

# 重イオン衝突実験における 電荷・バリオン二次キュムラント比

北沢正清、江角晋一、野中俊宏

in preparation

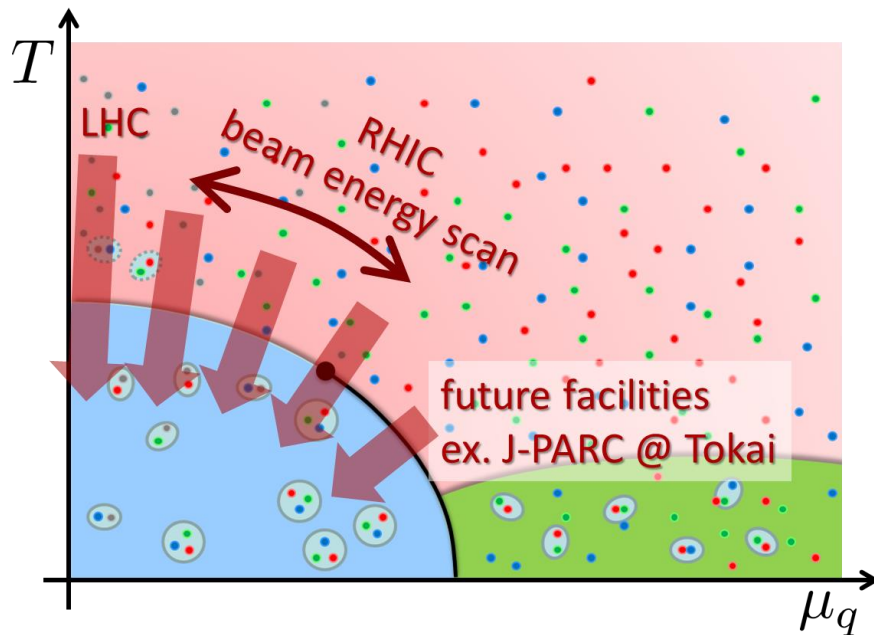
日本物理学会2021年秋季大会, オンライン, 2021/9/16

16aV2-14

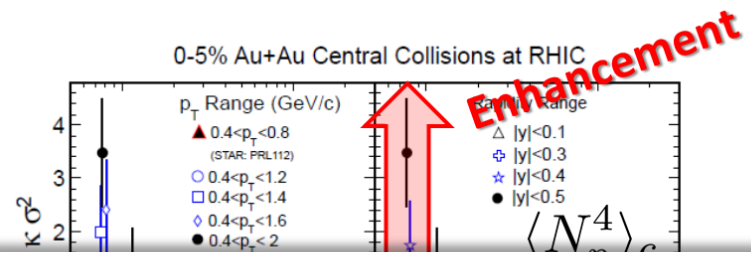
# 保存電荷のイベント毎ゆらぎ

## QCD臨界点探索の有力な観測量

### QCD相図



### 高次ゆらぎの実験結果



### 非ガウスゆらぎで探る宇宙最高密度の相転移



北沢 正清  
大阪大学大学院理学研究科  
kitazawa@phys.sci.osaka-u.ac.jp



野中 俊宏  
筑波大学教理学物質系  
nonaka.toshihiro.ge@u.tsukuba.ac.jp



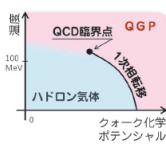
江角 晋一  
筑波大学教理学物質系  
esumi.shinichi.ge@u.tsukuba.ac.jp

現在、およそ  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> という超高密度で実現するとされる相転移の実験的探索が世界各地の実験施設で行われているのをご存じだろうか。この相転移とは、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) が低温かつ超高密度の物質中で引き起こす一次相転移と、その一次相転移線の端点である QCD 臨界点のことである。  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> という密度は、原子核の飽和密度  $\rho_0 = 2.5 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> を大きく上回り、現在の宇宙における最高密度状態の中性子星中心部に匹敵する。この相転移を、加速した重い原子核を衝突させる実験である高エネルギー重イオン衝突によって地上で実現し、その性質を調べるための実験が進められているのである。

これら一連の実験が目指す最重要課題が、ビームエネルギー走査による高密度領域の相構造探索である。これら一連の研究の中でも近年特に精力的に調べられてきたのが、非ガウスゆらぎを使った QCD 臨界点の実験的探索である。ゆらぎはキュムラントとよばれる量で特徴づけられるが、QCD 臨界点でゆらぎが発散するのに伴い、QCD 臨界点周辺では各次数のキュムラントに特徴的な発散や符号変化などの異常が現れることが理論的に指摘されている。一方、重イオン衝突実験では、衝突事象毎解析とよばれる手法で保存電荷数などの観測量のゆらぎが測定でき、  $10^6$  をも凌ぐ膨大な衝突事象の解析によって現在最高で 6 次までキュムラントが解析

用語解説

QCD 臨界点: QCD 真空にクォーク数密度を印加していくと、  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> 付近で真空構造の変質に伴う一次相転移が起きる可能性が指摘されている。この一次相転移は有限温度で端点、すなわち臨界点をもつ。この点を QCD 臨界点とよび、現在ビームエネルギー走査によるその実験的探索が注目されている。



