

# 高密度物質の相構造 ・ ゆらぎ



北沢正清  
(阪大理)

# 目次

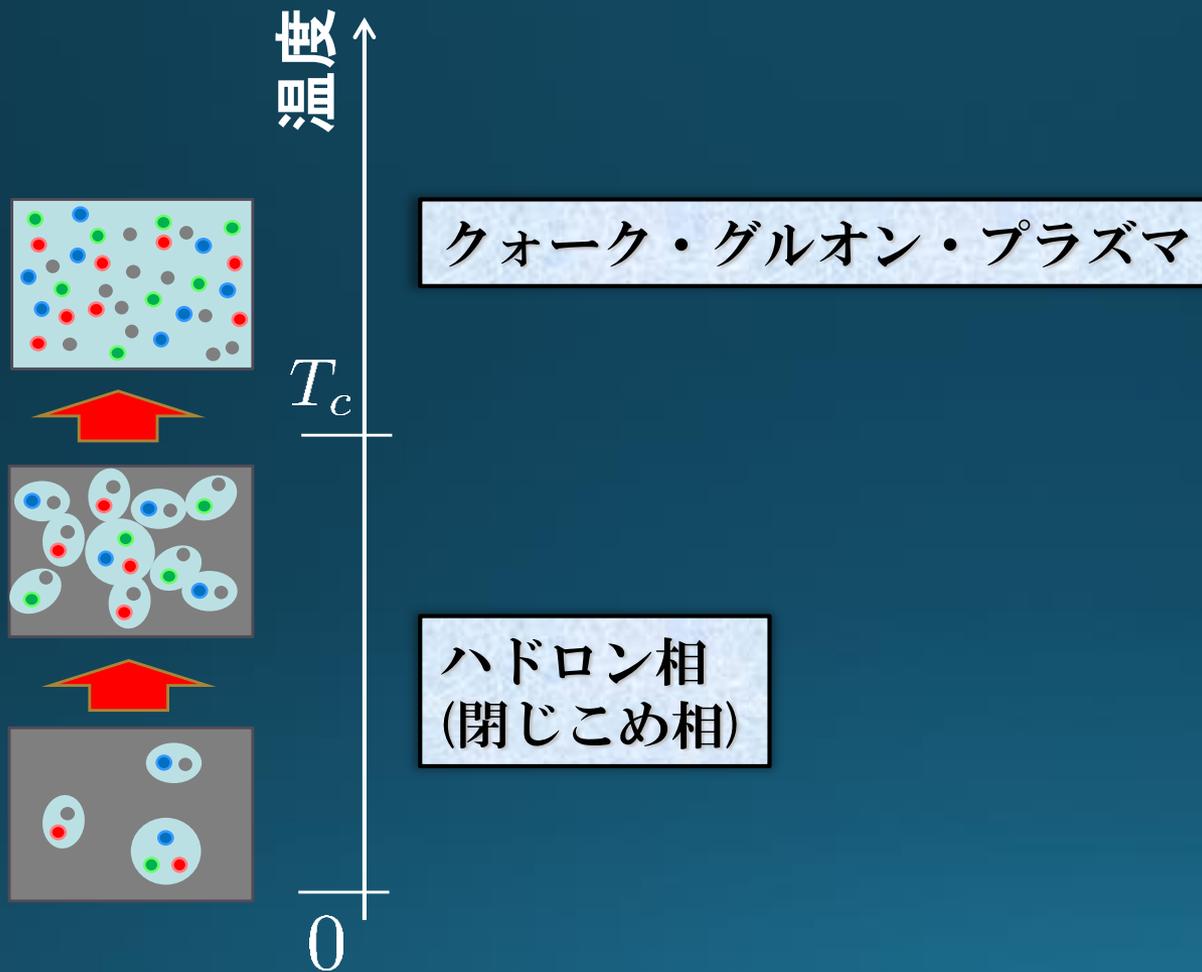
## 1. QCD相図

- QCD相図・臨界点・一次相転移
- カラー超伝導
- ビームエネルギー走査

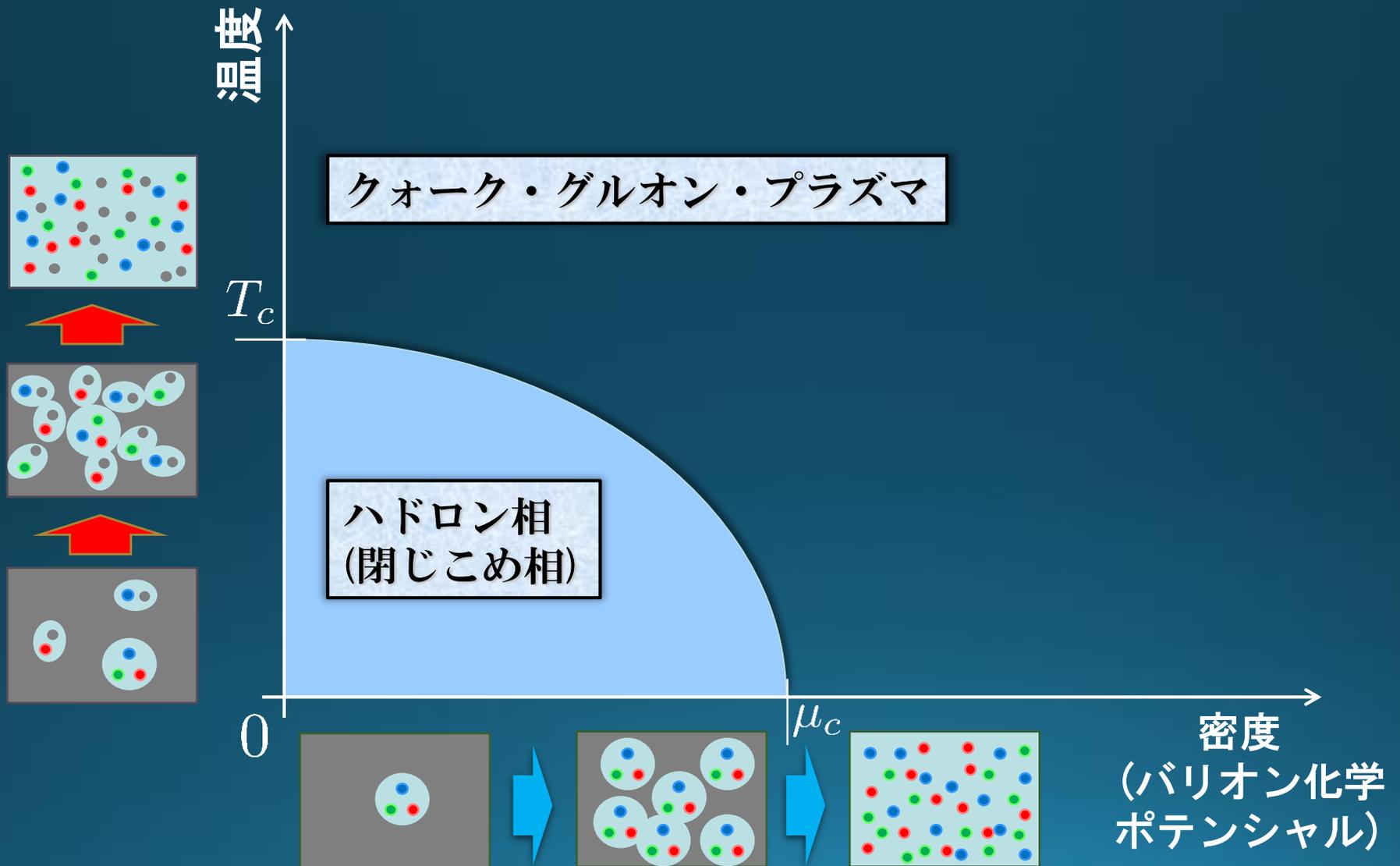
## 2. イベント毎ゆらぎ

- なぜ、ゆらぎ？
- 実験結果
- 課題

# QCD相図



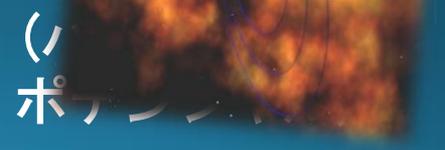
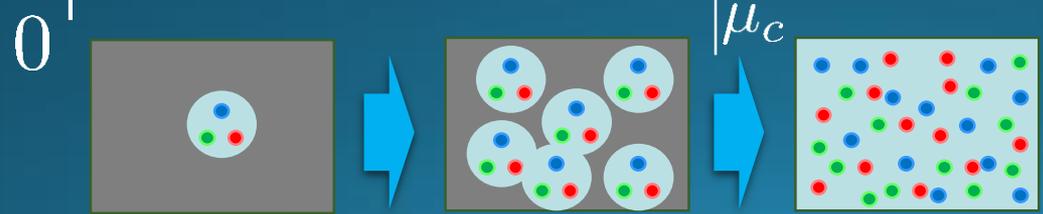
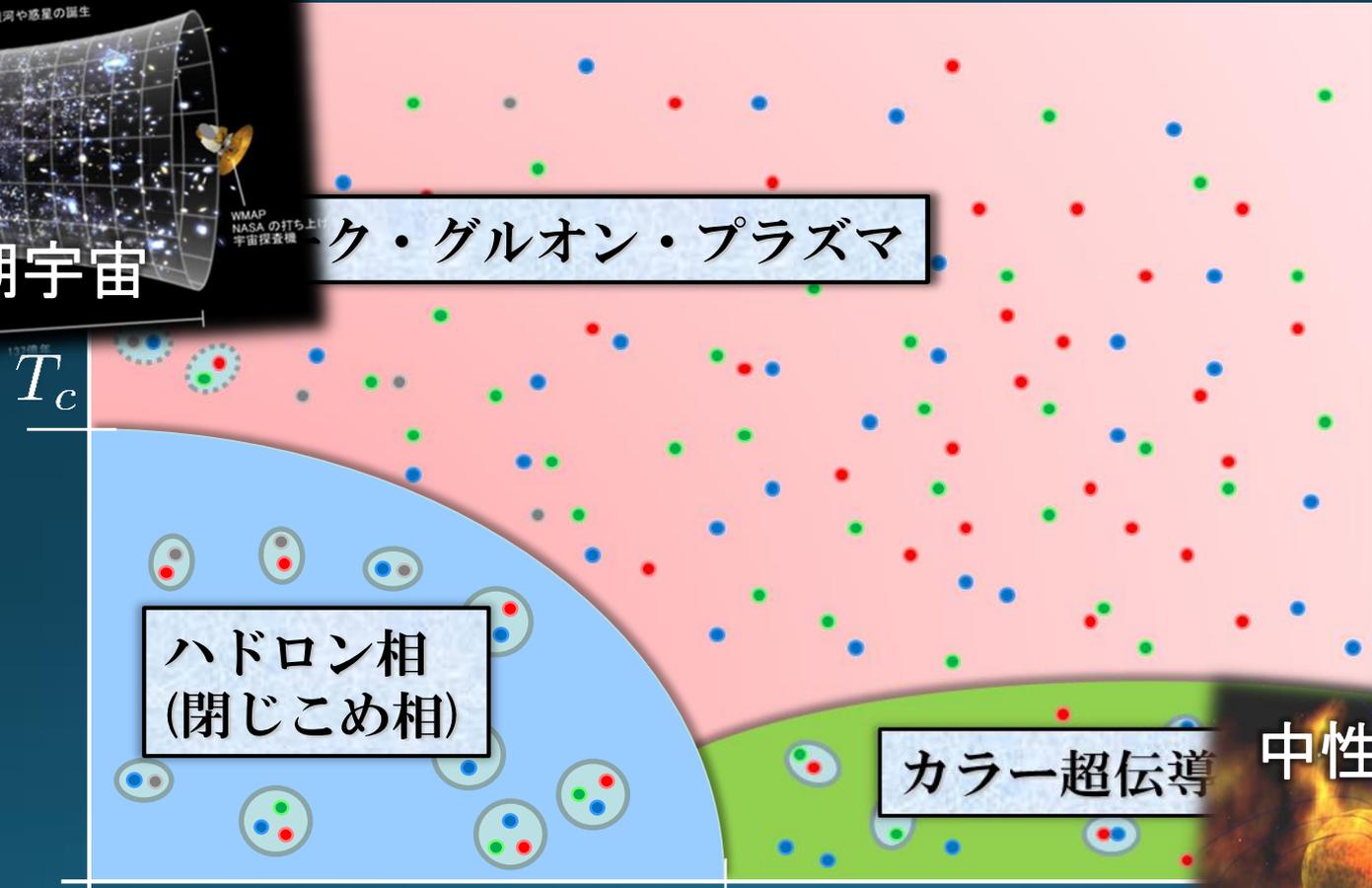
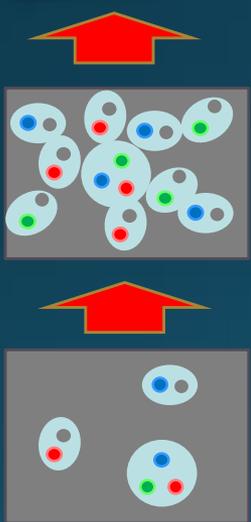
# QCD相図



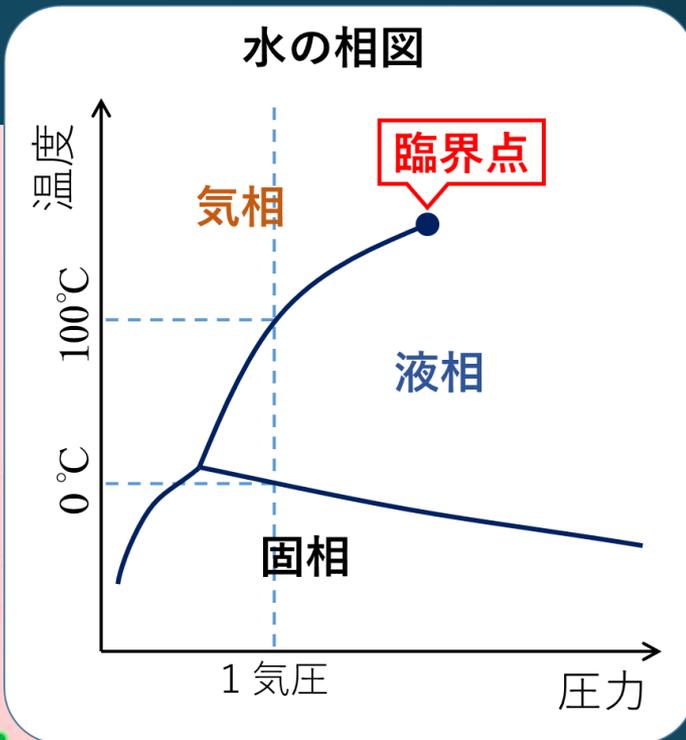
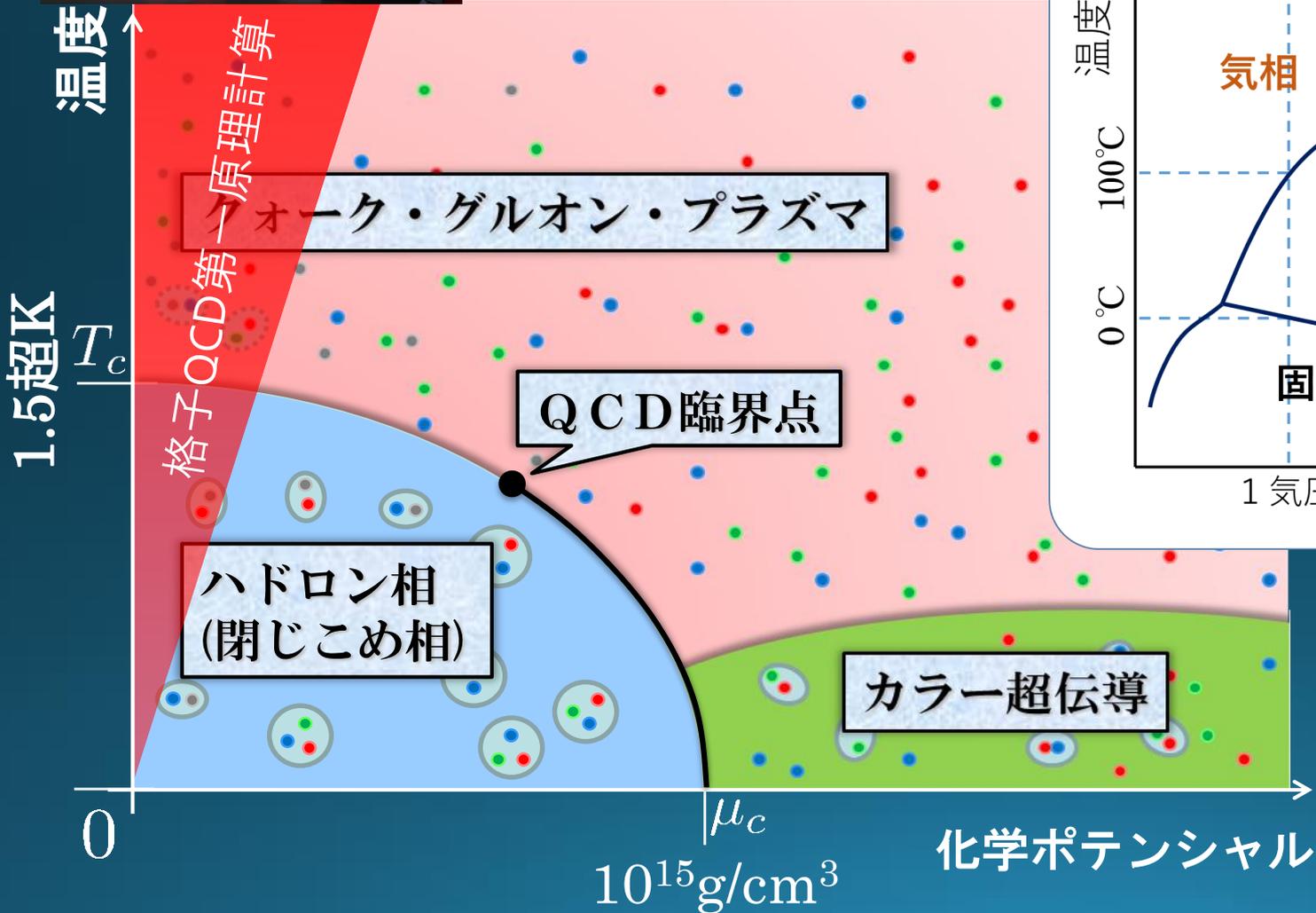
# QCD相図



