

日本物理学会2020年秋季大会シンポジウム 「揺らぎと流体的発展からみる物理の面白さ」

9月15日(火)SJ会場 15pSJ 13:30 ~ 16:55

- | | |
|--|-------|
| 1. シンポジウムのはじめに | 野中千穂 |
| 2. 重イオン衝突実験におけるゆらぎを用いたQCD相転移探索 | 北澤正清 |
| 3. 宇宙における密度ゆらぎの進化と大規模構造 | 松原隆彦 |
| 4. ナノスケール流体のゆらぎの数値解析とそれを用いた輸送係数の測定法の提案 | 中野裕義 |
| 5. Probing QGP with flow and particle correlations | 新井田貴文 |
| 6. 高強度重イオンビームによる高密度クォーク核物質の研究 | 佐甲博之 |
| 7. 中性子星連星合体からの重力波と電磁波対応天体 | 川口恭平 |
| 8. 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーションによる研究 | 住吉光介 |

一本の草も涼風宿りけり

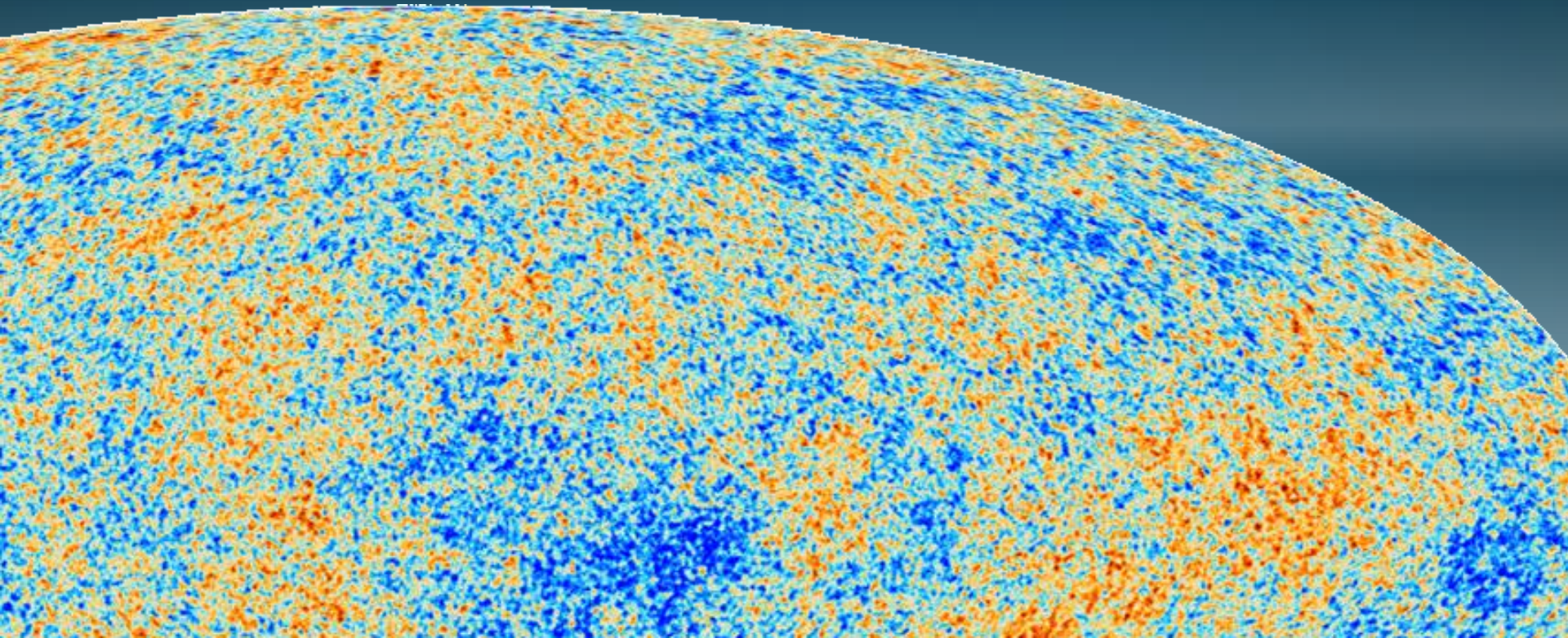
even on one blade of grass the cool wind lives

小林一茶

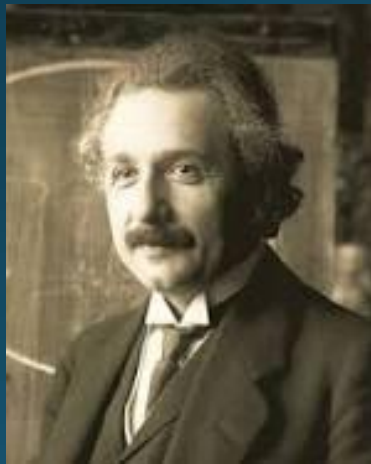
Issa Kobayashi

1814

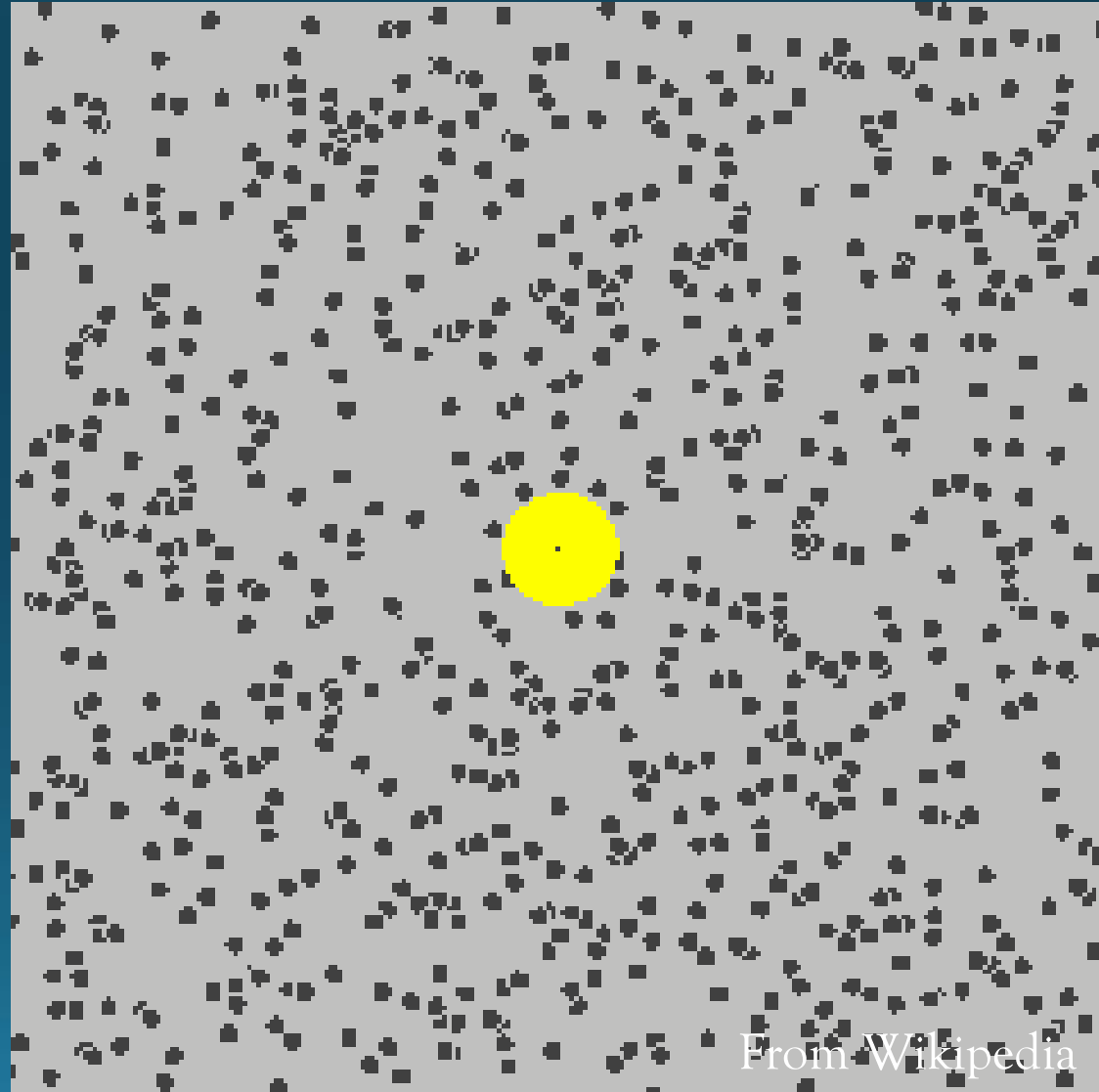
私たちは、宇宙背景放射の微小なゆらぎの奥に
誕生直後の熱い宇宙を見ることができる



私たちは、ブラウン運動の乱雑なゆらぎの奥に
極微の原子の存在を見ることができる



A. Einstein
1905



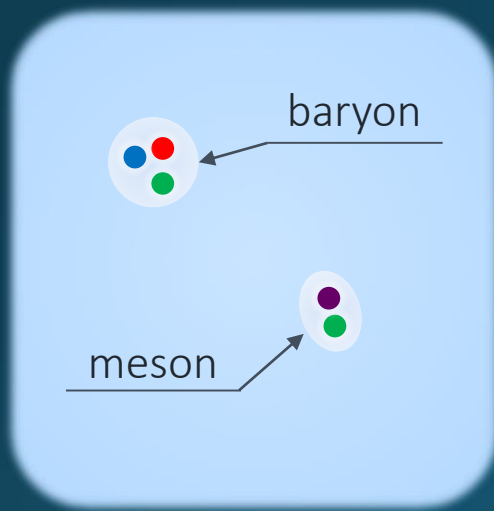
ゆらぎを通して
クォークの世界の相転移現象を覗く

重イオン衝突実験における ゆらぎを用いた QCD相転移探索

北沢正清
(阪大理)

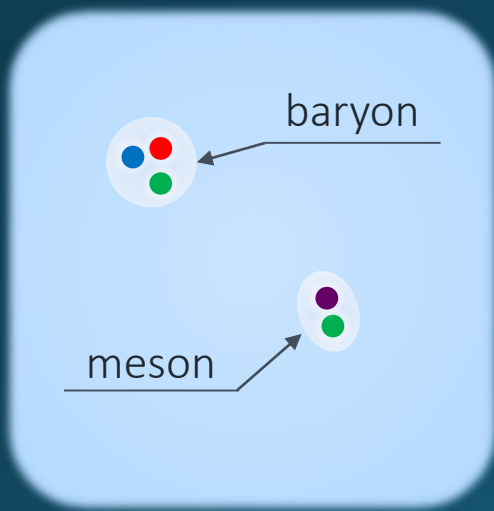
Quark-Gluon Plasma (QGP)

真空



Quark-Gluon Plasma (QGP)

真空



温度上昇

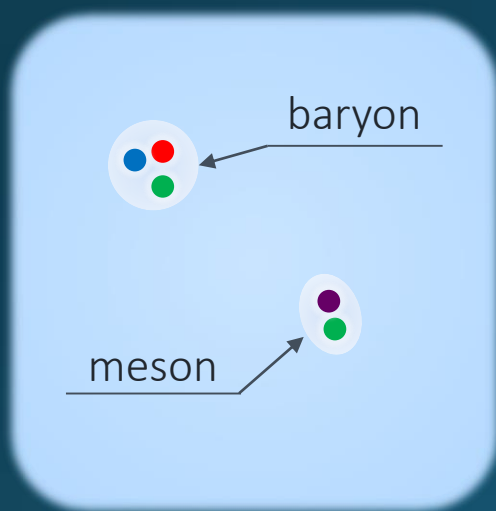


初期宇宙



Quark-Gluon Plasma (QGP)

