

RHIC-PHENIX実験での原子核衝突におけるQGP中のエネルギー損失の系統的研究

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科 物理科学専攻
高エネルギー物理学研究室 修士2年

柴田 実香

2021年度修士論文発表会

2022/2/17

目次

1. 序論
2. 解析手法
3. 結果・考察
4. まとめ

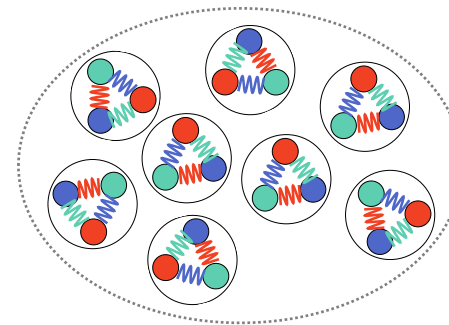
1. クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)

- ビックバンの100万分の1秒後の初期宇宙に存在
- クォークとグルーオンが高温高圧下で核子による閉じ込めから解放された状態

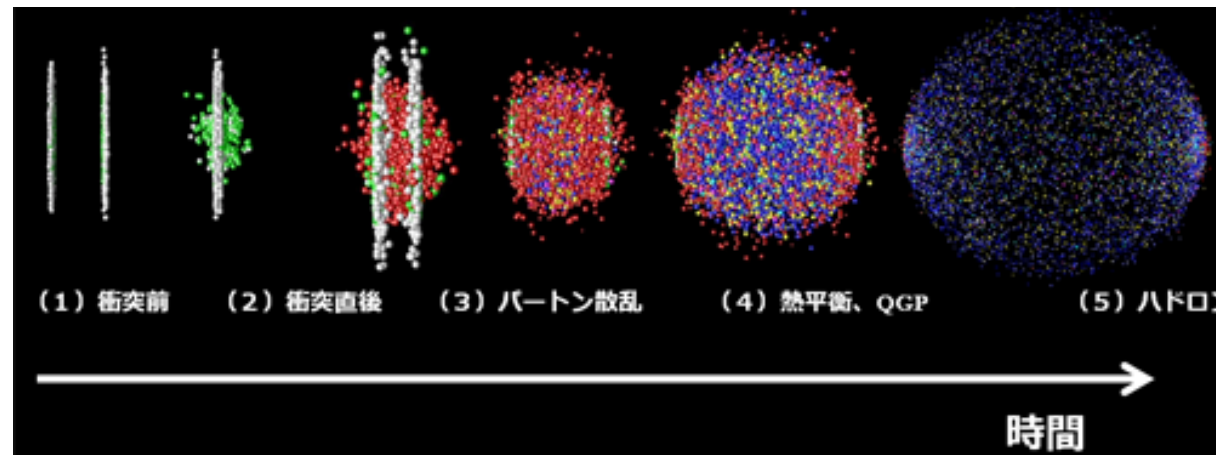
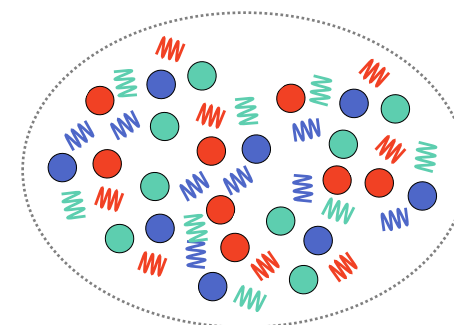
2. 原子核衝突実験でQGPを生成

- 加速器を用いて原子核同士を高エネルギーで衝突させることで、高温高密度の状態を生成。

通常物質
核子による閉じ込め



QGP
閉じ込めから解放



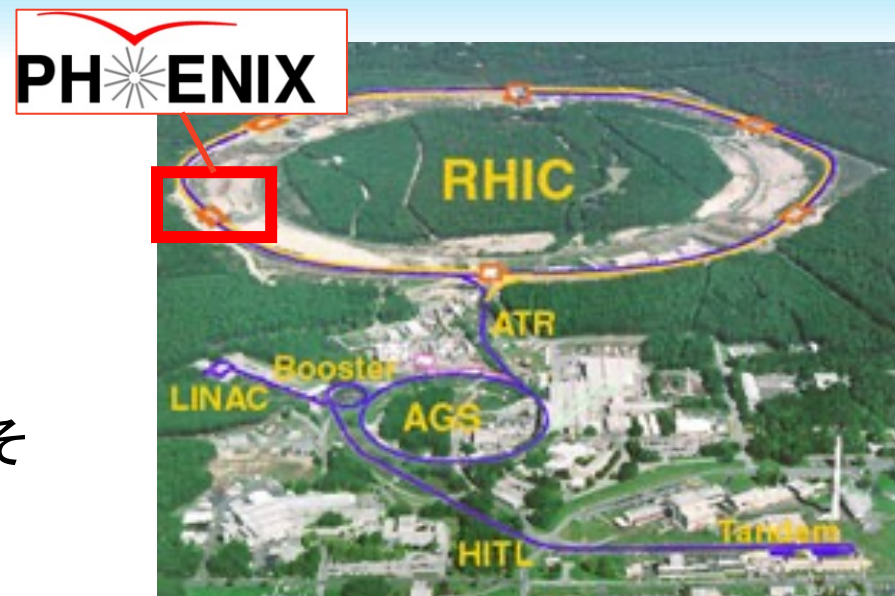
序章

3. RHIC加速器

- 米国ブルックヘブン国立研究所
- 様々な原子核を重心系エネルギー200GeVで衝突
(金金衝突、銅銅衝突、銅金衝突など)
- PHENIX実験：原子核衝突反応からQGP状態の生成とその性質を探究することが目的。

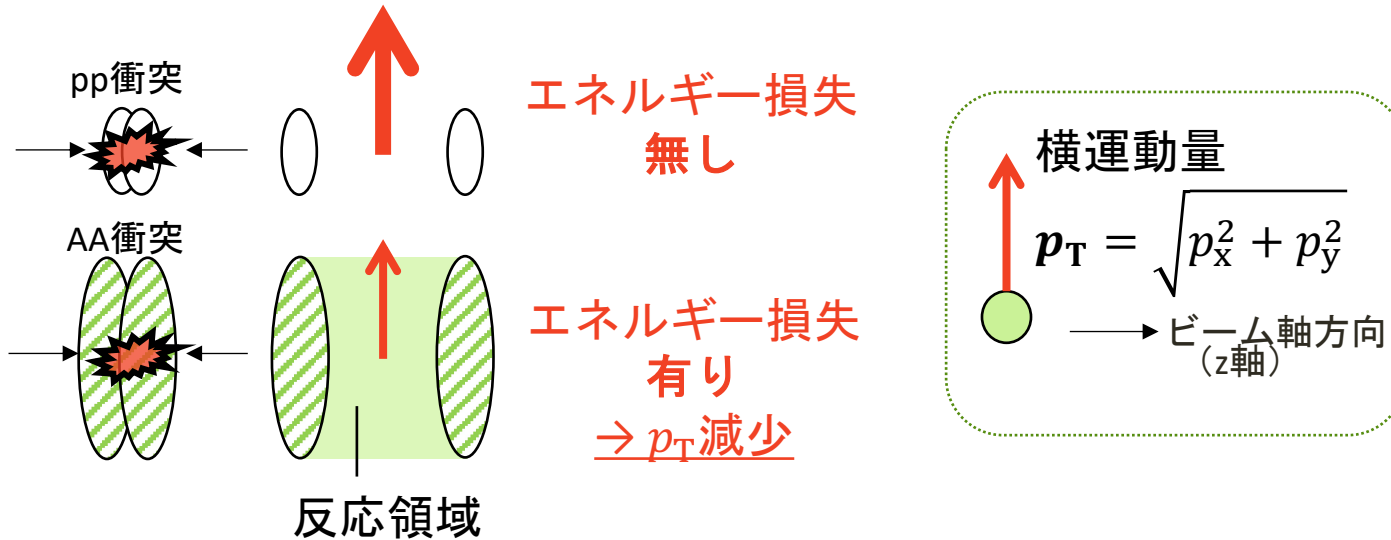
4. RHICで発見されたQGP生成の証拠となる事象

- ① 高い横運動量 (p_T) ハドロンの収量抑制
- ② 大きな方位角異方性 v_2

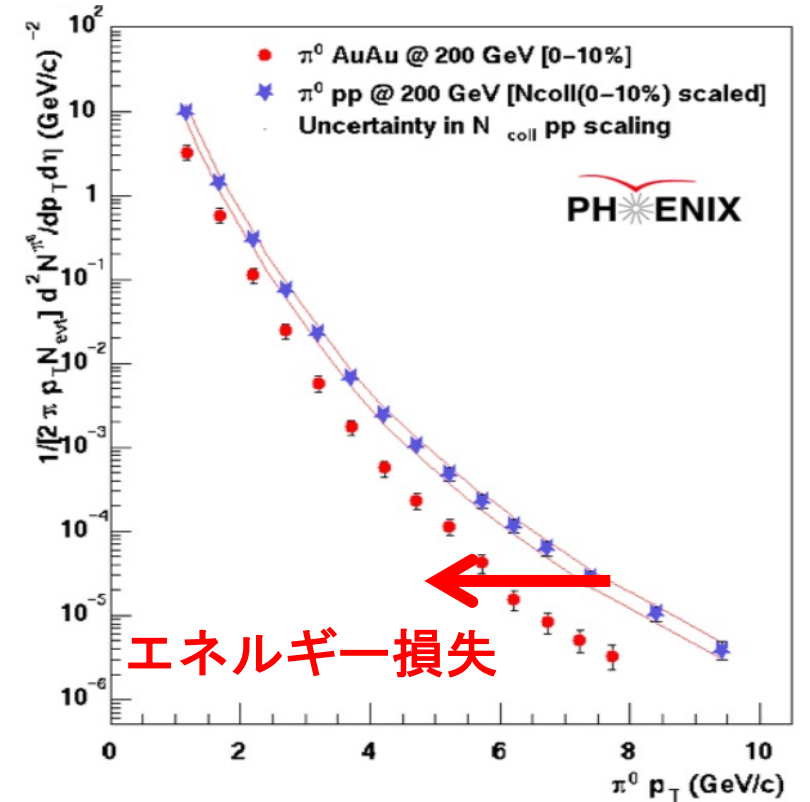


序章

4. RHICで発見されたQGP生成の証拠となる事象

① 高い横運動量 (p_T) ハドロンの収量抑制

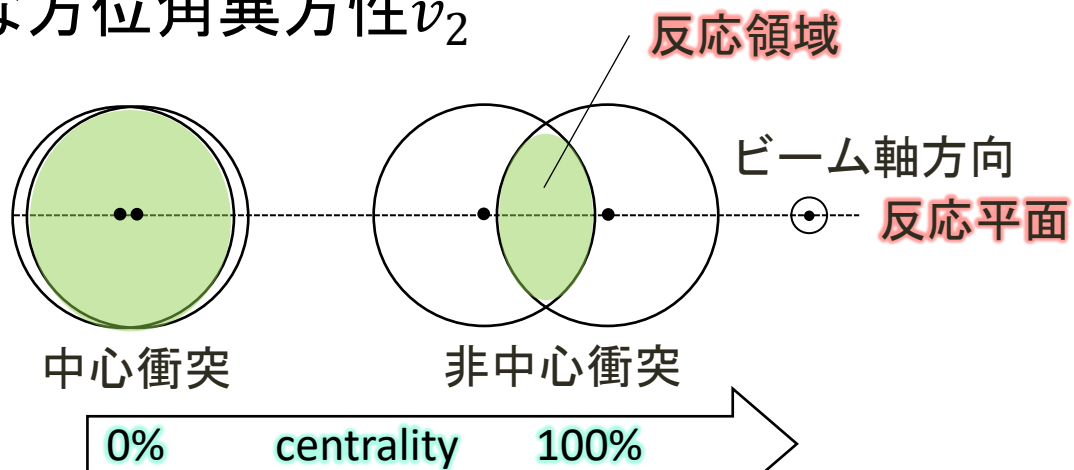
p+p衝突における π^0 と金+金衝突
における π^0 の横運動量分布



- $\frac{\pi^0 \text{の生成量(金+金衝突)}}{\text{核子衝突数}(N_{\text{coll}})} < \pi^0 \text{の生成量(p+p衝突)}$
- π^0 の p_T 分布がエネルギー損失の結果、低い p_T へシフト。