# 非ガウスゆらぎ (高次キュムラント)

## □ 高次キュムラントに着目する**利点**

- 相転移により敏感な振る舞い
- 比を取ることで体積依存性を相殺
- 格子QCD数値計算との直接比較

## □ **欠点**

- 正確な測定がより困難
  - より大きな誤差
  - 体積ゆらぎ、検出器効果等の影響大
- 非自明な動的発展

$$\langle \delta N^m \rangle = \chi_m V$$

➡ 低次ゆらぎから順に理解していくべきでは？

# 保存電荷ゆらぎと体積

Asakawa-Heinz-Müller/Jeon-Koch ('00)

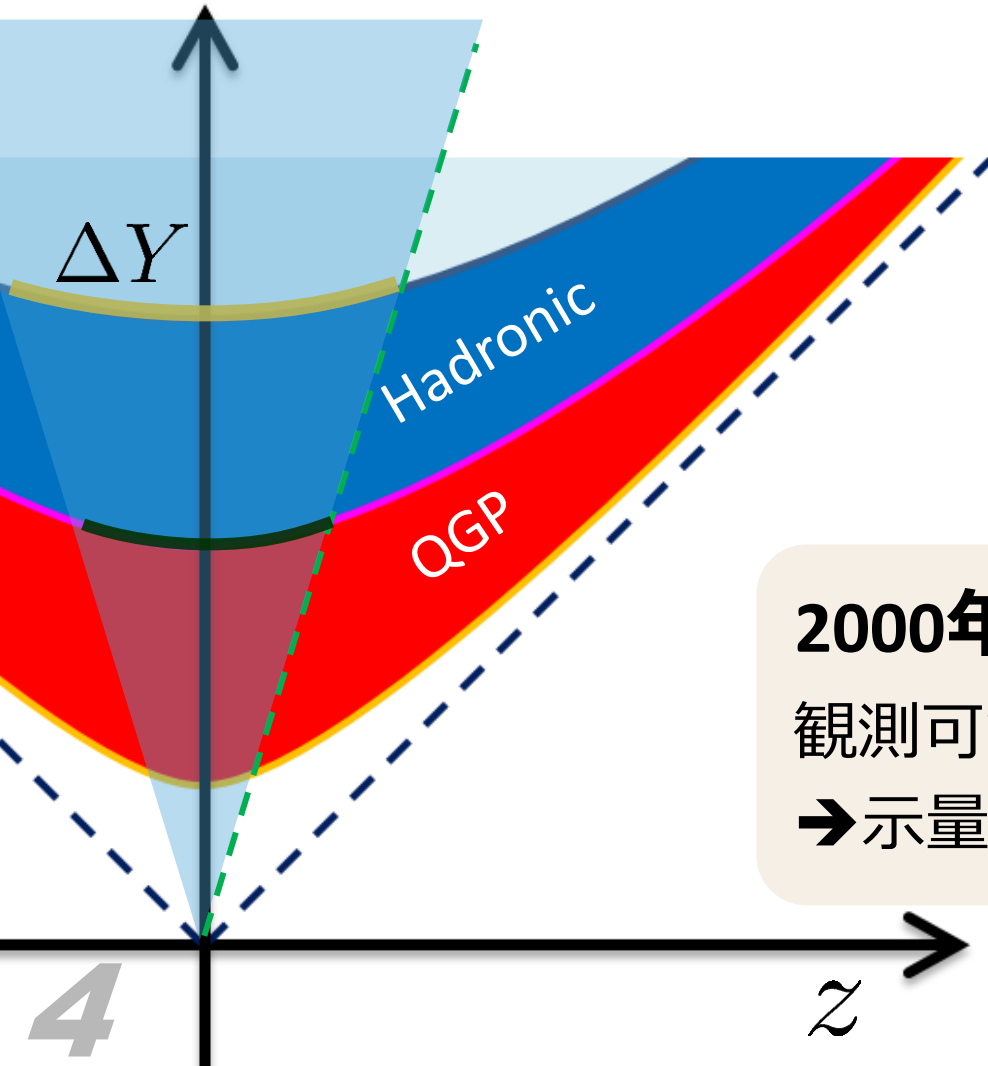
$$\langle \delta N^2 \rangle = \chi_2 V$$

