

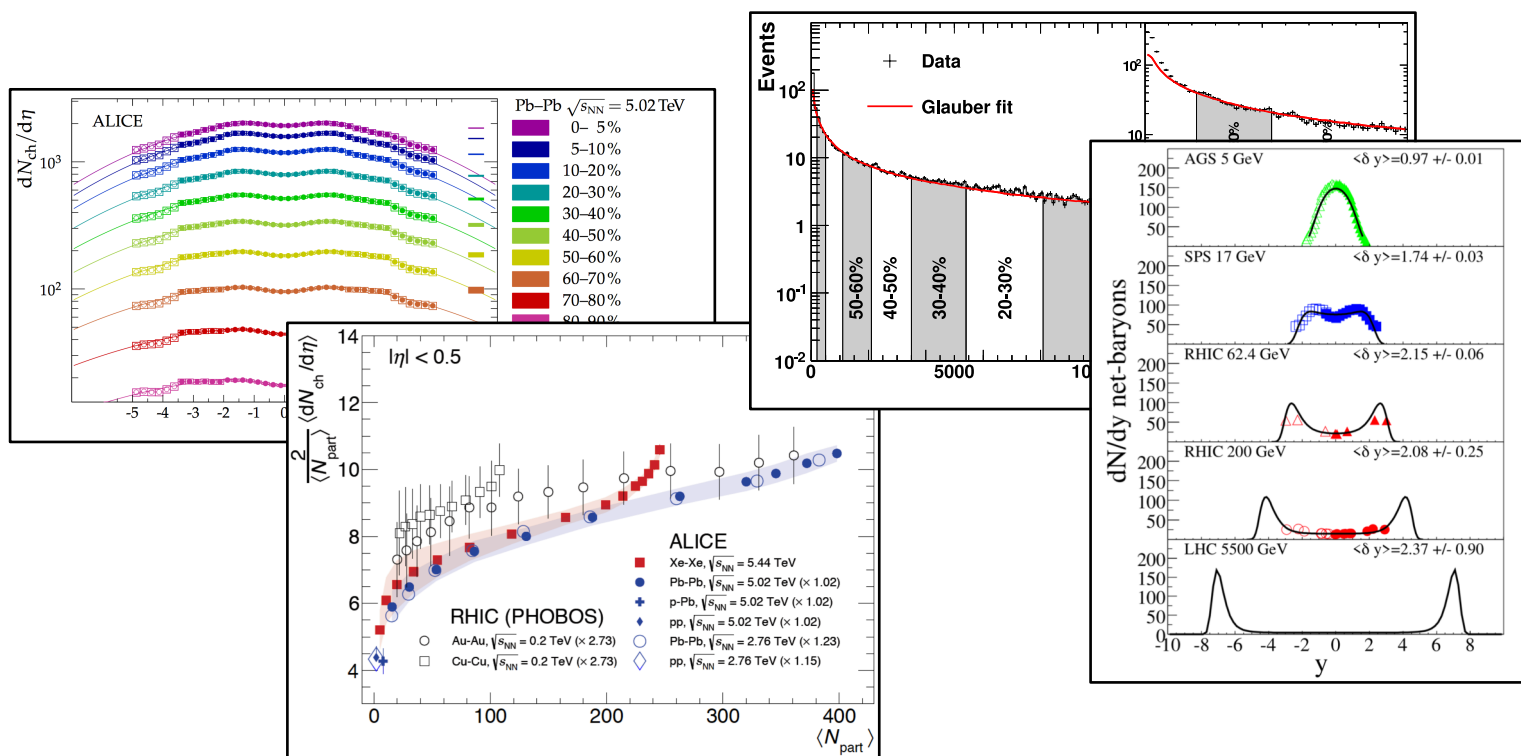
ジオメトリ・グラウバー模型

門内 晶彦 (KEK)

チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理：
基礎・最先端・課題・展望」
2019年8月19日、理化学研究所、和光

概要

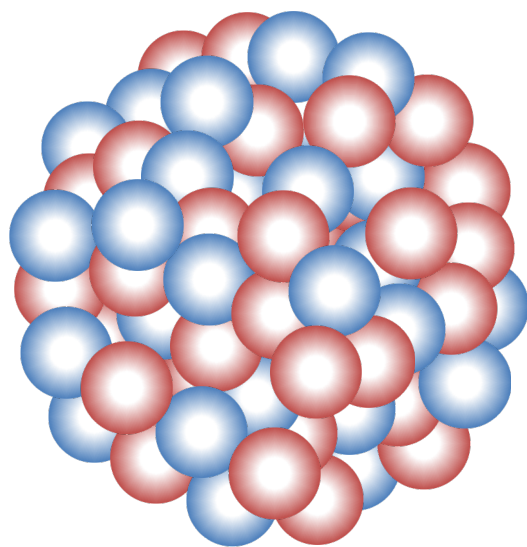
1. 重イオン衝突とは
2. ジオメトリとグラウバー模型
3. 基本的な観測量



「重イオン衝突」とは

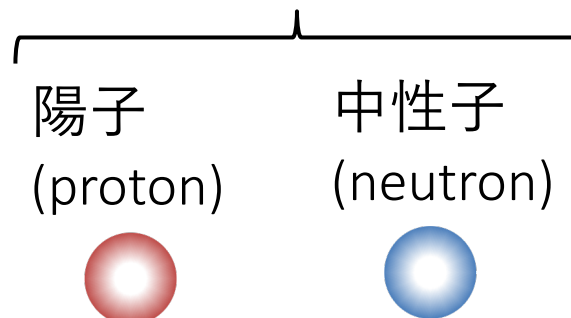
重イオン (heavy ion)

