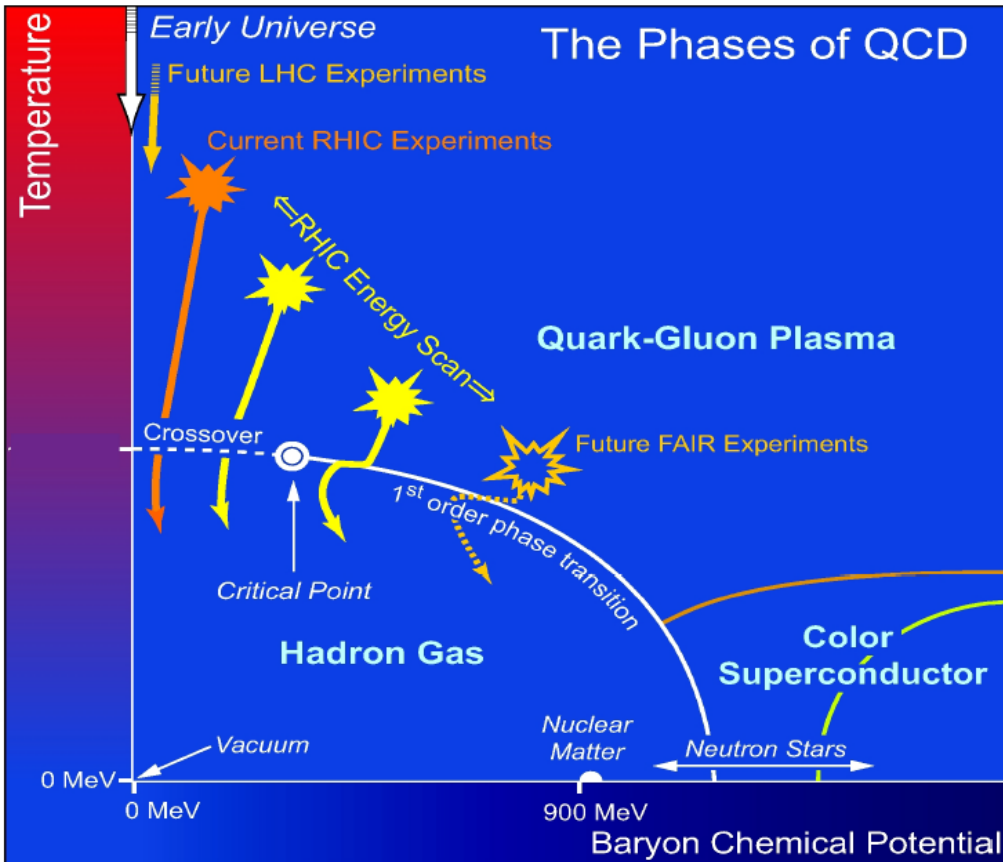


衝突エネルギー一走査により QCD相構造に迫る試み



北沢正清

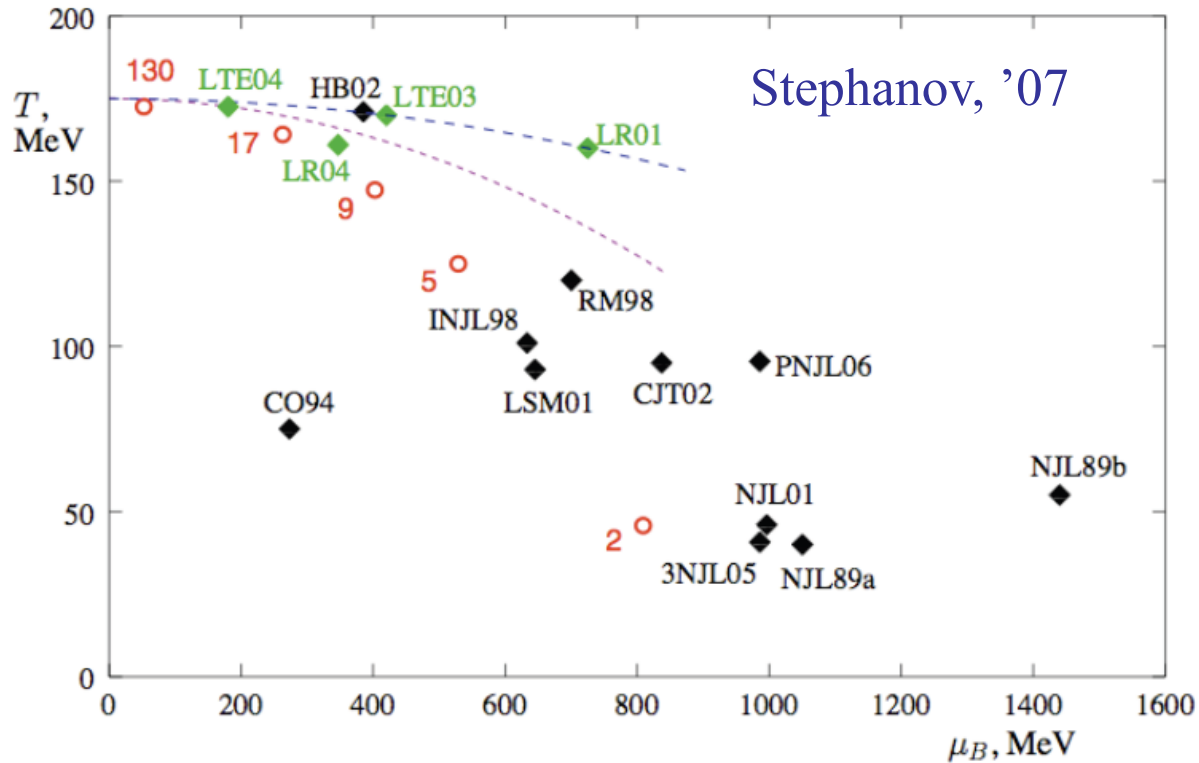
衝突エネルギー一走査



Map the QCD phase diagram

Locate (or, exclude)
QCD Critical point(s)

Where is QCD Critical Point

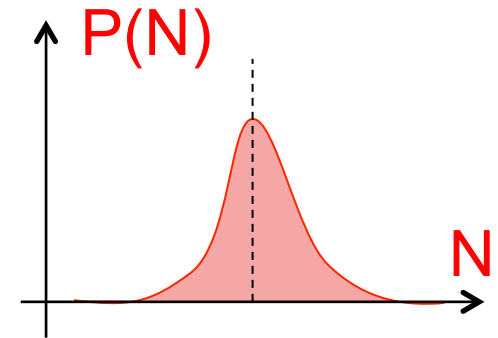
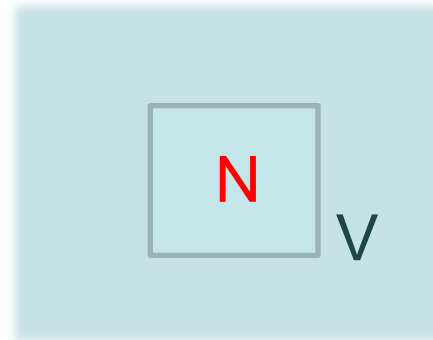


