

2021年度 修士学位論文

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
数物科学専攻 高エネルギー物理学研究室

柴田実香

2021年2月10日

概要

クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) とは高温、高密度下であったとされる宇宙初期のビッグバンから数 μ 秒後に実現していた、クォークとグルーオンが核子への閉じ込めから解放された状態である。この状態は初期宇宙発展の解明につながる重要な研究テーマとして非常に注目されている。現在 QGP は大型加速器を利用した原子核衝突実験で人工的に生成できることが報告されており、その性質の解明を目指して研究が進められている。本研究では、米国のブルックヘブン国立研究所の加速器 (RHIC) で行われた PHENIX 実験のデータを用い、様々な衝突系における QGP 中での放出粒子のエネルギー損失について研究を行った。使用したデータは、重心系エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の金金衝突における π^0 と荷電ハドロン、銅金衝突における π^0 である。

エネルギー損失は異なる 2 通りの方法で評価した。1 つ目は、原子核対衝突 (AA 衝突) と核子核子衝突 (pp 衝突) の比較による方法である。ここでは、エネルギー損失を定量的に表すパラメータとして運動量損失比 $S_{\text{loss}} = (p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA}})/p_T^{\text{pp}}$ を用いた。2 つ目は、AA 衝突における反応平面に対し平行方向 ("in-plane") と垂直方向 ("out-of-plane") の比較による方法である。1 つ目の方法と同様に、エネルギー損失を定量的に表すパラメータとして運動量損失比 $S'_{\text{loss}} = (p_T^{\text{AA, in}} - p_T^{\text{AA, out}})/p_T^{\text{AA, in}}$ を用いた。

測定の結果、 S_{loss} は p_T に大きく依存せず一定であることを確認した。また、この値は centrality に依存しており、反応領域が大きい中心衝突ほど S_{loss} が増加することを確認した。また、 S'_{loss} は centrality に依存しており、反応領域の幾何学的異方性が強い周辺衝突ほど S'_{loss} が増加することがわかった。さらに、 S_{loss} の通過距離 (L) 依存性と衝突関与核子数 (N_{part}) 依存性、及び生成粒子多重度 ($dN/d\eta$) 依存性の測定結果より、銅金衝突と先行研究の金金衝突と銅銅衝突の π^0 では、 L の関数としてよりも、 N_{part} や $dN/d\eta$ の関数として比較すると、より一致することがわかった。また、金金衝突における π^0 の S_{loss} と方位角に依存した $S_{\text{loss, in}}$ と $S_{\text{loss, out}}$ においても、 L の関数としてよりも、 N_{part} や $dN/d\eta$ の関数として比較すると、より一致することがわかった。これより、方位角を考慮する場合と考慮しない場合のエネルギー損失を同時に表すことができる一つの関数を見つけることができた。さらに、 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の結果を踏まえ、 S'_{loss} の依存性を測定した結果、 S'_{loss} が正の相関を持つ、 N_{part} と $dN/d\eta$ の関数を初めて示すことができた。

目次

第1章 序章	1
1.1 クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)	1
1.2 高エネルギー原子核衝突実験	1
1.2.1 高い p_T ハドロンの収量抑制	1
1.2.2 大きな楕円の方位角異方性の発見	2
1.3 研究目的と特色	3
第2章 RHIC-PHENIX	4
2.1 RHIC 加速器	4
2.2 PHENIX 実験	4
2.2.1 BBC (ビーム・ビーム・カウンター)	5
2.2.2 DC (ドリフトチェンバー)	6
2.2.3 RICH (リング・イメージング・チェレンコフ測定器)	6
2.2.4 EMCal (電子カロリメータ)	6
第3章 解析手法	7
3.1 物理量の定義	8
3.1.1 participant と spectator、 N_{part} と N_{coll}	8
3.1.2 中心衝突度 (centrality)	9
3.1.3 反応領域、反応平面、in-plane、out-of-plane	9
3.1.4 横運動量 (p_T) と擬ラピディティ (η)	10
3.1.5 生成粒子多重度 ($dN/d\eta$)	10
3.2 エネルギー損失割合 S_{loss}	11
3.2.1 pp 衝突における p_T スペクトラのスケールリング	11
3.2.2 pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラの p_T 差の測定と p_T^{pp} による分割	13
3.2.3 系統誤差と統計誤差	16
3.3 エネルギー損失割合 S'_{loss}	17
3.3.1 in-plane と out-of-plane の p_T スペクトラの算出	17
3.3.2 in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの p_T 差の測定 とその差の $p_T^{\text{AA,in}}$ による分割	19
3.3.3 系統誤差と統計誤差	20
3.4 S_{loss} と S'_{loss} の関係	21
3.5 エネルギー損失割合 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$	21
3.6 QGP 中の通過距離 (L)	22
3.6.1 原子核対衝突事象の生成	22

3.6.2	反応領域の決定	24
3.6.3	通過距離 L_{in} 、 L_{out} の計算	25
3.6.4	通過距離の n 乗 (L^2 と ΔL^2) の計算	26
3.7	生成粒子多重度 ($dN/d\eta$)	26
3.7.1	$N_{part,in}$ 、 $N_{coll,in}$ 、 $N_{part,out}$ 、 $N_{coll,out}$ 、 $ dN/d\eta _{in}$ 、及び $ dN/d\eta _{out}$ の算出	27
第 4 章 結果・考察		29
4.1	エネルギー損失割合 (S_{loss} , S'_{loss}) の p_T 依存性	29
4.1.1	S_{loss} の p_T 依存性	29
4.1.2	S'_{loss} の p_T 依存性	30
4.1.3	S_{loss} と S'_{loss} の比較	30
4.2	エネルギー損失割合 (S_{loss} , S'_{loss}) の通過距離依存性	32
4.2.1	S_{loss} の L^2 依存性	32
4.2.2	S'_{loss} の $L_{out}^2 - L_{in}^2$ 依存性	32
4.3	エネルギー損失割合 (S_{loss} , S'_{loss}) の衝突関与核子数と生成粒子多重度依存性	33
4.3.1	S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性	34
4.3.2	$S_{loss,in}$ と $S_{loss,out}$ による L 、 N_{part} 、及び $dN/d\eta$ 依存性の比較 . . .	35
4.3.3	S'_{loss} の $N_{part,out}^{2/3} - N_{part,in}^{2/3}$ 依存性と $ dN/d\eta _{out}^{2/3} - dN/d\eta _{in}^{2/3}$ 依存性	38
4.3.4	S'_{loss} の $N_{part,out}^n - N_{part,in}^n$ 依存性と $ dN/d\eta _{out}^n - dN/d\eta _{in}^n$ 依存性 .	38
第 5 章 まとめと今後の課題		40
付録 A S_{loss} 、 S'_{loss} の測定結果		44
付録 B S_{loss} の系統誤差と統計誤差		52
B.1	系統誤差	52
B.2	統計誤差	53
付録 C S'_{loss} の系統誤差と統計誤差		57
C.1	系統誤差	57
C.2	統計誤差	59

目次

1.1	金金中心衝突における荷電ハドロンと π^0 の R_{AA} 比 [2]。	2
1.2	核子対衝突 (pp 衝突) の粒子収量と原子核対衝突 (AA 衝突) の粒子収量の比較の模式図。	2
2.1	Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC) の上空写真。	4
2.2	上: PHENIX 検出器をビーム軸方向から見た図。 下: PHENIX 検出器をビーム軸に平行な方向から見た図。	5
3.1	S_{loss} の計算手法における pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラの比較のイメージ図。	7
3.2	S'_{loss} の計算手法における AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの比較のイメージ図。	7
3.3	本研究で用いたエネルギー損失を評価する値の関係図。	8
3.4	原子核衝突をビーム軸に平行な方向 (左図) と垂直な方向 (右図) から見た時の participant と spectator の概念図。	8
3.5	ビーム軸方向に垂直な方向から見た場合の衝突原子核の重なり度合いと centrality の関係を表した概念図。	9
3.6	xyz 座標	9
3.7	反応領域、反応平面、in-plane、out-of-plane を表した概略図。	9
3.8	p_x, p_y, p_z 座標	10
3.9	衝突関与核子 (participant) 対ごとの荷電ハドロンの擬ラピディティ密度の衝突関与核子数 (N_{part}) 依存。 [5]	11
3.10	E_T/N_{ch} の N_p 依存性。 [7]	11
3.11	S_{loss} 計算の関係図。	11
3.12	pp 衝突と金金衝突の荷電ハドロンの p_T スペクトラ。星印が中心衝突、丸印が周辺衝突を表す。また塗り潰されている印が金金衝突、塗りつぶされていない印が pp 衝突を表す。	12
3.13	(上段) スケーリング後の pp 衝突の p_T スペクトラ。(中段) フィット関数の値に対するデータ点の割合。(下段) データの系統誤差に対するフィット関数の値とデータ点の差。中段と下段の赤丸点 (original) は式 (3.13)、青四角点 (new) は式 (3.10) の結果を表す。ただし、中段と下段は centrality0-10% の結果である。	13

3.14	(上段) AA 衝突における p_T スペクトラ。(中段) フィット関数の値に対するデータ点の割合。(下段) データの系統誤差に対するフィット関数の値とデータ点の差。中段と下段の赤丸点 (original) は式 (3.13)、青四角点 (new) は式 (3.15) の結果を表す。ただし、中段と下段は centrality0-10% の結果である。	16
3.15	S'_{loss} 計算の関係図。	17
3.16	(上段) 金金衝突の centrality0-10% における v_2 の p_T 依存性。(下段) フィット関数 (3.18) の値に対するデータ点の割合。	18
3.17	centrality0-10% と 50-60% における金金衝突の π^0 の in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラ。丸印が p_T スペクトラ、プラス印が丸印が in-plane 方向の p_T スペクトラ、四角印が out-of-plane 方向の p_T スペクトラを表す。また塗り潰されている印が中心衝突、塗りつぶされていない印が周辺衝突を表す。	19
3.18	$S_{\text{loss},in}$ と $S_{\text{loss},out}$ 計算の関係図。	21
3.19	金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} の centrality 依存性。	23
3.20	centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における N_{part} の二次元分布。	23
3.21	centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における N_{coll} の二次元分布。	23
3.22	金金衝突における核子の位置を表すイメージ図。赤色と青色はそれぞれ原子核 A と原子核 B の核子、緑色は participant の位置を表す。左の点線は $R = 1.18 \times A^{1/3} \sim 6.38$ の原子核の輪郭。右の点線は $R = r_{\text{max}}$ の原子核の輪郭。	24
3.23	金金衝突における r_{max} 分布。	24
3.24	銅金衝突における r_{max} 分布。	24
3.25	反応領域のモデル図。	25
3.26	金金衝突における L^2 と ΔL^2 の centrality 依存。	26
3.27	金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} 、及び $dN/d\eta$ の centrality 依存。丸印は方位角を考慮しない値、三角印は in-plane 方向、四角印は out-of-plane 方向の値である。	26
3.28	centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における $\phi_{\text{part}} - \Phi_{RP}$ 分布。	27
3.29	centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{RP}$ 分布。	27
4.1	(上) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 の S_{loss} vs. p_T (下) 銅金衝突における π^0 の S_{loss} vs. p_T	29
4.2	金金衝突における荷電ハドロンと π^0 の S'_{loss} vs. p_T	30
4.3	金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss},in}$ と $S_{\text{loss},out}$ と S_{loss} の p_T 依存性。紫丸印は金金衝突における π^0 の S_{loss} 、斜線は $\frac{S_{\text{loss},out} + S_{\text{loss},in}}{2}$ の p_T 依存性を示す。	31
4.4	金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss},out} - S_{\text{loss},in}$ と S'_{loss} の p_T 依存。	31
4.5	金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4]、銅金衝突における π^0 の S_{loss} vs. L^2	32
4.6	S'_{loss} の ΔL^2 依存 (金金衝突 (荷電ハドロン、 π^0))。	32
4.7	金金衝突における通過距離 L と N_{part} の相関関係。	33
4.8	金金衝突における通過距離 L と $dN/d\eta$ の相関関係。	33

4.9	(左上) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4] の S_{loss} vs. N_{part} 。(右上) 銅金衝突と金金衝突 [4]、及び銅銅衝突 [4] における π^0 の S_{loss} vs. N_{part} 。(左下) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4] の S_{loss} vs. $dN/d\eta$ 。(右下) 銅金衝突と金金衝突 [4]、及び銅銅衝突 [4] における π^0 の S_{loss} vs. $dN/d\eta$ 。 ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$)	34
4.10	(上) 銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の N_{part} 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($6\text{GeV}/c \leq p_T < 9\text{GeV}/c$)	35
4.11	(上) 銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($6\text{GeV}/c \leq p_T < 9\text{GeV}/c$)	35
4.12	金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss}}[4]$ 、 $S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$ ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$)	36
4.13	(上) 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の N_{part} 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit)	37
4.14	(上) 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit)	37
4.15	(左) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $N_{\text{part}}^{2/3}$ 依存。(右) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $(dN/d\eta)^{2/3}$ 依存。 ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$)	38
4.16	(上) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の N_{part}^n 依存性 (下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 10\text{GeV}/c$)	39
4.17	(上) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $(dN/d\eta)^n$ 依存性 (下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 10\text{GeV}/c$)	39
B.1	上段： S_{loss} 誤差計算における $S_{\text{loss,I}}$ と $S_{\text{loss,II}}$ のイメージ図。破線は pp 衝突と AA 衝突のスペクトラ、赤い実線 (I と II) は、pp 衝突と AA 衝突のスペクトラの p_T 値の差を示している。下段： S_{loss} 誤差計算における $S_{\text{loss,III}}$ と $S_{\text{loss,IV}}$ のイメージ図。赤い実線 (III と IV) は、破線のスペクトラの p_T 値の差を示している。各値の説明は、表 B.1 にまとめた。	54
B.2	centrality ごとに計算した $S_{\text{loss,I}}$ 、 $S_{\text{loss,II}}$ 、 $S_{\text{loss,III}}$ 、及び $S_{\text{loss,IV}}$ の p_T 依存。実線のは元は元の S_{loss} 、星印は $S_{\text{loss,I}}$ 、白丸は $S_{\text{loss,II}}$ 、クロスは $S_{\text{loss,III}}$ 、プラスは $S_{\text{loss,IV}}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 、下段は銅金衝突の π^0 の結果である。	55
B.3	centrality ごとに計算した $S_{\text{loss,i}}$ 、 $S_{\text{loss,ii}}$ 、 $S_{\text{loss,iii}}$ 、及び $S_{\text{loss,iv}}$ の p_T 依存。実線のは元は元の S_{loss} 、クロスは $S_{\text{loss,i}}$ 、プラスは $S_{\text{loss,ii}}$ 、星印は $S_{\text{loss,iii}}$ 、白丸は $S_{\text{loss,iv}}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 、下段は銅金衝突の π^0 の結果である。	56
C.1	in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラの拡大図。赤丸印は in-plane 方向のスペクトラのデータ点を示し、青四角印は out-of-plane 方向のスペクトラのデータ点を示している。	58

C.2	上段： S'_{loss} 誤差計算における $S'_{\text{loss, I}}$ と $S'_{\text{loss, II}}$ のイメージ図。破線は AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラ、赤い実線 (I と II) は、破線のスペクトラの p_T 値の差を示している。各値の説明は、表??にまとめた。	59
C.3	centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss, I}}$ と $S'_{\text{loss, II}}$ の p_T 依存。実線の円は元の S'_{loss} 、星印は $S'_{\text{loss, I}}$ 、白丸は $S'_{\text{loss, II}}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 (2004 年)、下段は金金衝突の π^0 (2007 年) の結果である。	60
C.4	centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss, i}}$ 、 $S'_{\text{loss, ii}}$ 、 $S'_{\text{loss, iii}}$ 、及び $S'_{\text{loss, iv}}$ の p_T 依存。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 (2004 年)、下段は金金衝突の π^0 (2007 年) の結果である。	61

表 目 次

3.1	pp 衝突における荷電ハドロンの p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。	14
3.2	pp 衝突における π^0 の p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。	14
3.3	金金衝突における荷電ハドロンの p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。	15
3.4	銅金衝突における π^0 の p_T スペクトラのフィット関数 (3.15) のパラメータ。	15
3.5	金金衝突における荷電ハドロンの v_2 の p_T 依存性グラフのフィット関数 (3.18) のパラメータ。	18
3.6	金原子核と銅原子核における原子量 A と半径 R 。	22
3.7	通過距離計算に用いる反応領域の境界座標の候補と境界座標。	25
3.8	金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} 、及び $dN/d\eta$ 。	28
3.9	金金衝突における $N_{\text{part,in}}$ 、 $N_{\text{coll,in}}$ 、及び $ dN/d\eta _{\text{in}}$ 。	28
3.10	金金衝突における $N_{\text{part,out}}$ 、 $N_{\text{coll,out}}$ 、及び $ dN/d\eta _{\text{out}}$ 。	28
4.1	銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} vs. N_{part} と S_{loss} vs. $dN/d\eta$ のフィット関数 (4.1) のパラメータ。	36
4.2	金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$ vs. N_{part} のフィット関数 (4.1) のパラメータ。	38
A.1	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au	44
A.2	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au	44
A.3	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au	44
A.4	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au	44
A.5	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au	45
A.6	$h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au	45
A.7	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2004)	45
A.8	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2004)	45
A.9	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2004)	45
A.10	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2004)	45
A.11	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au(2004)	46
A.12	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au(2004)	46
A.13	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2007)	46
A.14	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2007)	46
A.15	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2007)	46
A.16	$\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2007)	46

A.17	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 40-50% in Au+Au(2007)	47
A.18	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 50-60% in Au+Au(2007)	47
A.19	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 0-10% in Cu+Au	47
A.20	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 10-20% in Cu+Au	47
A.21	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 0-20% in Cu+Au	48
A.22	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 20-40% in Cu+Au	48
A.23	$\pi^0 S_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 40-60% in Cu+Au	48
A.24	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 0-10% in Au+Au	48
A.25	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 10-20% in Au+Au	48
A.26	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 20-30% in Au+Au	49
A.27	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 30-40% in Au+Au	49
A.28	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 40-50% in Au+Au	49
A.29	$h^\pm S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 50-60% in Au+Au	49
A.30	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 0-10% in Au+Au(2004)	49
A.31	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 10-20% in Au+Au(2004)	49
A.32	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 20-30% in Au+Au(2004)	50
A.33	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 30-40% in Au+Au(2004)	50
A.34	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 40-50% in Au+Au(2004)	50
A.35	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 50-60% in Au+Au(2004)	50
A.36	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 0-10% in Au+Au(2007)	50
A.37	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 10-20% in Au+Au(2007)	50
A.38	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 20-30% in Au+Au(2007)	51
A.39	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 30-40% in Au+Au(2007)	51
A.40	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 40-50% in Au+Au(2007)	51
A.41	$\pi^0 S'_{\text{loss}}$	vs. p_T	for centrality 50-60% in Au+Au(2007)	51
B.1	図 B.1 における表記の説明。			53
C.1	図 C.1 における表記の説明			58

第1章 序章

1.1 クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)

QGP とは高温、高密度下であったとされる宇宙初期のビッグバンから数 μ 秒後に実現していたと考えられている状態である。プラズマとは原子が正イオンと電子に電離した状態では固体、液体、気体に次ぐ第四の状態相であり、物質がイオン化エネルギーに相当する高温状態に達した時に実現する。現在の宇宙ではクォーク（物質を構成する素粒子）とグルーオン（強い相互作用を媒介する素粒子）が核子の中に閉じ込められている。高温高圧下では核子同士が重なり合うことにより、ある核子中のクォークやグルーオンと隣の核子のクォークやグルーオンの区別がつかなくなる。この現象が大量に発生することによって、クォークとグルーオンが核子への閉じ込めから解放された QGP 状態が形成される。この状態は初期宇宙発展の解明につながる重要な研究テーマとして非常に注目されている。現在、QGP は大型加速器を利用した高エネルギー原子核衝突実験で人工的に生成することができる [1]。

1.2 高エネルギー原子核衝突実験

高エネルギー原子核衝突実験は、加速器を用いて原子核同士（金、鉛、銅原子核など）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し QGP を人工的に生成する実験である。この実験の主な目的は、QGP 状態の生成とその性質探究である。QGP 状態の生成は、2005 年にアメリカニューヨークにある RHIC 加速器 2.1 で初めて確認され、すでに達成している。現在、QGP 状態の生成可能な加速器は RHIC 加速器とスイス、ジュネーブにある LHC 加速器である。この QGP 生成の証拠となる事象は、高い p_T ハドロンの抑制と大きな楕円の方位角異方性の発見である。

1.2.1 高い p_T ハドロンの収量抑制

高 p_T ハドロンの抑制は、2002 年 RHIC で発見された [2]。この抑制は、原子核衝突により生成した高い運動量を持つパートンが QGP 中でエネルギーを損失したことを示している。このように、QGP 生成による影響は定量的に QGP 中のエネルギー損失として解釈されている。エネルギー損失を定量化する測定量として、生成粒子比 R_{AA} やエネルギー損失比 S_{loss} がある。 R_{AA} は原子核対衝突 (AA 衝突) の粒子収量と AA 衝突における核子衝突回数 (N_{coll}) 倍した核子対衝突 (pp 衝突) の粒子収量の比を表している [2]。図 1.1 は R_{AA} の p_T 依存性を示す。 S_{loss} は AA 衝突の粒子収量と N_{coll} 倍した pp 衝突の粒子収量が等しい場合の p_T 差とこの時の pp 衝突の p_T の比、つまり QGP が生成されていない

場合に予想される運動量と原子核対衝突により損失する運動量の比を表している。 S_{loss} の詳細については第3.2節で説明した。図1.2は R_{AA} と S_{loss} の計算方法を説明する模式図である。 R_{AA} は同一の p_T で N_{coll} 倍したpp衝突とAA衝突の収量を比較するものである一方、 S_{loss} は同じ収量を与える p_T の差として算出する。

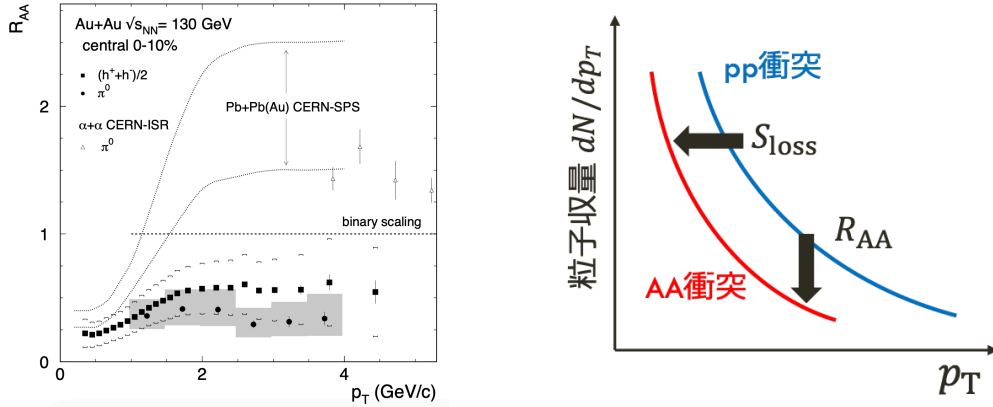


図 1.1: 金中心衝突における荷電ハドロンと π^0 の R_{AA} 比 [2]。 図 1.2: 核子対衝突 (pp 衝突) の粒子収量と原子核対衝突 (AA 衝突) の粒子収量の比較の模式図。

1.2.2 大きな楕円方位角異方性の発見

高エネルギーの原子核同士の中心がずれた衝突 (非中心衝突、第3.1.2節) により生成される粒子は、方位角方向に一様に分布しないことが知られており、この事象は方位角異方性と呼ばれている。非中心衝突では原子核の重なり部分の反応領域がアーモンド形状になる。このアーモンド形状の長軸と短軸の長さが異なることから、方位角によって圧力勾配が異なる。低横運動量領域 (第3.1.4節) では、圧力勾配が大きい方位角方向 (アーモンド形状の短軸方向) では収量が多く、圧力勾配が小さい方位角方向 (アーモンド形状の長軸方向) では収量が少なくなり、方位角異方性が生まれると考えられている。一方、高横運動量領域 (主に $8\text{GeV}/c$ 以上) では、粒子は主に初期のパートン同士のハード散乱によって生成されるため圧力勾配が生じず方位角に対し一様に分布すると考えられてきた。しかし、高横運動量領域においても方位角異方性が確認されている。これはアーモンド形状の長軸と短軸の QGP と相互作用する距離が異なることから、収量の違いが生じ、異方性が生まれると考えられている。方位角異方性の定量的な指標として方位角異方性の強度 v_n が用いられる。 v_n とは衝突で生成・放出された粒子の反応平面からの方位角分布をフーリエ展開したときの係数であり、

$$\frac{dN}{d(\phi - \Phi_{\text{RP}})} \propto 1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos[n(\phi - \Phi_{\text{RP}})] \quad (1.1)$$

と表される。ここで、 ϕ は実験室系での放出粒子の方位角、 Φ_{RP} は反応平面の方位角を表す。 $n=2$ の時の方位角異方性を楕円方位角異方性という。

1.3 研究目的と特色

本研究の目的は、高エネルギー原子核衝突実験での、様々な衝突系における QGP 中で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である。本研究の特色は、pp 衝突と AA 衝突の比較により見積もられるエネルギー損失割合 (S_{loss}) について先行研究の衝突システムに加え、新たに重心系エネルギー $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200\text{GeV}$ の金金衝突における π^0 と荷電ハドロン、銅金衝突における π^0 について見積る点である。さらに、pp 衝突データに依存せず AA 衝突のデータのみで QGP 通過中のエネルギー損失を見積もるため、AA 衝突の方位角を活用して算出するエネルギー損失割合 (S'_{loss}) を導入する。pp 衝突のデータを用いないことで、実験の違いからくる系統誤差や cold nuclear matter 効果を考慮する必要がなく [3]、より高精度な測定につながる。本論文では、 S_{loss} 及び S'_{loss} における粒子運動量や衝突系の大きさ、QGP 中の粒子の通過距離に対しての依存性について報告し、QGP 中において放出粒子のエネルギーがどのように損失されているかについて議論する。

第2章 RHIC-PHENIX

2.1 RHIC 加速器

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) は世界で初めての重イオン衝突型加速器であり、アメリカのニューヨーク州ロングアイランドにあるブルックヘブン国立研究所 (BNL : Brookhaven National Laboratory) に建設されている (図 2.1)。QGP を生成しその性質を研究することを目的に、2000 年から稼働を開始した。主な衝突原子核は金原子核対で、衝突時の重心系エネルギーは核子対あたり 200 GeV である。その他にも、ヘリウム原子核や陽子といった様々な原子核衝突実験を行っており、陽子・陽子衝突での最大重心系エネルギーは 510 GeV である。RHIC には周長 3.8 km の超伝導加速器リングが2つ建設されている。これらのリングが交差する衝突点は計 6 カ所あり、各衝突点においてビーム同士が衝突角 180 度で衝突する。ビームは 106 ns (9.4 MHz) の間隔でバンチ構造を持っており、各リングに 120 バンチが蓄積されている [1]。

