

ゆらぎ + Lattice ～バリオン・電荷ゆらぎ比の解析～

北沢正清（大阪大学）

MK, S. Esumi, T. Nonaka, in prep.

保存電荷のイベント毎ゆらぎ

■ QCD相構造探索の有用な観測量

QCD相図



解説

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
筑波大学数理学部
aonaka.toshiro.ge@u.tsukuba.ac.jp

江角晋一
筑波大学数理学部
enami.shinichi.ge@u.tsukuba.ac.jp

現在、およそ 10^{15} g/cm³ 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/cm³ という密度は、原子核の飽和密度 $\rho_0 = 2.5 \times 10^{14}$ g/cm³ 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、

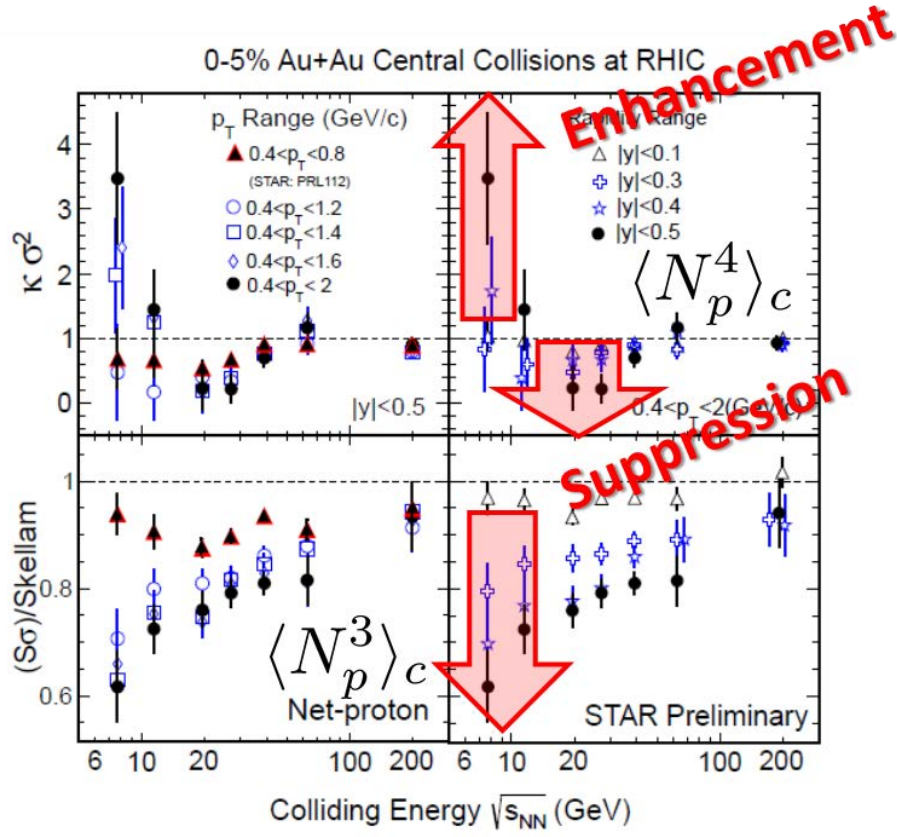
これら一連の実験が目指す最重要課題が、ビームエネルギー走査による高密度領域の相構造探索である。これら一連の研究の中でも近年特に精力的に調べられてきたのが、**非ガウスゆらぎ** を使った QCD 臨界点の実験的探索である。ゆらぎはキュムラントとよばれる量で特徴づけられるが、QCD 臨界点でゆらぎが急変するに伴い、QCD 臨界点周辺では各次数のキュムラントに特徴的な発散や符号変化などの異常が現れることが理論的に指摘されている。一方、重イオン衝突実験では、衝突事象節解析とよばれる手法で保存電荷数などの観測量のゆらぎが測定でき、

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/cm³ 付近で真空構造の急変に伴う一次相転移が起きる可能性が指摘されている。この一次相転移が存在する場合、相転移線は有限温度で端点、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目ざされている。

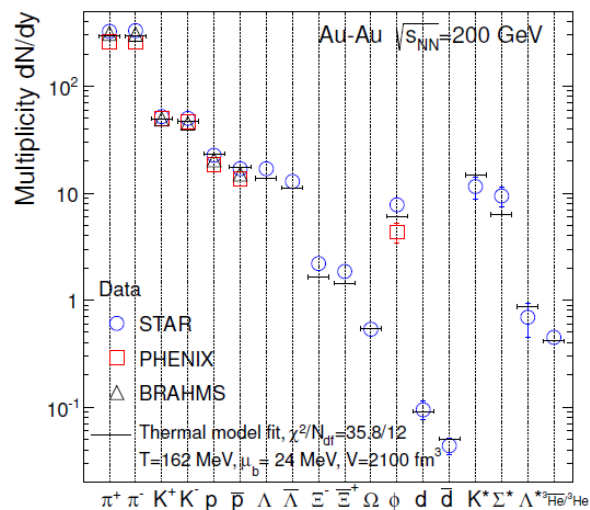
図例: QCD 相図。QCD 臨界点 (QCP) とハドロン気体の相転移を示す。

高次ゆらぎの実験結果

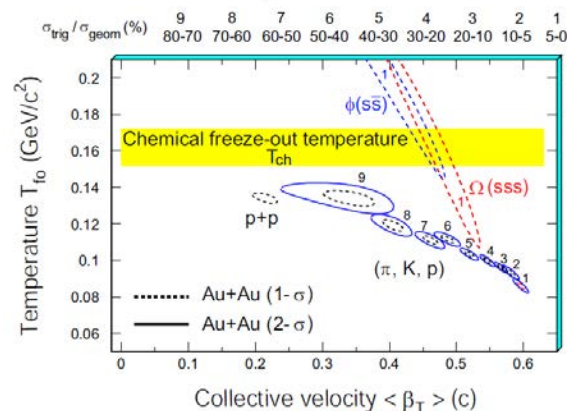
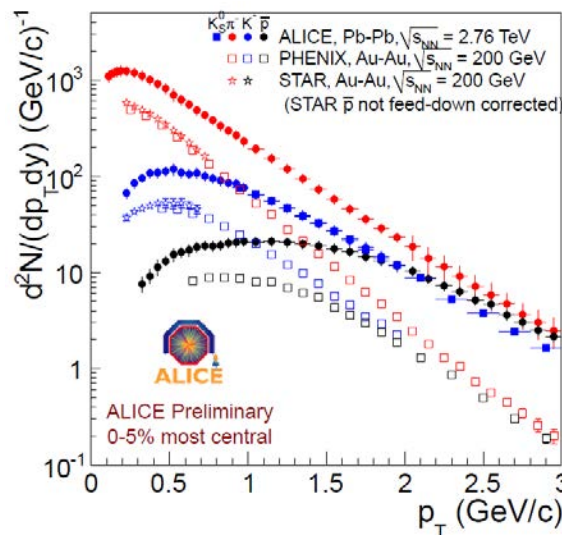


フリーズアウト

■ 化学凍結

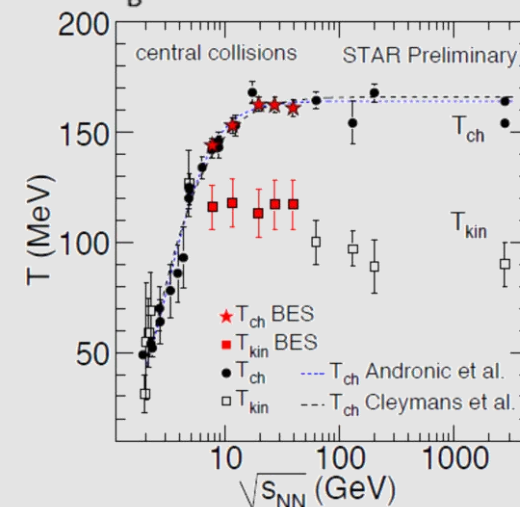
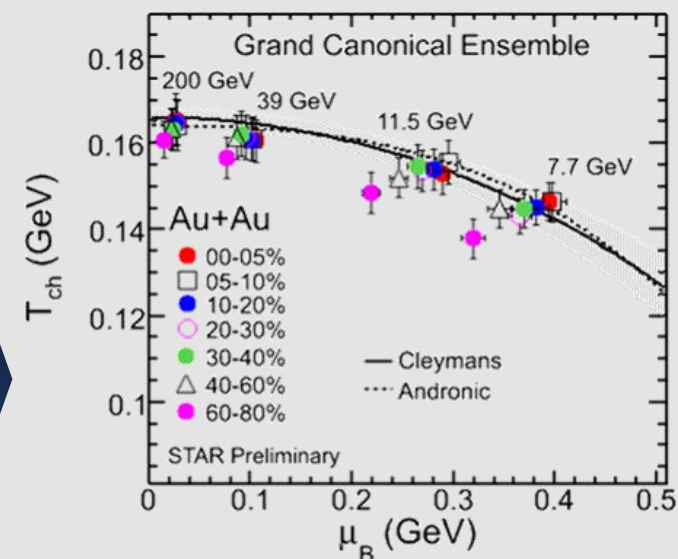


■ 熱的凍結



p_T スペクトル $\rightarrow T, (\beta_T)$

■ T, μ_B の”測定”