- 重元素の原子核 金 (^{197}Au , gold) , 鉛 (^{208}Pb , lead) など



↔
 $R = 6 \sim 7 \text{ fm}$ 位
(核子数) $^{1/3}$ ほど

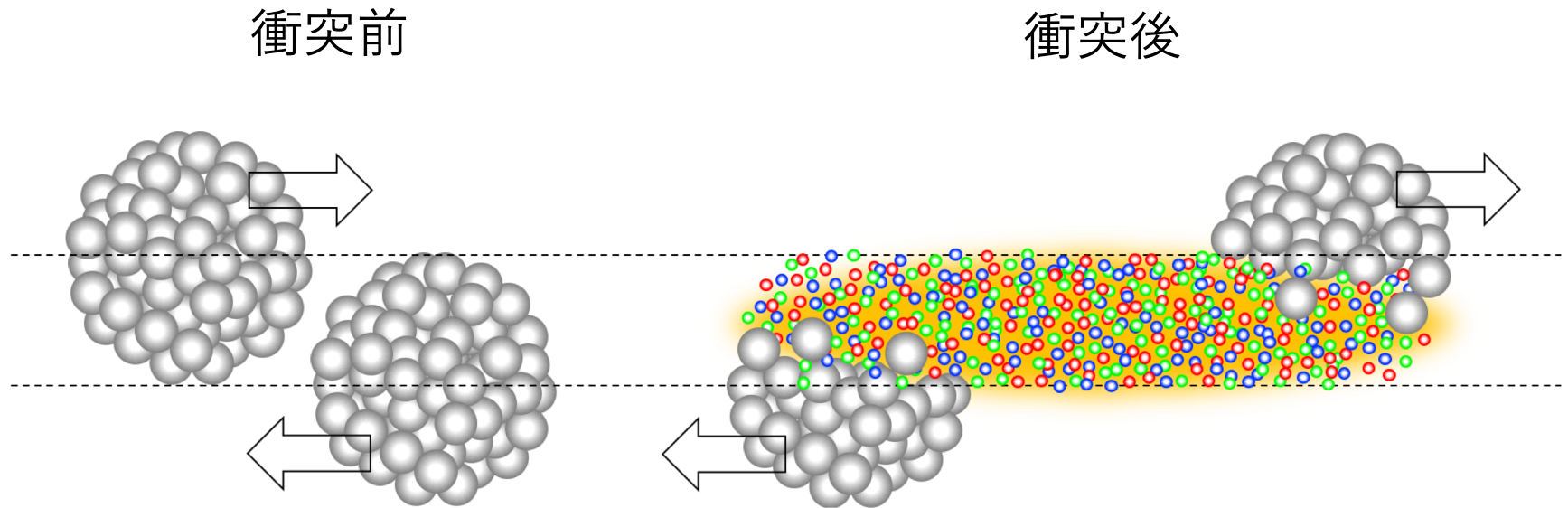
核子 (nucleon)



↔
1 fm位

重イオン衝突 (heavy ion collision)

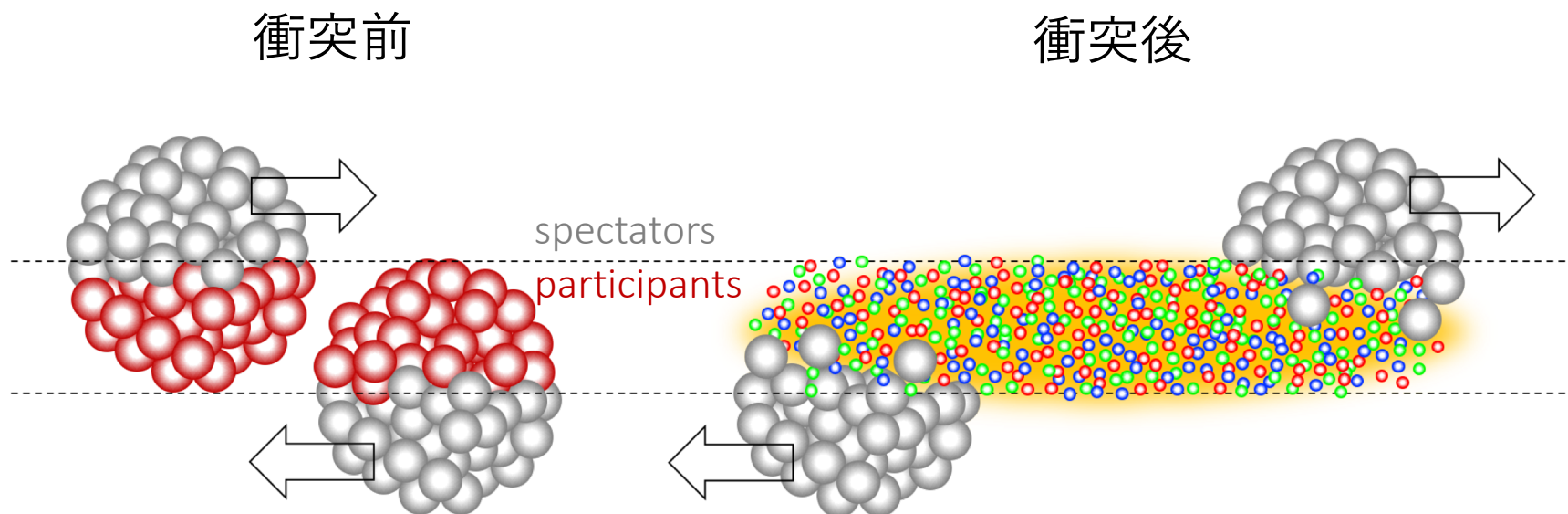
■ 模式図



- ▶ 衝突で重なり合った部分に媒質が生成すると考えられる

重イオン衝突 (heavy ion collision)

■ 模式図

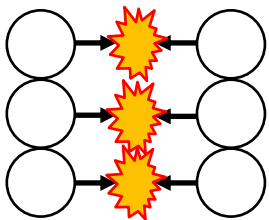


- ▶ 衝突で重なり合った部分に媒質が生成すると考えられる
- ▶ 衝突に参加する核子を **participant** そうでない核子を **spectator** と呼ぶ

N_{part} と N_{coll}

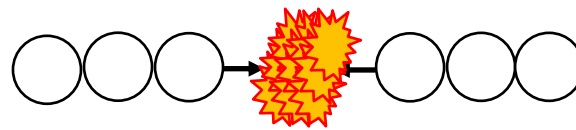
- N_{part} (number of participants): 参加した核子数
- N_{coll} (number of collisions): 核子-核子衝突の数

例:



$$N_{\text{part}} = 6$$

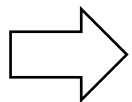
$$N_{\text{coll}} = 3$$



$$N_{\text{part}} = 6$$

$$N_{\text{coll}} = 9$$

- ▶ N_{coll} は観測量ではないためジオメトリを記述する模型が必要
(N_{spec} は測定されるが補正が必要)