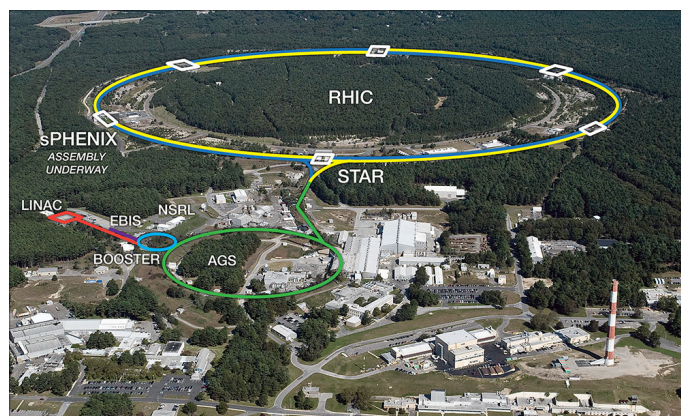


図 2.1: Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC) の上空写真。

2.2 PHENIX 実験

PHENIX 実験は、RHIC 加速器で実施された実験のひとつであり、2000 年から 2016 年にかけて稼働していた。世界 15 カ国の研究機関の約 500 人の研究者、エンジニア、大学院生が参加する大規模な国際共同実験である。PHENIX 実験の目的は、QGP 生成の実証や性質研究をすることである。そのため、横運動量で数 GeV/c までのハドロン粒子を識別や、電子、ミュオン、および光子の測定が重要とされた。また、高エネルギー粒子のより高精度な測定や J/ψ の質量測定には、高い運動量分解能が要求された。PHENIX

検出器は多く測定器サブシステムから構成されている。2.2はPHENIX 検出器をビーム軸方向とビーム軸に平行な方向から見た図であり、図中の BBC や DC、RICHなどは測定器サブシステムの名称である。これらの測定器からのデータをコンピュータで解析して、様々な粒子や物理量の測定し、QGP 性質の研究を行う。現在は、実験は終了しているが 17 年間で取得されたデータの解析研究が行われている。以下、主要な測定器サブシステムについて説明する。

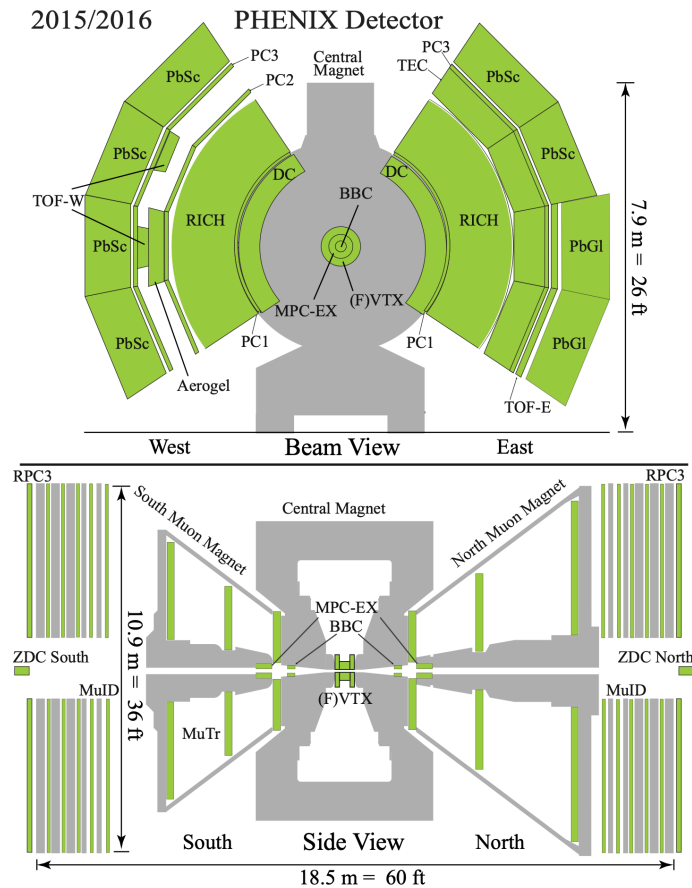


図 2.2: 上：PHENIX 検出器をビーム軸方向から見た図。 下：PHENIX 検出器をビーム軸に平行な方向から見た図。

2.2.1 BBC (ビーム・ビーム・カウンター)

衝突点の前方と後方にビーム軸を取り巻くように設置されており、それぞれ 64 本のチェレンコフ検出器から構成されている。前方の BBC が衝突時に発生する多量の粒子をとらえることで、衝突の発生を検知する。そして、衝突の起こった時間とビーム軸方向の位置、Centrality、反応平面の測定を行う。

2.2.2 DC (ドリフトチェンバー)

ビーム軸を挟み東西 2.0 ~ 2.4m に設置されている。ビーム軸に並行な 12 本のセンスワイヤーが張られており、そのワイヤー間はガスが満たされている。DC はこの装置中を通過した荷電粒子の位置と進行方向を測定する。荷電粒子の進行方向は、中央電磁石で作られた磁場の影響で曲げられる。この曲がり角は粒子の運動量に反比例するため、粒子の運動量を決定することができる。

2.2.3 RICH (リング・イメージング・チェレンコフ測定器)

ビーム軸を挟み東西 2.5 ~ 4m に設置されており、それぞれがガス容器と容器中の反射鏡、2560 個の光電子増倍管から構成されている。この装置を通過する粒子の速度が、ガス容器を満たす炭酸ガスの光速以上であれば、チェレンコフ光がその進行方向に放射される。高エネルギーハドロン ($4.65\text{GeV}/c$ 以上) や電子・陽電子 ($15\text{MeV}/c$ 以上) が通過するとチェレンコフ光が発生するが、低エネルギーのハドロン ($4.7\text{GeV}/c$ 以下) では発生しない。高エネルギーのハドロンはごく稀にしか生成しないことから、ハドロンと電子・陽電子を識別を行う。

2.2.4 EMCal (電子カロリメータ)

PHENIX 検出器の最外層に設置されており、2 種類 (PbSc、PbGl) のカロリメータで構成されている。通過粒子の位置と落としたエネルギー、飛行時間を測定する。落としたエネルギーは、電子や光子が通過した際に起こした電磁シャワーをシンチレーション光へと変換することで測定することができる。

第3章 解析手法

この章では、本研究で行った解析手法について記述した。第3.2節、第3.3節、及び第3.5節では、QGP中を通過するパートンのエネルギー損失についてまとめた。本研究では、エネルギー損失を S_{loss} と S'_{loss} という値を用いる異なる2つの手法で評価した。1つ

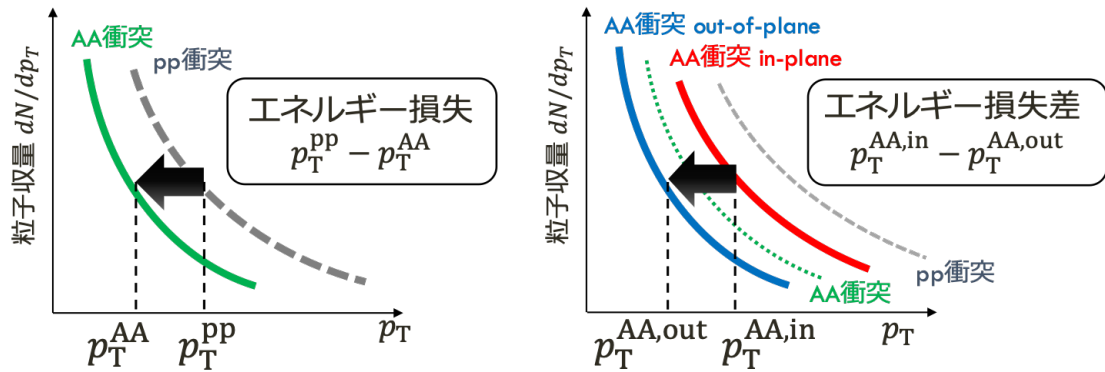


図 3.1: S_{loss} の計算手法における pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラの比較のイメージ図。
 図 3.2: S'_{loss} の計算手法における AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの比較のイメージ図。

目は、原子核原子核衝突 (AA) と核子核子衝突 (pp) の粒子生成量の比較により求められる値、 S_{loss} を用いた手法である。(図 3.1) この手法は先行研究 [4] で取り入れられ、注目されている。本研究では、先行研究とは異なる衝突原子核種や生成ハドロンを用いた。 S_{loss} は、

$$S_{\text{loss}} = (p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA}})/p_T^{\text{pp}} \quad (3.1)$$

と定義される。ここで p_T^{pp} はスケールされた pp 衝突の横運動量、 p_T^{AA} は AA 衝突の横運動量である。詳しい計算方法は 3.2 に記載した。

2つ目の手法では、AA 衝突において反応平面に対し平行 (in-plane) に生成する粒子量と垂直 (out-of-plane) に生成する粒子量の比較により求められる値、 S'_{loss} を用いる。(図 3.2) S'_{loss} は本研究で新たに定義した値である。

$$S'_{\text{loss}} = (p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}})/p_T^{\text{AA,in}} \quad (3.2)$$

ここで、 $p_T^{\text{AA,in}}$ は AA 衝突における in-plane 方向の生成粒子の横運動量、 $p_T^{\text{AA,out}}$ は out-of-plane 方向の生成粒子の横運動量である。詳しい計算方法は 3.3 に記載した。

また、1つ目の S_{loss} の解析手法を用いて、AA 衝突における in-plane 方向と pp 衝突の比較により $S_{\text{loss,in}}$ を、AA 衝突における out-of-plane 方向と pp 衝突の粒子生成量の比較により $S_{\text{loss,out}}$ を計算した。これらの値の目的と計算方法については第 3.5 節に記載した。

図 3.3 は、本研究で用いたエネルギー損失を評価する値の関係図である。

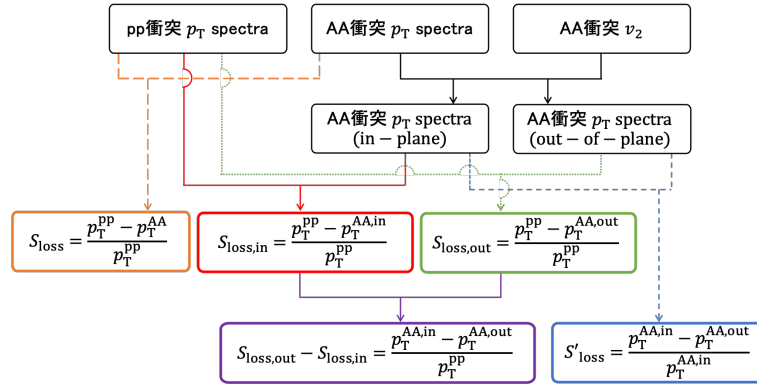


図 3.3: 本研究で用いたエネルギー損失を評価する値の関係図。

第 3.6 節と第 3.7 節では、エネルギー損失の評価に用いる値（QGP 中の通過距離、QGP 中の生成粒子密度）についてまとめた。

3.1 物理量の定義

ここでは、本研究で用いた高エネルギー原子核衝突実験で用いる用語、測定量について説明する。

3.1.1 participant と spectator、 N_{part} と N_{coll}

高エネルギー重イオン衝突における核子（パートン）は、participant と spectator の 2 種類に分類される。図 3.4 は原子核衝突をビーム軸（z 軸）に平行な方向（左図）と垂直な方向（右図）から見た時の participant と spectator の概念図である。衝突時に原子核同士が重なった部分に存在する衝突関与核子を participant、その他の核子を spectator と呼ぶ。participant の個数は N_{part} と表される。また、participant による核子核子衝突（binary collision）の回数は N_{coll} と表される。また、原子核中心距離を impact parameter (b) と呼ぶ。

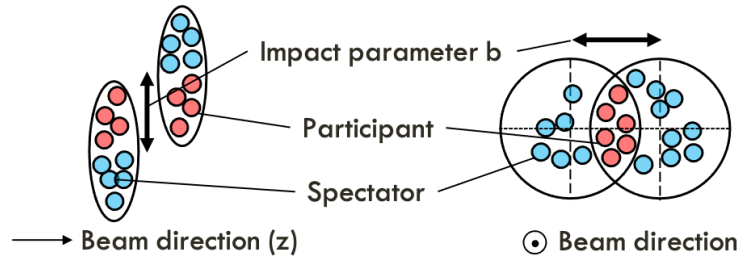


図 3.4: 原子核衝突をビーム軸に平行な方向（左図）と垂直な方向（右図）から見た時の participant と spectator の概念図。

3.1.2 中心衝突度 (centrality)

中心衝突度 (centrality) は、高エネルギー原子核衝突において、衝突する原子核同士の重なり度合いを表す値である。この値は impact parameter $b = 0$ の 0% から $b = R_A + R_B$ の 100% で表される。 R_A と R_B は衝突する 2 つの原子核それぞれ半径を示す。図 3.5 はビーム軸方向に垂直な方向から見た場合の衝突原子核の重なり度合いと centrality の関係を表した概念図である。原子核同士が正面衝突した場合 ($b \simeq 0$) は中心衝突 (central collision)、原子核同士の中心がずれて擦るように衝突した場合 ($b \simeq R_A + R_B$) は周辺衝突 (peripheral collision) と呼ぶ。centrality は実験で決定される量で、 N_{part} による。PHENIX 実験では centrality 92% まで測定可能である。

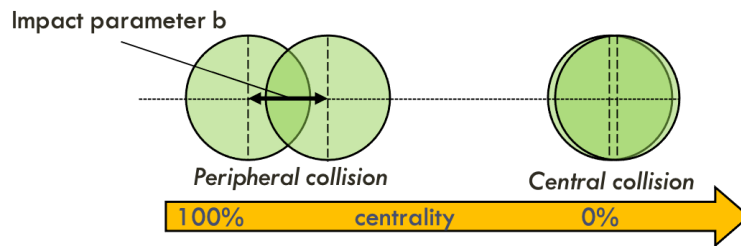


図 3.5: ビーム軸方向に垂直な方向から見た場合の衝突原子核の重なり度合いと centrality の関係を表した概念図。

3.1.3 反応領域、反応平面、in-plane、out-of-plane

原子核衝突によって生じる高温高密度の状態が生成される領域を反応領域という。また、ビーム軸 (z 軸) と原子核同士の中心を結んだ直線を含む平面を反応平面 (Reaction plane) と呼ぶ。反応平面はビーム軸に平行な xy 平面に対し Ψ_{RP} の角度を持っている。(図 3.6) さらに、反応平面に平行な方向を in-plane、垂直な方向を out-of-plane と呼ぶ。(図 3.7) ビーム軸に対して垂直な平面上の角度を方位角 ϕ とすると、in-plane は反応平面に対し $\phi - \Psi_{\text{RP}} = 90^\circ$ 、out-of-plane は反応平面に対し $\phi - \Psi_{\text{RP}} = 0^\circ$ の角度を持つ。

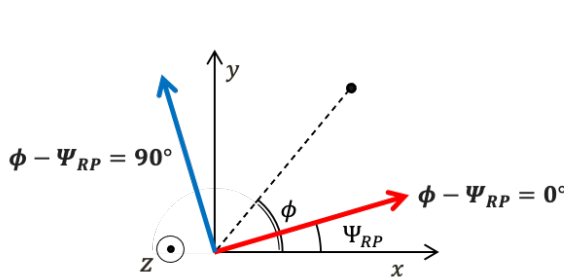


図 3.6: xyz 座標

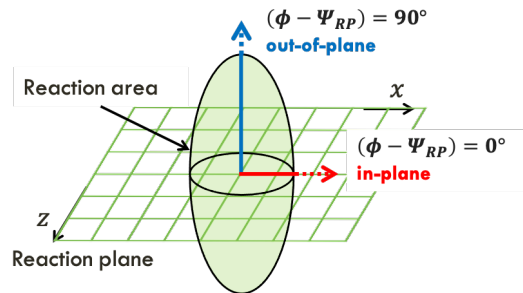


図 3.7: 反応領域、反応平面、in-plane、out-of-plane を表した概略図。

3.1.4 横運動量 (p_T) と擬ラピディティ (η)

ビーム軸 (z 軸) 方向に垂直な方位角 (ϕ) 方向の運動量を横運動量 (Transverse momentum) p_T と呼ぶ。この値は、運動量 $p = (p_x, p_y, p_z)$ を用いて、

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (3.3)$$

のように計算される。この値を用いることで、衝突によって発生した運動量に注目することが可能である。図 3.8 に運動量座標を示した。 θ はビーム軸から測った粒子の放出角である。また、反応で発生した粒子の運動を記述する便利な変数として擬ラピディティ η という量がある。これは、 z 軸方向の速度に対応する値であり、以下の式で定義される。

$$\eta \equiv \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{p} \right) = \tanh^{-1}(\cos\theta) \quad (3.4)$$

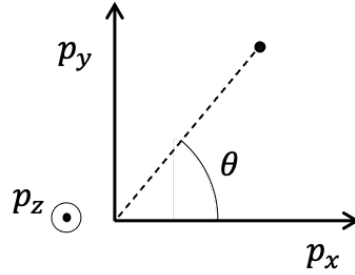


図 3.8: p_x, p_y, p_z 座標

3.1.5 生成粒子多重度 ($dN/d\eta$)

高エネルギー重イオン衝突実験では生成した荷電粒子数の擬ラピディティ分布 ($dN_{ch}/d\eta$) が測定され、荷電粒子多重度として扱われる。粒子生成メカニズムに関する重要な手がかりとして用いられる。 $dN_{ch}/d\eta$ は衝突関与核子数 N_{part} と核子核子衝突回数 N_{coll} から見積もられる値で、

$$dN_{ch}/d\eta = (0.88 \pm 0.28) \times N_{part} + (0.34 \mp 0.12) \times N_{coll} \quad (3.5)$$

と表せられる [5] (図 3.9)。全生成粒子数 N は N_{ch} を用いて $N \sim \frac{3}{2}N_{ch}$ と表されるため、測定された $dN_{ch}/d\eta$ から生成粒子多重度 ($dN/d\eta$) を得ることができる [6]。以下、 $dN_{ch}/d\eta$ を $dN/d\eta$ として扱う。さらに、 $dN/d\eta$ はエネルギー密度 $dE_T/d\eta$ に相当する値である [7]。 E_T は横運動量であり、荷電粒子多重度と共に測定される。図 3.10 は、 $\langle dE_T/d\eta \rangle / \langle dN_{ch}/d\eta \rangle$ の N_{part} 依存性を示しており、 $\langle dE_T/d\eta \rangle / \langle dN_{ch}/d\eta \rangle \sim 0.8 \text{ GeV}$ であることがわかる。

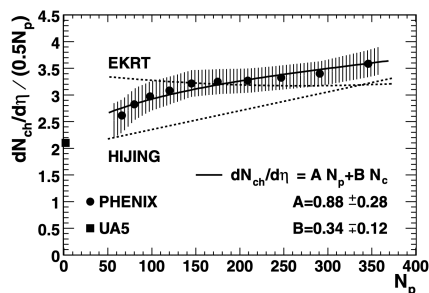


図 3.9: 衝突関与核子 (participant) 対ごとの荷電ハドロン の擬ラピディティ密度の衝突関与核子数 (N_{part}) 依存。[5]

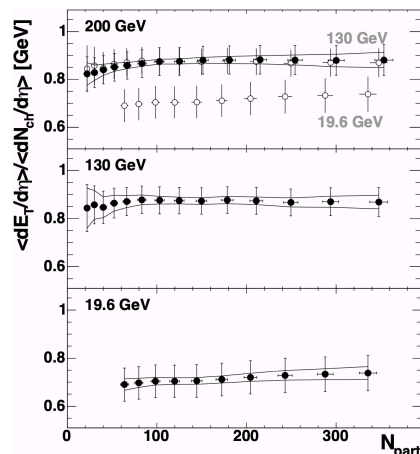


図 3.10: E_T/N_{ch} の N_p 依存性。[7]

3.2 エネルギー損失割合 S_{loss}

S_{loss} の計算では、主に pp 衝突の p_T スペクトラと AA 衝突の p_T スペクトラを用いる。(図 3.11) これらは centrality 10%、または 20% ごとに測定されたデータである。従って、 S_{loss} も用いるデータの centrality 範囲毎に求めた。金金衝突の荷電ハドロンにおいては centrality 0-10%、10-20%、20-30%、30-40%、40-50%、50-60%、銅金衝突の π^0 においては centrality 0-10%、10-20%、10-20%、20-40%、40-60% での S_{loss} をそれぞれ計算した。

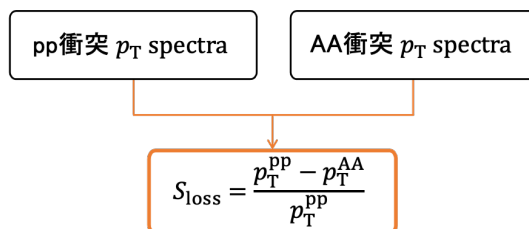


図 3.11: S_{loss} 計算の関係図。

計算手順は以下の 4 つである。

1. pp 衝突における p_T スペクトラのスケールリング
2. pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラの p_T 差の測定と p_T^{pp} による分割
3. 系統誤差と統計誤差

3.2.1 pp 衝突における p_T スペクトラのスケールリング

pp 衝突と AA 衝突を比較するために、pp 衝突の p_T 分布 (p_T スペクトラ) [8, 9] を AA 衝突の核子核子衝突回数 $\langle N_{coll} \rangle$ [10, 11] でスケールリングする。ここで、 π^0 の p_T スペクトラは断面積 (cross section)、荷電ハドロンの p_T スペクトラは不変収量 (invariant yield)

のデータであるので、pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラ [9, 12, 13] を比較する前に単位を揃える必要がある。cross section の単位は ($mb GeV^{-2}c^3$)、invariant yield の単位は ($GeV^{-2}c^2$)、 p_T スペクトラの単位は ($GeV^{-1}c$) である。cross section と invariant yield の関係式は、

$$invariant\ yield = cross\ section \times \frac{1}{\sigma_{inel}} \quad (3.6)$$

である。ここで、 σ_{inel} は pp 衝突の非弾性断面積で $\sigma_{inel} = 42 \pm 1$ mb であるまた、用いる cross section と invariant yield は p_T で割ってあることを考慮すると、 π^0 の p_T スペクトラのスケーリングの式は、

$$\begin{aligned} spectra &= cross\ section \times \frac{1}{\sigma_{inel}} \times p_T \times N_{coll} \\ &= cross\ section \times p_T \times T_{AB} \end{aligned} \quad (3.7)$$

荷電ハドロンの p_T スペクトラのスケーリングの式は、

$$\begin{aligned} spectra &= invariant\ yield \times p_T \times N_{coll} \\ &= invariant\ yield \times p_T \times \sigma_{inel} \times T_{AB} \end{aligned} \quad (3.8)$$

T_{AB} は核子重複関数で単位は [mb^{-1}] である。 N_{coll} と T_{AB} の関係式は、

$$T_{AB} = \langle N_{coll} \rangle / \sigma_{nn} \quad (3.9)$$

のようにあわらされる [10]。 T_{AB} は [10, 11] から簡単に求めることが可能である。図 3.13a は centrality 0-10%、20-30%、40-50% における pp 衝突の荷電ハドロンの p_T スペクトラ、図 3.13b は centrality 0-20%、20-40%、40-60% における pp 衝突における π^0 の結果である。また、図 3.12 は、金金衝突の荷電ハドロンの p_T スペクトラと AA 衝突の p_T スペクトラを示しており、AA 衝突の p_T スペクトラが p_T が減少する方向へシフトしていることがわかる。

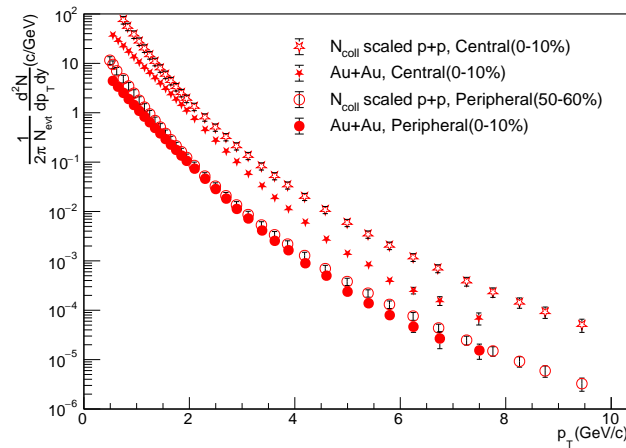


図 3.12: pp 衝突と金金衝突の荷電ハドロンの p_T スペクトラ。星印が中心衝突、丸印が周辺衝突を表す。また塗り潰されている印が金金衝突、塗りつぶされていない印が pp 衝突を表す。

3.2.2 pp 衝突と AA 衝突の p_T スペクトラの p_T 差の測定と p_T^{pp} による分割

第 3.2.1 節では、 N_{coll} でスケールした pp 衝突の p_T スペクトラと AA 衝突の p_T スペクトラの p_T に差が生じることを確認した。この差を定量的に見積もるために、まずこの 2 つの p_T スペクトラのフィット関数を得る。pp 衝突のフィット関数は、AA 衝突の p_T スペクトラに対応する p_T 値を求めるために用いた。AA 衝突のフィット関数は、 S_{loss} の系統誤差と統計誤差を導くために用いた。

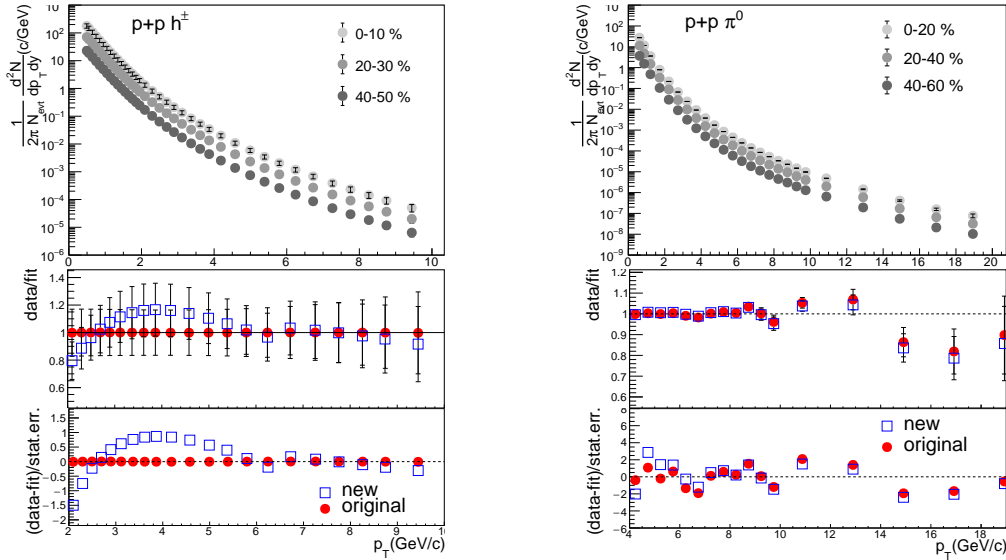
pp 衝突における p_T スペクトラのフィット

pp 衝突における荷電ハドロンと π^0 の p_T スペクトラは、式 (3.13) の関数を用いてフィットを行った。このフィット関数については先行研究 [14] を参考にした。その他の関数として、式 (3.10) でもフィットを行った。