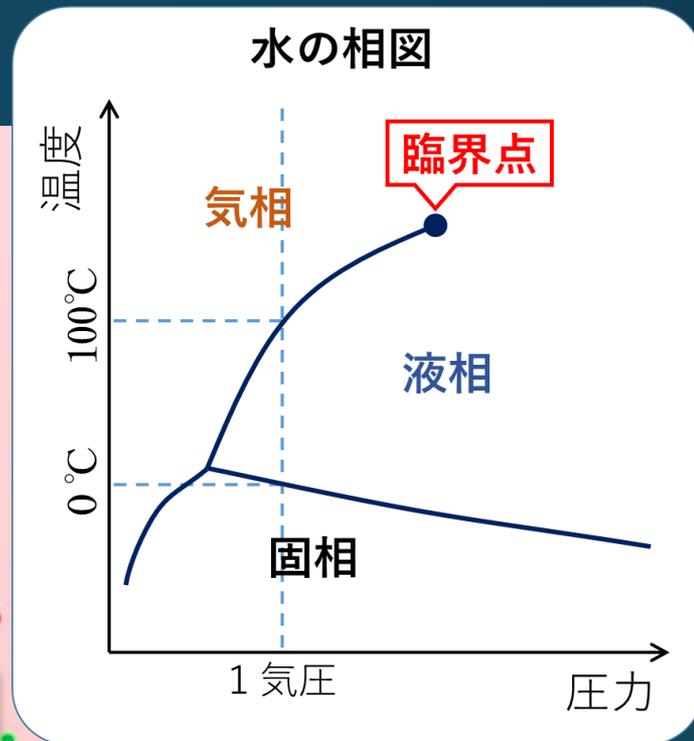
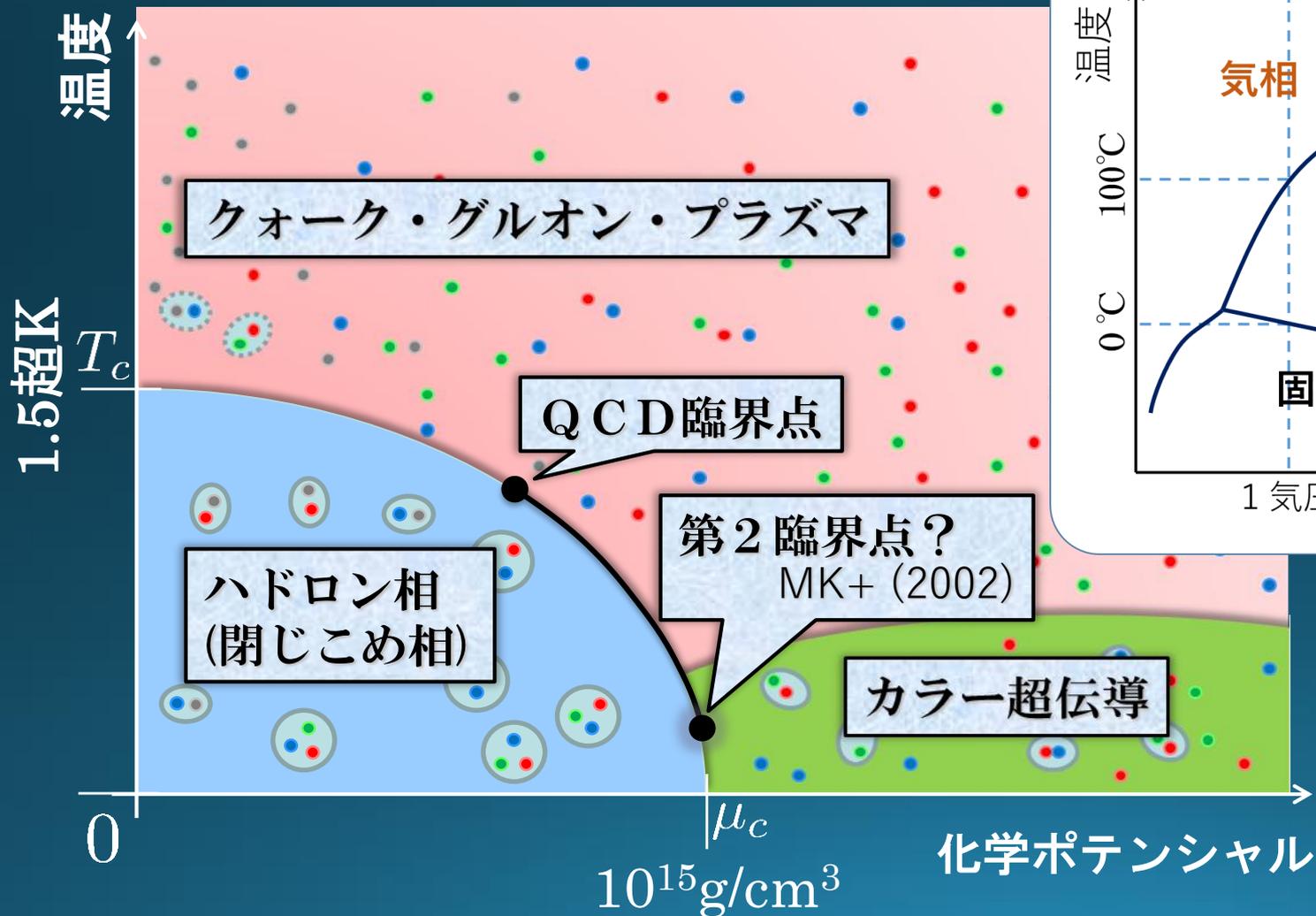
ク・グルオン・プラズマ



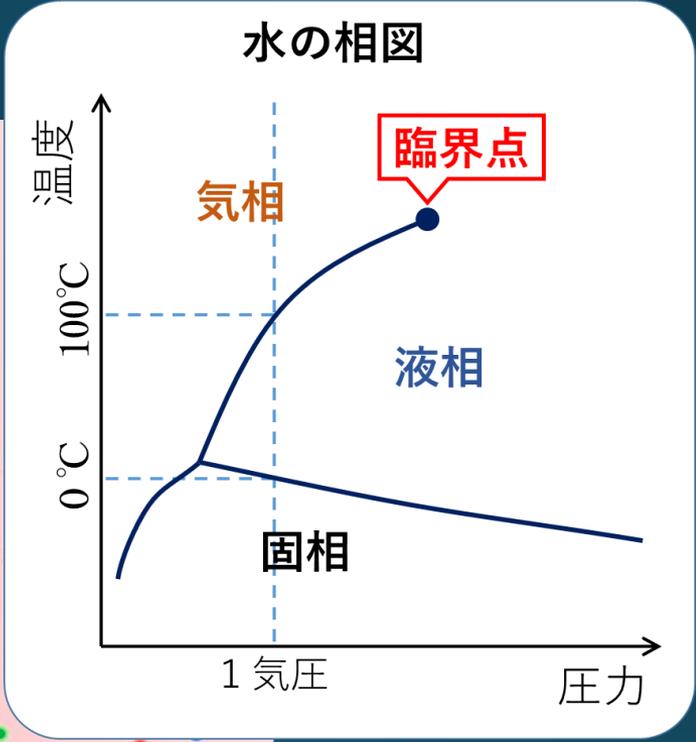
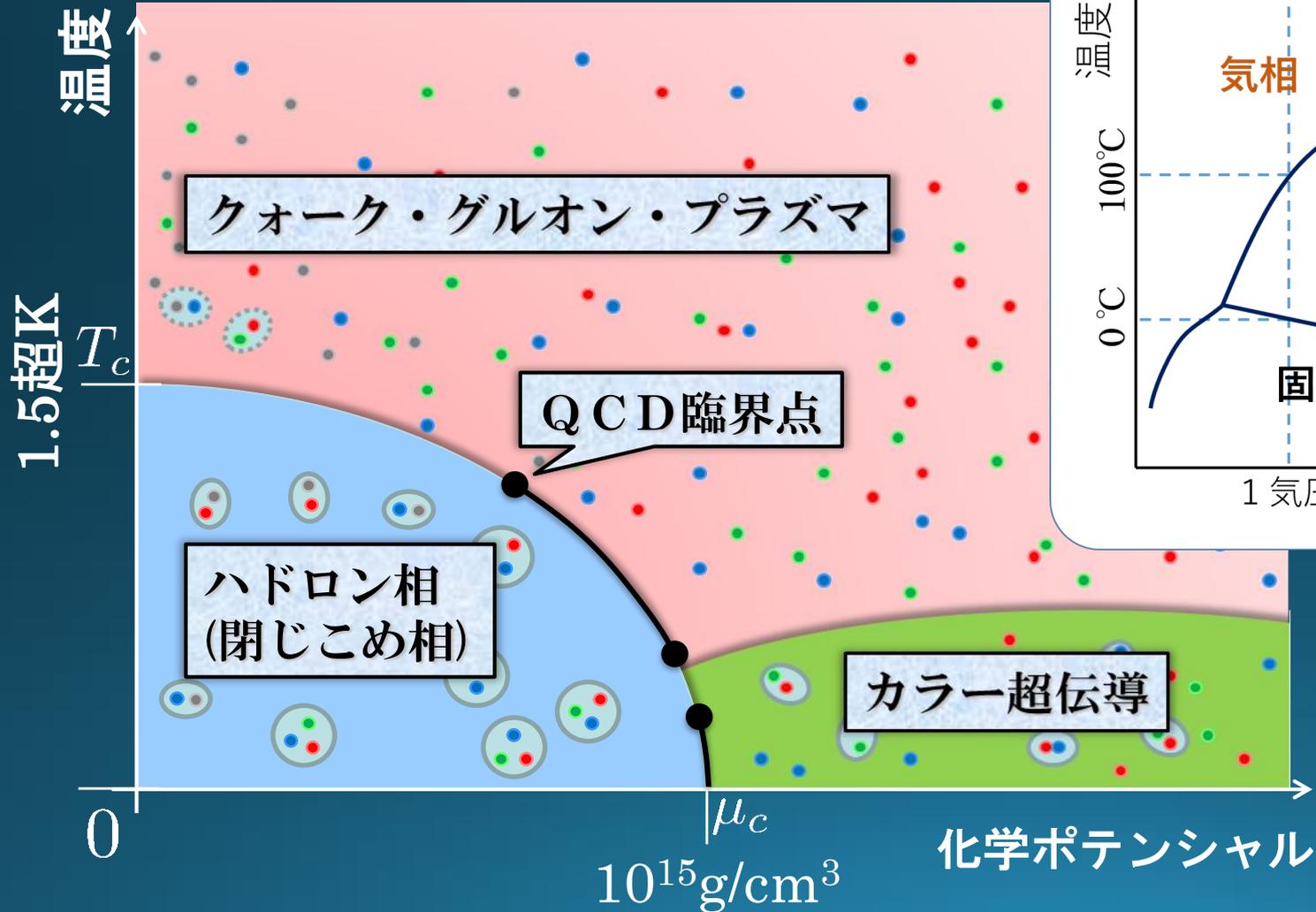
# 相転移の次数



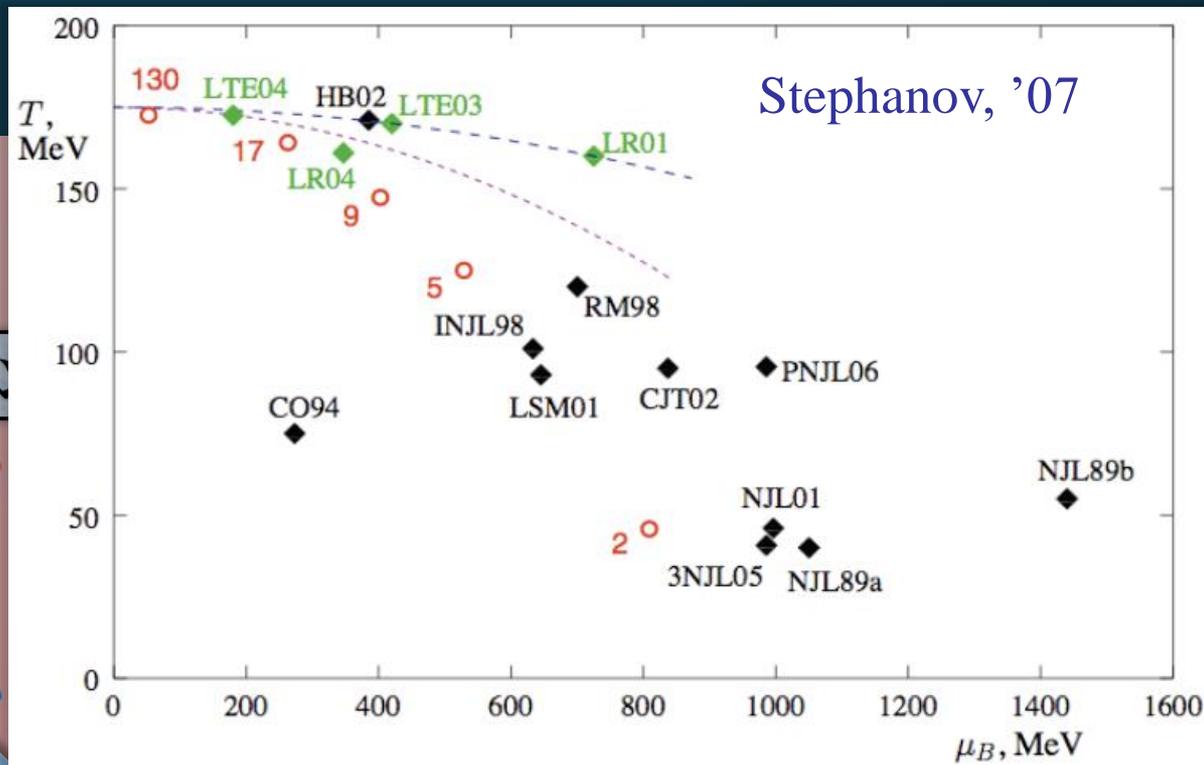
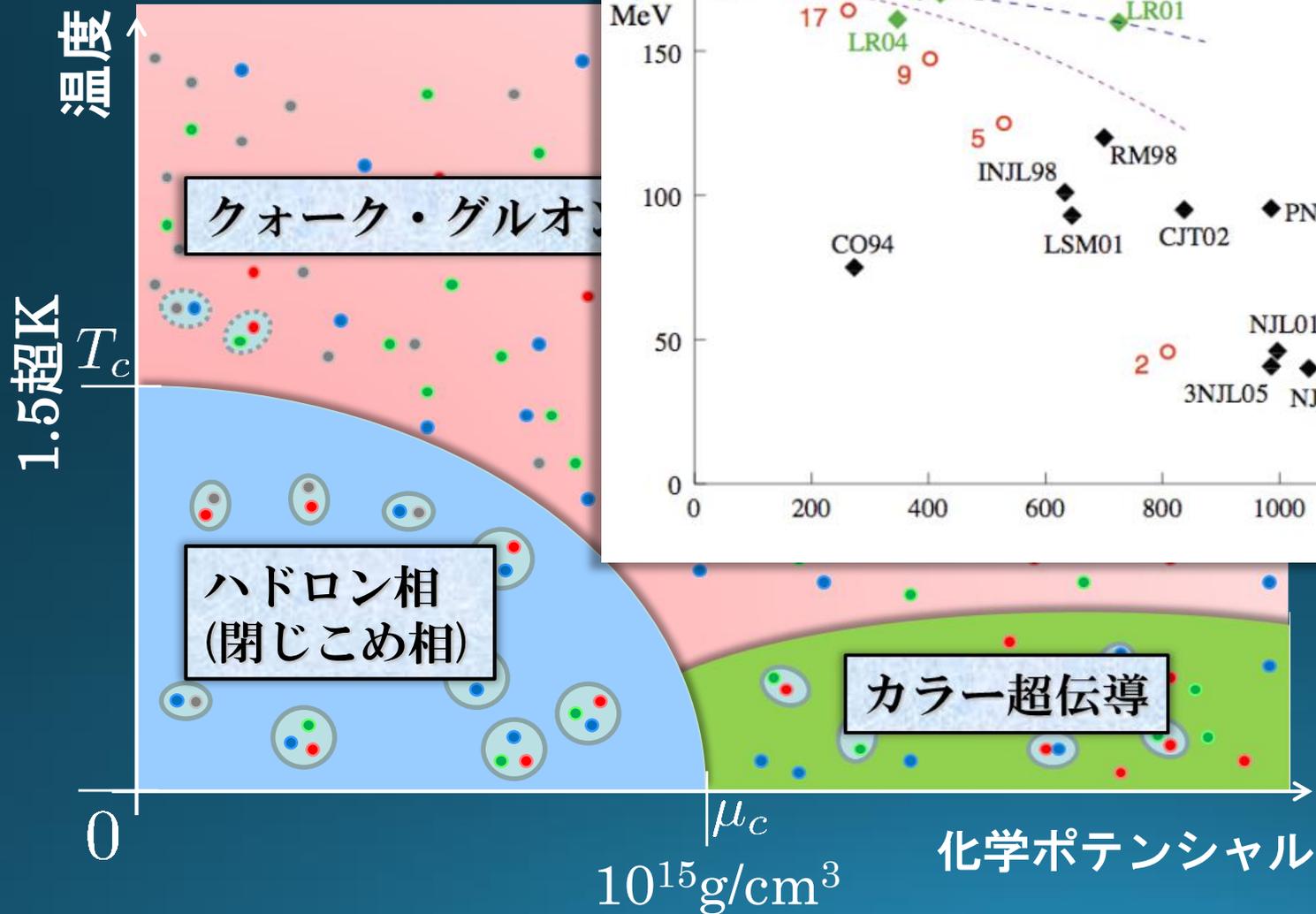
# 相転移の次数