真空

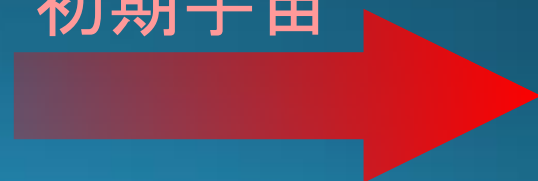


温度上昇

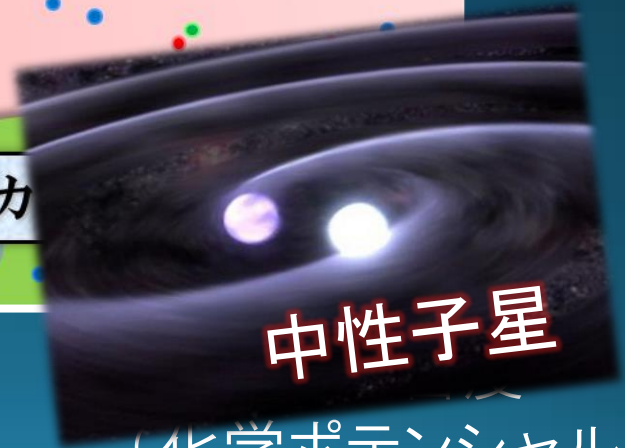
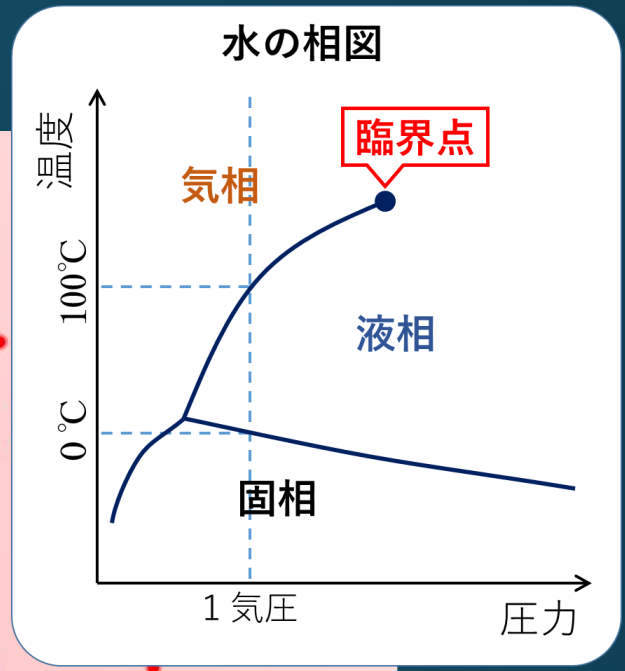
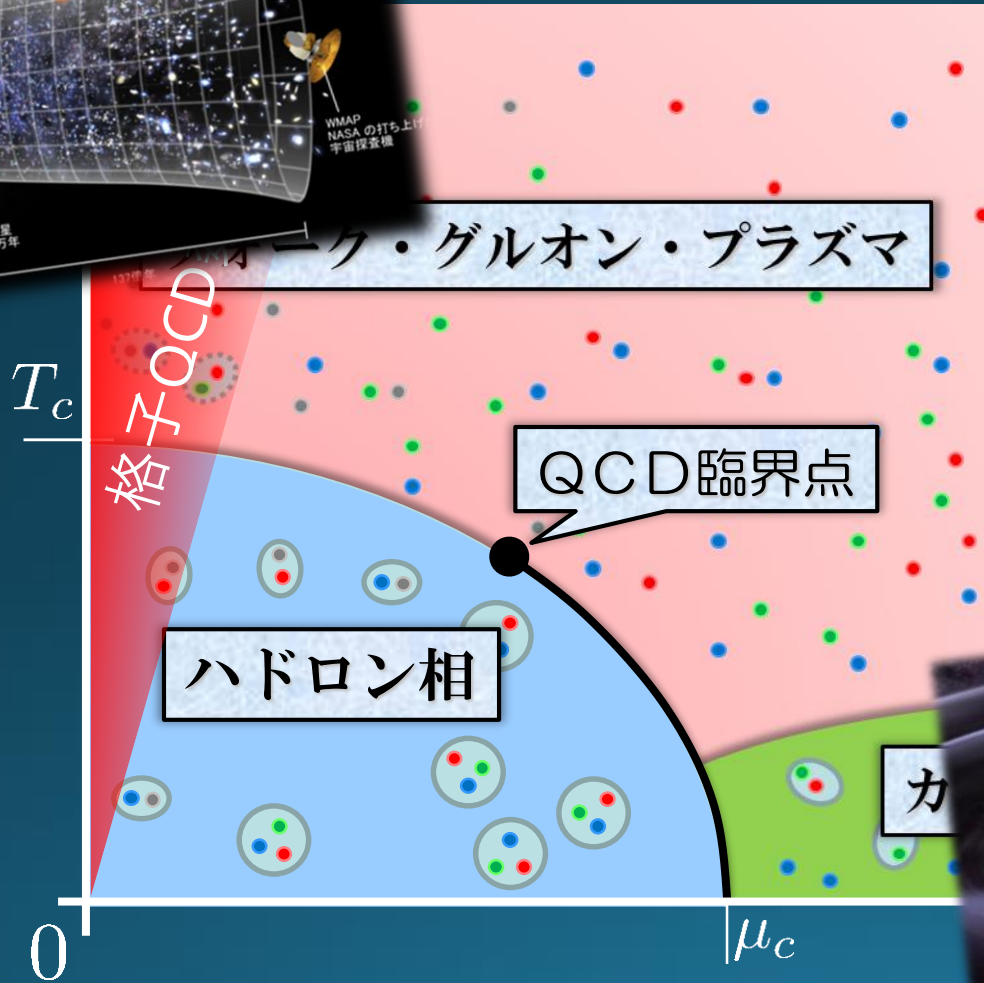
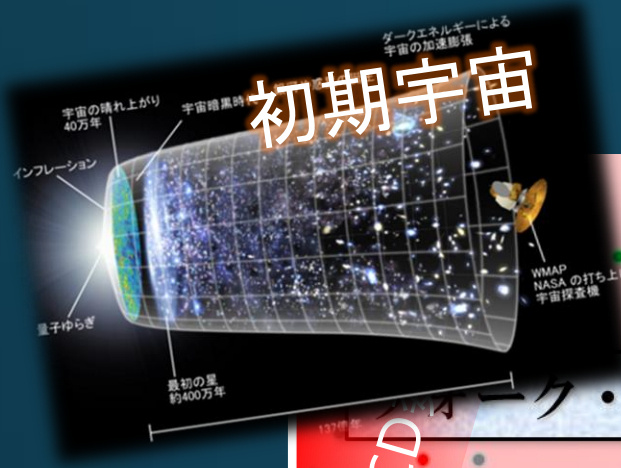