ラピディティ  $\Delta y$  で観測される  
示量変数の比を取る

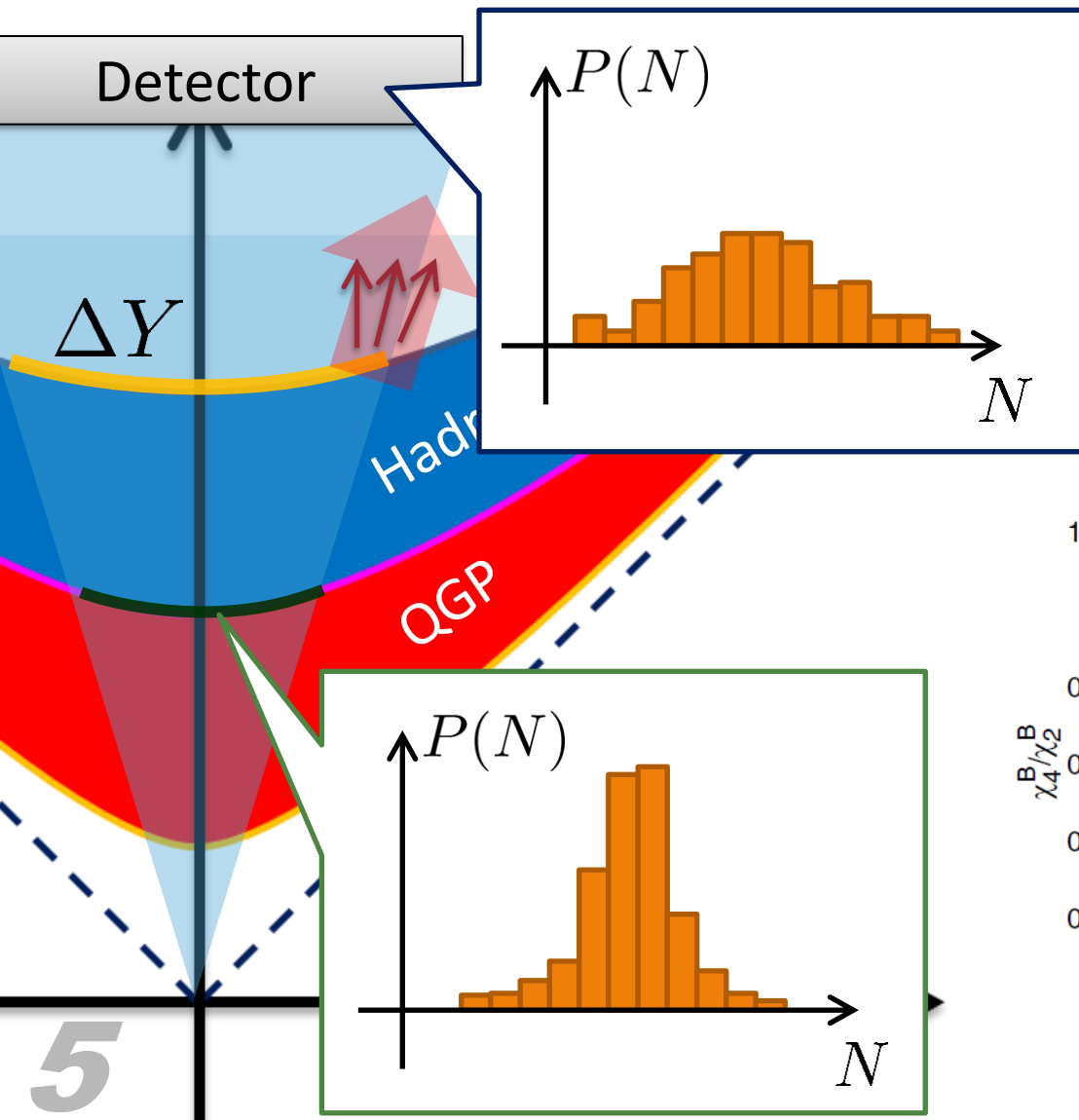
↓  
体積変化が相殺

## 2000年頃の議論

観測可能な保存電荷ゆらぎ： $\langle N_Q^2 \rangle_c$   
→ 示量変数としてエントロピーを使う



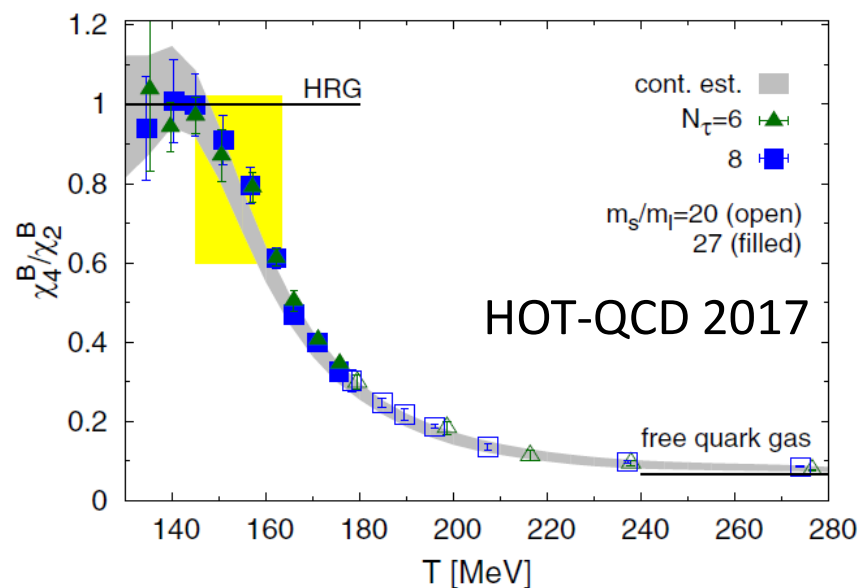
# ゆらぎの動的時間発展



## よくある誤り

観測されるゆらぎ  
= 化学FO時の熱ゆらぎ

参照：Asakawa, MK, Muller,  
PRC101 (2020)



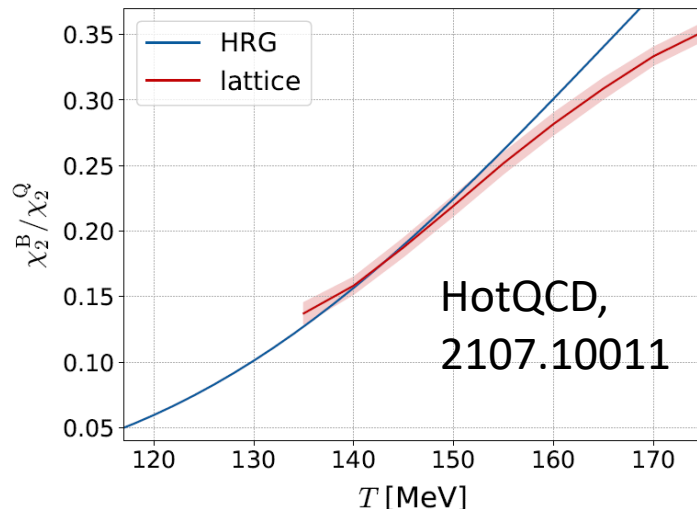
$$\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$$