粒子収量比 $\rightarrow T, \mu_B$

※ハドロン自由気体を仮定
体積は自由パラメータ

キュムラント

キュムラント

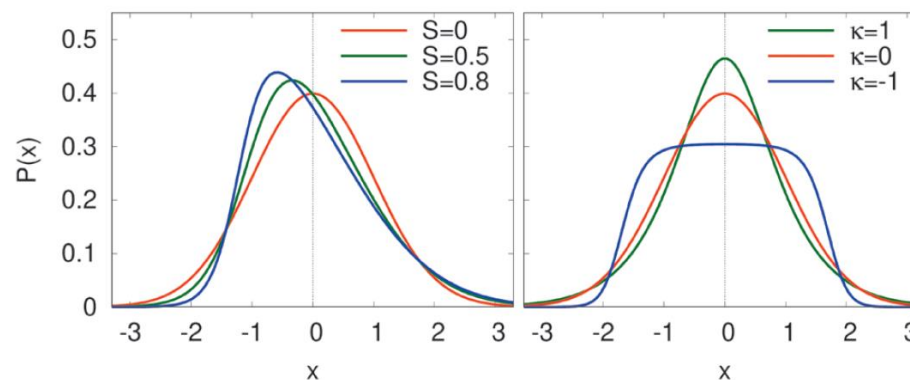
$$\left\{ \begin{array}{ll} \langle N \rangle_c = \langle N \rangle & \text{期待値} \\ \langle N^2 \rangle_c = \langle \delta N^2 \rangle & \text{分散} \\ \langle N^3 \rangle_c = \langle \delta N^3 \rangle \\ \langle N^4 \rangle_c = \langle \delta N^4 \rangle - 3\langle \delta N^2 \rangle^2 \end{array} \right.$$

■ 歪度

$$S = \frac{\langle N^3 \rangle_c}{\langle N^2 \rangle_c^{3/2}}$$

■ 尖度

$$\kappa = \frac{\langle N^4 \rangle_c}{\langle N^2 \rangle_c^2}$$



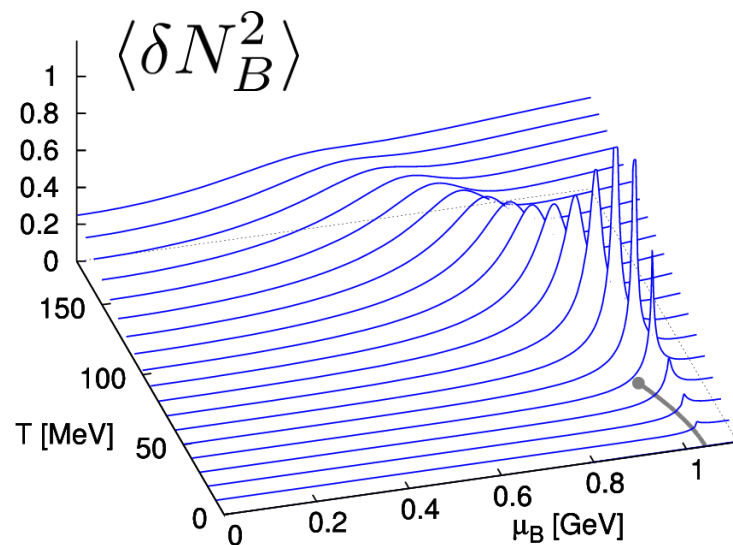
■ 重要な性質

- キュムラントは示量変数: $\langle N^m \rangle_c = \chi_m V$
- ガウス分布では $\langle N^3 \rangle_c = \langle N^4 \rangle_c = \dots = 0$
- ポアソン分布では $\langle N^2 \rangle_c = \langle N^3 \rangle_c = \langle N^4 \rangle_c = \dots = \langle N \rangle$

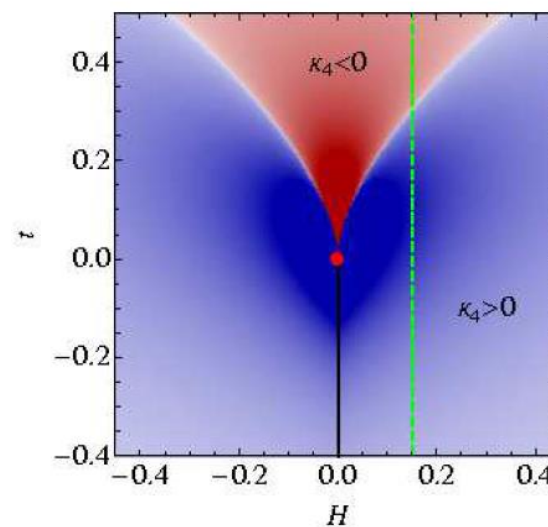
保存電荷のキュムラント

■ 特徴

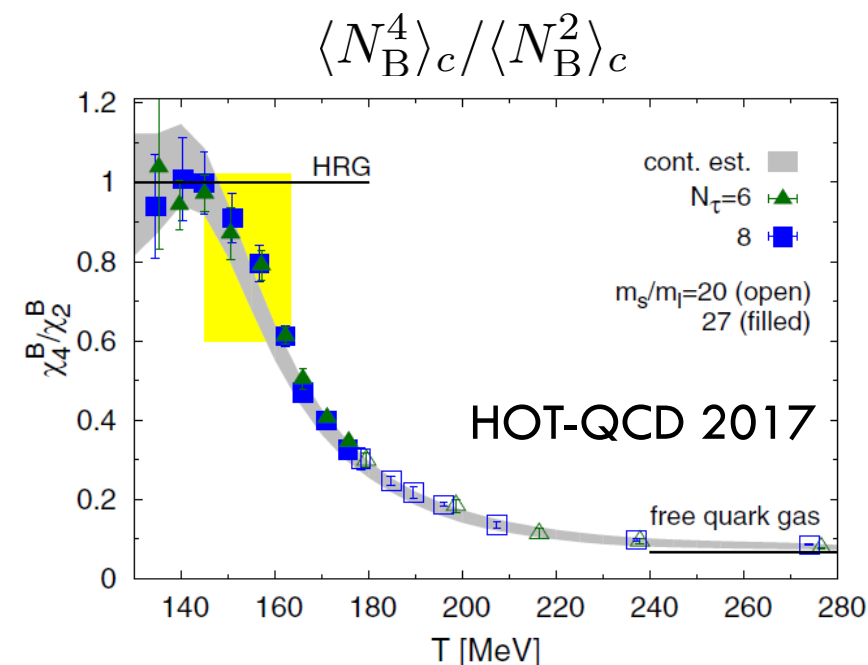
- QCD臨界点周辺で発散・符号変化
- 比を取ることで体積依存性を相殺
- 格子QCD数値計算との直接比較が可能
- 期待値と比べ、時間発展が遅い



Asakawa, Ejiri, MK (2009)



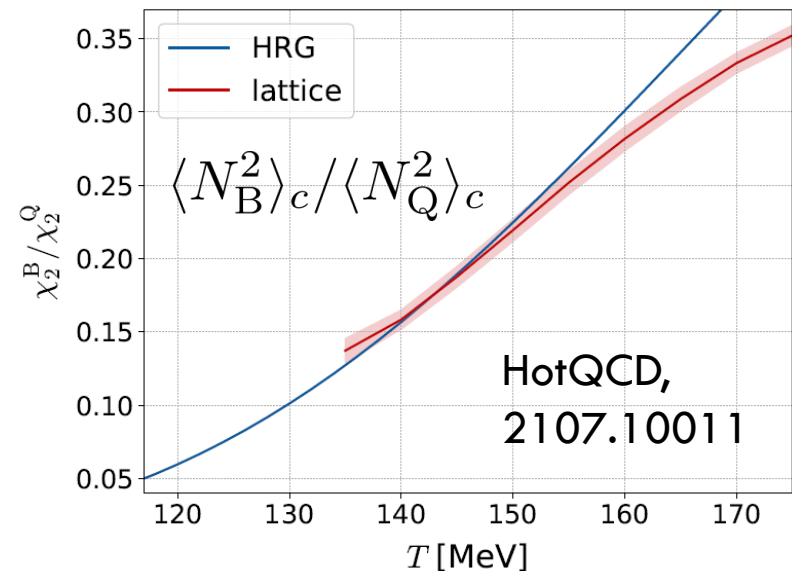
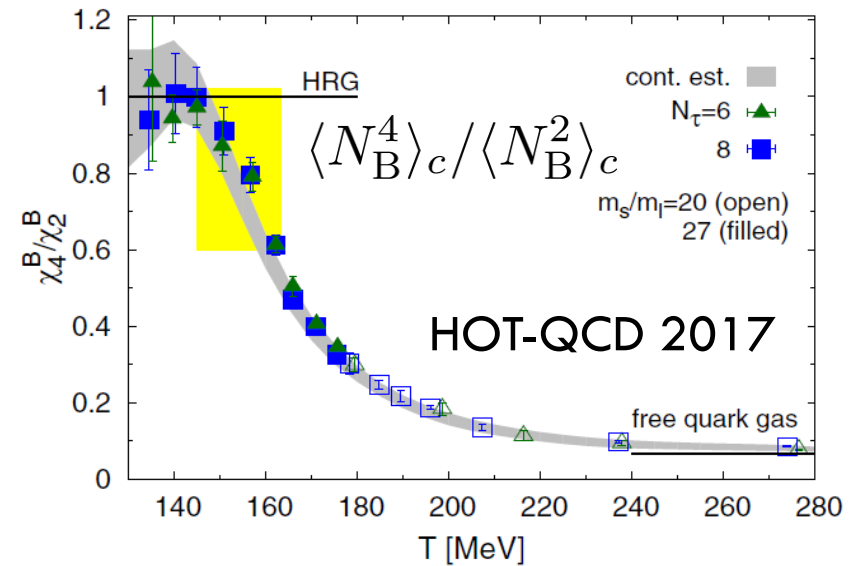
Stephanov (2011)



QCDの熱力学: 格子数値計算とハドロン共鳴気体(HRG)模型

- QCDの熱力学量は、低温・低密度極限でHRG模型の熱力学量に一致
- 格子QCD数値計算の結果は、様々なQCD熱力学量が $T \simeq 150\text{MeV}$ 以下でHRGとよく一致することを示唆

