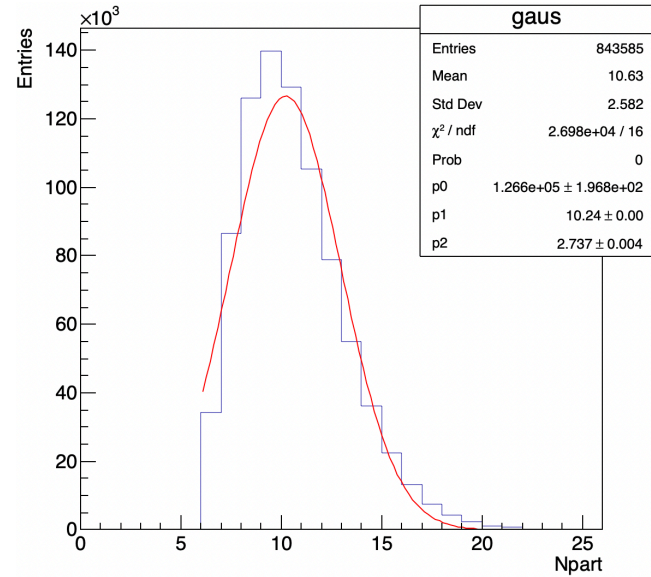
ヒストグラムのフィットがうまくいっているグラフの点のみでフィットを行う。

ガウスからフィットがずれている範囲はそのフィットの線を伸ばして考える。

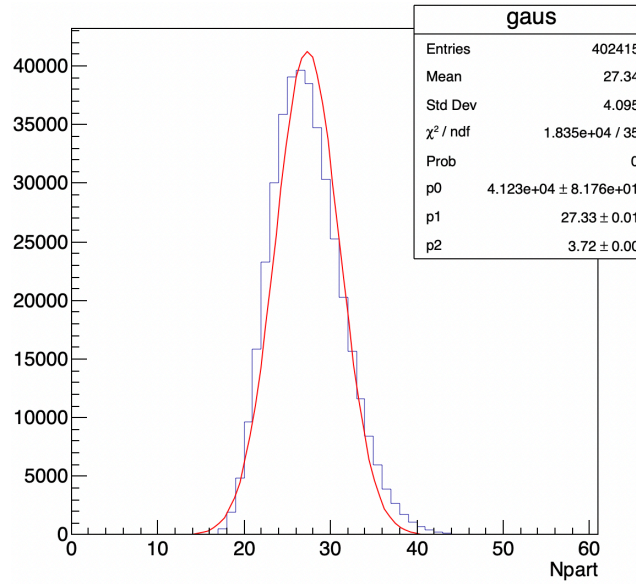


どこからフィットがガウスからずれてしまっているのかを求めるためにヒストグラムを確認

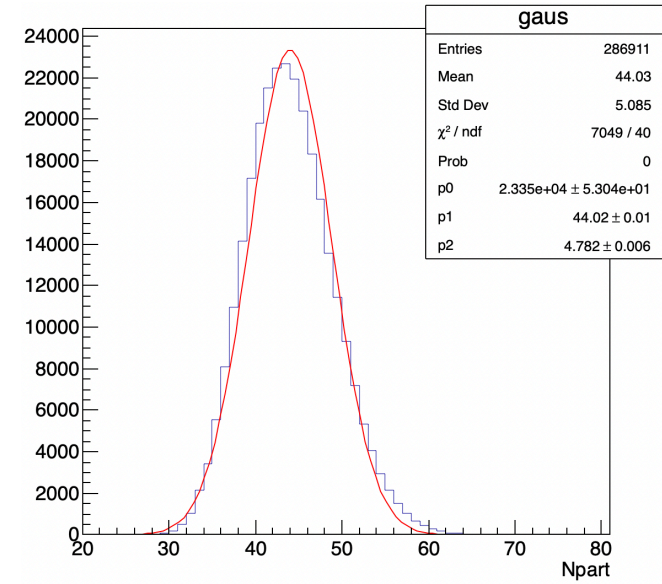