# 相転移の次数



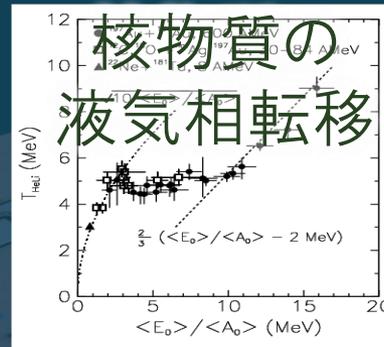
# 相転移の次数



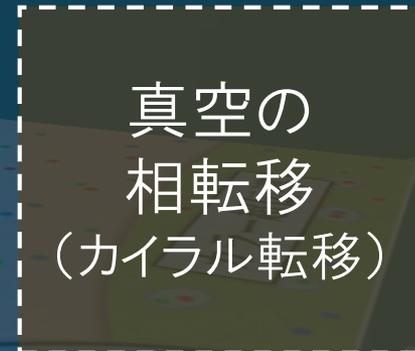
# 宇宙最高密度の一次相転移 = 物質による真空の破壊



$1\text{g/cm}^3$



$10^{14}\text{g/cm}^3$



$10^{15}\text{g/cm}^3$



南部理論の直接的検証

# 質問集より 1

- QCDの相図について何を議論することができるのか。
- QCD臨界点、相転移について現在どこまでわかっているのか？
- QCD臨界点での普遍性クラスがなぜ3次元イジングモデルと同じと言われているのか
- 臨界点のシグナルとして、理論計算と定量的な比較が可能な測定量はありますか？
- **ゆらぎ**
- **fluctuation**の解析を行っていますが、**揺らぎ**と相関長、臨界点の関係がよくわかっていません。
- QCD相図の臨界点付近では**なぜ保存量が揺らぐのか**？また偏極とは何か？
- **fluctuation**以外のQCD臨界点を探る物理量はどんなものがあるのか
- 臨界点付近で**保存量が揺らぐ**のは何故か
- **保存量の揺らぎ**はなぜ相転移すると大きく変わるのか

# 質問集より 1

- softest pointについて
- フリーズアウト時の密度が最大になる衝突エネルギーとマターの密度が最大になる衝突エネルギーの関係
- **J-PARC-HI**の進展と、期待されていること。
- **J-PARC HI**の必要性、有用性を議論したい。
- カラー超電導とは何でしょうか？ QGPとは違うのですか？
- カラー超伝導という言葉聞いたことがあるが、通常の超伝導で見られる電気抵抗ゼロの状態やマイスナー効果に対応する現象はどのようなものなのか？
- なぜカラー超伝導を実験的に実現することが困難なのか
- **colour superconductor**にアプローチするアイデアとしてどのようなものがあるか
- カラー超伝導相のプローブ
- より高密度側のQCD物性にはアプローチできないのか？

# カラー超伝導

## □ Cooper不安定性

- フェルミ粒子系 + フェルミ面付近で引力  
→ 十分低温では、超伝導状態が実現

## □ 超高密度クォーク物質

- クォーク物質 = フェルミ粒子系
- グルーオン交換による引力相互作用

→ 十分低温のクォーク物質は、超伝導状態



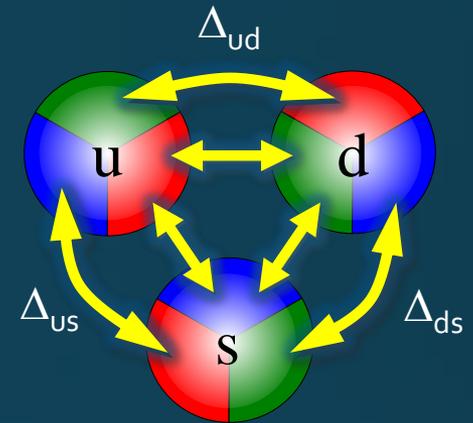
## 1998~1999頃

- 大きなカラー超伝導ギャップの可能性の発見 (Son, '99; ...)
- 多様な相構造の発見 (Alford+, '99; ...)

# カラー超伝導の種類

## Cooper対を組むクォーク

- クォークの組は、反対称 (Pauli原理)
- 1-gluon交換相互作用の引力はカラー反対称
- スカラーチャンネルの凝縮  
→ フレーバーも反対称 (と思われる)

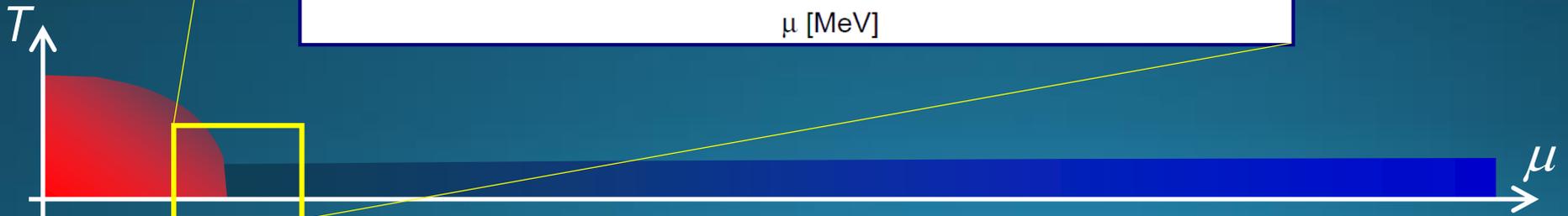
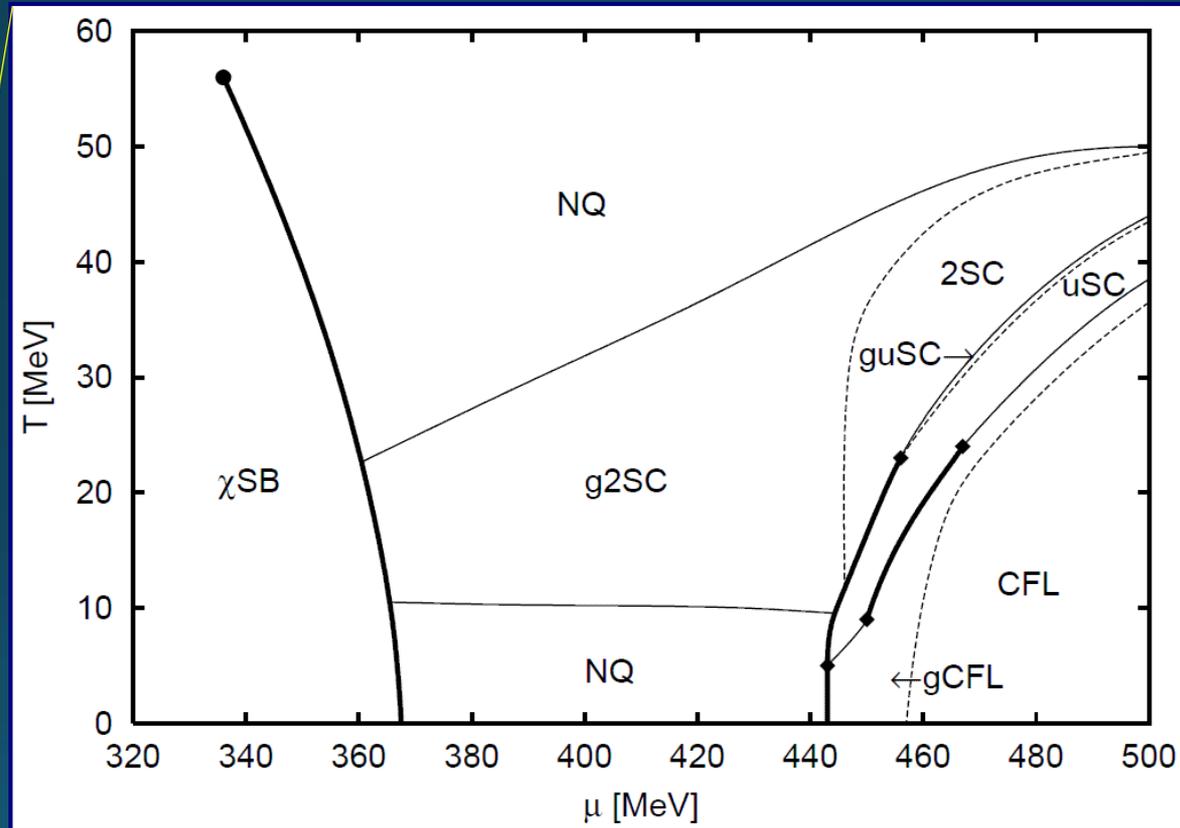


## 多様な状態の実現可能性

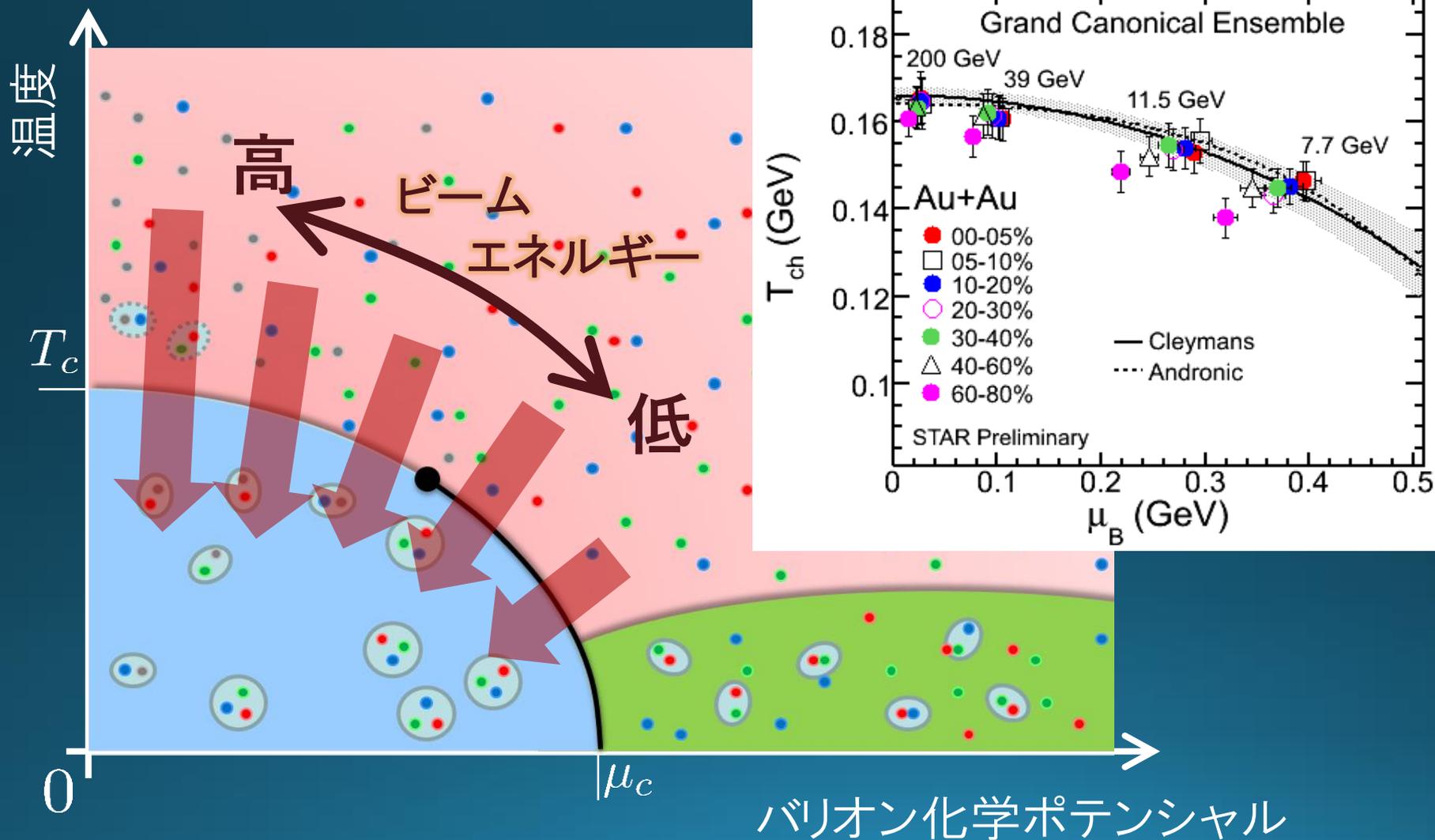
$\Delta_{ud} = \Delta_{us} = \Delta_{ds} > 0$	CFL	Alford, et al. '98
$\Delta_{ud} > 0, \Delta_{us} = \Delta_{ds} = 0$	2SC	Bailin, Love '84
$\Delta_{ud} > 0, \Delta_{us} > 0, \Delta_{ds} = 0$	uSC	Ruster, et al. '03
$\Delta_{ud} > 0, \Delta_{ds} > 0, \Delta_{us} = 0$	dSC	Matsuura, et al., '04

# 相構造の計算例

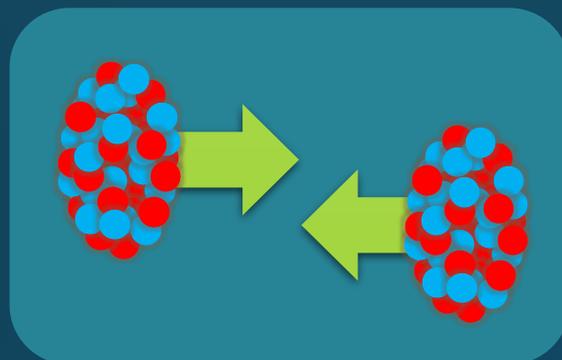
Ruster+ (2005)