quark-gluon plasma

初期宇宙



QCD相図



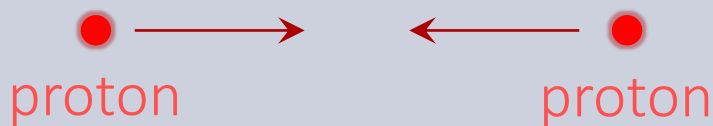
相対論的重イオン衝突実験



LHC – Large Hadron Collider

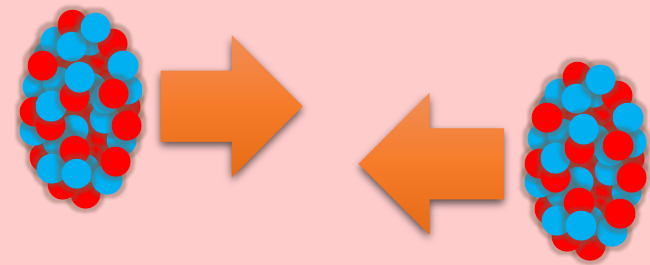
相対論的重イオン衝突実験

陽子・陽子衝突



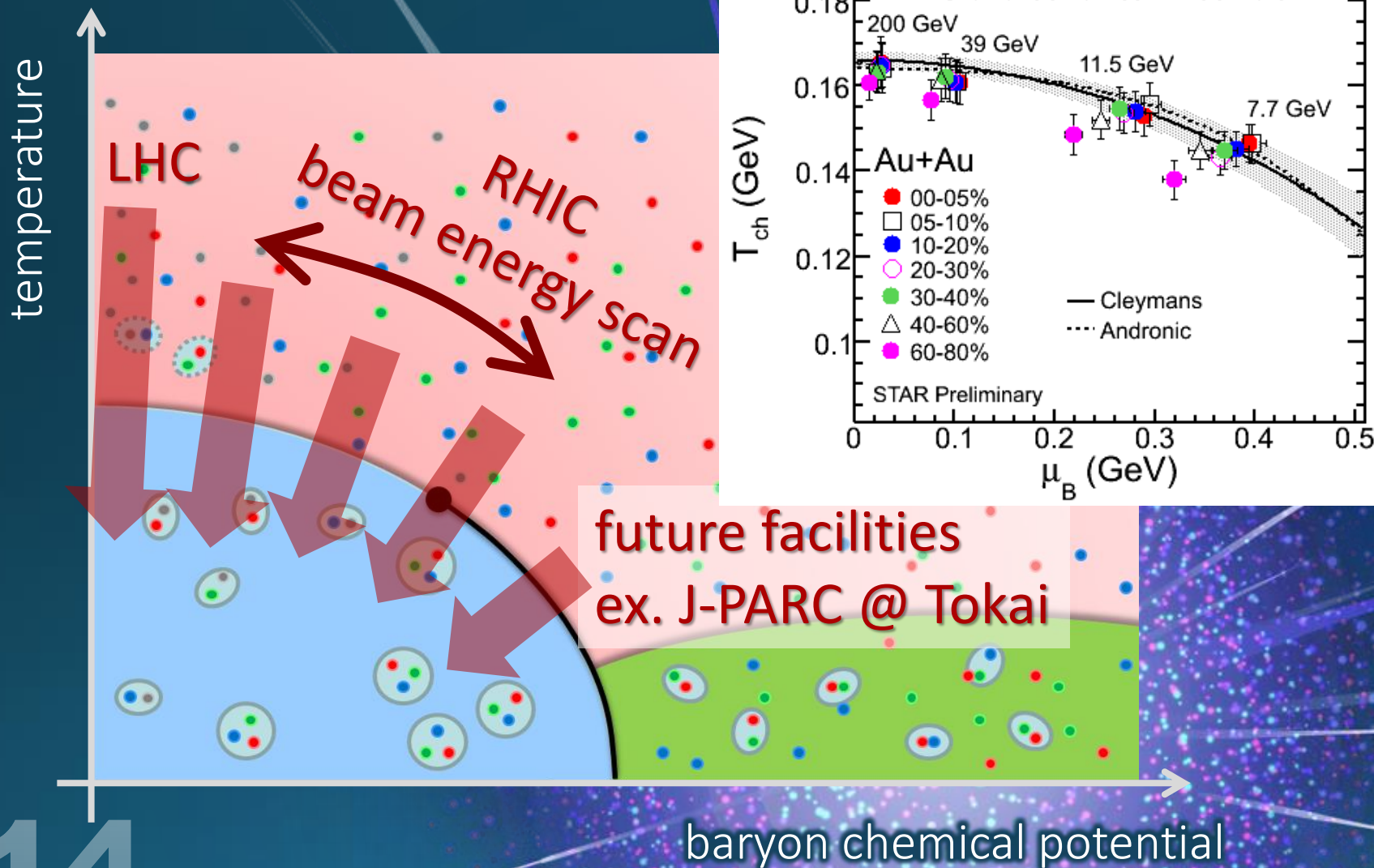
素過程の重ね合わせ
粒子探索
粒子の性質の測定

重イオン衝突

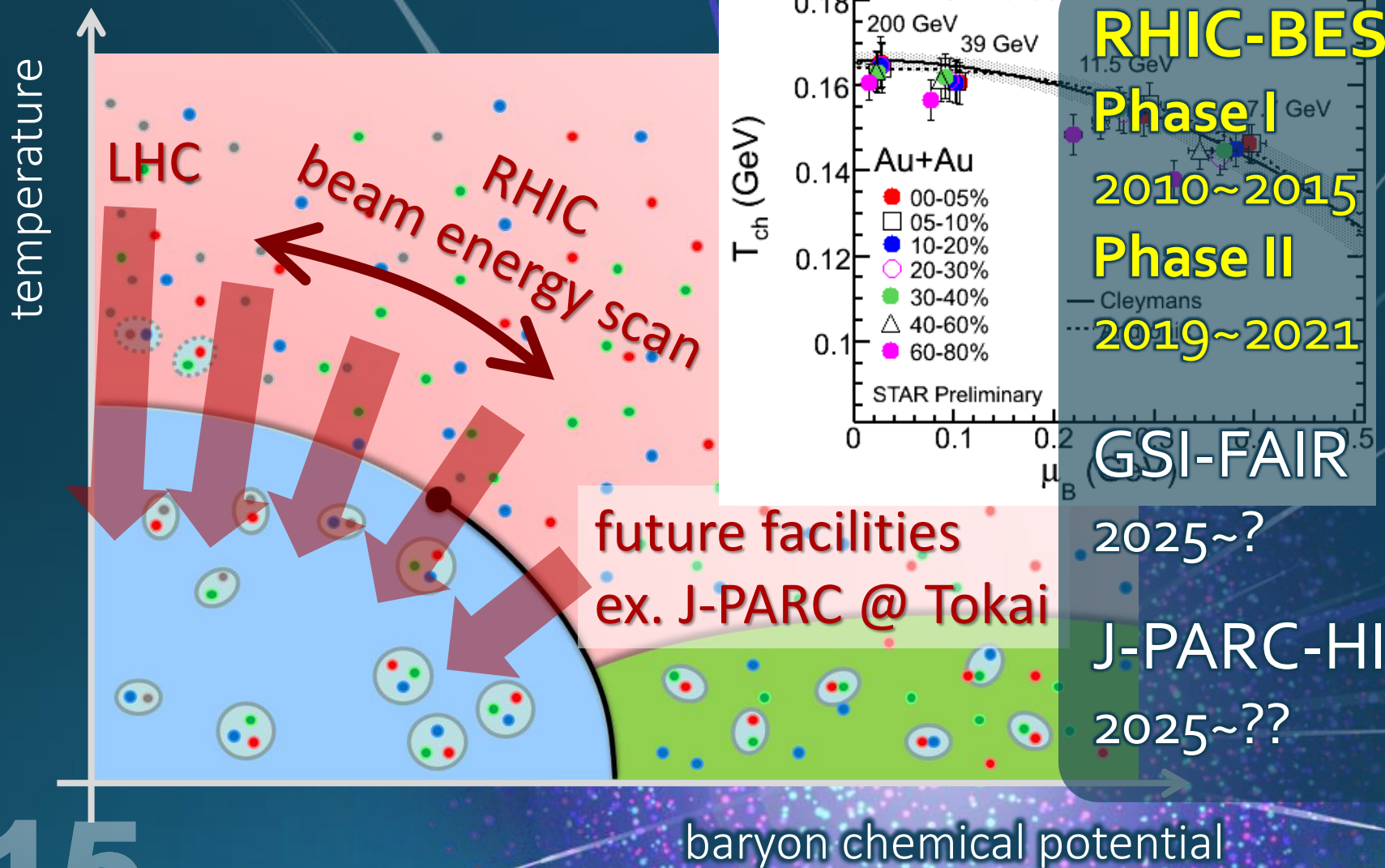


熱力学系の生成
高温物質の物性研究
多粒子が関与する問題

ビームエネルギー走査

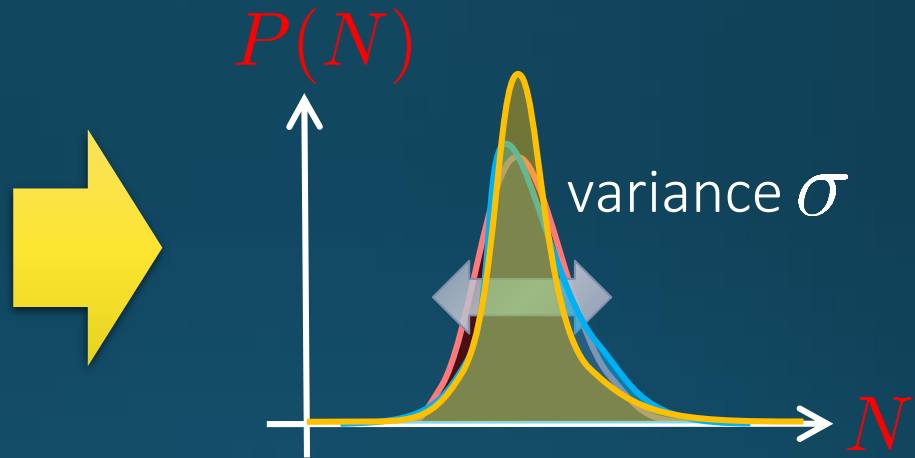
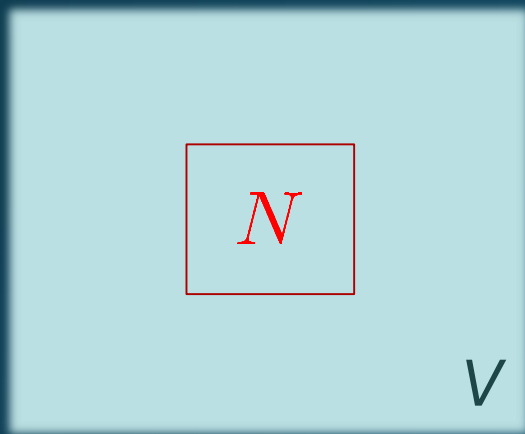



ビームエネルギー走査



ゆらぎ

Observables in equilibrium are fluctuating!



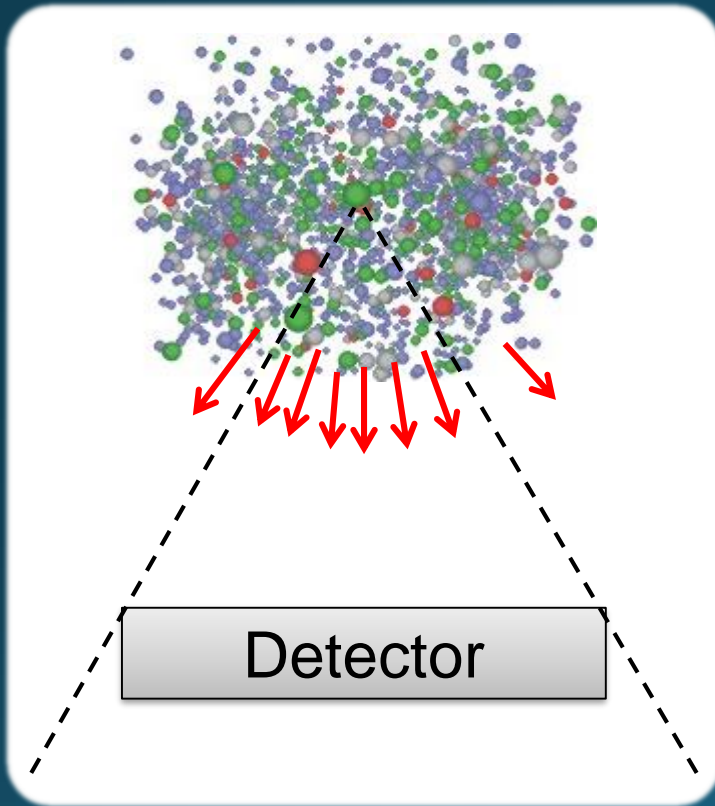

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \delta N^2 \rangle = V \chi_2 = \sigma^2 \\ S = \frac{\langle \delta N^3 \rangle}{\sigma^3} \\ \kappa = \frac{\langle \delta N^4 \rangle - 3 \langle \delta N^2 \rangle^2}{\chi_2 \sigma^2} \end{array} \right.$$

Gaussian

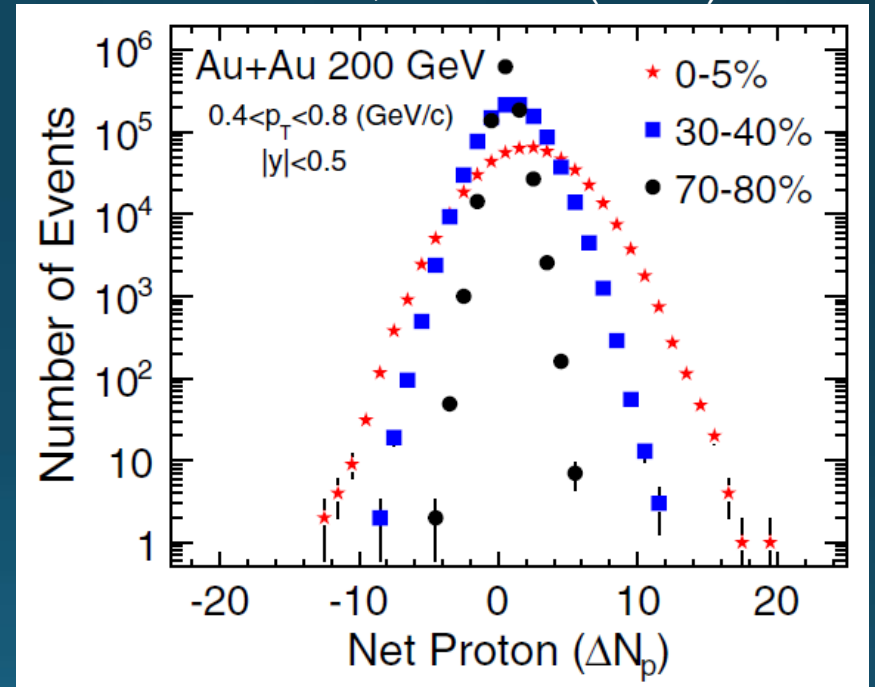
non-Gaussianity

イベント毎ゆらぎ = QCD相転移のシグナル

Review: Asakawa, MK, PPNP 90 (2016)



STAR, PRL105 (2010)