Nspec(neu)=230



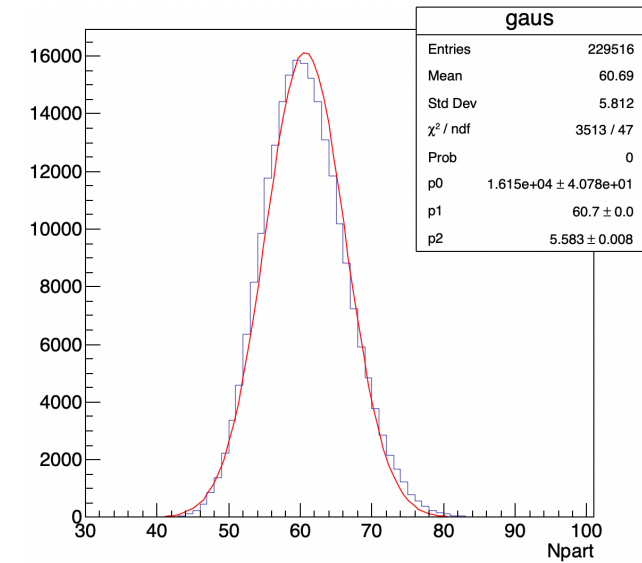
220



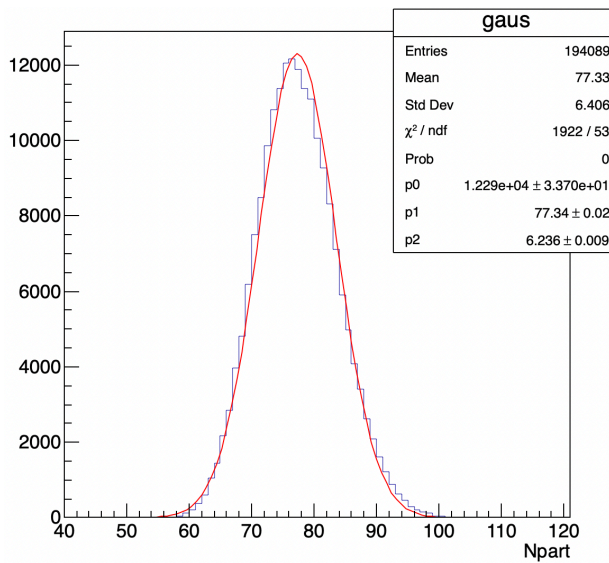
210



200

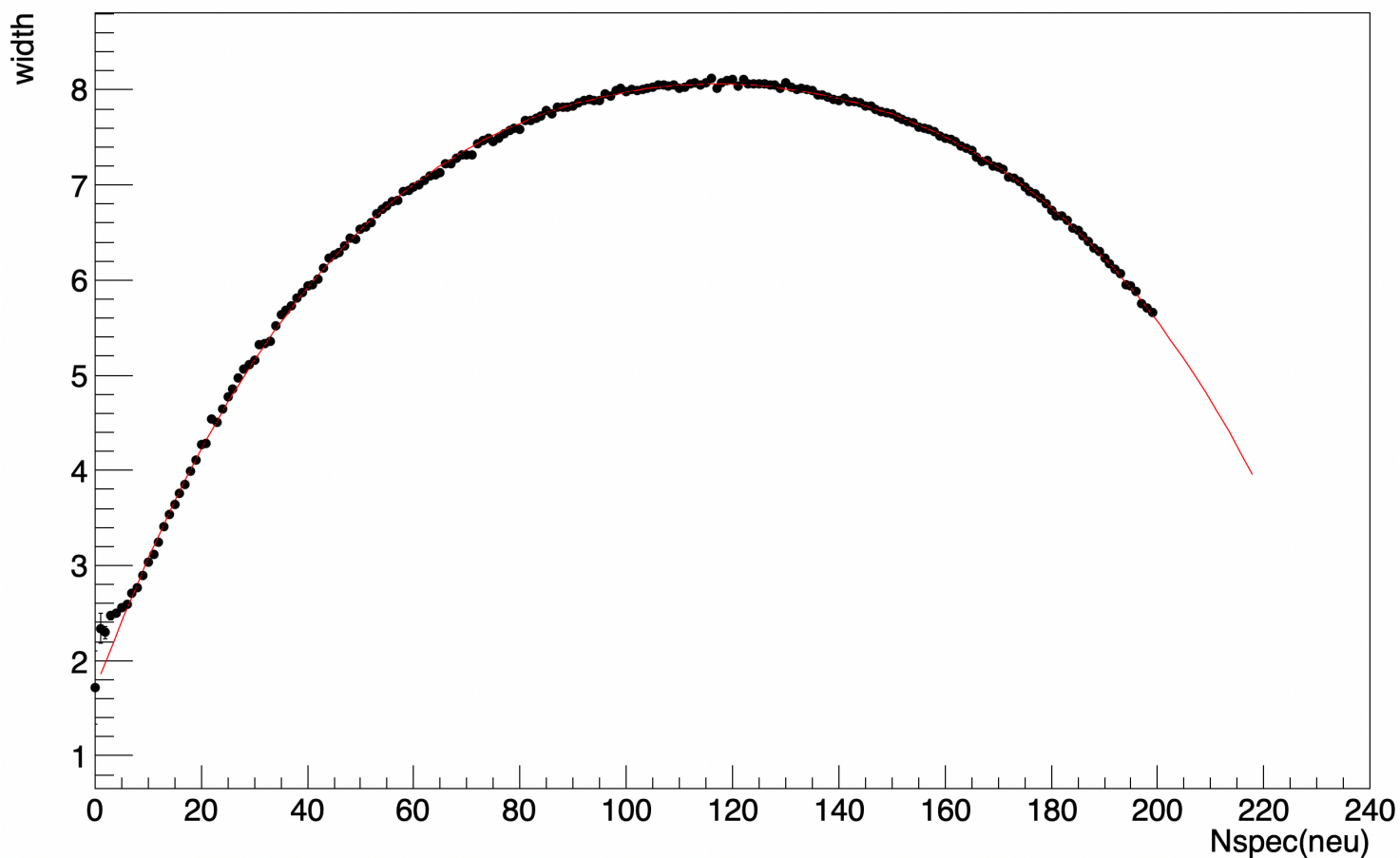


190



Nspec (neu) =200を採用

Nspec(neu)=200で切って、4次関数でフィット



- 誤差棒をつけているがほとんど見えないほどに誤差が小さい。