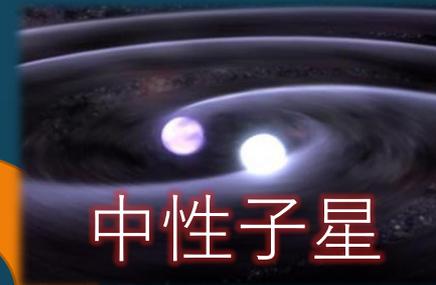
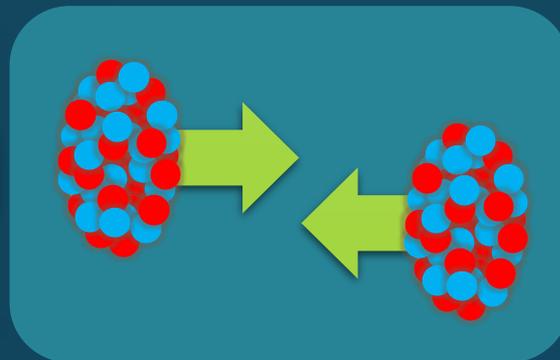
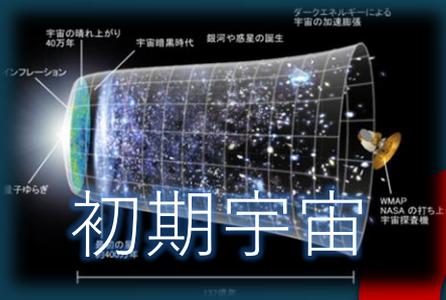
# ビームエネルギー走査



# バリオン減速

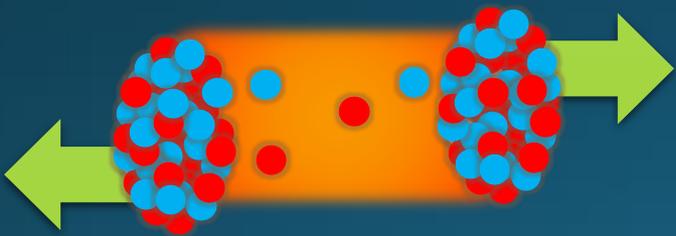


# バリオン減速

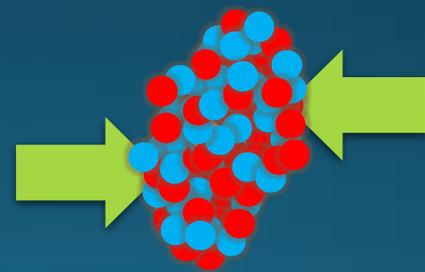


高エネルギー

低エネルギー



核子は衝突点を通過  
net-バリオン数: 少

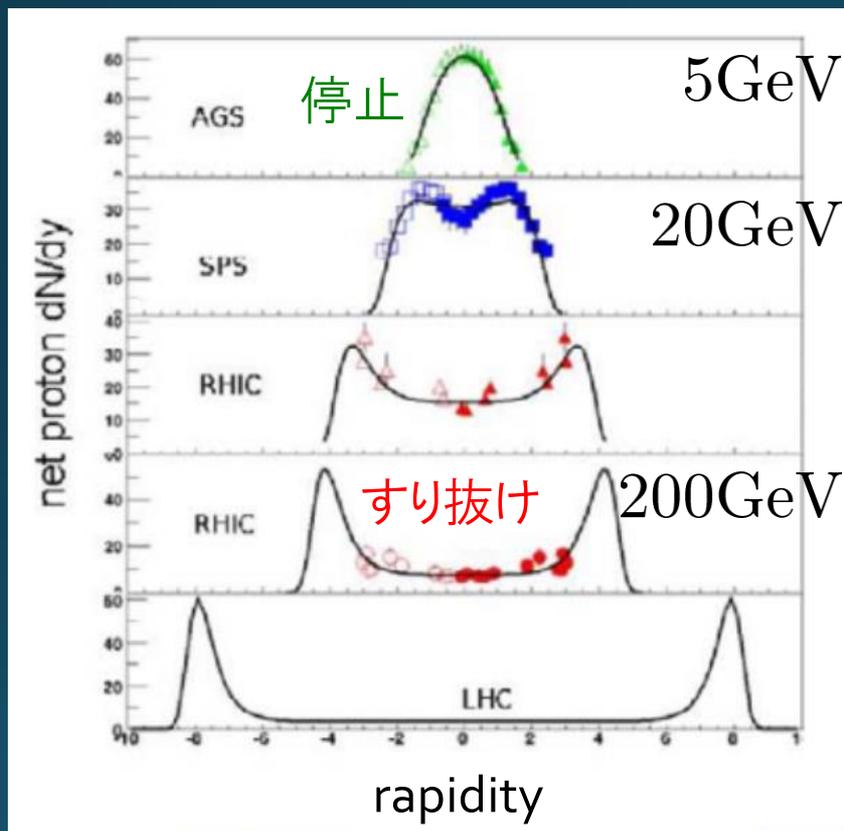


衝突点で止まる  
net-バリオン数: 大

# バリオン減速

正味陽子数の $y$ 依存性

正味陽子数( $N_{\text{陽子}} - N_{\text{反陽子}}$ )



$$\sqrt{s_{NN}} \simeq 4 - 6 \text{ GeV}$$

程良く圧縮して、止まる

$$\sqrt{s_{NN}} > 10 \text{ GeV}$$

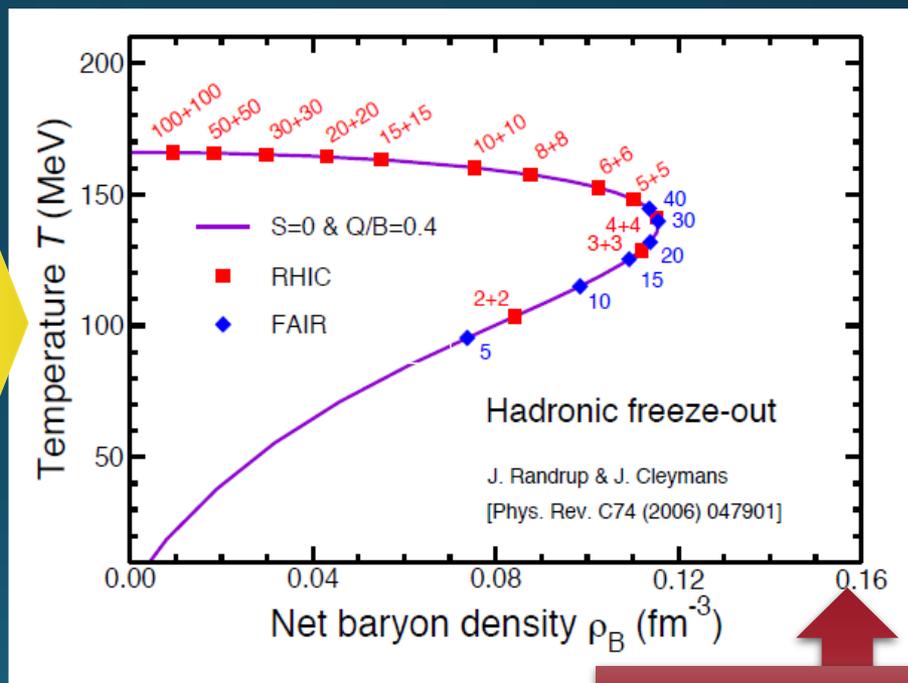
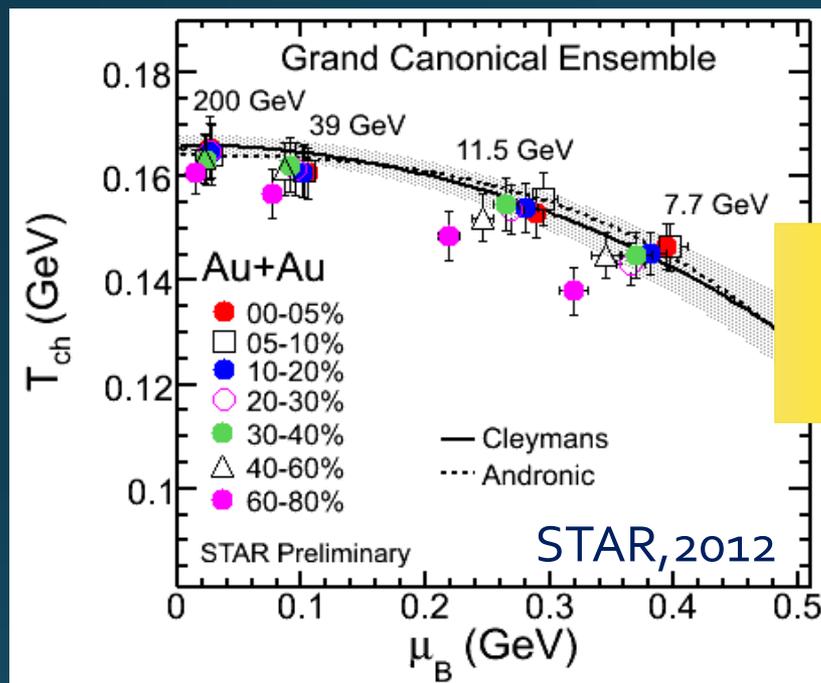
核子は、突き抜ける

←→  
ビーム軸

# ビームエネルギー走査

粒子収量から決めた温度、 $\mu$

温度、バリオン密度への換算



原子核密度

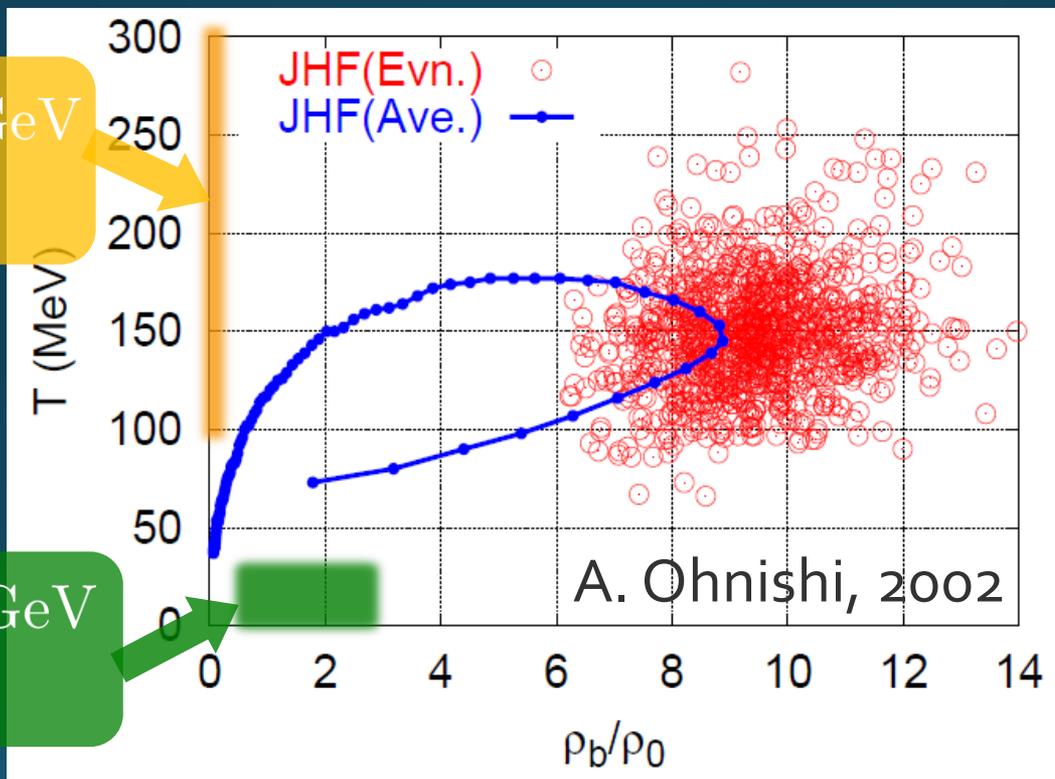
最高バリオン数密度

$$\sqrt{s_{NN}} = 4 \sim 10 \text{ GeV} \quad (E_{\text{lab.}} = 10 \sim 100 \text{ A GeV})$$

# 最大密度は？

$T$ - $\rho$  平面上の時間発展 by JAM

$\sqrt{s_{NN}} > 100 \text{ GeV}$   
RHIC・LHC



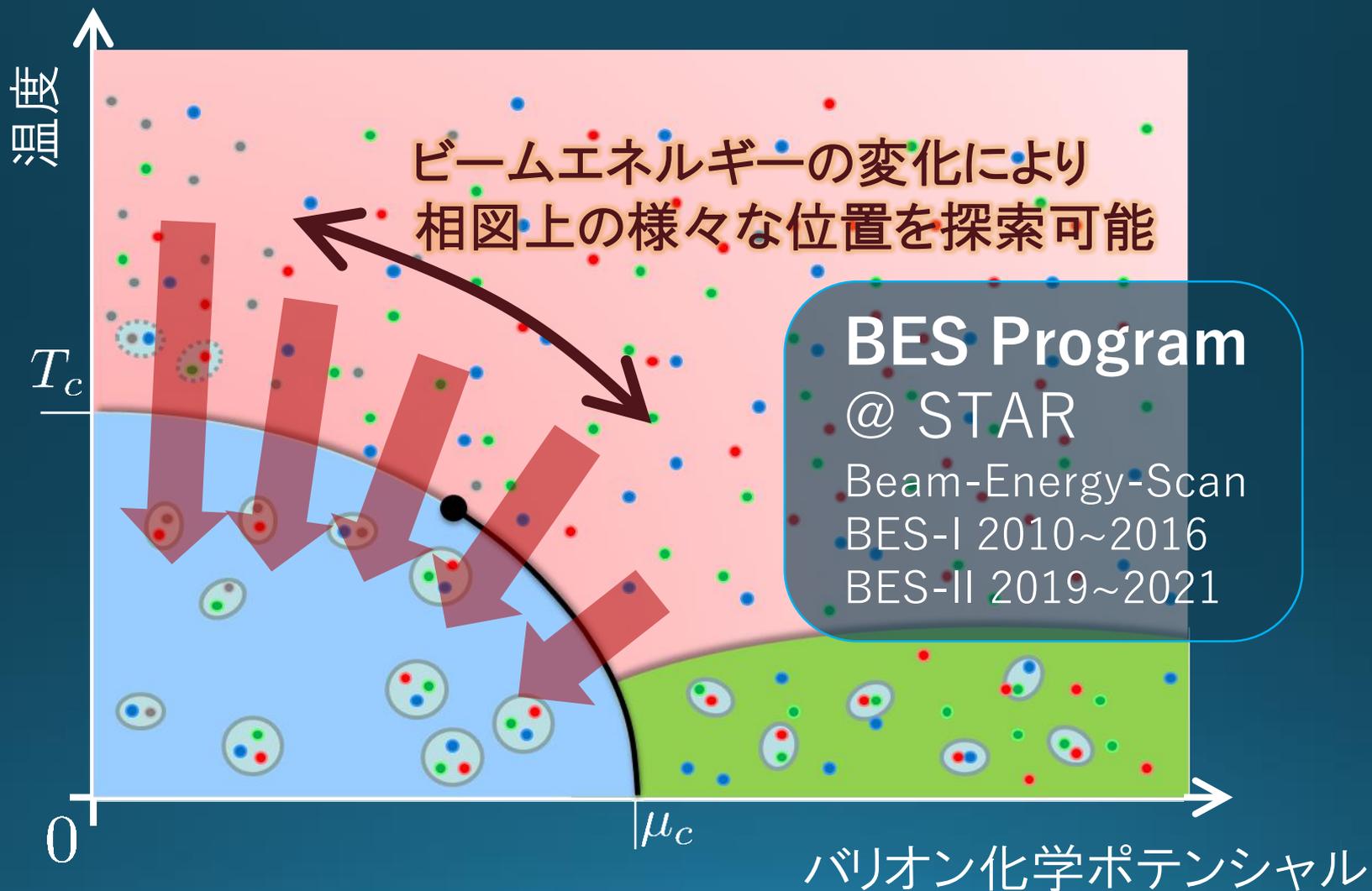
$E/A = 20 \text{ GeV}$

$\sqrt{s_{NN}} \simeq 6 \text{ GeV}$

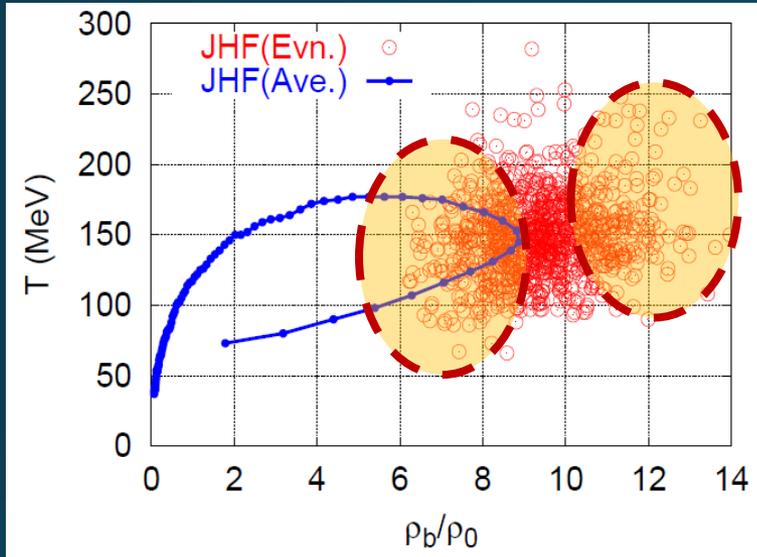
$E/A < 1 \text{ GeV}$   
RIBFなど

- 最高密度  $\sim 5\rho_0$  @  $E/A \sim 20 \text{ GeV}$
- 中性子星中心部をも凌ぐ宇宙最高密度
- 最高密度は、大きなイベント毎ゆらぎ？