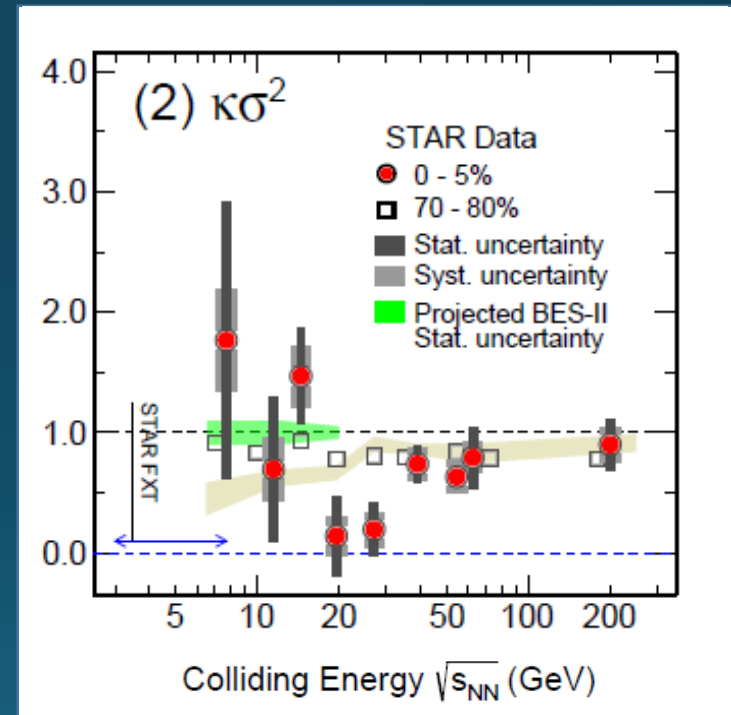
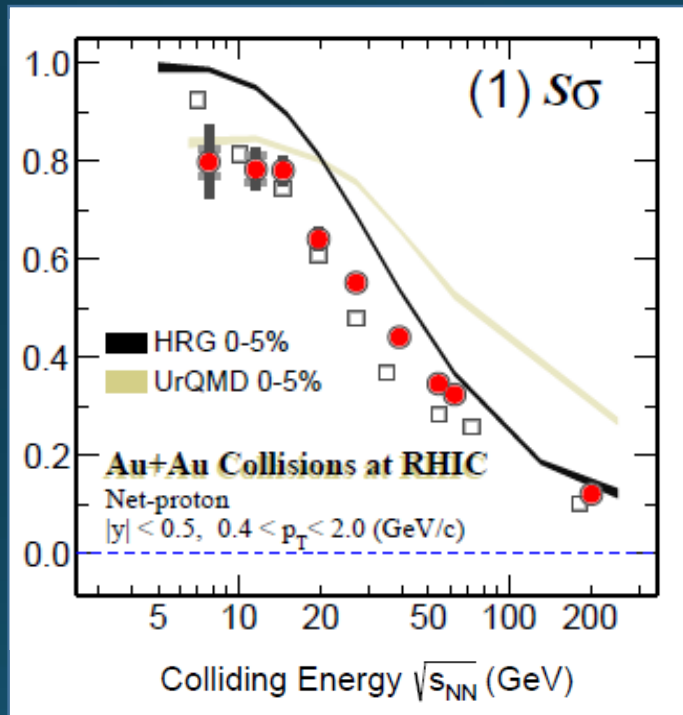
キュムラント

$$\langle \delta N_p^2 \rangle, \langle \delta N_p^3 \rangle, \langle \delta N_p^4 \rangle_c$$

陽子数高次キュムラント

$$\langle N_p^3 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



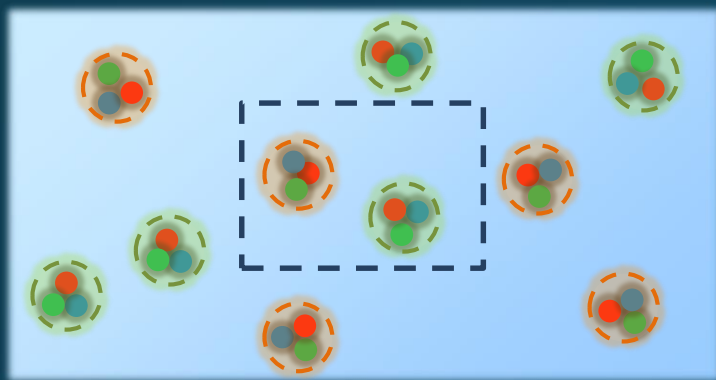
STAR, 2001.06419

□ 非ゼロの高次キュムラントが実験的に確立

有限系(粒子数 $\sim 10^4$ 個)・高統計 $\sim 10^8$ events

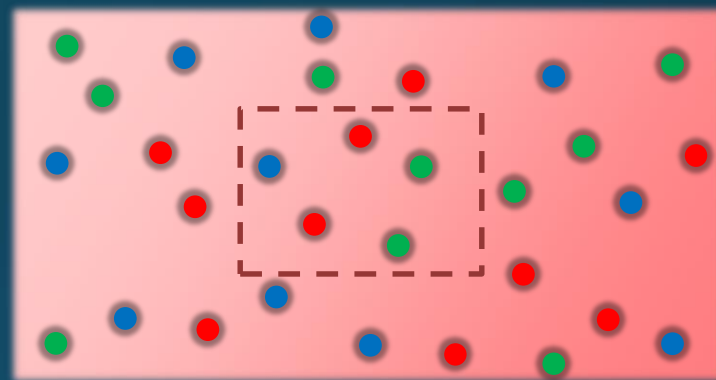
クォーク閉じ込め／解放

Hadronic



$$|q_B| = 0, 1, |q_Q| = 0, 1$$

Quark-Gluon



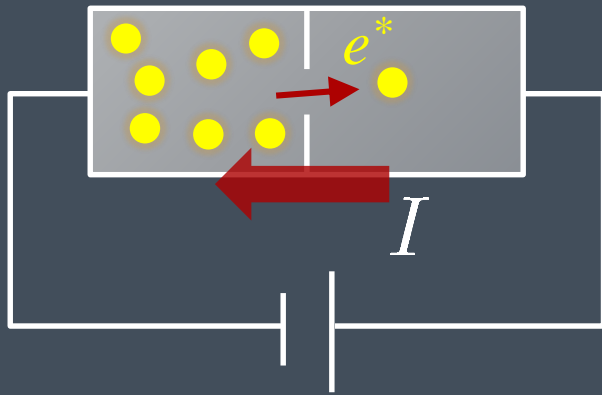
$$|q_B| = 1/3, |q_Q| = 1/3, 2/3$$

QGP中では準粒子励起が運ぶ電荷数が減少



単位粒子当たりの熱揺らぎが減少
高次キュムラントほど減少が顕著

Shot Noise



$$S_{\text{shot}} \sim \langle \delta I^2 \rangle$$

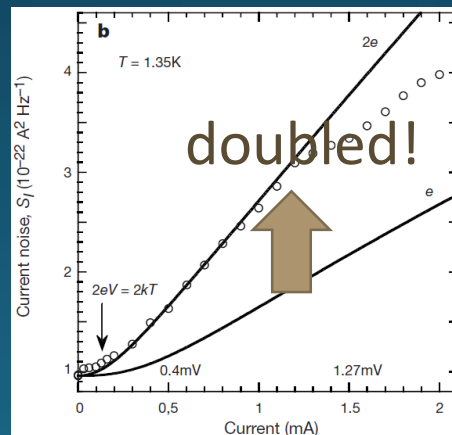
$$S_{\text{shot}} = 2e^* \langle I \rangle$$

charge of quasi-particles

Superconductors
with Cooper Pairs

$$e^* = 2e$$

Jehl+, Nature 405,50 (2000)



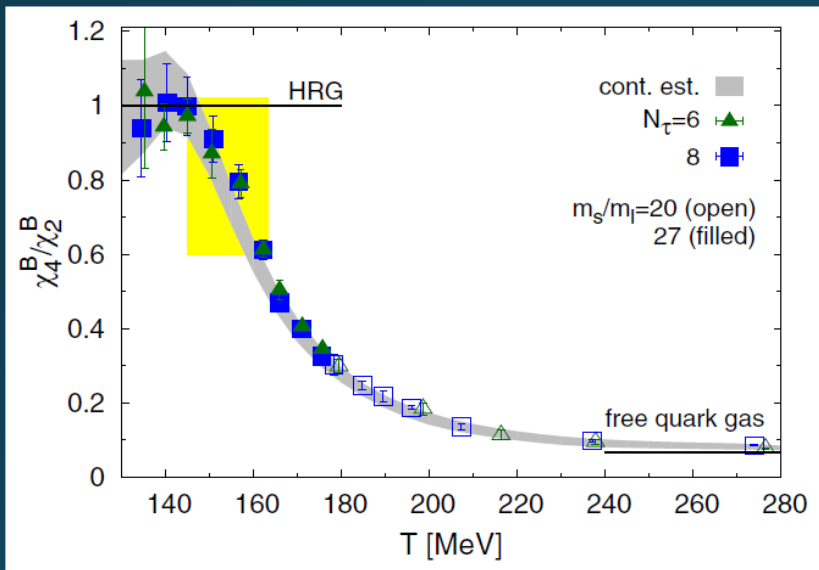
Fractional Quantum
Hall Systems

$$e^* = \frac{q}{p}e$$

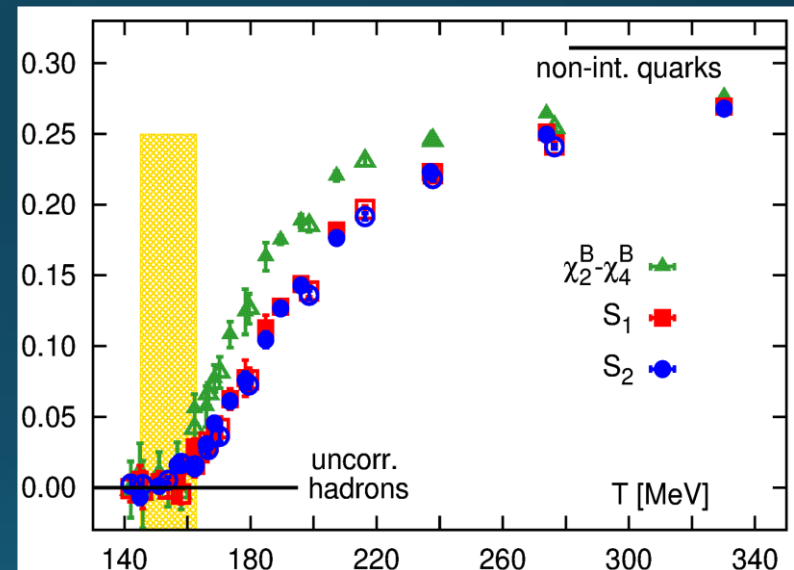
Saminadayar+, PRL79,2526 (1997)

格子QCD数値解析からの知見

Hot-QCD, PRD (2017)



BNL-Bielefeld, PRL(2013)



$$\frac{\chi_4}{\chi_2} = \frac{\langle N_B^4 \rangle_c}{\langle N_B^2 \rangle_c}$$

$$\frac{\langle \delta N_B^2 \rangle - \langle \delta N_B^4 \rangle_c}{\langle \delta N_S \delta N_B^3 \rangle_c - \langle \delta N_S \delta N_B \rangle}$$