- Nspec(neu)=1~5のグラフの点が他のNspec(neu)のときと比べてフィットの線から離れている。



Nspec(neu)=1~5のときの
ヒストグラムを確認する。

まとめ

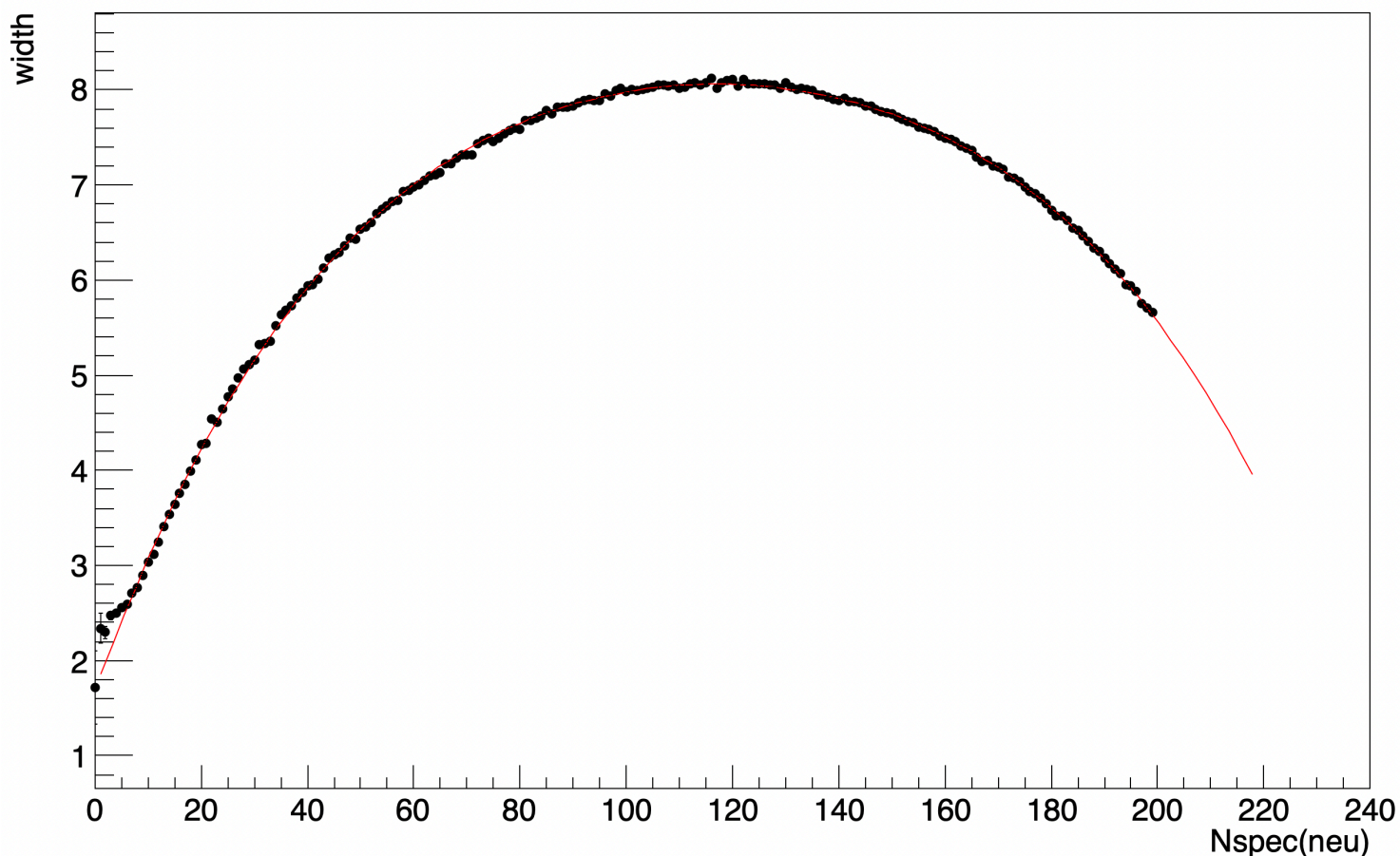
- ある $N_{\text{spec}}(\text{neu})$ での N_{part} がどれくらいばらつくのかをシミュレーションで求めた。
 - ばらつきはsPHENIXの検出器では $N_{\text{spec}}(\text{neu})$ しか測定できないため生じる。
- N_{part} のばらつきは4次関数でフィットできると考えているが、グラフの評価はまだ行っていない。

今後の課題

- $N_{\text{spec}}(\text{neu})=1\sim 5$ のヒストグラムを確認。
- グラフの評価。
- 作成する原子核をより現実的にし、ある $N_{\text{spec}}(\text{neu})$ のときの N_{part} のばらつきが今回求めたものとどれくらい変化するのか確認。
- データとの比較。