序章

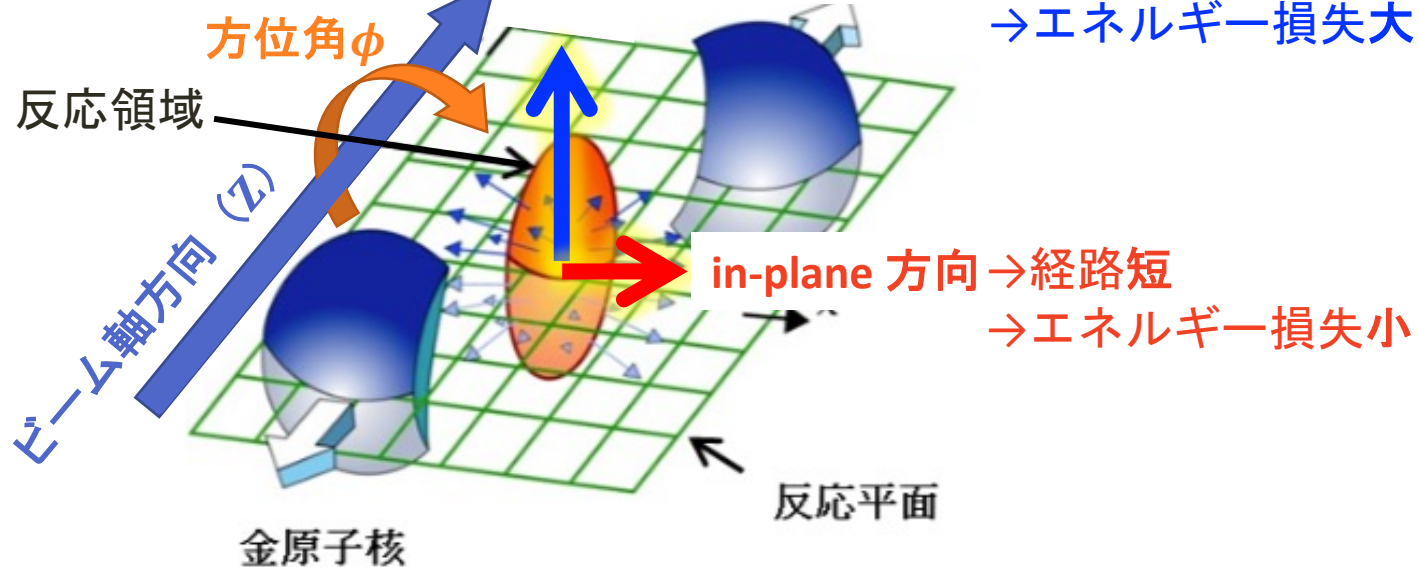
4. RHICで発見されたQGP生成の証拠となる事象

② 大きな方位角異方性 v_2 

反応平面に並行な方向 : in-plane方向
 反応平面に垂直な方向 : out-of-plane方向

- 非中心衝突では、生成粒子が方位角方向に一様分布しない。
 → 反応領域の経路長が異なる。
 → エネルギー損失量が異なる。
- 高 p_T ハドロンの v_2 は、このエネルギー損失量の違いにより生成。

<非中心衝突>



序章

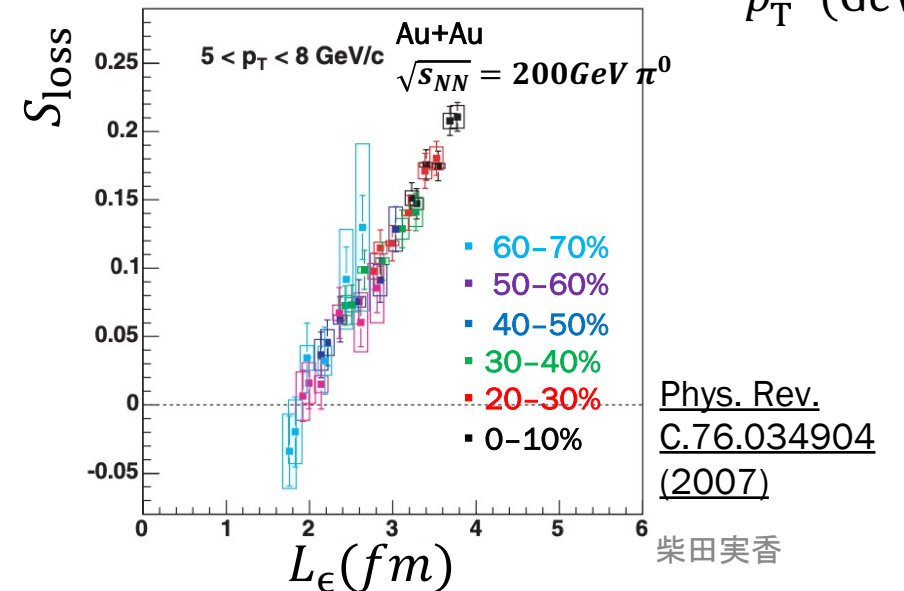
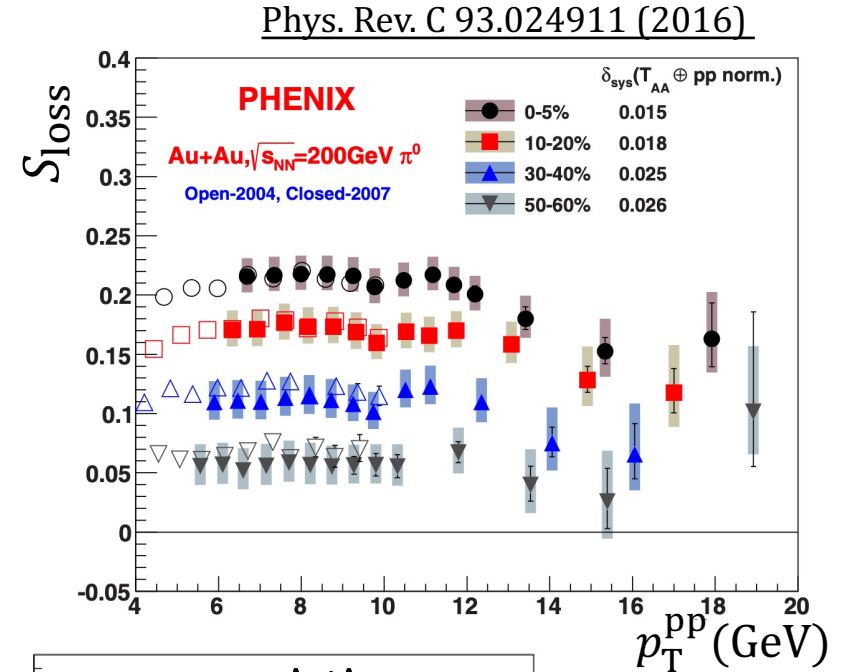
RHICで発見されたQGP生成の証拠となる事象

① 高い横運動量 (p_T) ハドロンの収量抑制

• S_{loss} : 高 p_T ハドロンのエネルギー損失割合

$$S_{loss} = \frac{p_T^{pp} - p_T^{AA}}{p_T^{pp}}$$

1. S_{loss} は p_T に大きく依存せず一定。
2. S_{loss} はcentralityに依存しており、反応領域が大きい中心衝突ほど S_{loss} が増加。[\(Phys. Rev. C. 93. 024911 \(2016\)\)](#)
3. S_{loss} は反応領域中の通過距離に対し増加傾向。[\(Phys. Rev. C. 76. 034904\(2007\)\)](#)



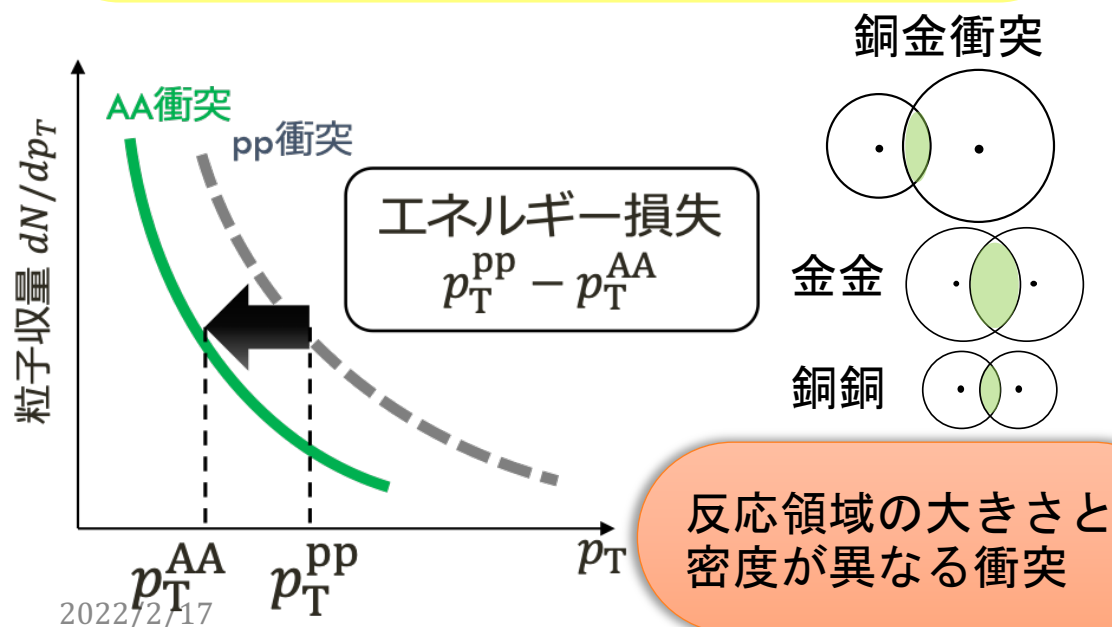
序章

研究目的と特色

- 目的：高エネルギー原子核衝突実験において、反応領域の大きさと密度が異なる衝突系でのQGP中の放出粒子のエネルギー損失を系統的に研究し、定量的に評価する。
- 特色：エネルギー損失割合を2つの異なる方法で評価