QCD臨界点は、ないかもしれないし、
たくさんあるかもしれないのだ。



Fluctuations

平衡状態において、
物理量はゆらいでいる。



ゆらぎを特徴づける量:

$$\delta N = N - \langle N \rangle$$

$$VT^3 \chi_2 = \langle \delta N^2 \rangle = \sigma^2 \quad \text{: Variance}$$

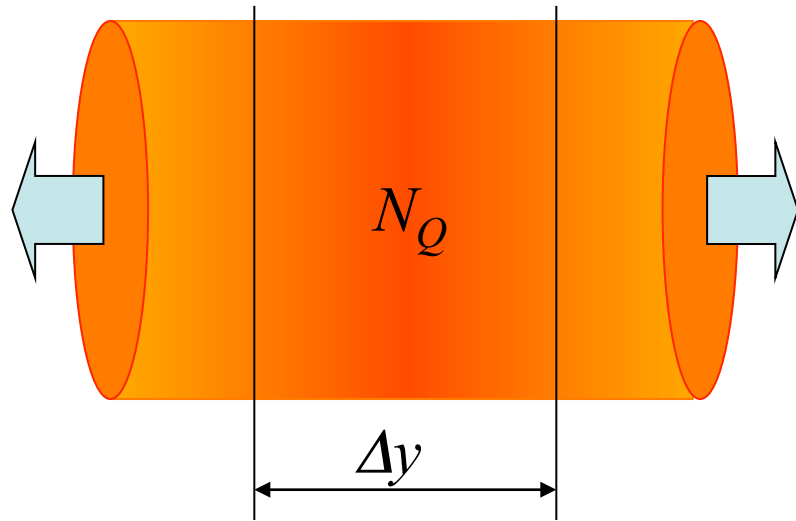
$$VT^3 \chi_3 = \langle \delta N^3 \rangle \quad \longrightarrow \quad \text{Skewness: } S = \frac{\langle \delta N^3 \rangle}{\sigma^3}$$

$$VT^3 \chi_4 = \langle \delta N^4 \rangle - 3 \langle \delta N^2 \rangle^2 \quad \longrightarrow \quad \text{Kurtosis: } \kappa = \frac{\chi_4}{\chi_2 \sigma^2} = \frac{\langle \delta N^4 \rangle}{\sigma^4} - 3$$

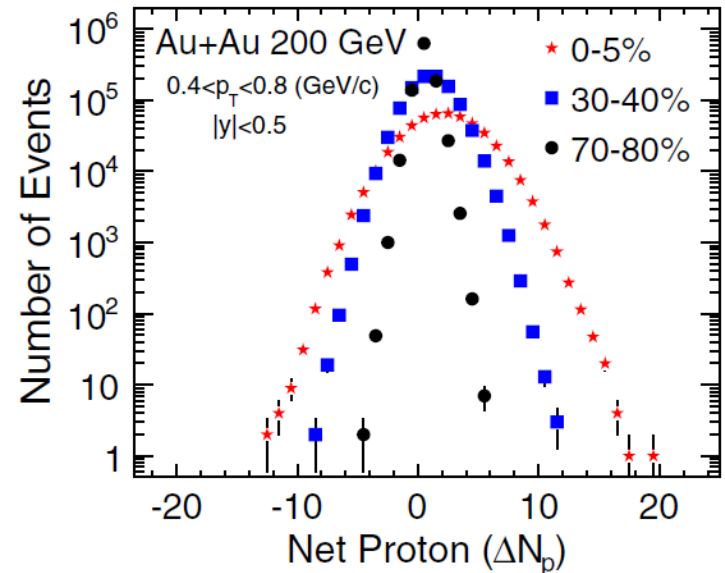
※全て示強変数

Event-by-Event Analysis @ HIC

ゆらぎ、及び高次のモーメントは、
event-by-event解析で「観測」できる。



STAR, PRL105 (2010)

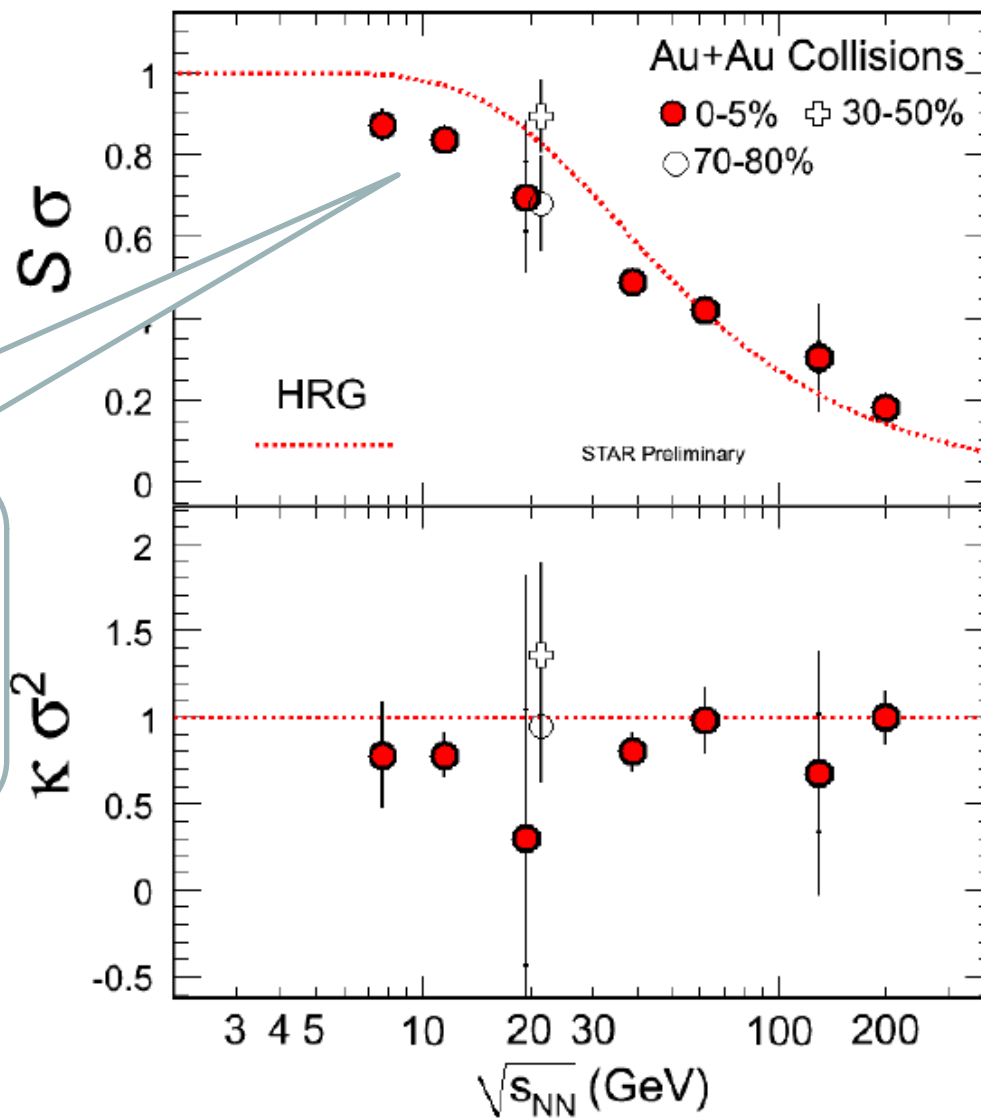


- Freezeoutからの N_Q の変化は小さいと期待する。
- 理論と比較する際は、示強変数同士の比を取るのが便利。

$$\longrightarrow \frac{\langle \delta N^3 \rangle}{\langle \delta N^2 \rangle} = S\sigma \quad \frac{\langle \delta N^4 \rangle}{\langle \delta N^2 \rangle} = \kappa\sigma^2$$

Higher Moments @ STAR

Signal of the CP??