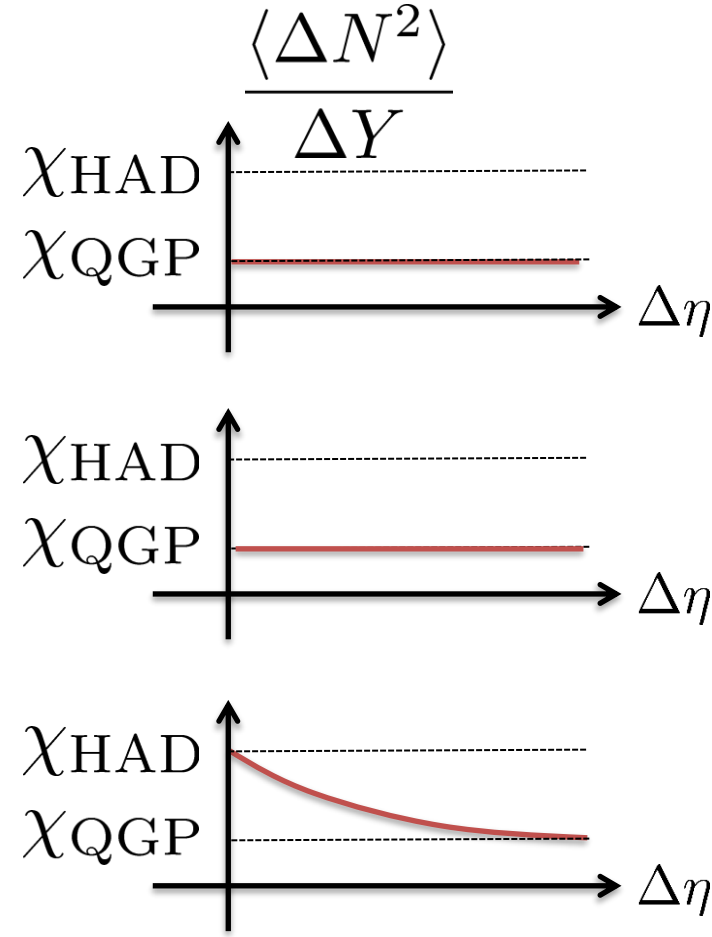
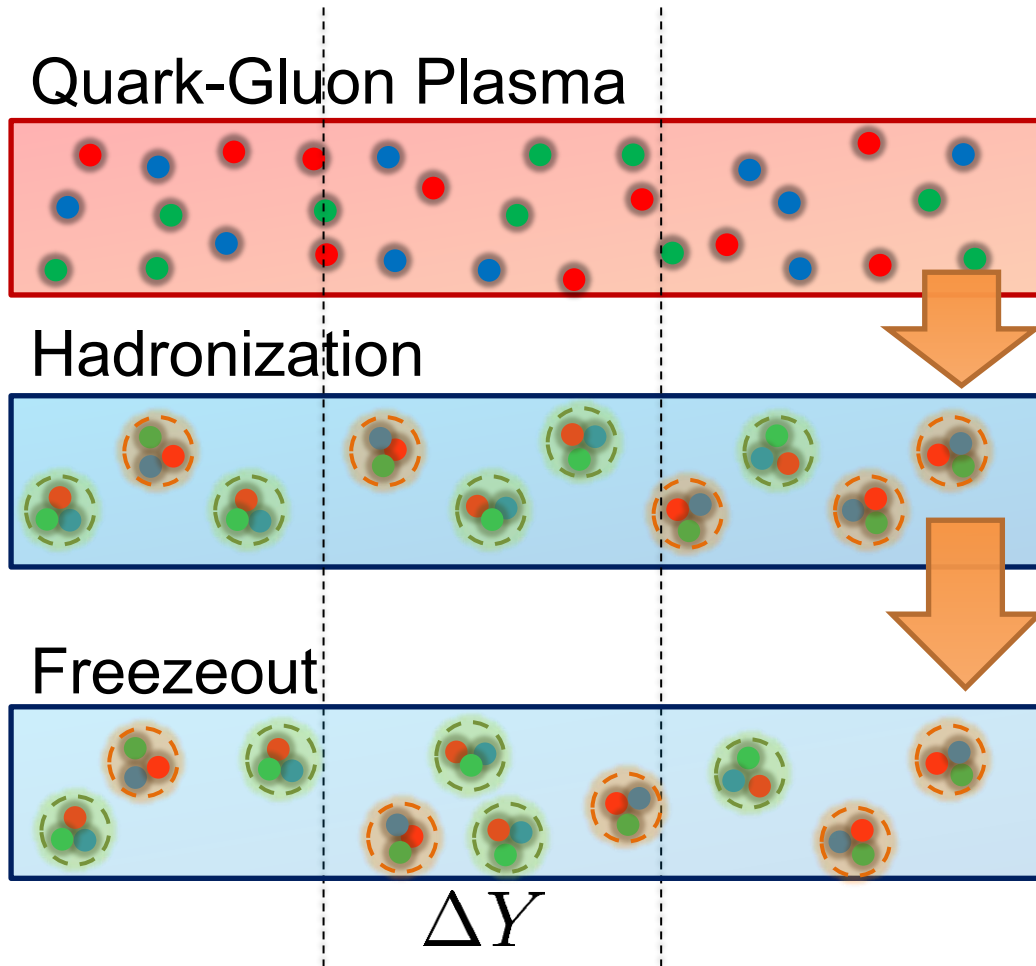
熱力学量を T の連続関数として得るには、 $T \simeq 150\text{MeV}$ 付近でHRGと格子計算結果を接続するべし



