

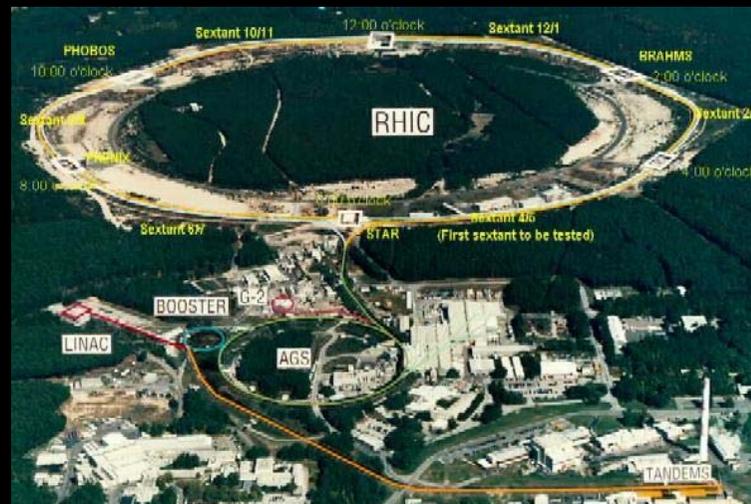
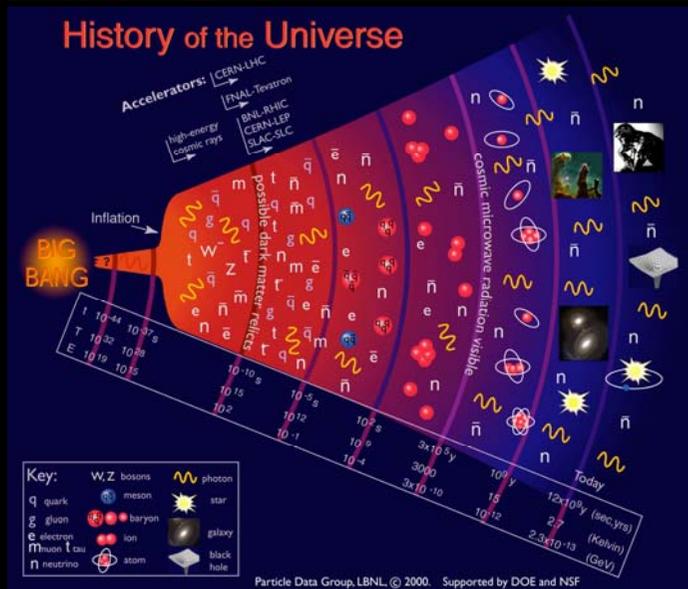
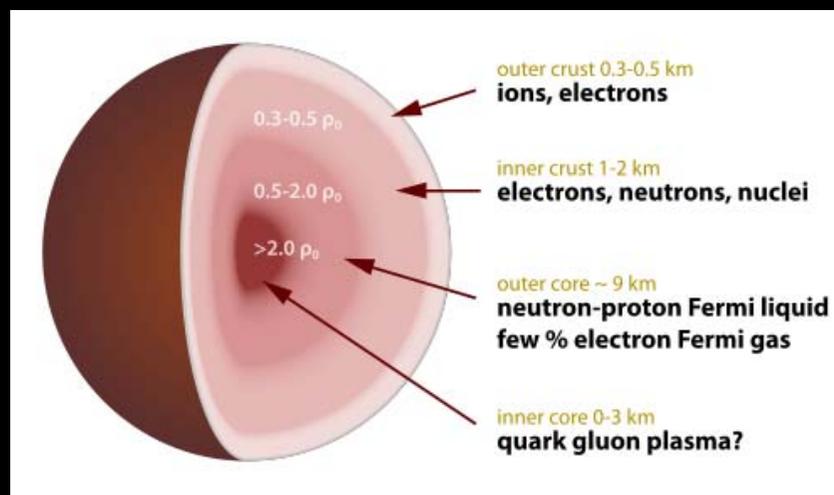
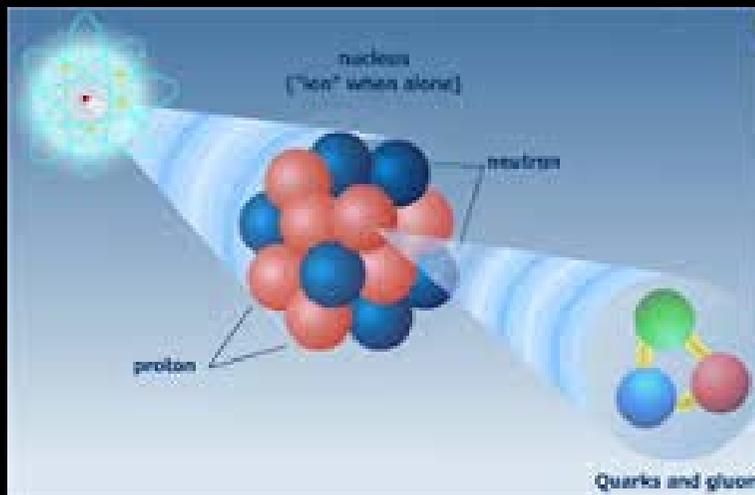
有限密度QCDシミュレーション