Fluctuations at QCD Critical Point

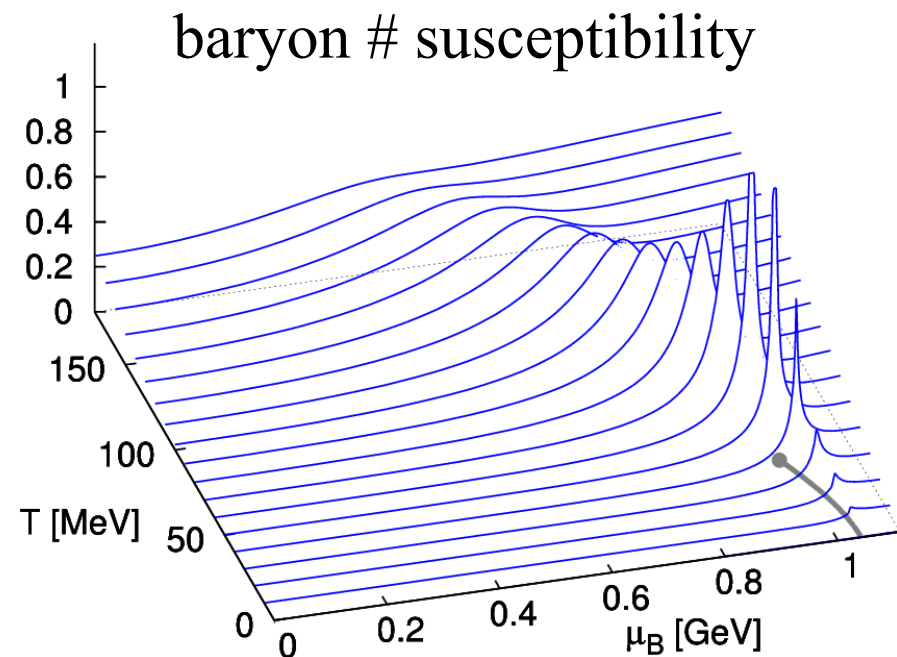
Stephanov, Rajagopal, Shuryak '98,'99

- 2nd order phase transition at the CP.



- divergences in fluctuations of

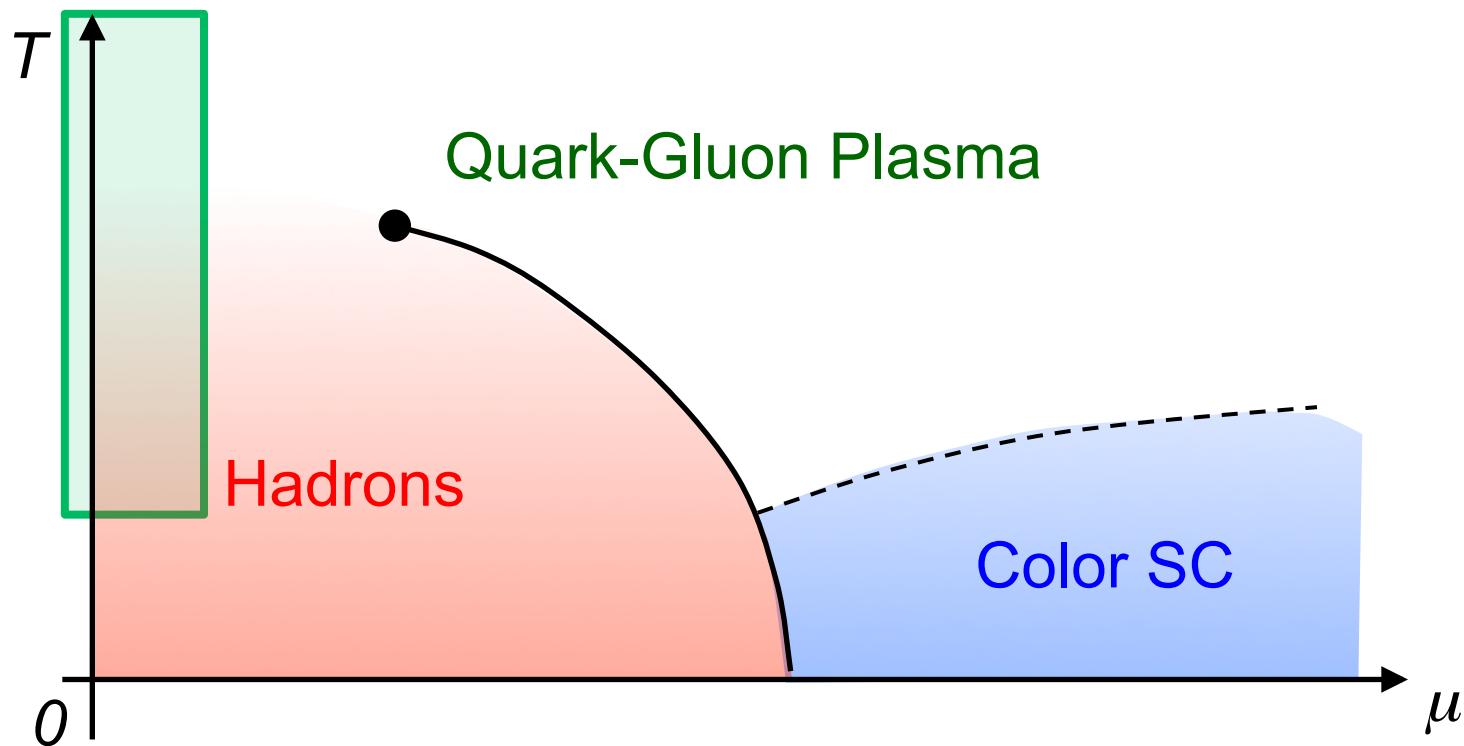
- p_T distribution
- freezeout T
- baryon number, proton, charge, ...



- Higher order moments has stronger ξ dep near the CP. Stephanov, '09

$$\langle \delta N^2 \rangle \sim \xi^2 \quad \langle \delta N^3 \rangle = \xi^{4.5} \quad \langle \delta N^4 \rangle_c = \xi^7$$

ゼロ温度付近

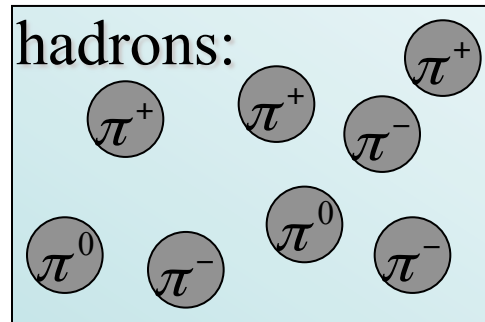


(Net-)Charge Fluctuations

Asakawa, Heinz, Muller, '00
Jeon, Koch, '00

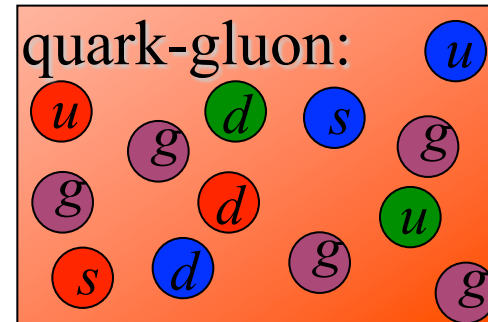
• D -measure: $D = 4 \frac{\langle (\delta N_Q)^2 \rangle}{N_{ch}}$

N_Q : net charge #
 N_{ch} : total #



$D \sim 3-4$

large \leftrightarrow small



$D \sim 1$

• values of D :

- When is experimentally measured D formed?
 - **Conserved charges can remember** fluctuations at early stage, if diffusions are sufficiently slow.