保存電荷ゆらぎの時間発展

Asakawa, Heinz, Muller, 2000

Jeon, Koch, 2000; Shuryak, Stephanov, 2001

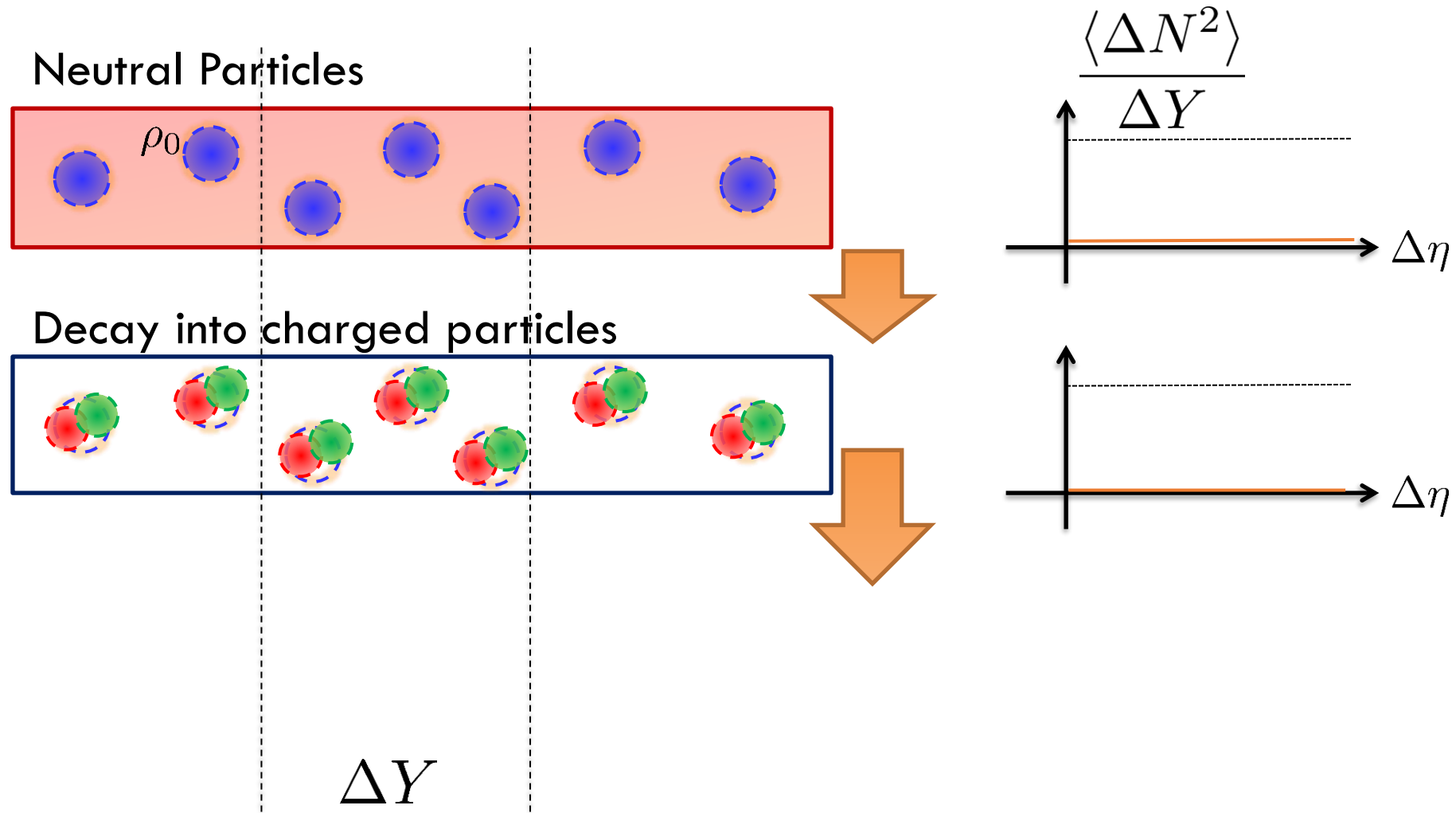


保存電荷ゆらぎ
の変化は、拡散
によって起こる

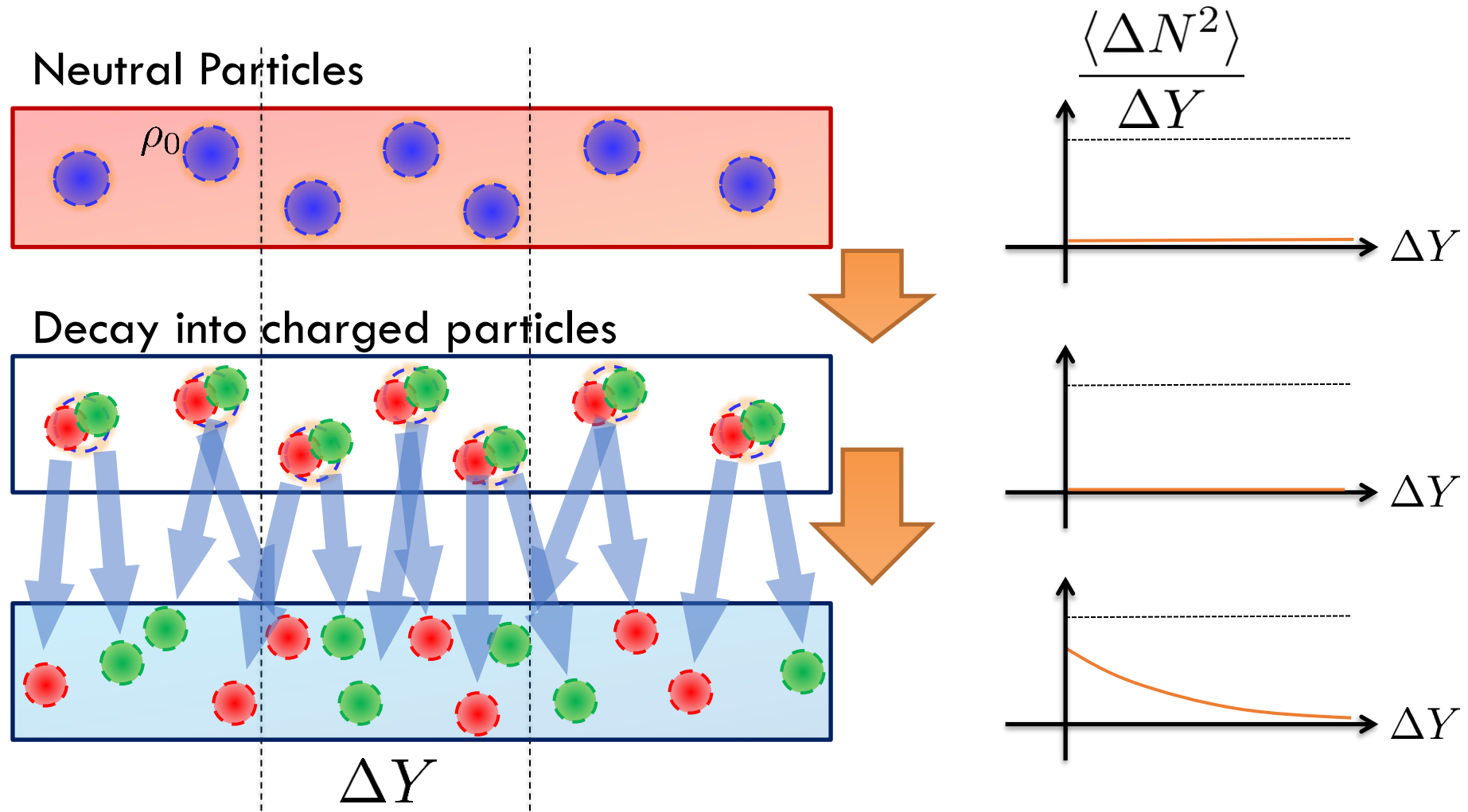


$\Delta Y \rightarrow$ 大で
緩和時間が減少。
初期のゆらぎの
値に漸近

共鳴崩壊の影響



共鳴崩壊の影響



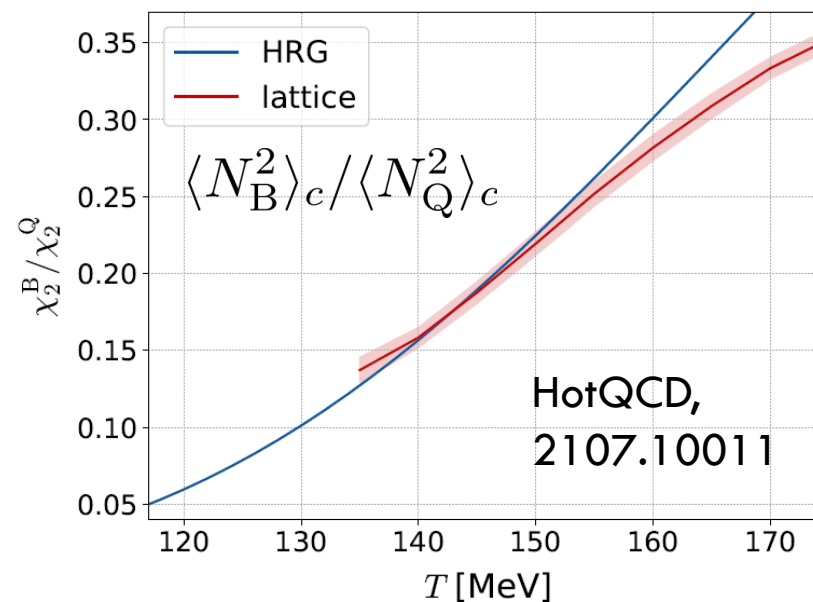
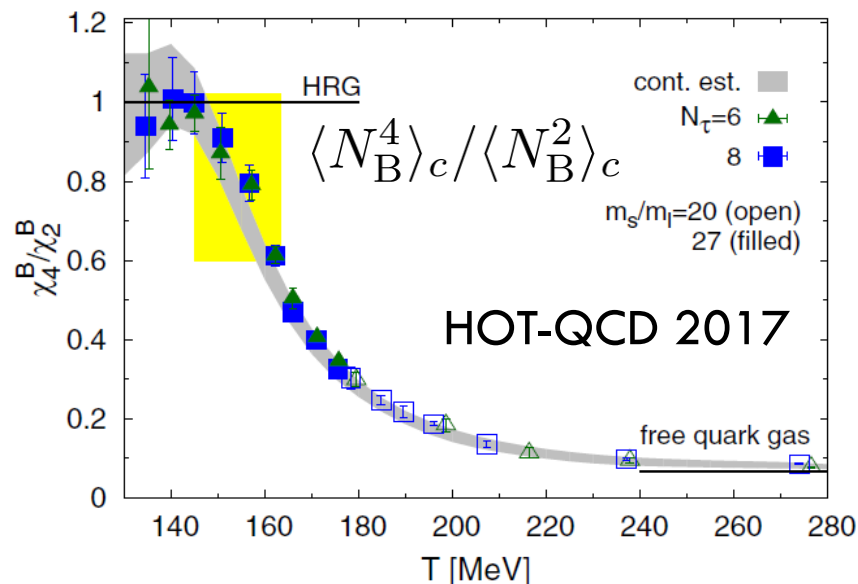
本研究の目的: $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$

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

- $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の解析
- Δy 依存性
- バリオン数、 p_T アクセプタンス補正の導入