永田桂太郎(KEK)

共同研究者: 青木慎也(京都), 中村純(広島大学),
西垣-望月真佑(島根), 花田政憲(京都), 橋本省二(KEK)



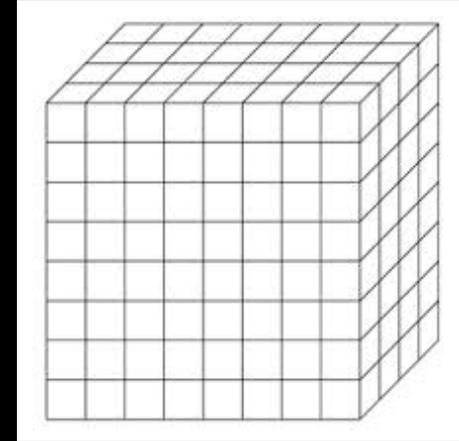
いろいろな有限クォーク密度系



有限密度格子QCD

- QCDの分配関数

$$Z = \int \mathcal{D}U (\det \Delta)^{N_f} e^{-S_{\text{YM}}}$$



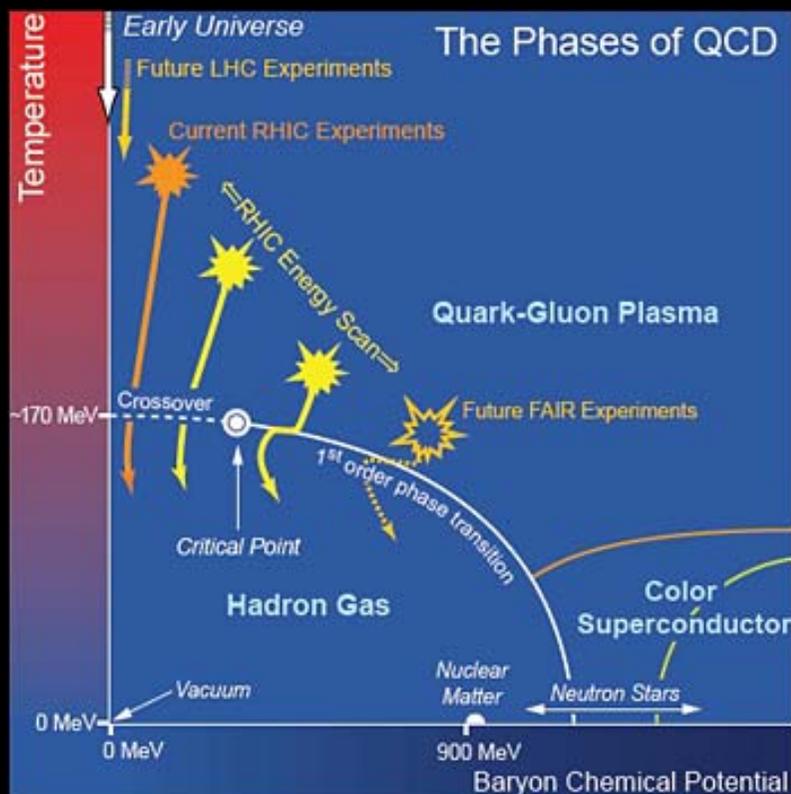
- クォーク化学ポテンシャルが非ゼロの場合
 - フェルミオン行列式が複素数になり, importance samplingが破綻
 - **符号問題の回避法の開発が必要**. 研究の難しい系として知られているが、近年急速に発展してきている。