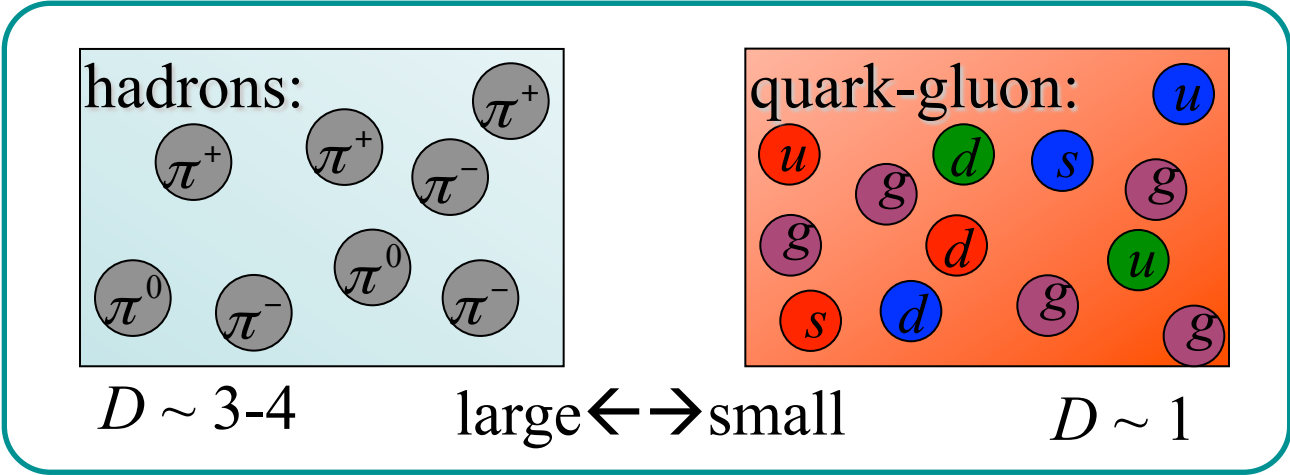
(Net-)Charge Fluctuations

Asakawa, Heinz, Muller, '00
Jeon, Koch, '00

● D -measure:
$$D = 4 \frac{\langle (\delta N_Q)^2 \rangle}{N_{ch}}$$

N_Q : net charge #
 N_{ch} : total #

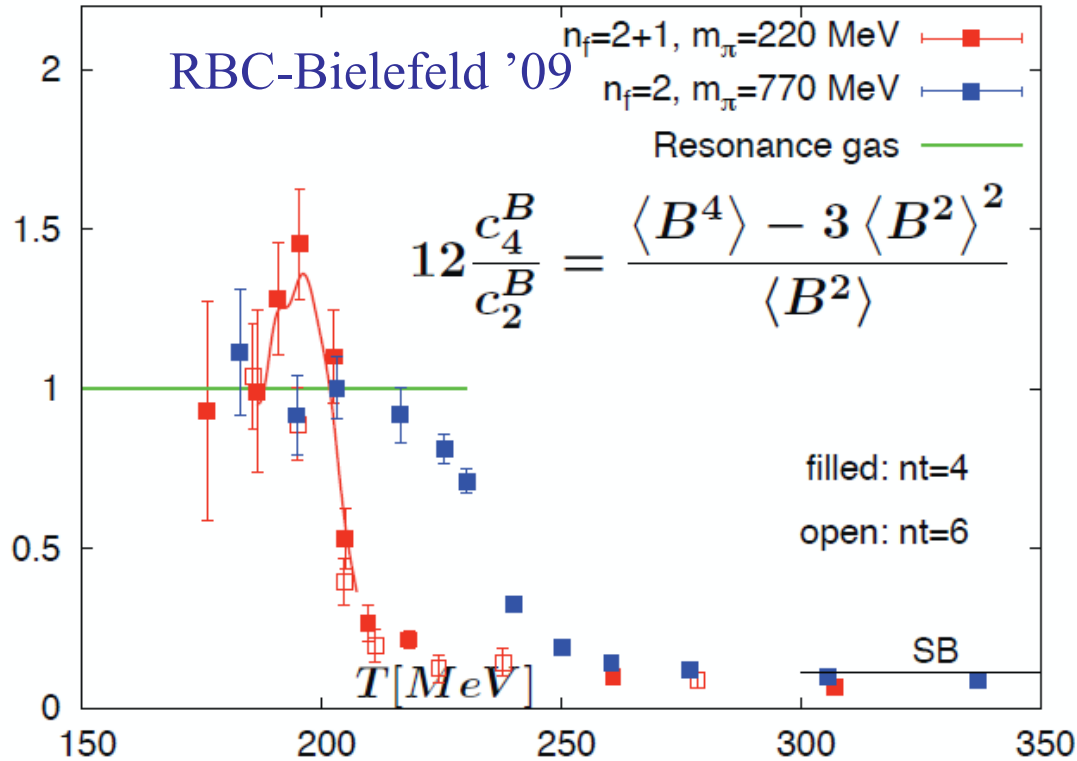
● values of D :



実験結果: $D \sim 3$
PHENIX '02, STAR '03

Counterarguments in
Bialas('02), Nonaka, *et al.*('05)

- Ratios between higher order moments (cumulants)

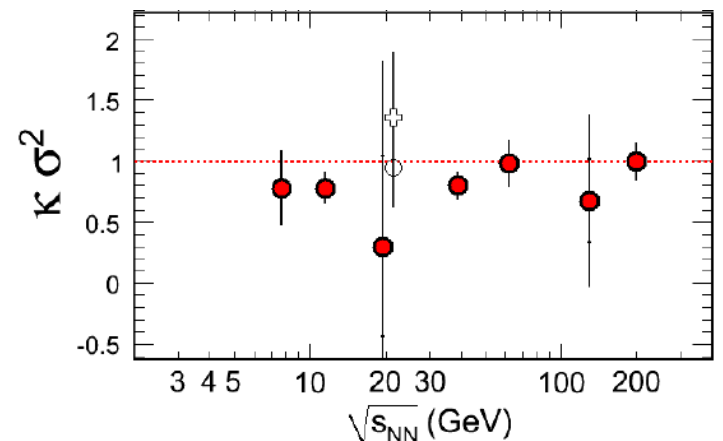


4th/2nd at $\mu = 0$ reflects the charge of quasi-particles.
For, $T \ll m$, $\kappa \sigma^2 \sim Q^2$