- 最も堅実に観測可能な保存電荷ゆらぎの比
- 格子QCD熱力学量との比較が可能

$$\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$$

- 最も堅実に観測可能な保存電荷ゆらぎの比
- 格子QCD熱力学量との比較が可能

## □ 格子QCD & HRG



$T_c$ 付近で概ね線形

## □ 実験データ by STAR Collab.

- ① B, Q, S in  $\eta$  space  
PRC100,014902('19)
- ② B in  $y$  space  
PRC104,024902('21)

②の $\langle N_B^2 \rangle_c$ と①の $\langle N_Q^2 \rangle_c$ を利用

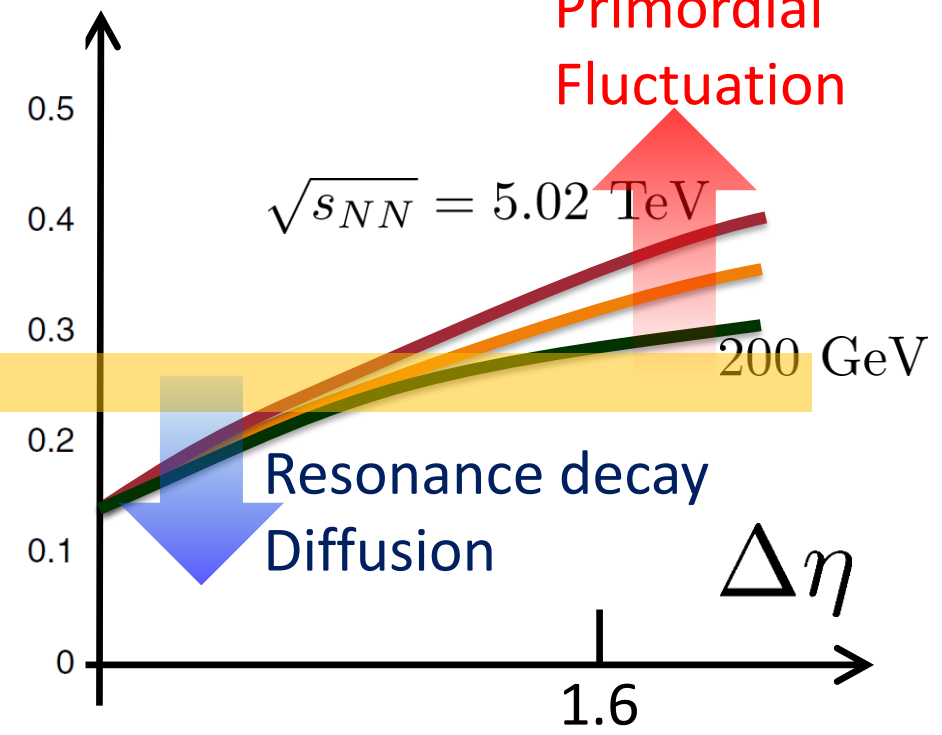
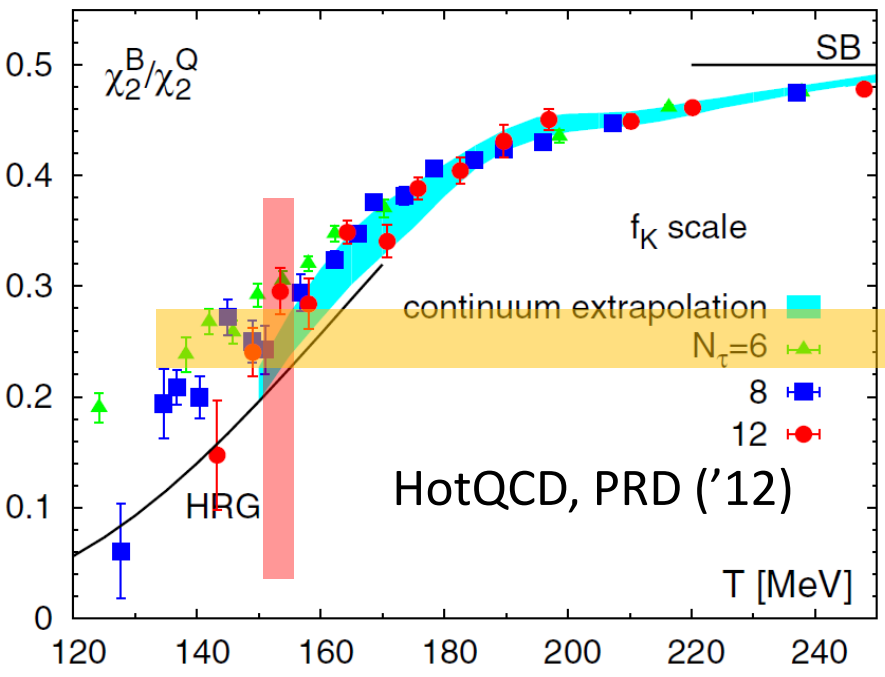
両者の比較から推定される“温度”は？