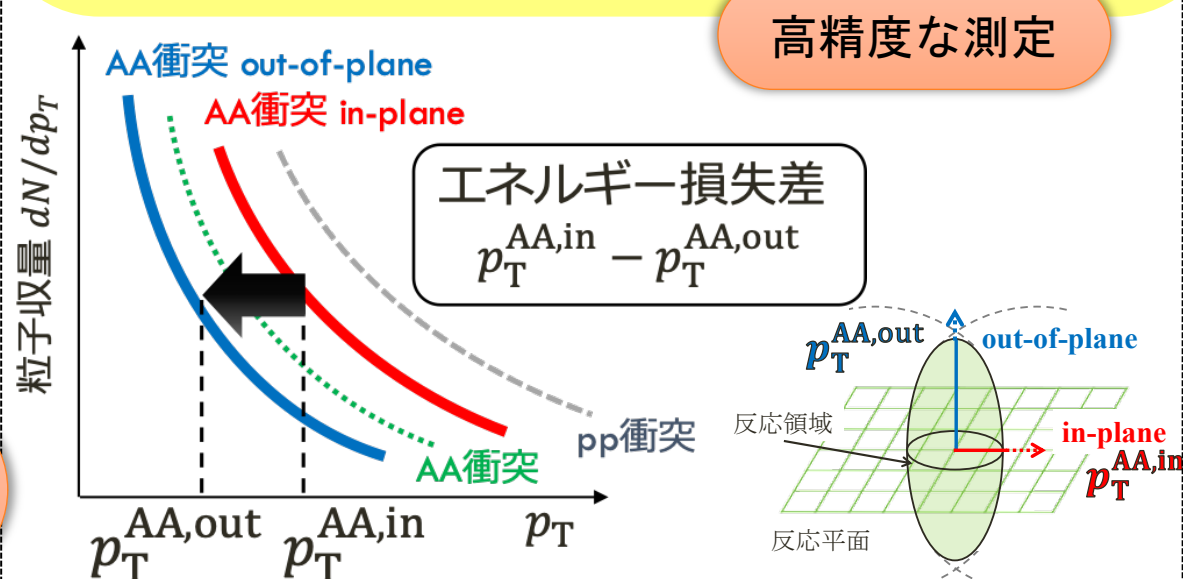
手法1

AA衝突とpp衝突の比較
「エネルギー損失割合 (S_{loss})」



手法2

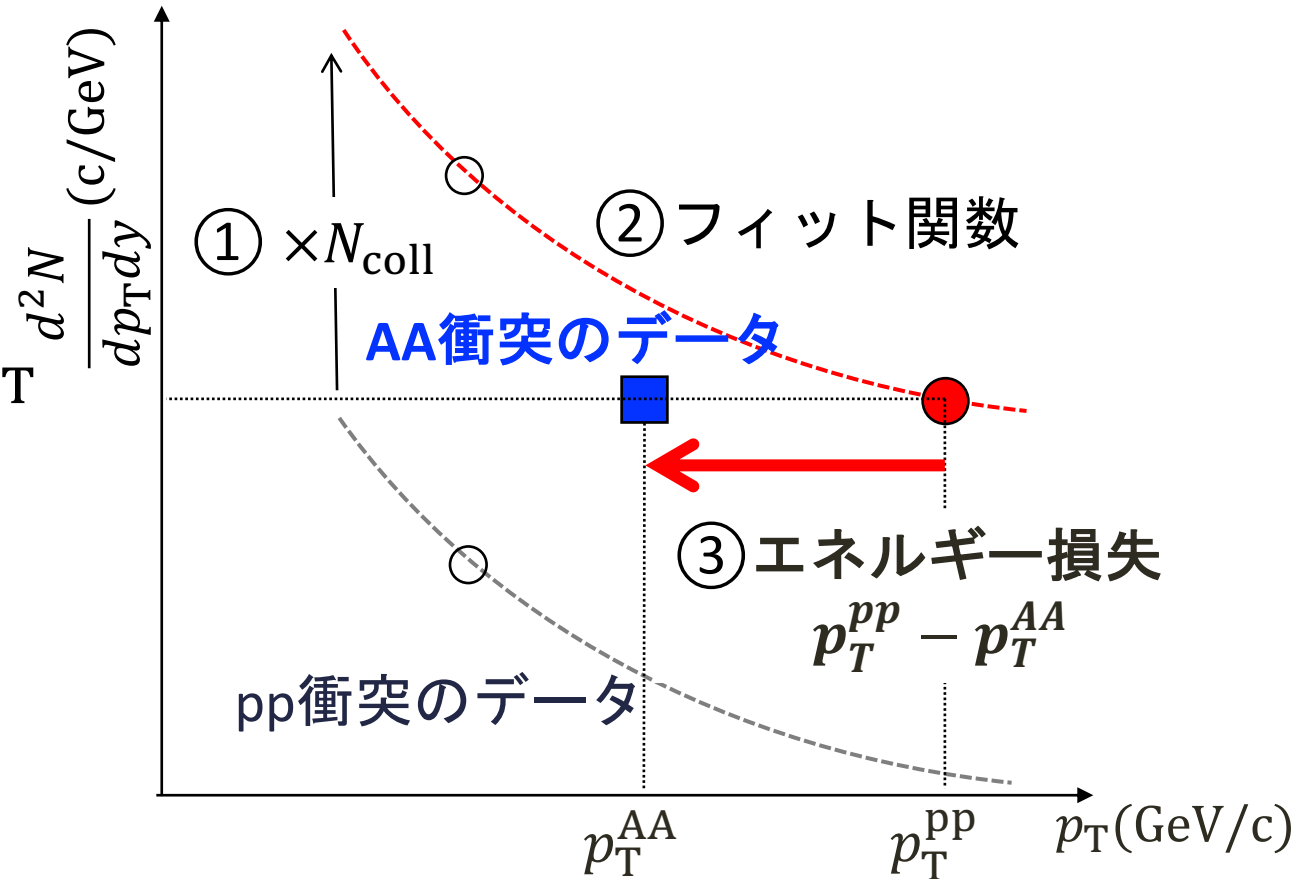
AA衝突のin-plane方向とout-of-plane方向の比較
「方位角に依存したエネルギー損失割合 (S'_{loss})」



解析手法 1 「 S_{loss} 」

- ① pp衝突の p_T 分布を核子衝突数 N_{coll} 倍する。
- ② N_{coll} 倍したpp衝突の p_T 分布のフィット関数を取得する。
- ③ N_{coll} 倍したpp衝突とAA衝突の p_T 分布より S_{loss} を計算する。

$$S_{\text{loss}} = \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA}}}{p_T^{\text{pp}}}$$



[Phys. Rev. C 93, 024911 \(2016\)](#)

解析手法 2 「 S'_{loss} 」

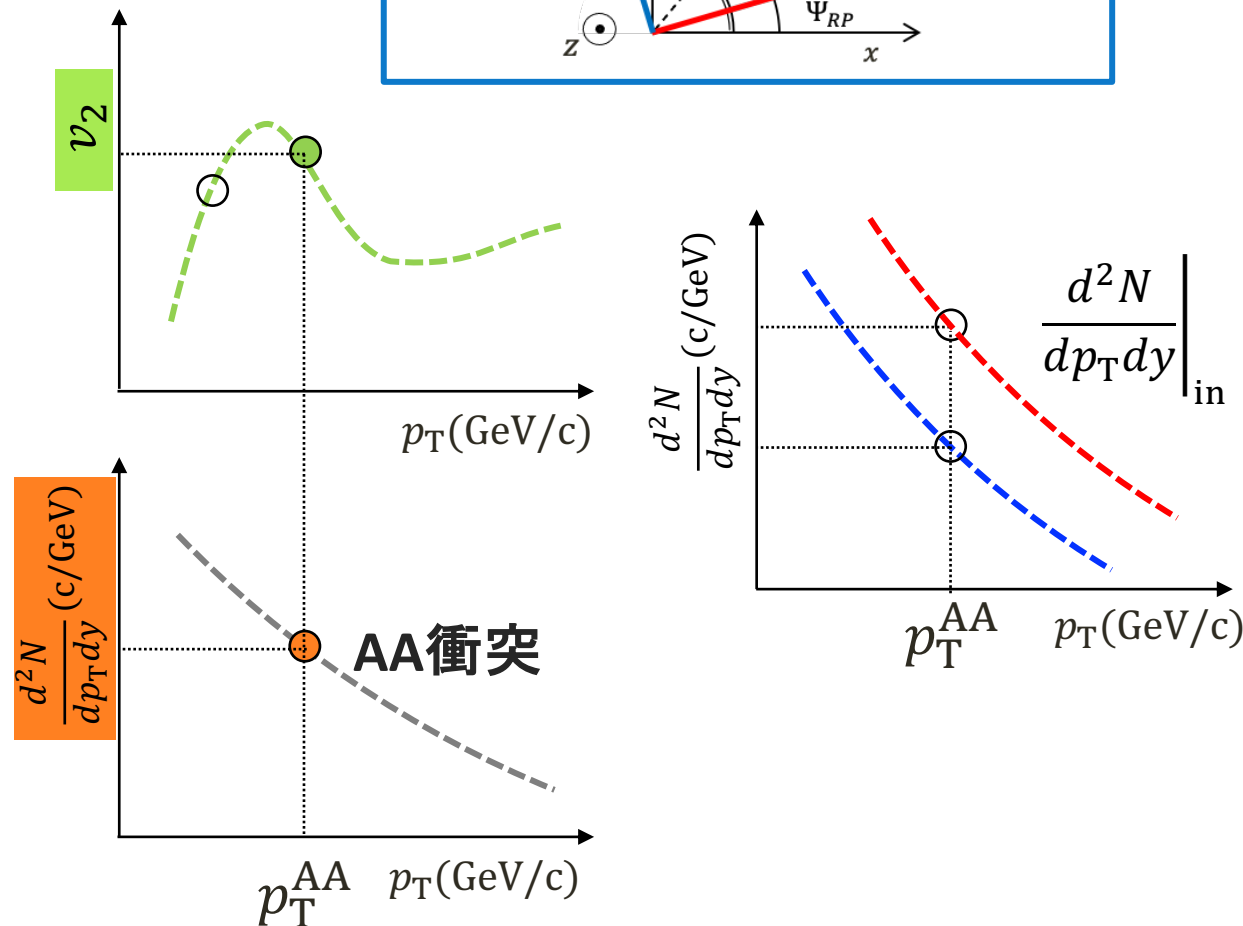
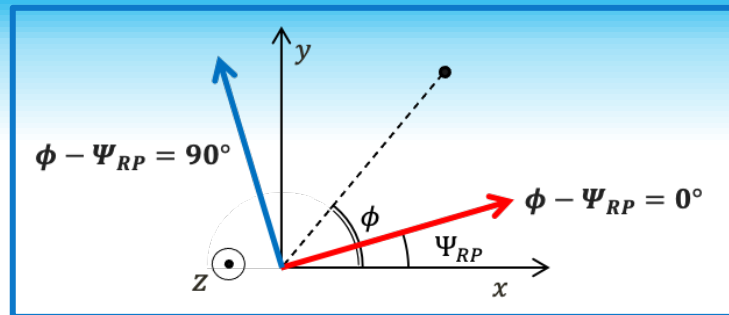
① AA衝突のin-plane方向とout-of-plane方向の p_T 分布を算出する。

$$\left. \frac{d^2N}{dp_T dy} \right|_{in} = \frac{d^2N}{dp_T dy} \times (2v_2 + 1) (\phi - \Psi = 0^\circ)$$

$$\left. \frac{d^2N}{dp_T dy} \right|_{out} = \frac{d^2N}{dp_T dy} \times (2v_2 - 1) (\phi - \Psi = 90^\circ)$$

② in-plane方向の p_T 分布のフィット関数を取得する。

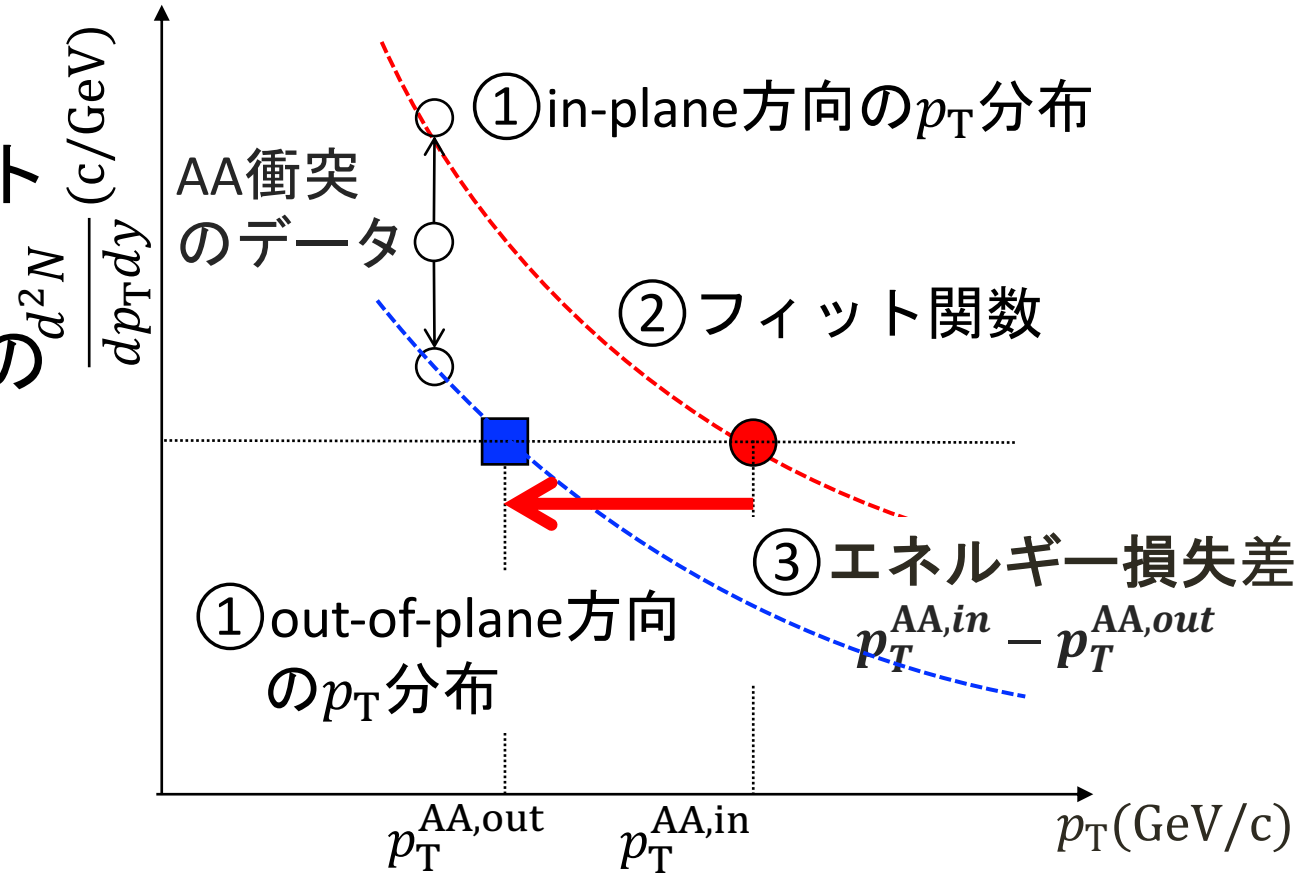
③ in-plane方向とout-of-plane方向の p_T 分布より S'_{loss} を計算する。