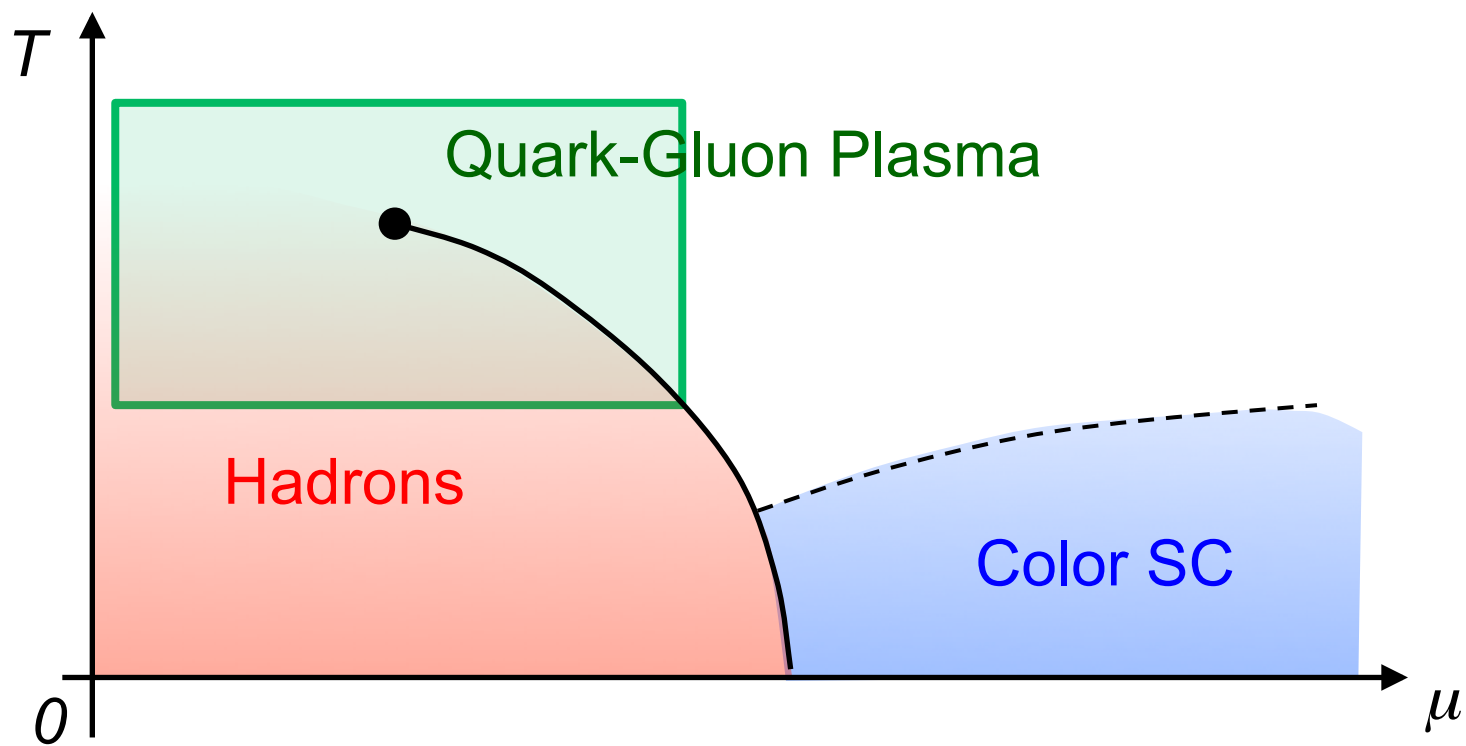
Hadrons:1 \leftrightarrow Quarks:1/3²

実験結果: $c_4/c_2 \sim 1$

STAR '10,'11



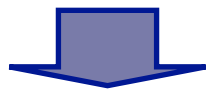
相構造



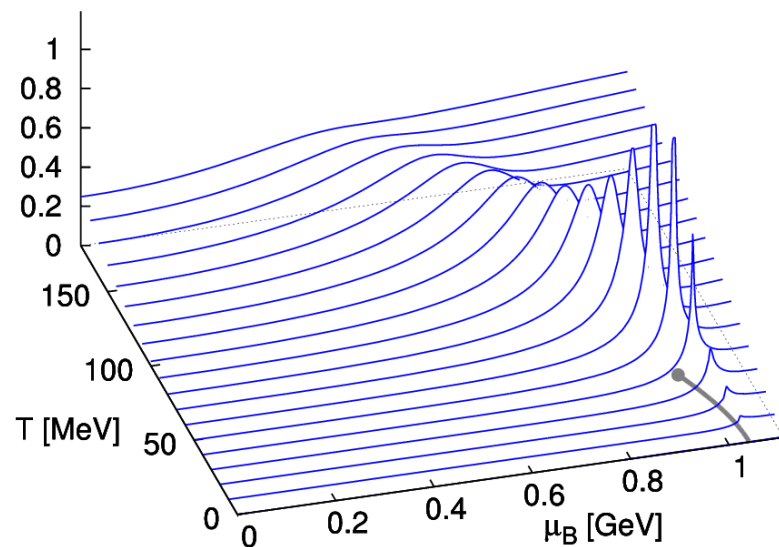
Take a Derivative of χ_B

Asakawa, Ejiri, MK, PRL103 (2009)

- χ_B has an edge along the phase boundary



$\frac{\partial \chi_B}{\partial \mu_B}$ changes the sign at QCD phase boundary!



Note:
$$\chi_B = -\frac{1}{V} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \mu_B^2} = \frac{\langle (\delta N_B)^2 \rangle}{VT}$$

$$\frac{\partial \chi_B}{\partial \mu_B} = -\frac{1}{V} \frac{\partial^3 \Omega}{\partial \mu_B^3} = \frac{\langle (\delta N_B)^3 \rangle}{VT^2} \equiv m_3(\text{BBB})$$

: third moment of fluctuations

$m_3(\text{BBB}), m_3(\text{BBE}), m_3(\text{BEE}), m_3(\text{EEE}),$
 $m_3(\text{QQQ}), m_3(\text{QQE}),$ and $m_3(\text{QEE})$

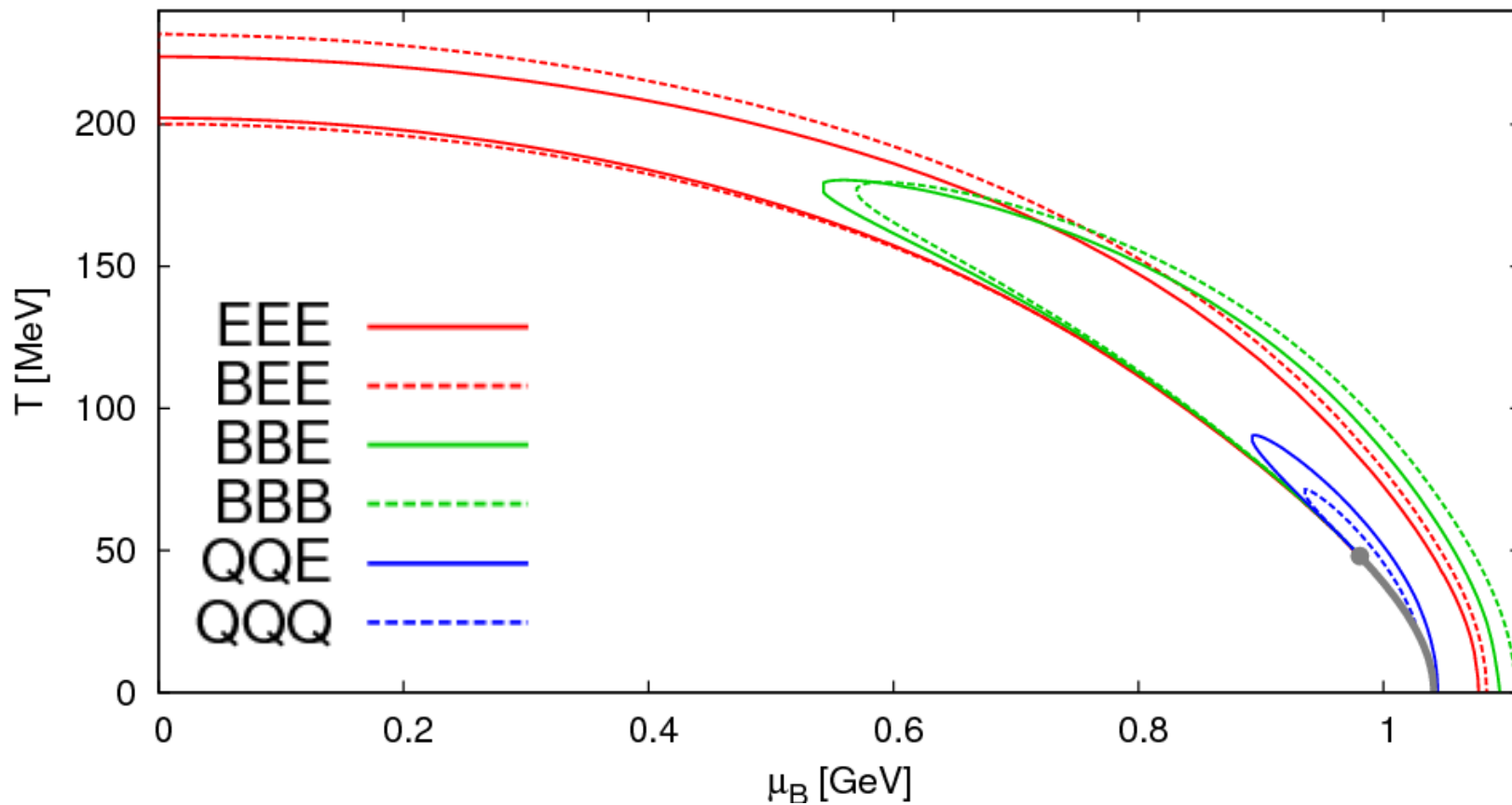
all change signs at QCD phase boundary near the critical point.