# B/Q Cumulant Ratio

**LATTICE**

$$\frac{\langle \delta N_B^2 \rangle}{\langle \delta N_Q^2 \rangle}$$

**Experiment**



**$\Delta\eta$  dependence for tracing back the history!**



# $p_T$ カットの影響

実験における粒子数測定

$$0.4 < p_T < 1.6, 2.0 \text{ [GeV/c]}$$



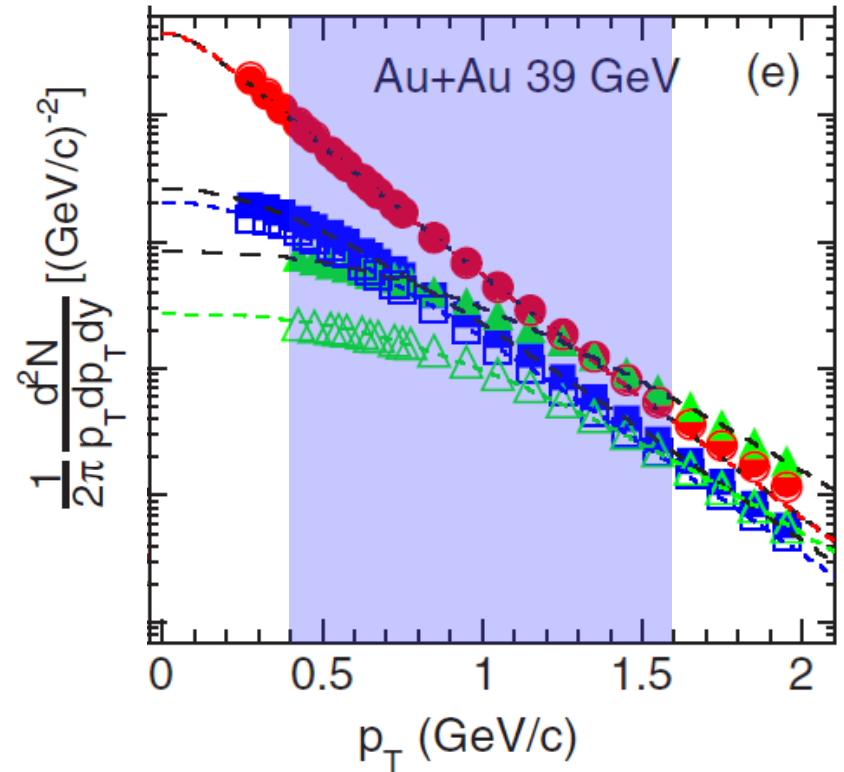
PRC100,014902('19)

PRC104,024902('21)

観測される粒子は全体の

- 荷電粒子：54%
- 陽子：81%

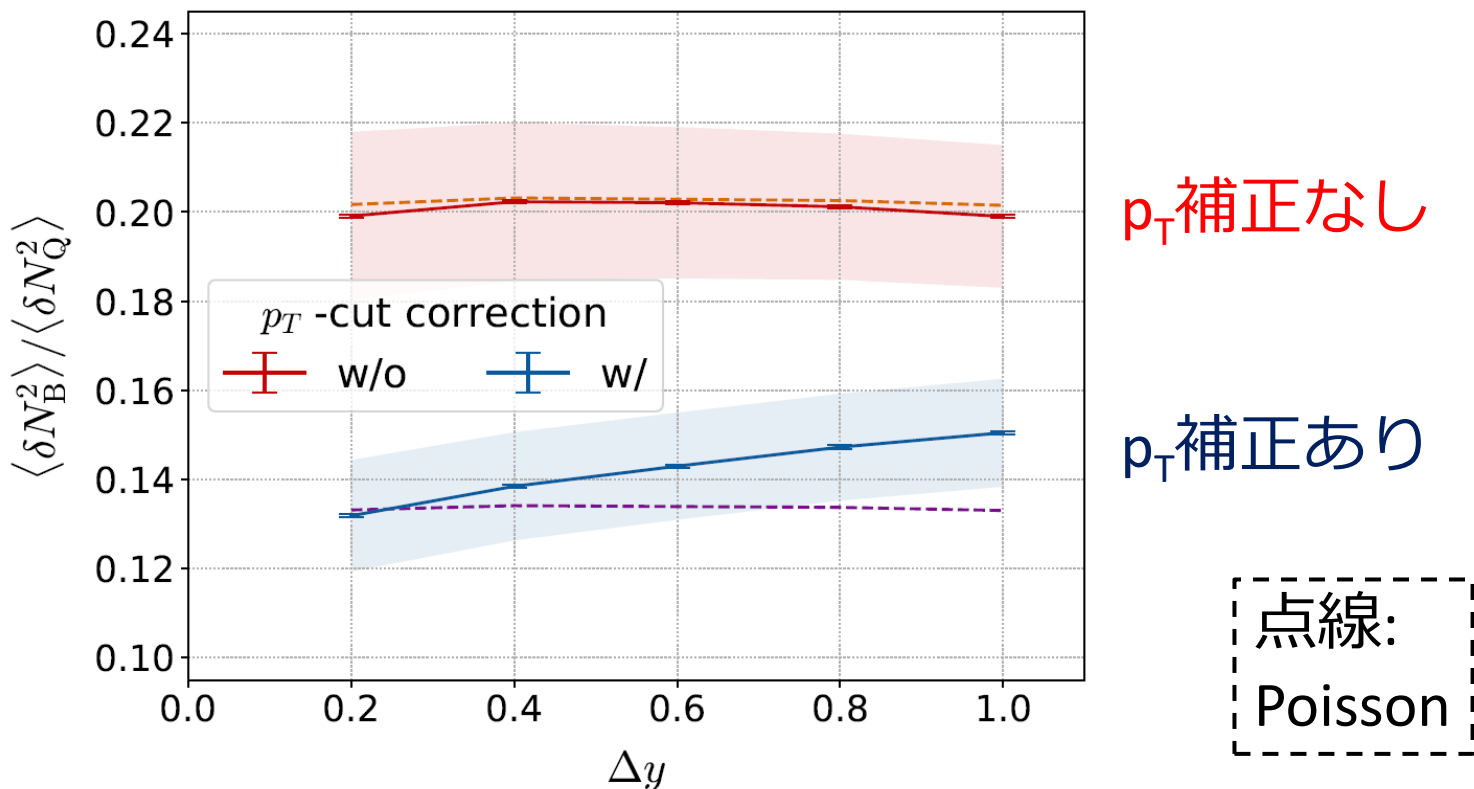
blast wave近似@  $v_{s_{NN}}=200 \text{ GeV}$