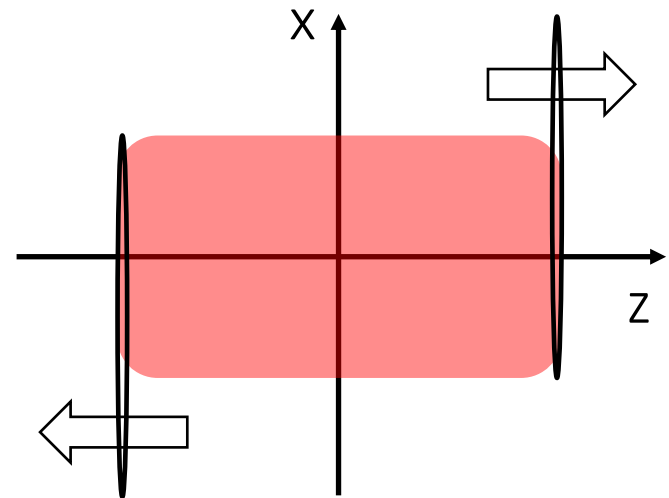
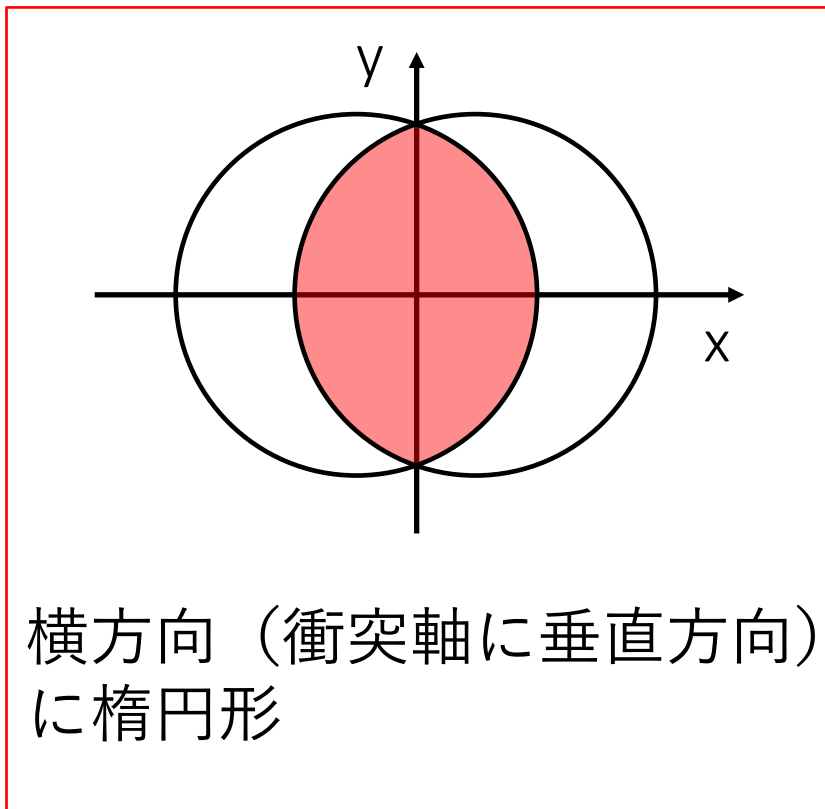


グロウバー模型 (Glauber model) を考える

ジオメトリとグラウバー模型

ジオメトリ (geometry)

■ 重イオン衝突のかたち

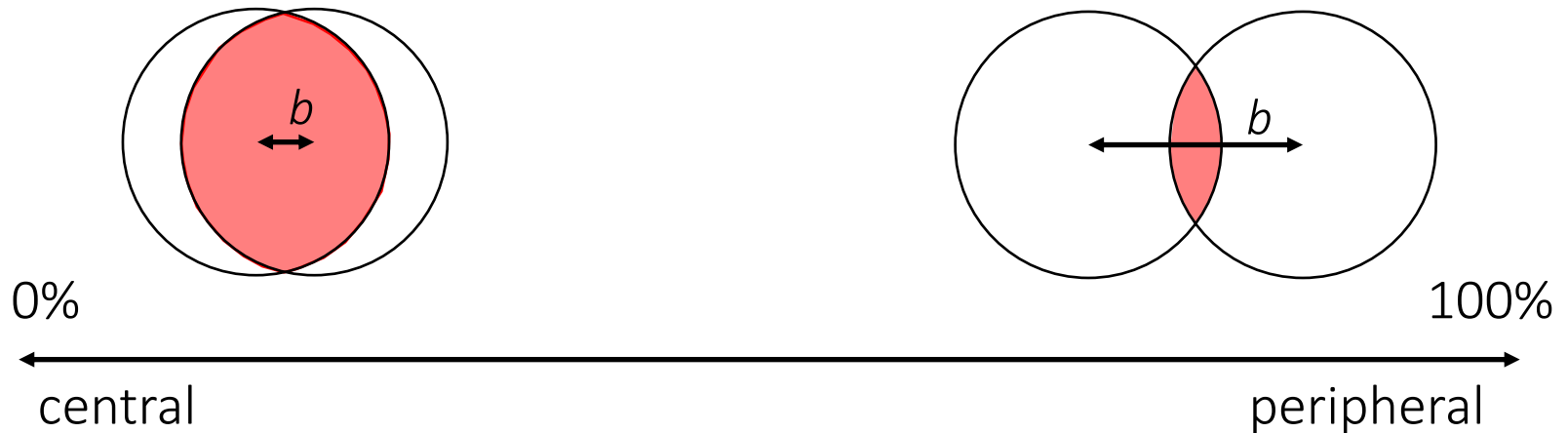


※ローレンツ収縮で原子核は板状に潰れる (RHICで1/100程度)

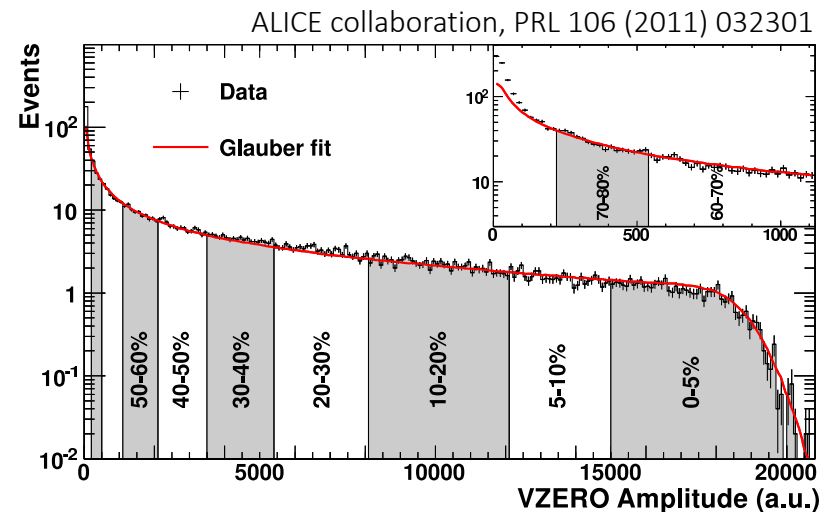
横方向のジオメトリ

■ セントラリティ (centrality)

b : impact parameter (中心間距離)



