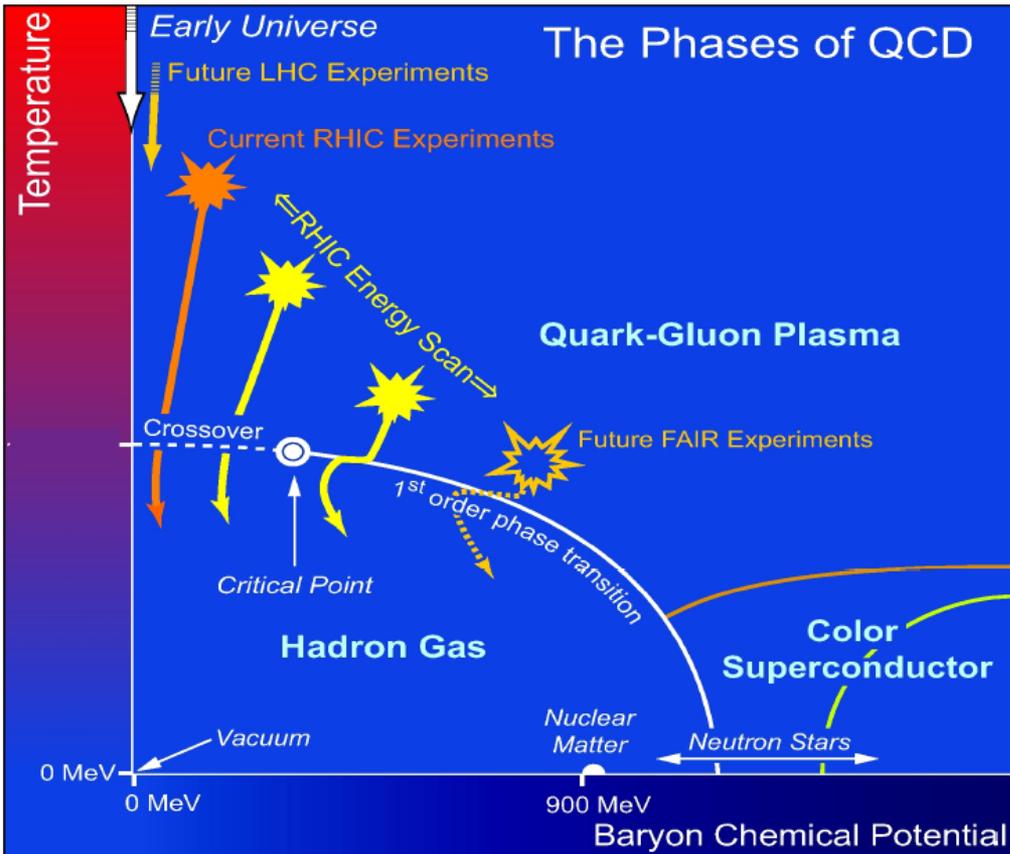


# 衝突エネルギー一走査により QCD相構造に迫る試み



北沢正清

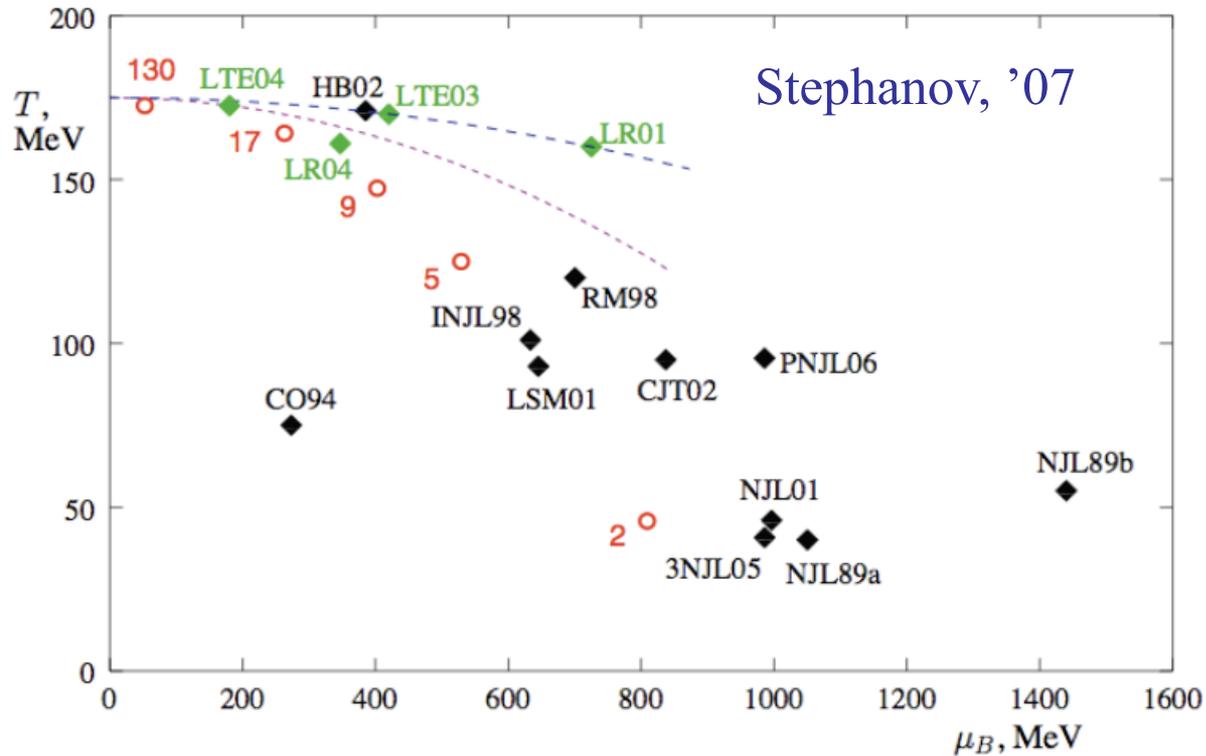
# 衝突エネルギー一走査



Map the QCD phase diagram

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

# Where is QCD Critical Point

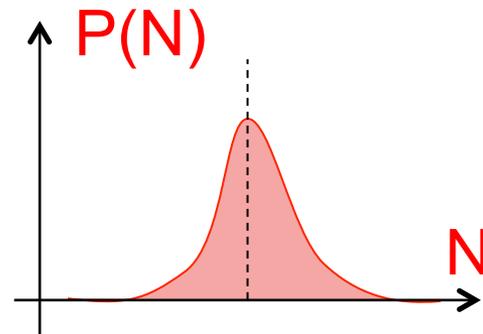
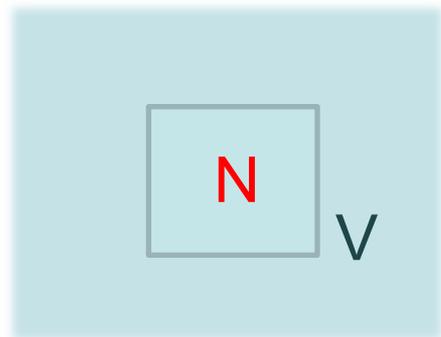