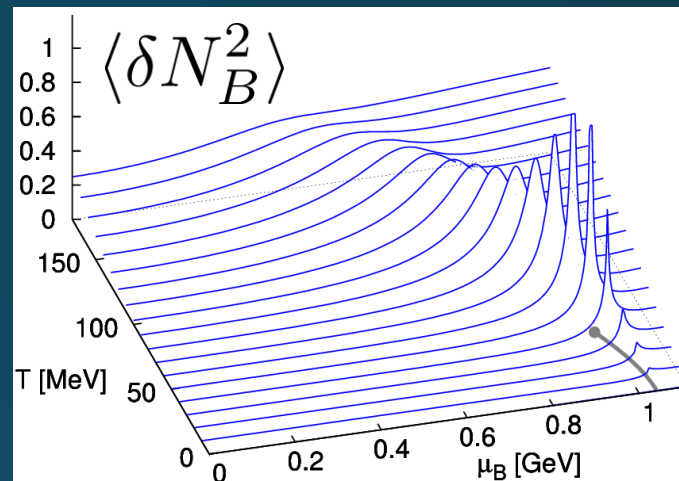
□ $T > T_c$ でのハドロン描像の破綻

□ 格子QCDと実験結果の比較手段

QCD臨界点の観測手段

- 相関長の増大 → ゆらぎの増大
 - 高次キュムラントでより顕著な増大

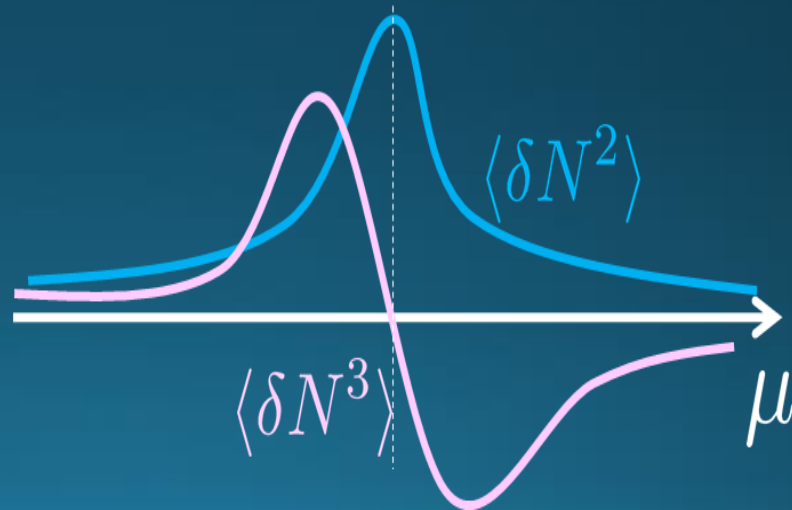
Stephanov, 2009



- 高次キュムラントの符号変化

熱力学関係式

$$\langle \delta N_B^3 \rangle = T \frac{\partial \langle \delta N_B^2 \rangle}{\partial \mu}$$

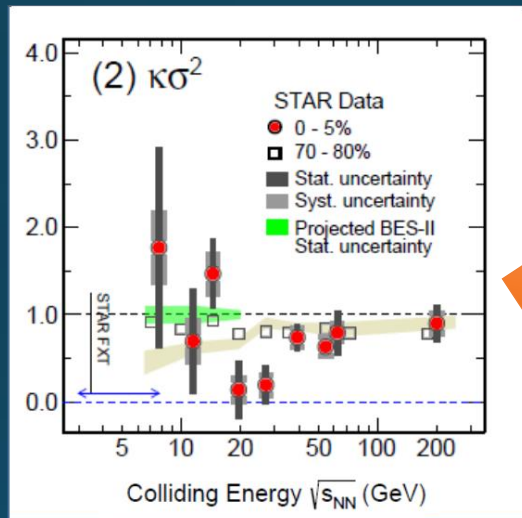
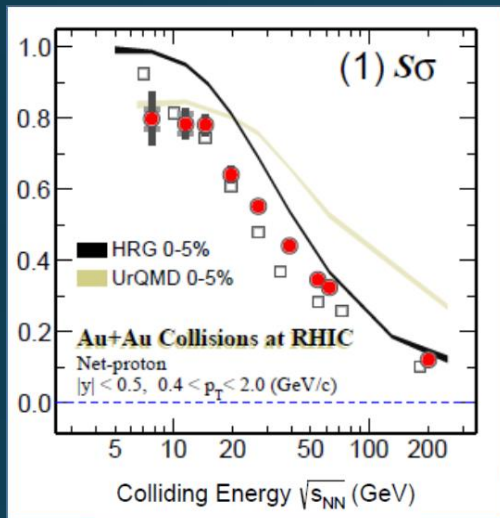


Asakawa, Ejiri, MK, 2009

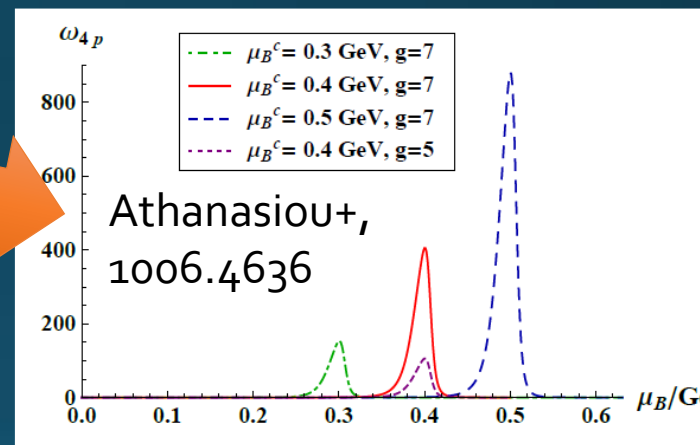
QCD臨界点は見えたのか？

$$\langle N_B^3 \rangle_c / \langle N_B^2 \rangle_c$$

$$\langle N_B^4 \rangle_c / \langle N_B^2 \rangle_c$$



当初の期待



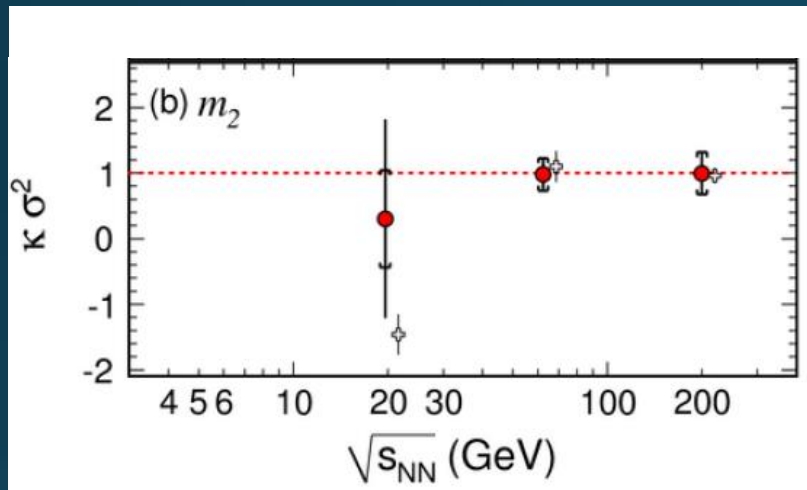
ポアソン分布からの有意なずれは存在するが
顕著な増幅や符号変化は見えない

実験結果の精緻な理解が必要

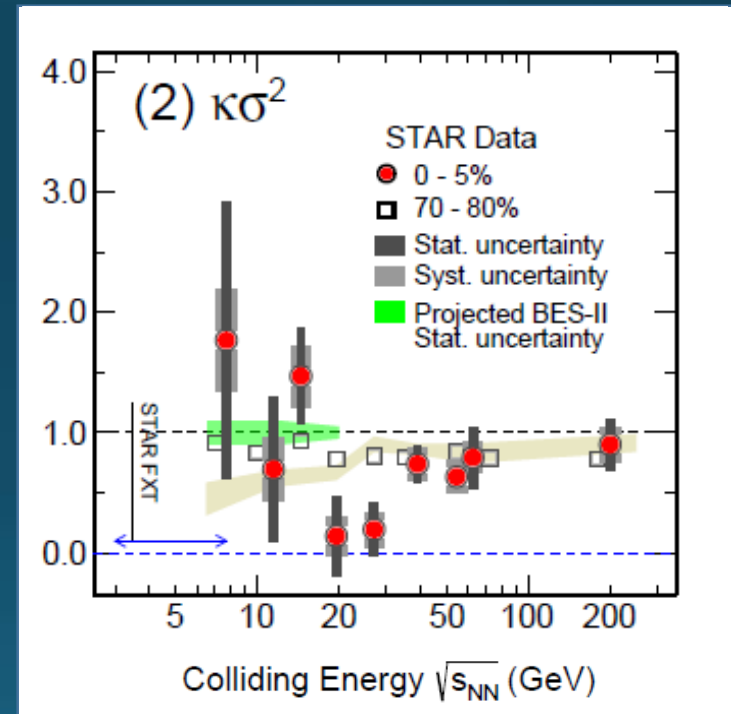
実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



PRL2010



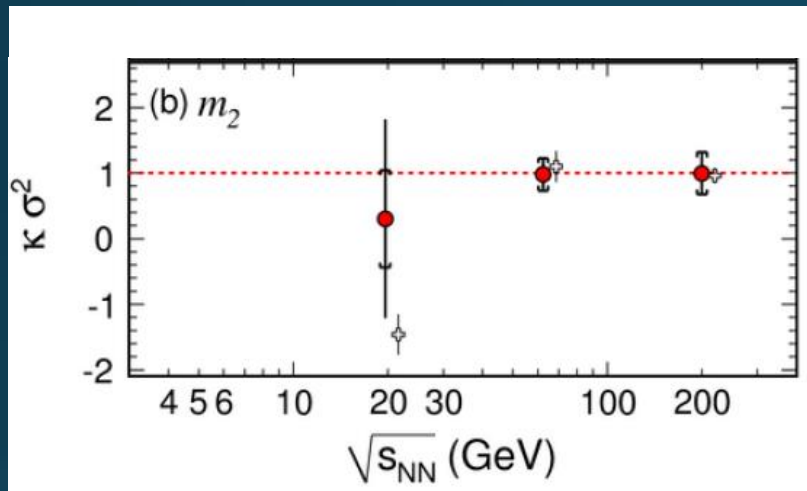
最新結果

2001.06419

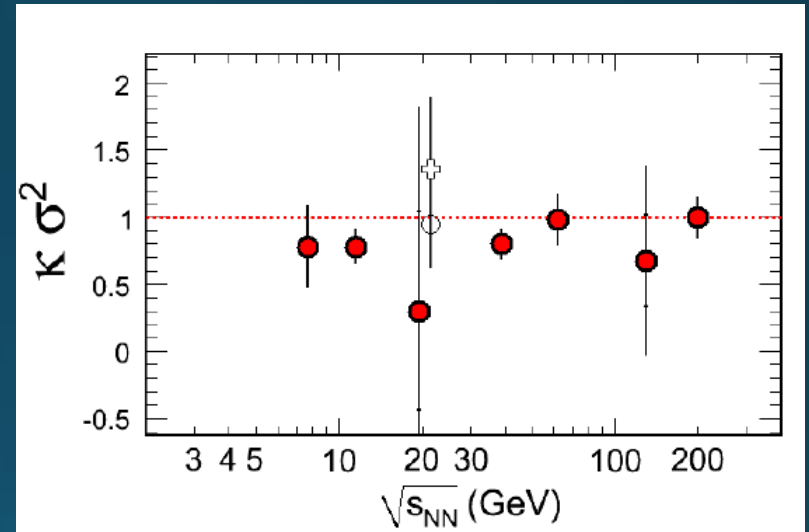
実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