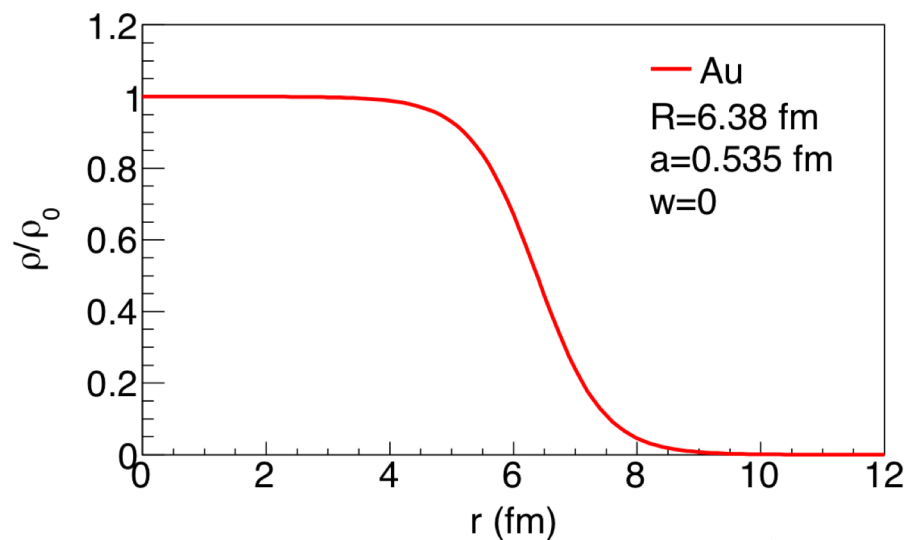
全イベントを並べて、粒子収量が多い方から数えて 0-5%, 5-10%, ..., 95-100% のように呼ぶ



グラウバー模型

■ 垂直方向の空間的配置を与える模型

1. Woods-Saxon分布に基づき原子核の密度分布を決める



$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1 + w(r/R)^2}{1 + \exp [(r - R)/a]}$$

△ p, d, ^3He などは異なる取り扱い

核子のランダム配置を考える
Monte-Carlo Glauber model

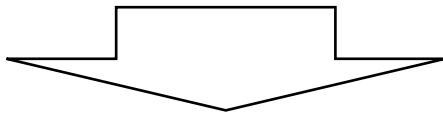
そのまま解析計算をする
Optical Glauber model

モンテカルログラウバー模型



■ 垂直方向の空間的配置を与える模型

2. 核子を分布に基づいて配置

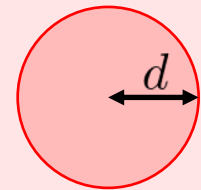


3. ランダムな距離の二原子核を用意し核子-核子衝突があるか判定する

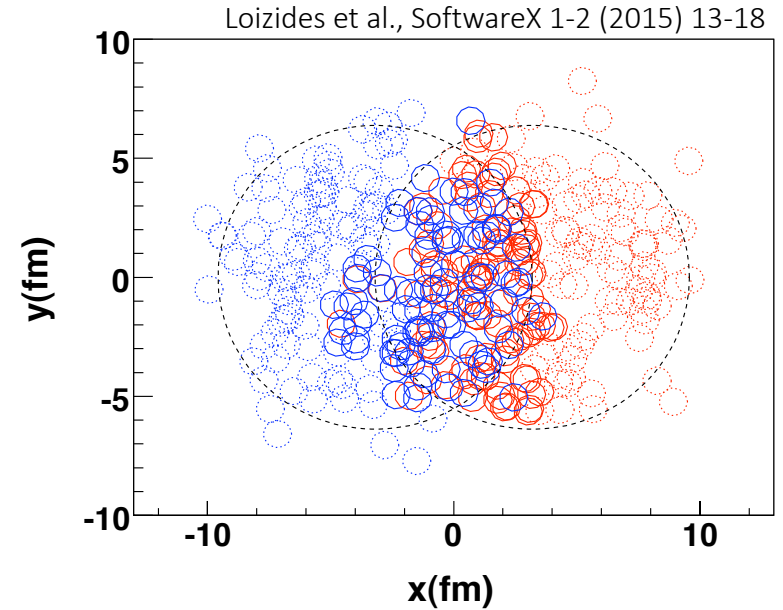
♠ 判定条件

核子-核子衝突の非弾性散乱断面積: σ_{NN}

核子対の距離が $d < \sqrt{\sigma_{NN}/\pi}$ のときに
「衝突」があったとする



面積 σ_{NN} の円

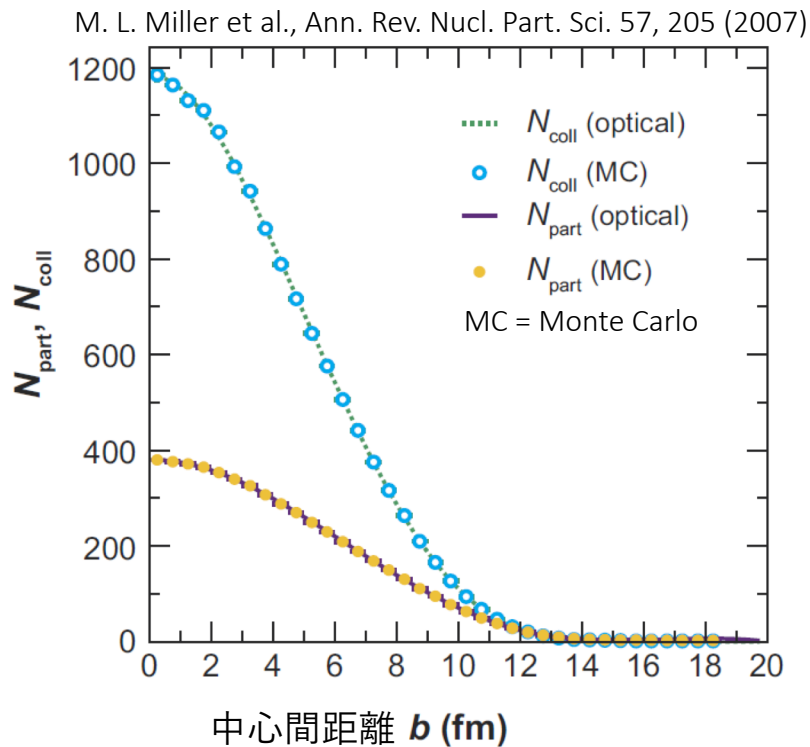


モンテカルログラウバー模型



■ 垂直方向の空間的配置を与える模型

3. (続き) b , N_{coll} , N_{part} が計算出来る



Au-Au 200 GeVの場合 $\sigma_{NN} = 42$ mb

class	$\langle N_{\text{part}} \rangle$	$\langle N_{\text{coll}} \rangle$	$\langle b \rangle$ (fm)
0-10%	325.2	955.4	3.2
10-20%	234.6	602.6	5.7
20-30%	166.6	373.8	7.4
30-40%	114.2	219.8	8.7
40-50%	74.4	120.3	9.9
50-60%	45.5	61.0	11.0
60-70%	25.7	28.5	11.9
70-92.2%	9.5	8.3	13.5