検出効率補正と同様の補正が必要

本研究：二項分布（粒子分布の独立性）を仮定した補正

# 実験値から構成した $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$



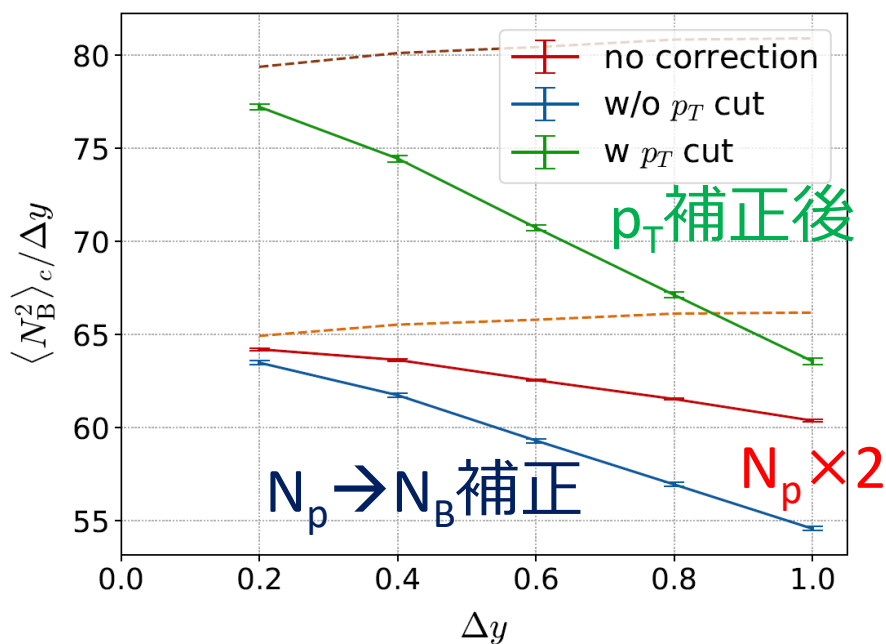
- $p_T$ カット補正は  $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$  を減少させる
- 補正後の  $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$  には有意な  $\Delta y$  依存性