解析手法 2 「 S'_{loss} 」

- ① AA衝突のin-plane方向とout-of-plane方向の p_T 分布を算出する。
- ② in-plane方向の p_T 分布のフィット関数を取得する。
- ③ in-plane方向とout-of-plane方向の p_T 分布より S'_{loss} を計算する。

$$S'_{\text{loss}} = \frac{p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{AA,in}}}$$



S_{loss} と S'_{loss} を評価する 3 つの依存性の計算

1. 通過距離 (L) 依存性

- 反応領域中の通過距離による評価。

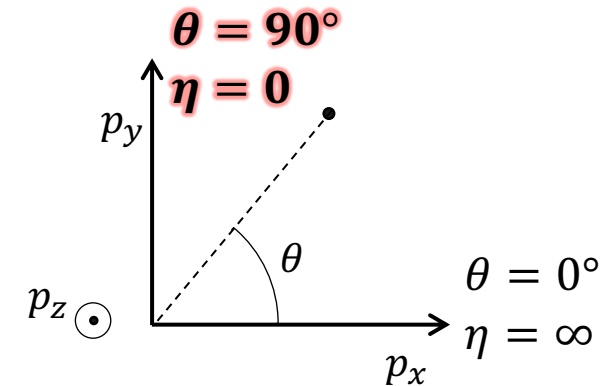
2. 衝突関与核子数 (N_{part}) 依存性

- N_{part} : 衝突に関与した核子数
- 衝突直後 (粒子発生前) の状態の粒子密度による評価。

3. 生成粒子多重度 ($dN/d\eta$) 依存性

- $dN/d\eta$: 単位擬ラピディティあたりの衝突による生成粒子数。 ($\eta = 0$)
- 衝突による粒子発生後の状態のエネルギー密度による評価。

$$\eta \equiv \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{p} \right) = \tanh^{-1}(\cos\theta)$$



反応領域中の通過距離（ L ）計算

1. 原子核対衝突事象の生成

- グラウバーモンテカルロシミュレーション

[Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 57, 205 \(2007\).](#)

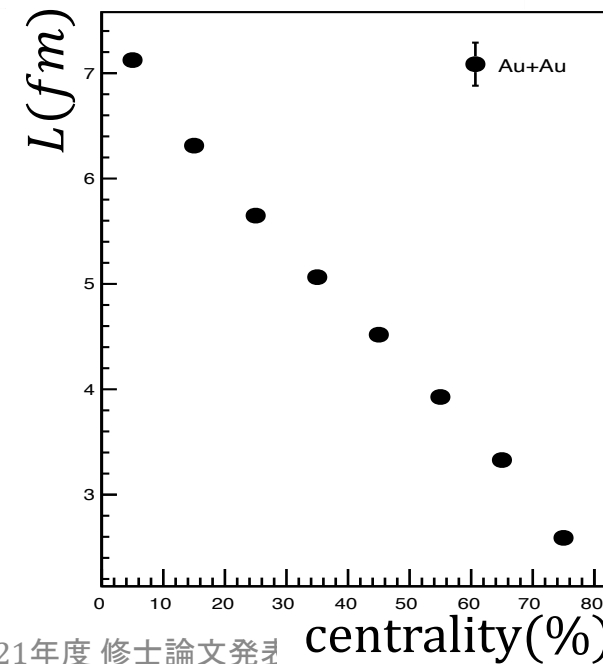
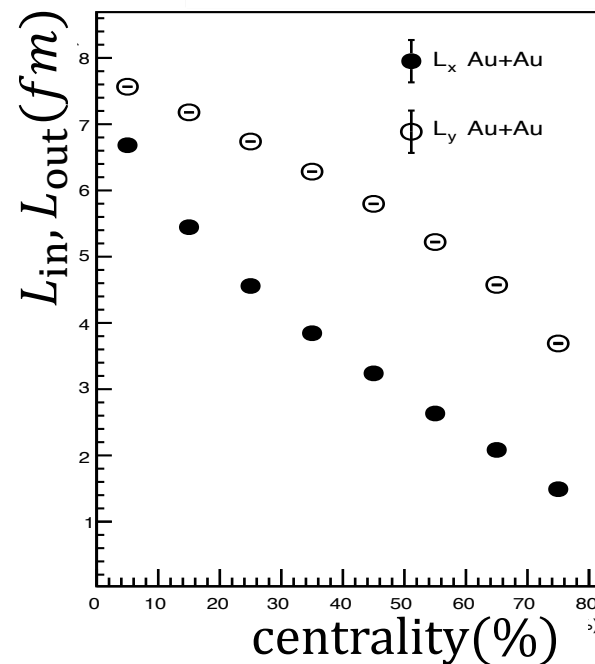
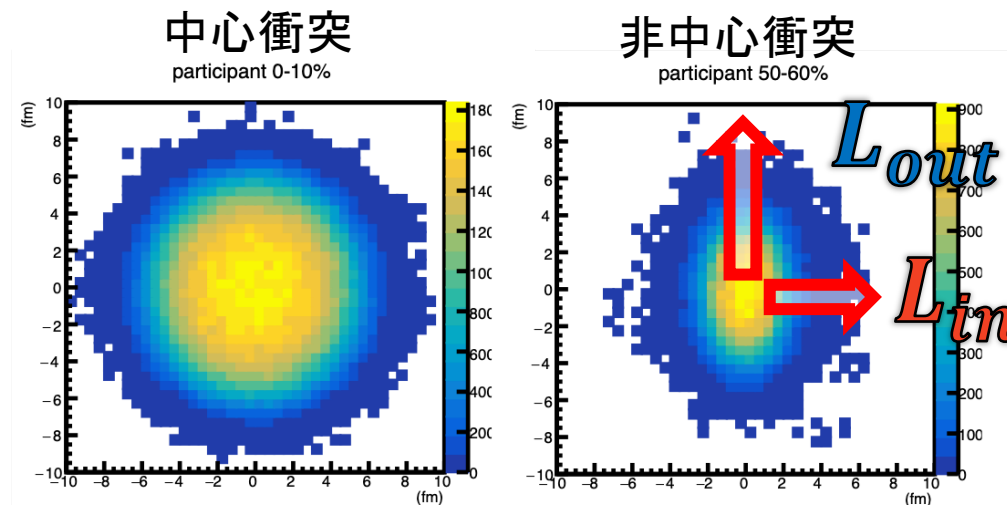
2. 中心度（centrality）10%ごとに通過距離を計算

- in-plane方向の通過距離： L_{in}

- out-of-plane方向の通過距離： L_{out}

- 通過距離： $L = \frac{\overline{L_{in}} + \overline{L_{out}}}{2}$

< N_{part} 分布>



衝突関与核子数 (N_{part}) の計算

N_{part} : 衝突に関与した核子数

衝突直後 (粒子発生前) の状態の粒子密度による評価。

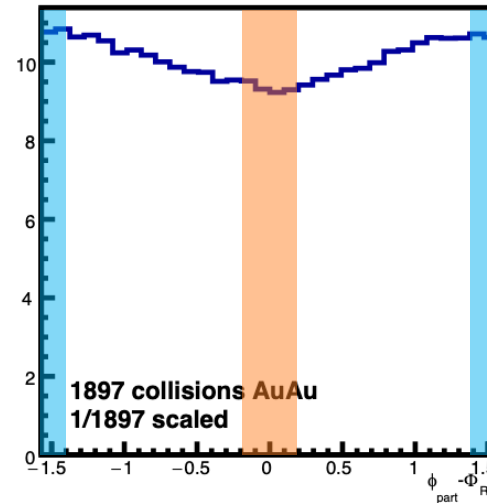
1. 原子核対衝突事象の生成し、centrality 10%ごと衝突関与核子数 (N_{part}) を計算。
2. N_{part} の方位角 (ϕ_{part}) 分布を測定。
3. in-plane方向 ($\phi_{part} = 0$) の N_{part} を $N_{part,in}$ 、out-of-plane方向 ($\phi_{part} = \frac{\pi}{2}$) の N_{part} を $N_{part,out}$ とする。

- $N_{part,in} = 8 * |N_{part}|_{\phi_{part}=0}$

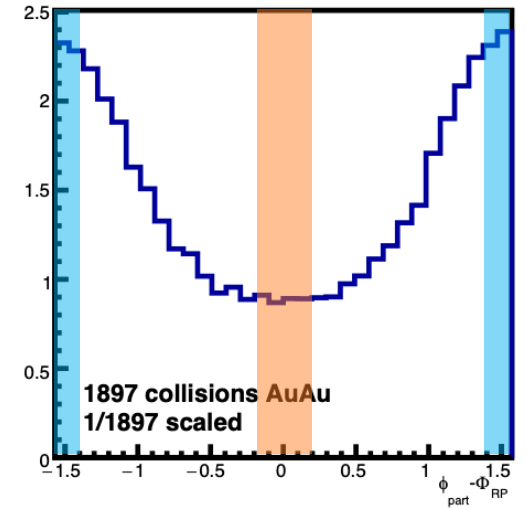
- $N_{part,out} = 8 * |N_{part}|_{\phi_{part}=\frac{\pi}{2}}$

< N_{part} の方位角分布>

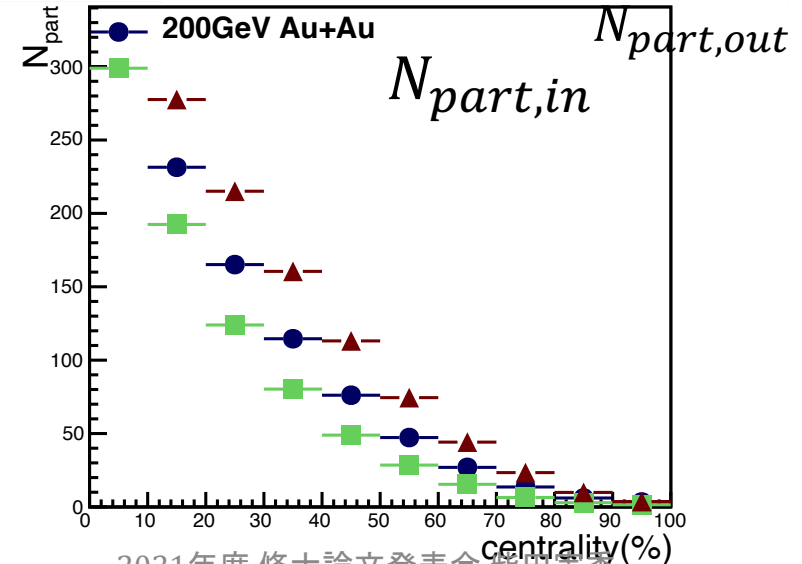
中心衝突



非中心衝突



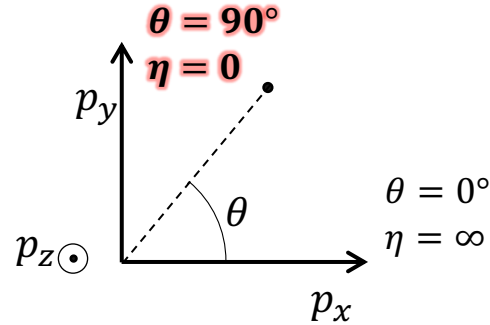
$N_{part,in}$



生成粒子多重度 ($dN/d\eta$) の計算

- $dN/d\eta$: 単位擬ラピディティあたりの衝突による生成粒子数 ($\eta = 0$)
- 擬ラピディティ (η) : 発生粒子の運動を記述する変数。ビーム軸 (z 軸) 方向の速度に対応する値。

$$\eta \equiv \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{p} \right) = \tanh^{-1}(\cos\theta)$$