QCD臨界点は、ないかもしれないし、  
たくさんあるかもしれないのだ。



# 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:

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

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

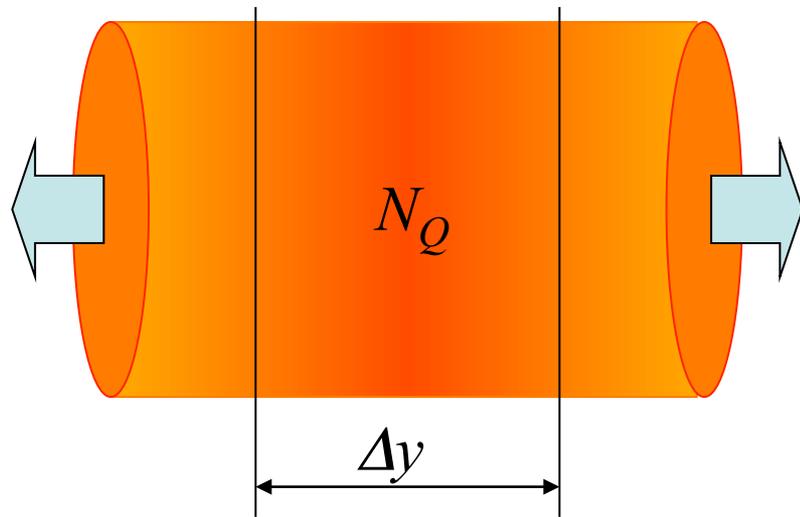
$$VT^3 \chi_3 = \langle \delta N^3 \rangle \quad \longrightarrow \quad \text{Skewness: } S = \frac{\langle \delta N^3 \rangle}{\sigma^3}$$

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

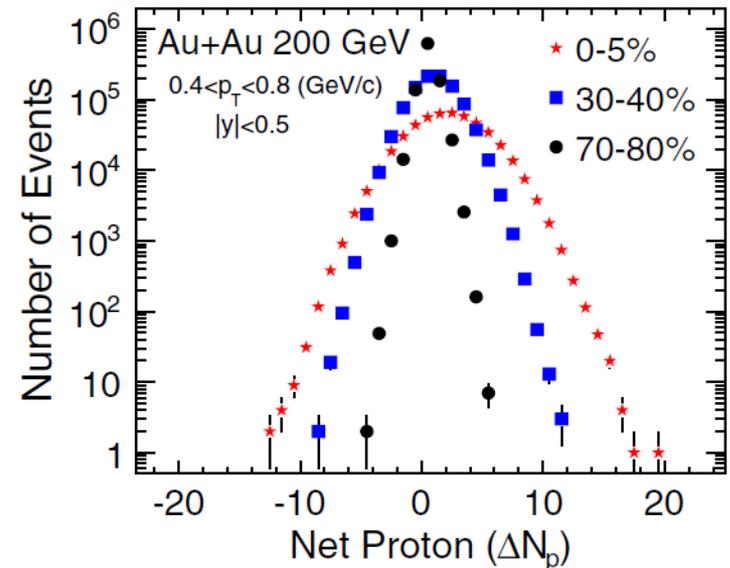
※全て示強変数

# 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)

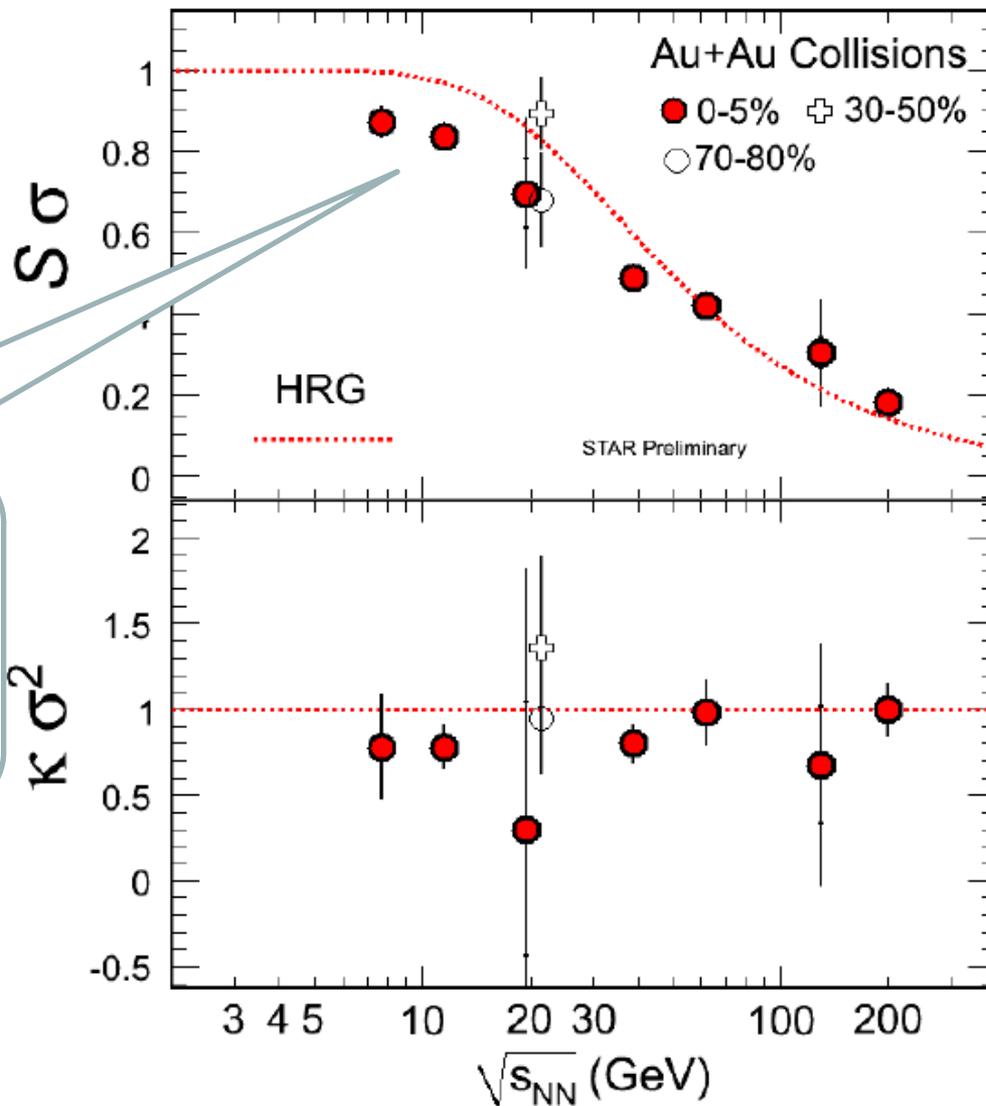


- Freezeoutからの $N_Q$ の変化は小さいと期待する。
- 理論と比較する際は、示強変数同士の比を取るのが便利。

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

# Higher Moments @ STAR

Signal of the CP??