K. Reygers, <https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/p/draft/reygers/glauber>

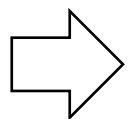
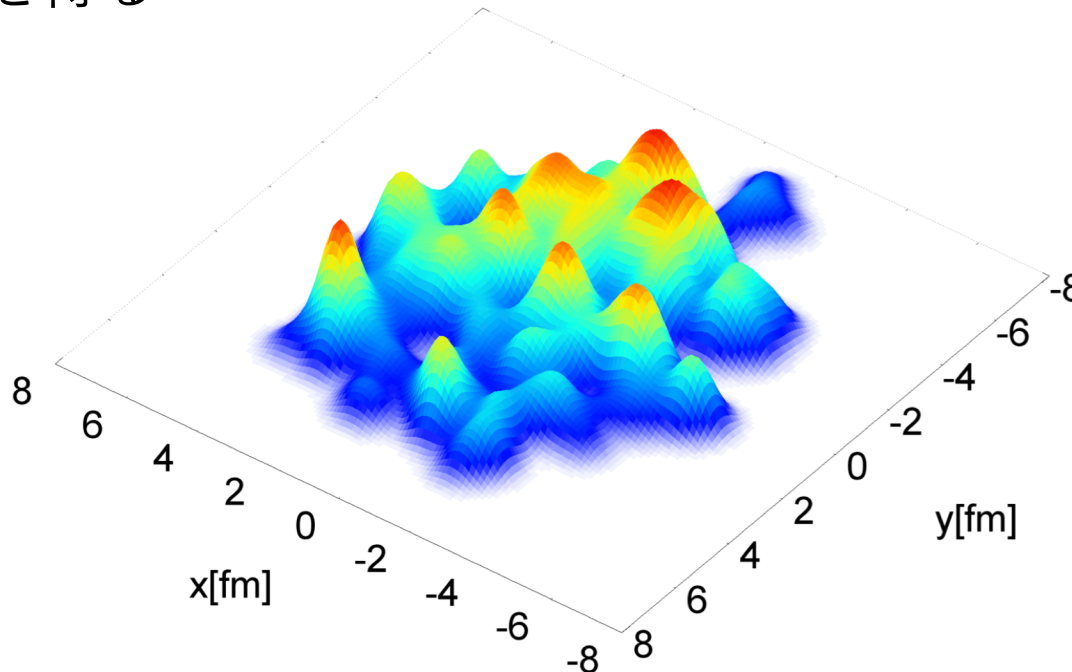
モンテカルログラウバー模型



■ 垂直方向の空間的配置を与える模型

4. 核子-核子衝突の位置にエネルギー/エントロピーを与えて
その分布を得る

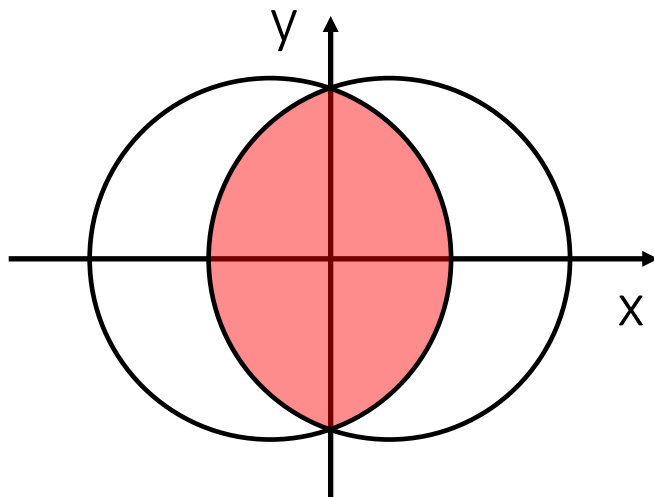
Fig: B. Schenke et al.,
PRL 108, 252301 (2012)



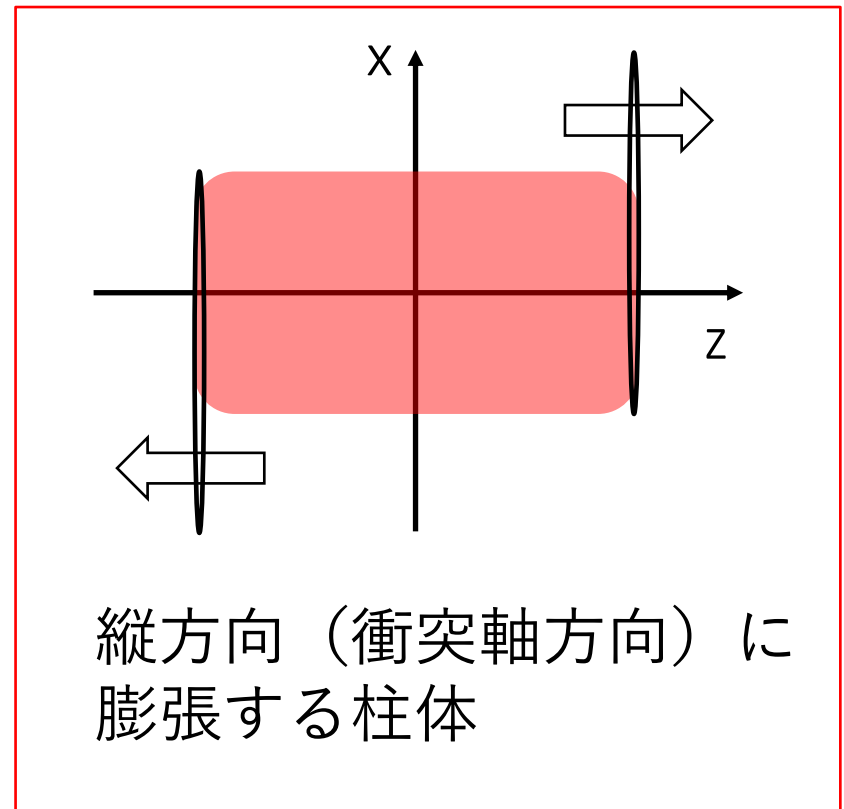
流体模型を含め様々なモデルの初期条件に用いられる

縦方向のジオメトリ

■ 重イオン衝突のかたち



横方向（衝突軸に垂直方向）
に楕円形



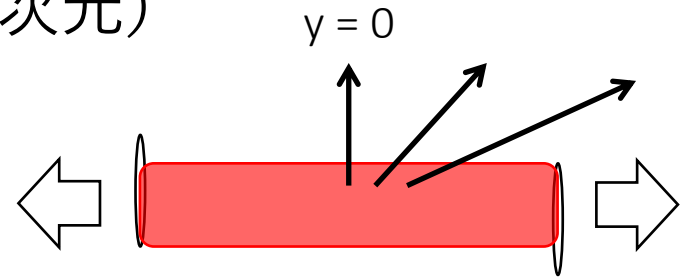
縦方向（衝突軸方向）に
膨張する柱体

ラピディティ (rapidity)

- 衝突軸方向の運動量の指標 (無次元)