→衝突による粒子発生後の状態のエネルギー密度による評価。

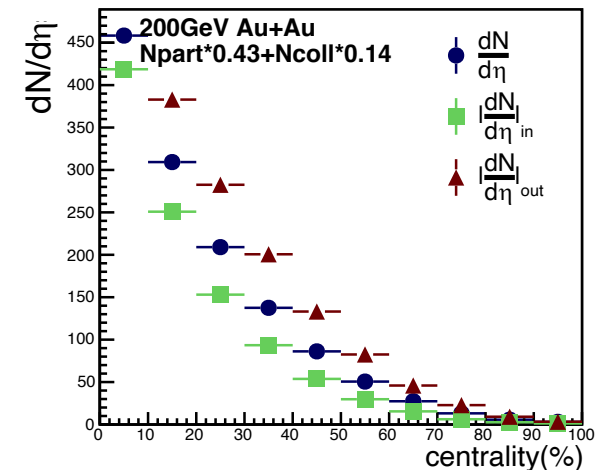
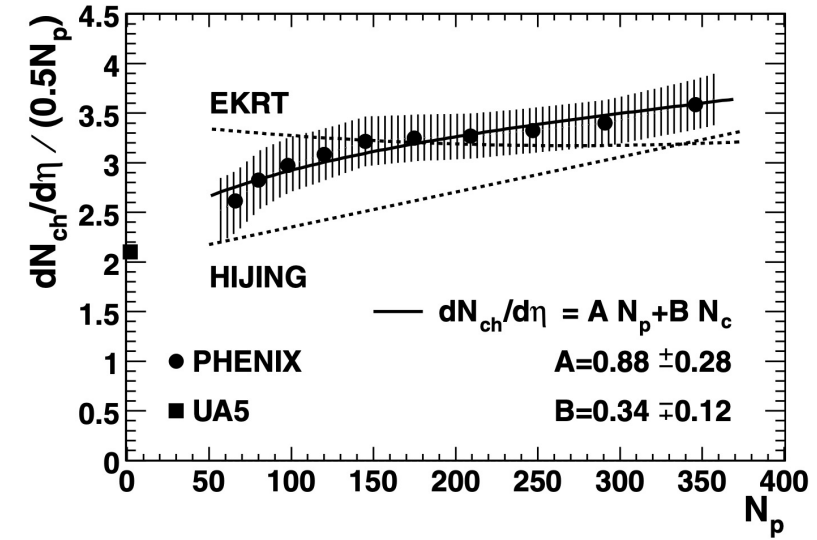
- $dN/d\eta$: 単位擬ラピディティあたりの衝突による $\frac{dN}{d\eta}$ を N_{part} と N_{coll} 見積もる。

$$\frac{dN}{d\eta} = 0.88 * N_{part} + 0.34 * N_{coll}$$

$$\left. \frac{dN}{d\eta} \right|_{in} = 0.88 * N_{part,in} + 0.34 * N_{coll,in}$$

$$\left. \frac{dN}{d\eta} \right|_{out} = 0.88 * N_{part,out} + 0.34 * N_{coll,out}$$

[Phys. Rev. Lett. 86, 3500 \(2001\).](#)



1. エネルギー損失割合の p_T 依存性
2. エネルギー損失割合の L 依存性
3. エネルギー損失割合 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性
4. S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の比較
5. エネルギー損失割合 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

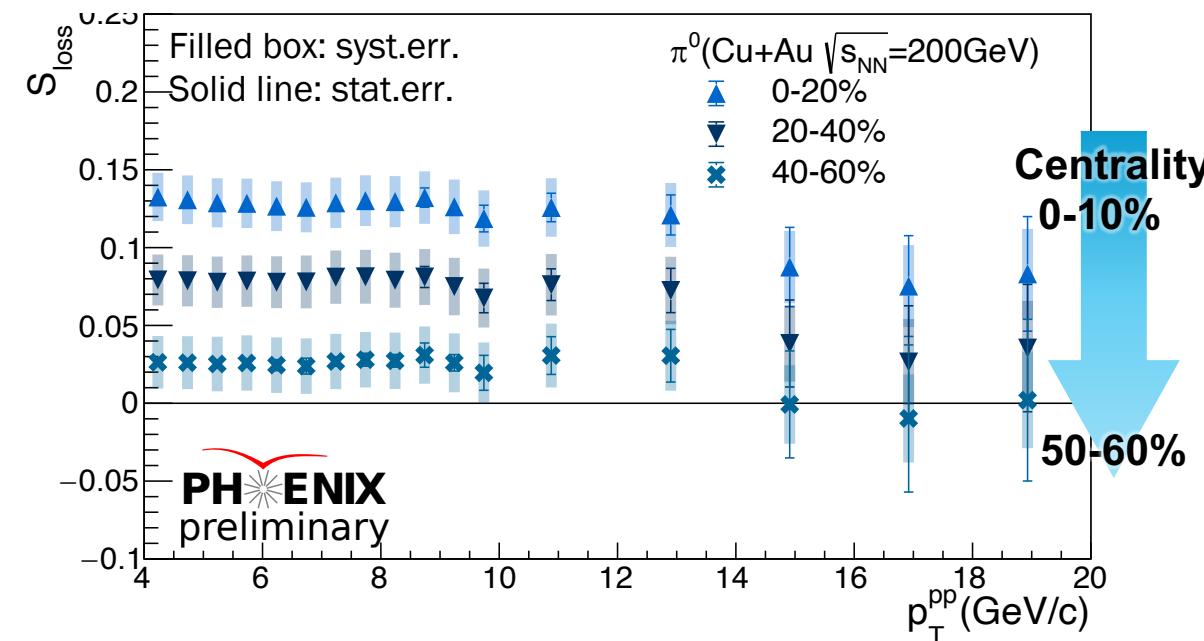
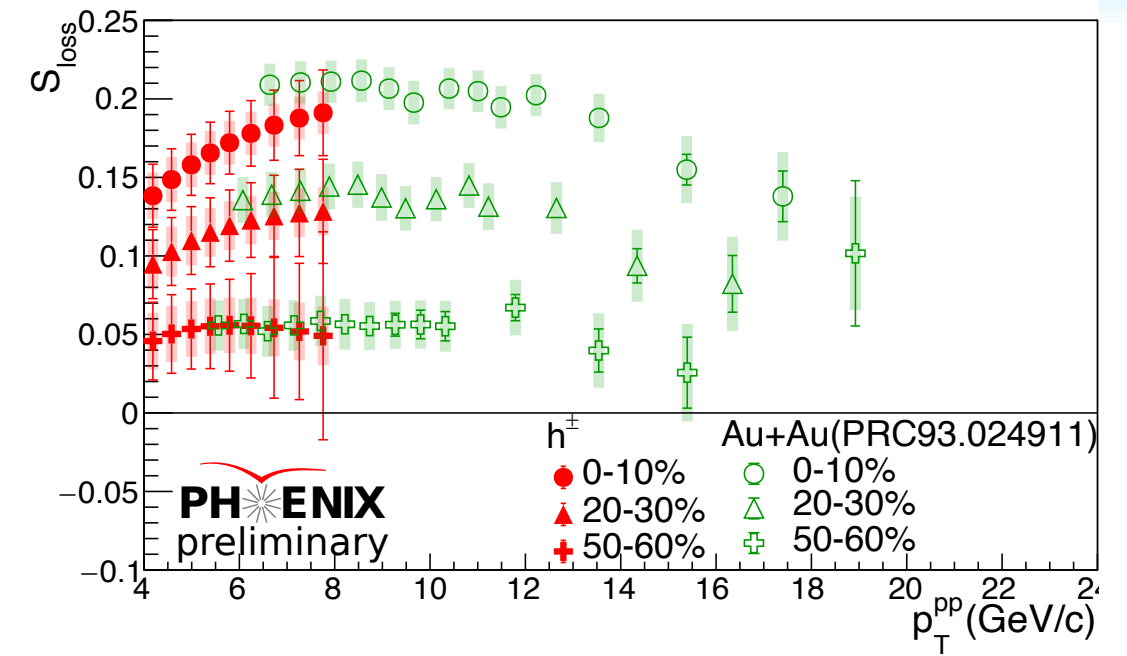
結果「エネルギー損失割合の p_T 依存性」

$$S_{\text{loss}} = \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA}}}{p_T^{\text{pp}}}$$

S_{loss} vs. p_T

1. 金金衝突の荷電ハドロン
 - p_T 依存性が π^0 と一致。
 - 大きな **粒子種依存性なし**
2. 銅金衝突の π^0
 - S_{loss} は p_T に大きく依存せず一定。
 - S_{loss} は centrality に依存しており、反応領域が大きい中心衝突ほど S_{loss} が増加。
 - **先行研究における π^0 と同じ傾向**

反応領域の大きさと密度が異なる衝突系

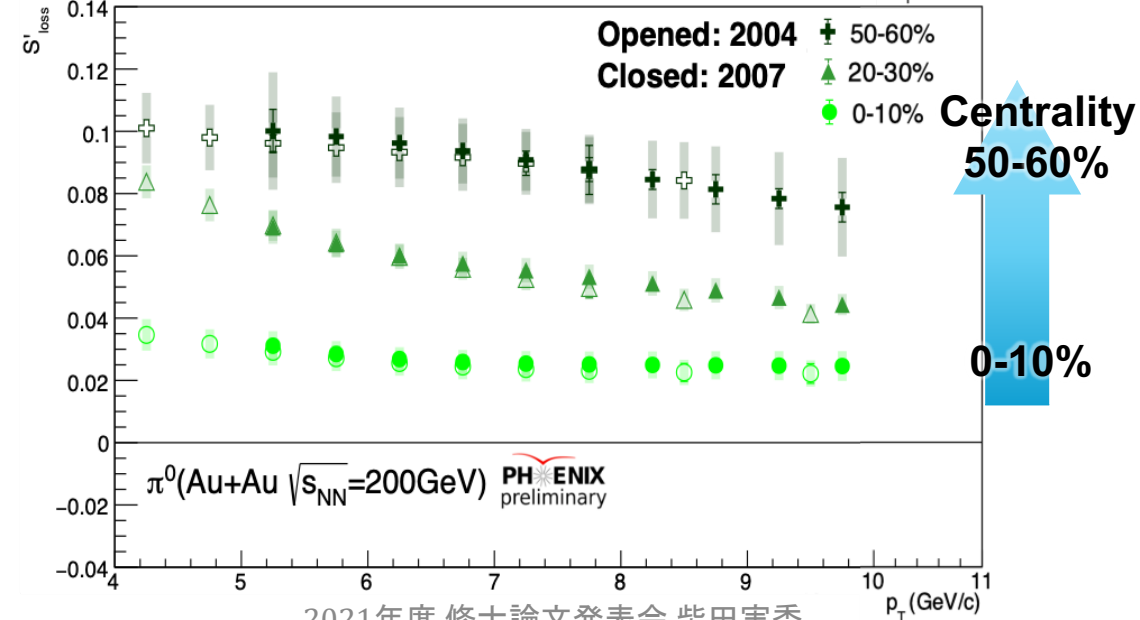
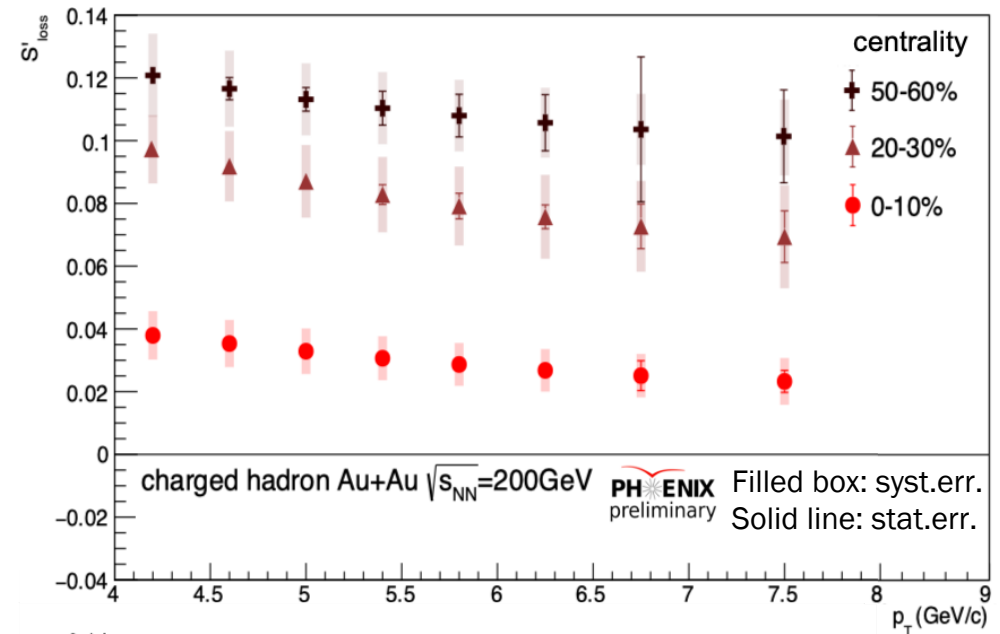
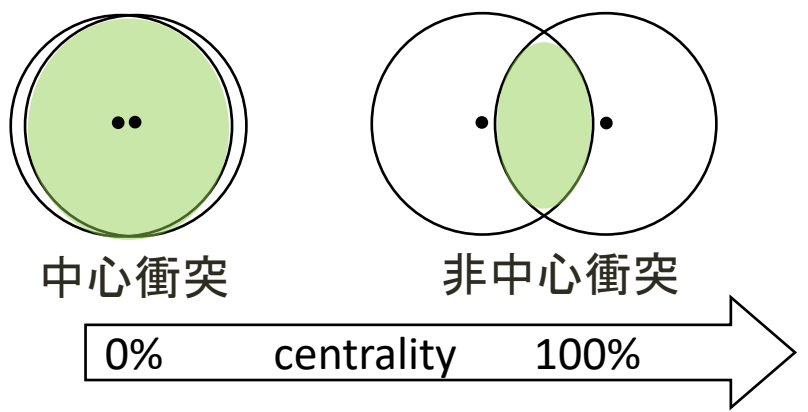