➡ 時空発展のダイナミクスが介在

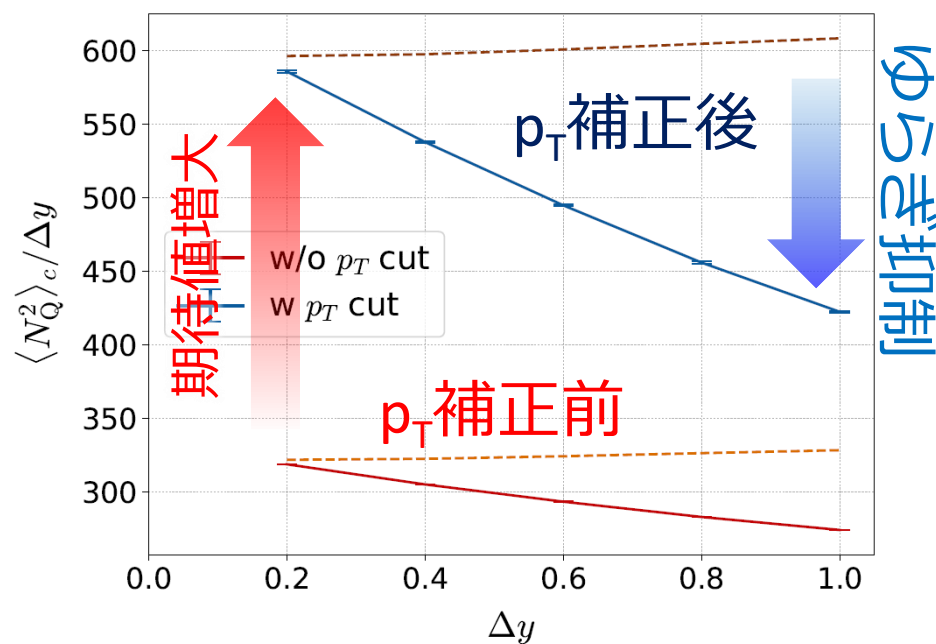
$$\langle N^2 \rangle_c / \Delta y$$

点線:  
Poisson

$$\langle N_B^2 \rangle_c / \Delta y$$

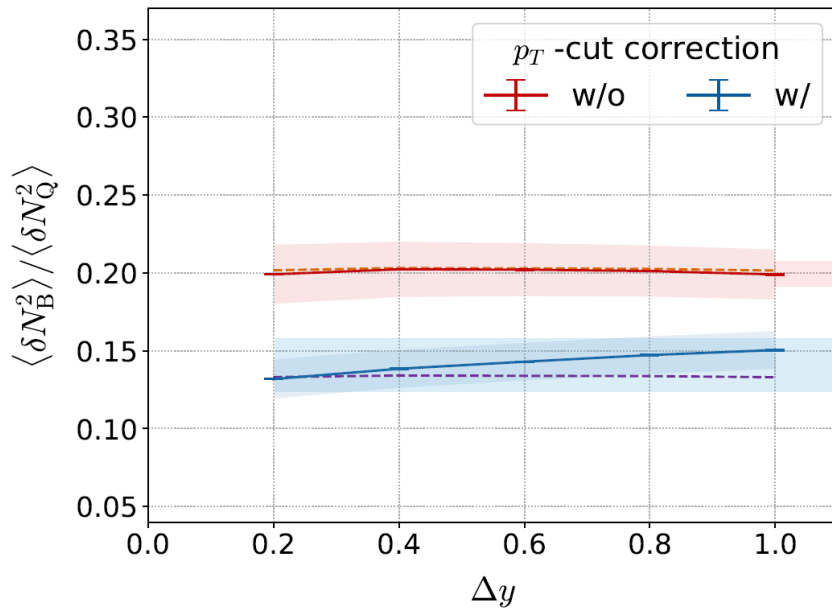


$$\langle N_Q^2 \rangle_c / \Delta y$$

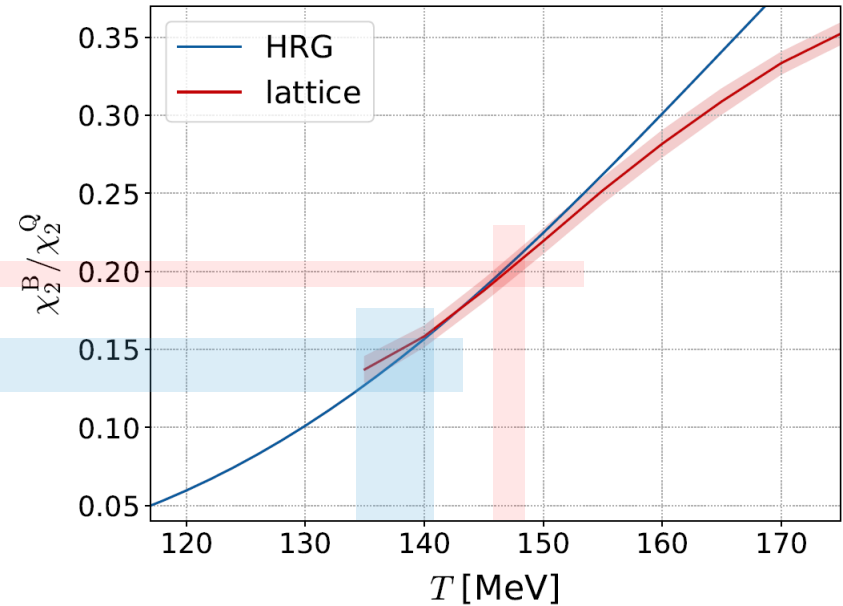


# HIC vs LAT

## STAR実験結果



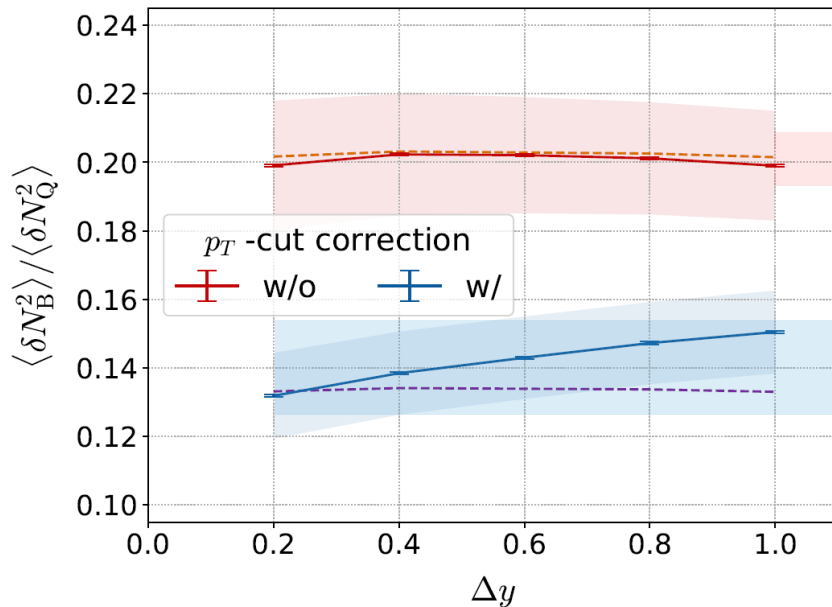
## 格子QCD + HRG



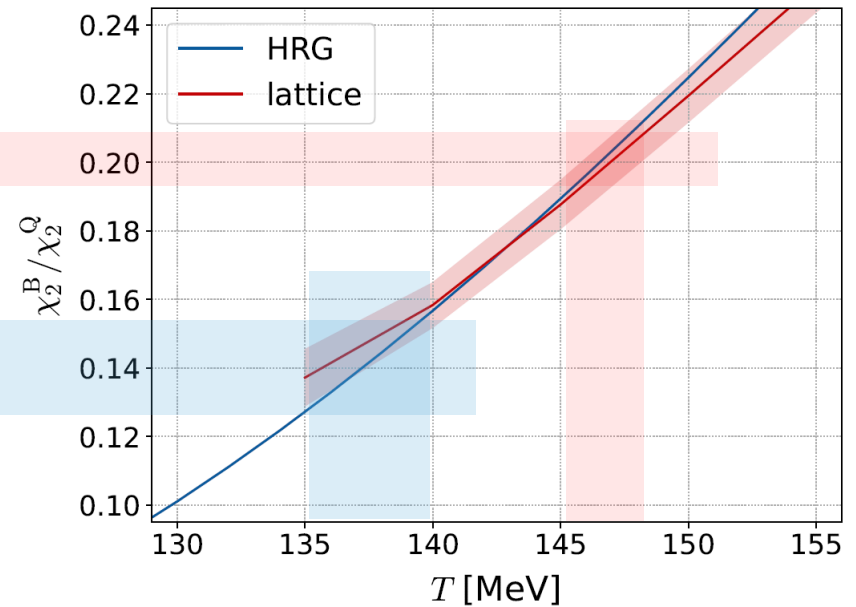
- 実験値を熱平衡値だと解釈すると、 $T=135\sim 140$  MeV
- 化学フリーズアウト(CFO)温度より有意に低い
- 我々はCFOのゆらぎを観測しているわけではない

# HIC vs LAT

## STAR実験結果



## 格子QCD + HRG



- 実験値を熱平衡値だと解釈すると、**T=135~140MeV**
- 化学フリーズアウト(CFO)温度より有意に低い
- 我々はCFOのゆらぎを観測しているわけではない

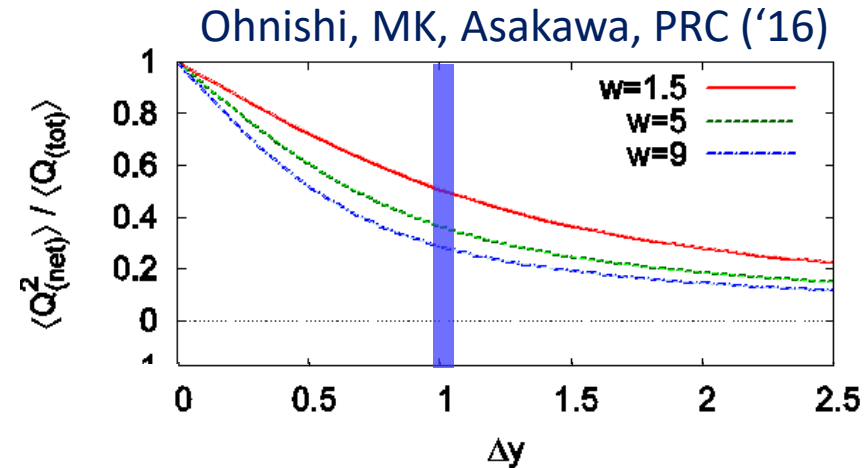
# 初期ゆらぎは見えないのか？

## □ 拡散とrapidity変換( $y \rightarrow Y$ )

- 初期ゆらぎは「にじむ」