PRL2010



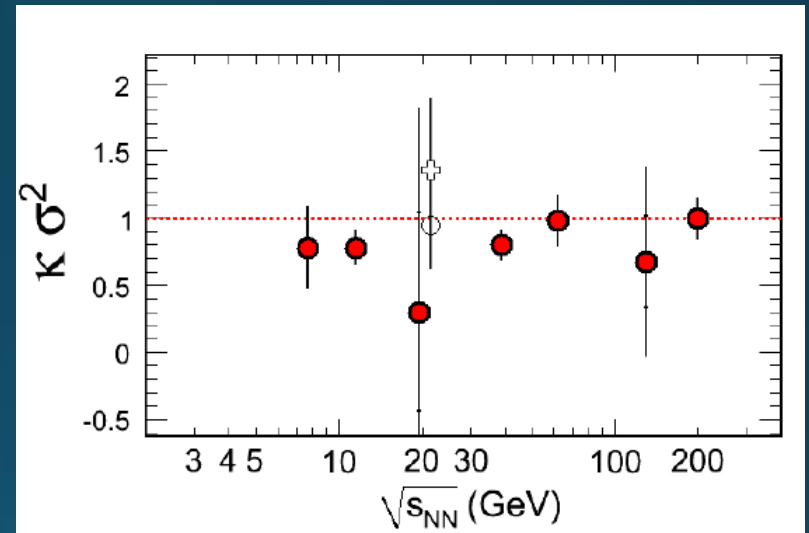
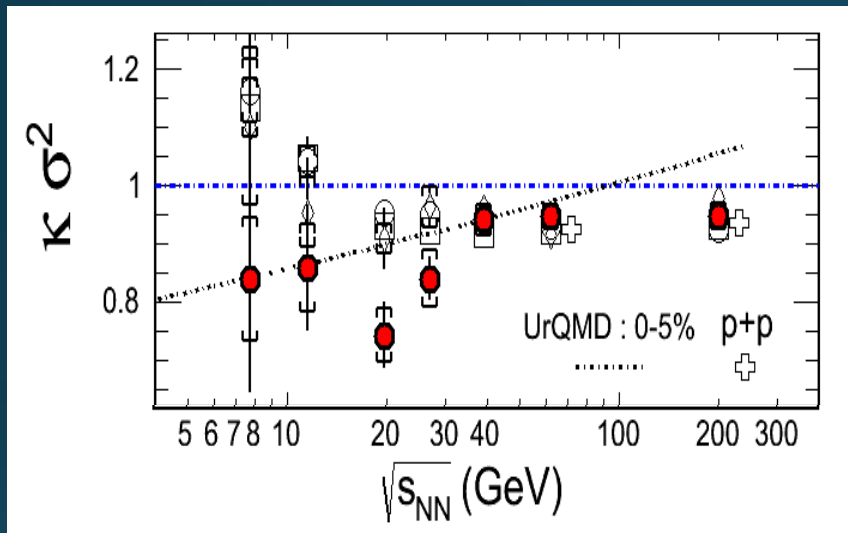
PRL2011

- 統計／アクセプタンスの改善
- イベント選択技法の改良
- 検出器補正 MK+, 2012-2018

実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$

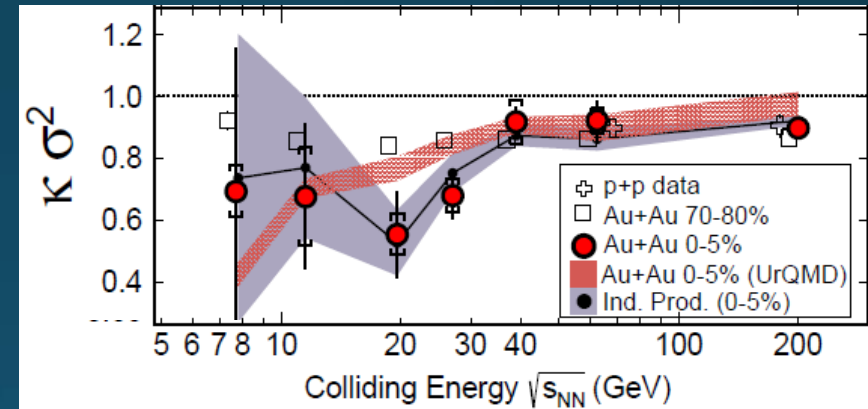
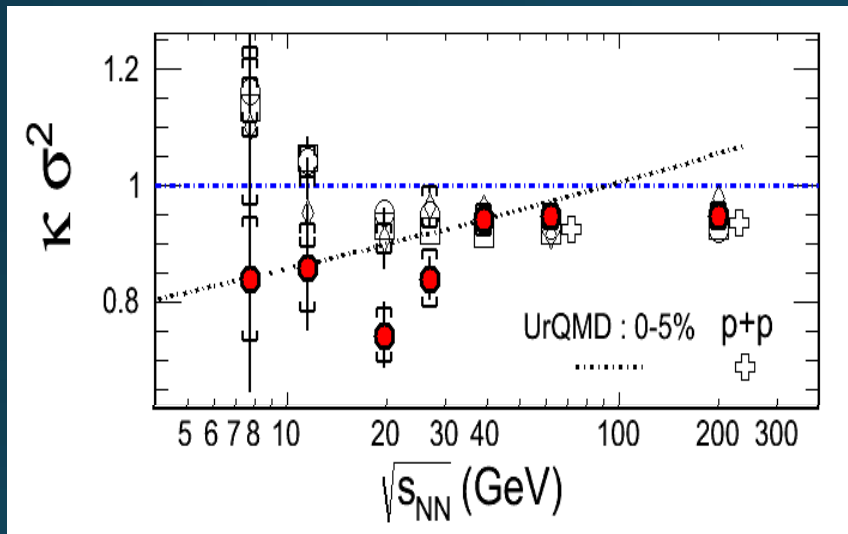


- 統計 / アクセプタンスの改善
- イベント選択技法の改良
- 検出器補正 MK+, 2012-2018

実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$

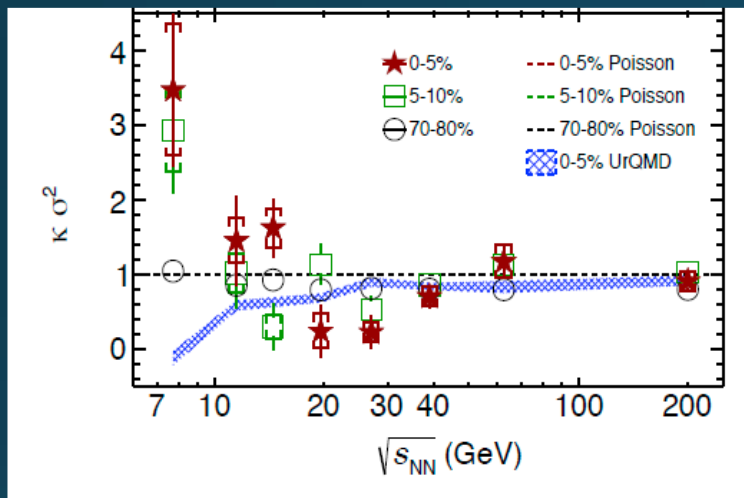


- 統計 / アクセプタンスの改善
- イベント選択技法の改良
- 検出器補正 MK+, 2012-2018

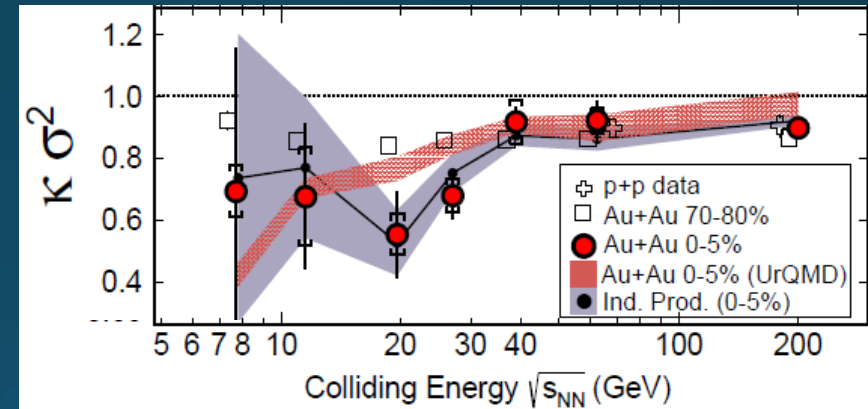
実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