結果「エネルギー損失割合の p_T 依存性」

$$S'_{\text{loss}} = \frac{p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{AA,in}}}$$

S'_{loss} vs. p_T

- 金金衝突の荷電ハドロンと π^0
 - S'_{loss} はcentralityに依存し、反応領域の幾何学的異方性が強い非中心衝突ほど S'_{loss} が増加。
 - 荷電ハドロンと π^0 の p_T 依存性が一致。
→大きな粒子種依存性なし



結果「エネルギー損失割合の p_T 依存性」

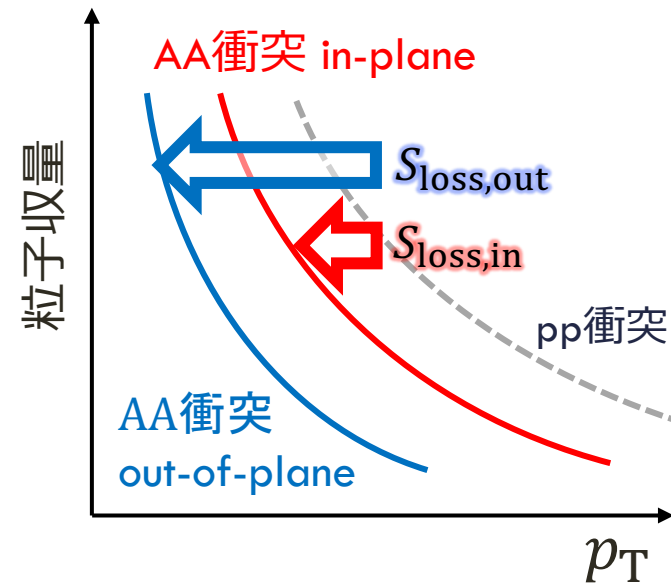
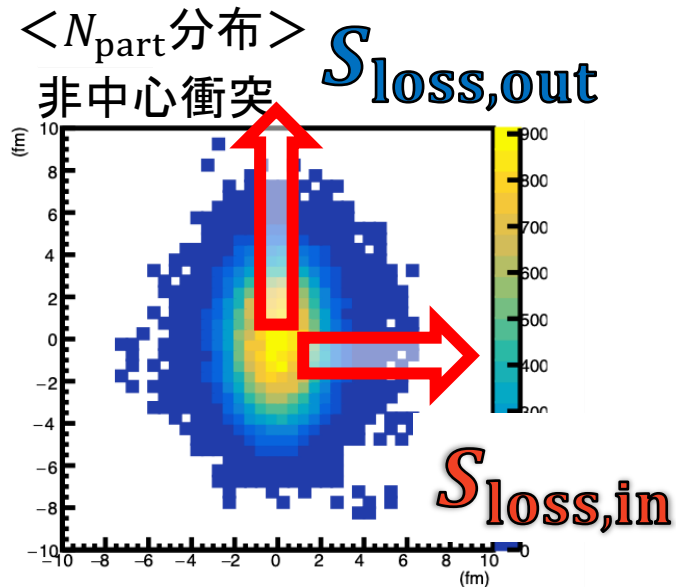
$S_{\text{loss,in}}, S_{\text{loss,out}}$ vs. p_T

- S_{loss} と S'_{loss} は比較可能な量であるか検証した。

< S'_{loss} と S_{loss} の関係式>

$$S'_{\text{loss}} = \frac{p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{AA,in}}} = \left(\frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{pp}}} - \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,in}}}{p_T^{\text{pp}}} \right) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}} = (S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}}) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}}$$

$$S'_{\text{loss}} \cong (\text{out-of-plane方向に生成する粒子の} S_{\text{loss}}) - (\text{in-plane方向に生成する粒子の} S_{\text{loss}})$$



結果「エネルギー損失割合の p_T 依存性」

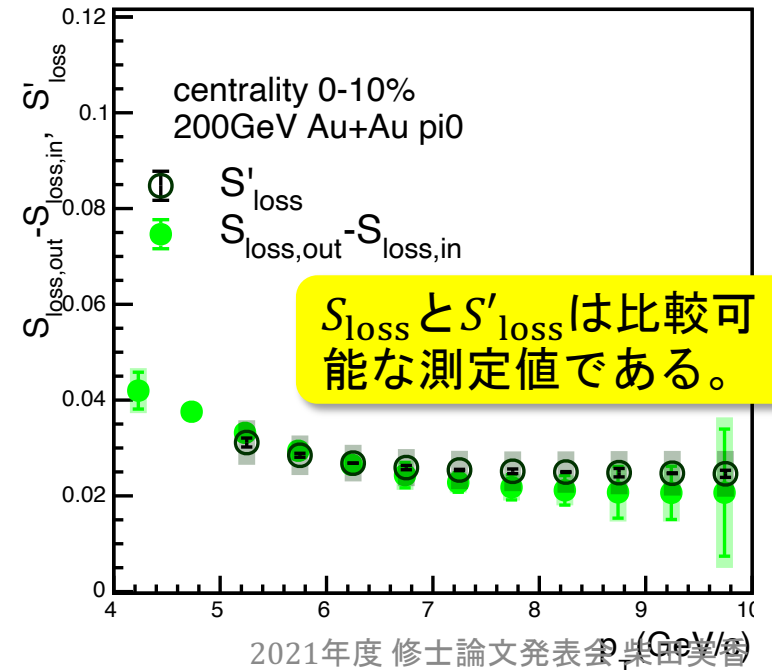
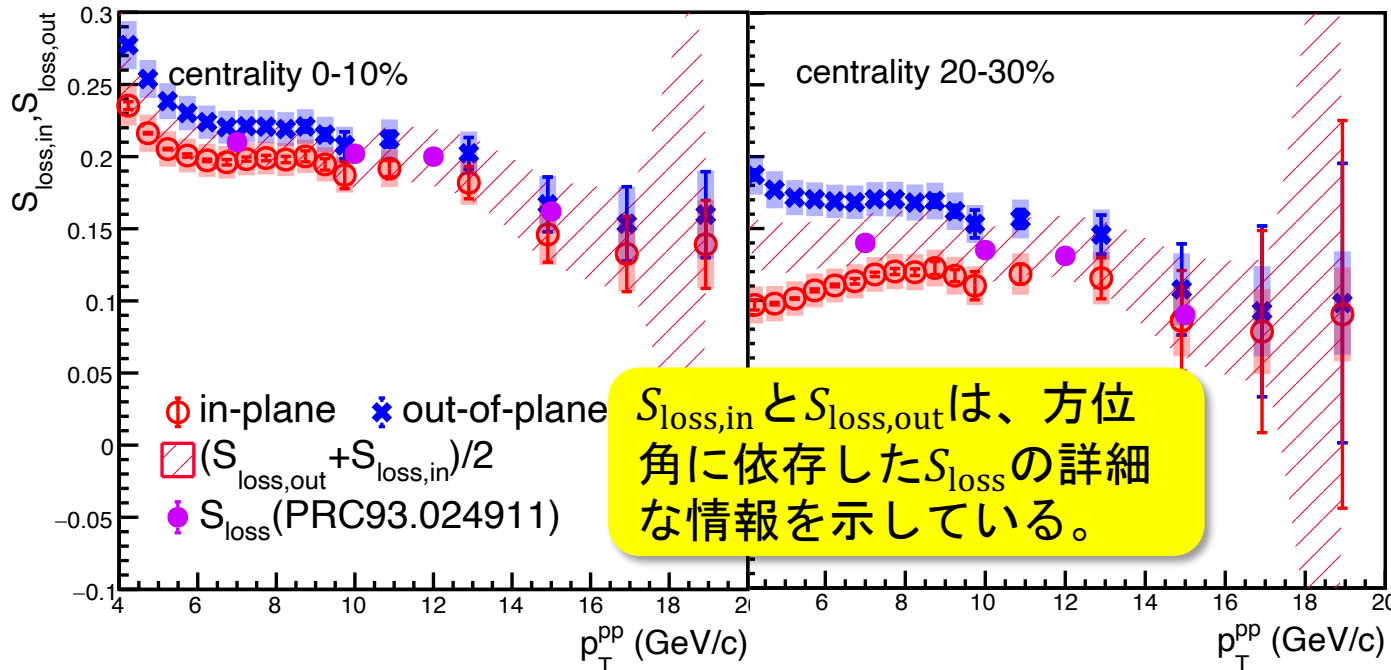
$S_{loss,in}, S_{loss,out}$ vs. p_T

- S_{loss} と S'_{loss} は比較可能な量であるか検証した。

< S'_{loss} と S_{loss} の関係式>

$$S'_{loss} = \frac{p_T^{AA,in} - p_T^{AA,out}}{p_T^{AA,in}} = \left(\frac{p_T^{pp} - p_T^{AA,out}}{p_T^{pp}} - \frac{p_T^{pp} - p_T^{AA,in}}{p_T^{pp}} \right) \times \frac{p_T^{pp}}{p_T^{AA,in}} = (S_{loss,out} - S_{loss,in}) \times \frac{p_T^{pp}}{p_T^{AA,in}}$$

$S'_{loss} \cong$ (out-of-plane方向に生成する粒子の S_{loss}) - (in-plane方向に生成する粒子の S_{loss})



1. エネルギー損失割合の p_T 依存性
2. エネルギー損失割合の L 依存性
3. エネルギー損失割合 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性
4. S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の比較
5. エネルギー損失割合 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

結果「エネルギー損失割合の L 依存性」

$S_{\text{loss}} \text{ vs. } L$

●金銅、金金、銅銅衝突の π^0

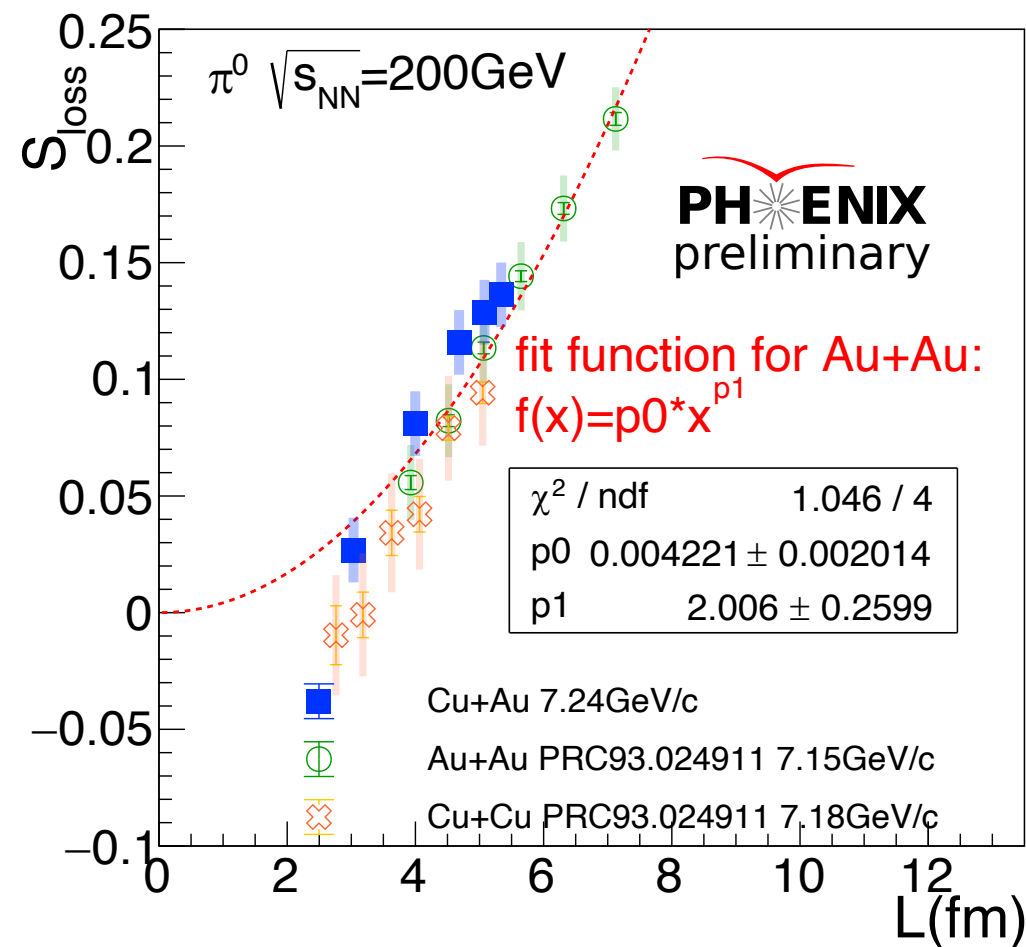
- S_{loss} は L の関数に対し**増加傾向**。

●金金衝突の π^0

フィット関数： $f(x) = p_0 * x^{p_1}$

- S_{loss} は概ね L^2 に比例。
- 高 p_T ハドロンのQGP中でのエネルギー損失機構において、グルーオン放射の寄与が大きいことを示唆。

反応領域中の通過距離 (L) による評価。



結果「エネルギー損失割合のL依存性」

S'_{loss} vs. $L_{\text{out}}^2 - L_{\text{in}}^2$

- S_{loss} が L^2 に比例した結果を踏まえて、 L^2 に対応する $\Delta L^2 = L_{\text{out}}^2 - L_{\text{in}}^2$ で S'_{loss} を評価。