Impact of Negative Third Moments

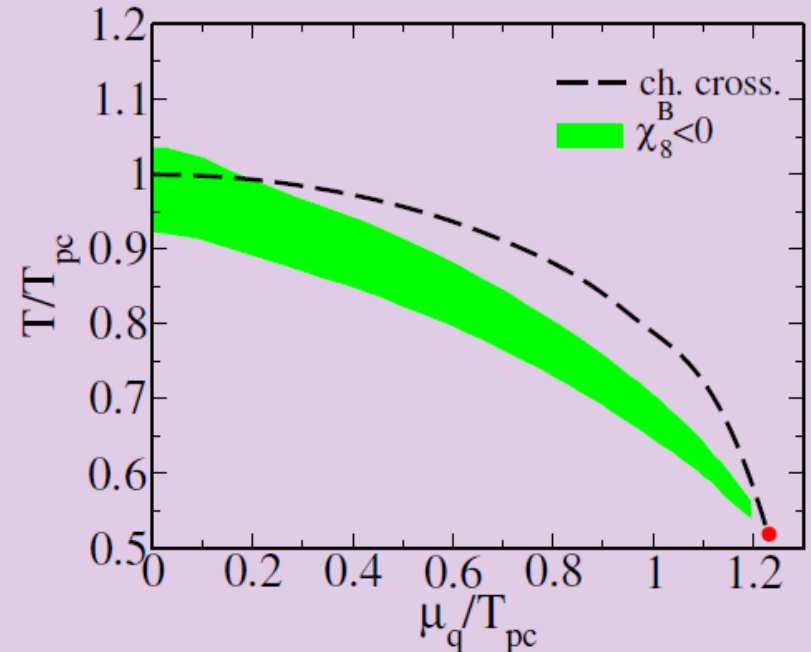
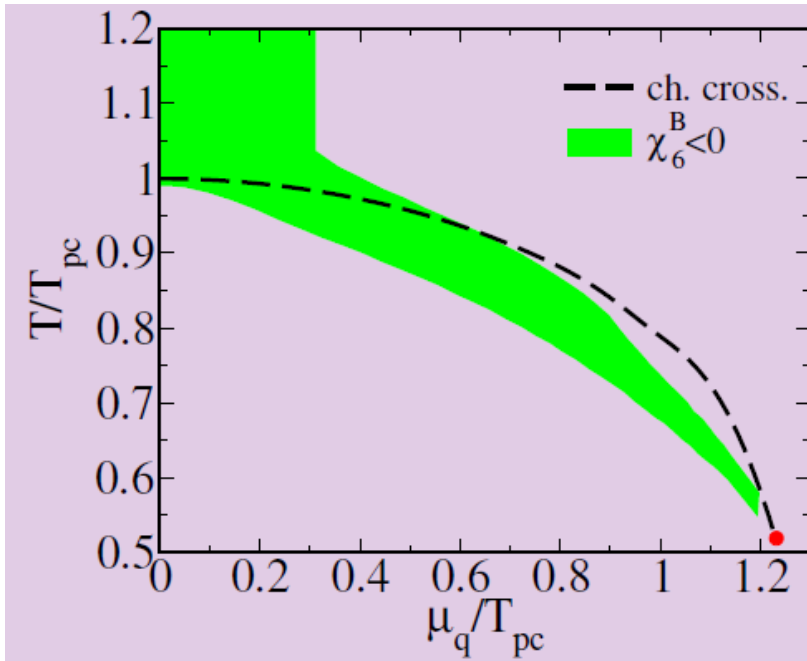
- Once negative $m_3(\text{BBB})$ is established, it is evidences that
 - { (1) χ_B has a peak structure in the QCD phase diagram.
 - { (2) Hot matter beyond the peak is created in the collisions.
- {
 - **No** dependence on any specific models.
 - **Just the sign! No** normalization (such as by N_{ch}).

Model Analysis

2-flavor NJL;
 $G=5.5\text{GeV}^{-2}$, $m_q=5.5\text{MeV}$, $\Lambda=631\text{MeV}$



- Regions with $m_3(*EE) < 0$ exist even on T -axis.
- 三次のモーメントは、単独の期待値で与えられる！



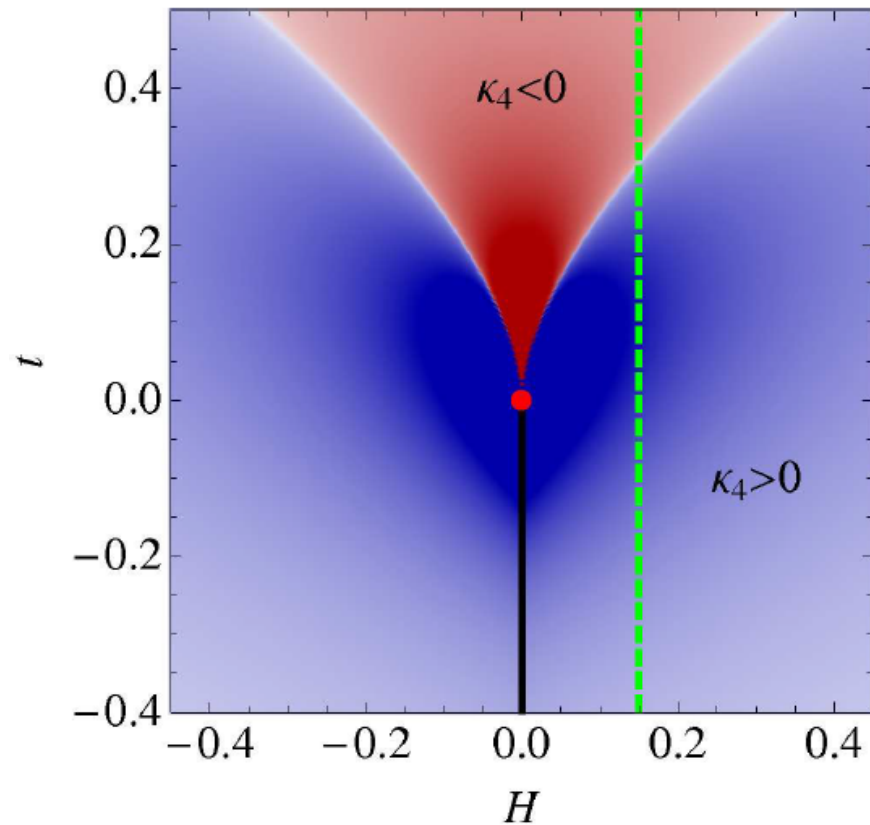
✘ イメージを表示できません。メモリ不足のためにイメージを開くことができないか、イメージが破損している可能性があります。コンピューターを再起動して再度ファイルを開いてください。それでも赤い x が表示される場合は、イメージを削除して挿入してください。