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

光速に近い速さで膨張する系を記述するのに便利



y	0	1	3	∞
p_z/E	0	0.76	0.995	1

- 実験では擬ラピディティ (pseudorapidity) がよく用いられる

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{|\mathbf{p}| + p_z}{|\mathbf{p}| - p_z}$$

$$E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$$

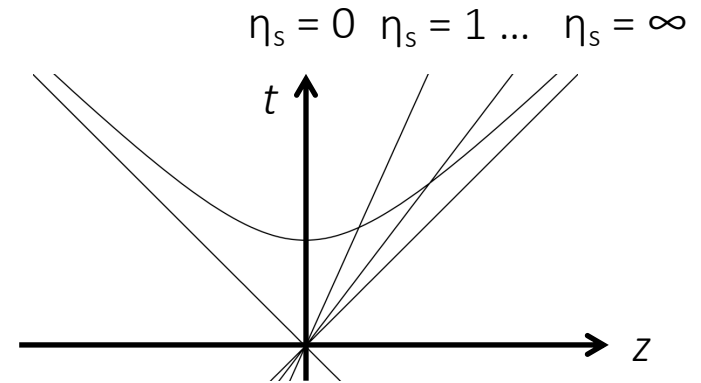
粒子種がわからなくても運動量だけで定義できる

ラピディティ

- 座標空間で時空(spacetime)ラピディティが定義できる

$$\eta_s = \frac{1}{2} \ln \frac{t+z}{t-z}$$

運動量空間のラピディティと異なる
(ただし大まかな相関あり)



♠ 便利な関係式

$$\begin{cases} t = \tau \cosh \eta_s \\ z = \tau \sinh \eta_s \end{cases}$$

固有時間 (proper time): $\tau = \sqrt{t^2 - z^2}$

$$\begin{cases} E = m_T \cosh y \\ p_z = m_T \sinh y \end{cases}$$

横質量 (transverse mass): $m_T = \sqrt{E^2 - p_z^2}$

基本的な観測量（の一部）

荷電ハドロン数 N_{ch}

- 実験的に電荷を持った粒子(charged hadrons)を観測しやすい

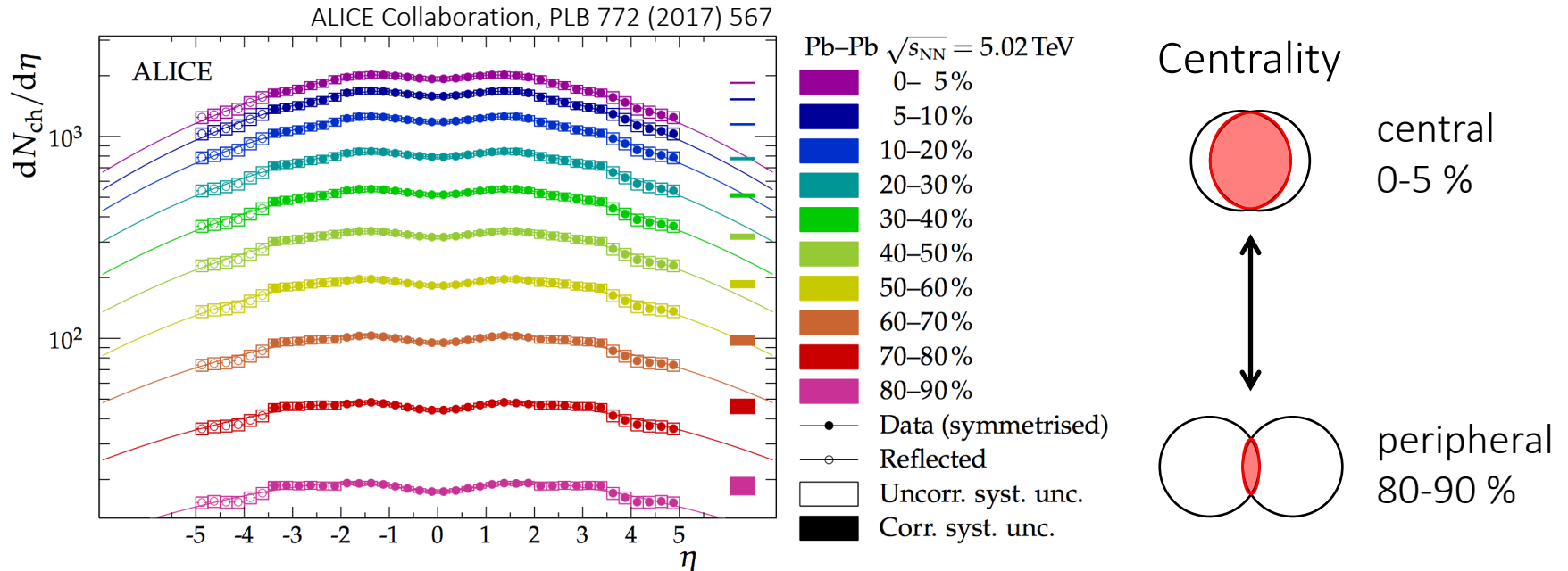
	電荷	π 中間子	K中間子	核子	ハイペロン
➡	Q = +1	π^+	K^+	p	
	Q = 0	π^0	K^0, \bar{K}^0	n, \bar{n}	...
➡	Q = -1	π^-	K^-	\bar{p}	