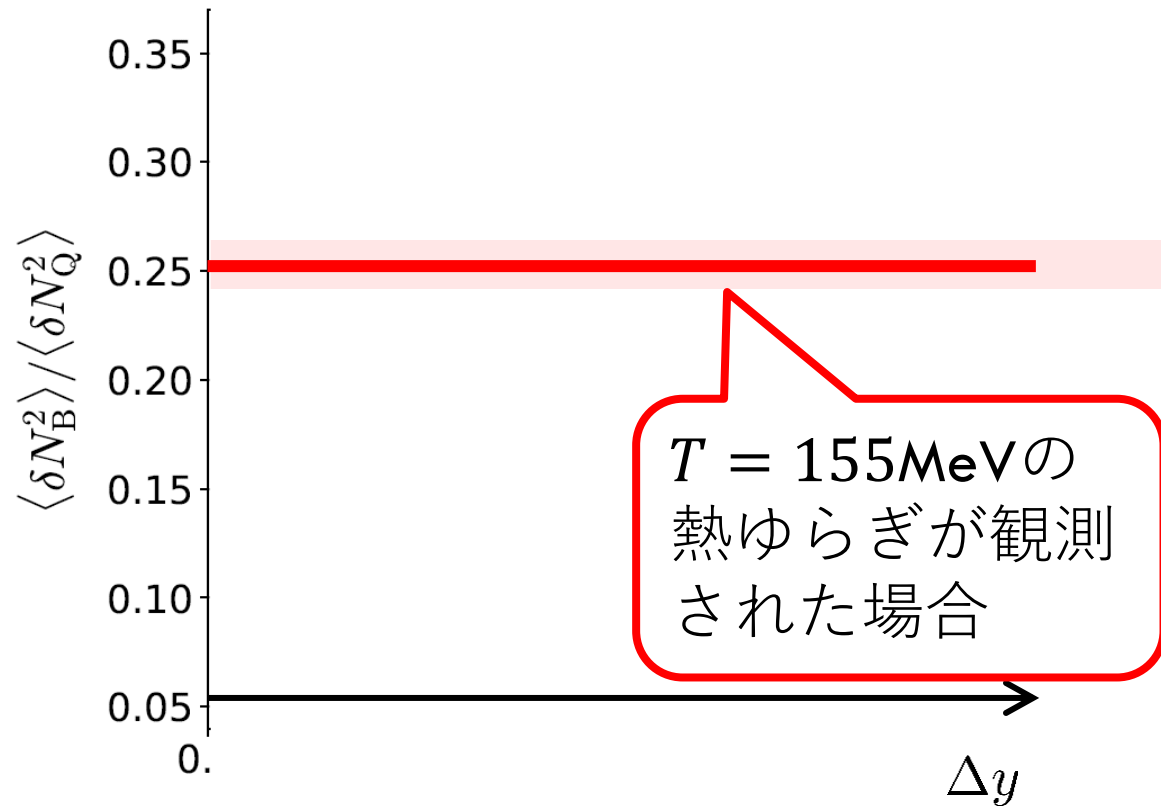


- 高次キュムラント解析の実験的不確実性を極力排除
- χ_2^B / χ_2^Q は臨界温度付近で線形的な振る舞い

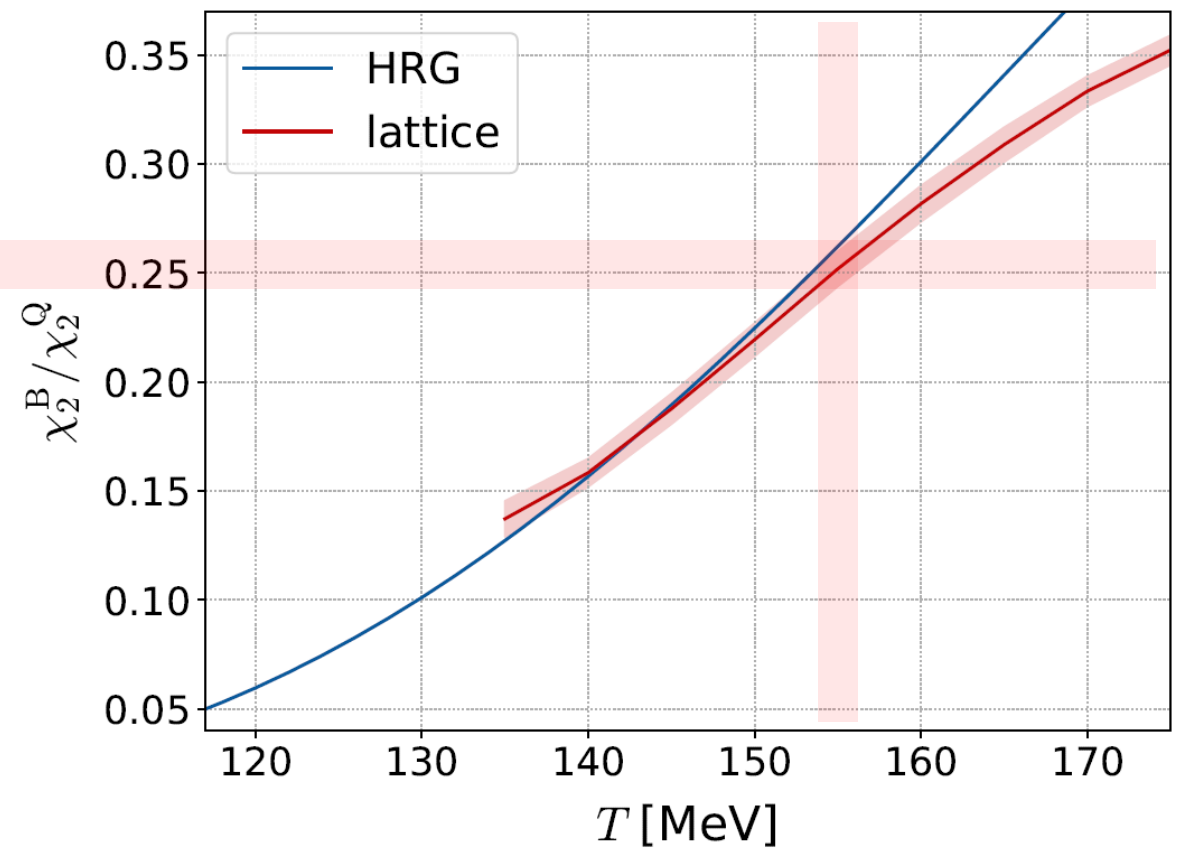


期待される結果

実験結果

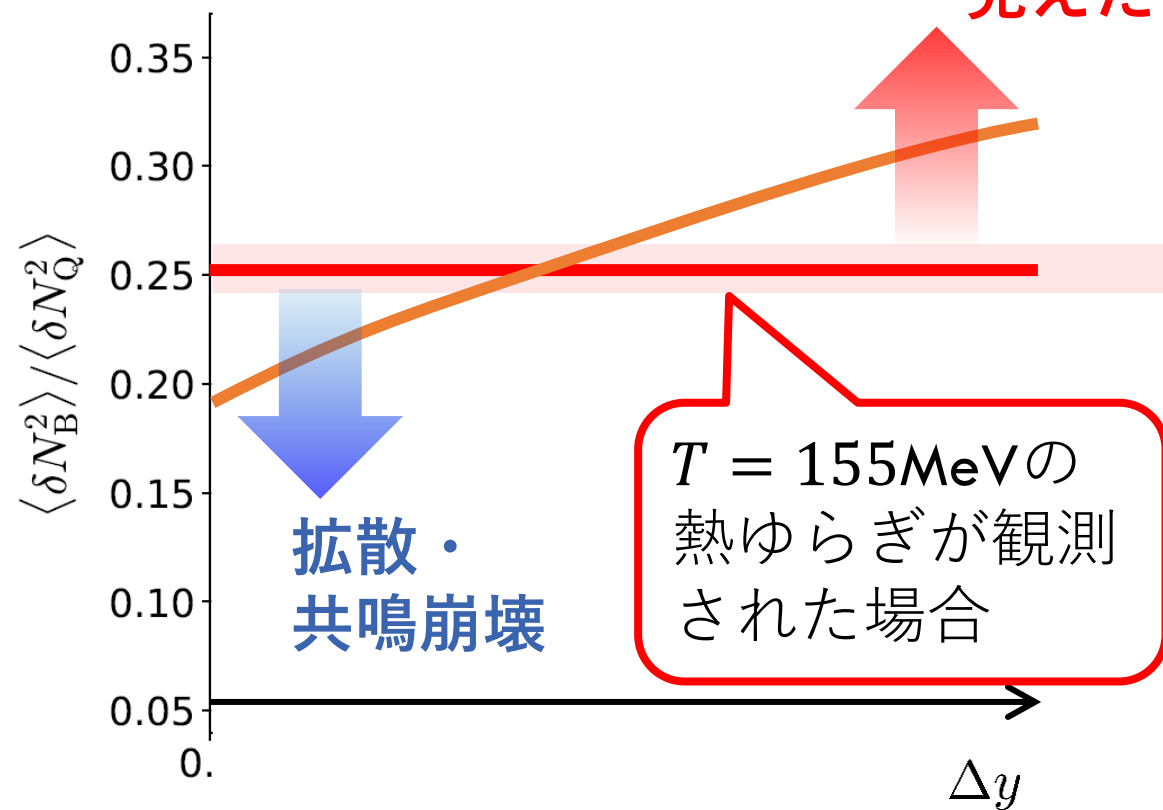


格子QCD + HRG

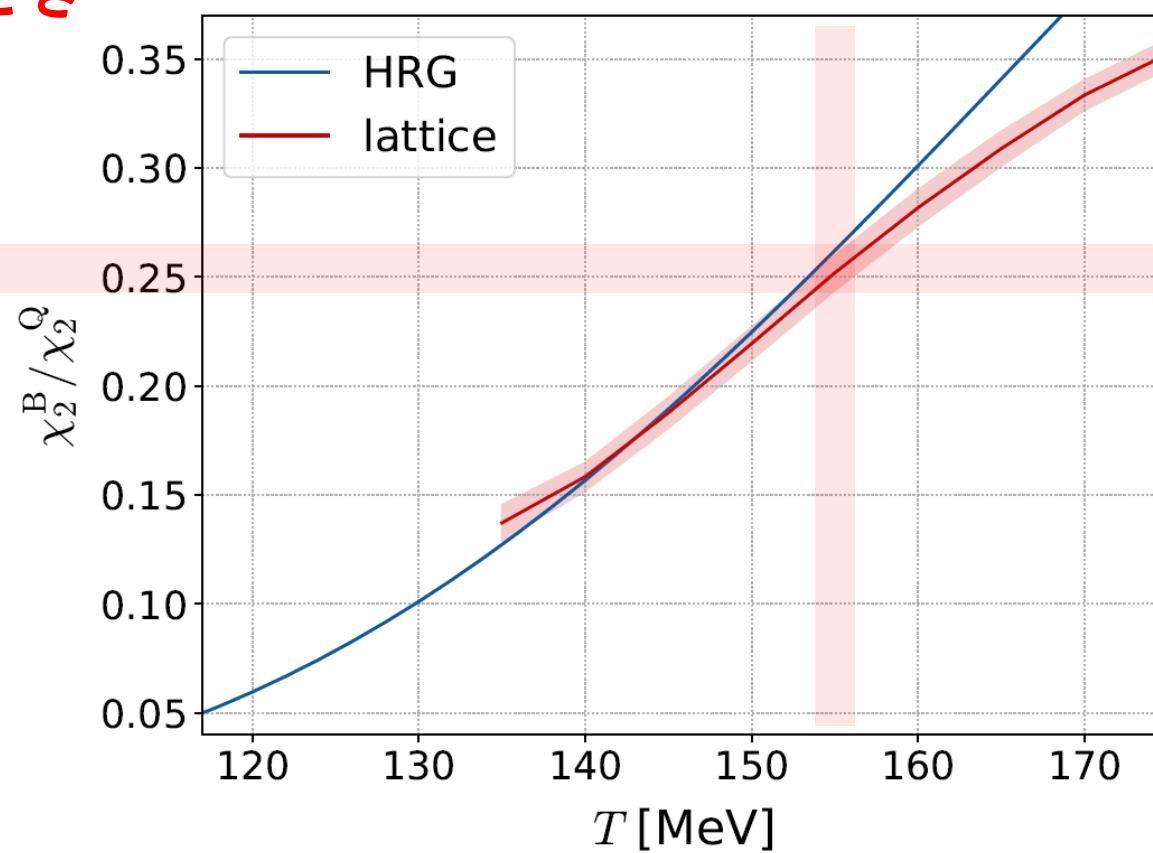


期待される結果

実験結果



格子QCD + HRG



実験データ

$$\langle N_p^2 \rangle_c$$

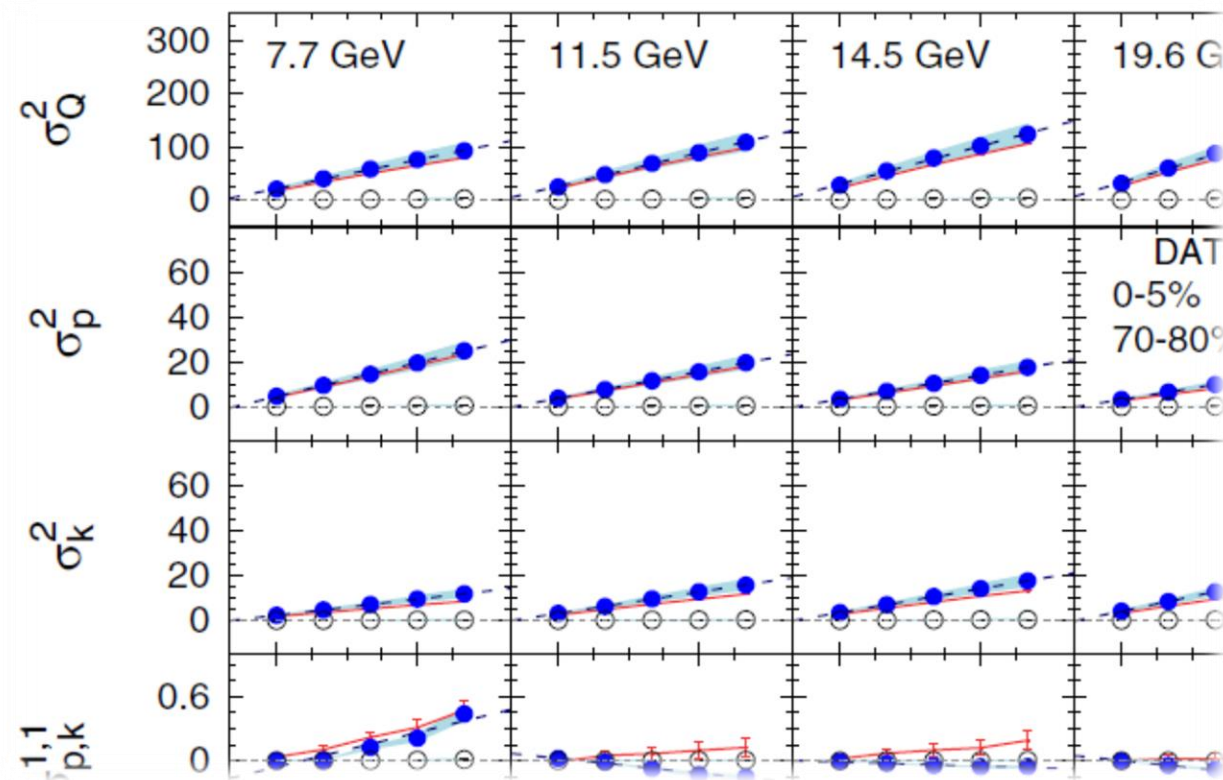
STAR, PRC104,024902 (2021)

- 4次までの陽子数キュムラント
- ラピディティ Δy 空間でのゆらぎ