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = \frac{A_1}{(1 + \frac{p_T}{p_0})^{n_1}} \times (1 - S) + \frac{A_2}{(1 + \frac{p_T}{p_2})^{n_2}} \times S \quad (3.10)$$

$$S = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{p_T - p_1}{w})} \quad (3.11)$$

フィット結果から、最もよくフィットする関数 (式 (3.13)) を決定した。フィット後の関数のパラメータは表 3.1 と表 3.2 の通りである。また、centrality 0-10% におけるフィットの結果を図 3.13a と図 3.13b に示した。中段のフィット関数の値に対するデータ点の割合が 1 に近いほどより良いフィット関数であると言える。その他の centrality においても同様のフィット結果が得られた。



(a) pp 衝突における荷電ハドロンの結果。

(b) pp 衝突における π^0 の結果。

図 3.13: (上段) スケール後の pp 衝突の p_T スペクトラ。(中段) フィット関数の値に対するデータ点の割合。(下段) データの系統誤差に対するフィット関数の値とデータ点の差。中段と下段の赤丸点 (original) は式 (3.13)、青四角点 (new) は式 (3.10) の結果を表す。ただし、中段と下段は centrality 0-10% の結果である。

表 3.1: pp 衝突における荷電ハドロン の p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。

Parameters for Eq.(3.13)	centrality		
	0-10%	10-20%	20-30%
$A(\text{GeV}/c)^{-2}$	4195.67±1987.81	2096.21±108.88	2134.49±99.95
$a(\text{GeV}/c)^{-1}$	0.20±0.07	0.28±0.08	0.251±0.094
$b(\text{GeV}/c)^{-2}$	0.0004±0.0259	0.01±0.04	0.02±0.04
$p_0(\text{GeV}/c)$	1.04±0.07	0.968±0.005	0.892±0.006
n	8.2±0.2	7.88±0.07	7.82±0.07

Parameters for Eq.(3.13)	30-40%	40-50%	50-60%
	$A(\text{GeV}/c)^{-2}$	2161.94±81.03	1675.84±821.97
$a(\text{GeV}/c)^{-1}$	0.19±0.08	0.18±0.11	0.2±0.2
$b(\text{GeV}/c)^{-2}$	0.02±0.04	0.04±0.04	0.02±0.09
$p_0(\text{GeV}/c)$	0.853±0.004	0.77±0.05	0.9±0.4
n	7.91±0.07	7.7±0.2	7.9±1.3

表 3.2: pp 衝突における π^0 の p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。

Parameters for Eq.(3.13)	centrality				
	0-10%	10-20%	0-20%	20-40%	40-60%
$A(\text{GeV}/c)^{-2}$	1325.91±115.71	3927.42±61.91	520.55±8.23	731.02±11.57	2642.58±41.81
$a(\text{GeV}/c)^{-1}$	0.78±0.08	-0.45±0.16	0.91±0.03	0.85±0.03	0.72±0.03
$b(\text{GeV}/c)^{-2}$	-0.011±0.013	0.31±0.04	-0.047±0.003	-0.045±0.003	-0.039±0.003
$p_0(\text{GeV}/c)$	0.735±0.011	0.5890±0.0013	0.820±0.002	0.693±0.002	0.4957±0.0011
n	7.17±0.02	7.126±0.007	7.172±0.007	7.174±0.007	7.179±0.006

AA 衝突における p_T スペクトラのフィット

AA 衝突のフィット関数は S_{loss} の系統誤差と統計誤差を求めるために用いる。フィット関数を得る前に pp 衝突の p_T スペクトラと比較できるように、単位を揃える必要がある。pp 衝突同様、AA 衝突において用いる invariant yield は横運動量 p_T で割ってあることを考慮すると、 π^0 の p_T スペクトラは、

$$\text{spectra}(AA) = \text{invariant yield} \times p_T \quad (3.12)$$

と表される。図 3.14a は centrality0-10%、20-30%、40-50% における金金衝突の荷電ハドロン の p_T スペクトラ、図 3.14b は centrality0-20%、20-40%、40-60% における銅金衝突における π^0 の結果である。

そして p_T スペクトラのフィット関数は、金金衝突の荷電ハドロンと π^0 は式 (3.13)、銅金衝突における π^0 は式 (3.15) を用いた。式 (3.13) は [14] を参照した。式 3.13 の他に、様々な関数 (式 (3.14)、式 (3.15)) でもフィットを行った。フィット結果から、最もよくフィットする関数 (金金衝突の π^0 は式 3.13、銅金衝突の π^0 は式 (3.15)) を決定した。フィット後の関数のパラメータは表 3.3 と表 3.4 の通りである。また、centrality0-10% におけるフィットの結果を図 3.14a と図 3.14b に示した。その他の centrality においても同様のフィット結果が得られた。

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = \frac{A}{[\exp(-ap_T - bp_T^2) + \frac{p_T}{p_0}]^n} \quad (3.13)$$

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = p_0 \times \frac{x}{e^{p_1 \times p_T} + p_2 \times \left(1 + \frac{1}{p_3}\right)^{p_4}} \quad (3.14)$$

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = \frac{A_1}{\left(1 + \frac{p_T}{p_0}\right)^{n_1}} \times (1 - S) + \frac{A_2}{p_T^{n_2}} \times S \quad (3.15)$$

$$S = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{p_T - p_1}{w}\right)} \quad (3.16)$$

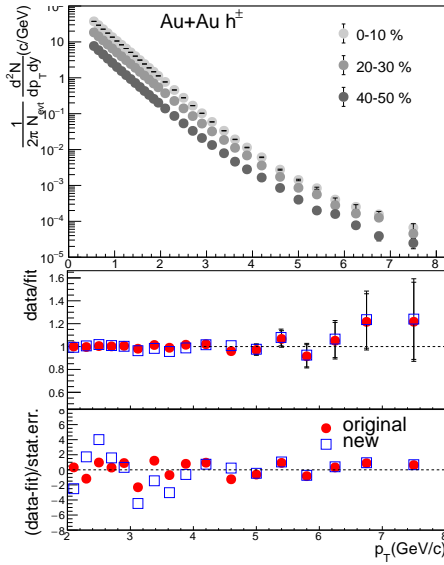
表 3.3: 金金衝突における荷電ハドロン の p_T スペクトラのフィット関数 (3.13) のパラメータ。

Parameters for Eq.(3.13)	centrality		
	0-10%	10-20%	20-30%
$A(\text{GeV}/c)^{-2}$	1803.72±36.19	894.29±188.59	650.63±16.65
$a(\text{GeV}/c)^{-1}$	0.073±0.012	0.14±0.05	0.119±0.016
$b(\text{GeV}/c)^{-2}$	0.293±0.006	0.24±0.03	0.271±0.008
$p_0(\text{GeV}/c)$	0.885±0.002	0.94±0.03	0.878±0.003
n	8.10±0.02	8.085±0.096	7.73±0.02

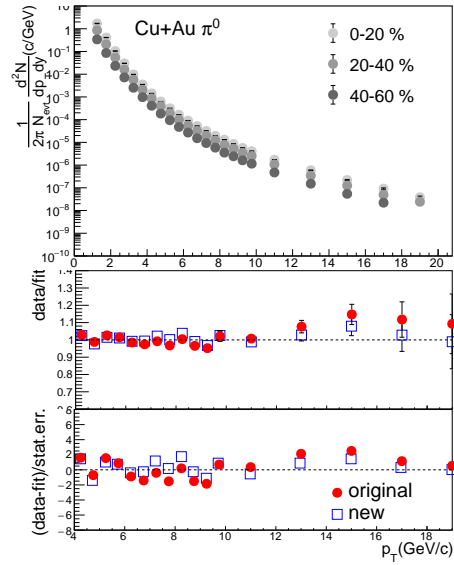
	centrality		
	30-40%	40-50%	50-60%
$A(\text{GeV}/c)^{-2}$	611±19.02	311.69±94.71	308.27±170.84
$a(\text{GeV}/c)^{-1}$	0.18±0.02	0.22±0.06	0.01±0.14
$b(\text{GeV}/c)^{-2}$	0.2163±0.0096	0.17±0.04	0.30±0.09
$p_0(\text{GeV}/c)$	0.826±0.003	0.86±0.05	0.73±0.06
n	7.60±0.02	7.7±0.2	7.27±0.17

表 3.4: 銅金衝突における π^0 の p_T スペクトラのフィット関数 (3.15) のパラメータ。

Parameters for Eq.(3.15)	centrality				
	0-10%	10-20%	0-20%	20-40%	40-60%
A_1	23561.4(fixed)	46767.5 (fixed)	22058(fixed)	21168.5(fixed)	9773.92 (fixed)
A_2	0.57795(fixed)	0.511795(fixed)	0.585297(fixed)	0.544732(fixed)	0.539796(fixed)
p_0	7.80437(fixed)	7.81324 (fixed)	7.85352(fixed)	7.82676(fixed)	7.78558 (fixed)
p_1	27.5518(fixed)	23.4815 (fixed)	25.3367(fixed)	17.1198(fixed)	11.5488 (fixed)
n_1	6.86242(fixed)	6.88451 (fixed)	6.86878(fixed)	6.91812(fixed)	7.08886 (fixed)
n_2	7.8±0.8	6.8±0.6	7.1±0.6	6.5±0.7	7.2±1.5
w	0.9±0.4	0.6±0.3	0.5±0.4	0.4±0.4	1.0±0.8



(a) 金金衝突における荷電ハドロンの結果。



(b) 銅金衝突における π^0 の結果。

図 3.14: (上段) AA 衝突における p_T スペクトラ。(中段) フィット関数の値に対するデータ点の割合。(下段) データの系統誤差に対するフィット関数の値とデータ点の差。中段と下段の赤丸点 (original) は式 (3.13)、青四角点 (new) は式 (3.15) の結果を表す。ただし、中段と下段は centrality 0-10% の結果である。

S_{loss} は pp 衝突と AA 衝突の p_T 差を p_T^{pp} で割ることにより求めることができる。式は、

$$S_{\text{loss}} = (p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA}}) / p_T^{\text{pp}} \quad (3.17)$$

と表せる。ここで、 p_T^{pp} と p_T^{AA} は、それぞれ pp 衝突と AA 衝突における p_T スペクトラの横運動量である。また、これらはそれぞれの p_T スペクトラの縦軸が同じ (生成粒子量が同じ) 場合の横運動量である。

3.2.3 系統誤差と統計誤差

誤差計算については、付録 B に記載した。ここでは、計算手順のみ記載する。誤差の計算結果は付録 A に示した。

系統誤差

S_{loss} の系統誤差は、データの系統誤差の伝播によって定義した。系統誤差伝播は次の 4 つの手順で行った。

step 1 pp 衝突と AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播

step 2 フィット関数から抜き出す点に最も近いデータ点の系統誤差の選択

step 3 4 つの S_{loss} の計算

step 4 系統誤差の決定

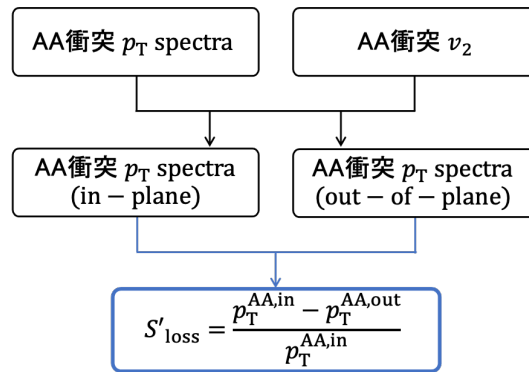
統計誤差

S_{loss} の統計誤差は、 S_{loss} 計算の最初の手順（第 3.2.1 節）において、データの統計誤差を考慮した pp 衝突のスペクトラと AA 衝突のスペクトラから得られる 4 つの S_{loss} を計算し、それらと第 3.2.2 節で求めた S_{loss} の違いから定義した。

3.3 エネルギー損失割合 S'_{loss}

S'_{loss} の計算では、主に AA 衝突の p_T スペクトラと v_2 を用いる。（図 3.15）これらは centrality 10% ごと（centrality 0-10%、10-20%、20-30%、30-40%、40-50%、50-60%）に測定されたデータである。従って、 S_{loss} と同様に、 S'_{loss} も用いるデータの centrality 範囲毎に求めた。

図 3.15: S'_{loss} 計算の関係図。



計算手順は以下の 4 つである。

1. in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの算出
2. in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの p_T 差の測定とその差の $p_T^{\text{AA,in}}$ による分割
3. 系統誤差と統計誤差

3.3.1 in-plane と out-of-plane の p_T スペクトラの算出

in-plane と out-of-plane の p_T スペクトラの算出には、方位角異方性 v_2 [15, 16] と AA 衝突の p_T スペクトラ [9, 12, 13] を用いる。まずこの 2 つのフィット関数を得る。 v_2 のフィット関数は、AA 衝突の p_T スペクトラに対応する v_2 値を得るために用いた。AA 衝突のフィット関数は、 S'_{loss} の系統誤差と統計誤差を導くために用いた。ただし、AA 衝突の p_T スペクトラには invariant yield を用いているため、式 (3.12) のように p_T を掛けた値を用いる。AA 衝突の p_T スペクトラのフィットについては、第 3.2.2 項で述べた。荷電ハドロンにはフィット関数 (3.13)、 π^0 にはフィット関数 (3.15) を用いた [14]。

AA 衝突における v_2 のフィット

AA 衝突における v_2 のフィット関数は、

$$f(p_T) = (1 - S) \times (P_0 + P_1 \times p_T + P_2 \times p_T^2) + S \times (\exp(P_3 + P_4 \times p_T) + P_5) \quad (3.18)$$

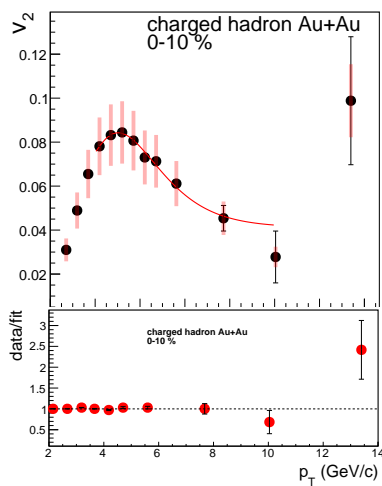
$$S = \frac{1}{1 + \exp(-p_T + p_1)} \quad (3.19)$$

である。ここで、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、及び p_1 はフィットパラメータである。フィット後の関数のパラメータは表 3.5 の通りである。ただし、 p_1 は固定値 2.8 である。centrality 0-10% における金金衝突の荷電ハドロンと π^0 の結果を図 3.16a と図 3.16b に示した。その他の centrality においても同様のフィット結果が得られた。

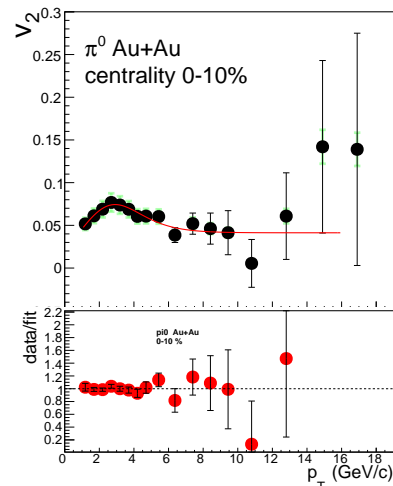
表 3.5: 金金衝突における荷電ハドロンの v_2 の p_T 依存性グラフのフィット関数 (3.18) のパラメータ。

Parameters for Eq.(3.18)	centrality		
	0-10%	10-20%	20-30%
P_0	0.12 ± 0.05	0.11 ± 0.06	-0.07 ± 0.09
P_1	-0.20 ± 0.04	-0.27 ± 0.06	-0.06 ± 0.08
P_2	0.072 ± 0.011	0.10 ± 0.02	0.07 ± 0.03
P_3	-1.56 ± 0.04	-1.08 ± 0.06	-1.36 ± 0.09
P_4	-0.62 ± 0.05	-0.59 ± 0.09	-0.54 ± 0.13
P_5	0.041 ± 0.003	0.087 ± 0.004	0.124 ± 0.003

	30-40%	40-50%	50-60%
P_0	-0.217 ± 0.007	-0.3 ± 1.8	-0.11 ± 0.02
P_1	0.122 ± 0.004	0.01 ± 0.65	0.173 ± 0.013
P_2	0.002 ± 0.002	0.07 ± 0.04	$0.008e-02 \pm 0.005$
P_3	-1.25 ± 0.02	-0.3 ± 6.7	-2.19 ± 0.08
P_4	-0.195 ± 0.005	-1.0 ± 2.7	-0.05 ± 0.02
P_5	0.065 ± 0.002	0.155 ± 0.007	0.101 ± 0.008



(a) 荷電ハドロンの結果。



(b) π^0 の結果。

図 3.16: (上段) 金金衝突の centrality 0-10% における v_2 の p_T 依存性。(下段) フィット関数 (3.18) の値に対するデータ点の割合。

次に、 v_2 と AA 衝突の p_T スペクトラのフィット関数を用いて、in-plane と out-of-plane の p_T スペクトラを算出した。 v_2 と粒子の方位角分布の関係式は、

$$\frac{dN}{d\phi} \propto (1 + 2v_2 \cos[2(\phi - \Phi_{RP})]) \quad (3.20)$$

である。ここで、 ϕ は粒子の方位角、 Φ_{RP} は反応平面の方位角である。この式は式 (1.1) に $n=2$ を代入することで求められる。in-plane 方向と out-of-plane 方向の $(\phi - \Phi_{RP})$ はそれぞれ 0° と 90° である。よって、 p_T スペクトラは以下のように算出することができる。

$$spectra_{in-plane} = spectra_{inclusive} \times (2 \times v_2 + 1) \quad (3.21)$$

$$spectra_{out-of-plane} = spectra_{inclusive} \times (2 \times v_2 - 1) \quad (3.22)$$

ここで、 $spectra_{inclusive}$ と v_2 は同じ p_T での値である。 $spectra_{inclusive}$ はデータ点、 v_2 はフィット関数から得られた値である。図 3.17 は、centrality 0-10% と 50-60% における金金衝突の π^0 の in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラを示しており、in-plane 方向の p_T スペクトラよりも、out-of-plane 方向の p_T スペクトラが p_T が減少する方向へシフトしていることがわかる。また、周辺衝突の方が大きく減少方向へシフトしていることがわかる。

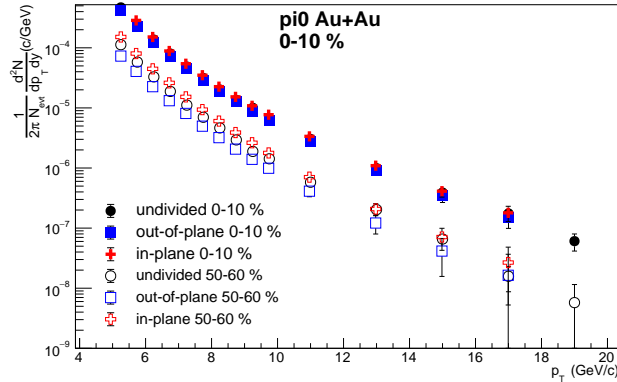


図 3.17: centrality 0-10% と 50-60% における金金衝突の π^0 の in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラ。丸印が p_T スペクトラ、プラス印が丸印が in-plane 方向の p_T スペクトラ、四角印が out-of-plane 方向の p_T スペクトラを表す。また塗り潰されている印が中心衝突、塗りつぶされていない印が周辺衝突を表す。

3.3.2 in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの p_T 差の測定とその差の $p_T^{AA,in}$ による分割

まず、in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラのフィット関数を得る。out-of-plane 方向のフィット関数は、in-plane 方向の p_T スペクトラに対応する p_T 値を得るために用いた。in-plane 方向のフィット関数は、 S'_{loss} の系統誤差と統計誤差を導くために用いた。

in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラのフィット

in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラのフィット関数は、それぞれ

$$spectra_{in-plane} = [Fitting\ function\ of\ AA\ spectra] \times (2 \times [Fitting\ function\ of\ v_2] + 1) \quad (3.23)$$

$$spectra_{out-of-plane} = [Fitting\ function\ of\ AA\ spectra] \times (2 \times [Fitting\ function\ of\ v_2] - 1) \quad (3.24)$$

である。これらの関数は v_2 のフィット関数 (式 (3.18)) と p_T のフィット関数 (式 (3.13) (荷電ハドロン)、式 (3.15) (π^0)) を式 (3.21) と式 (3.22) に代入したものである。

S'_{loss} は in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T 差を $p_T^{AA,in}$ で割ることにより求めることができる。式は、

$$S'_{loss} = dp_T/p_T = \frac{p_T^{AA,in} - p_T^{AA,out}}{p_T^{AA,in}} \quad (3.25)$$

と表せる。ここで、 $p_T^{AA,in}$ と $p_T^{AA,out}$ は、それぞれ AA 衝突における in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの横運動量である。また、これらはそれぞれの p_T スペクトラの縦軸が同じ (生成粒子量が同じ) 場合の横運動量である。

3.3.3 系統誤差と統計誤差

誤差計算については、付録 C に記載した。ここでは、計算手順のみ記載する。誤差の計算結果は付録 A に示した。

系統誤差

S'_{loss} の系統誤差は、データの系統誤差の伝播によって定義した。系統誤差伝播は次の 5 つの手順で行った。

step 1 AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播

step 2 in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの誤差伝播

step 3 フィット関数から抜き出す点に最も近いデータ点の系統誤差の選択

step 4 2 つの S'_{loss} の計算

step 5 系統誤差の決定

統計誤差

統計誤差は、 S'_{loss} 計算の最初の手順 (第 3.3.1 節) において、データの統計誤差を考慮した AA 衝突の p_T スペクトラと v_2 から得られる 4 つの S'_{loss} を計算し、それらと S'_{loss} (第 3.3.2 節) のズレから定義した。

3.4 S_{loss} と S'_{loss} の関係

S'_{loss} は AA 衝突における in-plane 方向と out-of-plane 方向のエネルギー損失差 ($p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}$) の in-plane 方向に対する割合を表している。このエネルギー損失差を pp 衝突に対する割合で表すと、

$$\frac{p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{pp}}} = \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{pp}}} - \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,in}}}{p_T^{\text{pp}}} = S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}} \quad (3.26)$$

のように表せる。従って S_{loss} と S'_{loss} の関係式は、

$$\begin{aligned} S'_{\text{loss}} &= \frac{p_T^{\text{AA,in}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{AA,in}}} = \left(\frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,out}}}{p_T^{\text{pp}}} - \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,in}}}{p_T^{\text{pp}}} \right) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{AA,in}}} \\ &= (S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}}) \times \frac{p_T^{\text{pp}}}{p_T^{\text{in}}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

のように表すことができる。 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ は、AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラをそれぞれ pp 衝突のスペクトラと比較により計算した値である。(第 3.5 節)

3.5 エネルギー損失割合 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$

$S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ は、方位角による S_{loss} の傾向に変化の有無について評価するために用いた。この値を用いた経緯については第 4 章に記載した。これらの計算では、pp 衝突の p_T スペクトラ、AA 衝突の p_T スペクトラ、及び v_2 を用いる。(図 3.18)

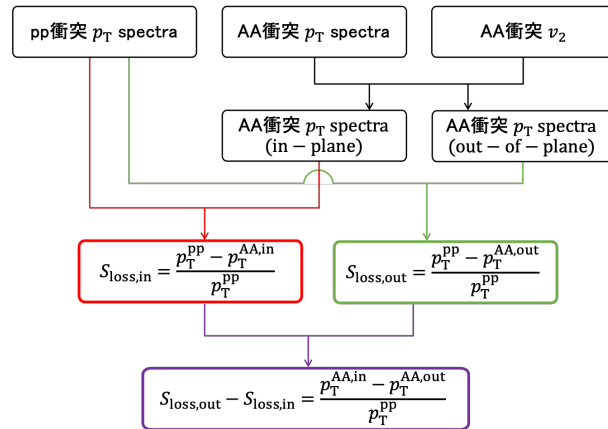


図 3.18: $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ 計算の関係図。

計算手順は以下の 5 つである。

1. pp 衝突における p_T スペクトラのスケーリング
2. in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの算出

3. pp 衝突の p_T スペクトラと AA 衝突の in-plane (out-of-plane) 方向の p_T スペクトラの p_T 差の測定とその差の p_T^{pp} による分割
4. 系統誤差と統計誤差

手順 1 は第 3.2.1 節、手順 2 は第 3.3.1 節に記述した。手順 3 も第 3.2.2 節で記述した手順とほとんど同じであるが、pp 衝突と比較するスペクトラが方位角方向に分割後の in-plane (out-of-plane) 方向の p_T スペクトラである点が異なる。手順 4 において、 $S_{\text{loss,in}}$ ($S_{\text{loss,out}}$) は pp 衝突と AA 衝突における in-plane (out-of-plane) 方向の p_T 差を p_T^{pp} で割ることにより求めることができる。従って、

$$S_{\text{loss,in}} = (p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,in}})/p_T^{\text{pp}} \quad (3.28)$$

$$S_{\text{loss,out}} = (p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,out}})/p_T^{\text{pp}} \quad (3.29)$$

と表せる。ここで、 $p_T^{\text{AA,in}}$ と $p_T^{\text{AA,out}}$ は、それぞれ AA 衝突における in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの横運動量である。また、これらはそれぞれの p_T スペクトラの縦軸が同じ (生成粒子量が同じ) 場合の横運動量である。

3.6 QGP 中の通過距離 (L)

S_{loss} と S'_{loss} によるエネルギー損失の評価に用いる QGP 中のパートンの通過距離を考える。原子核対衝突における通過距離計算は Glauber Monte Carlo simulation [10] を用いて行った。

3.6.1 原子核対衝突事象の生成

重心衝突エネルギー $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200\text{GeV}/c$ での非弾性衝突断面積は 42mb であり、核子密度は Woods-Saxon 関数、

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1}{1 + \exp(\frac{r-R}{a})} \quad (3.30)$$

を用いた。 $a = 0.54\text{fm}$ 、 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ であり、 $r(x,y,z)$ は核子の位置座標を表す。金原子核と銅原子核の原子量 A や半径 R は表 3.6 の通りである。 R は、

$$R = 1.18 \times A^{1/3} - 0.48 \quad (3.31)$$

とする。ここで、単位 mb と fm の関係式 $(\text{fm}) = \sqrt{\frac{(\text{mb}) \times 10}{\pi}}$ を用いた。

表 3.6: 金原子核と銅原子核における原子量 A と半径 R 。

Nuclei	A	R (fm)
Au	197	6.38
Cu	64	4.24

上記の条件下で、30000回の金原子核対衝突を生成し、核子核子衝突が1回以上起こった18977回の原子核衝突を用いた。同様に、銅金衝突と銅銅衝突においても30000回の原子核衝突を生成し、それぞれ13694回と9223回の衝突を用いた。