# ビームエネルギー走査



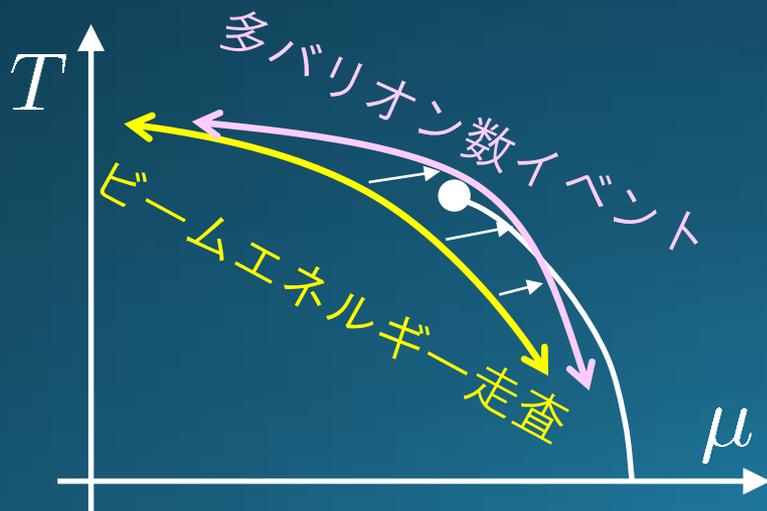
# 最高密度走査実験？



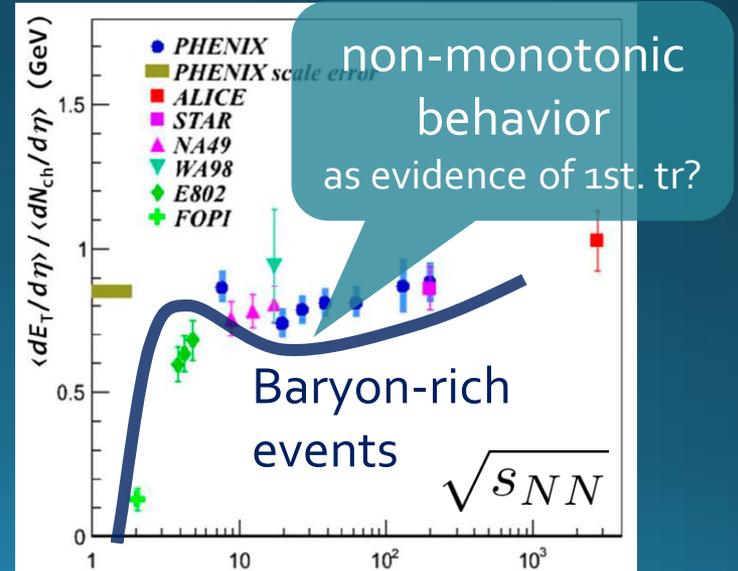
最高密度は大きな  
イベント毎ゆらぎを持つ



高密度イベントの選択で  
観測量の密度依存性を探索？



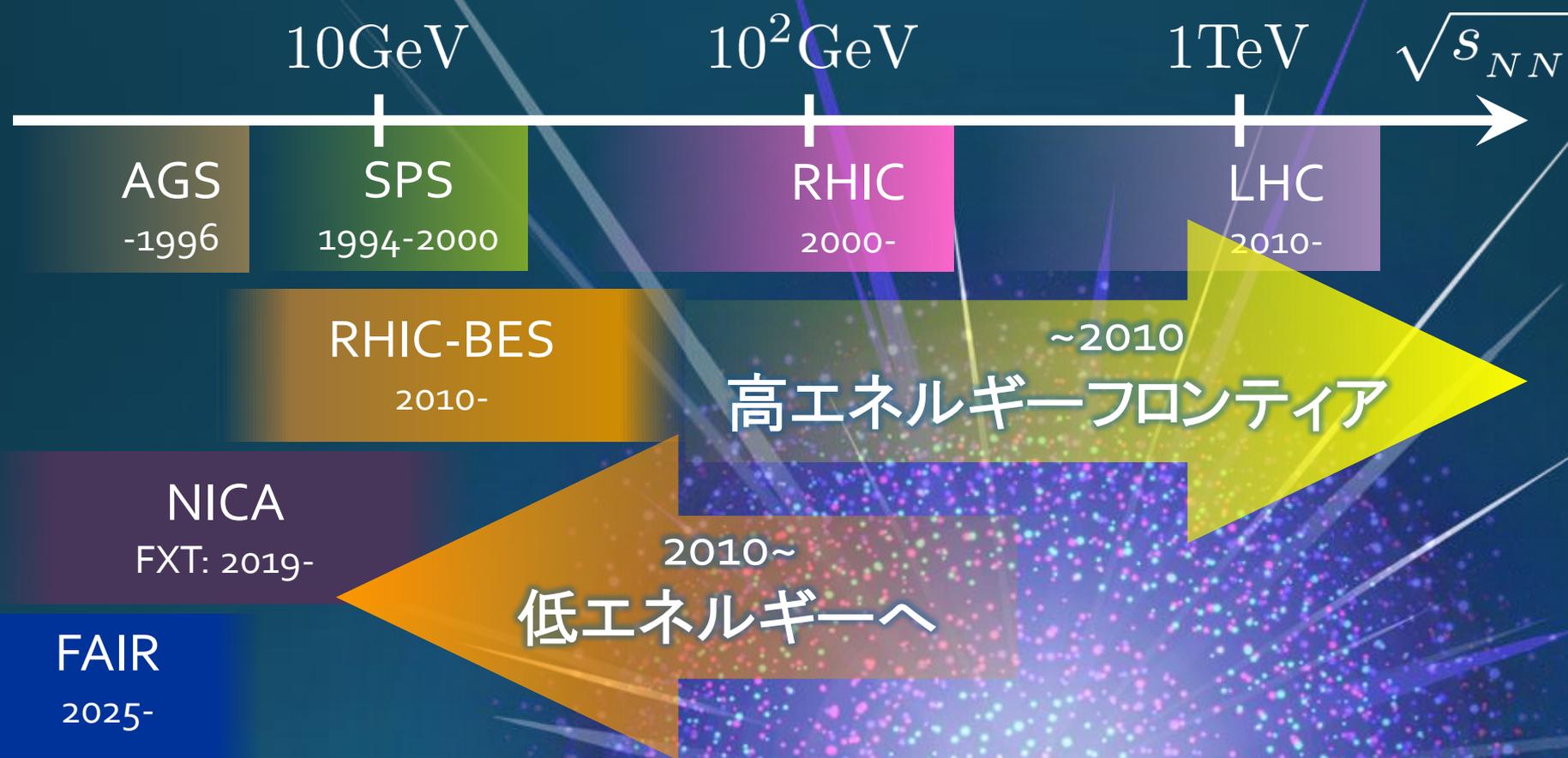
平均横方向エネルギー



# 重イオン衝突の歴史



# 重イオン衝突の歴史



# J-PARC-HI

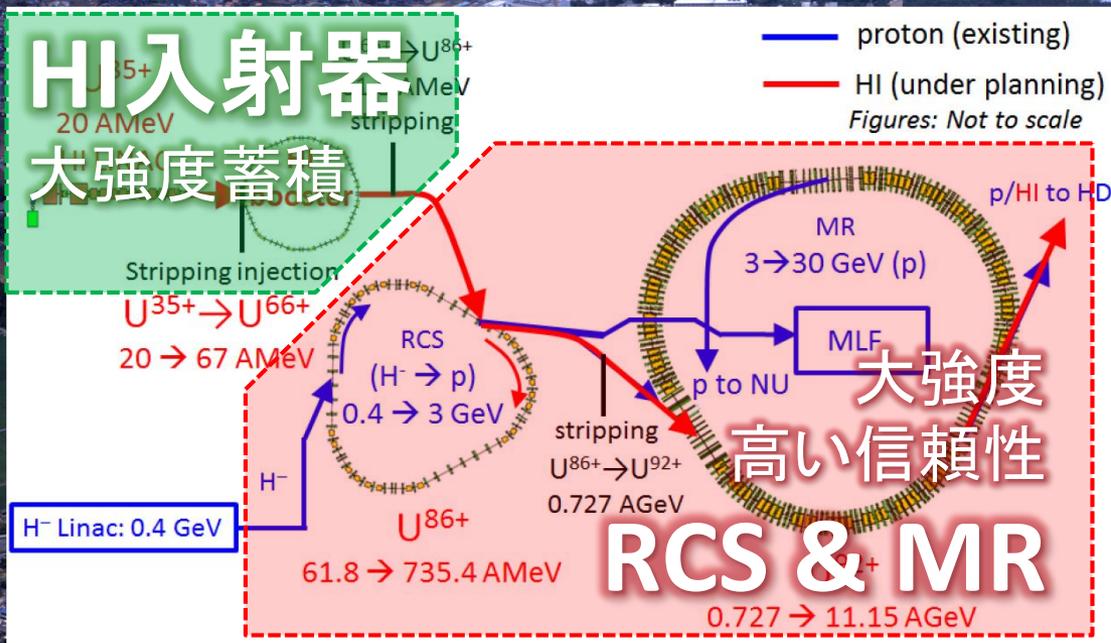
## J-PARC Heavy-Ion Program

J-PARC加速器(RCS/MR)を用いた  
世界最強度・低コストの重イオン加速・衝突実験



- $E_{\text{lab}} \sim 11 \rightarrow 19 \text{ AGeV}$
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2 \text{ GeV}$
- 衝突レート:  $\sim 10^8 \text{ Hz}$
- 実験開始: 2026~?

# J-PARC-HI

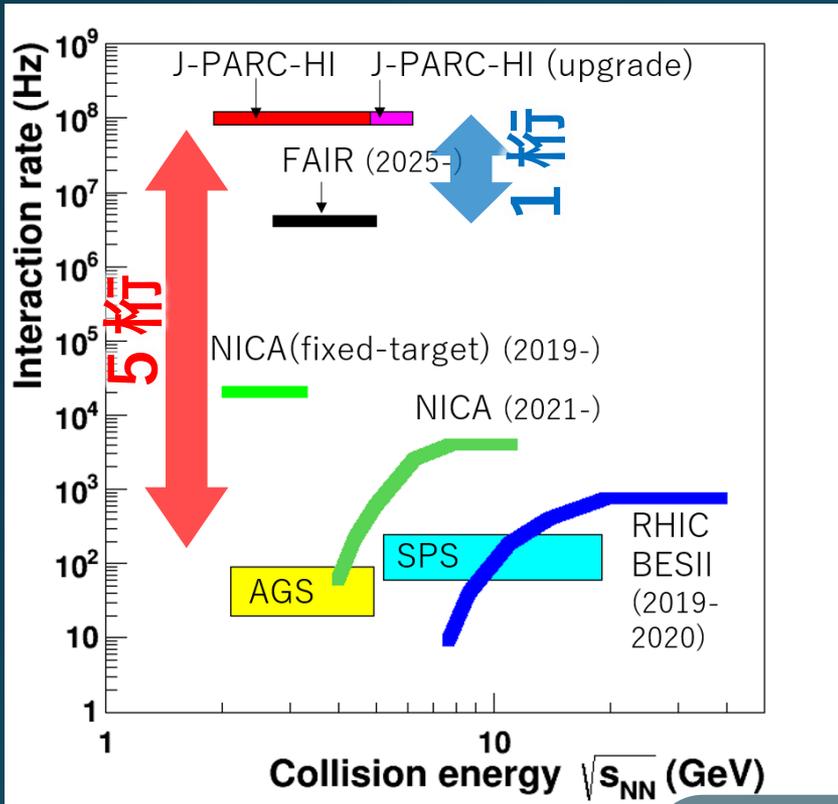


- $E_{lab} \sim 11 \rightarrow 19$  AGeV
- $\sqrt{s_{NN}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2$  GeV
- 衝突レート:  $\sim 10^8$  Hz
- 実験開始: 2026~?

## 特徴

安い・早い・うまい

# 衝突率



## J-PARC-HI:

超高強度ビーム×固定標的  
→世界最高衝突率 $\sim 10^8$ Hz

□ AGS,SPSを**5桁**上回る

AGS, SPS = J-PARC-HI  
1年間 = 5分

□ FAIR(2025~)を**1桁**凌ぐ

提案書より



高統計を活かした物理の推進

- 各種物理量の高統計測定
- 高度なイベント選択・高次相関・ゆらぎ
- 稀現象の探索

# 目次

## 1. QCD相図

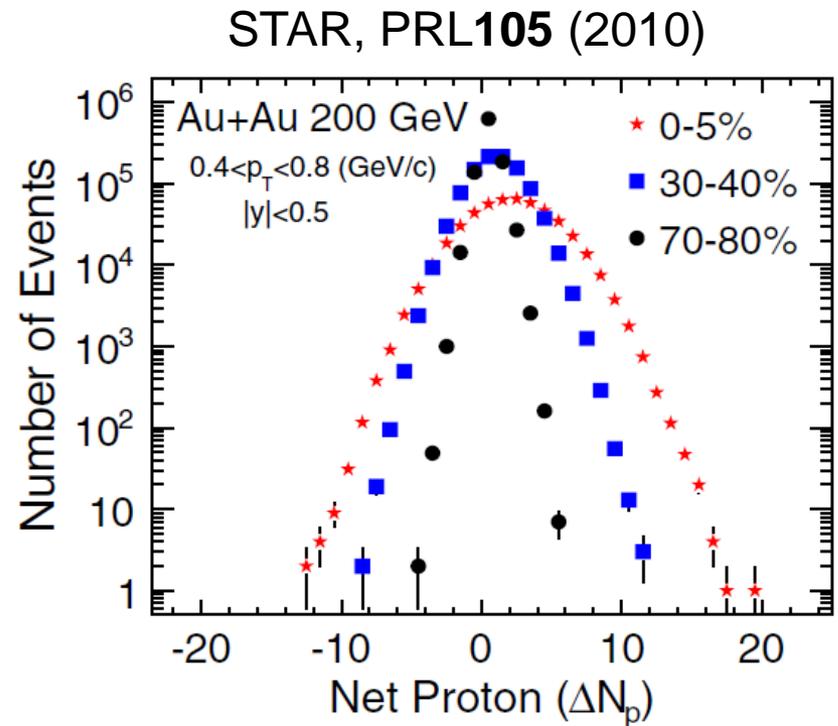
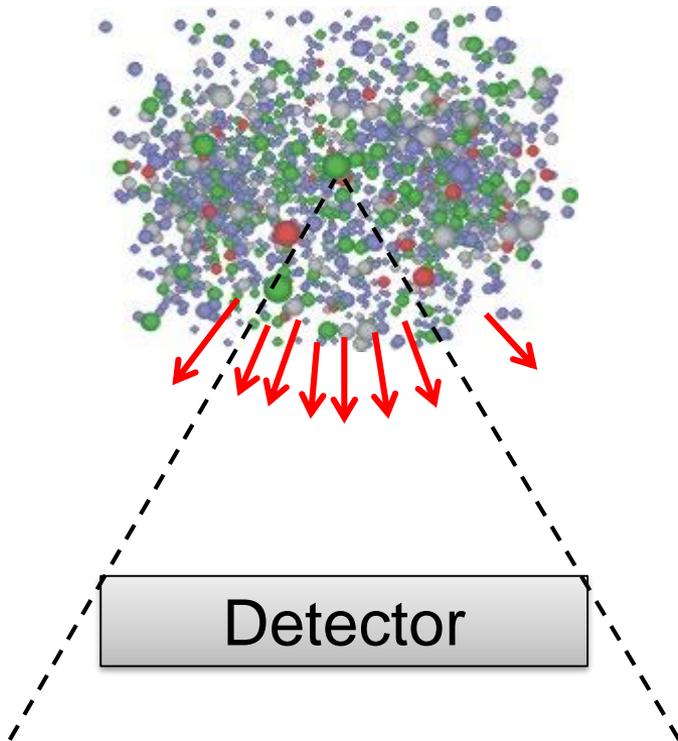
- QCD相図・臨界点・一次相転移
- カラー超伝導
- ビームエネルギー走査