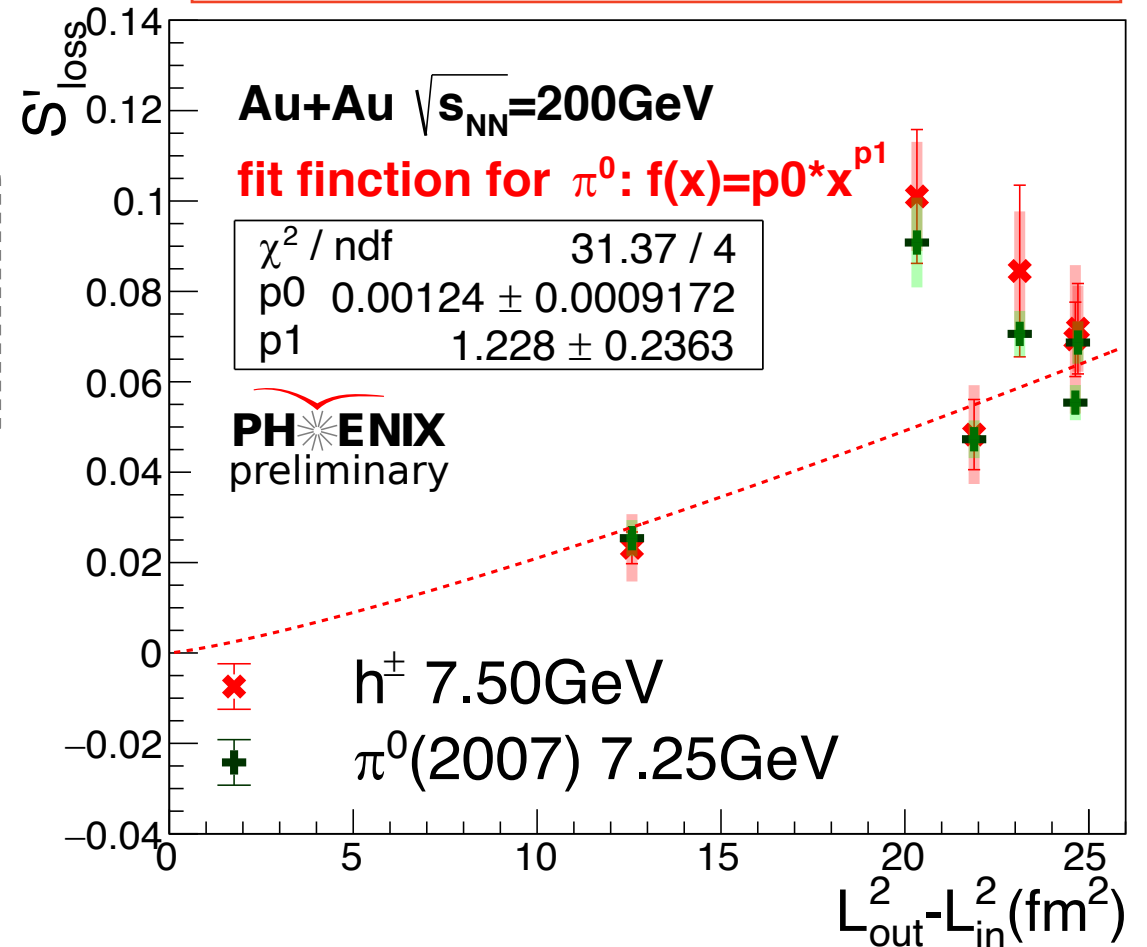
$$S'_{\text{loss}} = (S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}}) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}} \\ = (p_0 \times L_{\text{out}}^2 - p_0 \times L_{\text{in}}^2) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}} = p_0 \times \frac{(L_{\text{out}}^2 - L_{\text{in}}^2)}{\Delta L^2} \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}}$$

● 金金衝突の π^0

フィット関数: $f(x) = p_0 * x^{p_1}$

- S'_{loss} は ΔL^2 の関数に対し概ね増加傾向。
- S'_{loss} をより簡単に表す関数については、より詳細な研究が必要。

反応領域中の通過距離 (L) による評価。



1. エネルギー損失割合の p_T 依存性
2. エネルギー損失割合の L 依存性
3. エネルギー損失割合 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性
4. S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の比較
5. エネルギー損失割合 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

結果「エネルギー損失割合の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性」

$S_{\text{loss}} \text{ vs. } N_{\text{part}}, S_{\text{loss}} \text{ vs. } dN/d\eta$

●銅金、金金、銅銅衝突の π^0

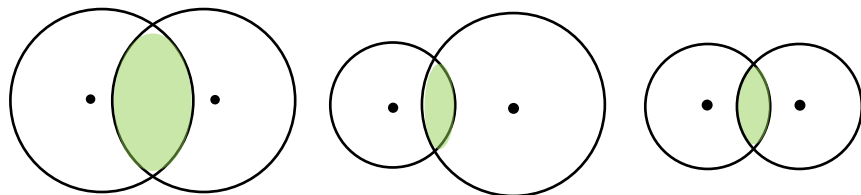
- S_{loss} は N_{part} や $dN/d\eta$ の関数に対し**増加傾向**。
- 3つの衝突系を N_{part} と $dN/d\eta$ の関数で比較すると**一致**。

反応領域の大きさと密度が異なる。

金金衝突

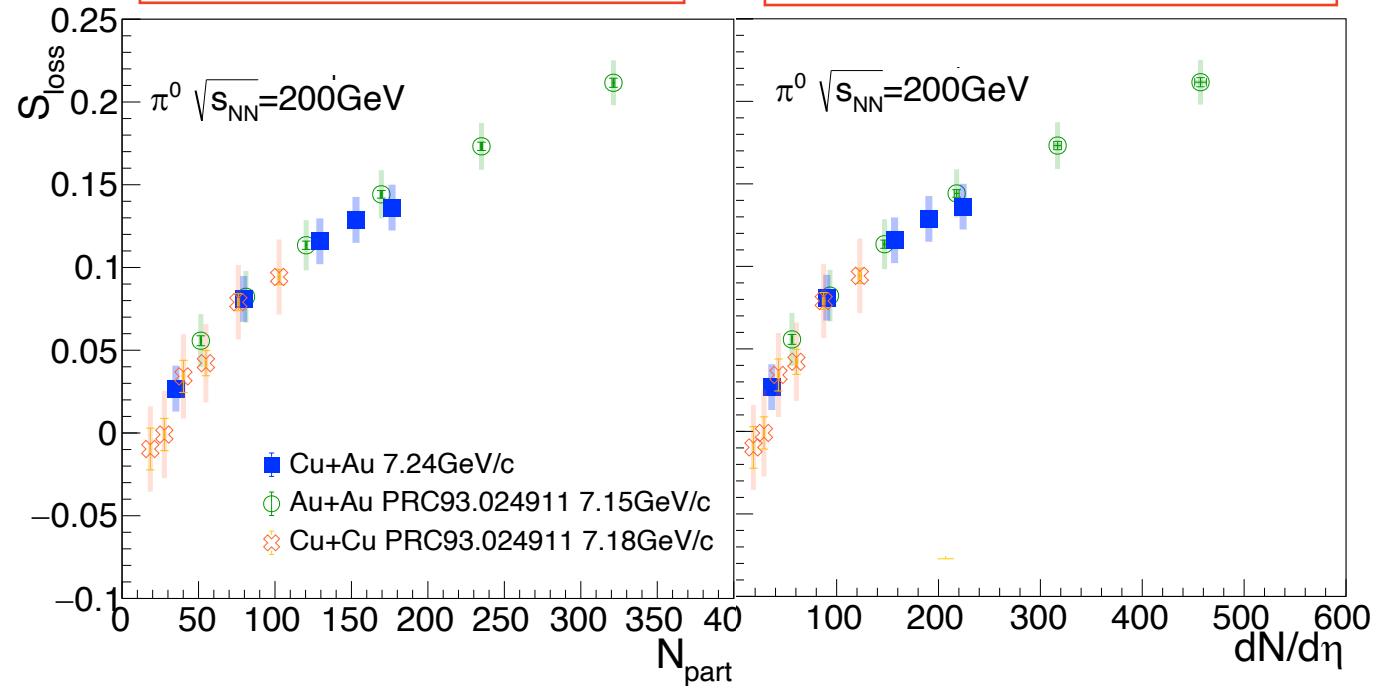
銅金衝突

銅銅衝突



衝突直後（粒子発生前）の状態の粒子密度による評価。

衝突による粒子発生後の状態のエネルギー密度による評価。



1. エネルギー損失割合の p_T 依存性
2. エネルギー損失割合の L 依存性
3. エネルギー損失割合 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性
4. S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の比較
 - ① 比較点 : 反応領域の大きさと密度が異なる衝突系
 - ② 比較点 : 異なる方位角方向に生成する粒子
5. エネルギー損失割合 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

結果「依存性の比較①」

S_{loss} vs. $L, N_{\text{part}}, dN/d\eta$

- 金金、銅金、銅銅衝突における π^0 の S_{loss} は「 N_{part} または $dN/d\eta$ の関数」で比較すると一致した。
→ 反応領域の大きさと密度が異なる衝突系における S_{loss} を1つの関数でフィット。