本研究の通過距離計算では participant の Z 軸（ビーム軸）方向の広がりには考慮しないため、位置座標を反応平面に対して平行な（in-plane 方向）X 軸と垂直な（out-of-plane 方向）Y 軸のみで表した。衝突する2つの原子核 A と原子核 B の participant 座標は $(x_{\text{part,A}}, y_{\text{part,A}})$ と $(x_{\text{part,B}}, y_{\text{part,B}})$ 、binary collision の位置座標は $(x_{\text{coll}}, y_{\text{coll}})$ と表記すると、これらの関係は、

$$(x_{\text{coll}}, y_{\text{coll}}) = \left(\frac{x_{\text{part,A}} + x_{\text{part,B}}}{2}, \frac{y_{\text{part,A}} + y_{\text{part,B}}}{2} \right) \quad (3.32)$$

である。ここで、binary collision の位置座標はその衝突に関与した participant 2つの中点と仮定した。この時の原子核 A と B の中心座標は、impact parameter を用いると $(-b/2, 0)$ と $(b/2, 0)$ と表される。 $(b$ は impact parameter) 図 3.19 の左と中央は、金金衝突における N_{coll} と N_{part} の centrality 依存性を示す。また、図 3.28 は金金衝突における N_{part} の二次元分布、図 3.29 は、金金衝突における N_{coll} の二次元分布を示す。

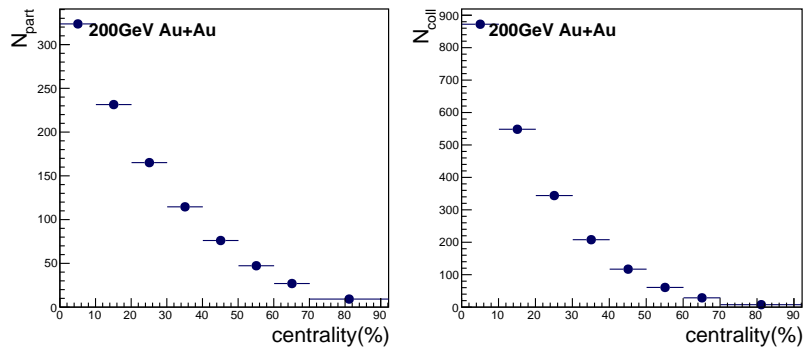


図 3.19: 金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} の centrality 依存性。

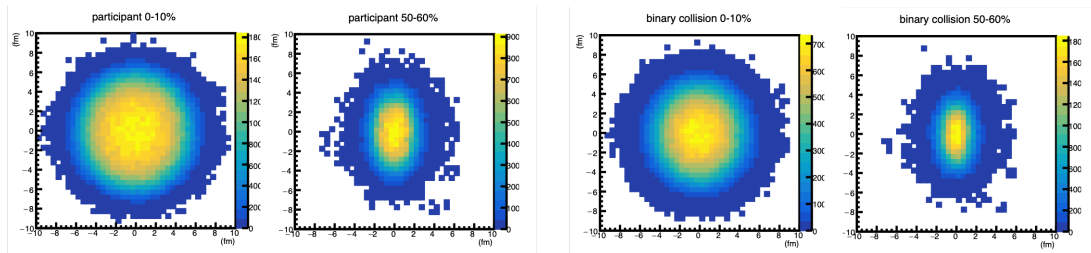


図 3.20: centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突 図 3.21: centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における N_{part} の二次元分布。 における N_{coll} の二次元分布。

3.6.2 反応領域の決定

次に、participant の位置情報を用いてエネルギー損失する反応領域を決定する。核子は Woods-Saxon 分布をしているため、核子は半径 $R = 1.18 \times A^{1/3}$ の円の外側に存在することがある。そこで反応領域にすべての participant を含めるために、最も衝突中心から遠い participant の位置から得られる半径 r_{\max} を計算した。図 3.22 は原子核対衝突における核子の位置を表すイメージ図である。図 3.23 と図 3.24 は、 r_{\max} 分布を示している。金金衝突のピーク値が約 8fm であることから、半径 R の円の外側にいる participant を確認できる。原子核 A と B それぞれの participant から最大半径 $r_{\max,A}$ と $r_{\max,B}$ を計算する。用いた式を (3.33) と (3.34) に示す。金金衝突と銅銅衝突の場合、衝突する原子核の種類（半径）が同じであることから、求めた $r_{\max,A}$ と $r_{\max,B}$ の内、長い方を r_{\max} として使用した。

$$r_{\max,A} = \sqrt{y_{\text{part},A}^2 + (x_{\text{part},A} + b/2)^2} \quad (3.33)$$

$$r_{\max,B} = \sqrt{y_{\text{part},B}^2 + (x_{\text{part},B} - b/2)^2} \quad (3.34)$$

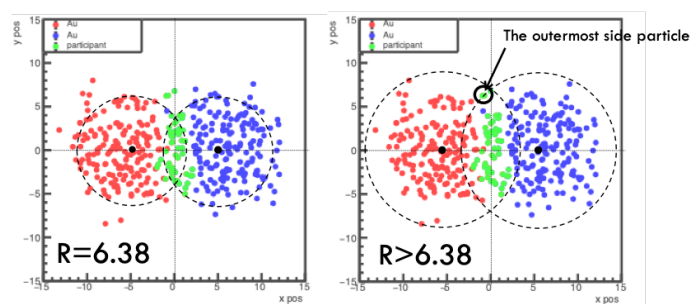


図 3.22: 金金衝突における核子の位置を表すイメージ図。赤色と青色はそれぞれ原子核 A と原子核 B の核子、緑色は participant の位置を表す。左の点線は $R = 1.18 \times A^{1/3} \sim 6.38$ の原子核の輪郭。右の点線は $R = r_{\max}$ の原子核の輪郭。

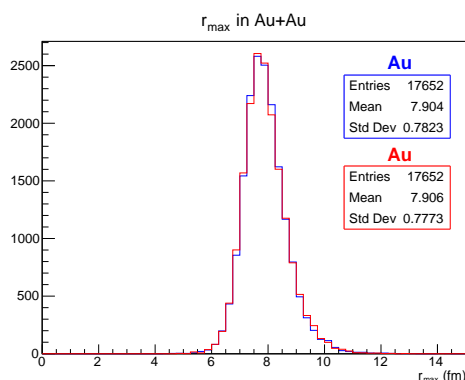


図 3.23: 金金衝突における r_{\max} 分布。

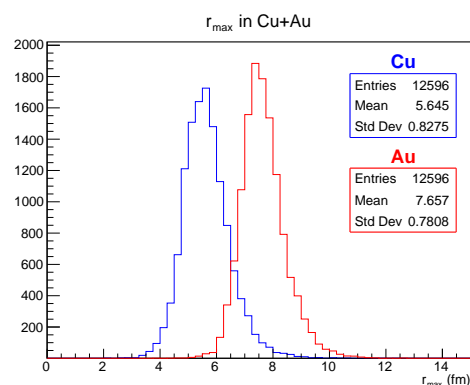


図 3.24: 銅金衝突における r_{\max} 分布。

3.6.3 通過距離 L_{in} 、 L_{out} の計算

決定した反応領域と binary collision の位置情報を用いて、通過距離を計算する。本研究では反応領域内部の核子密度を考慮する通過距離と考慮しない通過距離の2つを計算した。ここでは核子密度は考慮しない場合の計算方法について記述した。核子密度は考慮しない場合、各核子核子衝突点から反応領域の境界線までを生成パートの通過距離と定義した。図 3.25a と図 3.25b は、金金衝突と銅金衝突の反応領域を決定する際の幾何学的なモデル図である。図内に示されている値の詳細説明は表 3.7 にまとめた。in-plane 方向の

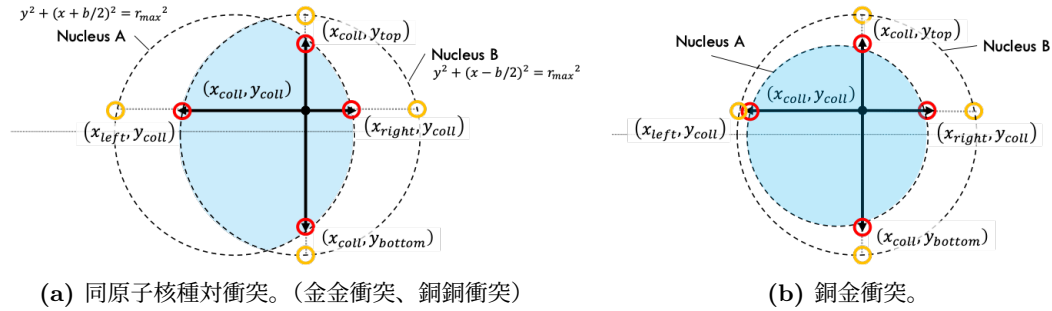


図 3.25: 反応領域のモデル図。

表 3.7: 通過距離計算に用いる反応領域の境界座標の候補と境界座標。

反応領域の境界座標	境界座標の候補となる座標
(x_{coll}, y_{top})	$(x_{coll}, y_{top,B}) = (x_{coll}, \sqrt{r_{max}^2 - (x_{coll} - b/2)^2})$ $(x_{coll}, y_{top,A}) = (x_{coll}, \sqrt{r_{max}^2 - (x_{coll} + b/2)^2})$
(x_{coll}, y_{bottom})	$(x_{coll}, y_{bottom,A}) = (x_{coll}, -\sqrt{r_{max}^2 - (x_{coll} + b/2)^2})$ $(x_{coll}, y_{bottom,B}) = (x_{coll}, -\sqrt{r_{max}^2 - (x_{coll} - b/2)^2})$
(x_{right}, y_{coll})	$(x_{right,B}, y_{coll}) = (\sqrt{r_{max}^2 - y_{coll}^2} + b/2, y_{coll})$ $(x_{right,A}, y_{coll}) = (\sqrt{r_{max}^2 - y_{coll}^2} - b/2, y_{coll})$
(x_{left}, y_{coll})	$(x_{left,B}, y_{coll}) = (-\sqrt{r_{max}^2 - y_{coll}^2} + b/2, y_{coll})$ $(x_{left,A}, y_{coll}) = (-\sqrt{r_{max}^2 - y_{coll}^2} - b/2, y_{coll})$

通過距離 L_{in} と out-of-plane 方向の通過距離 L_{out} の計算式は、

$$L_x = x_{right} - x_{coll}, x_{coll} - x_{left} \quad (3.35)$$

$$L_y = y_{top} - y_{coll}, y_{coll} - y_{bottom} \quad (3.36)$$

これらの値を全核子核子衝突点で計算し、中心衝突度 (centrality) 10% ごとに、それぞれの平均値 (" $\overline{L_{in}}$ "、" $\overline{L_{out}}$ ") と方位角を考慮しない通過距離 $L = (\overline{L_{in}} + \overline{L_{out}})/2$ を計算する。これで、ある centrality 領域における平均通過距離 L と in-plane 方向の通過距離 $\overline{L_{in}}$ 、out-of-plane 方向の $\overline{L_{out}}$ が決定する。

3.6.4 通過距離の n 乗 (L^2 と ΔL^2) の計算

エネルギー損失が通過距離の何乗に比例するかは重要な測定値であり、先行研究 [17, 18] では S_{loss} は平均通過距離の 2 乗 L^2 に比例する傾向にあることが明らかになっている。そこで、本研究においては先行研究と同じ測定量 L^2 で S_{loss} を、 $\Delta L^2 = \overline{L_{\text{out}}}^2 - \overline{L_{\text{in}}}^2$ で S'_{loss} を評価した。 S'_{loss} における ΔL^2 は、 S_{loss} における L^2 に対応する値である。まず、 S_{loss} と S'_{loss} の関係は式 3.27 のように表される。ここで S_{loss} が n 乗に比例する関数 ($S_{\text{loss}} = p_0 \times L^n$) であると仮定すると、 S'_{loss} は、

$$S'_{\text{loss}} = (S_{\text{loss}}^{\text{out}} - S_{\text{loss}}^{\text{in}}) \times \frac{p_{\text{T}}^{\text{pp}}}{p_{\text{T}}^{\text{in}}} = p_0 \times L_{\text{out}}^n - p_0 \times L_{\text{in}}^n \times \frac{p_{\text{T}}^{\text{pp}}}{p_{\text{T}}^{\text{AA,in}}} = p_0 \times (L_{\text{out}}^n - L_{\text{in}}^n) \times \frac{p_{\text{T}}^{\text{pp}}}{p_{\text{T}}^{\text{AA,in}}} \quad (3.37)$$

のように表すことができる。ここで、 p_0 はパラメータである。従って、 $n=2$ である場合に S'_{loss} の評価に用いるべき値は $\Delta L^2 = \overline{L_{\text{out}}}^2 - \overline{L_{\text{in}}}^2$ であると言える。図 3.26 は、金金衝突における L^2 と ΔL^2 の centrality 依存の計算結果である。

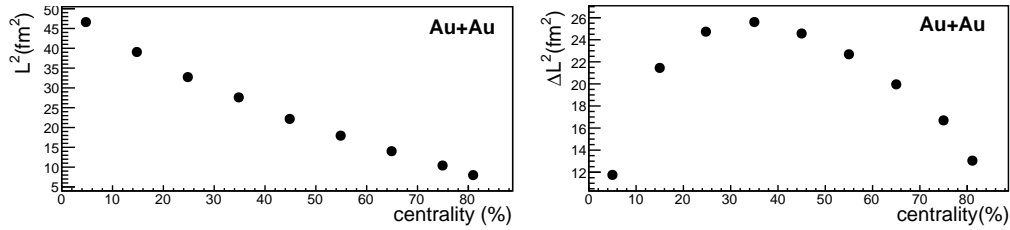


図 3.26: 金金衝突における L^2 と ΔL^2 の centrality 依存。

3.7 生成粒子多重度 ($dN/d\eta$)

S_{loss} と S'_{loss} によるエネルギー損失の評価に用いる QGP 中の生成粒子多重度 $dN/d\eta$ を考える。生成粒子多重度 $dN/d\eta$ については、第 3.1.5 節に記述した。 $dN_{\text{ch}}/d\eta$ は、式 (3.5) より N_{part} と N_{coll} から算出した。 N_{part} と N_{coll} は第 3.6.1 節と同じ手順で見積もった。図 3.27 の丸印は金金衝突における N_{part} と N_{coll} 、 $dN/d\eta$ の centrality 依存性を示す。

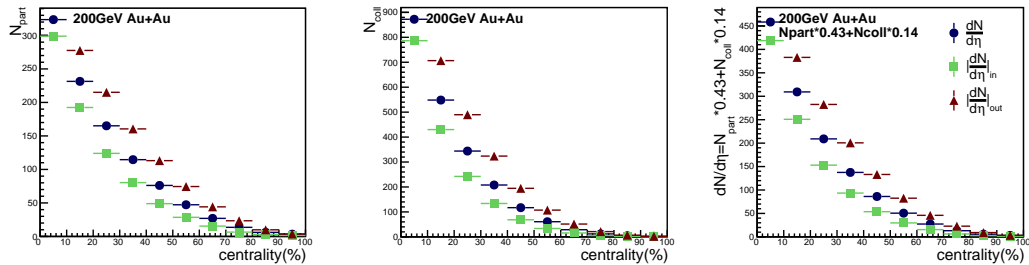


図 3.27: 金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} 、及び $dN/d\eta$ の centrality 依存。丸印は方位角を考慮しない値、三角印は in-plane 方向、四角印は out-of-plane 方向の値である。

3.7.1 $N_{\text{part,in}}$ 、 $N_{\text{coll,in}}$ 、 $N_{\text{part,out}}$ 、 $N_{\text{coll,out}}$ 、 $|dN/d\eta|_{\text{in}}$ 、及び $|dN/d\eta|_{\text{out}}$ の算出

in-plane 方向の $dN/d\eta$ ($|dN/d\eta|_{\text{in}}$) と out-of-plane 方向の $dN/d\eta$ ($|dN/d\eta|_{\text{out}}$) を算出する。ここでは、 N_{part} の $\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布と N_{coll} の $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布を用いた。 ϕ_{part} と ϕ_{coll} は、それぞれ participant と binary collision 位置の方位角を表す。図 3.28 は金金衝突における $\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布、図 3.29 は、金金衝突における $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布を示す。これらの図より、 N_{part} と N_{coll} が in-plane 方向 ($\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 0^\circ$) より out-of-plane 方向 ($\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 90^\circ$) において多く分布していることがわかる。そこで、 $N_{\text{part,in}}$ は $\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 0^\circ$ の N_{part} の定数倍、 $N_{\text{part,out}}$ は $\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 90^\circ$ の N_{part} の定数倍として算出した。同様に、 $N_{\text{coll,in}}$ は $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}} = 0^\circ$ の N_{coll} の定数倍、 $N_{\text{coll,out}}$ は $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}} = 90^\circ$ の N_{coll} の定数倍として算出した。ここで、定数倍は算出した値と N_{part} または N_{coll} の大きさに揃えるために行った。 $N_{\text{part,in}}$ 、 $N_{\text{coll,in}}$ 、 $N_{\text{part,out}}$ 、及び $N_{\text{coll,out}}$ の算出式を以下に示した。

$$N_{\text{part,in}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |N_{\text{part}}|_{(\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 0^\circ)} d(\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}}) \quad (3.38)$$

$$N_{\text{coll,in}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |N_{\text{coll}}|_{(\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}} = 0^\circ)} d(\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}}) \quad (3.39)$$

$$N_{\text{part,out}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |N_{\text{part}}|_{(\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}} = 90^\circ)} d(\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}}) \quad (3.40)$$

$$N_{\text{coll,out}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |N_{\text{coll}}|_{(\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}} = 90^\circ)} d(\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}}) \quad (3.41)$$

これらの値を用いて $|dN/d\eta|_{\text{in}}$ 、及び $|dN/d\eta|_{\text{out}}$ は以下のように算出した。

$$|dN/d\eta|_{\text{in}} = 0.43 \times N_{\text{part,in}} + 0.14 \times N_{\text{coll,in}} \quad (3.42)$$

$$|dN/d\eta|_{\text{out}} = 0.43 \times N_{\text{part,out}} + 0.14 \times N_{\text{coll,out}} \quad (3.43)$$

と書ける。図 3.27 の三角印と四角印は、それぞれ in-plane と out-of-plane の N_{part} と N_{coll} 、 $dN/d\eta$ の centrality 依存性を示す。また、算出した値は表 3.8、表 3.9、及び表 3.10 に記載した。

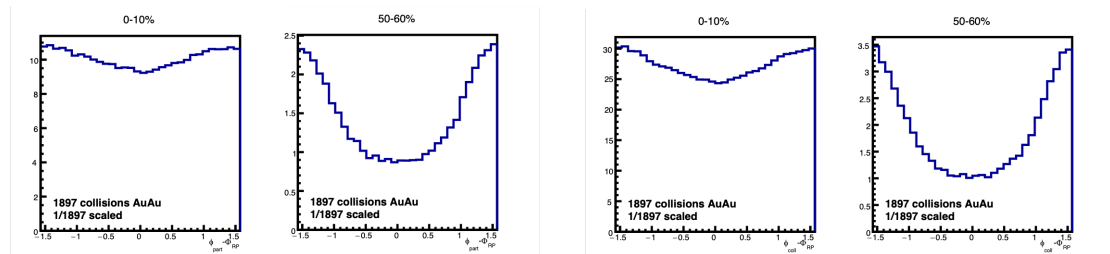


図 3.28: centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における $\phi_{\text{part}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布。 図 3.29: centrality 0-10% と 50-60% の金金衝突における $\phi_{\text{coll}} - \Phi_{\text{RP}}$ 分布。

表 3.8: 金金衝突における N_{part} 、 N_{coll} 、及び $dN/d\eta$ 。

centrality(%)	N_{part}	δN_{part}	N_{coll}	δN_{coll}	$dN/d\eta$	$\delta dN/d\eta$
0-10	324	0.757	872	3.02	458	7.5
10-20	231	0.501	548	1.83	309	4.36
20-30	165	0.391	344	1.29	209	2.53
30-40	115	0.289	208	0.884	137	1.39
40-50	76.1	0.219	117	0.565	86.2	0.698
50-60	47.3	0.161	60.7	0.348	50.6	0.343

表 3.9: 金金衝突における $N_{\text{part,in}}$ 、 $N_{\text{coll,in}}$ 、及び $|dN/d\eta|_{\text{in}}$ 。

centrality(%)	$N_{\text{part,in}}$	$\delta N_{\text{part,in}}$	$N_{\text{coll,in}}$	$\delta N_{\text{coll,in}}$	$ dN/d\eta _{\text{in}}$	$\delta dN/d\eta _{\text{in}}$
0-10	299	1.47	787	5.33	419	7.47
10-20	192	1.11	430	3.24	251	3.98
20-30	124	0.92	242	2.27	153	2.39
30-40	80.3	0.778	134	1.59	93.4	1.54
40-50	48.9	0.591	68.4	1.01	53.7	0.982
50-60	28.5	0.456	33.6	0.66	29.8	0.684

表 3.10: 金金衝突における $N_{\text{part,out}}$ 、 $N_{\text{coll,out}}$ 、及び $|dN/d\eta|_{\text{out}}$ 。

centrality(%)	$N_{\text{part,out}}$	$\delta N_{\text{part,out}}$	$N_{\text{coll,out}}$	$\delta N_{\text{coll,out}}$	$ dN/d\eta _{\text{out}}$	$\delta dN/d\eta _{\text{out}}$
0-10	344	1.1	962	4.57	496	8.73
10-20	278	0.988	707	3.77	383	6.24
20-30	215	0.914	490	3.03	283	4.24
30-40	160	0.816	324	2.38	201	2.81
40-50	113	0.736	195	1.79	133	1.8
50-60	74.5	0.619	107	1.23	82.5	1.16

第4章 結果・考察

4.1 エネルギー損失割合 ($S_{\text{loss}}, S'_{\text{loss}}$) の p_T 依存性

4.1.1 S_{loss} の p_T 依存性

図4.1は S_{loss} の p_T 依存性を示す。図中の凡例に centrality 範囲を示した。実線のエラーバーは統計誤差、色のついた四角は系統誤差である。先行研究の金金衝突における π^0 の結果と比較より、測定の誤差の範囲内で荷電ハドロンと π^0 の S_{loss} の値と傾向に大きな違いはないことを確かめた。また、銅金衝突における π^0 の結果から、 S_{loss} は $p_T \sim 12$ GeV あたりまで一定であり、より高い p_T になると減少することを明らかにした。さらに、図4.1から、金金衝突と銅金衝突における S_{loss} は同じ傾向を示すことを明らかにした。

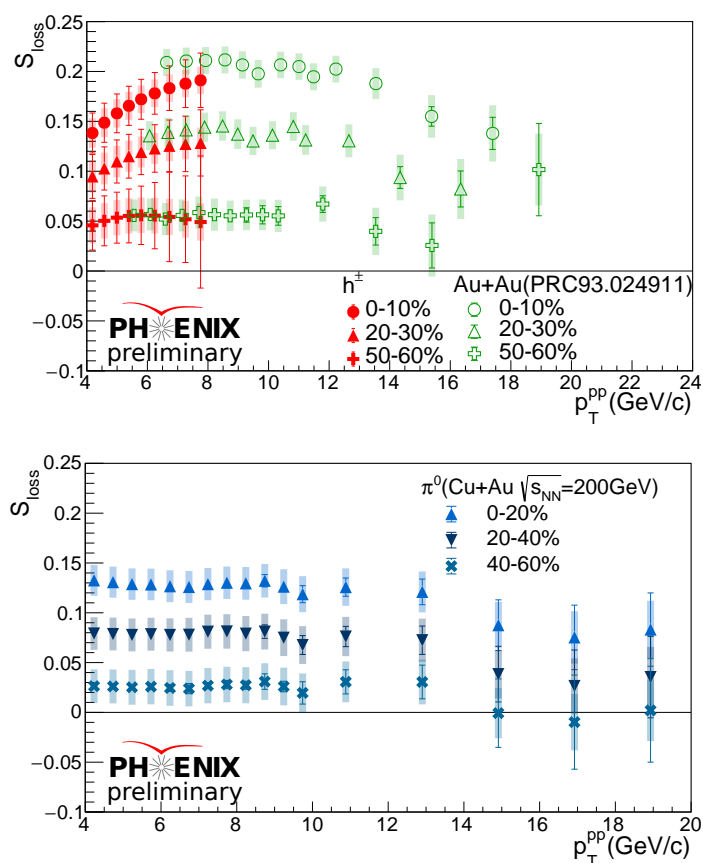


図 4.1: (上) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 の S_{loss} vs. p_T (下) 銅金衝突における π^0 の S_{loss} vs. p_T

4.1.2 S'_{loss} の p_T 依存性

図 4.2 は S'_{loss} の p_T 依存性を示す。金金衝突における荷電ハドロンと π^0 において、 S'_{loss} は、 $p_T \sim 6$ GeV までわずかに減少し、より高い p_T で一定になることを明らかにした。また S_{loss} と同じように、測定の誤差の範囲内で荷電ハドロンと π^0 の S'_{loss} の値と傾向に大きな違いはないことを確かめた。さらに図 4.1 と図 4.2 からわかるように、centrality 60 % までの範囲において、centrality が増加するに従い S_{loss} は減少し、 S'_{loss} は centrality 60 % までは増加することを確認した。

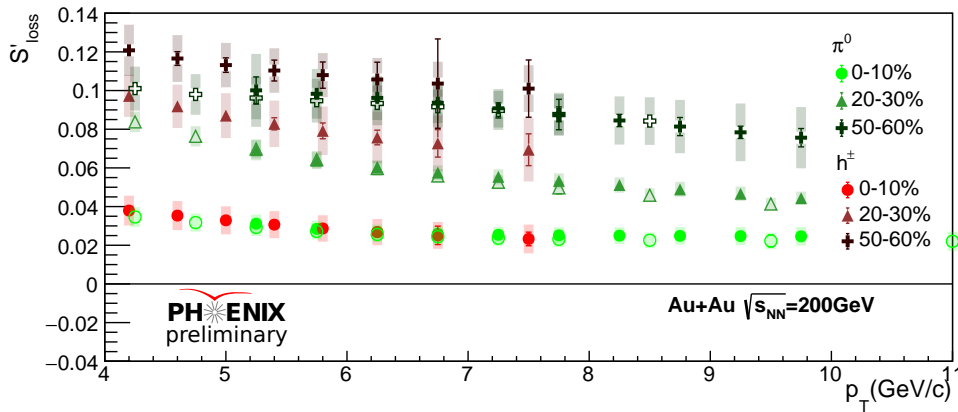


図 4.2: 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 の S'_{loss} vs. p_T

4.1.3 S_{loss} と S'_{loss} の比較

S_{loss} と S'_{loss} が表すエネルギー損失割合が比較可能な値であるかを考察した。 S_{loss} と S'_{loss} の関係式は、式 3.27 のように表される。 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ は、第 3.5 節で述べたように AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラをそれぞれ pp 衝突のスペクトラと比較により計算した値である。方位角方向に分割した S_{loss} を測定することで、エネルギー損失の方位角依存の有無を確認することができる。図 4.3 は $S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$ 、 S_{loss} 、及び $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の平均値の p_T 依存性を示している。 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の傾向が非中心衝突に行くほど異なっており、この 2 つを平均化したものが S_{loss} に対応している。従って、方位角に依存した S_{loss} の詳細な情報を示していると考えられる。 S'_{loss} と $(S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}})$ の値を比較した結果は図 4.4 に示す通りである。図 4.4 中の 2 つの値が誤差の範囲で一致していることから、 S_{loss} で見積もるエネルギー損失の割合は pp 衝突のデータを用いない S'_{loss} でも見積もることができている。ここで、図 4.3 と図 4.4 には centrality 0-30 % の結果のみ記載したが、centrality 30-60 % においても同様の結果が得られた。