➡ particle identificationを経て個別の粒子情報 (N_{π^+} , etc.)
が得られる

※ 座標空間ではなく運動量空間の分布として与えられる

荷電ハドロン分布 $dN_{ch}/d\eta$

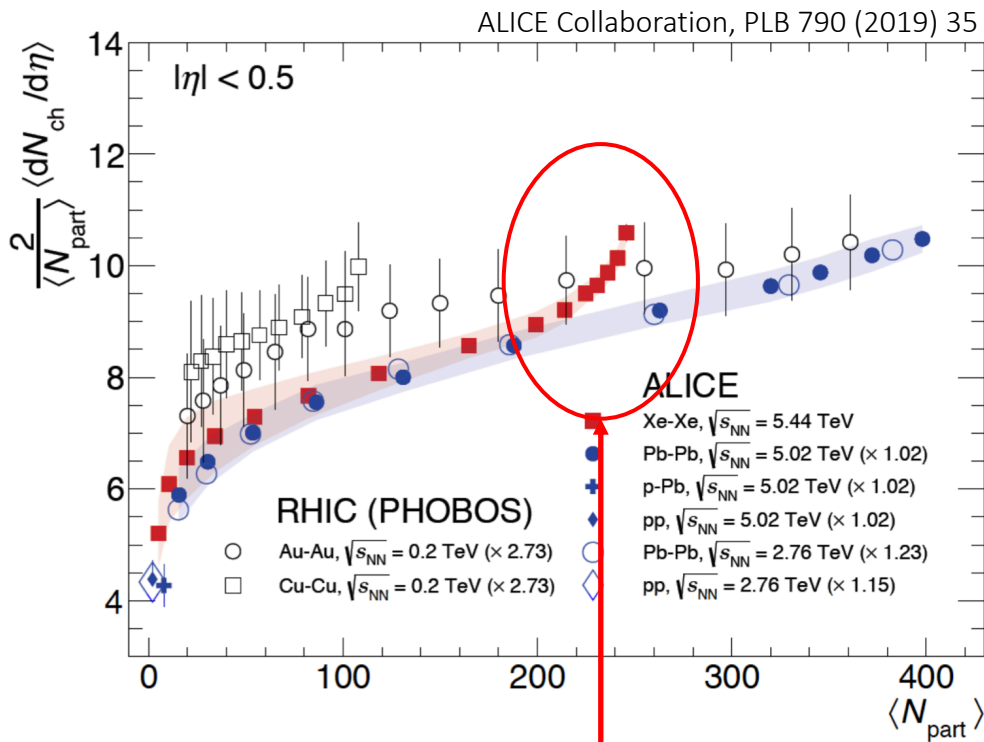
- 新しい衝突系・エネルギーで重要となる量の一つ



- ▶ 系のエネルギーやサイズを目安となる (模型の規格化などにも用いられる)

$dN_{ch}/d\eta$ の N_{part} 依存性

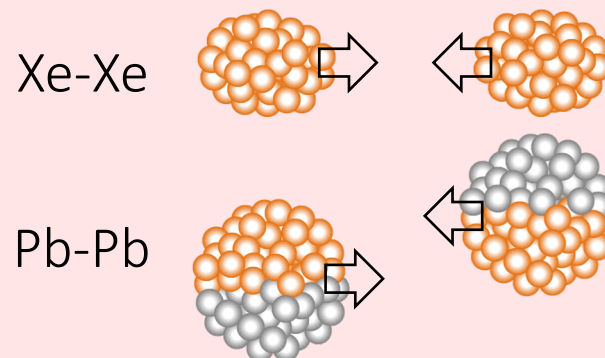
- ジオメトリに関する情報が得られる



- ▶ 横軸: 参加核子数
(セントラルリティに依存)
- ▶ 縦軸: 中央ラピディティでの荷電ハドロン生成
(ppと比較のため $N_{part}/2$ で割られている)

同じ N_{part} で異なる粒子生成

ジオメトリの違い



ネットバリオン分布 dN_B/dy

- ネットバリオン数（バリオン数-反バリオン数）は保存量

- ▶ 衝突原子核に由来するため「原子核の破片」の位置がわかる

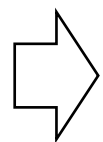
- 衝突前には、最も単純には

$$y_p = y(E = \sqrt{s_{NN}}/2)$$

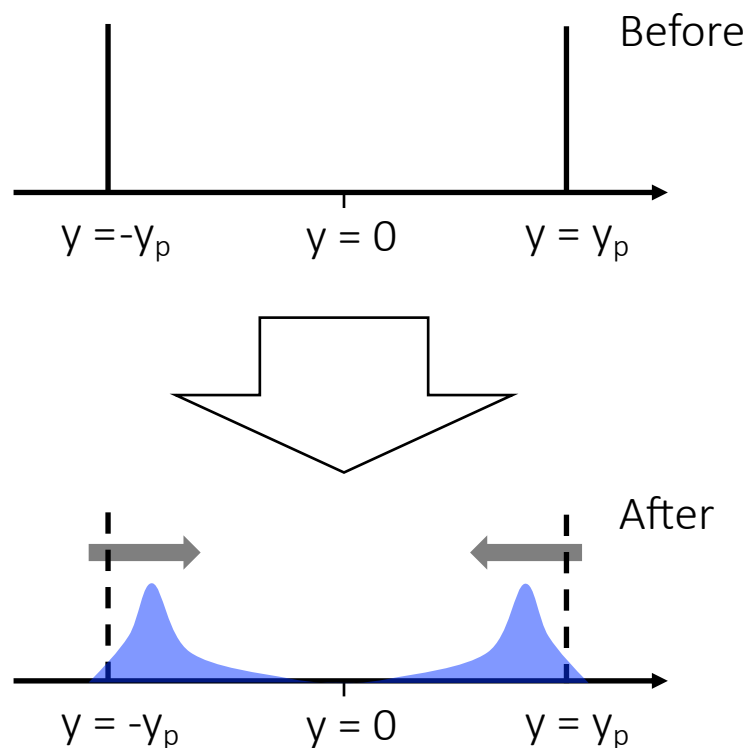
にピークがあるはず

*実際は複合粒子なのでぼやけている

- 運動量の交換があれば、平均ラピディティ $\langle y \rangle$ は小さくなる



バリオンストップング
(baryon stopping)



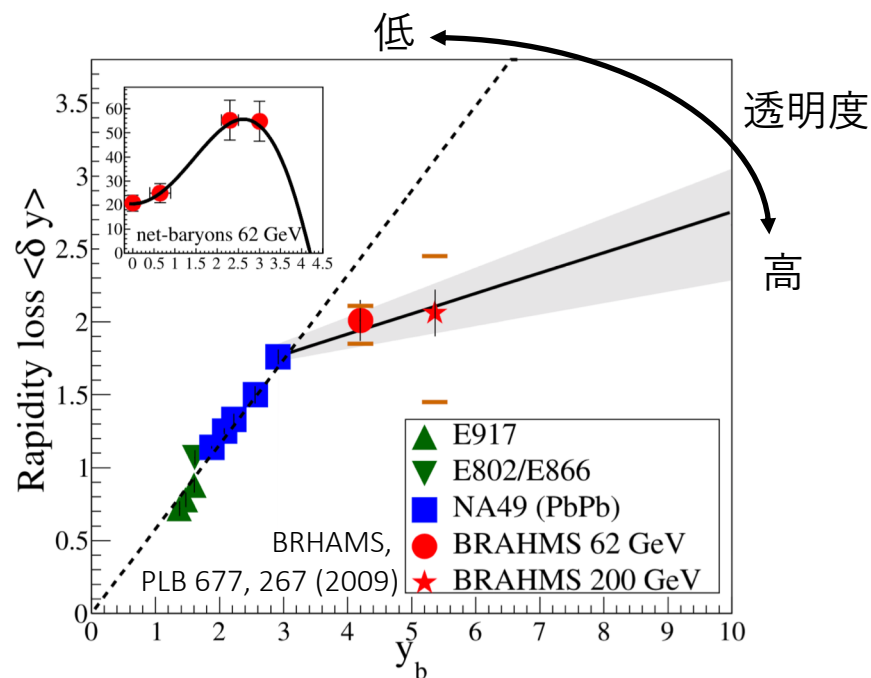
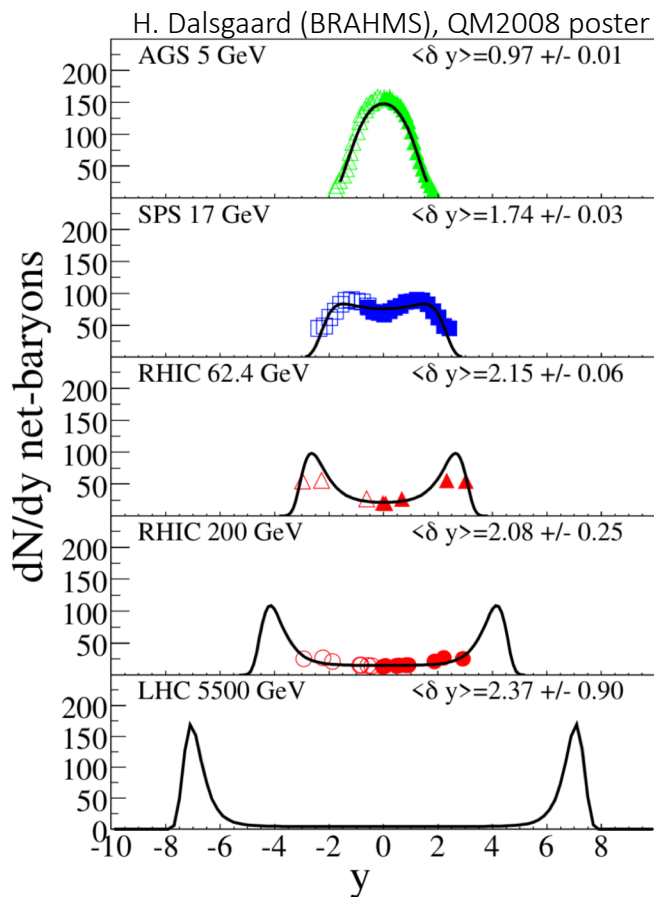
ネットバリオン分布 dN_B/dy