- 拡散の効果： $Q \gg B$

## □ 共鳴崩壊の効果

- 終状態粒子の約30%は共鳴崩壊に由来
- 特に荷電粒子数が増大



- いずれも特に $\langle N_Q^2 \rangle$ を増大
- $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$ を減少させる効果

ゆらぎ解析において要配慮！

# まとめ

- 重イオン衝突実験で観測される保存電荷ゆらぎは、 $T = T_{\text{chem}}$ での熱ゆらぎ**ではない**。
- $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$ の測定値と格子QCDの値の比較で得られる”温度”は $T_{\text{chem}}$ と有意にずれている。
- 拡散と共鳴崩壊は特に電荷ゆらぎを大きく変更。
- 運動量 $p_T$ カットはゆらぎの測定値に大きな影響。要補正。
- **これらの効果は、RHIC-BESで観測されたゆらぎを解釈する際にも適切に考慮されるべきである。**

# 今後の課題

## □理論

- 拡散・共鳴崩壊の効果の定量的見積もり
- 運動量カット補正の適切な取り扱い

## □実験

- ラピディティ空間での $Q, s$ ゆらぎ測定
- その他の2次(混合)キュムラント  $\langle N_B N_Q \rangle_c, \langle N_s^2 \rangle_c, \dots$
- ラピディティ幅 $\Delta y$ の拡張
- 高次キュムラントの $p_T$ カット補正
- LHCエネルギーでのBQ比