QuarkMatter 2015



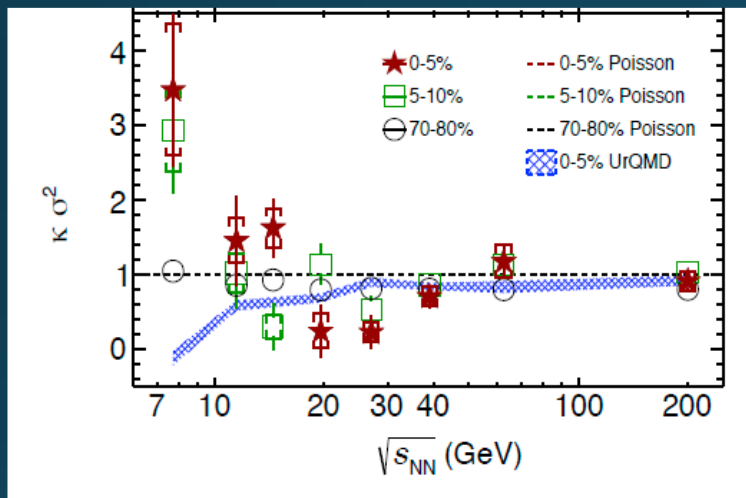
PRL, 2014

- 統計／アクセプタンスの改善
- イベント選択技法の改良
- 検出器補正 MK+, 2012-2018

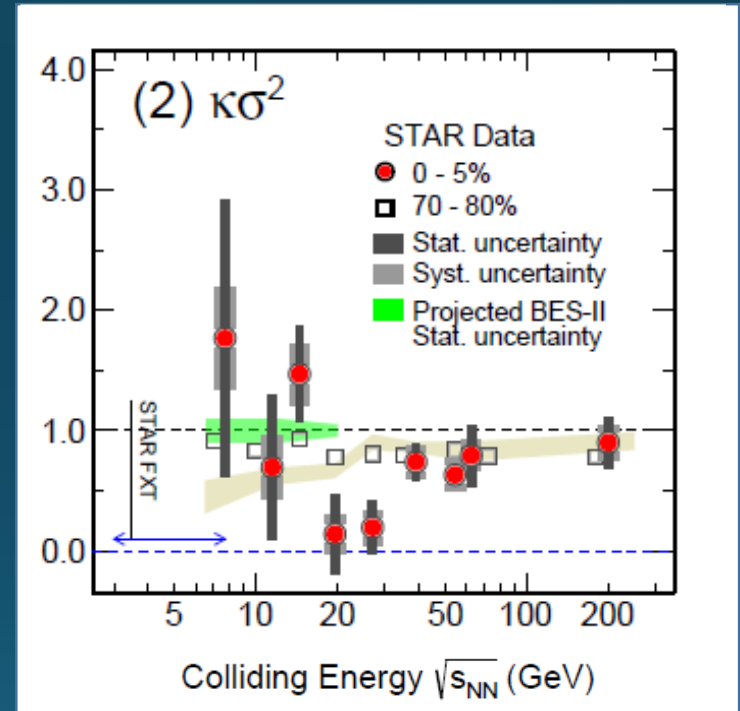
実験結果の変遷

STAR Collaboration, 2010~2020

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



QuarkMatter 2015

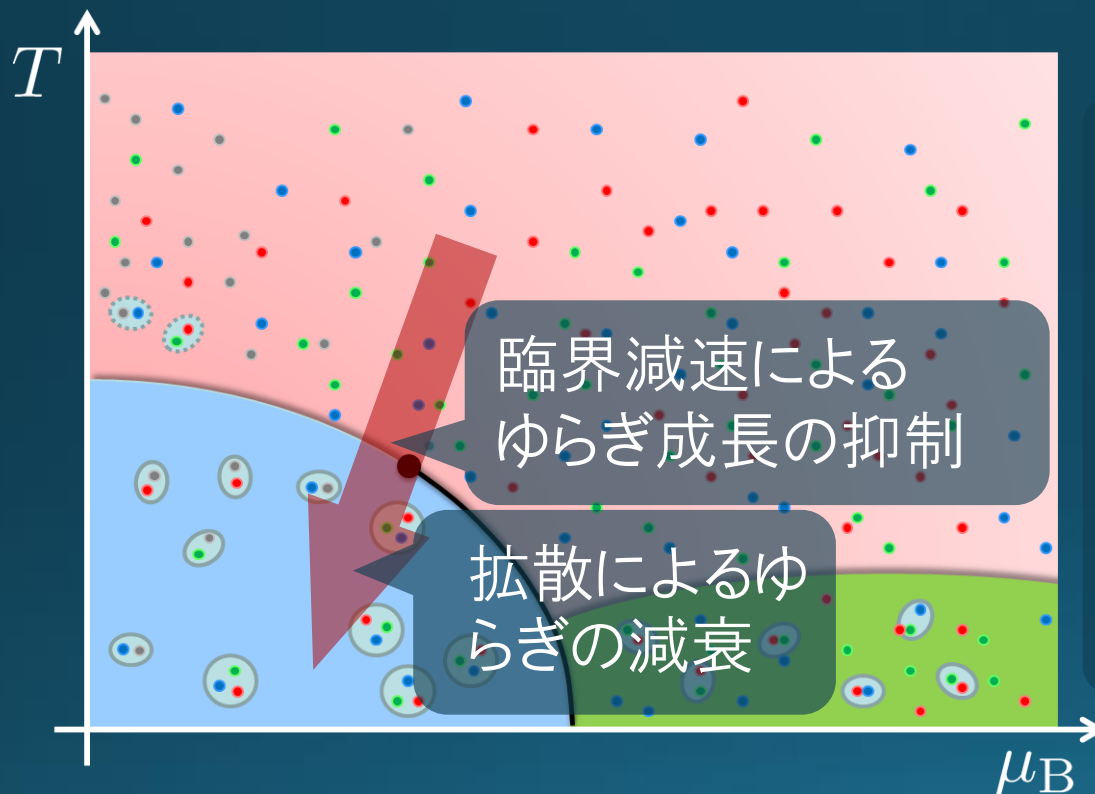


STAR, 2010.06419

RHIC-BES-II実験(2019~2021)で更なる高統計化

ゆらぎの時間発展

検出器が観測するゆらぎは、いつ生成されたのか？



QCD臨界点のソフトモード
＝バリオン数ゆらぎ

Fujii, 2013



ソフトモードの時間発展
＝保存電荷の拡散現象

ゆらぎの拡散の記述

- 拡散方程式

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n$$

- 確率論的拡散方程式 (SDE)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n + \nabla \xi(x, t)$$

- 非線形項を含むSDE

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta n} + \frac{\partial}{\partial x} \xi(x, t)$$

$$\mathcal{F} = \int dx (a \Delta n^2 + c (\nabla n)^2 + \lambda_3 \Delta n^3 + \dots)$$

- SDEによるガウスゆらぎの記述

Sakaida, Asakawa, Fujii, MK ('17)
Wu, Song ('19)

- 非線形項を含んだ数値シミュレーション

Nahrgang, Bluhm, Shaefer, Bass ('19)
Nahrgang, Bluhm, 2007.10371

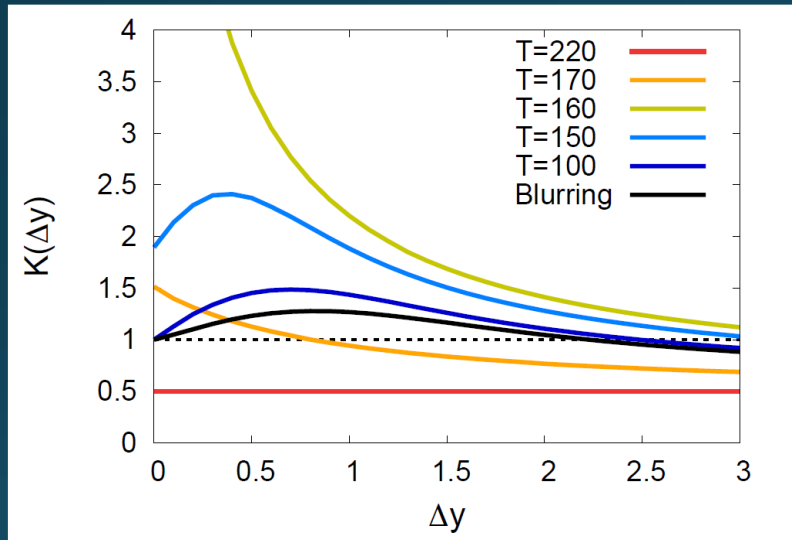
- 拡散モデルによる高次ゆらぎの拡散

MK, Asakawa, Ono ('14)
MK ('15)

ゆらぎの時間発展 by SDE

臨界点通過時の
2次ゆらぎの発展

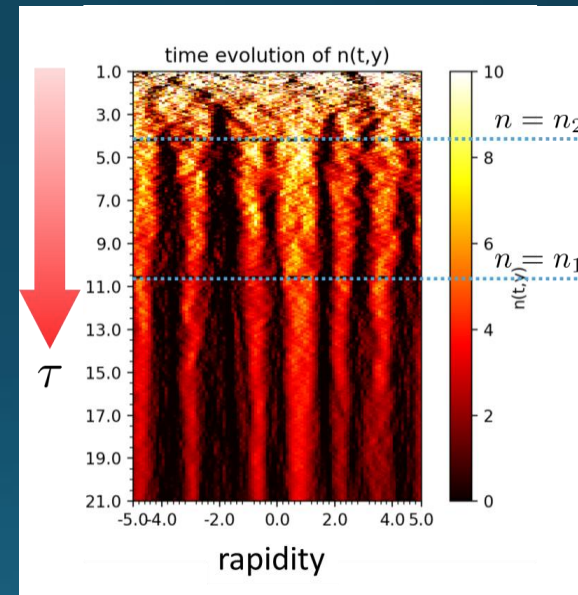
$$K(\Delta y) = \langle \delta Q^2 \rangle / \langle \delta Q^2 \rangle_{\text{eq.}}$$



Sakaida, Asakawa, Fujii, MK ('17)

- 臨界点ゆらぎは急激に減衰
- Δy 依存性の非単調性の出現

一次相転移通過時の
密度分布の発展

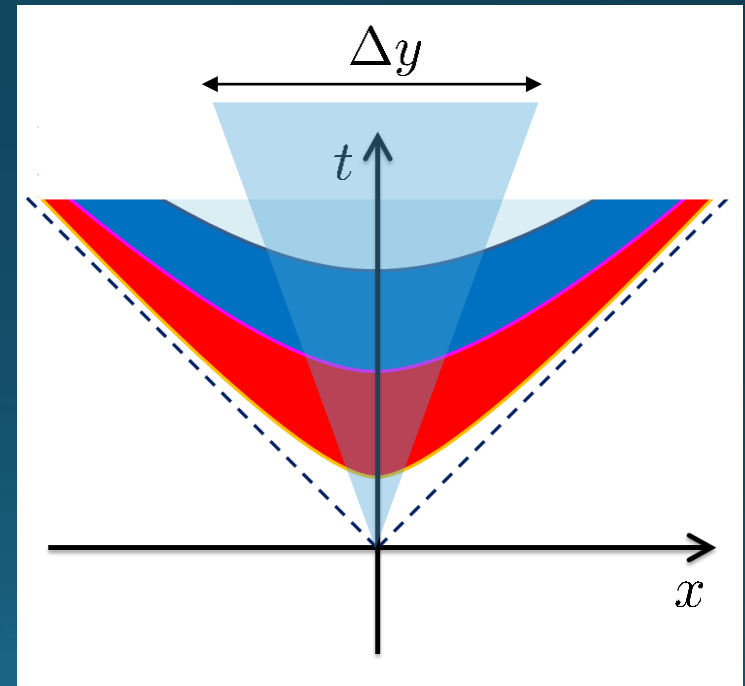
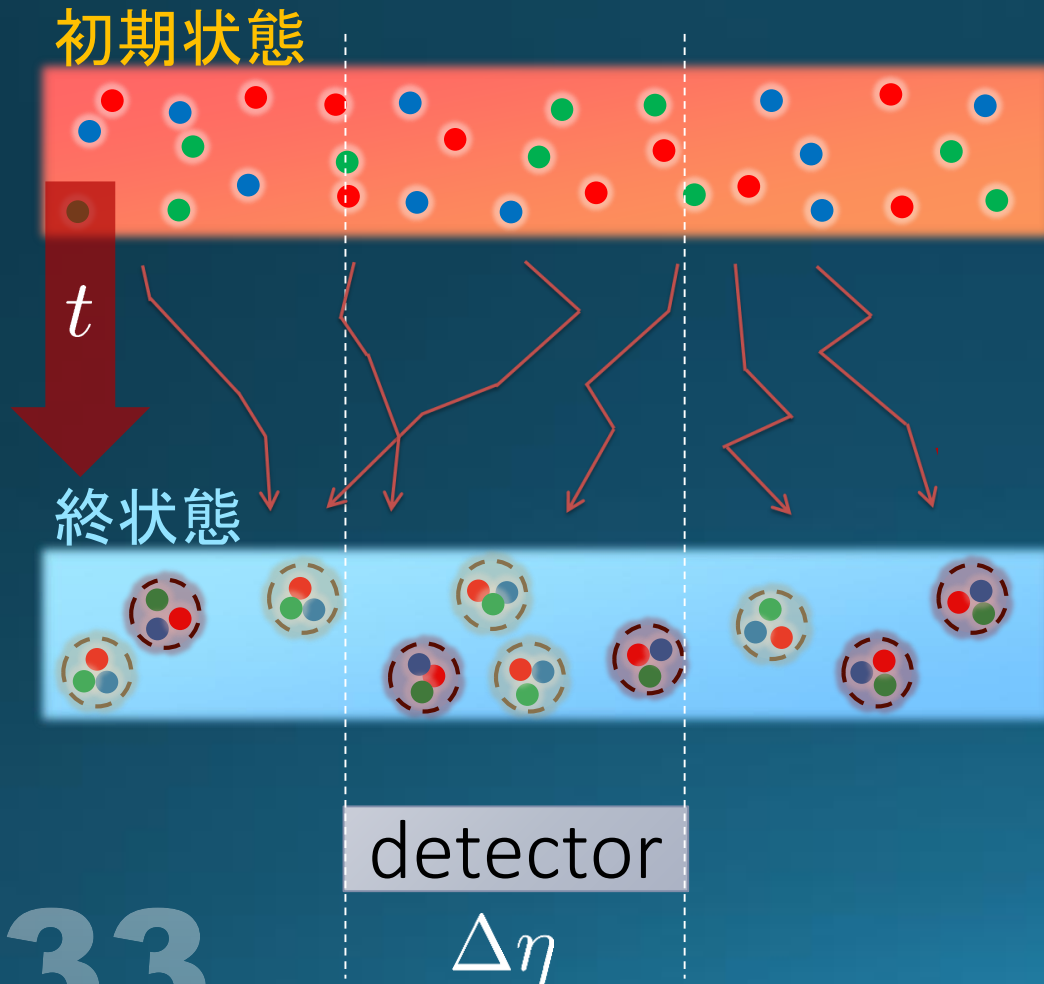


MK+ ('20, proc. of QM19)