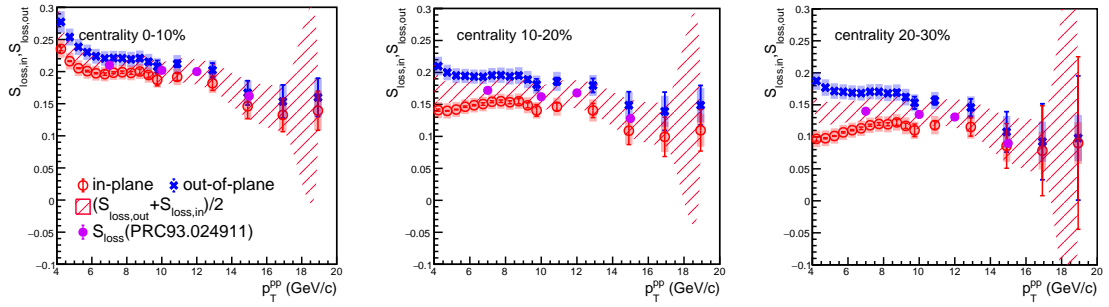


図 4.3: 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ と S_{loss} の p_T 依存性。紫丸印は金金衝突における π^0 の S_{loss} 、斜線は $\frac{S_{\text{loss,out}} + S_{\text{loss,in}}}{2}$ の p_T 依存性を示す。

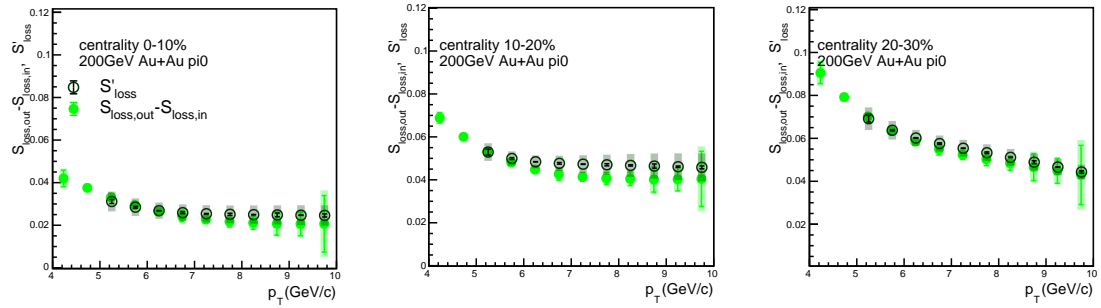


図 4.4: 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}}$ と S'_{loss} の p_T 依存性。

4.2 エネルギー損失割合 (S_{loss} , S'_{loss}) の通過距離依存性

4.2.1 S_{loss} の L^2 依存性

図 4.5 は S_{loss} の L^2 依存性を示す。測定した金金衝突の荷電ハドロンと銅金衝突の π^0 の結果より、 S_{loss} は L^2 に対し増加傾向にあることを確認した。これは、測定した p_T 範囲において、グルーオンの放射損失が支配的である可能性を示している [19]。また、測定結果は先行研究 [17] で計算された金金衝突における π^0 と同じ傾向である。

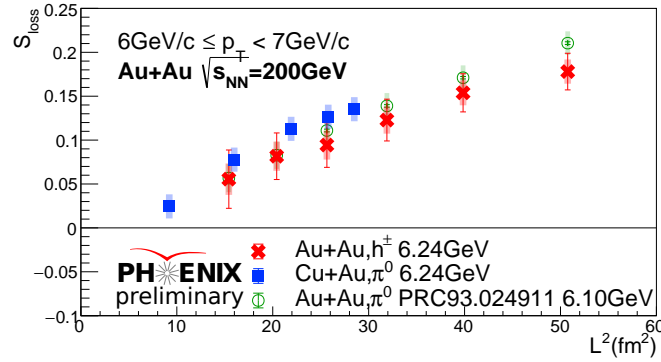


図 4.5: 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4]、銅金衝突における π^0 の S_{loss} vs. L^2

4.2.2 S'_{loss} の $L^2_{\text{out}} - L^2_{\text{in}}$ 依存性

図 4.6 は、 S'_{loss} の $\Delta L^2 = (L^2_{\text{out}} - L^2_{\text{in}})$ 依存の結果である。金金衝突の荷電ハドロンと π^0 において、 S'_{loss} は ΔL^2 に比例せず、 S_{loss} とは異なる傾向を示すことを明らかにした。この結果の原因の 1 つは、図 3.26 に示すように、centrality に対して ΔL^2 が単調に変化しないことであると考えられる。従って、 S'_{loss} は方位角に依存した S_{loss} の詳細な情報を示していると考えられる。また、荷電ハドロンと π^0 では、 S_{loss} と同様に、測定した誤差の範囲内で S'_{loss} の値や傾向に大きな違いはないことを確認した。

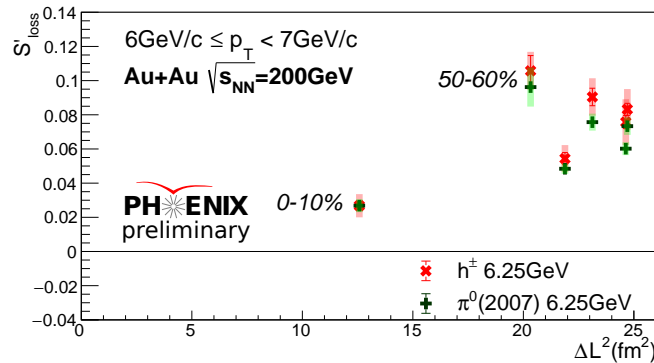


図 4.6: S'_{loss} の ΔL^2 依存 (金金衝突 (荷電ハドロン、 π^0))。

4.3 エネルギー損失割合 ($S_{\text{loss}}, S'_{\text{loss}}$) の衝突関与核子数と生成粒子多重度依存性

第 4.2.1 節と第 4.2.2 節で用いたエネルギー損失を評価する横軸 (通過距離 L) は、QGP 中に存在すると考えられる粒子の密度を考慮していないモデルによる計算であった。そこで、衝突核子数 N_{part} と N_{part} から算出する生成粒子多重度 $dN/d\eta$ という値に注目した。これらの値を用いることで、 N_{part} では衝突関与核子の密度を考慮した値によるエネルギー損失の評価、 $dN/d\eta$ では QGP 内部のエネルギー密度を考慮した値によるエネルギー損失の評価が可能になる。 N_{part} と $dN/d\eta$ の計算方法は第 3.6.1 節と第 3.7 節に記述した。ただし、本文中における $dN/d\eta$ は荷電ハドロン粒子多重度 $dN_{\text{ch}}/d\eta$ のことを示す (第 3.7 節)。図 4.7 と図 4.8 は通過距離 L と N_{part} 、及び $dN/d\eta$ の相関関係を示しており、 N_{part} は L の 2.5~4.1 乗、 $dN/d\eta$ は L の 2.9~4.9 乗に比例することを示している。従って、通過距離 L の約 3 乗が N_{part} と $dN/d\eta$ に対応すると考えられる。

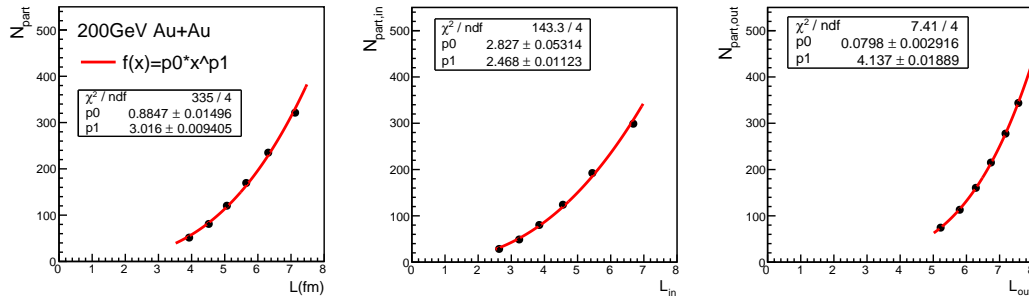


図 4.7: 金金衝突における通過距離 L と N_{part} の相関関係。

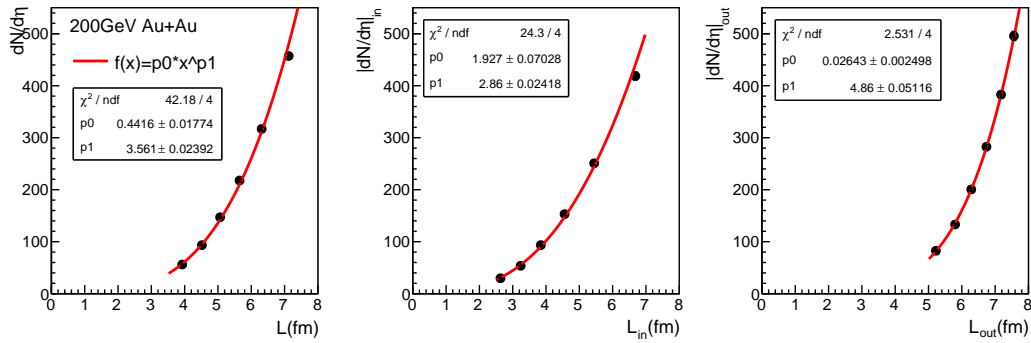


図 4.8: 金金衝突における通過距離 L と $dN/d\eta$ の相関関係。

4.3.1 S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性

図 4.9 は S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性を示す。第 4.1.1 節より高 p_T 領域において S_{loss} は p_T によらないため、ここでは $7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$ の結果のみを示した。 L^2 依存性と同様に、 S_{loss} は N_{part} と $dN/d\eta$ に対し増加傾向にあることを確認した。また、 L^2 依存性に比べ、銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} が測定の誤差の範囲内でさらに一致することを明らかにした。

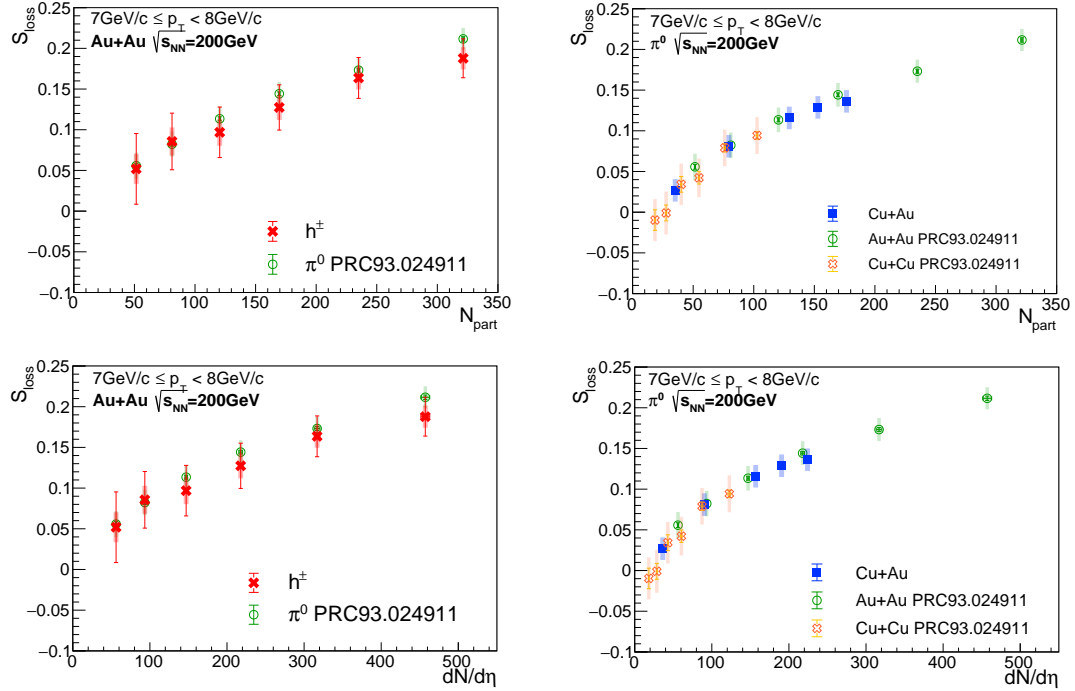


図 4.9: (左上) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4] の S_{loss} vs. N_{part} 。(右上) 銅金衝突と金金衝突 [4]、及び銅銅衝突 [4] における π^0 の S_{loss} vs. N_{part} 。(左下) 金金衝突における荷電ハドロンと π^0 [4] の S_{loss} vs. $dN/d\eta$ 。(右下) 銅金衝突と金金衝突 [4]、及び銅銅衝突 [4] における π^0 の S_{loss} vs. $dN/d\eta$ 。 ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$)

さらに、銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性を 1 つの関数でフィットした。フィットに用いた関数は、

$$f(x) = p_0 \times x^{p_1} + p_2 \quad (4.1)$$

であり、 p_0 、 p_1 、 p_2 はパラメータである。図 4.10 と図 4.11 は、それぞれ N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果を示す。また、得られらフィット関数のパラメータは表 4.1 のとおりである。パラメータ p_1 より、 N_{part} では 0.1 ~ 0.7 乗、 $dN/d\eta$ では 0.1 ~ 0.5 乗の関数が得られた。

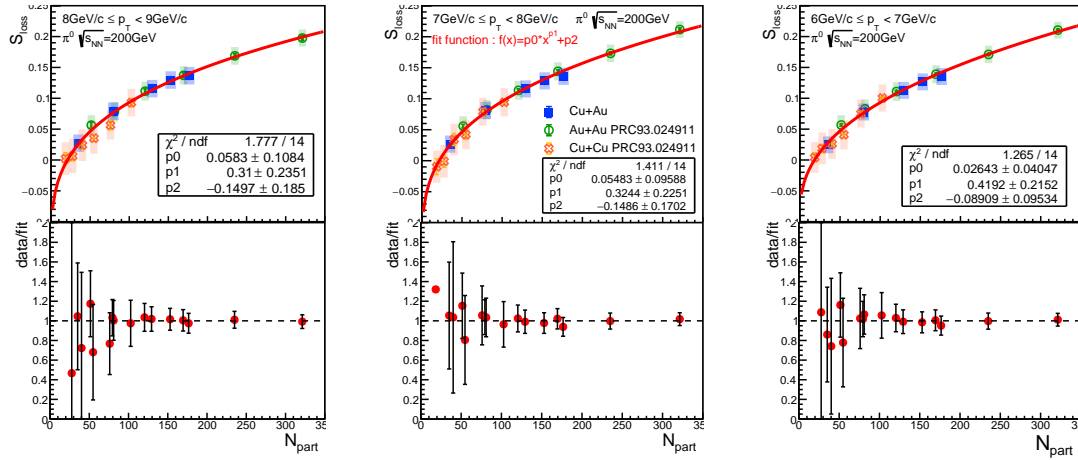


図 4.10: (上) 銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の N_{part} 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($6\text{GeV}/c \leq p_T < 9\text{GeV}/c$)

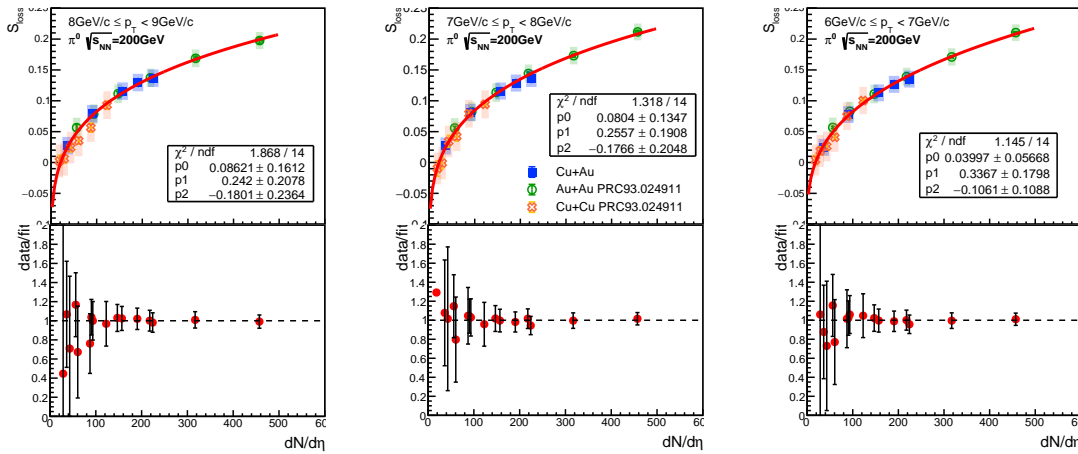


図 4.11: (上) 銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($6\text{GeV}/c \leq p_T < 9\text{GeV}/c$)

4.3.2 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ による L 、 N_{part} 、及び $dN/d\eta$ 依存性の比較

第4章では、QGP中における粒子のエネルギー損失を評価するために、 L 依存性、 N_{part} 依存性、及び $dN/d\eta$ 依存性を見てきた。この節では、方位角を考慮した S_{loss} ($S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$) を用い、3つの依存性を比較した結果について記述した。

図4.12は、 S_{loss} 、 $S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$ の L 、 N_{part} 、及び $dN/d\eta$ 依存性を示す。図4.12aでは、 S_{loss} と $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の依存性が一致しないことがわかる。一方、図4.12bと図4.12cでは、3つの依存性が測定の実験誤差の範囲で一致しており、方位角を考慮する場合と

表 4.1: 銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} vs. N_{part} と S_{loss} vs. $dN/d\eta$ のフィット関数 (4.1) のパラメータ。

p_T (GeV/c)	Parameters	Dependences	
		N_{part}	$dN/d\eta$
6-7	$p0$	0.02643 ± 0.04047	0.03997 ± 0.05668
	$p1$	0.4192 ± 0.2152	0.3367 ± 0.1798
	$p2$	-0.08909 ± 0.09534	-0.1061 ± 0.1088
7-8	$p0$	0.05483 ± 0.09588	0.0804 ± 0.1347
	$p1$	0.3244 ± 0.2251	0.2557 ± 0.1908
	$p2$	-0.1486 ± 0.1702	-0.1766 ± 0.2048
8-9	$p0$	0.0583 ± 0.1084	0.08621 ± 0.1612
	$p1$	0.31 ± 0.2351	0.242 ± 0.2078
	$p2$	-0.1497 ± 0.185	-0.1801 ± 0.2364

考慮しない場合のエネルギー損失が1つの関数で表されていると考えられる。従って、高 p_T 領域において衝突関与核子数 N_{part} や QGP 内部のエネルギー密度を考慮した $dN/d\eta$ で S_{loss} を評価することは、QGP 中のエネルギー損失割合の評価に適していると考えられる。

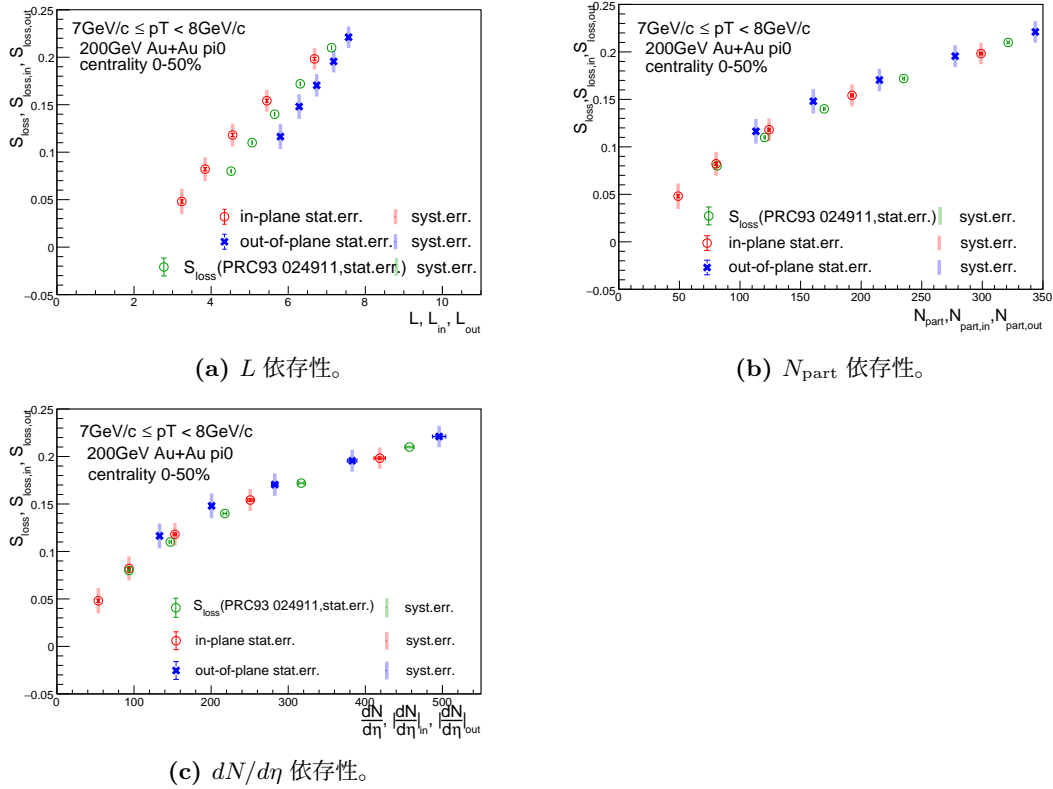


図 4.12: 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss}}[4]$ 、 $S_{\text{loss,in}}$ 、 $S_{\text{loss,out}}$ ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 8\text{GeV}/c$)。

また、これらのエネルギー損失を評価する1つの関数を、 N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性から見積もった。ここでは、 $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の依存性を同時にフィットした。フィットに用いた関数は式 (4.1) である。また centrality 50-60% は周辺衝突であり中心衝突に比べ QGP が生成しにくいため、フィットには用いていない。図 4.13 と図 4.14 は、それぞれ N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果を示す。また、得られらフィット関数のパラ

メータは表 4.2 のとおりである。パラメータ $p1$ より、 N_{part} と $dN/d\eta$ の $-0.1 \sim 0.7$ 乗の関数が得られた。この結果は第 4.3.1 節で得られた銅金衝突と金金衝突と銅銅衝突の π^0 の S_{loss} の N_{part} 依存性の関数が持つ乗数のパラメータ $p1$ と等しい。従って、高 p_T 領域において方位角を考慮する場合と考慮しない場合のエネルギー損失の N_{part} 依存性は 1 つの関数で表すことができると考えられる。

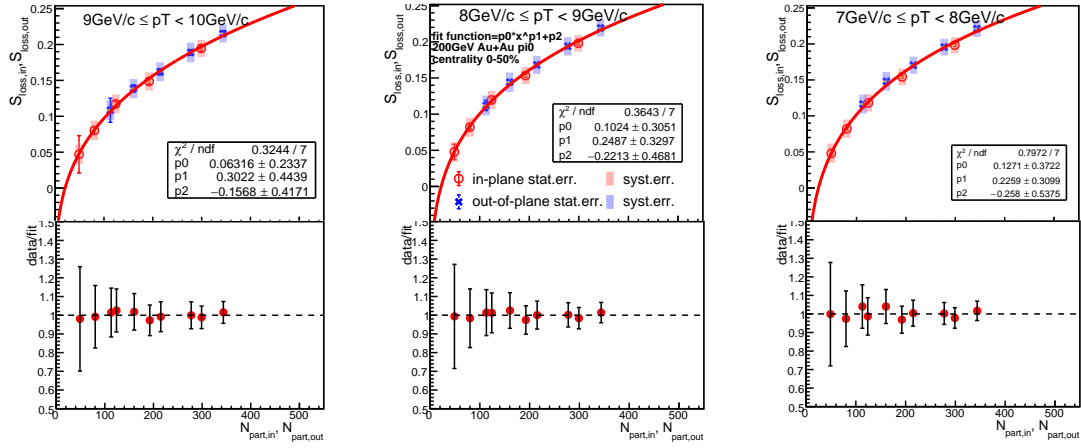


図 4.13: (上) 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の N_{part} 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit)

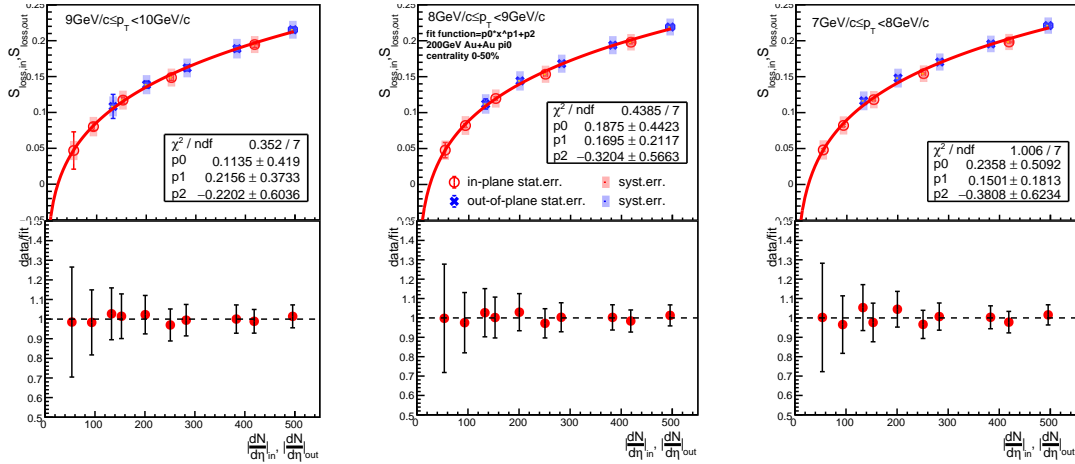


図 4.14: (上) 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の $dN/d\eta$ 依存性のフィット結果。(下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit)

表 4.2: 金金衝突における π^0 の $S_{\text{loss,in}}, S_{\text{loss,out}}$ vs. N_{part} のフィット関数 (4.1) のパラメータ。

p_T (GeV/c)	Parameters	Dependences	
		N_{part}	$dN/d\eta$
7-8	p_0	0.1271 ± 0.3721	0.2358 ± 0.5092
	p_1	0.2259 ± 0.3099	0.1501 ± 0.1813
	p_2	-0.2580 ± 0.5375	-0.3808 ± 0.6234
8-9	p_0	0.1024 ± 0.3051	0.1875 ± 0.4423
	p_1	0.2487 ± 0.3297	0.1695 ± 0.2117
	p_2	-0.2213 ± 0.4681	-0.3204 ± 0.5663
9-10	p_0	0.0632 ± 0.2337	0.1135 ± 0.419
	p_1	0.3022 ± 0.4439	0.2156 ± 0.3733
	p_2	-0.1568 ± 0.5375	-0.2202 ± 0.6036

4.3.3 S'_{loss} の $N_{\text{part,out}}^{2/3} - N_{\text{part,in}}^{2/3}$ 依存性と $|dN/d\eta|_{\text{out}}^{2/3} - |dN/d\eta|_{\text{in}}^{2/3}$ 依存性