## 2. イベント毎ゆらぎ

- ゆらぎとは？なぜ、ゆらぎ？
- 実験結果
- 課題

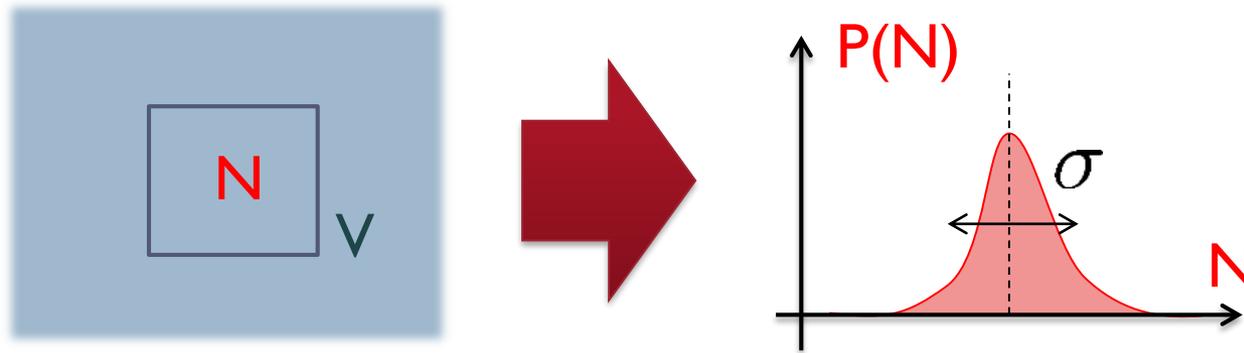
# イベント毎ゆらぎとは

観測される(特定の粒子種の)粒子数は、観測ごとにゆらぐ！



# 熱ゆらぎと物性現象

例：熱平衡状態下で、観測量はゆらいでいる



## ゆらぎで見えてくる物理

- ① ミクロな自由度の同定
- ② 時間発展の履歴の記憶
- ③ 相転移の探索

参考文献：Asakawa, MK,  
PPNP 90, 299 (2016)

# 非ガウスゆらぎ・キュムラント

□ 分散  $\langle N^2 \rangle_c = \langle \delta N^2 \rangle = \sigma^2$

□ 歪度  $\langle N^3 \rangle_c = S\sigma^3$

□ 尖度  $\langle N^4 \rangle_c = \kappa\sigma^4$

$\langle N^n \rangle_c$ : n次キュムラント

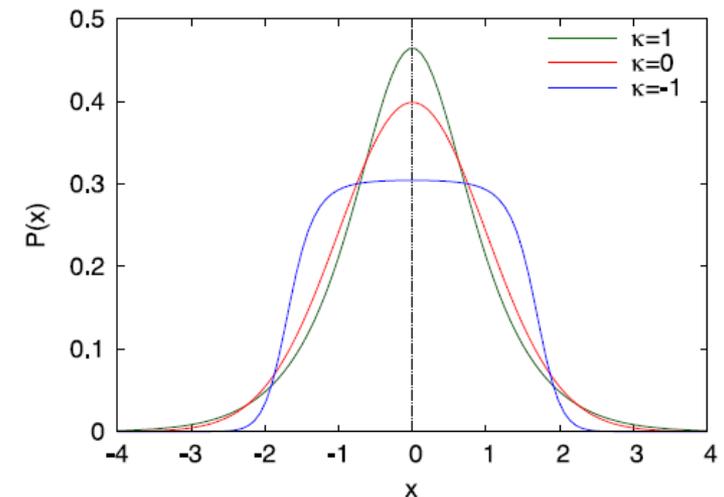
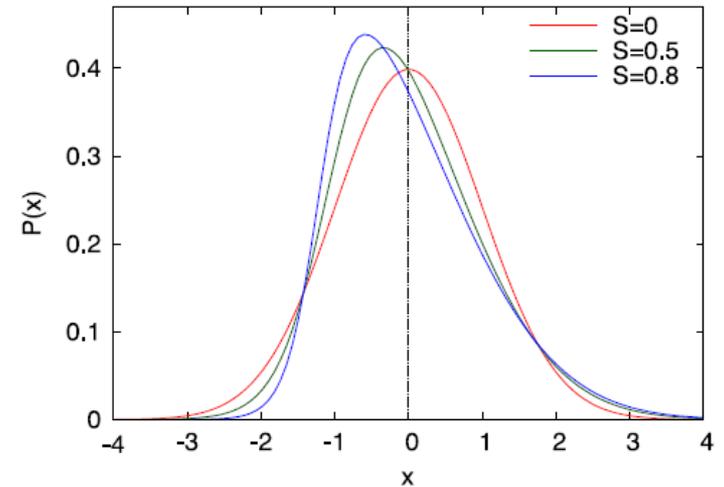
## キュムラントの特徴

□ ガウス分布: 3次以上は全てゼロ

$$\langle N^m \rangle_c = 0 \quad \text{for } m \geq 3$$

□ ポアソン分布: 全ての次数が等しい

$$\langle N^m \rangle_c = \langle N \rangle$$



# A Coin Game

- ① 25 Euroを賭ける
- ② 表が出たコインをもらえる

A. 50 x 1 Euro



B. 25 x 2 Euro



期待値は当然同じ。

# A Coin Game

- ① 25 Euroを賭ける
- ② 表が出たコインをもらえる

A. 50 x 1 Euro



B. 25 x 2 Euro



C. 1 x 50 Euro



期待値は当然同じ。  
しかし、ゆらぎは異なる。

# QCD相構造とゆらぎ

## QCD臨界点探索



ゆらぎは**増大**

Stephanov, Rajagopal, Shuryak, 1998; 1999

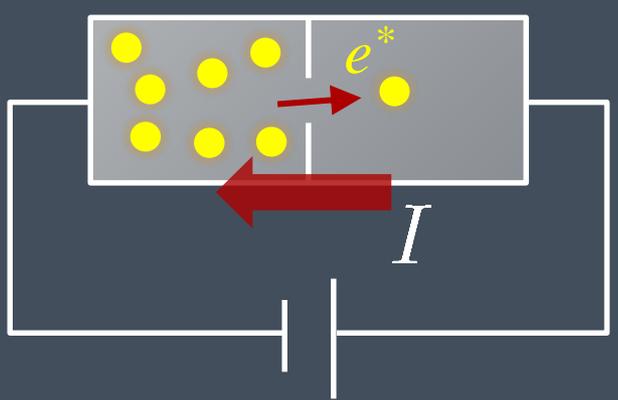
## QGP状態の実現



ゆらぎは**減少**

Asakawa, Heinz, Muller, 2000;  
Jeon, Koch, 2000

# 電流雑音 (Shot Noise)



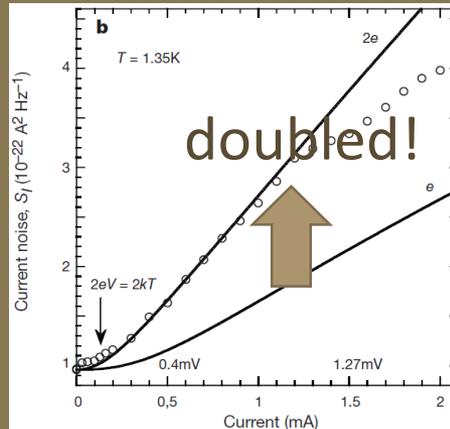
$S_{\text{shot}} \sim \langle \delta I^2 \rangle$   
 $S_{\text{shot}} = 2e^* \langle I \rangle$

↑  
準粒子の電荷

## 超伝導相転移

$$e^* = 2e$$

Jehl+, Nature 405,50 (2000)



## 分数量子ホール効果

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

Saminadayar+, PRL79,2526 (1997)

高次キュムラント:

3rd order: ex. Beenakker+, PRL90,176802(2003)

up to 5th order: Gustavsson+, Surf.Sci.Rep.64,191(2009)

# 高次キュムラント

A. 50 x 1 Euro



B. 25 x 2 Euro



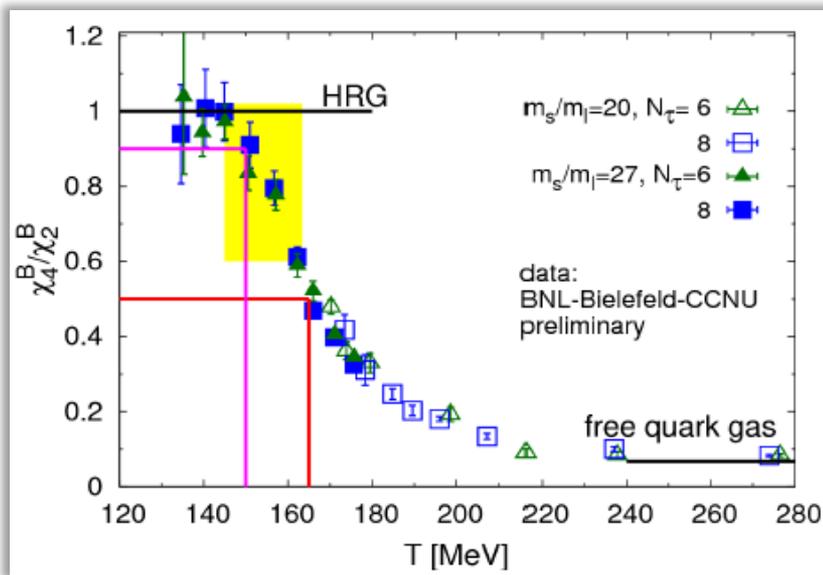
$$2 \langle \delta \epsilon^2 \rangle_{\text{1 Euro}} = \langle \delta \epsilon^2 \rangle_{\text{2 Euro}}$$

$$4 \langle \delta \epsilon^3 \rangle_{\text{1 Euro}} = \langle \delta \epsilon^3 \rangle_{\text{2 Euro}}$$

$$8 \langle \epsilon^4 \rangle_{\text{1 Euro}} = \langle \epsilon^4 \rangle_{\text{2 Euro}}$$

# 非ガウスゆらぎ

## QGP状態の実現



ゆらぎは**減少**

Ejiri, Karsch, Redlich, 2006

## QCD臨界点探索



ゆらぎは**増大**

Stephanov, 2009

The noise is the signal.

R. Landauer  
1998

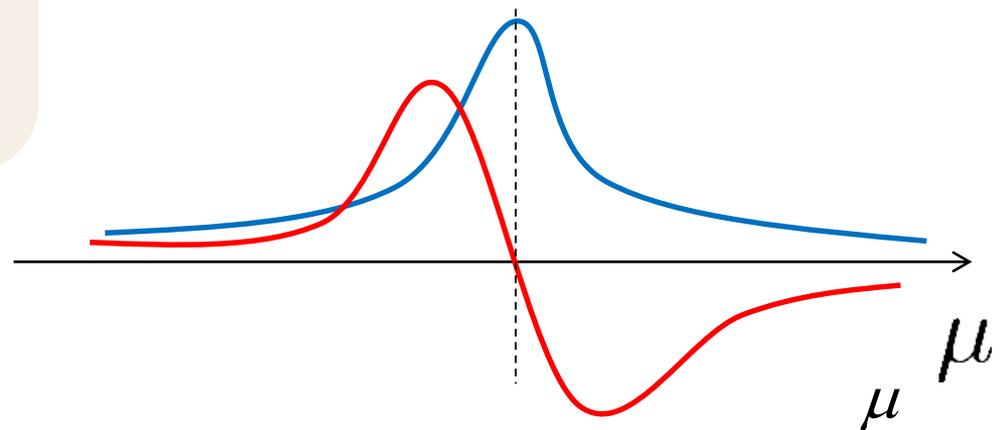
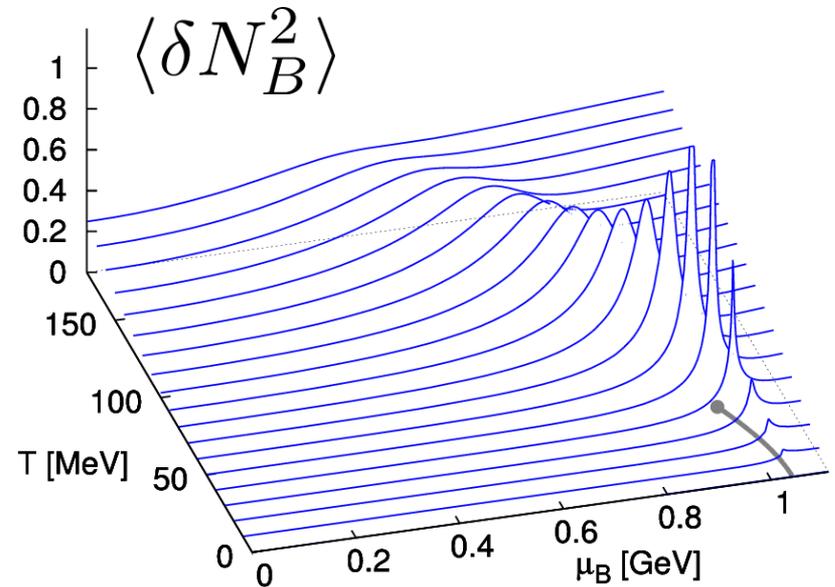
# 臨界点近傍での非ガウスゆらぎ

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

$\langle N_B^2 \rangle_c$ : 相境界にピーク構造



$\langle N_B^3 \rangle_c$ : 相境界で符号変化



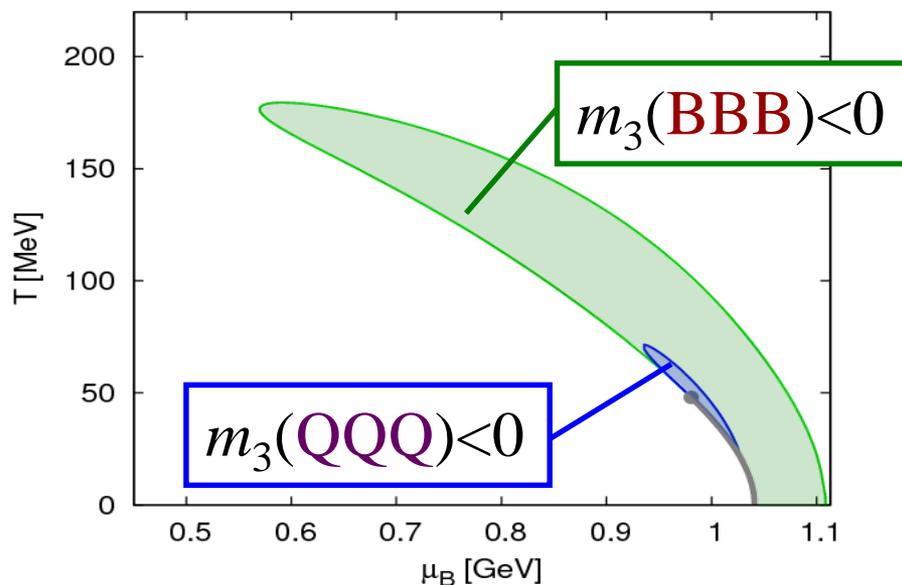
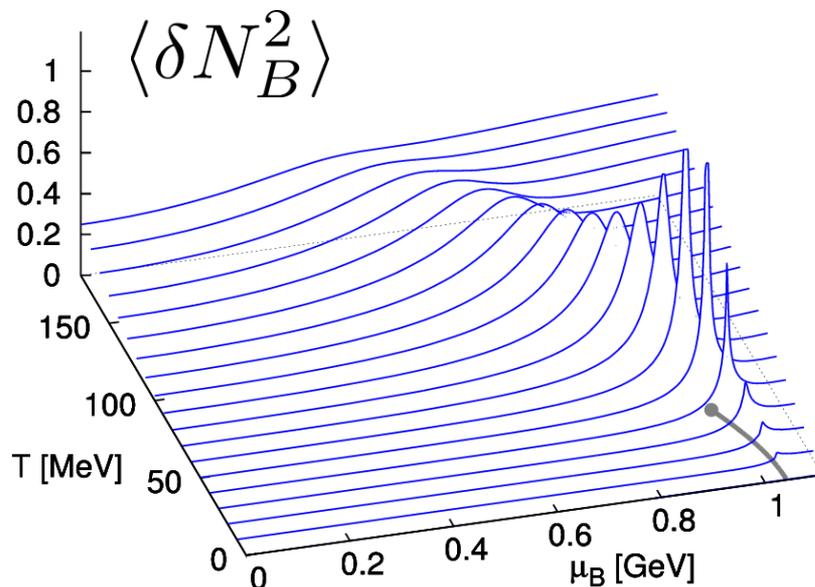
# 臨界点近傍での非ガウスゆらぎ