Back up

Nspec(neu)=200で切って、4次関数でフィット



• 誤差棒をつけているがほとんど見えないほどに誤差が小さい。

$$\bullet \chi^2 = \frac{1152}{195} = 5.91$$

• Nspec(neu)=1~5のグラフの点が他のNspec(neu)のときと比べてフィットの線から離れている。



Nspec(neu)=1~5のときのヒストグラムを確認する。

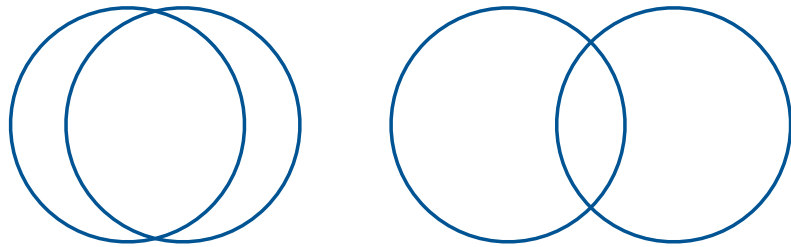
作成する原子核をより現実的に

～中性子ハローの再現～

中性子ハロー

安定な原子核の陽子と中性子の割合よりも極端に中性子が多い核子系で、安定核の周りに余分な中性子が後光（ハロー）のように大きな半径で分布する。

中性子ハローは外側に中性子が多く存在しているため正面衝突に近い衝突だとNspecのうちNspec(neu)の割合が多くなると考えられる。



$$\rho(w) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(w-R)/a}} \quad : \text{Woods - Saxon型関数}$$

$$w = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad R = 1.18 \times A^{1/3} - 0.48 [fm]$$

$$a = 0.54 fm, \quad \rho_0 = 1$$

x, y, z は $-15 fm$ から $15 fm$ の範囲で発生させた乱数, A は核子数

a (diffuseness) : 原子核表面で核子密度が減る割合

陽子 : $0.54 fm$

中性子 : $1.0 fm$

ある範囲に存在する核子のうちの中性子の割合

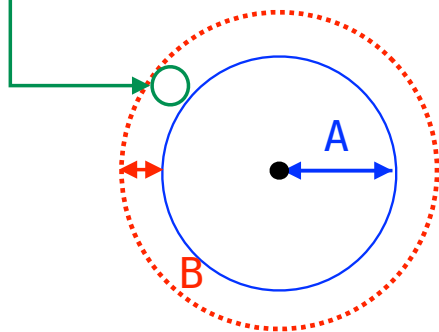
作成している原子核は半径6.386[fm]付近
でぼやけた分布になるようにしている。