# Fluctuations at QCD Critical Point

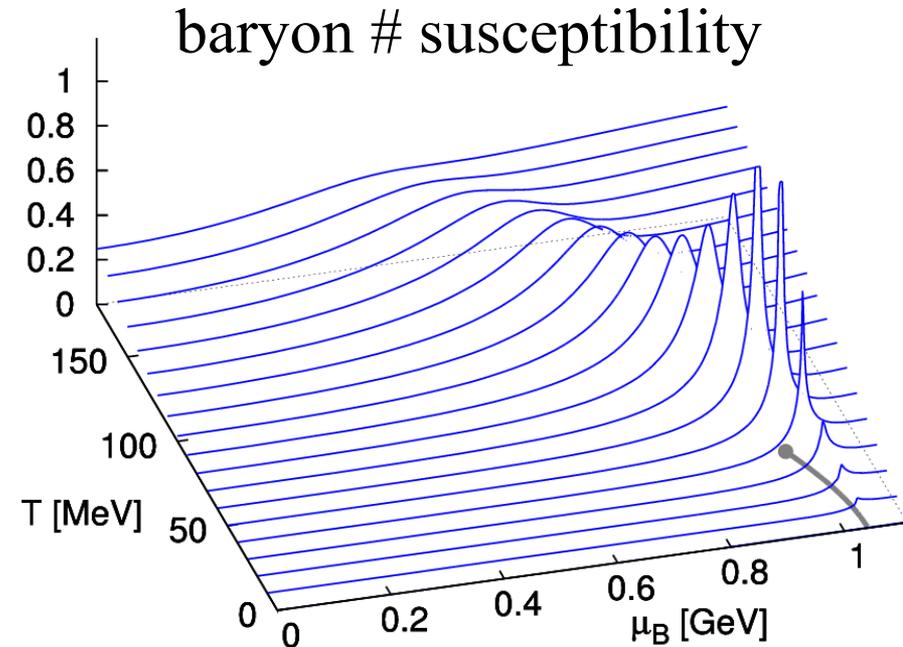
Stephanov, Rajagopal, Shuryak '98,'99

- 2<sup>nd</sup> order phase transition at the CP.



- divergences in fluctuations of

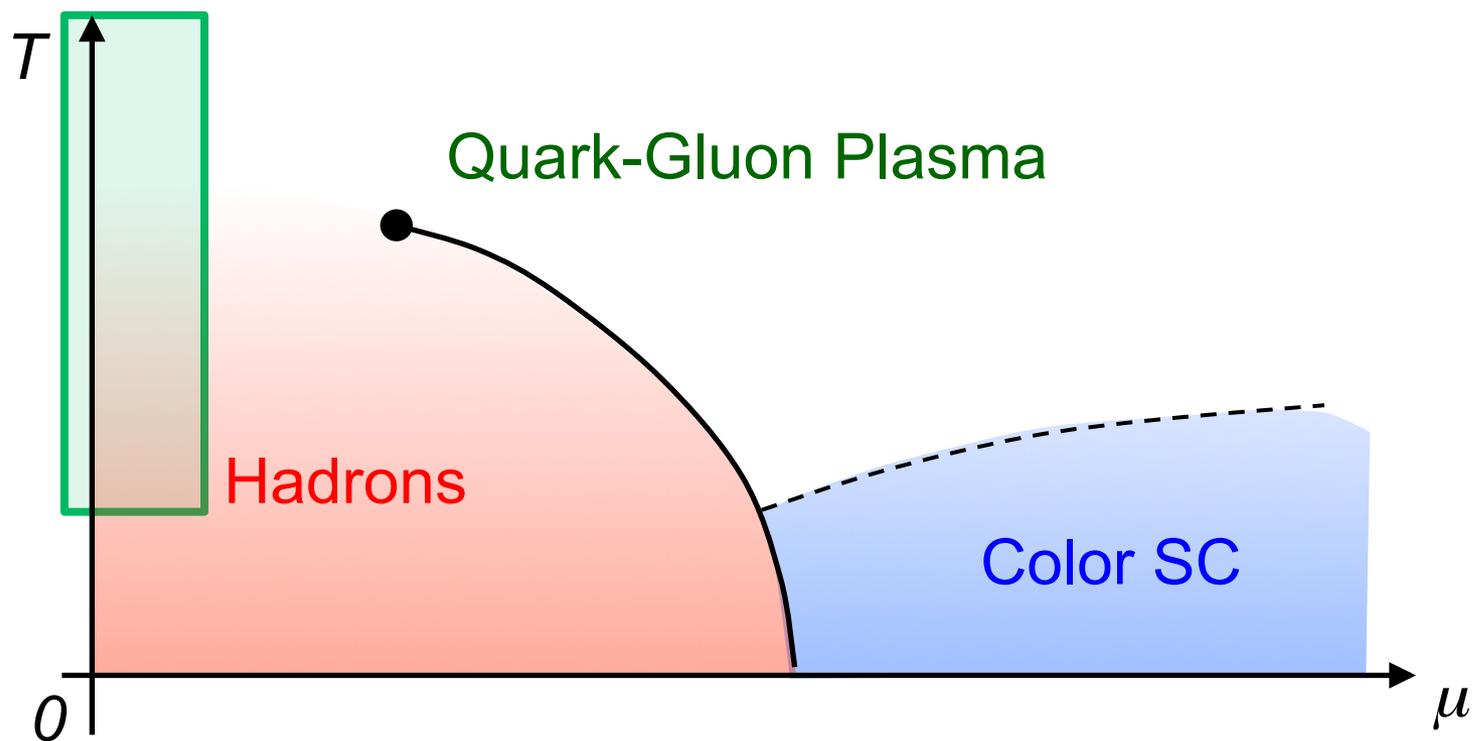
- $p_T$  distribution
- freezeout  $T$
- baryon number, proton, charge, ...



- Higher order moments has stronger  $\xi$  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

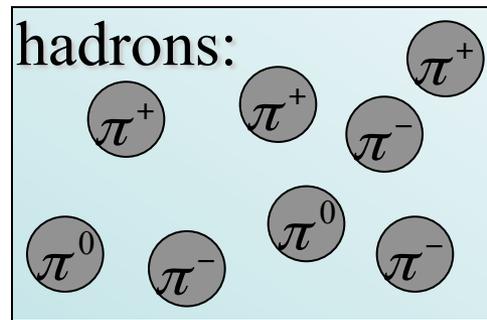


# (Net-)Charge Fluctuations

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

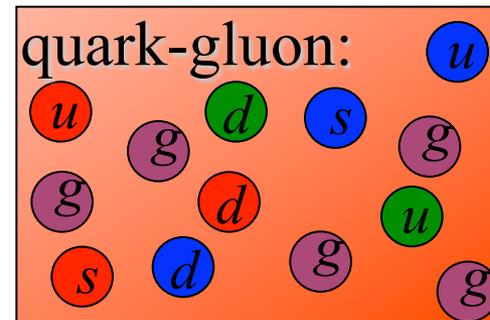
•  $D$ -measure:  $D = 4 \frac{\langle (\delta N_Q)^2 \rangle}{N_{ch}}$

$N_Q$ : 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.