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

$\langle N_B^2 \rangle_c$ : 相境界にピーク構造



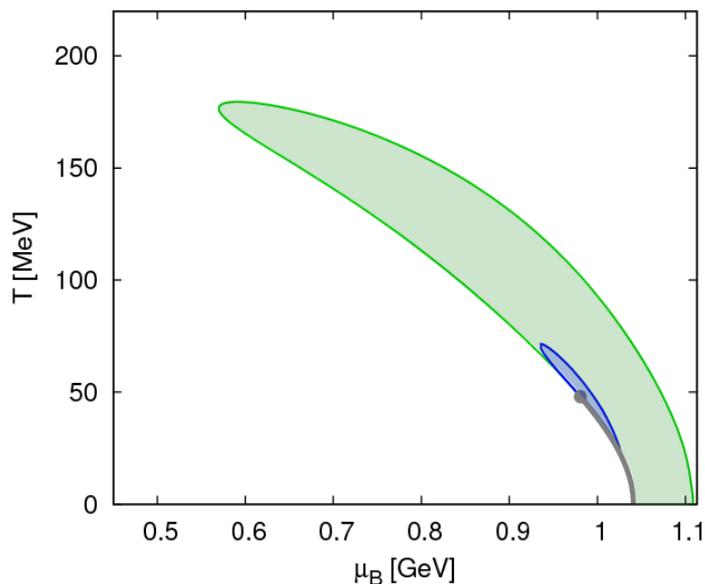
$\langle N_B^3 \rangle_c$ : 相境界で符号変化



# 高次のバリオン数キュムラント

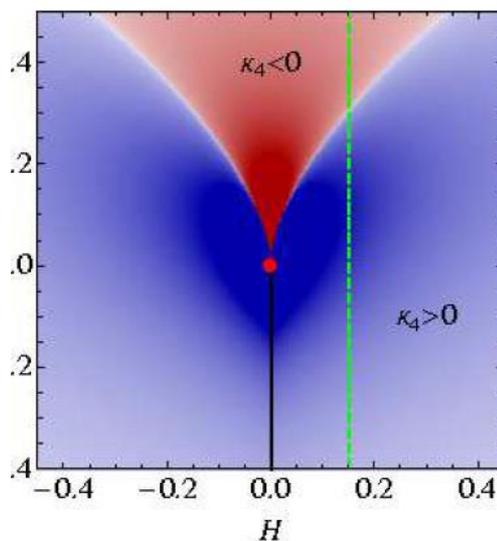
$$\langle N_B^{m+1} \rangle_c = T \frac{\partial \langle N_B^m \rangle_c}{\partial \mu}$$

3次



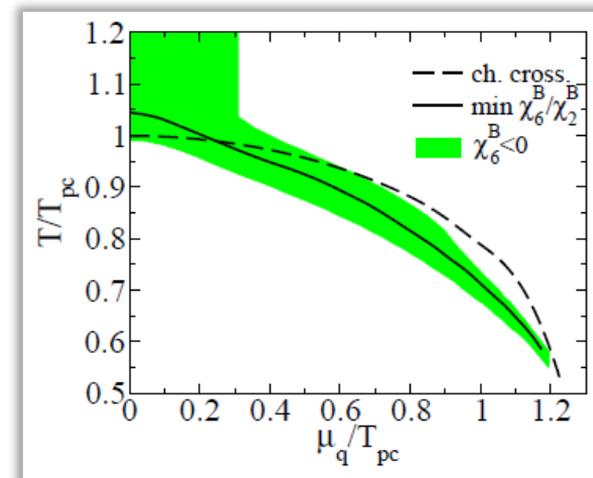
Asakawa, Ejiri, MK (2009)

4次



Stephanov (2011)

6次



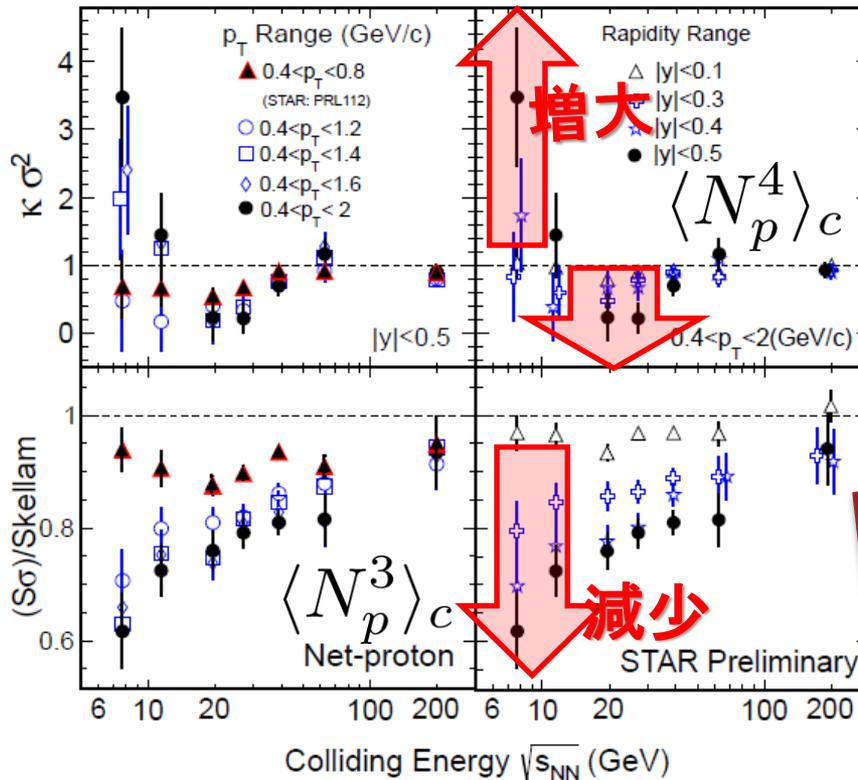
Friman+ (2011)

# 高次キュムラント測定の特長

負の高次キュムラントの実験的確定は、  
①低次キュムラントのピーク構造  
②ピークの「向こう側」の物質生成  
の強い傍証を与える。

# 陽子数ゆらぎ @STAR-BES-I

0-5% Au+Au Central Collisions at RHIC



STAR Collab.  
2010~

4次ゆらぎ

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

3次ゆらぎ

$$\frac{\langle N^3 \rangle_c}{\langle N \rangle_c^3}$$

高次熱ゆらぎの測定  
 □ 超高統計実験  
 □ 物理学として希少

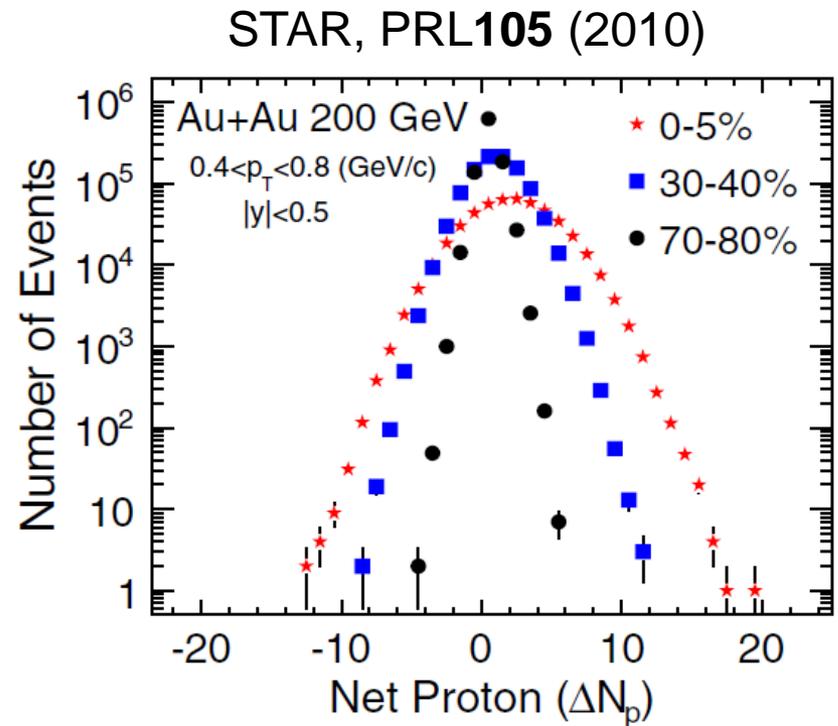
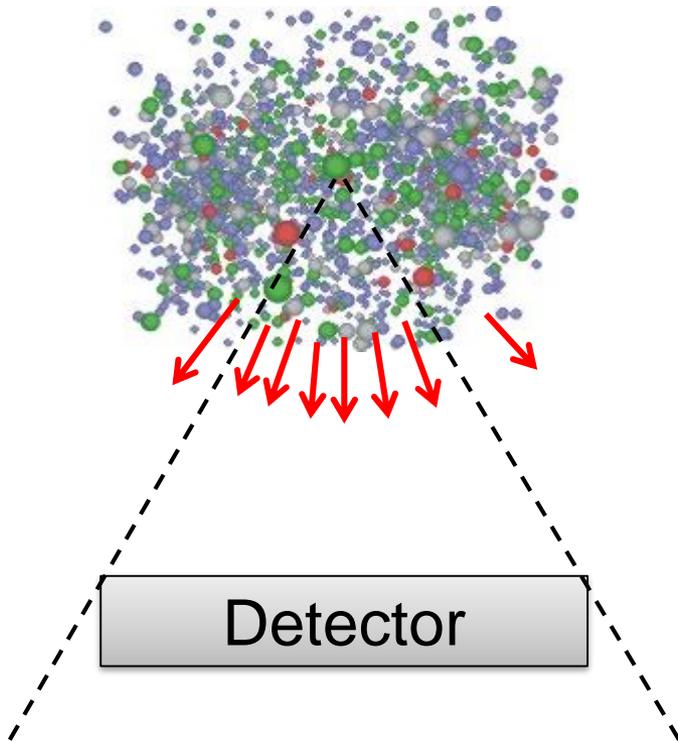
非ガウスゆらぎに、  
非自明な**増大**と**減少**



QCD臨界点の  
シグナル？

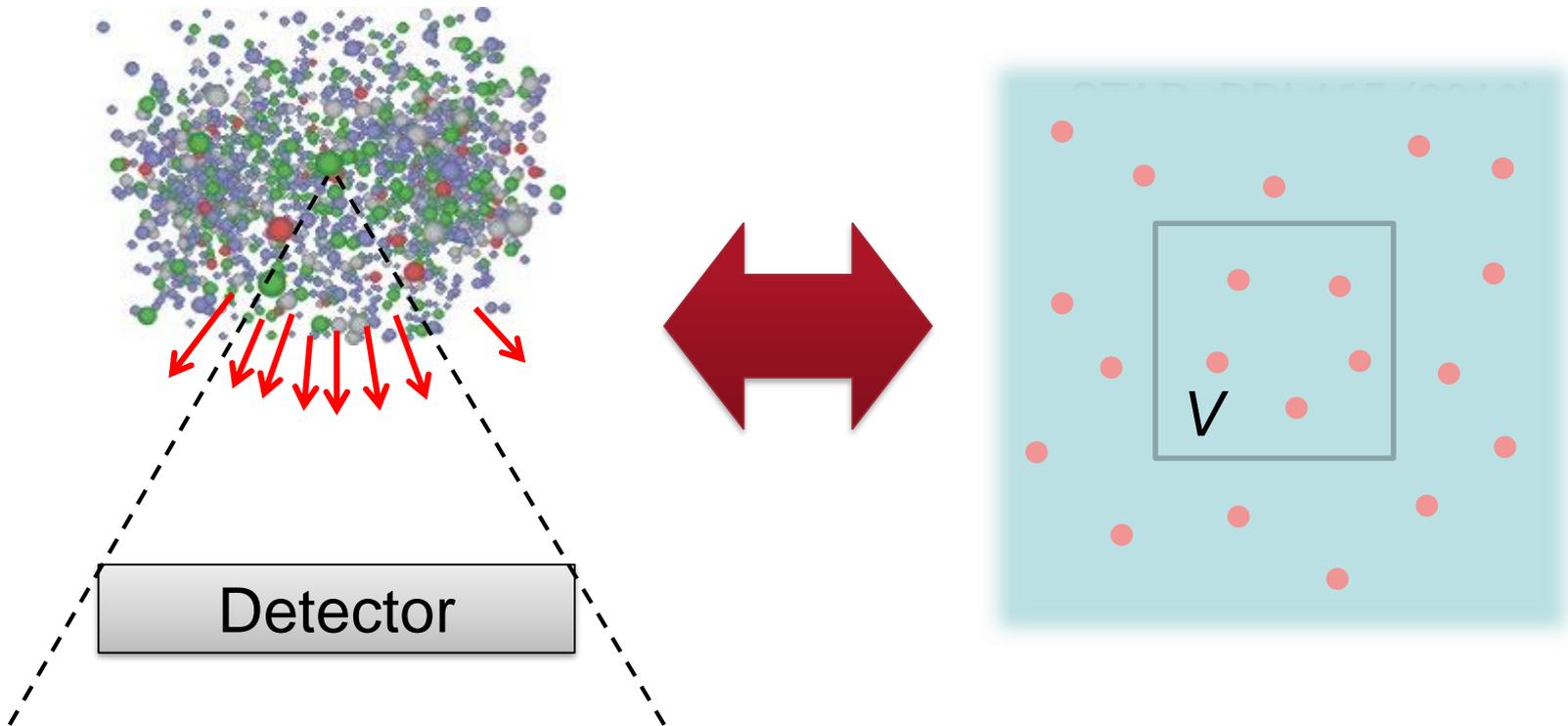
# イベント毎ゆらぎとは

観測される(特定の粒子種の)粒子数は、観測ごとにゆらぐ！



# イベント毎ゆらぎとは

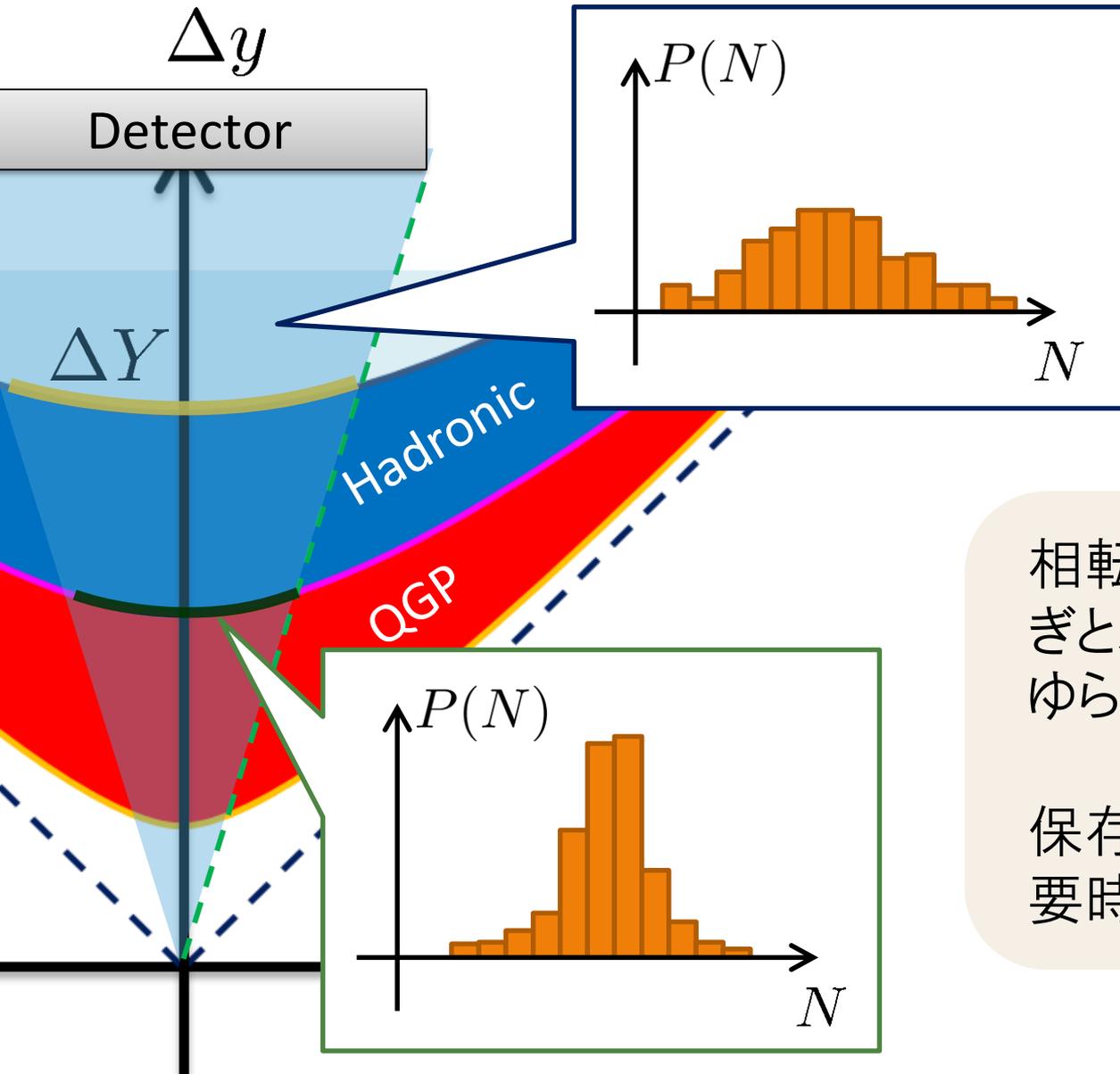
観測される(特定の粒子種の)粒子数は、観測ごとにゆらぐ！



# 様々な問題

- 初期ゆらぎ: 体積、衝突のダイナミクス
- 高温物質の時間発展
- 実空間と位相空間の関係
- 軽イオン生成・共鳴崩壊
- 全ゆらぎの保存
- ジェットの影響
- 古典 vs 量子
- 動的模型上でのシミュレーション
- 粒子化: 連続分布 → 離散分布
- 検出器効果の補正
- 有限検出領域の問題 ( $p_T$  カットなど)
- ...