有限密度QCDのさまざまな取組

- フェルミオン行列式
 - 符号問題の発生源, 化学ポテンシャルの起源
 - 符号問題の回避法はフェルミオン行列式計算を必要とすることが多い.
 - ランク $N_x N_y N_z N_t N_{\text{dof}}$ の多次元配列
- フェルミオン行列式の時間成分を解析的に実行
 - 行列ランクの縮小
 - 化学ポテンシャルに関する解析関数としての表示
 - 低温計算への応用

Beam Energy Scan実験

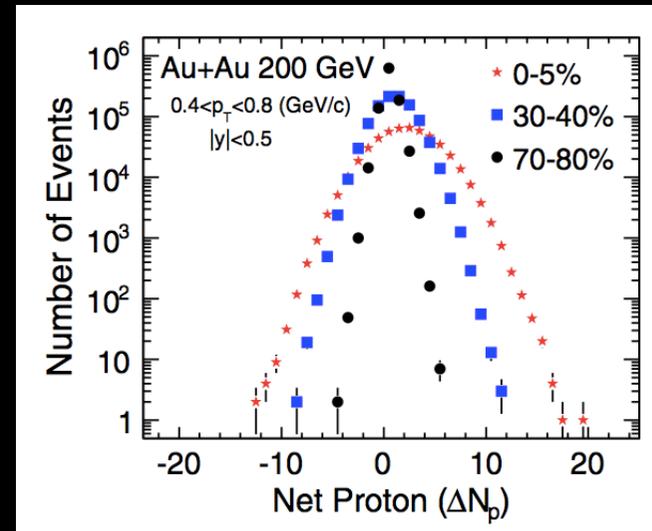
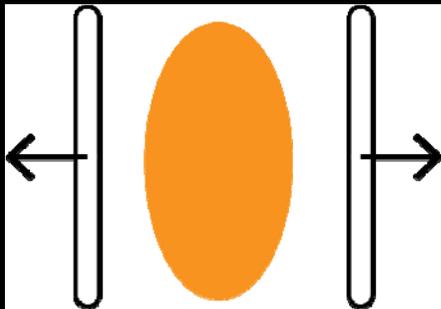
- 臨界点(CEP)の存在が予想されている
 - 高温低密度：クロスオーバ
 - 低温高密度：1次相転移(現象論研究)



- 臨界点
 - 相関長の発散と臨界緩和
 - FireballがCEP近傍を經由すれば、シグナルが測定される可能性
- BES実験：衝突エネルギーを変えて相図上の広い領域を探索する。

ビームエネルギー走査(BES)実験

衝突エネルギーを変えて生成される物質の温度や密度を変える。



Net protonごとのイベント数

Aggarwal et al. STAR, PRL105,
022302('10)