核子1つ直径を1.75[fm]として

$$6.386 - 0.875 = 5.511[fm]$$

A : 半径5.511[fm]を持つ円の範囲

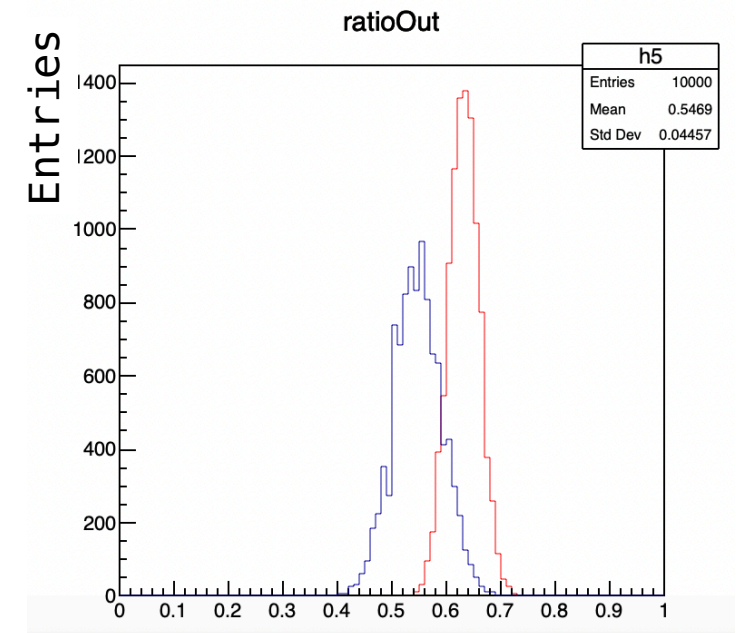
B : Aの外側



$$\rho_A = \frac{n_A}{V_A}$$
$$\rho_B = \frac{n_B}{V_B}$$

$$\rho_B = \frac{n_B + p_B}{V_B}$$

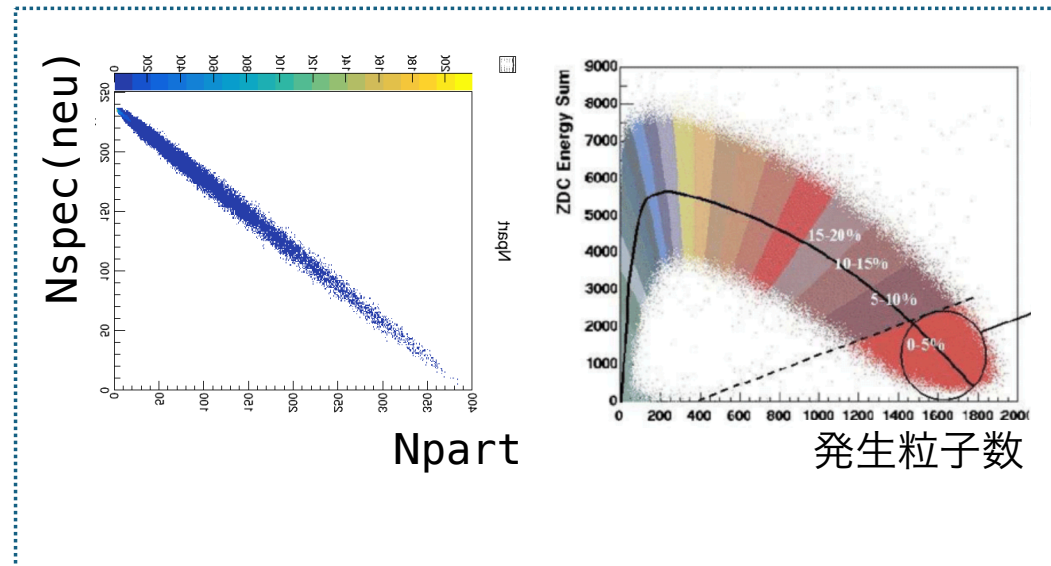
原子核表面で中性子の割合が増加することが再現できた。



中中性子の割合

データとどう比べるか

- 直線or曲線でフィットする
- ヒストグラムとデータを比べてみる
- あるNspec(neu)のときの発生粒子数
- Npartが同じでも発生粒子数が異なり、それによってどのように物理現象が異なるのか確認したい。



引用元: High-pT charged hadron suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
(https://www.researchgate.net/publication/235585778_High-pT_charged_hadron_suppression_in_AuAu_collisions_at_sNN200_GeV?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJLY3QiLCJwYWdlIjoieX2RpcmVjdCJ9fQ)

陽子が原子核よりも大きく曲がる理由

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

遠心力 ローレンツ力



$$r = \frac{m}{q} \frac{v}{B}$$

質量と電荷の比で定まる

m : 陽子または原子核の質量

v : 粒子の速度

r : 曲率半径

q : 粒子の電荷

B : 磁束密度

質量は核子の個数に比例するため今は質量を核子数で考える。

$$\text{陽子} : \frac{1}{1}$$

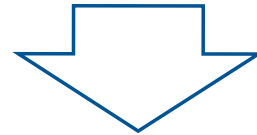
$$\text{原子核} : \frac{197}{79}$$

陽子の方が r が小さい

$$\pi \times c_{max}^2 = 42 [mb]$$

$$1[b] = 10^{-28} [m^2]$$
$$1[mb] = 10^{-31} [m^2]$$

$$1[fm] = 10^{-15} [m]$$
$$1[fm^2] = 10^{-30} [m^2]$$



$$42[mb] = 4.2[fm^2]$$

$$c_{max} = \sqrt{\frac{4.2}{\pi}} = 1.15624 [fm]$$