フィット関数

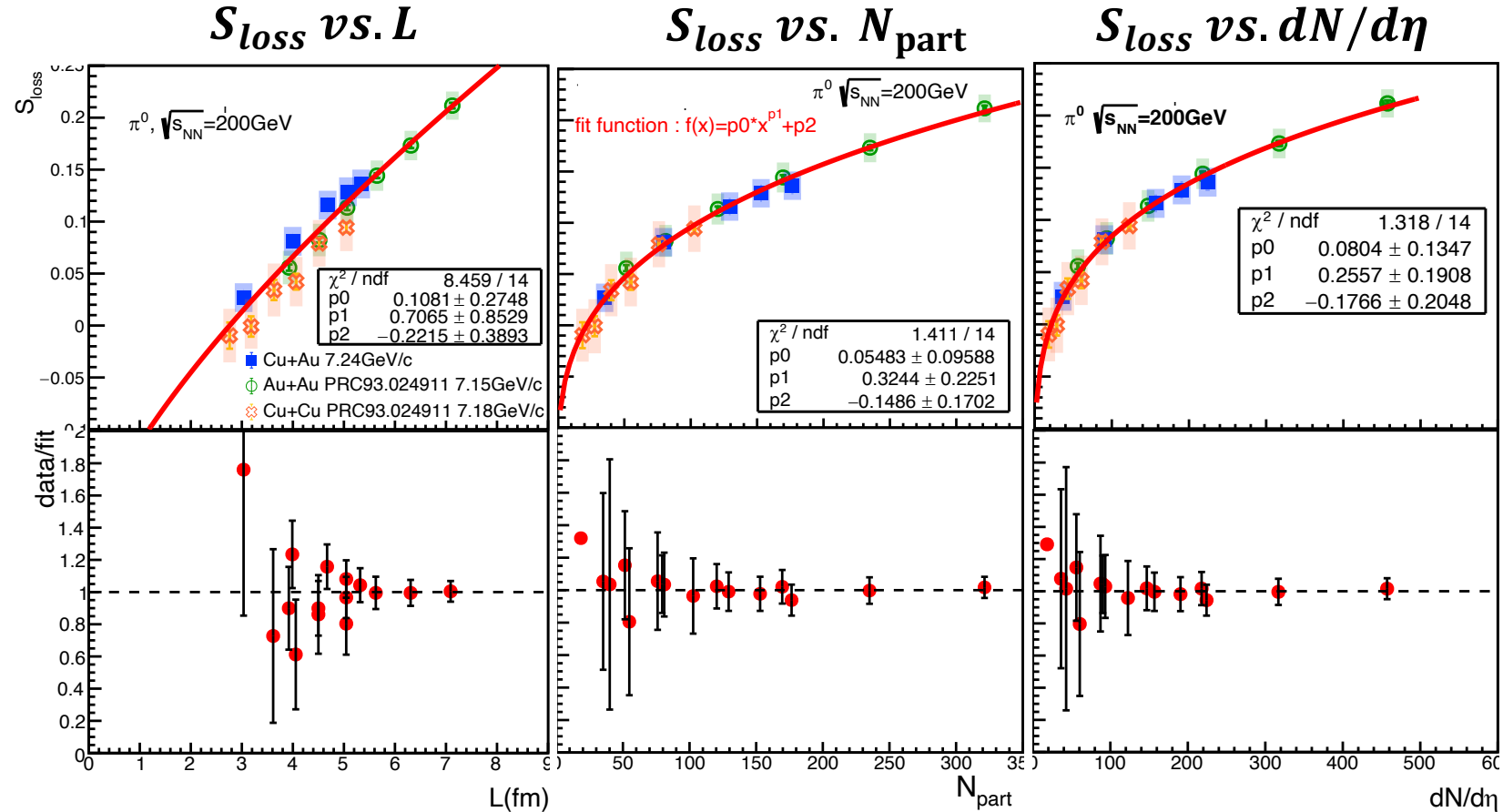
$$f(x) = p_0 * x^{p_1} + p_2$$

- フィット関数の χ^2/ndf

- L : 0.604
- N_{part} : 0.101
- $dN/d\eta$: 0.094

- 反応領域の大きさと密度が異なる3つの衝突系の S_{loss} は、 L 、 N_{part} 、 $dN/d\eta$ の関数で一意に表される。

- L の関数としてよりも N_{part} や $dN/d\eta$ の関数として比較した方が、より一致した。

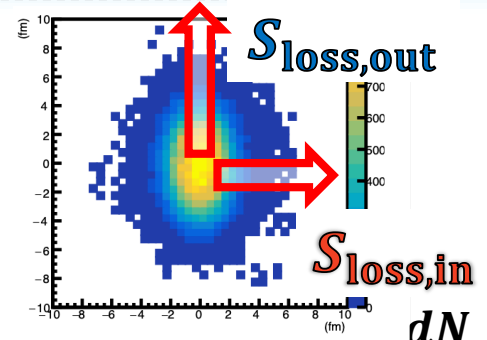


結果「依存性の比較②」

$S_{\text{loss,in}}, S_{\text{loss,out}}$ vs. $L, N_{\text{part}}, dN/d\eta$

$S_{\text{loss,in}}$: in-plane方向のエネルギー損失割合
 $S_{\text{loss,out}}$: out-of-plane方向のエネルギー損失割合

- 方位角に依存した $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ は S_{loss} よりも詳細な情報を含んでいる。
 →異なる方位角方向に生成する粒子のエネルギー損失割合を1つの関数でフィット。

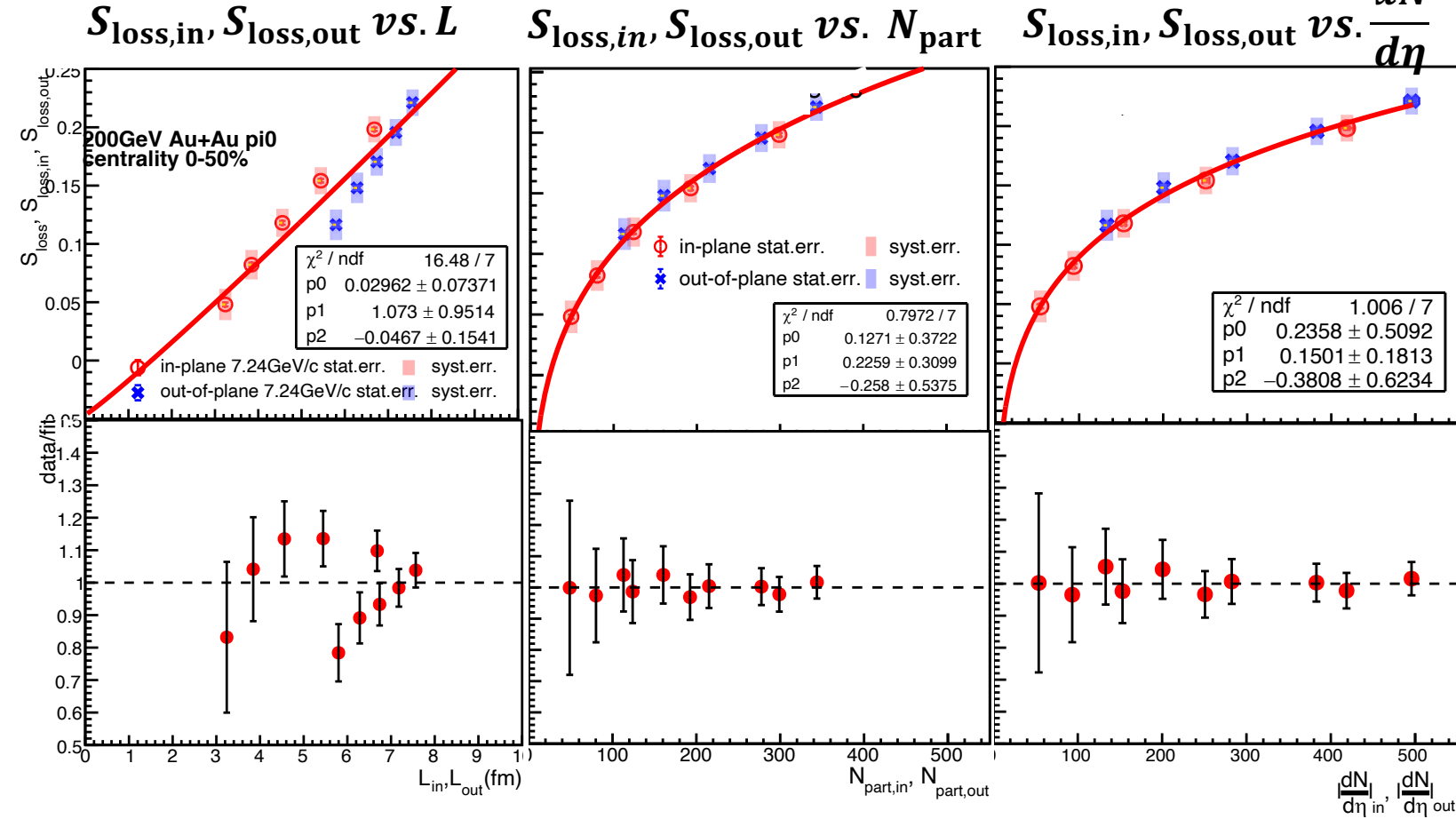


フィット関数

$$f(x) = p_0 * x^{p_1} + p_2$$

- フィット関数の χ^2/ndf
 - L : 2.354
 - N_{part} : 0.114
 - $dN/d\eta$: 0.144

異なる方位角に放出される粒子のエネルギー損失は、Lの関数としてよりも N_{part} や $dN/d\eta$ の関数として比較した方が、より一致して一意に表される。



1. エネルギー損失割合の p_T 依存性
2. エネルギー損失割合の L 依存性
3. エネルギー損失割合 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性
4. S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の比較
5. エネルギー損失割合 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

結果 「 S'_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性」

$$S'_{\text{loss}} \text{ vs. } N_{\text{part,out}}^{p1} - N_{\text{part,in}}^{p1} \left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{out}} \right)^{p1} - \left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{in}} \right)^{p1}$$

- S'_{loss} の N_{part} と $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果より、乗数パラメータ $p1$ を得た。
→乗数パラメータ $p1$ を用いた関数で S'_{loss} を評価した。

- S'_{loss} のフィット関数 ($f(x) = p0 * x^{p1} + p2$)

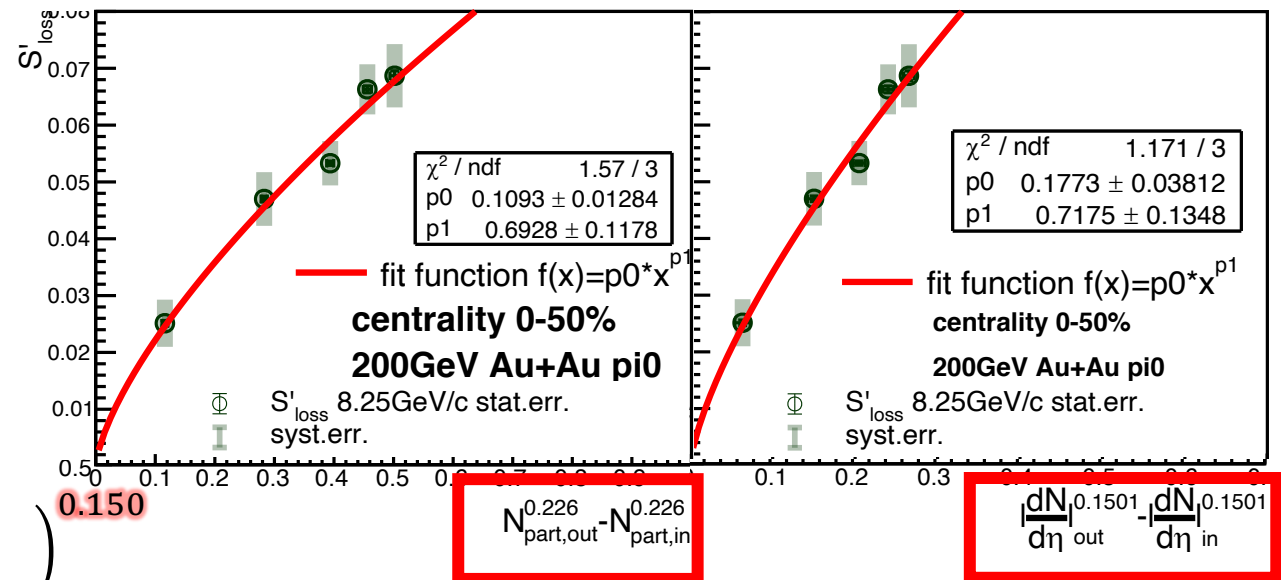
1. $N_{\text{part}}: p1 = 0.226$

2. $\frac{dN}{d\eta}: p1 = 0.150$

- S'_{loss} を評価する関数(横軸):

1. $N_{\text{part,out}}^{p1} - N_{\text{part,in}}^{p1} = N_{\text{part,out}}^{0.226} - N_{\text{part,in}}^{0.226}$

2. $\left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{out}} \right)^{p1} - \left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{in}} \right)^{p1} = \left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{out}} \right)^{0.150} - \left(\left| \frac{dN}{d\eta} \right|_{\text{in}} \right)^{0.150}$



- S'_{loss} が正の相関を持つ、 N_{part} または $dN/d\eta$ の関数で示すことができた。

- 反応領域の大きさと密度の違う衝突系における、QGP 中の放出粒子のエネルギー損失を系統的に研究し、定量的に評価することが目的。
- S_{loss} は p_T に大きく依存せず一定で、反応領域が大きい中心衝突ほど増加。
- S'_{loss} は反応領域の幾何学的異方性が強い非中心衝突ほど増加。
- 反応領域の大きさと密度の違う衝突系における S_{loss} は、 L や N_{part} 、 $dN/d\eta$ の関数で比較すると一致する。
- 異なる方位角に放出される粒子のエネルギー損失は、 N_{part} や $dN/d\eta$ の関数で比較すると一致する。
- S'_{loss} は、 S_{loss} の N_{part} と $dN/d\eta$ 依存性の結果を使用した関数により正の相関を示す。

- 現在は、結果と理論モデルの比較を行うために JetScape と呼ばれる重イオン衝突シミュレーションフレームワークを用いたシミュレーションに取り組んでいる。この比較により、QGP 中での粒子のエネルギー損失に関する、より詳細な情報が得られると考えている。