通過距離 L を用いた場合と同様に、 N_{part} と $dN/d\eta$ を用いて S'_{loss} も評価した。第??節の初めに記述したとおり、 N_{part} と $dN/d\eta$ は L の約3乗に比例すると考えられる。従って、第4.2.2節における $\Delta L^2 (= L_{\text{out}}^2 - L_{\text{in}}^2)$ と同次元の値は、 $N_{\text{part,out}}^{2/3} - N_{\text{part,in}}^{2/3}$ 、 $|dN/d\eta|_{\text{out}}^{2/3} - |dN/d\eta|_{\text{in}}^{2/3}$ と書ける。図4.15は、 S'_{loss} の $N_{\text{part,out}}^{2/3} - N_{\text{part,in}}^{2/3}$ 依存性と $|dN/d\eta|_{\text{out}}^{2/3} - |dN/d\eta|_{\text{in}}^{2/3}$ 依存性を示す。 ΔL^2 依存性の結果 (第4.2.2節) と同様に単調増加ではなく、一意の依存性が示されなかった。これより、高 p_T 領域において S'_{loss} は L^2 と同じ次元の関数だけでは示すことができないと考えられる。

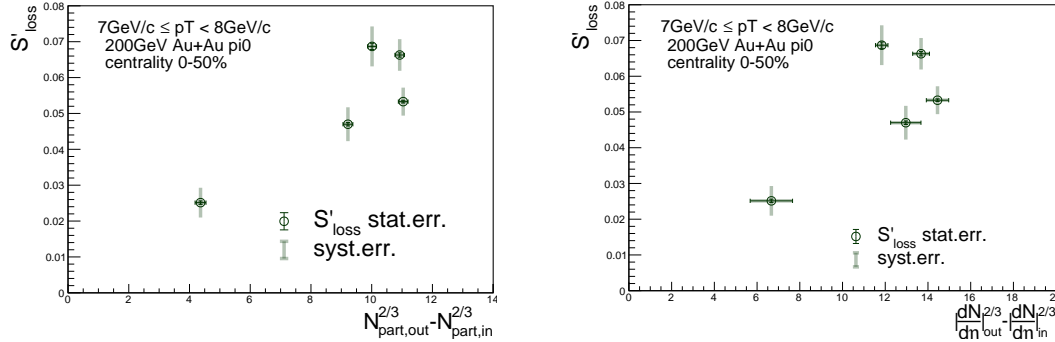


図 4.15: (左) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $N_{\text{part}}^{2/3}$ 依存。(右) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $(dN/d\eta)^{2/3}$ 依存。(7GeV/c $\leq p_T < 8$ GeV/c)

4.3.4 S'_{loss} の $N_{\text{part,out}}^n - N_{\text{part,in}}^n$ 依存性と $|dN/d\eta|_{\text{out}}^n - |dN/d\eta|_{\text{in}}^n$ 依存性

第4.3.3節では S'_{loss} を通過距離の2乗 (L^2 , $N_{\text{part}}^{2/3}$, $(dN/d\eta)^{2/3}$) の関数として示すことができず、一意の依存性が見られなかったことから、 S_{loss} と S'_{loss} の n 乗依存性を測定した。この乗数には $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ のフィット関数 (第4.3.2節) のパラメータ p_0 (表4.2) を用いた。図4.16と図4.17は S'_{loss} の $N_{\text{part}}^{p_0}$ 依存性と $(dN/d\eta)^{p_0}$ 依存性のフィット結果を示す。この測定により、 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。この関数が QGP のどのような性質、物理量を表しているか

が今後の重要な議論点であり、理論モデルとの比較が求められる。そのため、現在は理論モデルとの比較を行うために JetScape[20] 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。

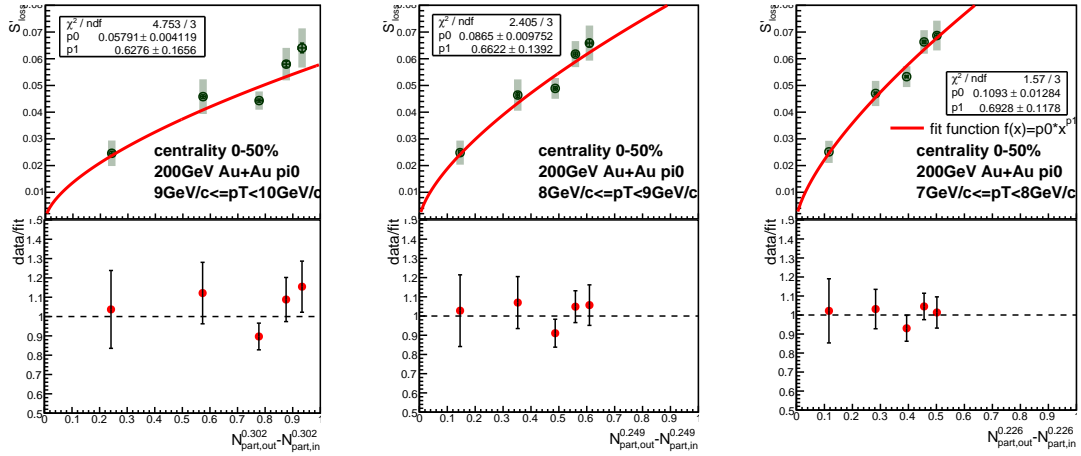


図 4.16: (上) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の N_{part}^n 依存性 (下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 10\text{GeV}/c$)

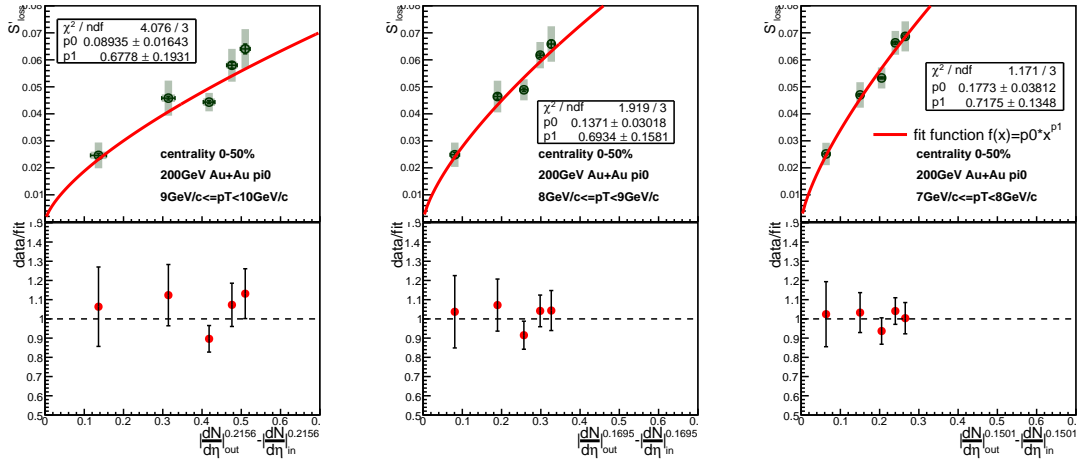


図 4.17: (上) 金金衝突における π^0 の S'_{loss} の $(dN/d\eta)^n$ 依存性 (下) フィット関数の値に対するデータ点の割合 (data/fit) ($7\text{GeV}/c \leq p_T < 10\text{GeV}/c$)

第5章 まとめと今後の課題

高エネルギー原子核衝突実験での、様々な衝突系における QGP 中で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を目的として、研究を行った。エネルギー損失は S_{loss} と S'_{loss} という値を用いる異なる2つの手法で評価した。 S_{loss} は pp 衝突と AA 衝突の比較より、 S'_{loss} は AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向の比較より算出する値である。

S_{loss} においては、先行研究 [4] の衝突システムに加え、新たに重心系エネルギー $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200\text{GeV}$ の金金衝突における π^0 と荷電ハドロン、銅金衝突における π^0 について見積った。その結果、銅金衝突のような異なる原子核種の衝突においても、 S_{loss} は p_{T} に大きく依存せず一定であることを確認した。また、この値は centrality に依存しており、反応領域が大きい中心衝突ほど S_{loss} が増加することを確認した。これは先行研究の金金衝突における π^0 の S_{loss} と同じ傾向である。さらに、金金衝突での荷電ハドロンにおける S_{loss} の p_{T} 依存性が π^0 と一致していることがわかった。

S'_{loss} においては、重心系エネルギー $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200\text{GeV}$ の金金衝突の荷電ハドロンと π^0 について見積もった。原子核の非中心衝突では、衝突関与部が楕円状になり、粒子が放射される方位角によって、QGP 中の通過距離が異なる。 S'_{loss} は、方位角に依存したエネルギー損失割合の違いを示しており、本研究で新たに導入・定義した。この値は、 S_{loss} と違って、pp 衝突のデータを用いずに算出できるため、実験の違いからくる系統誤差や cold nuclear matter 効果を考慮する必要がなく [3]、より高精度な測定につながる。測定の結果、 S'_{loss} は centrality に依存しており、反応領域の幾何学的異方性が強い周辺衝突ほど S'_{loss} が増加することがわかった。また、 S_{loss} と同様に、荷電ハドロンにおける S'_{loss} の p_{T} 依存性が金金衝突における π^0 と一致していることを確認した。さらに、 S_{loss} と S'_{loss} は異なる手法で導かれるエネルギー損失割合であるため、これら2つの値が比較可能であるか考察した。 S_{loss} を用いて表される S'_{loss} に対応する値 ($S_{\text{loss,out}} - S_{\text{loss,in}}$) と S'_{loss} の p_{T} 依存性を比較し一致していたことから、2つの値が比較可能であることを確かめた。

ここで、 S_{loss} と S'_{loss} の通過距離 (L) 依存性と衝突関与核子数 (N_{part}) 依存性、及び生成粒子多重度 ($dN/d\eta$) 依存性を測定した。 L 依存性において、エネルギー損失が L の何乗に比例するかは重要な測定値である。先行研究 [17, 18] では S_{loss} は通過距離の2乗 L^2 に比例する傾向にあることが明らかになっている。そこで、先行研究と同じ測定量 L^2 の関数で S_{loss} を、それに対応する $\Delta L^2 = \overline{L_{\text{out}}^2} - \overline{L_{\text{in}}^2}$ で S'_{loss} を評価した。 L は QGP 中の粒子密度を一樣とするモデルにより算出した。その結果、 S_{loss} は L^2 に比例することを確認した。これは、QGP 中でのエネルギー損失機構が、この p_{T} 領域においては、グルーオン放射が支配的であることを示唆している。[19] 一方、 S'_{loss} は ΔL^2 の関数として一意に示されず、 S_{loss} とは異なる傾向を示すことがわかった。 N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性において、 N_{part} では衝突関与核子の密度を考慮した値によるエネルギー損失の評価、 $dN/d\eta$

では QGP 内部のエネルギー密度を考慮した値によるエネルギー損失の評価が可能になる。測定の結果、 N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の両方において増加傾向であることがわかった。

さらに、 S_{loss} の L 依存性と N_{part} 依存性、及び $dN/d\eta$ 依存性を比較した。まず、銅金衝突と先行研究の金金衝突と銅銅衝突の π^0 では、 L の関数としてよりも、 N_{part} や $dN/d\eta$ の関数として比較すると、より一致することがわかった。また、この関数をフィットから求めると、 N_{part} では $0.3\sim 0.4$ 乗 (フィットの誤差は最大 ± 0.2)、 $dN/d\eta$ では $0.2\sim 0.3$ 乗 (フィットの誤差は最大 ± 0.2) の関数が得られた。次に、金金衝突における π^0 の S_{loss} と方位角に依存した $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の 3 つのエネルギー損失割合において、 L 依存性に比べ、 N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の方がより一致することを明らかにした。これより、方位角を考慮する場合と考慮しない場合のエネルギー損失を同時に表すことができる一つの関数を見つけることができた。また、この関数をフィットから求めると、 N_{part} では $0.2\sim 0.3$ 乗 (フィットの誤差は最大 ± 0.4)、 $dN/d\eta$ では 0.2 乗 (フィットの誤差は最大 ± 0.4) の関数が得られた。

S_{loss} の N_{part} 依存性と $dN/d\eta$ 依存性の結果を踏まえ、 S'_{loss} の依存性を測定した。まず、 ΔL^2 と同じ次元を示す $N_{\text{part,out}}^{2/3} - N_{\text{part,in}}^{2/3}$ と $|dN/d\eta|_{\text{out}}^{2/3} - |dN/d\eta|_{\text{in}}^{2/3}$ の依存性において、 ΔL^2 と同様に一意の依存性が示されなかった。これより、高 p_T 領域において S'_{loss} は L^2 の関数では示すことができないことがわかった。そこで、上記で得られた $S_{\text{loss,in}}$ と $S_{\text{loss,out}}$ の N_{part} 依存性、及び $dN/d\eta$ 依存性を表す関数の乗数パラメータ p_1 を用いて S'_{loss} の $N_{\text{part}}^{p_1} - N_{\text{part,in}}^{p_1}$ 依存性、及び $|dN/d\eta|_{\text{out}}^{p_1} - |dN/d\eta|_{\text{in}}^{p_1}$ 依存性を測定した。その結果、 S'_{loss} が正の相関を持つ関数を初めて示すことができた。この関数の物理的解釈は重要な今後の課題である。現在は理論モデルとの比較を行うために JetScape[20] 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。

関連図書

- [1] 秋葉康之 2014 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理実験室で再現する宇宙の始まり』, 共立出版.
- [2] K. Adcox *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. Lett.* **88**, 022301 (2002).
- [3] Xin-Nian Wang, *Phys. Rev. C* **61**, 064910 (2000).
- [4] A. Adare *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **93**, 024911 (2016).
- [5] K. Adcox *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3500 (2001).
- [6] Kohsuke Yagi, Tetsuo Hatsuda, Yasuo Miake, 2005 『Quark-Gluon Plasma』, Cambridge University Press.
- [7] S. S. Adler *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **71**, 034908 (2005).
- [8] A. Adare *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. D* **76**, 051106(R) (2007).
- [9] S. S. Adler *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **69**, 034910 (2004).
- [10] M. L. Miller *et al.*, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **57**, 205 (2007).
- [11] C. Aidala *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **98**, 054903 (2018).
- [12] A. Adare *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. Lett.* **101**, 232301 (2008).
- [13] A. Adare *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **87**, 034911 (2013).
- [14] P. K. Khandai, P. Shukla, and V. Singh, *Phys. Rev. C* **84**, 054904 (2011).
- [15] R. Nishitani for the PHENIX Collaboration, *Proceedings* **2019**, 10, 42 (2019).
- [16] A. Takeda for the PHENIX Collaboration, *Conf. Series* **832**, 012055 (2017).
- [17] S. S. Adler *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. C* **76**, 034904 (2007).
- [18] A. Adare *et al.* (PHENIX), *Phys. Rev. Lett.* **105**, 142301 (2010).
- [19] S. Peigne and A. V. Smilga, *Phys. Usp.* **52**, 659 (2009).
- [20] J. H. Putschke *et al.*, arXiv:1903.07706 [**nucl-th**], (2009).

謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になりました方々に紙面を借りてお礼申し上げます。はじめに、このような素晴らしい実験に携わり勉強する機会を与えて下さった、高エネルギー物理学研究室の林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生に感謝いたします。直接ご指導いただきました下村先生、蜂谷先生には、研究に関する物理知識や解析方法、研究に対する姿勢等、たくさんのご指導をいただきました。また、修士課程でありながら一人の研究者として、国際学会や研究会への参加等、多くの機会を頂きました。林井先生、宮林先生には、研究室ミーティングや研究室で多くのご助言を頂きました。学会の proceedings の作成では、先生方から丁寧なご指導を頂き、納得のいく文章を書くことができました。理化学研究所の秋葉さん、中川さん、PHENIX グループの方々には物理の考え方や解析方法のご指導をいただきました。国際教養大学の橘さん、筑波大学の新井田さんには JetScape によるシミュレーションのご指導をいただきました。大学4年生からの3年間、高エネルギー研究室に入り多くの素晴らしい経験をさせていただきました。物理解析をしたいという強い気持ちで取り組み始めた研究ですが、課題にぶつかる度に知識と経験不足を痛感し、思うように進まない研究生生活に焦りと不安を感じる事が何度もありました。そんな時、下村先生をはじめ、研究室の皆様のおかげで1つ1つ乗り越えることができました。研究室でたくさん考え、議論し、学んだことは本当に楽しく、かけがえのない思い出です。皆様のおかげで本研究を行うことができ、心から感謝致します。

付録A S_{loss} 、 S'_{loss} の測定結果

表 A.1: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	1.38e-01	2.01e-02	1.48e-02	10.69
4.58	1.49e-01	1.96e-02	1.44e-02	9.71
4.99	1.58e-01	1.94e-02	1.42e-02	8.98
5.39	1.66e-01	1.96e-02	1.40e-02	8.47
5.79	1.72e-01	2.00e-02	1.39e-02	8.08
6.24	1.78e-01	2.09e-02	1.38e-02	7.76
6.73	1.83e-01	2.23e-02	1.37e-02	7.50
7.26	1.88e-01	2.39e-02	1.37e-02	7.29
7.76	1.91e-01	2.73e-02	1.36e-02	7.14
8.26	1.94e-01	3.31e-02	1.36e-02	7.02
8.75	1.96e-01	4.28e-02	1.36e-02	6.94
9.44	1.98e-01	7.15e-02	1.36e-02	6.85

表 A.2: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	1.15e-01	2.08e-02	1.54e-02	13.41
4.58	1.25e-01	2.03e-02	1.50e-02	12.02
4.99	1.34e-01	2.02e-02	1.47e-02	10.98
5.39	1.41e-01	2.03e-02	1.45e-02	10.26
5.79	1.48e-01	2.08e-02	1.43e-02	9.70
6.24	1.54e-01	2.17e-02	1.42e-02	9.25
6.73	1.59e-01	2.34e-02	1.41e-02	8.88
7.26	1.64e-01	2.51e-02	1.40e-02	8.58
7.76	1.67e-01	2.91e-02	1.41e-02	8.42
8.26	1.70e-01	3.67e-02	1.41e-02	8.31
8.75	1.72e-01	5.00e-02	1.41e-02	8.23
9.44	1.74e-01	9.12e-02	1.42e-02	8.17

表 A.3: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	9.48e-02	2.20e-02	1.62e-02	17.10
4.58	1.03e-01	2.16e-02	1.59e-02	15.50
4.99	1.10e-01	2.16e-02	1.57e-02	14.34
5.39	1.15e-01	2.20e-02	1.56e-02	13.58
5.79	1.19e-01	2.27e-02	1.55e-02	13.03
6.24	1.23e-01	2.38e-02	1.55e-02	12.60
6.73	1.25e-01	2.59e-02	1.54e-02	12.30
7.26	1.27e-01	2.78e-02	1.54e-02	12.09
7.76	1.28e-01	3.32e-02	1.54e-02	11.99
8.26	1.29e-01	4.33e-02	1.54e-02	11.95
8.75	1.29e-01	6.18e-02	1.54e-02	12.00
9.44	1.28e-01	1.26e-01	1.55e-02	12.15

表 A.4: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	7.20e-02	2.31e-02	1.70e-02	23.58
4.58	7.86e-02	2.28e-02	1.67e-02	21.26
4.99	8.43e-02	2.29e-02	1.66e-02	19.64
5.39	8.86e-02	2.34e-02	1.65e-02	18.62
5.79	9.18e-02	2.43e-02	1.65e-02	17.93
6.24	9.43e-02	2.54e-02	1.65e-02	17.46
6.73	9.60e-02	2.88e-02	1.65e-02	17.20
7.26	9.68e-02	3.11e-02	1.66e-02	17.11
7.76	9.69e-02	3.92e-02	1.66e-02	17.16
8.26	9.64e-02	5.54e-02	1.67e-02	17.33
8.75	9.54e-02	8.73e-02	1.68e-02	17.58
9.44	9.35e-02	2.45e-01	1.69e-02	18.11

表 A.5: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	5.71e-02	2.36e-02	1.73e-02	30.34
4.58	6.38e-02	2.33e-02	1.70e-02	26.63
4.99	6.99e-02	2.35e-02	1.68e-02	24.03
5.39	7.46e-02	2.39e-02	1.67e-02	22.37
5.79	7.84e-02	2.57e-02	1.66e-02	21.21
6.24	8.16e-02	2.65e-02	1.66e-02	20.38
6.73	8.40e-02	3.03e-02	1.69e-02	20.09
7.26	8.56e-02	3.48e-02	1.72e-02	20.12
7.76	8.63e-02	4.87e-02	1.75e-02	20.33
8.26	8.64e-02	7.85e-02	1.79e-02	20.68
8.75	8.61e-02	1.47e-01	1.82e-02	21.13
9.44	8.50e-02	1.04e-01	1.86e-02	21.93

表 A.6: $h^\pm S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.19	4.58e-02	2.47e-02	1.80e-02	39.37
4.58	5.03e-02	2.50e-02	1.79e-02	35.52
4.99	5.35e-02	2.55e-02	1.78e-02	33.22
5.39	5.52e-02	2.70e-02	1.77e-02	32.09
5.79	5.58e-02	2.93e-02	1.77e-02	31.68
6.24	5.55e-02	3.32e-02	1.79e-02	32.26
6.73	5.42e-02	4.48e-02	1.82e-02	33.51
7.26	5.19e-02	4.34e-02	1.84e-02	35.53
7.76	4.91e-02	6.62e-02	1.87e-02	38.09
8.26	4.59e-02	1.20e-01	1.90e-02	41.40
8.75	4.24e-02	3.20e-01	1.92e-02	45.42
9.44	3.70e-02	1.26e-01	1.96e-02	53.08

表 A.7: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.35e-01	1.73e-03	2.04e-02	15.17
4.73	1.40e-01	2.03e-03	2.04e-02	14.64
5.23	1.43e-01	2.26e-03	2.05e-02	14.38
5.74	1.46e-01	3.03e-03	2.06e-02	14.10
6.24	1.48e-01	3.26e-03	2.08e-02	14.10
6.74	1.49e-01	5.31e-03	2.10e-02	14.08
7.24	1.53e-01	3.96e-03	2.10e-02	13.74
7.74	1.56e-01	5.51e-03	2.11e-02	13.57
8.24	1.57e-01	3.85e-03	2.15e-02	13.70
8.74	1.62e-01	8.85e-03	2.18e-02	13.51
9.24	1.59e-01	6.50e-03	2.24e-02	14.06

表 A.8: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.35e-01	1.73e-03	2.04e-02	15.17
4.73	1.40e-01	2.03e-03	2.04e-02	14.64
5.23	1.43e-01	2.26e-03	2.05e-02	14.38
5.74	1.46e-01	3.03e-03	2.06e-02	14.10
6.24	1.48e-01	3.26e-03	2.08e-02	14.10
6.74	1.49e-01	5.31e-03	2.10e-02	14.08
7.24	1.53e-01	3.96e-03	2.10e-02	13.74
7.74	1.56e-01	5.51e-03	2.11e-02	13.57
8.24	1.57e-01	3.85e-03	2.15e-02	13.70
8.74	1.62e-01	8.85e-03	2.18e-02	13.51
9.24	1.59e-01	6.50e-03	2.24e-02	14.06

表 A.9: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.08e-01	2.04e-03	2.10e-02	19.51
4.73	1.12e-01	2.34e-03	2.10e-02	18.81
5.23	1.14e-01	2.83e-03	2.11e-02	18.45
5.74	1.18e-01	3.53e-03	2.13e-02	18.03
6.24	1.19e-01	3.82e-03	2.15e-02	18.05
6.74	1.20e-01	6.07e-03	2.17e-02	18.03
7.24	1.24e-01	4.92e-03	2.18e-02	17.51
7.74	1.27e-01	6.77e-03	2.19e-02	17.26
8.24	1.28e-01	4.87e-03	2.21e-02	17.25
8.74	1.33e-01	1.04e-02	2.22e-02	16.66
9.24	1.31e-01	8.20e-03	2.24e-02	17.16

表 A.10: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	8.70e-02	2.36e-03	2.17e-02	24.96
4.73	8.99e-02	2.85e-03	2.18e-02	24.30
5.23	9.16e-02	3.76e-03	2.22e-02	24.22
5.74	9.37e-02	4.55e-03	2.25e-02	24.04
6.24	9.35e-02	5.06e-03	2.30e-02	24.58
6.74	9.35e-02	7.88e-03	2.34e-02	25.02
7.24	9.67e-02	7.27e-03	2.37e-02	24.49
7.74	9.83e-02	8.68e-03	2.40e-02	24.41
8.24	9.84e-02	7.11e-03	2.44e-02	24.75
8.74	1.03e-01	1.38e-02	2.46e-02	23.93
9.24	9.92e-02	1.25e-02	2.50e-02	25.20

表 A.11: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	6.55e-02	3.06e-03	2.34e-02	35.69
4.73	6.81e-02	3.91e-03	2.34e-02	34.36
5.23	6.95e-02	5.12e-03	2.34e-02	33.61
5.74	7.16e-02	5.56e-03	2.33e-02	32.49
6.24	7.13e-02	7.54e-03	2.32e-02	32.58
6.74	7.13e-02	1.01e-02	2.32e-02	32.51
7.24	7.46e-02	8.33e-03	2.33e-02	31.25
7.74	7.62e-02	1.25e-02	2.39e-02	31.39
8.24	7.63e-02	1.04e-02	2.46e-02	32.19
8.74	8.07e-02	1.78e-02	2.50e-02	31.02
9.24	7.71e-02	1.55e-02	2.57e-02	33.37

表 A.12: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	3.73e-02	4.32e-03	2.39e-02	63.94
4.73	3.81e-02	5.21e-03	2.40e-02	62.99
5.23	3.88e-02	7.21e-03	2.43e-02	62.58
5.74	4.09e-02	7.94e-03	2.46e-02	60.08
6.24	4.09e-02	1.15e-02	2.49e-02	60.99
6.74	4.15e-02	1.48e-02	2.53e-02	61.04
7.24	4.55e-02	1.60e-02	2.56e-02	56.18
7.74	4.79e-02	2.09e-02	2.65e-02	55.37
8.24	4.87e-02	1.45e-02	2.78e-02	57.16
8.74	5.38e-02	2.26e-02	2.89e-02	53.69
9.24	5.08e-02	3.68e-02	3.03e-02	59.61

表 A.13: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	2.10e-01	1.01e-03	1.44e-02	6.87
6.74	2.08e-01	2.15e-03	1.51e-02	7.30
7.24	2.09e-01	1.65e-03	1.55e-02	7.40
7.74	2.09e-01	2.13e-03	1.55e-02	7.40
8.24	2.08e-01	2.42e-03	1.54e-02	7.39
8.74	2.10e-01	4.36e-03	1.52e-02	7.25
9.24	2.05e-01	4.50e-03	1.53e-02	7.49
9.74	1.97e-01	1.04e-02	1.56e-02	7.92
10.88	2.02e-01	6.04e-03	1.67e-02	8.27
12.90	1.92e-01	1.20e-02	2.03e-02	10.57
14.91	1.56e-01	2.13e-02	2.58e-02	16.54
16.92	1.43e-01	2.97e-02	3.20e-02	22.47
18.93	1.49e-01	3.20e-02	3.72e-02	24.96