■ 実験データ

▶ 実際の平均ラピディティとの差

$$\langle \delta y \rangle = y_p - \langle y \rangle$$

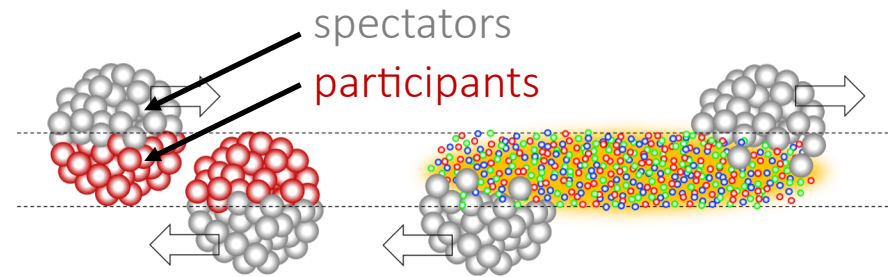
は衝突の透明度を表す指標となる



まとめ

1. ジオメトリ

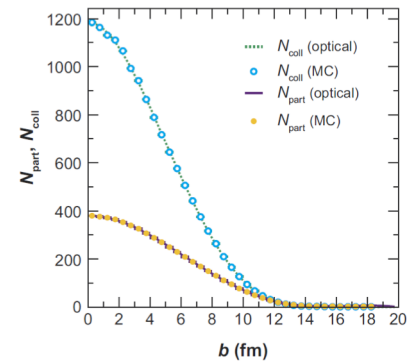
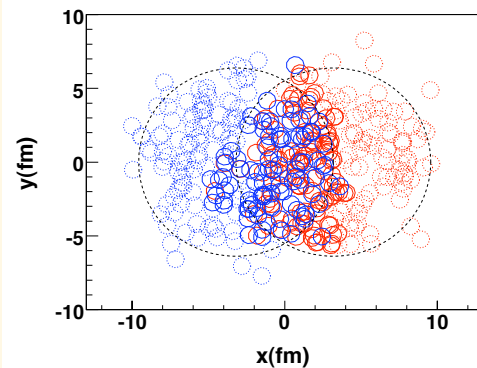
- 2つの原子核の重なり領域に媒質が生成され、衝突軸方向に膨張する



2. (モンテカルロ)グラウバー模型

- Woods-Saxon分布に基づき核子を配置し、核子-核子衝突があるか σ_{NN} を基に判定

- N_{coll} , N_{part} , b などを計算でき、初期条件を得られる



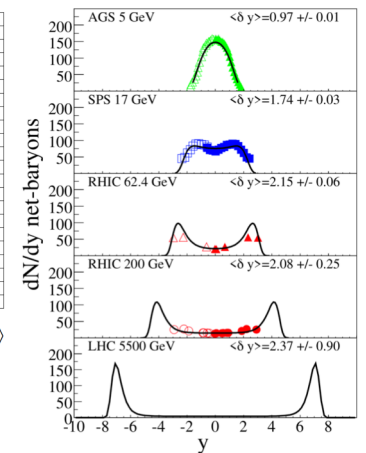
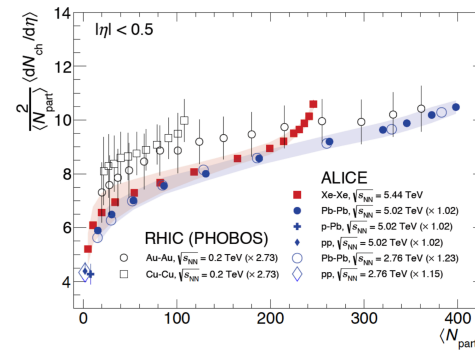
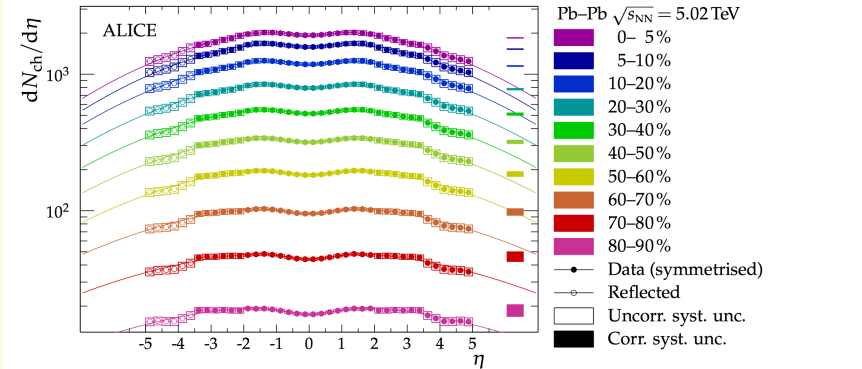
まとめ

3. 基本的な図やデータの理解

- 荷電ハドロン分布 $dN_{ch}/d\eta$
系のエネルギー・モデルの規格化に関する知見が得られる

- $dN_{ch}/d\eta$ の N_{part} 分布
系のジオメトリに関する情報が得られる

- ネットバリオン分布 dN_B/dy
衝突でどれだけ運動量を交換したか(透明度)を評価できる



etc ...