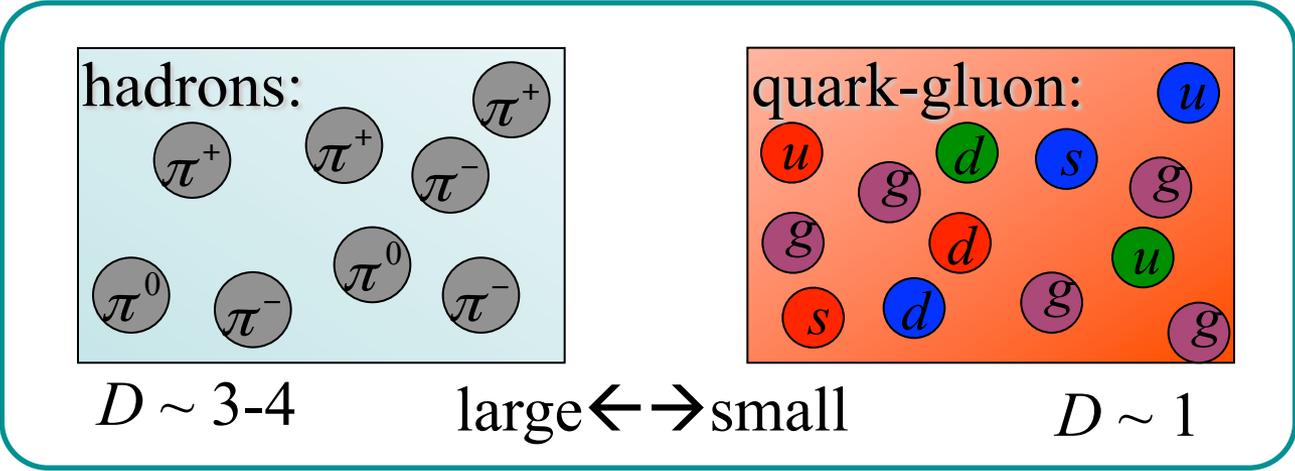
# (Net-)Charge Fluctuations

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 #

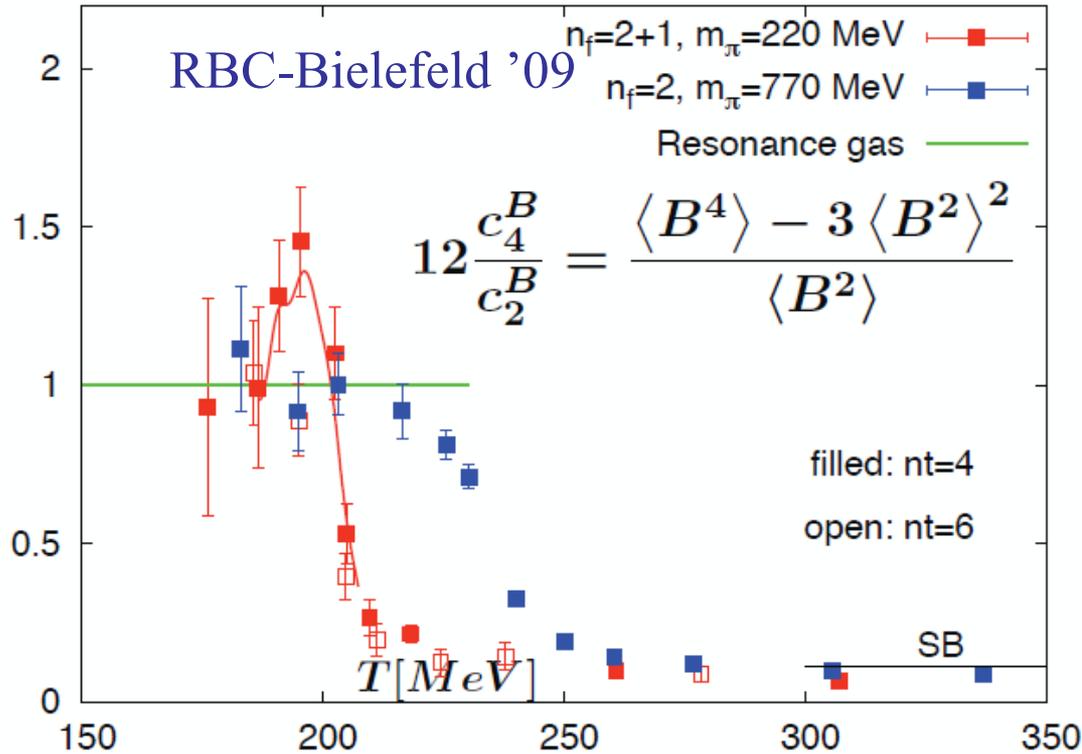
● values of  $D$ :



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)

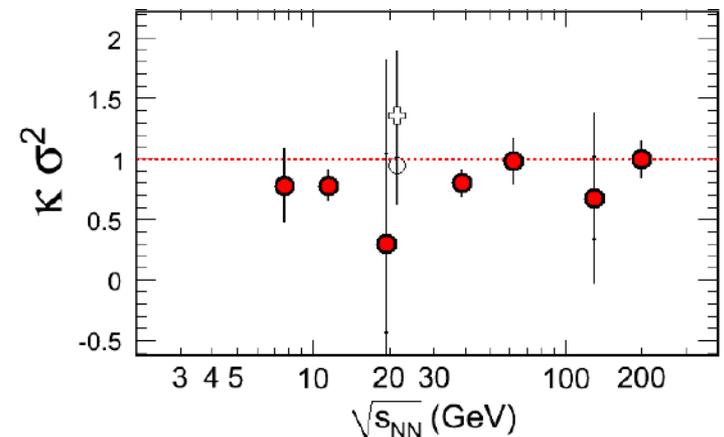


4th/2nd at  $\mu = 0$  reflects the charge of quasi-particles.  
For,  $T \ll m$ ,  $\kappa \sigma^2 \sim Q^2$