- 相分離の形成とその持続

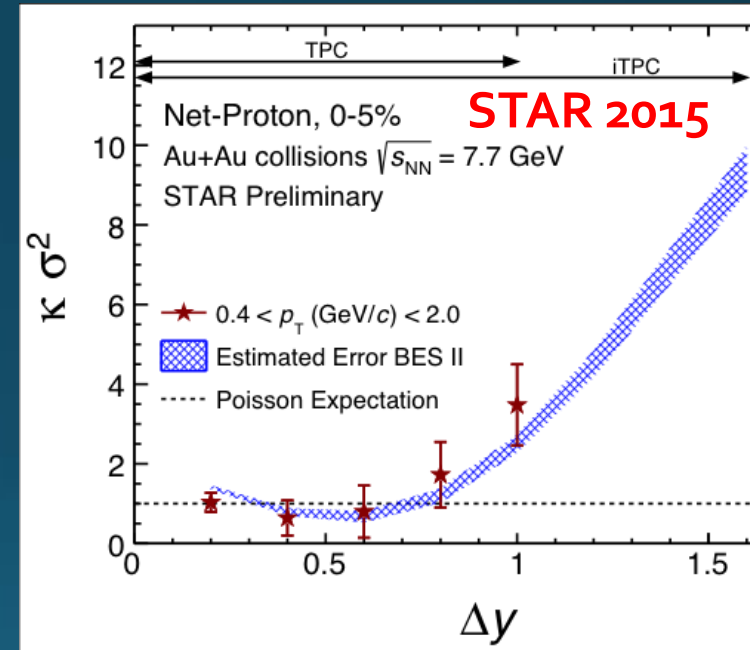
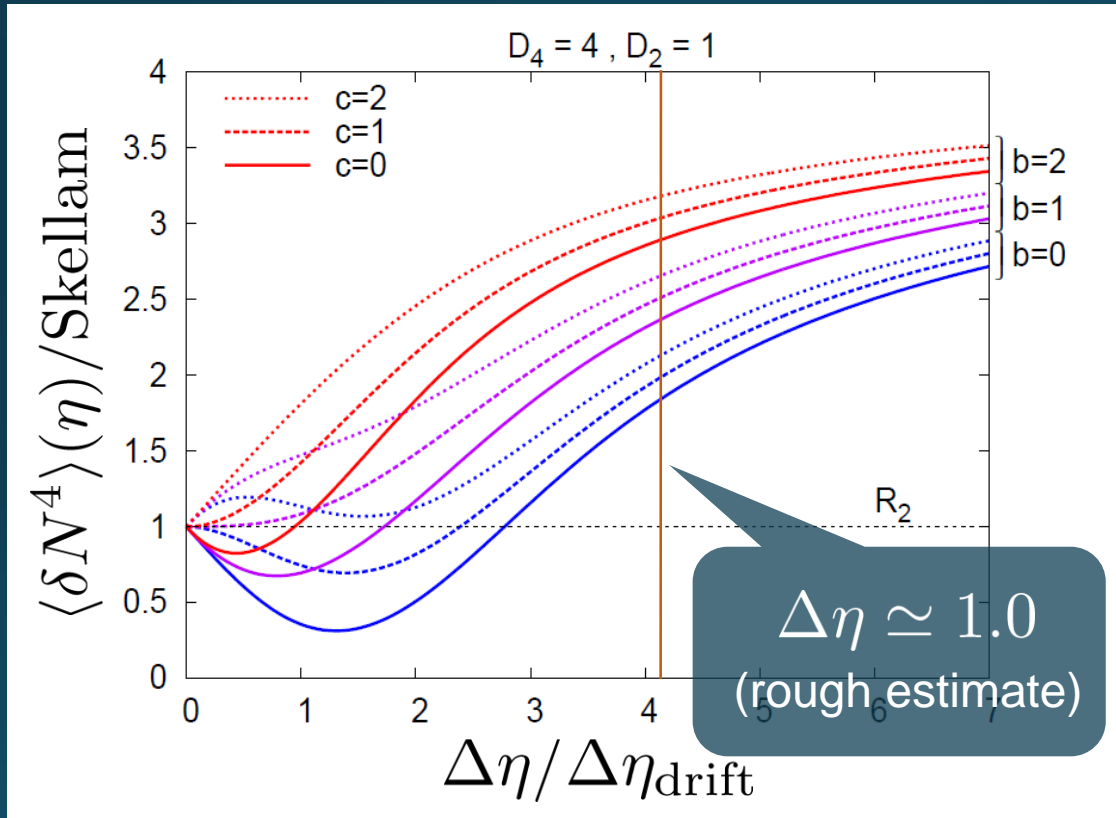
非相互作用ブラウン粒子モデル

MK, Asakawa, Ono('14); MK('15)



4次ゆらぎの Δy 依存性 in 拡散モデル

MK+ (2014); MK (2015)



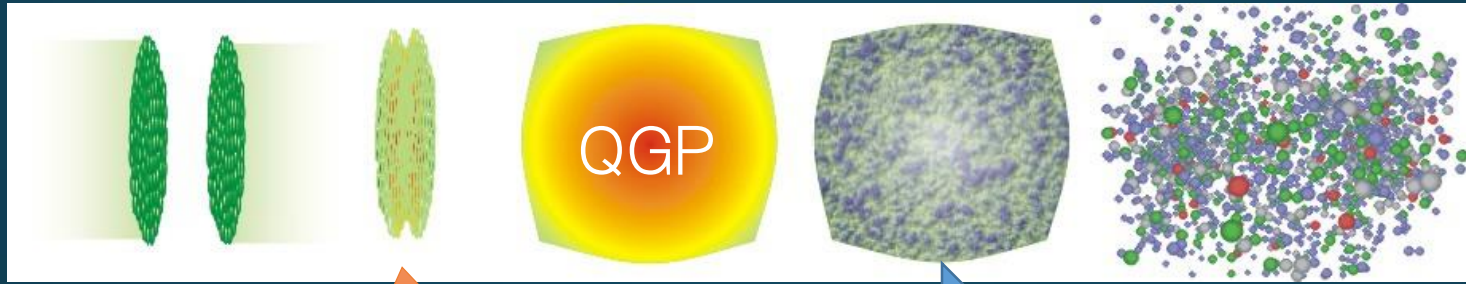
- 高次ゆらぎには、非単調な $\Delta\eta$ 依存性が現れうる。
- $\Delta\eta$ 依存性から、ゆらぎの物理的性質が理解可能！

実験結果の解釈に潜む諸問題

- バリオン数の陽子数による代用
- 有限サイズ効果
- 初期状態・体積ゆらぎ
- 共鳴崩壊
- 位相空間での測定
- 検出器効果補正
- ...

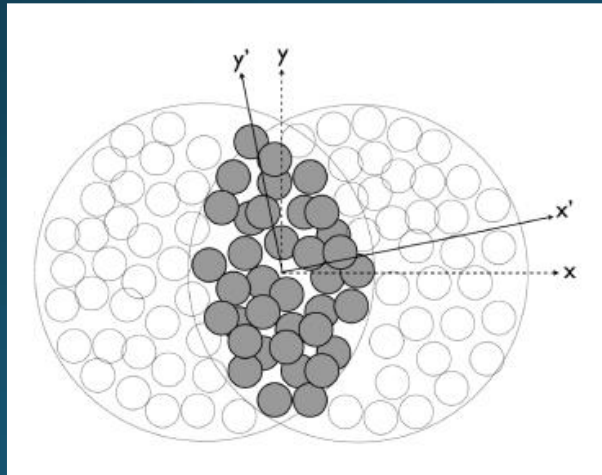
LHC-ALICE, GSI-HADESなどの結果も活用した総合的理解へ

その他のゆらぎ



衝突初期状態のゆらぎ

流体発展中のゆらぎ



ゆらぎは重イオン衝突の
時空発展の至るところに存在

統合的動的模型の発展

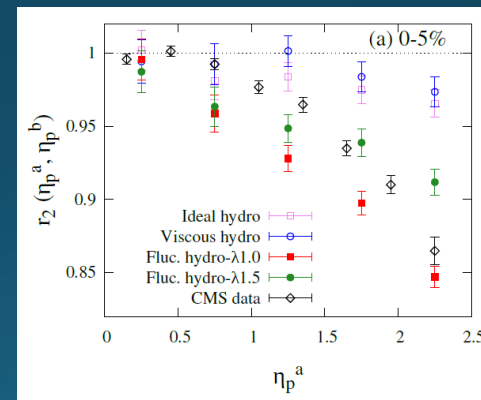
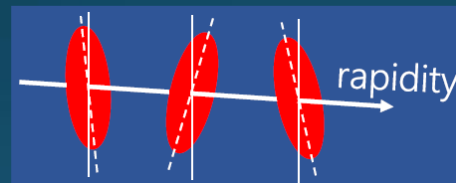
流体ゆらぎ

流体ゆらぎ方程式(確率論的流体方程式)

$$\partial_{\mu} T^{\mu\nu} = 0 \quad T^{\mu\nu} = T_{\text{ideal}}^{\mu\nu} + T_{\text{viscous}}^{\mu\nu} + \xi^{\mu\nu}$$
$$\xi^{\mu\nu}(x)\xi^{\rho\sigma}(y) = \Delta^{\mu\nu;\rho\sigma} \delta^{(4)}(x - y)$$

Kapusta, Muller, Stephanov, PRC (2012)

□ 数値シミュレーション



Sakai, Murase,
Hirano,
2003.13496

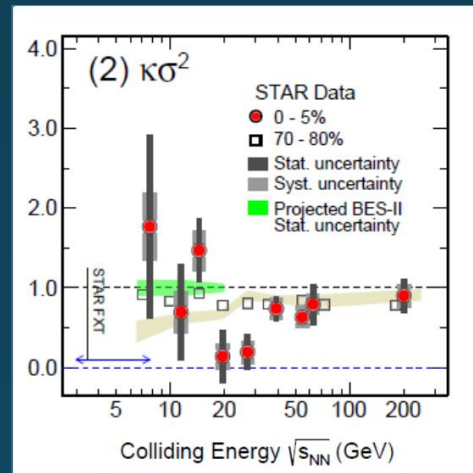
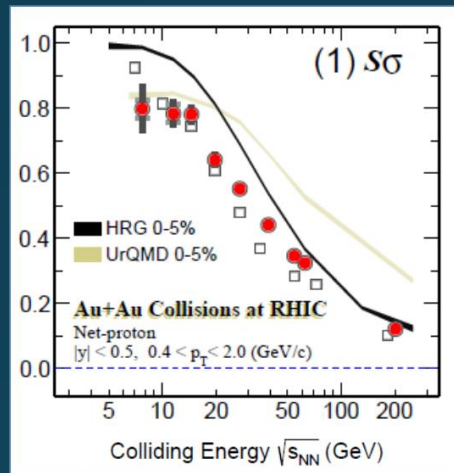
□ 決定論的アプローチ

□ Bjorken膨張下 Akamatsu, Mazeliauskas, Teaney, PRC (2017; 18)

□ “Hydro+”理論 Stephanov, Yin, PRD (2018)

まとめ

- ビームエネルギー走査による高密度物質探索が進行中
 - STAR-BES, FAIR, J-PARC-HI, ...
- QCD臨界点・一次相転移発見の期待



- 高次ゆらぎは、ポアソン分布からの有意なずれを持つ
- 非自明なシグナルが存在するが、大きくはない
- ゆらぎを通じた相構造探索に向け、**更なる理論的進展・実験結果の精密化**が必要とされる

一本の草も涼風宿りけり

even on one blade of grass the cool wind lives

小林一茶

Issa Kobayashi

1814

重イオン衝突の歴史



高エネルギーフロンティア

~2010

重イオン衝突の歴史