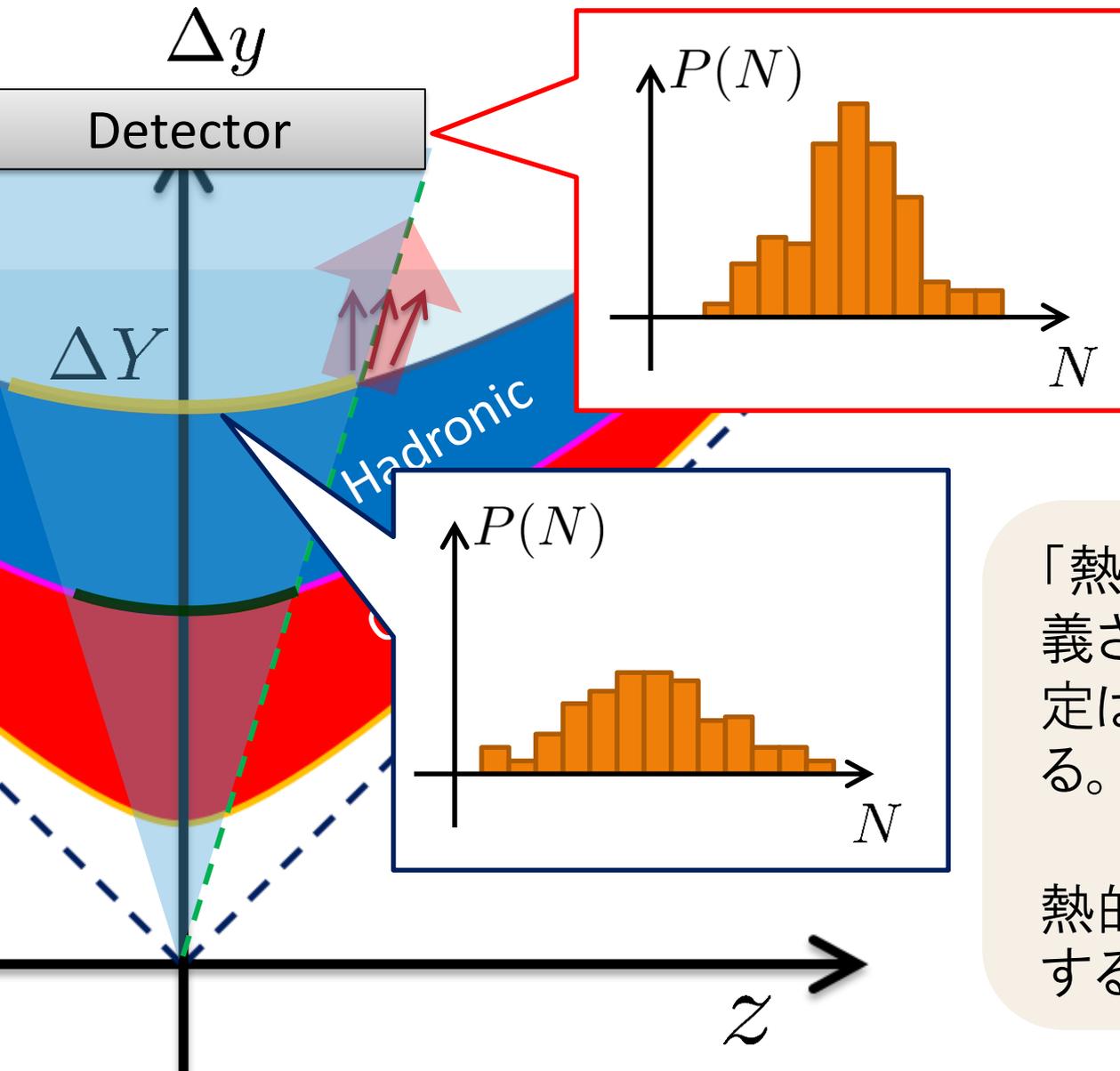
# ゆらぎの時間発展



相転移時刻におけるゆらぎと、運動学的凍結後のゆらぎは異なる。

保存電荷を使う必要有。  
要時間発展の追跡。

# ゆらぎの時間発展



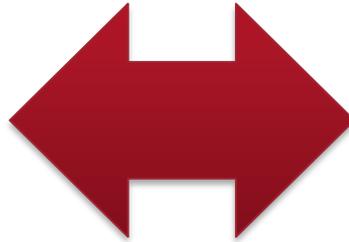
「熱」ゆらぎは実空間で定義される。一方、実験測定は運動量空間で行われる。

熱的「にじみ」効果を考慮する必要性。

# 陽子ゆらぎ vs バリオンゆらぎ

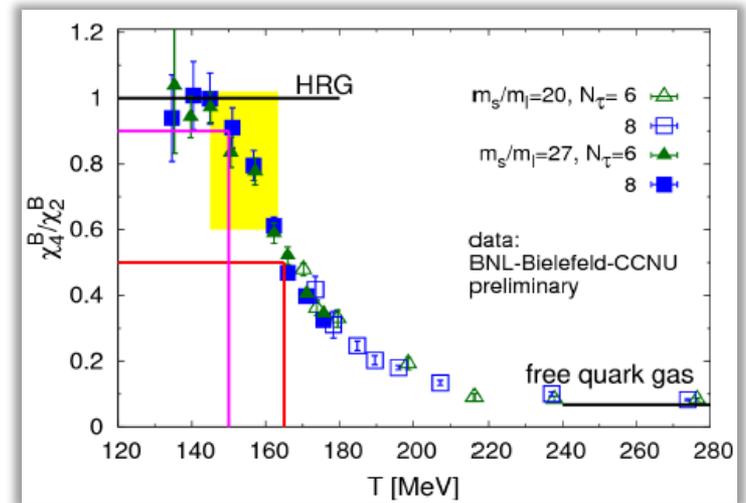
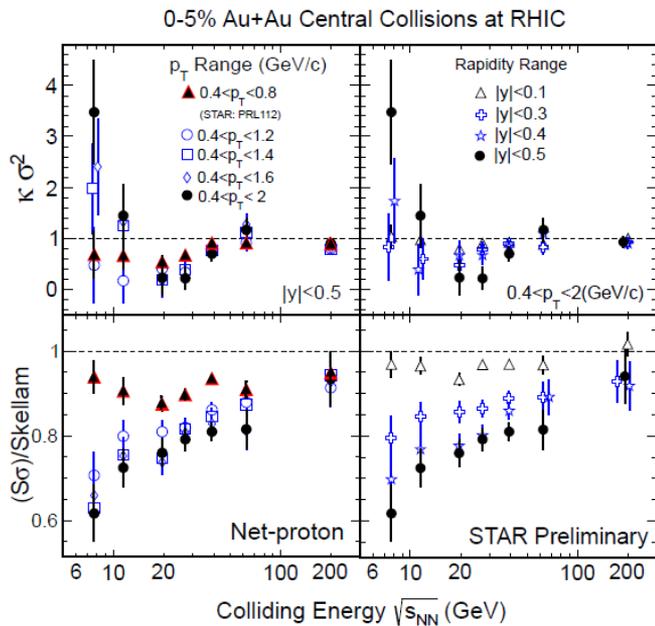
## 実験測定

陽子数キュムラント  
(非保存電荷)



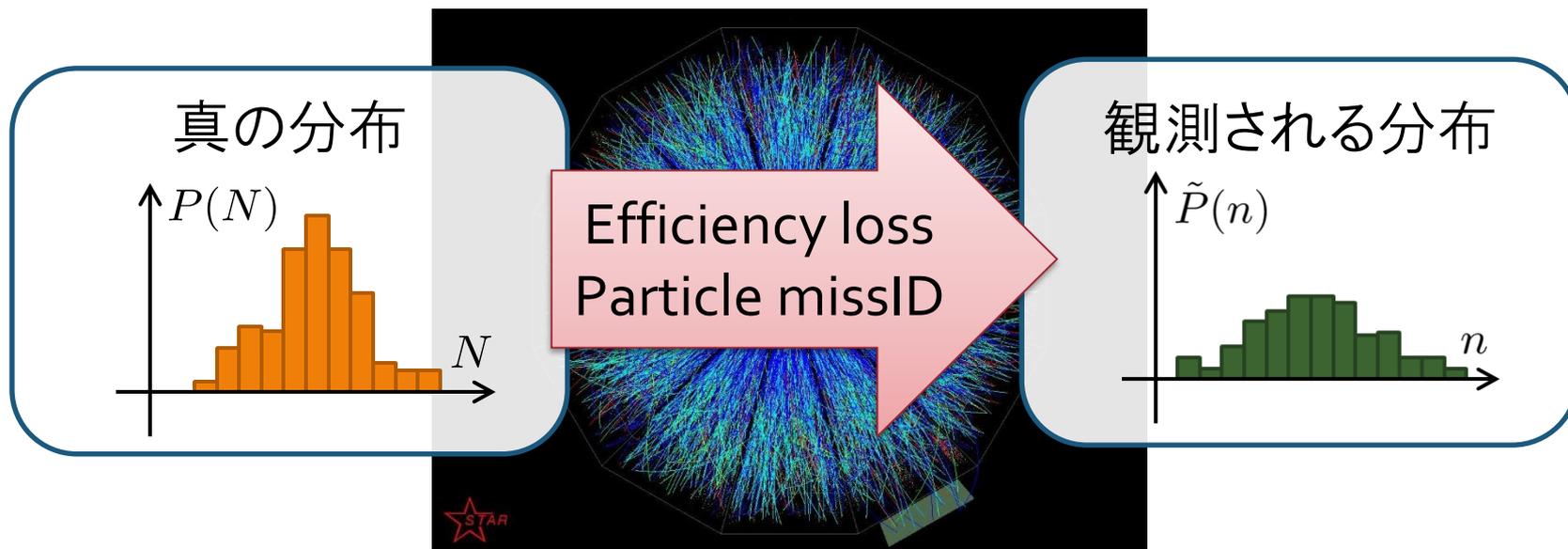
## 理論計算

バリオン数キュムラント  
(非保存電荷)



※高次キュムラントの理論的計算は、保存電荷しかできない

# 検出器効果の補正



- ❑ 検出器による検出ミス、誤検出により、分布は変化。
- ❑ これにより、高次キュムラントは非自明に変化。
- ❑ 正しいキュムラントを得るための補正が必要。

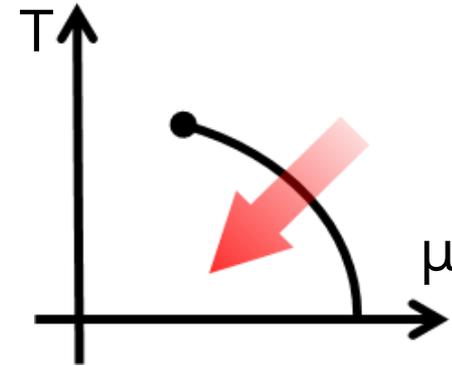


野中さんのトーク

# 様々な問題

- 初期ゆらぎ: 体積、衝突のダイナミクス
- ✓ 高温物質の時間発展
- ✓ 実空間と位相空間の関係
- 軽イオン生成・共鳴崩壊
- 全ゆらぎの保存
- ジェットの影響
- 古典 vs 量子
- 動的模型上でのシミュレーション
- 粒子化: 連続分布 → 離散分布
- ✓ 検出器効果の補正
- 有限検出領域の問題 ( $p_T$ カットなど)
- ...

# 一次相転移の観測



- 混合物質の形成
- 非一様系

- 相転移「線」観測は、臨界点の観測よりも容易？
- 非一様系の非ガウスゆらぎの取り扱いの困難

# 質問集より 1

- QCDの相図について何を議論することができるのか。
- QCD臨界点、相転移について現在どこまでわかっているのか？
- QCD臨界点での普遍性クラスがなぜ3次元イジングモデルと同じと言われているのか
- 臨界点のシグナルとして、理論計算と定量的な比較が可能な測定量はありますか？
- **ゆらぎ**
- **fluctuation**の解析を行っていますが、**揺らぎ**と相関長、臨界点の関係がよくわかっていません。
- QCD相図の臨界点付近では**なぜ保存量が揺らぐのか**？また偏極とは何か？
- **fluctuation**以外のQCD臨界点を探る物理量はどんなものがあるのか
- 臨界点付近で**保存量が揺らぐ**のは何故か
- **保存量の揺らぎ**はなぜ相転移すると大きく変わるのか

# 質問集より 1

- softest pointについて
- フリーズアウト時の密度が最大になる衝突エネルギーとマターの密度が最大になる衝突エネルギーの関係
- **J-PARC-HI**の進展と、期待されていること。
- **J-PARC HI**の必要性、有用性を議論したい。
- カラー超電導とは何でしょうか？ QGPとは違うのですか？
- カラー超伝導という言葉聞いたことがあるが、通常の超伝導で見られる電気抵抗ゼロの状態やマイスナー効果に対応する現象はどのようなものなのか？
- なぜカラー超伝導を実験的に実現することが困難なのか
- **colour superconductor**にアプローチするアイデアとしてどのようなものがあるか
- カラー超伝導相のプローブ
- より高密度側のQCD物性にはアプローチできないのか？

# まとめ

重イオン衝突実験・媒質中のQCD研究は、  
**超高密度領域の物質探索**へ。

**イベント毎ゆらぎ**はQCD相構造探索に有効な観測量。  
しかし、**実験結果の適切な理解・情報抽出は  
まだ発展途上**。

臨界点・一次相転移を発見し、カラー超伝導  
探索へと歩みを進めるためには、  
**実験・理論双方のさらなる発展**が必要。

# Fragile Higher Orders

Ex.: Relation b/w baryon & proton # cumulants  
(with approximations)

MK, Asakawa, 2012

$$\left\{ \begin{array}{l}
 2\langle(\delta N_p^{(\text{net})})^2\rangle = \frac{1}{2}\langle(\delta N_B^{(\text{net})})^2\rangle + \frac{1}{2}\langle(\delta N_B^{(\text{net})})^2\rangle_{\text{free}} \\
 2\langle(\delta N_p^{(\text{net})})^3\rangle = \frac{1}{4}\langle(\delta N_B^{(\text{net})})^3\rangle + \frac{3}{4}\langle(\delta N_B^{(\text{net})})^3\rangle_{\text{free}} \\
 2\langle(\delta N_p^{(\text{net})})^4\rangle_c = \frac{1}{8}\langle(\delta N_B^{(\text{net})})^4\rangle_c + \dots
 \end{array} \right.$$

genuine info.
Poisson noise

Higher orders are more seriously affected by efficiency loss.

# 相転移の次数