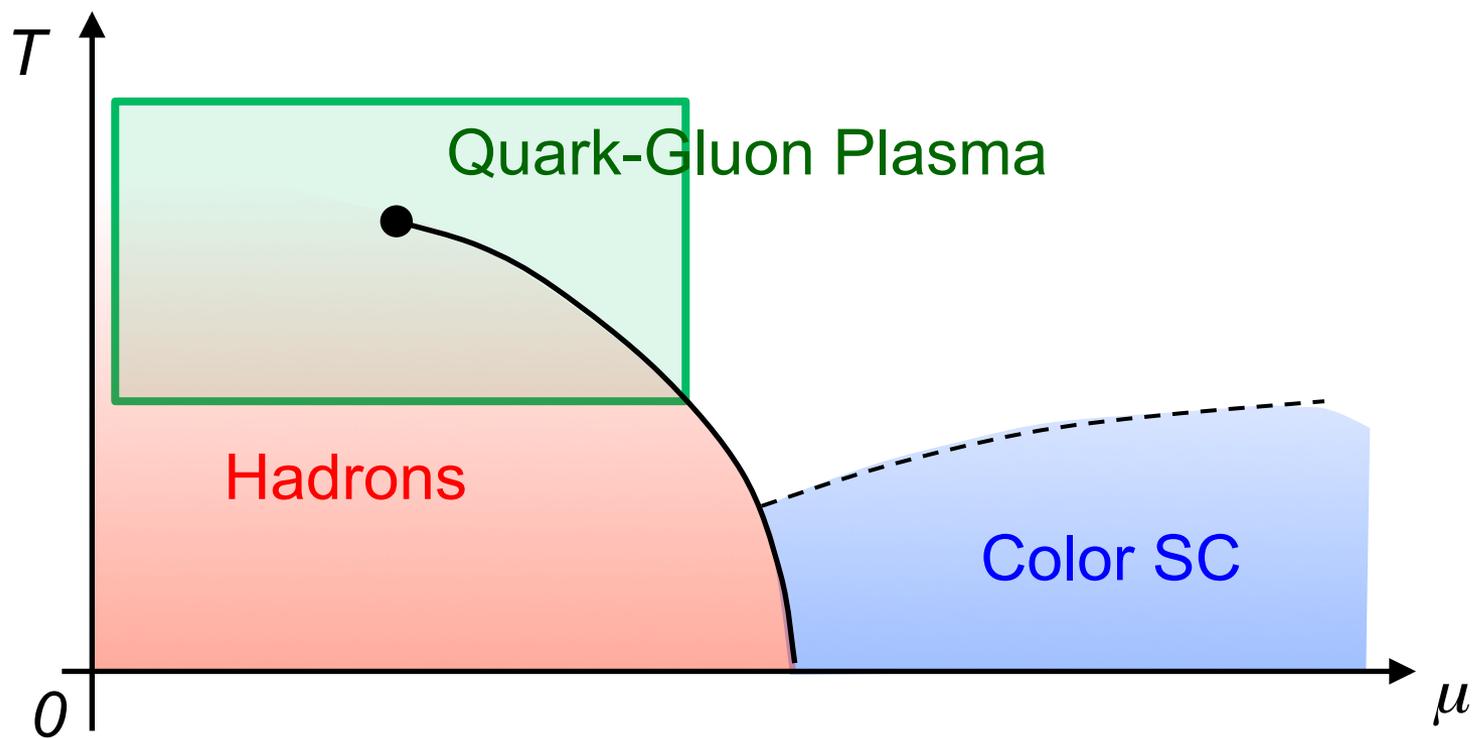
Hadrons:1  $\leftrightarrow$  Quarks:1/3<sup>2</sup>

実験結果:  $c_4/c_2 \sim 1$

STAR '10,'11



# 相構造



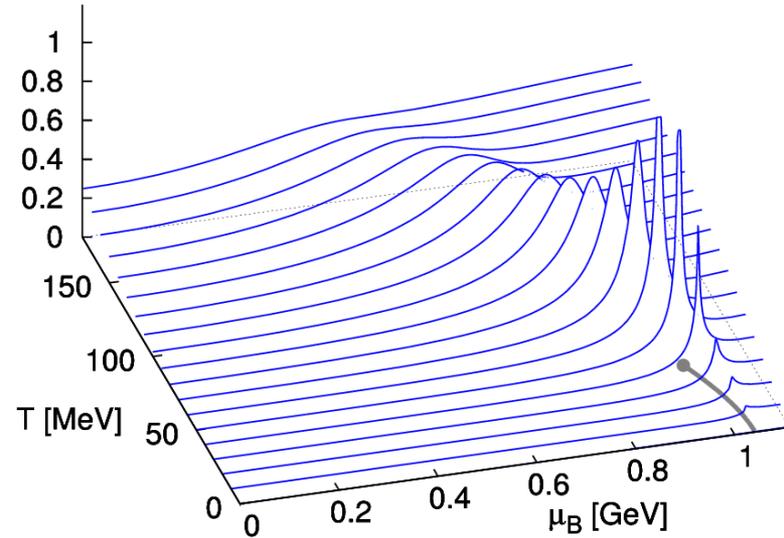
# Take a Derivative of $\chi_B$

Asakawa, Ejiri, MK, PRL103 (2009)

- $\chi_B$  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  $m_3(\text{QEE})$

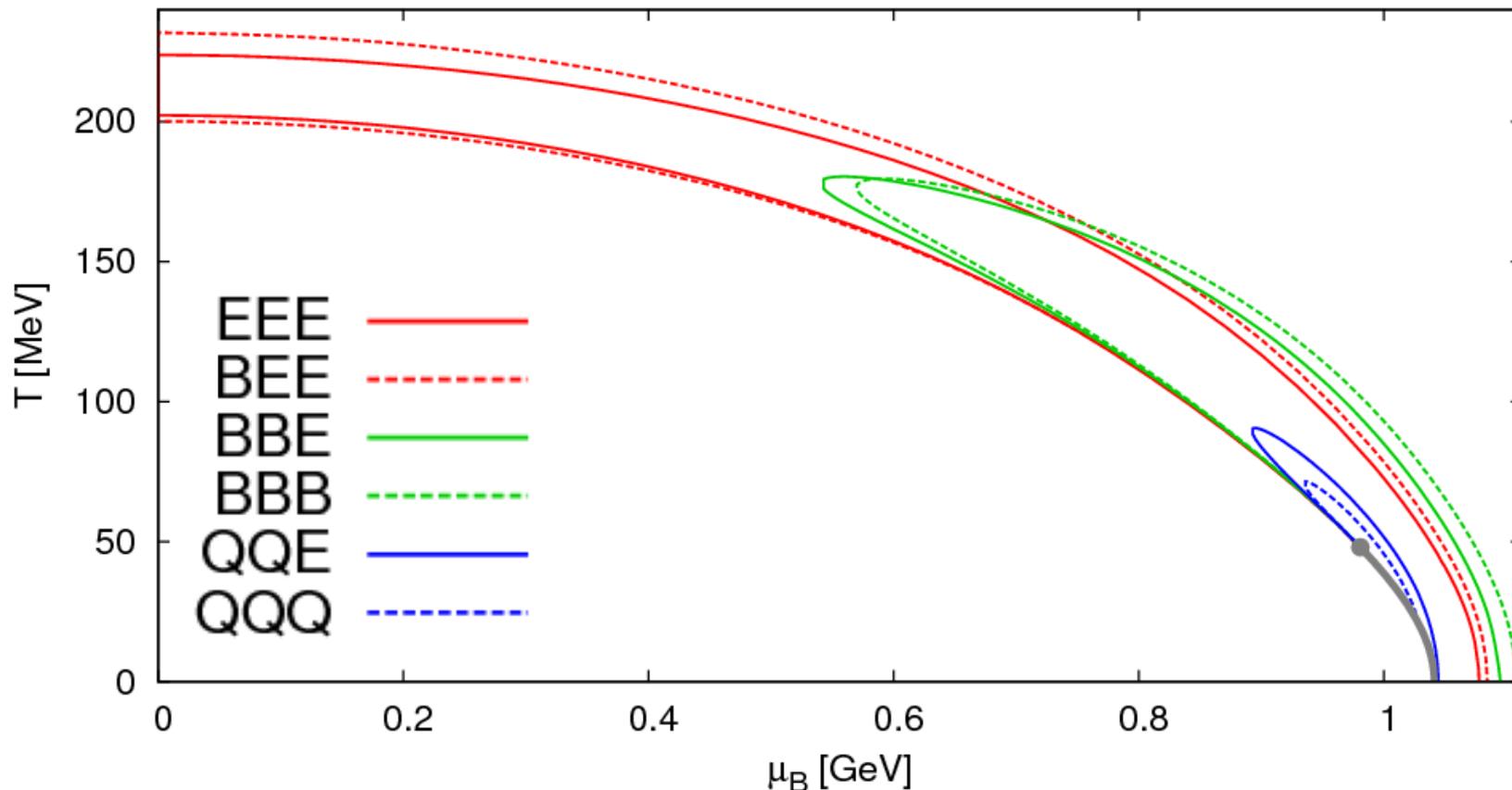
all change signs at QCD phase boundary near the critical point.