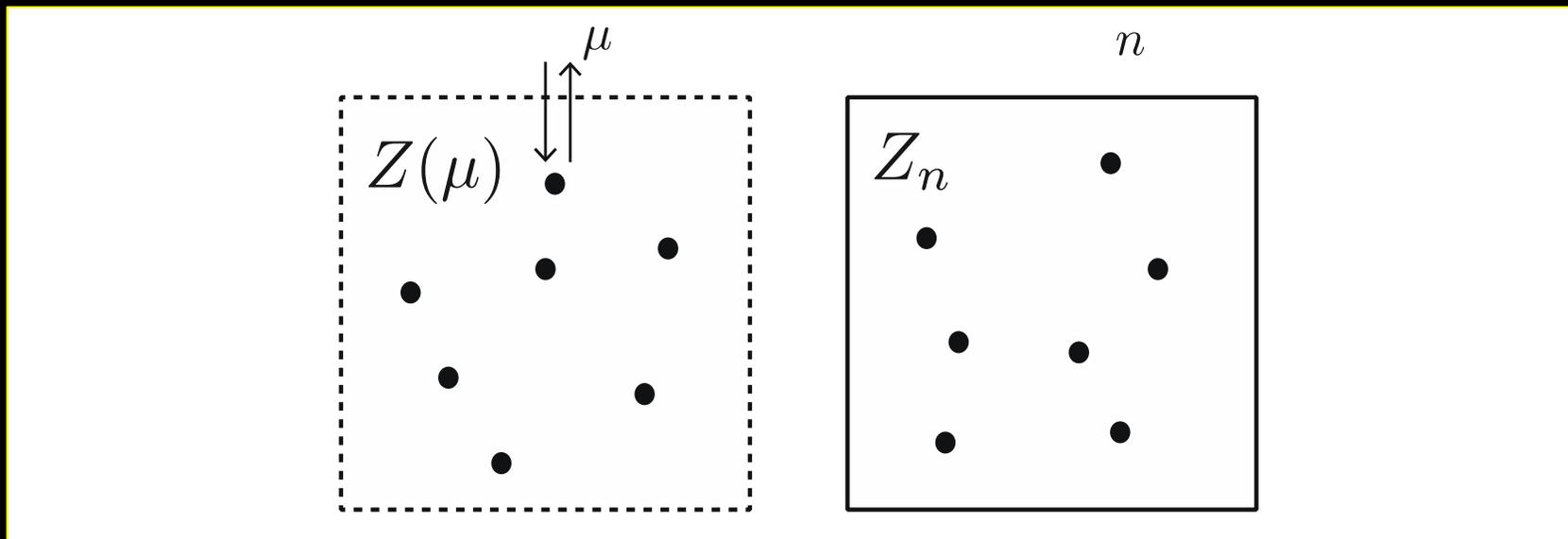
- 生成された物質の温度や密度が臨界点に達するかどうかはわからない。
- 理論的予言や、低密度の情報を活かすことは出来ないか？

カノニカル法

- Canonical と Grandcanonicalアンサンブル

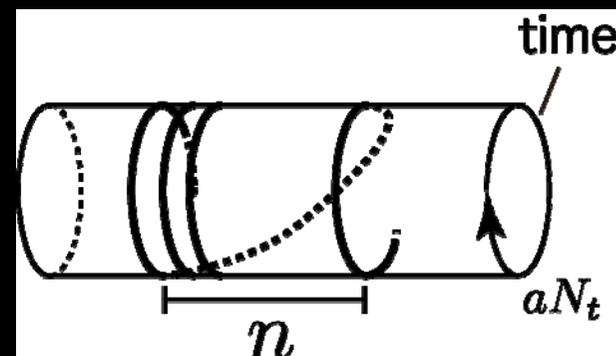
$$Z_{GC}(\mu, T) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_n e^{n\mu/T}$$