表 A.14: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	1.69e-01	1.13e-03	1.49e-02	8.83
6.74	1.70e-01	2.37e-03	1.55e-02	9.15
7.24	1.73e-01	1.73e-03	1.57e-02	9.08
7.74	1.74e-01	2.34e-03	1.57e-02	9.06
8.24	1.72e-01	2.54e-03	1.58e-02	9.19
8.74	1.74e-01	4.93e-03	1.59e-02	9.18
9.24	1.67e-01	4.56e-03	1.63e-02	9.76
9.74	1.59e-01	1.04e-02	1.69e-02	10.60
10.88	1.65e-01	6.62e-03	1.81e-02	10.99
12.90	1.59e-01	1.22e-02	2.11e-02	13.28
14.91	1.27e-01	2.40e-02	2.54e-02	19.93
16.92	1.18e-01	3.49e-02	3.01e-02	25.54
18.93	1.28e-01	3.49e-02	3.37e-02	26.35

表 A.15: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	1.36e-01	1.25e-03	1.57e-02	11.57
6.74	1.37e-01	2.46e-03	1.61e-02	11.72
7.24	1.41e-01	1.98e-03	1.61e-02	11.43
7.74	1.42e-01	2.66e-03	1.61e-02	11.31
8.24	1.41e-01	2.69e-03	1.62e-02	11.44
8.74	1.43e-01	5.32e-03	1.63e-02	11.34
9.24	1.37e-01	4.96e-03	1.67e-02	12.12
9.74	1.30e-01	1.12e-02	1.72e-02	13.29
10.88	1.36e-01	6.86e-03	1.86e-02	13.70
12.90	1.29e-01	1.29e-02	2.23e-02	17.22
14.91	9.60e-02	2.59e-02	2.78e-02	28.99
16.92	8.50e-02	3.58e-02	3.32e-02	39.05
18.93	9.40e-02	4.07e-02	3.72e-02	39.57

表 A.16: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	1.08e-01	1.43e-03	1.64e-02	15.22
6.74	1.08e-01	2.72e-03	1.61e-02	14.89
7.24	1.11e-01	2.26e-03	1.61e-02	14.55
7.74	1.11e-01	3.02e-03	1.62e-02	14.57
8.24	1.09e-01	3.06e-03	1.64e-02	14.97
8.74	1.12e-01	5.90e-03	1.66e-02	14.85
9.24	1.06e-01	5.55e-03	1.80e-02	16.93
9.74	9.94e-02	1.19e-02	1.96e-02	19.74
10.88	1.09e-01	7.34e-03	2.26e-02	20.83
12.90	1.08e-01	1.37e-02	2.87e-02	26.61
14.91	7.98e-02	2.98e-02	3.63e-02	45.48
16.92	7.31e-02	4.13e-02	4.24e-02	58.05
18.93	8.56e-02	4.95e-02	4.66e-02	54.41

表 A.17: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	7.77e-02	1.69e-03	1.73e-02	22.24
6.74	7.62e-02	3.17e-03	1.74e-02	22.86
7.24	7.78e-02	2.63e-03	1.76e-02	22.57
7.74	7.77e-02	3.50e-03	1.77e-02	22.83
8.24	7.61e-02	3.75e-03	1.79e-02	23.56
8.74	7.91e-02	6.73e-03	1.80e-02	22.79
9.24	7.43e-02	6.55e-03	1.83e-02	24.59
9.74	6.84e-02	1.35e-02	1.85e-02	27.13
10.88	7.99e-02	8.29e-03	1.92e-02	24.05
12.90	8.28e-02	1.55e-02	2.22e-02	26.77
14.91	5.80e-02	5.72e-02	2.63e-02	45.32
16.92	5.42e-02	5.13e-02	3.01e-02	55.55
18.93	6.92e-02	8.78e-02	3.30e-02	47.63

表 A.18: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
6.24	4.76e-02	2.12e-03	1.97e-02	41.43
6.74	4.58e-02	4.02e-03	1.94e-02	42.36
7.24	4.80e-02	3.04e-03	1.87e-02	38.89
7.74	4.90e-02	4.04e-03	1.80e-02	36.81
8.24	4.87e-02	5.30e-03	1.82e-02	37.44
8.74	5.32e-02	8.06e-03	1.89e-02	35.62
9.24	4.97e-02	8.45e-03	1.98e-02	39.94
9.74	4.51e-02	1.58e-02	2.08e-02	46.08
10.88	5.91e-02	1.05e-02	2.22e-02	37.48
12.90	6.57e-02	2.07e-02	2.50e-02	38.11
14.91	4.38e-02	3.93e-02	2.88e-02	65.71
16.92	4.23e-02	5.87e-02	3.20e-02	75.72
18.93	5.91e-02	7.55e-02	3.43e-02	58.12

表 A.19: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Cu+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.43e-01	1.65e-03	1.55e-02	10.86
4.73	1.41e-01	1.76e-03	1.56e-02	11.11
5.23	1.38e-01	1.42e-03	1.57e-02	11.38
5.74	1.37e-01	1.76e-03	1.58e-02	11.48
6.24	1.35e-01	2.64e-03	1.58e-02	11.71
6.74	1.34e-01	3.85e-03	1.59e-02	11.86
7.24	1.36e-01	2.02e-03	1.59e-02	11.66
7.74	1.37e-01	3.08e-03	1.60e-02	11.63
8.24	1.37e-01	3.00e-03	1.61e-02	11.81
8.74	1.40e-01	6.71e-03	1.64e-02	11.70
9.24	1.35e-01	3.89e-03	1.69e-02	12.51
9.74	1.28e-01	8.57e-03	1.76e-02	13.69
10.88	1.35e-01	9.78e-03	1.86e-02	13.79
12.90	1.29e-01	1.32e-02	2.05e-02	15.90
14.91	9.54e-02	2.82e-02	2.32e-02	24.31
16.92	8.32e-02	4.18e-02	2.62e-02	31.54
18.93	9.08e-02	4.27e-02	2.88e-02	31.69

表 A.20: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Cu+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.14e-01	1.76e-03	1.58e-02	13.81
4.73	1.14e-01	1.57e-03	1.59e-02	13.92
5.23	1.13e-01	1.62e-03	1.60e-02	14.09
5.74	1.14e-01	2.21e-03	1.60e-02	14.05
6.24	1.13e-01	2.31e-03	1.61e-02	14.23
6.74	1.13e-01	3.57e-03	1.61e-02	14.29
7.24	1.16e-01	2.49e-03	1.62e-02	13.95
7.74	1.17e-01	3.48e-03	1.64e-02	13.99
8.24	1.16e-01	3.22e-03	1.68e-02	14.51
8.74	1.18e-01	6.71e-03	1.71e-02	14.57
9.24	1.11e-01	4.18e-03	1.77e-02	15.85
9.74	1.04e-01	9.71e-03	1.82e-02	17.49
10.88	1.11e-01	8.83e-03	1.89e-02	17.01
12.90	1.07e-01	1.17e-02	2.08e-02	19.46
14.91	7.34e-02	3.28e-02	2.36e-02	32.15
16.92	6.12e-02	4.82e-02	2.67e-02	43.52
18.93	6.94e-02	4.94e-02	2.92e-02	42.13

表 A.21: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-20% in Cu+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	1.33e-01	1.33e-03	1.55e-02	11.70
4.73	1.31e-01	1.54e-03	1.56e-02	11.96
5.23	1.29e-01	1.12e-03	1.58e-02	12.26
5.74	1.28e-01	1.52e-03	1.59e-02	12.37
6.24	1.27e-01	2.46e-03	1.60e-02	12.63
6.74	1.26e-01	3.73e-03	1.61e-02	12.76
7.24	1.29e-01	1.73e-03	1.62e-02	12.57
7.74	1.30e-01	2.69e-03	1.63e-02	12.53
8.24	1.30e-01	2.69e-03	1.64e-02	12.68
8.74	1.32e-01	6.20e-03	1.69e-02	12.76
9.24	1.26e-01	3.74e-03	1.75e-02	13.89
9.74	1.19e-01	8.57e-03	1.81e-02	15.25
10.88	1.26e-01	9.17e-03	1.88e-02	14.96
12.90	1.21e-01	1.29e-02	2.06e-02	17.00
14.91	8.75e-02	2.55e-02	2.33e-02	26.63
16.92	7.53e-02	3.24e-02	2.64e-02	34.99
18.93	8.31e-02	3.68e-02	2.89e-02	34.78

表 A.22: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-40% in Cu+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	7.92e-02	1.64e-03	1.64e-02	20.69
4.73	7.87e-02	1.90e-03	1.64e-02	20.90
5.23	7.78e-02	1.44e-03	1.65e-02	21.21
5.74	7.85e-02	1.82e-03	1.65e-02	21.03
6.24	7.78e-02	2.82e-03	1.67e-02	21.45
6.74	7.80e-02	4.17e-03	1.70e-02	21.78
7.24	8.10e-02	2.15e-03	1.71e-02	21.14
7.74	8.13e-02	3.21e-03	1.73e-02	21.29
8.24	7.91e-02	3.18e-03	1.77e-02	22.34
8.74	8.11e-02	6.76e-03	1.80e-02	22.17
9.24	7.50e-02	4.23e-03	1.85e-02	24.62
9.74	6.76e-02	9.46e-03	1.90e-02	28.04
10.88	7.62e-02	1.02e-02	1.98e-02	25.93
12.90	7.25e-02	1.42e-02	2.17e-02	29.92
14.91	3.84e-02	2.80e-02	2.45e-02	63.88
16.92	2.65e-02	3.61e-02	2.77e-02	104.45
18.93	3.55e-02	4.09e-02	3.03e-02	85.52

表 A.23: $\pi^0 S_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-60% in Cu+Au

p_T (GeV/c)	S_{loss} (GeV ⁻² c ²)	stat. err.	sys. err.	%
4.23	2.63e-02	2.14e-03	1.69e-02	64.18
4.73	2.61e-02	2.38e-03	1.70e-02	65.32
5.23	2.52e-02	1.90e-03	1.75e-02	69.57
5.74	2.59e-02	2.39e-03	1.78e-02	68.78
6.24	2.45e-02	3.55e-03	1.79e-02	72.91
6.74	2.39e-02	5.10e-03	1.78e-02	74.70
7.24	2.68e-02	3.08e-03	1.78e-02	66.19
7.74	2.80e-02	4.17e-03	1.78e-02	63.75
8.24	2.73e-02	4.07e-03	1.81e-02	66.37
8.74	3.09e-02	7.80e-03	1.84e-02	59.47
9.24	2.60e-02	5.28e-03	1.89e-02	72.91
9.74	1.96e-02	1.12e-02	1.95e-02	99.97
10.88	3.07e-02	1.21e-02	2.05e-02	66.89
12.90	3.05e-02	1.69e-02	2.25e-02	73.63
14.91	-7.54e-04	3.44e-02	2.52e-02	-3346.34
16.92	-9.78e-03	4.73e-02	2.83e-02	-289.31
18.93	1.99e-03	5.19e-02	3.09e-02	1548.29

表 A.24: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	3.79e-02	2.06e-03	7.71e-03	20.32
4.60	3.53e-02	7.26e-04	7.52e-03	21.27
5.00	3.29e-02	1.31e-03	7.25e-03	22.06
5.40	3.06e-02	1.95e-03	7.01e-03	22.86
5.80	2.87e-02	1.53e-03	6.84e-03	23.85
6.25	2.68e-02	2.19e-03	6.80e-03	25.37
6.75	2.51e-02	4.76e-03	6.94e-03	27.64
7.50	2.33e-02	3.51e-03	7.45e-03	32.03

表 A.25: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	7.36e-02	4.96e-03	7.49e-03	10.17
4.60	6.90e-02	8.78e-04	7.33e-03	10.63
5.00	6.47e-02	2.10e-03	7.21e-03	11.14
5.40	6.09e-02	3.31e-03	7.20e-03	11.83
5.80	5.76e-02	3.17e-03	7.40e-03	12.86
6.25	5.44e-02	3.54e-03	7.92e-03	14.57
6.75	5.15e-02	7.07e-03	8.88e-03	17.26
7.50	4.83e-02	7.76e-03	1.09e-02	22.63

表 A.26: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	1.11e-01	5.88e-04	1.21e-02	10.85
4.60	1.05e-01	1.45e-03	1.24e-02	11.83
5.00	9.86e-02	2.30e-03	1.26e-02	12.76
5.40	9.32e-02	4.13e-03	1.26e-02	13.52
5.80	8.82e-02	5.66e-03	1.24e-02	14.02
6.25	8.32e-02	3.52e-03	1.19e-02	14.26
6.75	7.82e-02	9.62e-03	1.11e-02	14.14
7.50	7.17e-02	1.00e-02	9.52e-03	13.27

表 A.27: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	1.11e-01	5.88e-04	1.21e-02	10.85
4.60	1.05e-01	1.45e-03	1.24e-02	11.83
5.00	9.86e-02	2.30e-03	1.26e-02	12.76
5.40	9.32e-02	4.13e-03	1.26e-02	13.52
5.80	8.82e-02	5.66e-03	1.24e-02	14.02
6.25	8.32e-02	3.52e-03	1.19e-02	14.26
6.75	7.82e-02	9.62e-03	1.11e-02	14.14
7.50	7.17e-02	1.00e-02	9.52e-03	13.27

表 A.28: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	1.16e-01	1.51e-03	1.06e-02	9.17
4.60	1.09e-01	2.57e-03	1.03e-02	9.52
5.00	1.03e-01	3.34e-03	1.02e-02	9.97
5.40	9.78e-02	3.75e-03	1.03e-02	10.52
5.80	9.39e-02	8.18e-03	1.05e-02	11.20
6.25	9.04e-02	5.12e-03	1.10e-02	12.12
6.75	8.75e-02	1.00e-02	1.17e-02	13.35
7.50	8.45e-02	1.90e-02	1.32e-02	15.60

表 A.29: $h^\pm S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.20	1.21e-01	1.46e-03	1.33e-02	10.98
4.60	1.17e-01	3.54e-03	1.21e-02	10.39
5.00	1.13e-01	3.76e-03	1.15e-02	10.15
5.40	1.10e-01	5.40e-03	1.15e-02	10.42
5.80	1.08e-01	6.79e-03	1.14e-02	10.56
6.25	1.06e-01	8.95e-03	1.11e-02	10.53
6.75	1.04e-01	2.31e-02	1.13e-02	10.91
7.50	1.01e-01	1.48e-02	1.21e-02	11.96

表 A.30: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	3.46e-02	1.01e-04	5.06e-03	14.62
4.75	3.17e-02	1.56e-04	4.68e-03	14.74
5.25	2.92e-02	8.90e-04	4.37e-03	14.98
5.75	2.71e-02	2.23e-04	4.14e-03	15.28
6.25	2.56e-02	2.40e-04	4.06e-03	15.89
6.75	2.44e-02	1.48e-04	4.08e-03	16.69
7.25	2.36e-02	8.95e-04	4.03e-03	17.04
7.75	2.31e-02	2.04e-03	3.96e-03	17.14
8.50	2.26e-02	2.87e-03	4.06e-03	17.99
9.50	2.22e-02	3.14e-03	4.22e-03	19.00
11.00	2.20e-02	1.64e-04	4.97e-03	22.54

表 A.31: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	6.30e-02	2.83e-04	4.11e-03	6.53
4.75	5.76e-02	5.67e-04	4.08e-03	7.10
5.25	5.31e-02	9.50e-04	3.86e-03	7.26
5.75	4.96e-02	6.63e-05	3.42e-03	6.90
6.25	4.72e-02	2.01e-04	3.13e-03	6.64
6.75	4.55e-02	1.12e-03	3.49e-03	7.67
7.25	4.43e-02	1.19e-03	3.92e-03	8.84
7.75	4.36e-02	2.62e-03	4.42e-03	10.14
8.50	4.29e-02	9.98e-04	5.04e-03	11.76
9.50	4.25e-02	1.76e-03	5.60e-03	13.20

表 A.32: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	8.38e-02	4.96e-04	5.30e-03	6.32
4.75	7.63e-02	6.49e-04	5.23e-03	6.85
5.25	6.98e-02	1.35e-03	4.96e-03	7.11
5.75	6.43e-02	2.28e-04	4.49e-03	6.98
6.25	5.97e-02	1.94e-04	3.91e-03	6.55
6.75	5.58e-02	1.03e-03	3.52e-03	6.30
7.25	5.26e-02	1.57e-03	3.62e-03	6.89
7.75	4.97e-02	3.16e-03	3.66e-03	7.36
8.50	4.59e-02	4.04e-04	3.59e-03	7.82
9.50	4.13e-02	2.03e-03	3.19e-03	7.72

表 A.33: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	9.29e-02	6.76e-04	6.16e-03	6.63
4.75	8.66e-02	6.16e-04	5.64e-03	6.51
5.25	8.14e-02	1.62e-03	5.17e-03	6.35
5.75	7.70e-02	8.40e-04	5.17e-03	6.71
6.25	7.33e-02	1.15e-03	5.13e-03	7.00
6.75	7.00e-02	2.38e-03	4.96e-03	7.09
7.25	6.71e-02	3.06e-03	4.65e-03	6.92
7.75	6.47e-02	2.29e-03	4.21e-03	6.51
8.50	6.15e-02	5.05e-04	3.82e-03	6.21
9.50	5.83e-02	4.76e-03	4.58e-03	7.85

表 A.34: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	9.85e-02	5.59e-04	6.42e-03	6.52
4.75	9.07e-02	1.08e-03	6.33e-03	6.98
5.25	8.39e-02	2.18e-03	6.19e-03	7.38
5.75	7.84e-02	4.30e-04	5.93e-03	7.57
6.25	7.40e-02	2.17e-03	5.48e-03	7.40
6.75	7.06e-02	1.92e-03	4.85e-03	6.87
7.25	6.79e-02	7.86e-04	4.90e-03	7.22
7.75	6.58e-02	4.72e-03	5.01e-03	7.60
8.50	6.36e-02	1.13e-03	5.39e-03	8.47
9.50	6.17e-02	2.81e-03	5.95e-03	9.64

表 A.35: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au(2004)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
4.25	1.01e-01	8.55e-04	1.13e-02	11.22
4.75	9.80e-02	1.38e-03	1.05e-02	10.72
5.25	9.62e-02	2.71e-03	1.10e-02	11.43
5.75	9.47e-02	8.92e-04	1.13e-02	11.96
6.25	9.33e-02	2.55e-03	1.12e-02	12.05
6.75	9.17e-02	1.84e-03	1.08e-02	11.74
7.25	8.97e-02	3.91e-03	1.01e-02	11.23
7.75	8.76e-02	7.87e-03	1.05e-02	12.00
8.50	8.42e-02	1.25e-03	1.23e-02	14.62

表 A.36: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 0-10% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	3.11e-02	9.33e-04	4.65e-03	14.94
5.75	2.85e-02	4.15e-04	4.13e-03	14.52
6.25	2.68e-02	3.27e-05	3.82e-03	14.25
6.75	2.59e-02	4.48e-04	3.88e-03	14.96
7.25	2.54e-02	1.37e-04	4.01e-03	15.78
7.75	2.51e-02	4.84e-04	4.15e-03	16.52
8.25	2.50e-02	9.44e-05	4.32e-03	17.31
8.75	2.48e-02	8.79e-04	4.51e-03	18.15
9.25	2.47e-02	9.04e-05	4.67e-03	18.87
9.75	2.46e-02	7.42e-04	4.78e-03	19.43

表 A.37: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 10-20% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	5.29e-02	1.39e-03	4.10e-03	7.76
5.75	4.99e-02	4.22e-04	3.32e-03	6.65
6.25	4.84e-02	8.00e-05	3.01e-03	6.21
6.75	4.77e-02	3.68e-04	3.59e-03	7.53
7.25	4.73e-02	8.70e-05	4.17e-03	8.83
7.75	4.70e-02	4.94e-04	4.72e-03	10.05
8.25	4.67e-02	2.98e-04	5.36e-03	11.47
8.75	4.64e-02	9.85e-04	5.87e-03	12.64
9.25	4.61e-02	3.16e-04	6.24e-03	13.53
9.75	4.58e-02	6.74e-04	6.50e-03	14.19

表 A.38: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 20-30% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	6.91e-02	1.55e-03	5.27e-03	7.61
5.75	6.38e-02	2.66e-04	4.33e-03	6.79
6.25	6.02e-02	5.64e-05	3.77e-03	6.27
6.75	5.76e-02	3.17e-04	3.76e-03	6.52
7.25	5.54e-02	6.08e-05	3.89e-03	7.03
7.75	5.33e-02	3.76e-04	3.90e-03	7.33
8.25	5.11e-02	6.34e-05	3.94e-03	7.70
8.75	4.89e-02	6.40e-04	3.90e-03	7.97
9.25	4.66e-02	9.03e-05	3.72e-03	7.98
9.75	4.43e-02	5.87e-04	3.42e-03	7.71

表 A.39: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 30-40% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	7.92e-02	2.35e-03	6.90e-03	8.72
5.75	7.59e-02	3.97e-04	5.98e-03	7.88
6.25	7.33e-02	6.84e-05	5.11e-03	6.97
6.75	7.10e-02	4.21e-04	4.88e-03	6.87
7.25	6.87e-02	1.27e-04	4.69e-03	6.83
7.75	6.63e-02	6.07e-04	4.41e-03	6.65
8.25	6.39e-02	2.51e-04	4.63e-03	7.24
8.75	6.17e-02	7.86e-04	4.88e-03	7.90
9.25	5.97e-02	3.61e-04	5.49e-03	9.18
9.75	5.80e-02	1.07e-03	6.08e-03	10.49

表 A.40: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 40-50% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	8.34e-02	4.24e-03	6.63e-03	7.94
5.75	7.91e-02	5.42e-04	5.66e-03	7.15
6.25	7.57e-02	9.12e-06	4.97e-03	6.57
6.75	7.29e-02	6.48e-04	4.65e-03	6.37
7.25	7.06e-02	2.04e-04	5.07e-03	7.19
7.75	6.87e-02	8.74e-04	5.57e-03	8.11
8.25	6.71e-02	3.31e-04	6.09e-03	9.08
8.75	6.59e-02	1.47e-03	6.57e-03	9.98
9.25	6.49e-02	5.85e-04	6.99e-03	10.77
9.75	6.40e-02	1.82e-03	7.34e-03	11.46

表 A.41: $\pi^0 S'_{\text{loss}}$ vs. p_T for centrality 50-60% in Au+Au(2007)

p_T (GeV/c)	S'_{loss}	stat. err.	sys. err.	%
5.25	1.00e-01	6.96e-03	1.89e-02	18.85
5.75	9.83e-02	2.50e-03	1.29e-02	13.09
6.25	9.62e-02	6.16e-04	1.14e-02	11.86
6.75	9.37e-02	1.23e-03	1.05e-02	11.16
7.25	9.08e-02	1.66e-03	9.93e-03	10.94
7.75	8.77e-02	3.83e-03	1.11e-02	12.70
8.25	8.45e-02	3.18e-03	1.25e-02	14.76
8.75	8.14e-02	4.69e-03	1.38e-02	16.93
9.25	7.84e-02	3.17e-03	1.49e-02	19.05
9.75	7.56e-02	4.74e-03	1.58e-02	20.95

付録B S_{loss} の系統誤差と統計誤差

B.1 系統誤差

S_{loss} の系統誤差は、データの系統誤差の伝播によって定義した。系統誤差伝播は次の4つの手順で行った。

step 1 pp 衝突と AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播

step 2 フィット関数から抜き出す点に最も近いデータ点の系統誤差の選択

step 3 4つの S_{loss} の計算

step 4 系統誤差の決定

step 1 では、系統誤差の伝播を行った。pp 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播の式は、

$$\text{stat.err.}(pp, \text{誤差伝播後}) = \text{stat.err.}(pp) \times p_T \times \langle N_{\text{coll}} \rangle \quad (\text{B.1})$$

AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播の式は、

$$\text{stat.err.}(AA, \text{誤差伝播後}) = \text{stat.err.}(AA) \times p_T \quad (\text{B.2})$$

step2 では、フィット関数から用いる点に最も近いデータ点の系統誤差を選択した。

step3 では、pp 衝突のスペクトラと AA 衝突のスペクトラの系統誤差をそれぞれ考慮することで得られる S_{loss} 値を計算した。2つのスペクトラにはそれぞれ伝播させた誤差があるため、この誤差により S_{loss} がどれくらい元の値とズレるかを系統誤差として考慮しなければならない。pp 衝突と AA 衝突の系統誤差を別々に伝播させることによって得られる値は4つで、 $S_{\text{loss,I}}$ と $S_{\text{loss,II}}$ は pp 衝突、 $S_{\text{loss,III}}$ と $S_{\text{loss,IV}}$ は AA 衝突の誤差を考慮した値である。各値の計算方法のイメージ図を図 B.1 に示した。計算式は、

$$\begin{aligned} \text{I. } S_{\text{loss,I}}(\text{spectra}_{\text{pp}} + \text{stat.err.}(\text{spectra}_{\text{pp}}), \text{spectra}_{\text{AA}}), S_{\text{loss,I}} &= \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,max}}}{p_T^{\text{pp}}} \\ \text{II. } S_{\text{loss,II}}(\text{spectra}_{\text{pp}} - \text{stat.err.}(\text{spectra}_{\text{pp}}), \text{spectra}_{\text{AA}}), S_{\text{loss,II}} &= \frac{p_T^{\text{pp}} - p_T^{\text{AA,min}}}{p_T^{\text{pp}}} \\ \text{III. } S_{\text{loss,III}}(\text{spectra}_{\text{pp}}, \text{spectra}_{\text{AA}} + \text{stat.err.}(\text{spectra}_{\text{AA}})), S_{\text{loss,III}} &= \frac{p_T^{\text{pp,max}} - p_T^{\text{AA}}}{p_T^{\text{pp}}} \\ \text{IV. } S_{\text{loss,IV}}(\text{spectra}_{\text{pp}}, \text{spectra}_{\text{AA}} - \text{stat.err.}(\text{spectra}_{\text{AA}})), S_{\text{loss,IV}} &= \frac{p_T^{\text{pp,min}} - p_T^{\text{AA}}}{p_T^{\text{pp}}} \end{aligned}$$

word	description
$spectra_{pp}$	spectra in p+p collisions
$spectra_{AA}$	spectra in A+A collisions
$stat.err.(pp)$	statistic error of spectra in p+p collisions
$stat.err.(AA)$	statistic error of spectra in A+A collisions
F_{pp}	Fit function of p+p collisions
F_{AA}	Fit function of A+A collisions
$p_T^{AA,max}$	The p_T of the extracted point from F_{AA} at the same spectra value as the point $(p_T^{pp}, spectra_{pp} + stat.err.(pp))$ on $spectra_{pp}$
$p_T^{AA,min}$	The p_T of the extracted point from F_{AA} at the same spectra value as the point $(p_T^{pp}, spectra_{pp} - stat.err.(pp))$ on $spectra_{pp}$
$p_T^{pp,max}$	The p_T of the extracted point from F_{pp} at the same spectra value as the point $(p_T^{AA}, spectra_{pp} + stat.err.(AA))$ on $spectra_{AA}$
$p_T^{pp,min}$	The p_T of the extracted point from F_{pp} at the same spectra value as the point $(p_T^{AA}, spectra_{pp} - stat.err.(AA))$ on $spectra_{AA}$