- $0.4 < p_T < 2.0 \text{ GeV}/c$

$$\langle N_Q^2 \rangle_c$$

STAR, PRC100,014902 (2019)

- p, Q, S の2次(混合)キュムラント
- **擬**ラピディティ $\Delta \eta$ 空間
- $0.4 < p_T < 1.6 \text{ GeV}/c$
- Total charge: private comm. A. Chattergee



※ラピディティ空間、できるだけ広いアクセプタンスでの測定が望ましい

p_T アクセプタンス補正

実験における粒子数測定

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

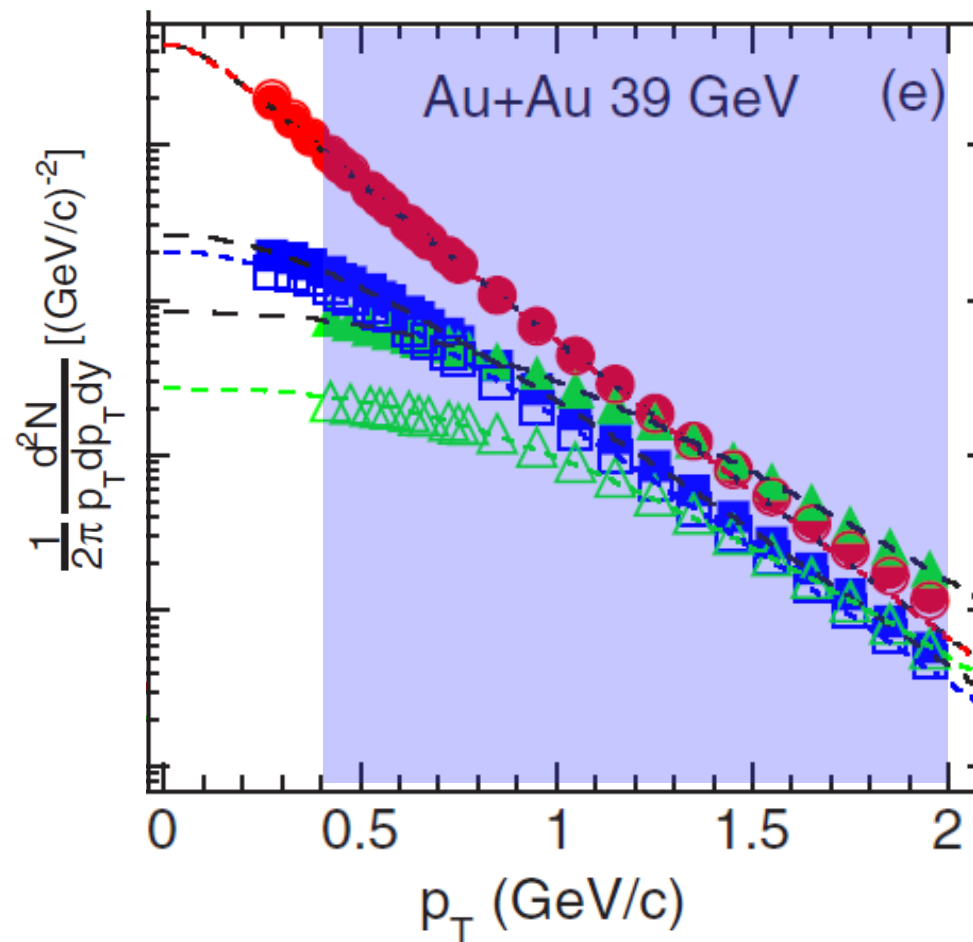
PRC100,014902('19)

PRC104,024902('21)