# Impact of Negative Third Moments

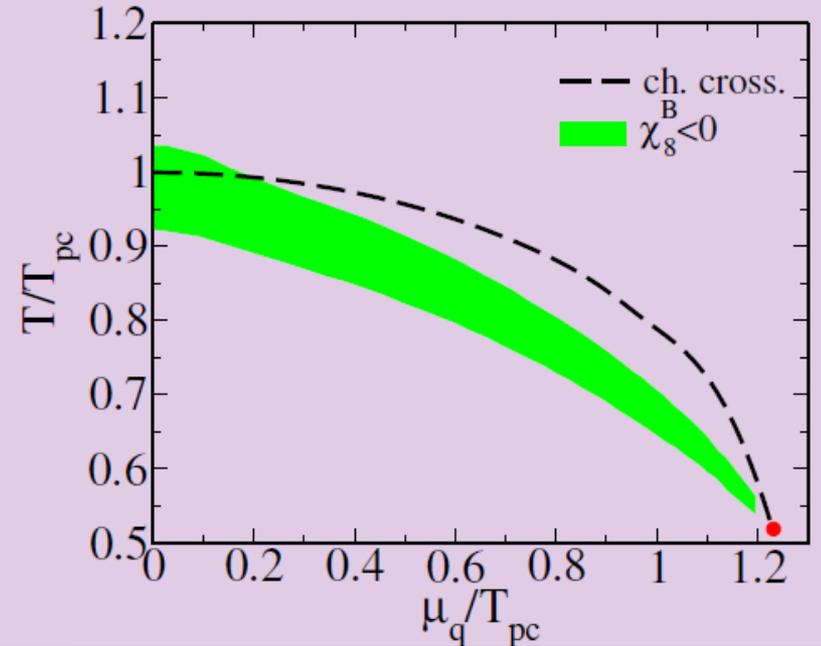
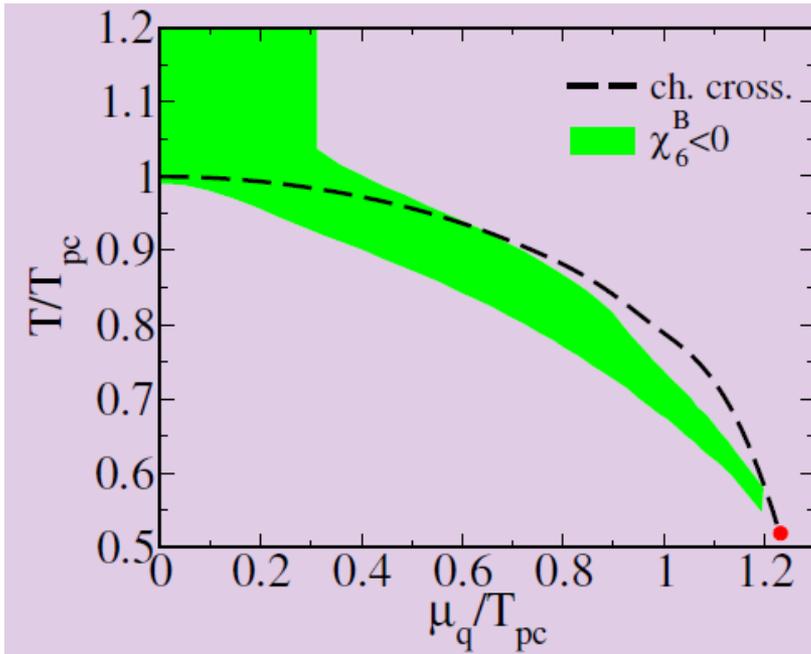
- Once negative  $m_3(\text{BBB})$  is established, it is evidences that
  - { (1)  $\chi_B$  has a peak structure in the QCD phase diagram.
  - { (2) Hot matter beyond the peak is created in the collisions.
- {
  - **No** dependence on any specific models.
  - **Just the sign! No** normalization (such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