表 B.1: 図 B.1 における表記の説明。

である。上式及び図 B.1 における値の表記の説明は表 B.1 の通りである。また、図 B.2 は、centrality ごとに計算した $S_{loss,I}$ 、 $S_{loss,II}$ 、 $S_{loss,III}$ 、及び $S_{loss,IV}$ の p_T 依存である。

step 4 では、step 3 計算値と第??節で計算した S_{loss} との差 ($|S_{loss,I} - S_{loss}|$ 、 $|S_{loss,II} - S_{loss}|$ 、 $|S_{loss,III} - S_{loss}|$ 、及び $|S_{loss,IV} - S_{loss}|$) を計算し、pp 衝突と AA 衝突のそれぞれで S_{loss} とのズレが大きい方の二乗和平方根を S_{loss} の系統誤差とした。二乗和平方根は、

$$stat.err. = \sqrt{(|S_{loss} - S_{loss,I}| \text{ or } |S_{loss} - S_{loss,II}|)^2 + (|S_{loss} - S_{loss,III}| \text{ or } |S_{loss} - S_{loss,IV}|)^2} \quad (B.3)$$

のように計算した。

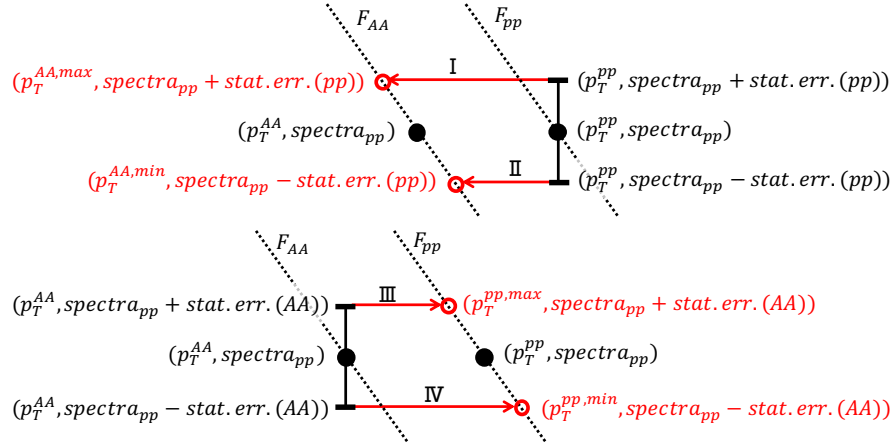
B.2 統計誤差

統計誤差は、 S_{loss} 計算の最初の手順 (第??節) において、データの統計誤差を考慮した pp 衝突のスペクトラと AA 衝突のスペクトラから得られる 4 つの S_{loss} を計算し、それらと S_{loss} (第??節) のズレから定義した。pp 衝突と AA 衝突の統計誤差をそれぞれ考慮して得られる値は 4 つで、 $S_{loss,i}$ と $S_{loss,ii}$ は pp 衝突、 $S_{loss,iii}$ と $S_{loss,iv}$ は AA 衝突の誤差を考慮した値である。第??節における誤差の考慮に用いたデータの組み合わせは、

- i. $S_{loss,i}(spectra_{pp} + syst.err.(spectra_{pp}), spectra_{AA})$
- ii. $S_{loss,ii}(spectra_{pp} - syst.err.(spectra_{pp}), spectra_{AA})$
- iii. $S_{loss,iii}(spectra_{pp}, spectra_{AA} + syst.err.(spectra_{AA}))$
- iv. $S_{loss,iv}(spectra_{pp}, spectra_{AA} - syst.err.(spectra_{AA}))$

である。図 B.3 は、centrality ごとに計算した $S_{loss,i}$ 、 $S_{loss,ii}$ 、 $S_{loss,iii}$ 、及び $S_{loss,iv}$ の p_T 依存である。統計誤差は、これらと第??節で計算した S_{loss} との差 ($|S_{loss,i} - S_{loss}|$ 、 $|S_{loss,ii} -$

図 B.1: 上段: S_{loss} 誤差計算における $S_{\text{loss,I}}$ と $S_{\text{loss,II}}$ のイメージ図。破線は pp 衝突と AA 衝突のスペクトラ、赤い実線 (I と II) は、pp 衝突と AA 衝突のスペクトラの p_T 値の差を示している。下段: S_{loss} 誤差計算における $S_{\text{loss,III}}$ と $S_{\text{loss,IV}}$ のイメージ図。赤い実線 (III と IV) は、破線のスペクトラの p_T 値の差を示している。各値の説明は、表 B.1 にまとめた。



S_{loss} 、 $|S_{\text{loss,iii}} - S_{\text{loss}}|$ 、及び $|S_{\text{loss,iv}} - S_{\text{loss}}|$ を計算し、その最大値を統計誤差とした。従って、

$$\text{sys. err.} = |S_{\text{loss}} - S_{\text{loss,i}}| \text{ or } |S_{\text{loss}} - S_{\text{loss,ii}}| \text{ or } |S_{\text{loss}} - S_{\text{loss,iii}}| \text{ or } |S_{\text{loss}} - S_{\text{loss,iv}}| \quad (\text{B.4})$$

のように決定した。

図 B.2: centrality ごとに計算した $S_{\text{loss,I}}$, $S_{\text{loss,II}}$, $S_{\text{loss,III}}$, 及び $S_{\text{loss,IV}}$ の p_T 依存。実線の円は元の S_{loss} 、星印は $S_{\text{loss,I}}$ 、白丸は $S_{\text{loss,II}}$ 、クロスは $S_{\text{loss,III}}$ 、プラスは $S_{\text{loss,IV}}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 、下段は銅金衝突の π^0 の結果である。

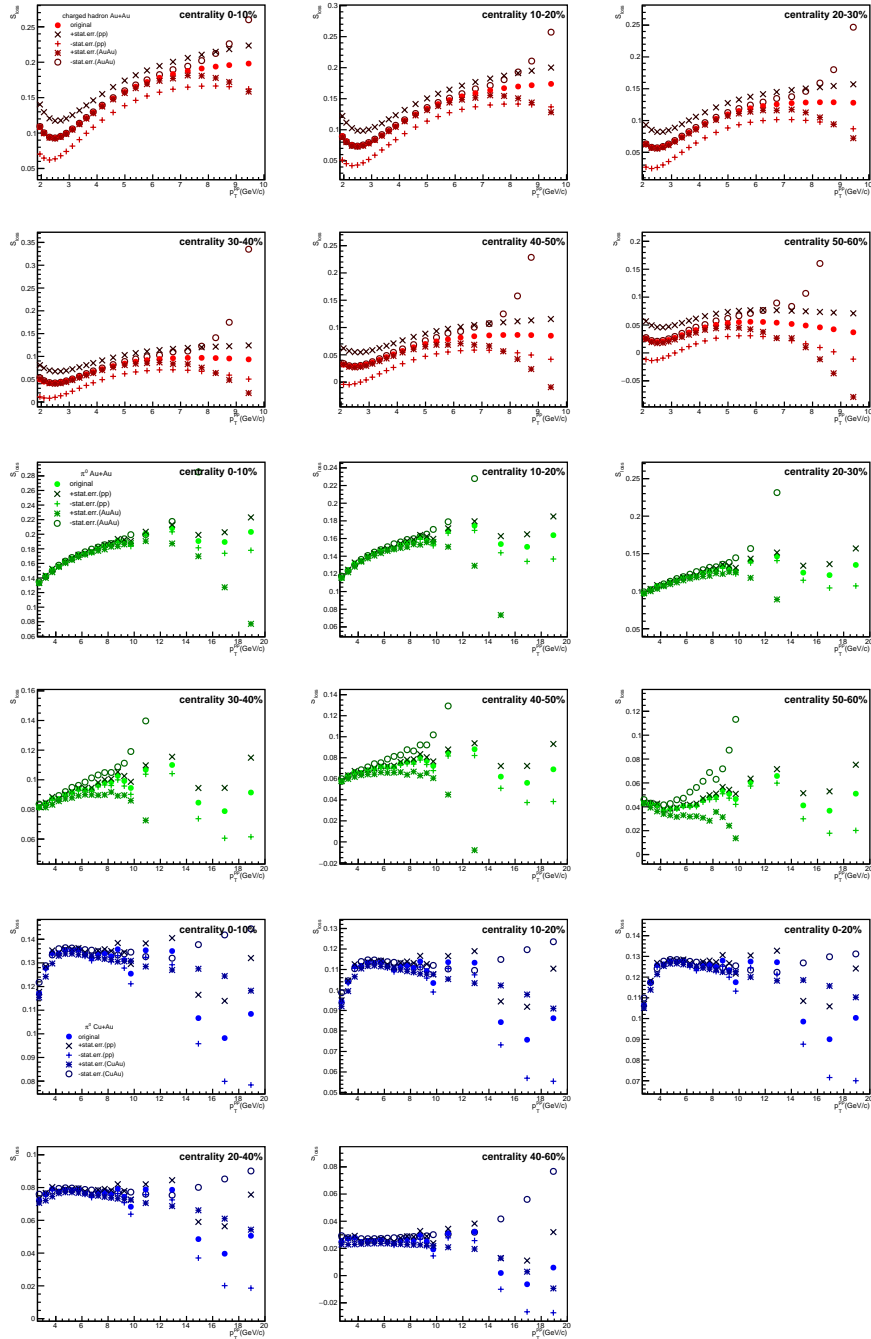
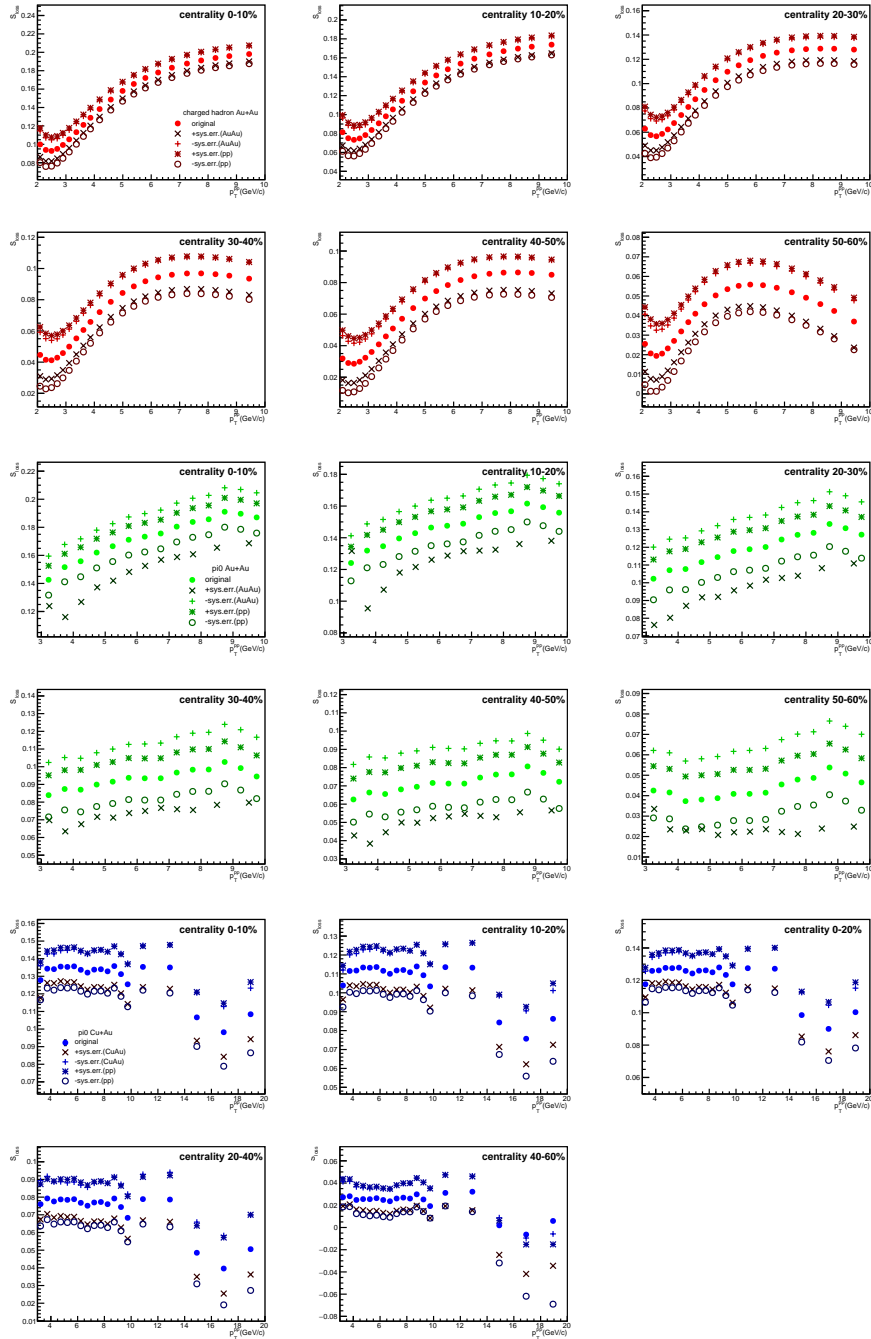


図 B.3: centrality ごとに計算した $S_{\text{loss},i}$, $S_{\text{loss},ii}$, $S_{\text{loss},iii}$, 及び $S_{\text{loss},iv}$ の p_T 依存。実線の円は元の S_{loss} 、クロスは $S_{\text{loss},i}$ 、プラスは $S_{\text{loss},ii}$ 、星印は $S_{\text{loss},iii}$ 、白丸は $S_{\text{loss},iv}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 、下段は銅金衝突の π^0 の結果である。



付録C S'_{loss} の系統誤差と統計誤差

C.1 系統誤差

S'_{loss} の系統誤差は、データの系統誤差の伝播によって定義した。系統誤差伝播は次の4つの手順で行った。

step 1 AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播

step 2 in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラの誤差伝播

step 3 フィット関数から抜き出す点に最も近いデータ点の系統誤差の選択

step 4 2つの S'_{loss} の計算

step 5 系統誤差の決定

step 1 では、系統誤差の伝播を行った。AA 衝突における p_T スペクトラの誤差伝播の式は、

$$\text{stat.err.}(\text{scaled AA}) = \text{stat.err.}(\text{AA}) \times p_T \quad (\text{C.1})$$

step 2 では、

$$\text{stat.err.}(\text{in(out)}) = \sqrt{\text{stat.err.}(\text{scaled AA})^2 \left(\frac{\delta \text{spectra}_{\text{in(out)}}}{\delta \text{spectra}_{\text{scaled AA}}} \right)^2 + \text{stat.err.}(v_2)^2 \left(\frac{\delta \text{spectra}_{\text{in(out)}}}{\delta v_2} \right)^2} \quad (\text{C.2})$$

のように誤差を伝播した。

step 3 では、フィット関数から用いる点に最も近いデータ点の系統誤差を選択した。図 C.1 は step 3 の誤差伝播のモデル図である。

step 4 では、in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラの系統誤差をそれぞれ考慮することで得られる S'_{loss} 値を計算した。2つのスペクトラにはそれぞれ伝播させた誤差があるため、この誤差により S'_{loss} がどれくらい元の値とズレるかを系統誤差として考慮しなければならない。この時、in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラの系統誤差は別々に考慮するのではなく、同時に動かして値のズレを計算しなければならない。これは、in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラは同じ p_T スペクトラと v_2 から計算されているため、値の変動には連動して起こると考えられるからである。従って、これらの系統誤差の伝播から得られる値は $S'_{\text{loss,I}}$ と $S'_{\text{loss,II}}$ の2つである。 $S'_{\text{loss,I}}$ は in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラを誤差分上方向に移動させた値、 $S'_{\text{loss,II}}$ は in-plane 方向と out-of-plane 方向の p_T スペクトラを誤差分下方向に移動させた値である。各値の計算方法のイメージ図を図 C.2 に示した。計算式は、

$$\text{I. } S'_{\text{loss,I}} = (p_{\text{T}}^{\text{F}_{\text{AA},\text{in},\text{max}}} - p_{\text{T}}^{\text{AA},\text{out},\text{max}}) / p_{\text{T}}^{\text{F}_{\text{AA},\text{in},\text{max}}}$$

$$\text{II. } S'_{\text{loss,II}} = (p_{\text{T}}^{\text{F}_{\text{AA},\text{in},\text{min}}} - p_{\text{T}}^{\text{AA},\text{out},\text{min}}) / p_{\text{T}}^{\text{F}_{\text{AA},\text{in},\text{min}}}$$

である。上式及び図 C.2 における値の表記の説明は表??の通りである。また、図 C.3 は、centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss,I}}$ と $S'_{\text{loss,II}}$ の p_{T} 依存である。step 5 では、step 4 計算値

word	description
$spectra_{\text{in}}$	in-plane spectra in A+A collisions
$spectra_{\text{out}}$	out-of-plane spectra in A+A collisions
$stat.err.(in)$	statistic error of in-plane spectra in A+A collisions
$stat.err.(out)$	statistic error of out-of-plane spectra in A+A collisions
F_{in}	Fit function of in-plane spectra in A+A collisions
F_{out}	Fit function of out-of-plane spectra in A+A collisions
$F_{\text{out}+\text{stat.err.}(out)}$	Fitting function of out-of-plane spectra added statistic error
$F_{\text{out}-\text{stat.err.}(out)}$	Fitting function of out-of-plane spectra minused statistic error
p_{T}^{in}	The p_{T} of in-plane spectra
$p_{\text{T}}^{\text{out}+\text{stat.err.}(in)}$	The p_{T} of the extracted point from $F_{\text{out}+\text{stat.err.}(out)}$ at the same spectra value as the point $(p_{\text{T}}^{\text{in}}, spectr_{\text{in}} + stat.err.(in))$ on in-plane spectra
$p_{\text{T}}^{\text{out}-\text{stat.err.}(in)}$	The p_{T} of the extracted point from $F_{\text{out}-\text{stat.err.}(out)}$ at the same spectra value as the point $(p_{\text{T}}^{\text{in}}, spectr_{\text{in}} - stat.err.(in))$ on out-of-plane spectra

表 C.1: 図 C.1 における表記の説明

と第??節で計算した S'_{loss} との差 ($|S'_{\text{loss,I}} - S'_{\text{loss}}|$, $|S'_{\text{loss,II}} - S'_{\text{loss}}|$) を計算し、大きい方の値を S'_{loss} の系統誤差とした。従って、

$$stat.err.(S'_{\text{loss}}) = |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,I}}| \text{ or } |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,II}}| \quad (\text{C.3})$$

のように計算した。

図 C.1: in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラの拡大図。赤丸印は in-plane 方向のスペクトラのデータ点を示し、青四角印は out-of-plane 方向のスペクトラのデータ点を示している。

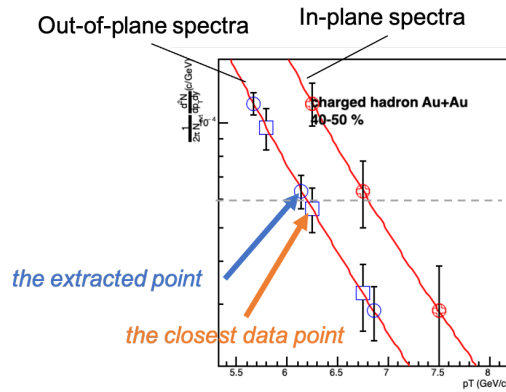
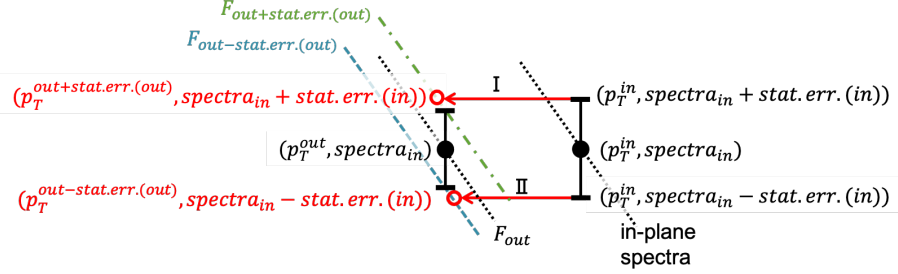


図 C.2: 上段: S'_{loss} 誤差計算における $S'_{\text{loss, I}}$ と $S'_{\text{loss, II}}$ のイメージ図。破線は AA 衝突の in-plane 方向と out-of-plane 方向のスペクトラ、赤い実線 (I と II) は、破線のスペクトラの p_T 値の差を示している。各値の説明は、表??にまとめた。



C.2 統計誤差

統計誤差は、 S'_{loss} 計算の最初の手順 (第??節) において、データの統計誤差を考慮した AA 衝突の p_T スペクトラと v_2 から得られる 4つの S'_{loss} を計算し、それらと S'_{loss} (第??節) のズレから定義した。AA 衝突の p_T スペクトラと v_2 の統計誤差をそれぞれ考慮して得られる値は 4つで、 $S'_{\text{loss,i}}$ と $S'_{\text{loss,ii}}$ は p_T スペクトラ、 $S'_{\text{loss,iii}}$ と $S'_{\text{loss,iv}}$ は v_2 の誤差を考慮した値である。第??節における誤差の考慮に用いたデータの組み合わせは、

- i. $S'_{\text{loss,i}}(v_2, \text{spectra}_{\text{AA}} + \text{syst.err.}(\text{spectra}_{\text{AA}}))$
- ii. $S'_{\text{loss,ii}}(v_2, \text{spectra}_{\text{AA}} - \text{syst.err.}(\text{spectra}_{\text{AA}}))$
- iii. $S'_{\text{loss,iii}}(v_2 + \text{syst.err.}(v_2), \text{spectra}_{\text{AA}})$
- iv. $S'_{\text{loss,iv}}(v_2 - \text{syst.err.}(v_2), \text{spectra}_{\text{AA}})$

である。図 C.4 は、centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss,i}}$ 、 $S'_{\text{loss,ii}}$ 、 $S'_{\text{loss,iii}}$ 、及び $S'_{\text{loss,iv}}$ の p_T 依存である。統計誤差は、これらと第??節で計算した S'_{loss} との差 ($|S'_{\text{loss,i}} - S'_{\text{loss}}|$ 、 $|S'_{\text{loss,ii}} - S'_{\text{loss}}|$ 、 $|S'_{\text{loss,iii}} - S'_{\text{loss}}|$ 、及び $|S'_{\text{loss,iv}} - S'_{\text{loss}}|$) を計算し、その最大値を統計誤差とした。従って、

$$\text{syst.err.}(S'_{\text{loss}}) = |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,i}}| \text{ or } |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,ii}}| \text{ or } |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,iii}}| \text{ or } |S'_{\text{loss}} - S'_{\text{loss,iv}}| \quad (\text{C.4})$$

のように決定した。

図 C.3: centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss,I}}$ と $S'_{\text{loss,II}}$ の p_T 依存。実線の円は元の S'_{loss} 、星印は $S'_{\text{loss, I}}$ 、白丸は $S'_{\text{loss, II}}$ を表している。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 (2004年)、下段は金金衝突の π^0 (2007年) の結果である。

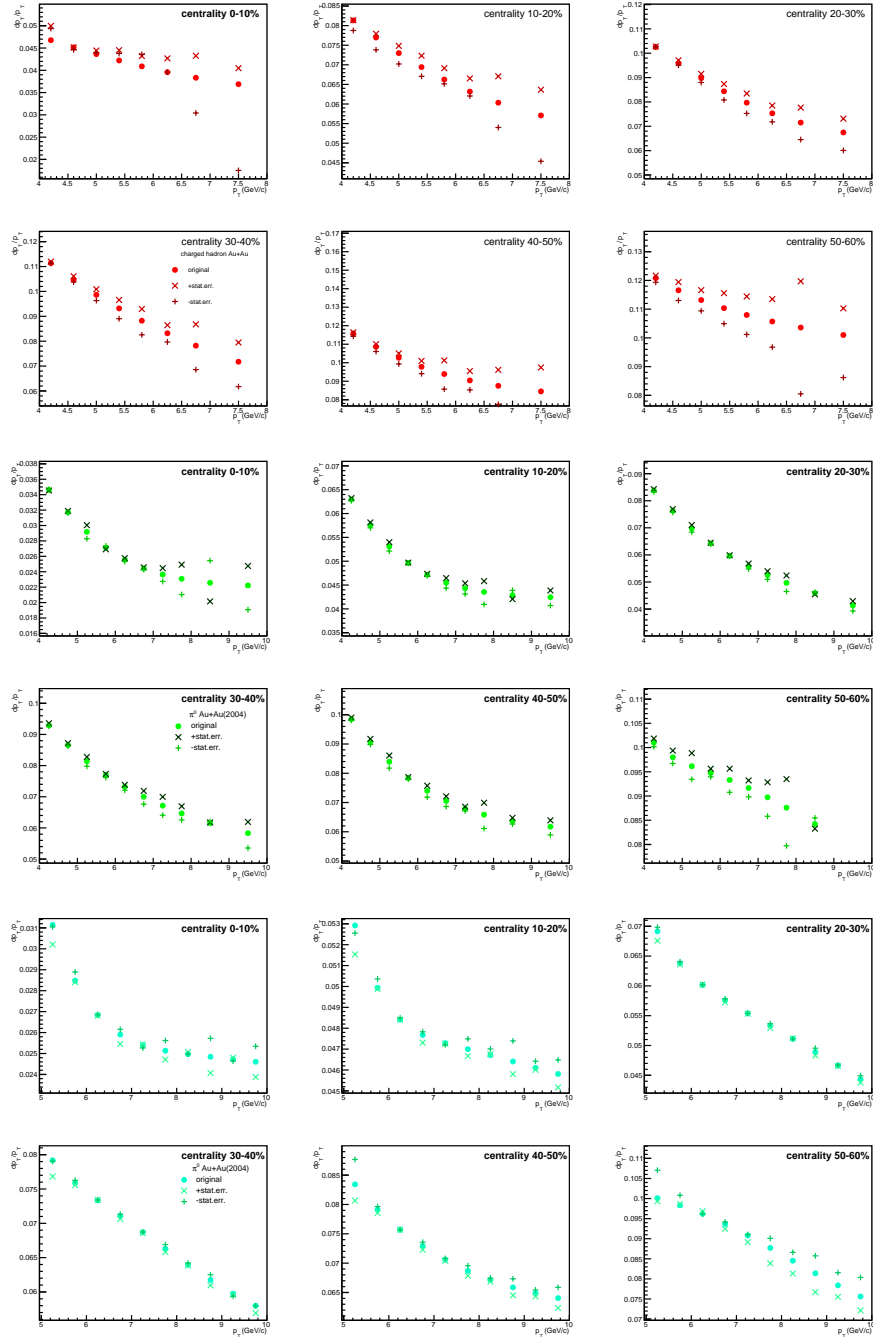


図 C.4: centrality ごとに計算した $S'_{\text{loss,i}}$, $S'_{\text{loss,ii}}$, $S'_{\text{loss,iii}}$, 及び $S'_{\text{loss,iv}}$ の p_T 依存。上段は金金衝突の荷電ハドロン、中段は金金衝突の π^0 (2004 年)、下段は金金衝突の π^0 (2007 年) の結果である。