観測される粒子は全体の

- 荷電粒子：54%
- 陽子：81%

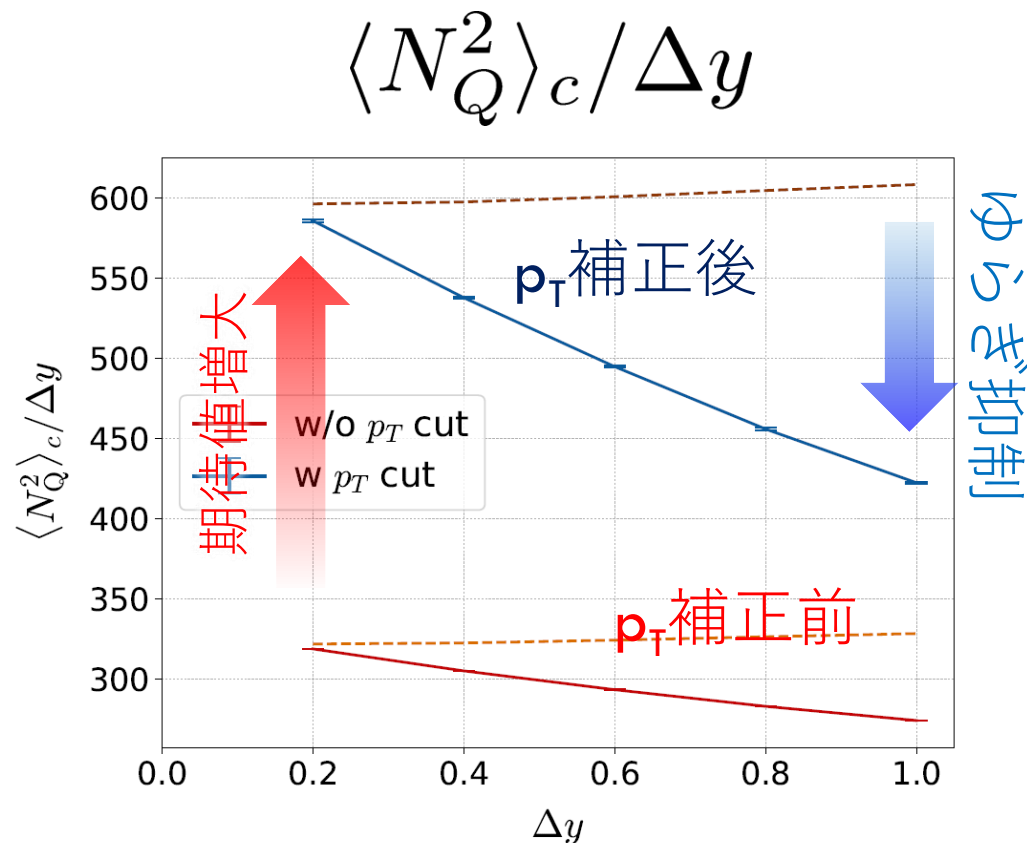
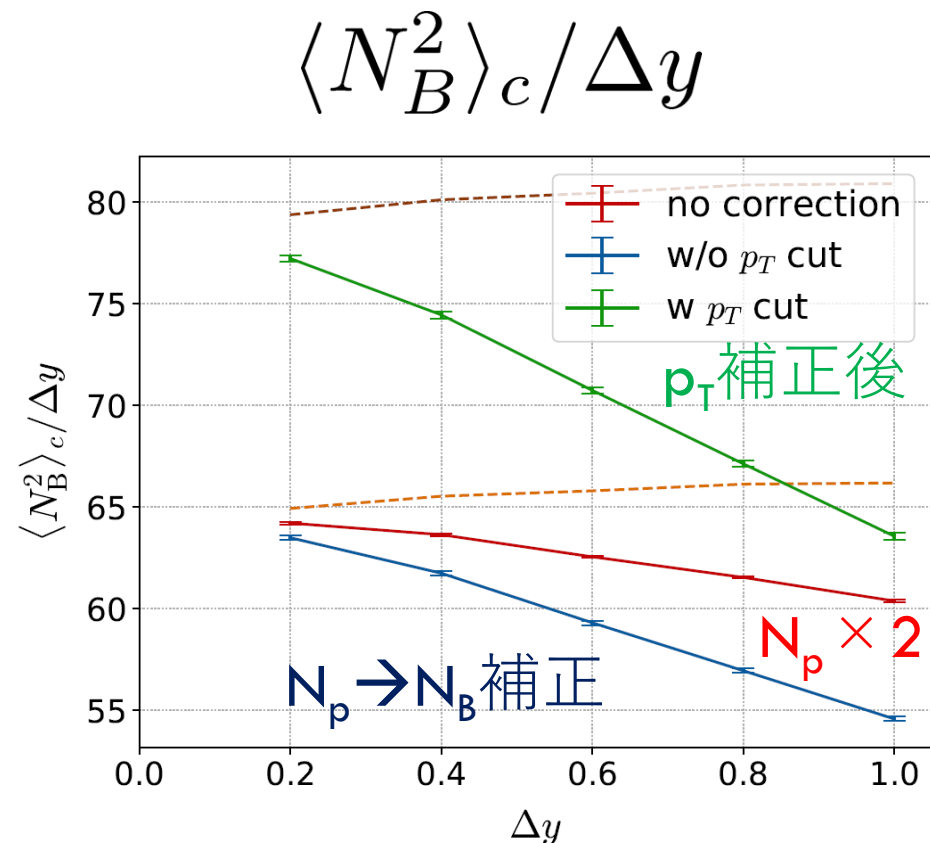
blast wave 模型 @ $\sqrt{s_{NN}}=200 \text{ GeV}$



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

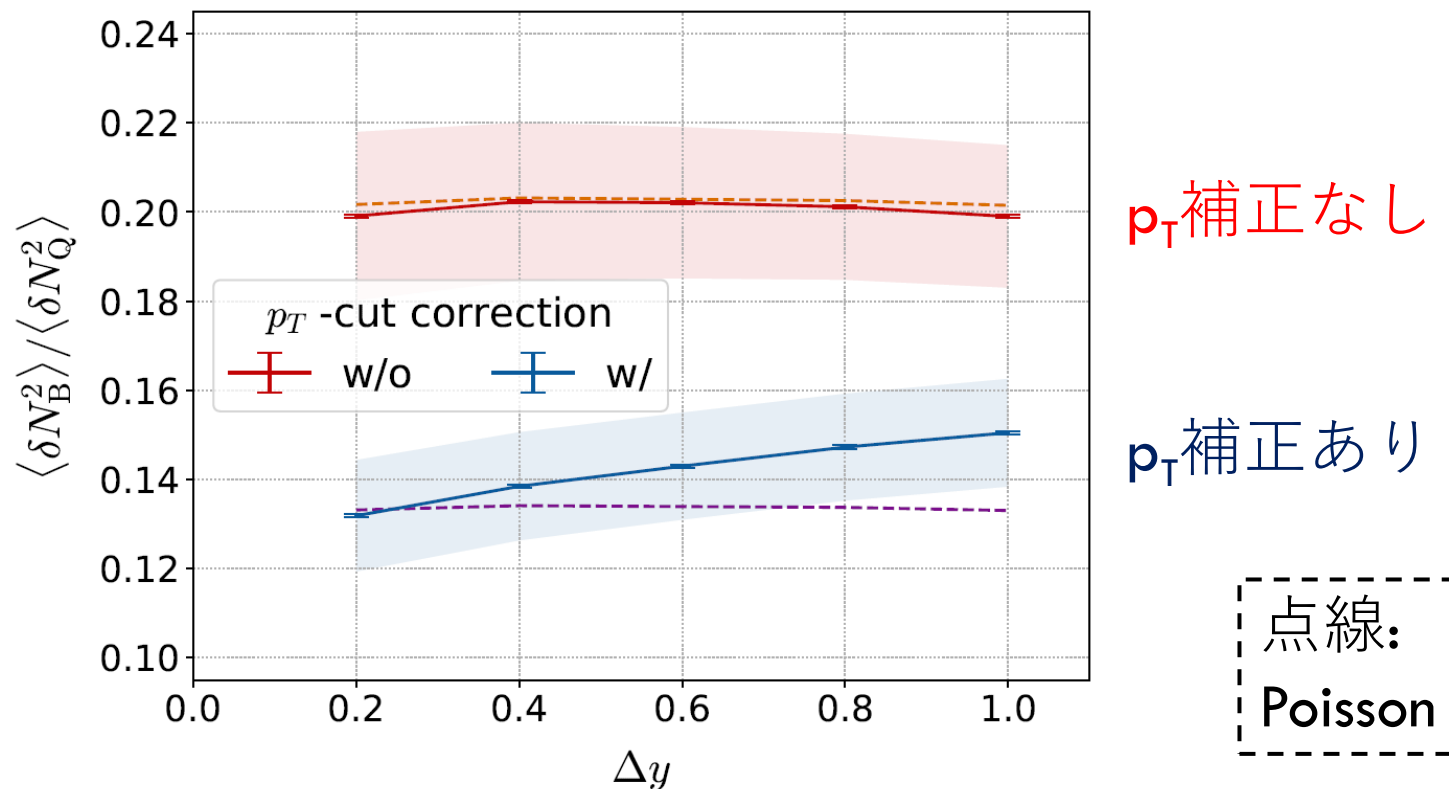
バリオン数・ p_T アクセプタンス補正



点線:
 $\langle N_B^{tot} \rangle \sim$
 Poisson値

$$\langle N_{\text{net}}^2 \rangle_c^{\text{corrected}} = \frac{1}{p^2} \left(\langle n_{\text{net}}^2 \rangle_c - (1 - p) \langle n_{\text{tot}} \rangle_c \right)$$