Cheng, et al. '08

6次および8次のモーメントは、通常相においても符号を変える。
 →負符号が観測しやすいかも

c6 on the lattice →

4th Order Near the CP



Stephanov, 1104.1627

Kurtosis changes the sign around the CP

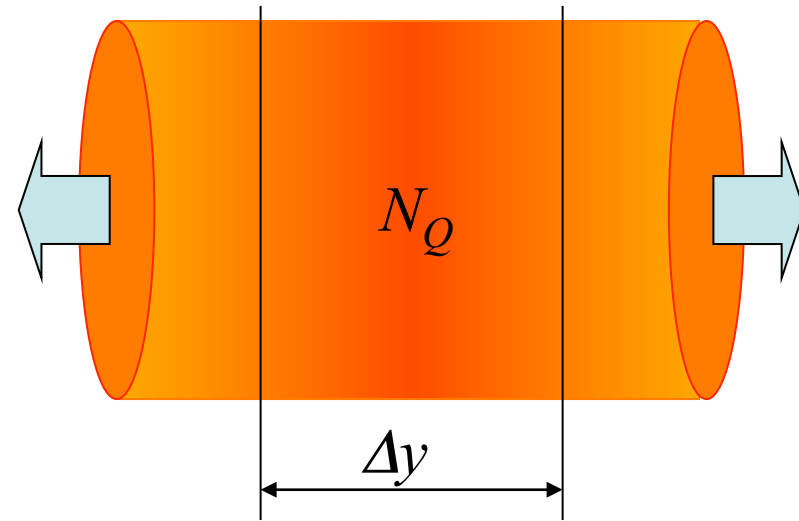
観測にかかるゆらぎは、いつ形成されるのか？

保存量のゆらぎは、拡散によってのみ変化するので変化しにくい。

Asakawa, Heinz, Muller, '00

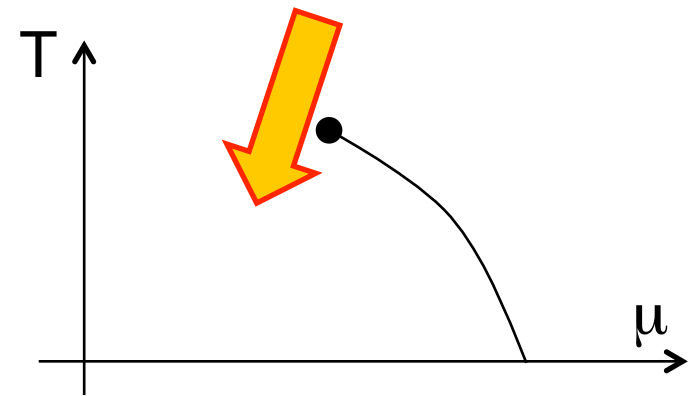
Jeon, Koch, '00

Shuryak, Stephanov, '02



非保存量のゆらぎの変化も、保存量の緩和速度と比べてさほど速くない。

Stephanov, '10



初期段階において、
ゆらぎは十分に形成されるのか？
拡散速度は、次数に依ることはないのか？

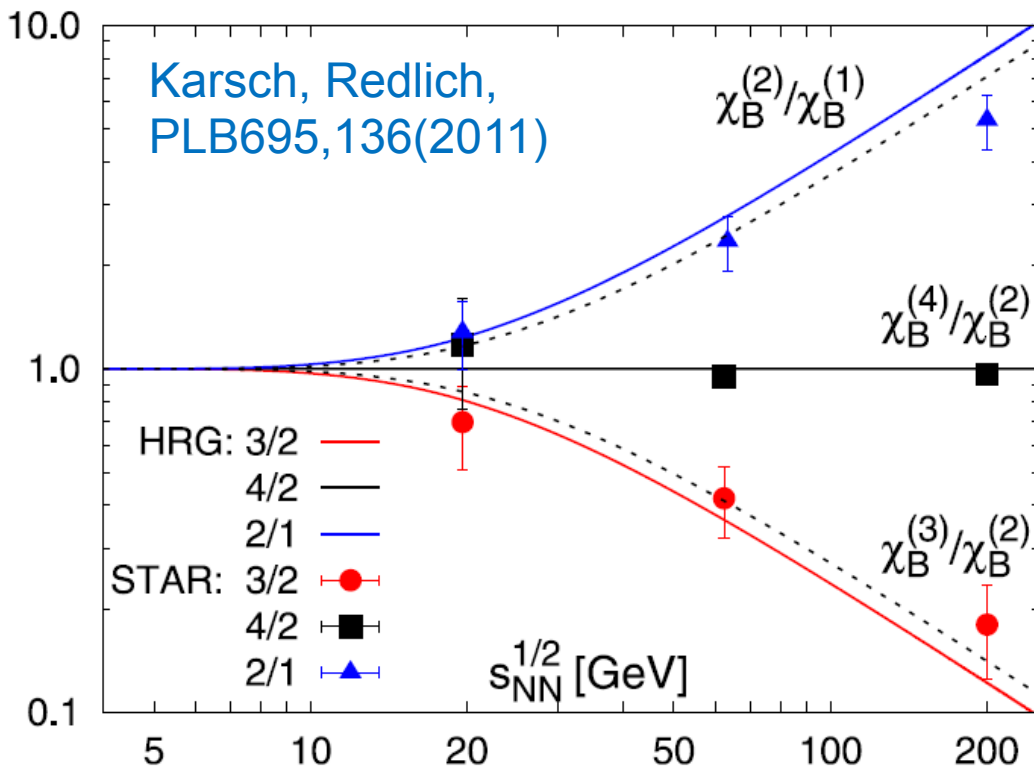
Summary 2

Critical Point



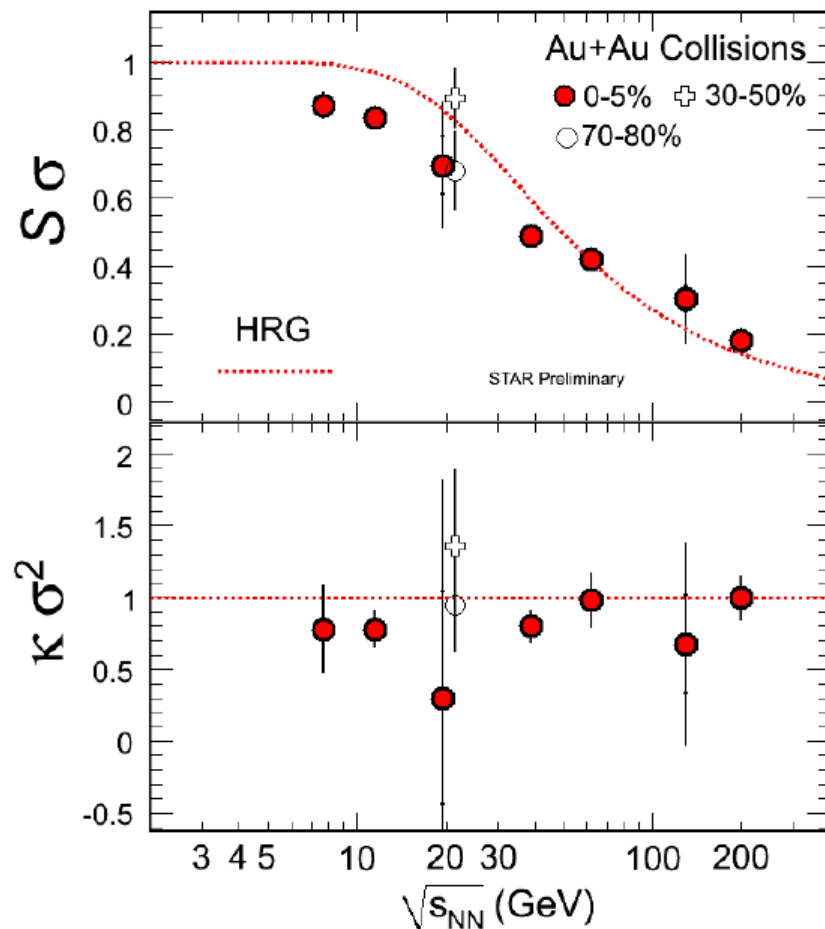
Let's go see the scenery over the ridge!