# 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！



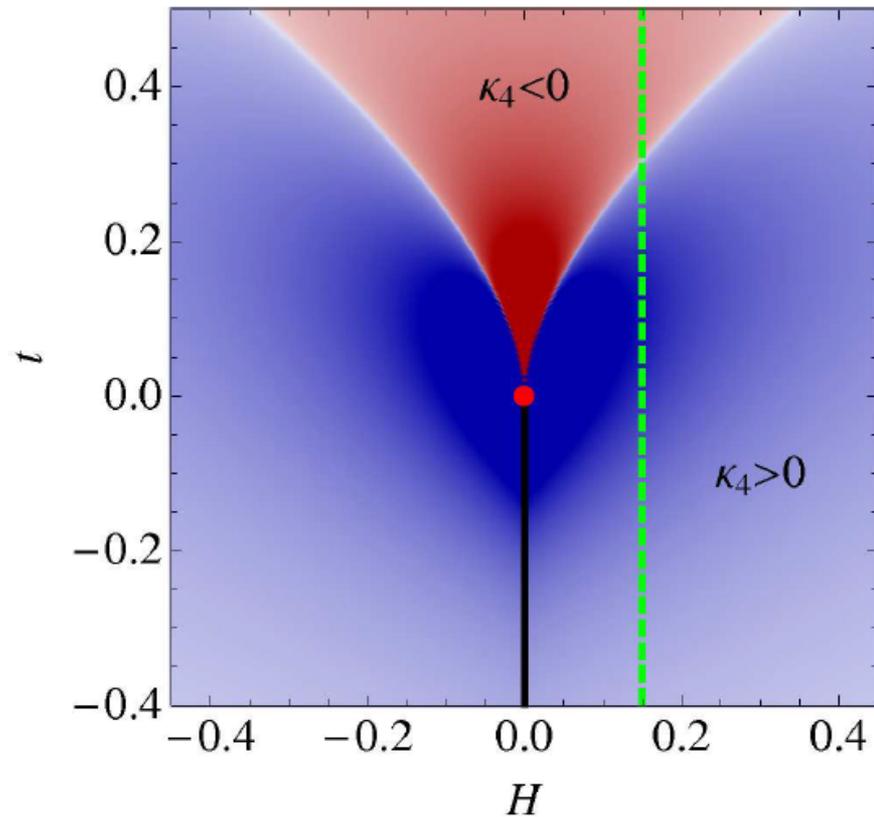
✖ イメージを表示できません。メモリ不足のためにイメージを開くことができないか、イメージが破損している可能性があります。コンピューターを再起動して再度ファイルを開いてください。それでも赤い x が表示される場合は、イメージを削除して挿入してください。