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

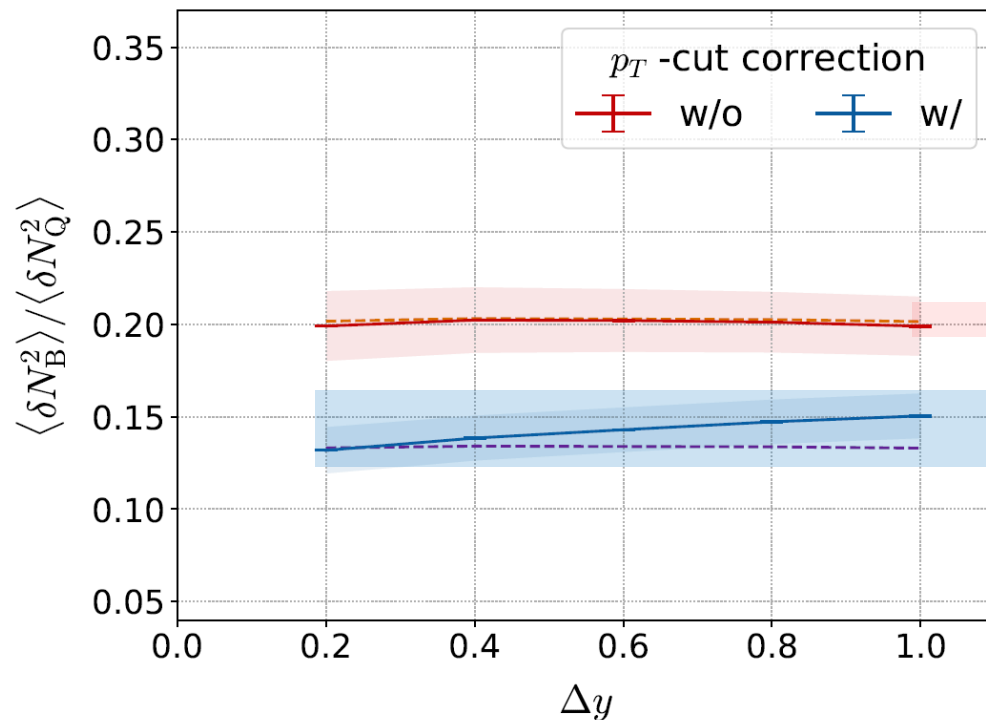


□ p_T カット補正は $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$ を減少させる

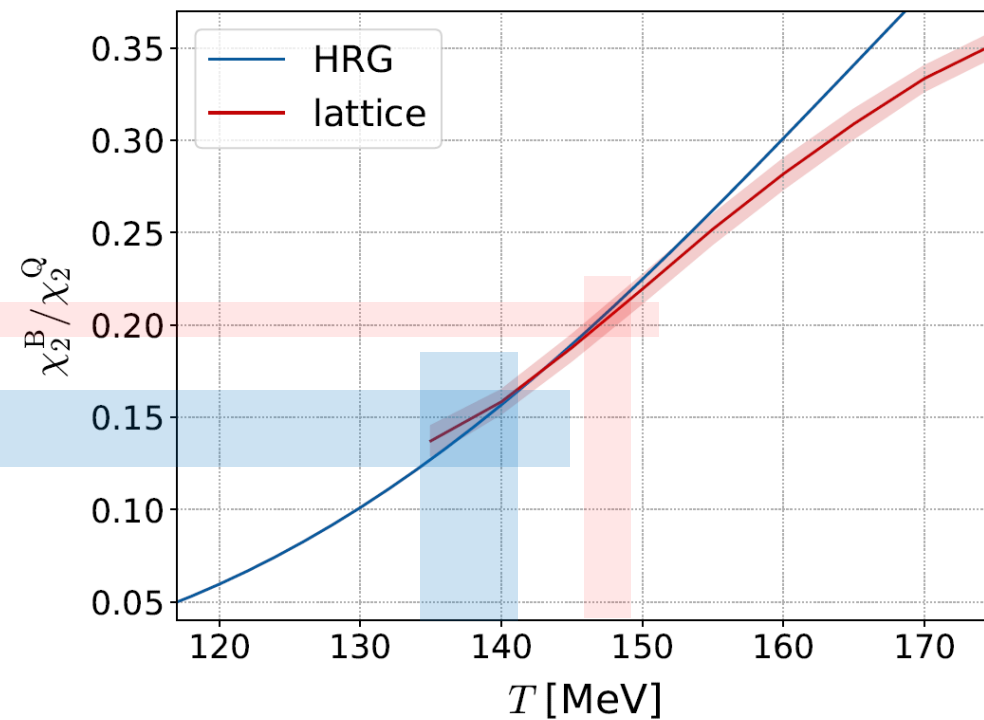
□ 補正後の $\langle N_B^2 \rangle_c / \langle N_Q^2 \rangle_c$ には有意な Δy 依存性

➡ 時空発展のダイナミクスが介在

STAR実験結果

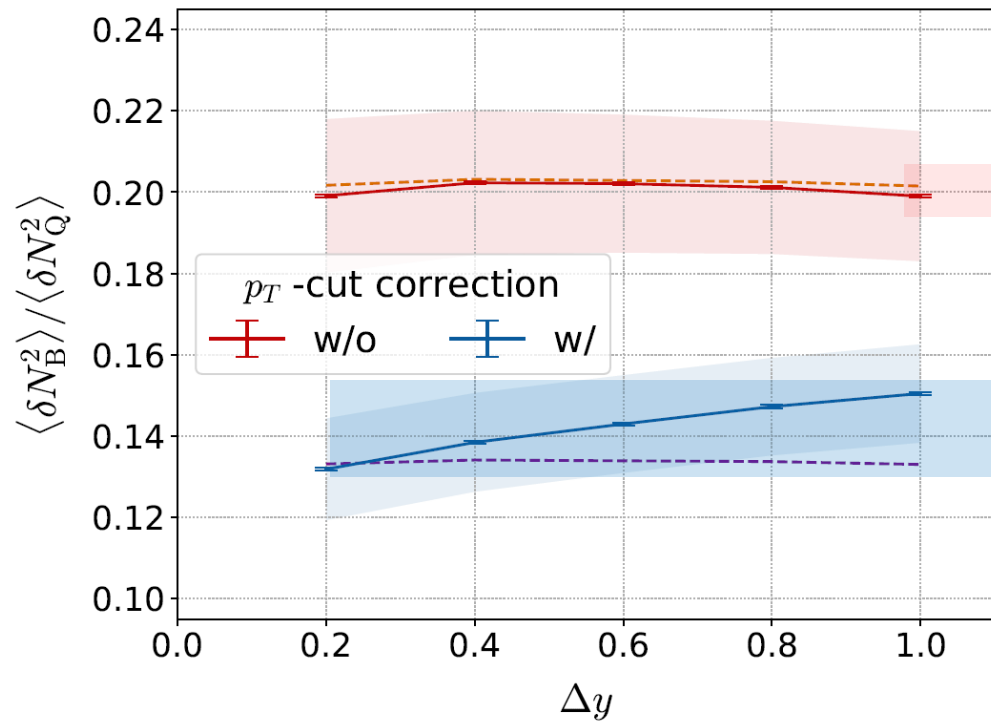


格子QCD + HRG

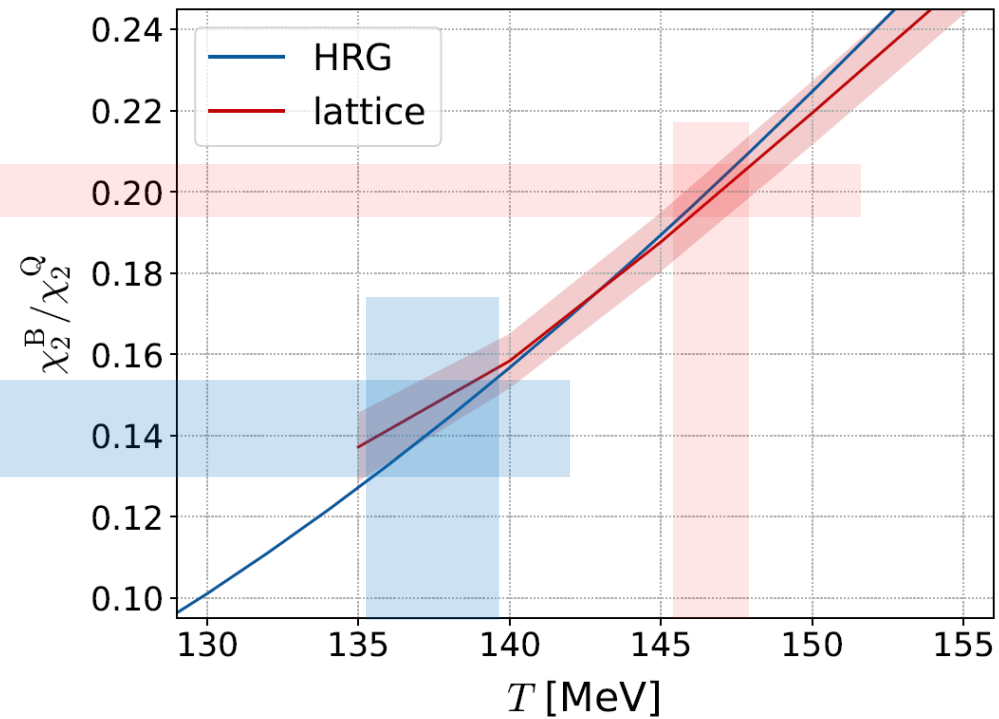


- ❑ 実験値を熱平衡値だと解釈すると、 **$T=135\sim140\text{MeV}$**
- ❑ 化学フリーズアウト(CFO)温度より有意に低い
- ❑ 我々はCFOのゆらぎを観測しているわけではない

STAR実験結果



格子QCD + HRG



- ❑ 実験値を熱平衡値だと解釈すると、 **$T=135 \sim 140 \text{ MeV}$**
- ❑ 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

初期ゆらぎは見えないのか？

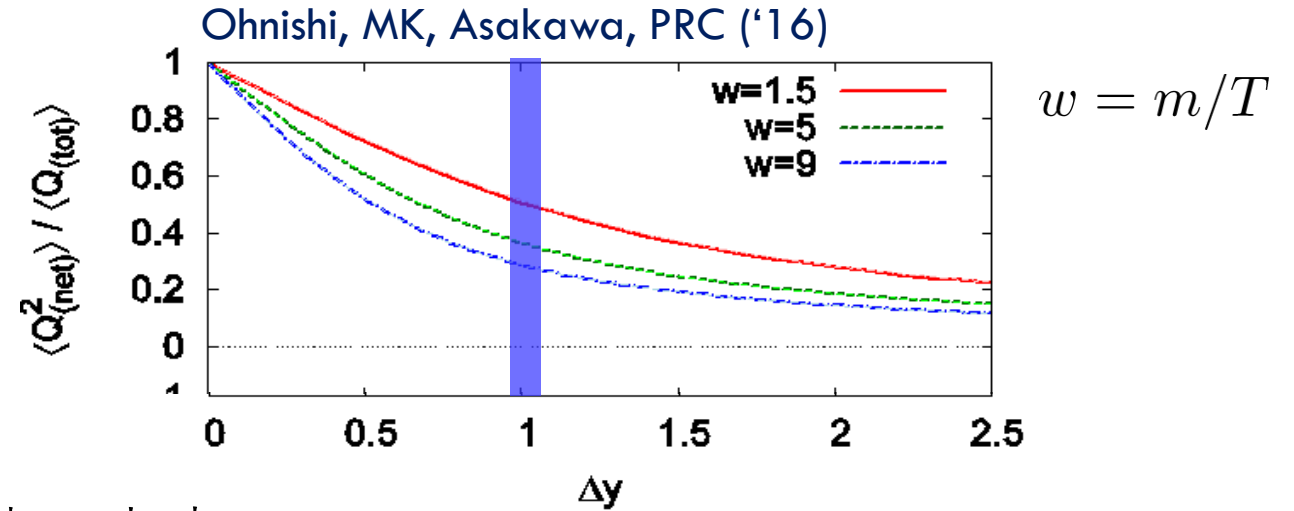
□ 拡散とrapidity変換($y \rightarrow Y$)

- 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_{chem} と有意にずれている。
- Δy 依存性の存在→ダイナミクスの影響を示唆
- 拡散と共鳴崩壊は特に電荷ゆらぎを大きく変更。
- p_T アクセプタンス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でのQCD臨界点探索で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 Δy 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