Hadron Resonance Gas Modelとの比較



実線: HRG

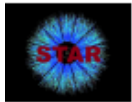
実験: STAR (2010)



Note: 実験データは、陽子数。

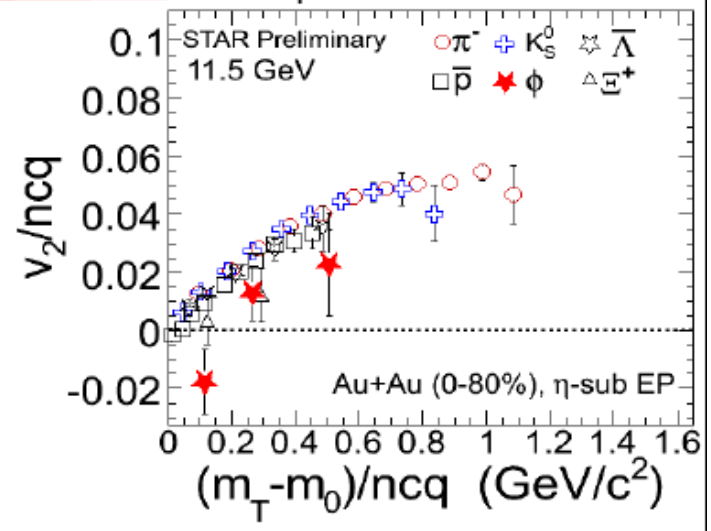
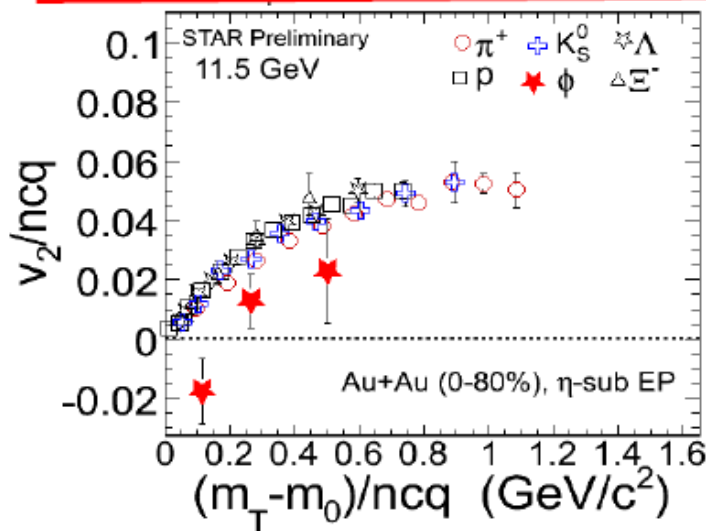
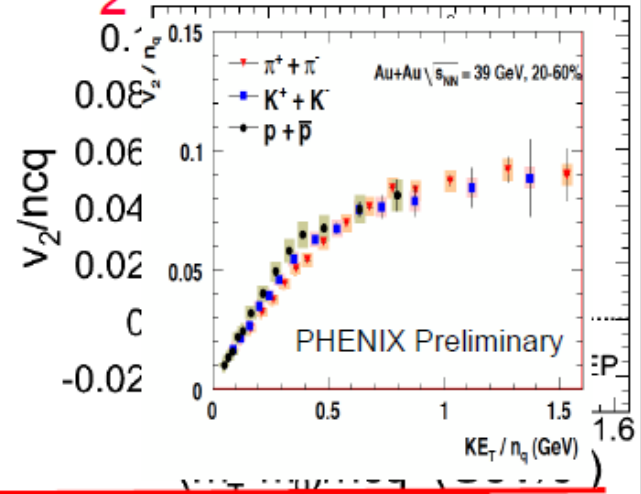
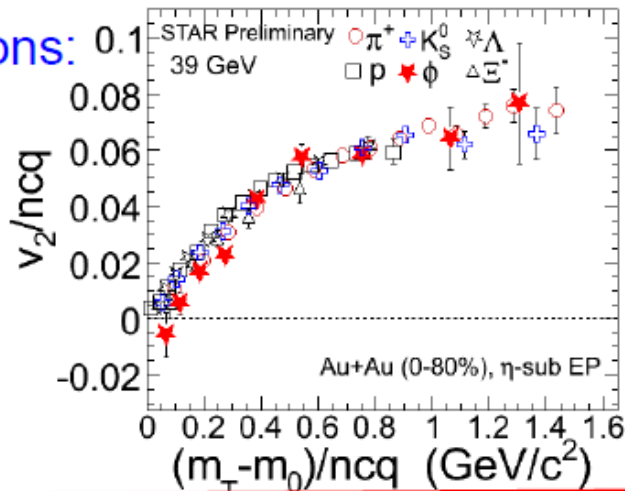
バリオン数ではないので、保存量ではない。

その他の物理量の \sqrt{s} 依存性



NCQ scaling of v_2

Observations:



ϕ meson v_2 falls off the trend from other hadrons at 11.5 GeV

まとめ

- 衝突エネルギー走査によるQCD相構造の探索において、粒子数のゆらぎ、特に高次のモーメントは有用な物理量である。
- 実験結果も出始めている。高エネルギーでHRGとconsistent。低エネルギーでのずれの起源は??
- 理論的課題:
 - 相構造および、各モーメントの振る舞い(格子QCD?)
 - 他の物理量?
 - 動的時間発展
 - フローなどゆらぎ以外の物理量