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 →

# 4<sup>th</sup> Order Near the CP



Stephanov, 1104.1627

Kurtosis changes the sign around the CP

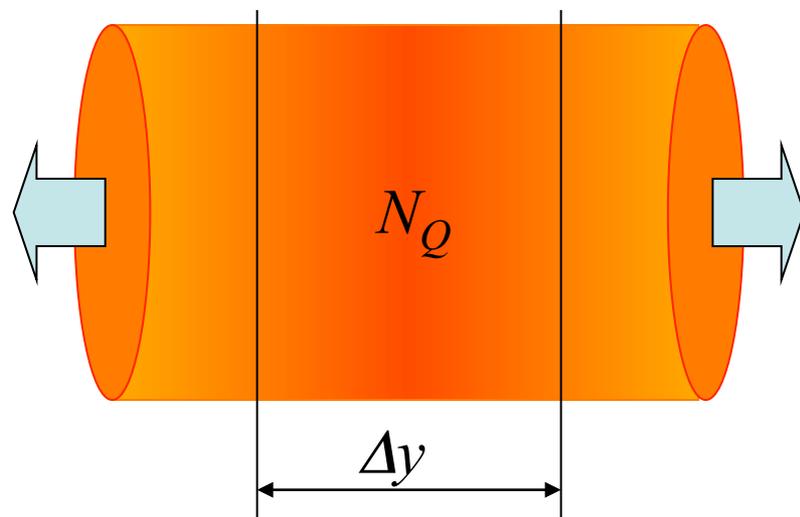
# 観測にかかるゆらぎは、いつ形成されるのか？

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

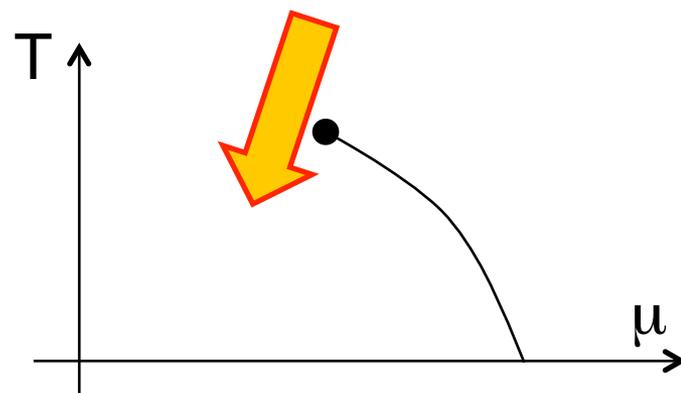
Jeon, Koch, '00

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？

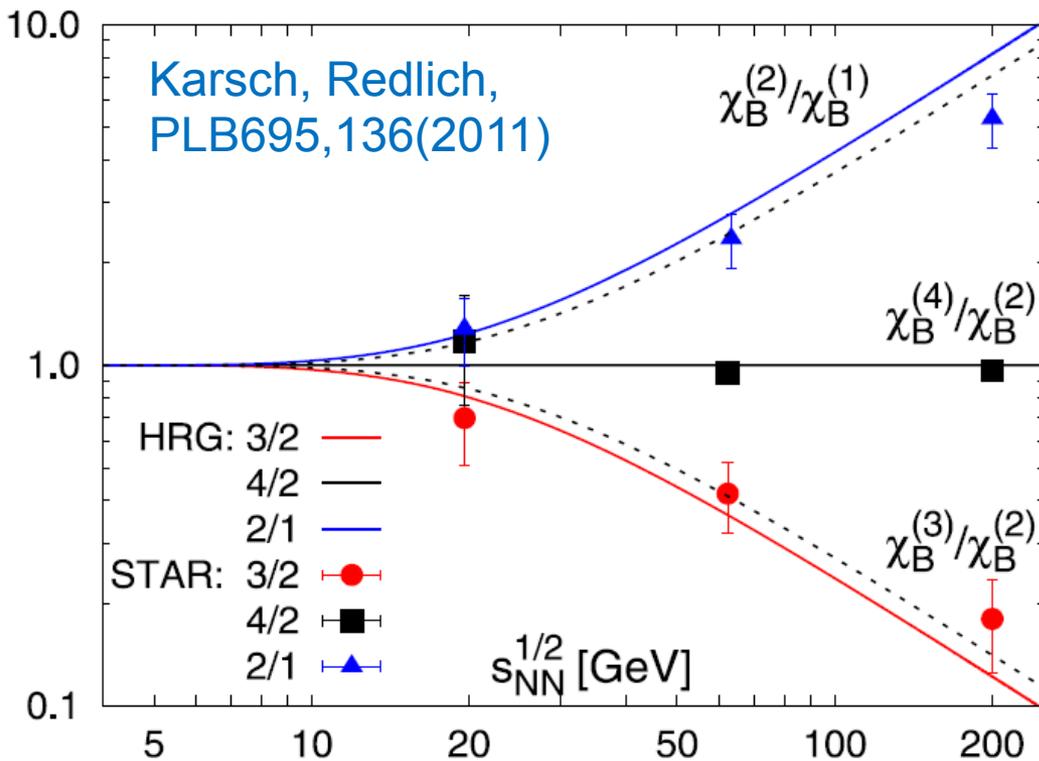
# Summary 2

Critical Point



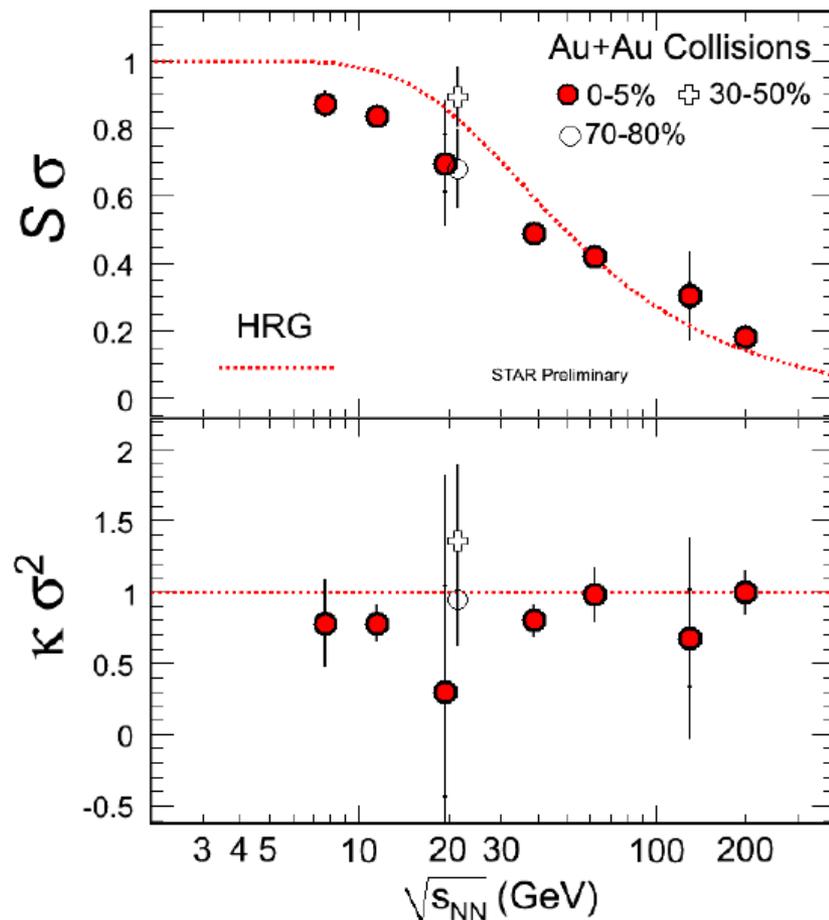
Let's go see the scenery over the ridge!

# 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。

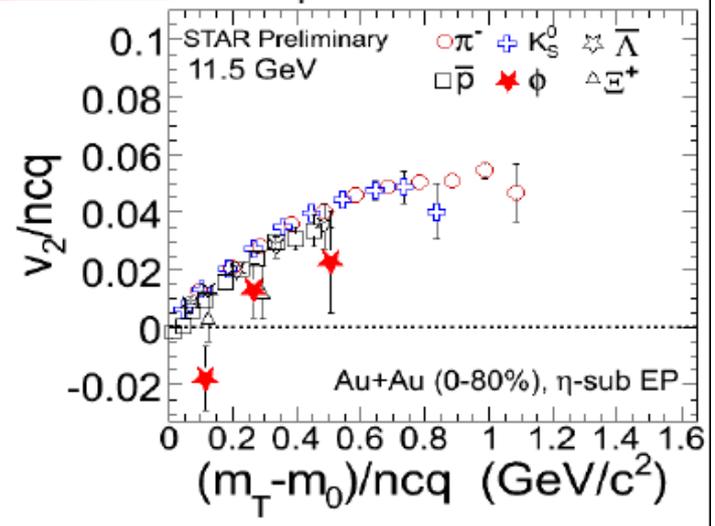
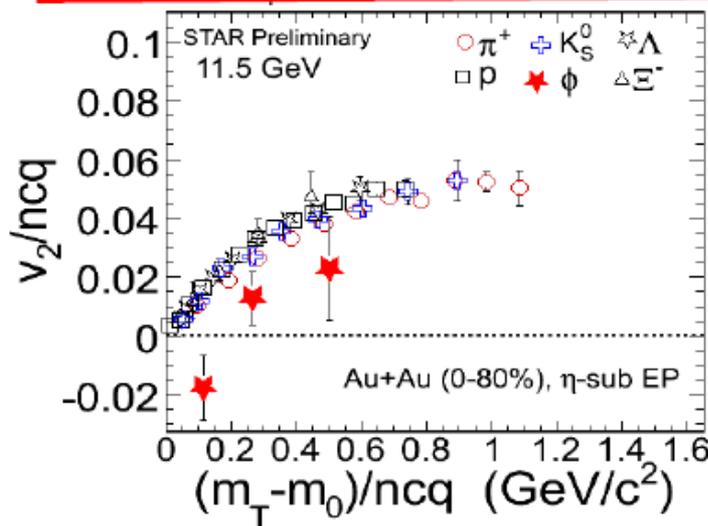
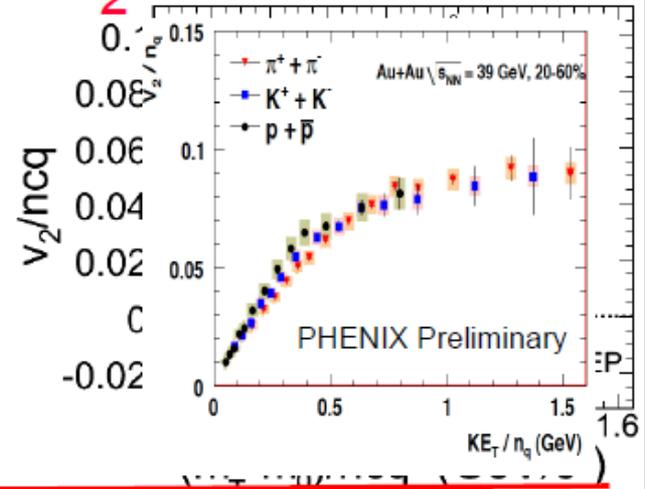
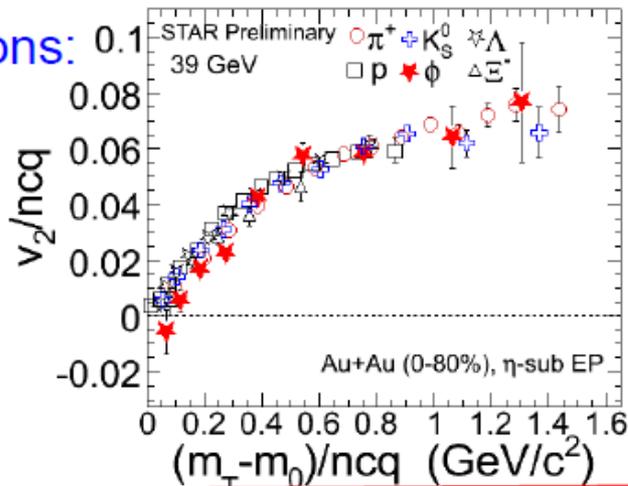
バリオン数ではないので、保存量ではない。

# その他の物理量の $\sqrt{s}$ 依存性



## NCQ scaling of $v_2$

Observations:



$\phi$  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