- 化学ポテンシャルを導入した場の理論：大正準集団
- 大分配関数からあるクォーク数のみのセクタを抜き出す。

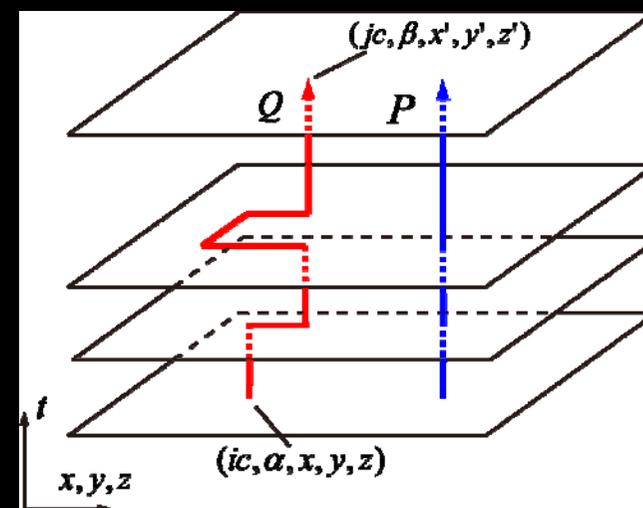


カノニカル分配関数

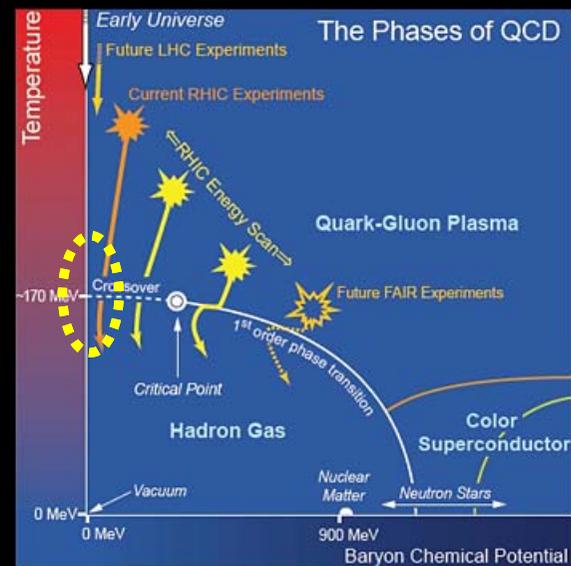
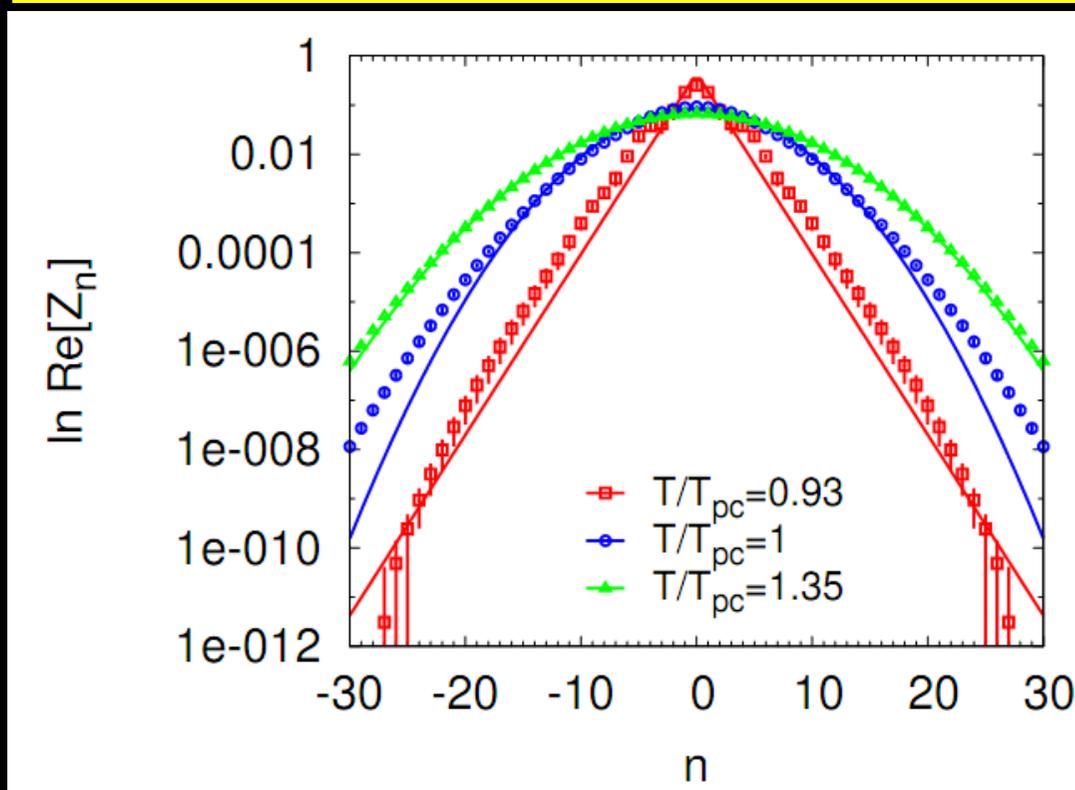
- カノニカル分配関数をどう求めるか?
 - クォーク数：クォークの時間方向の巻き数.
 - フェルミオン行列式を時間方向の巻き数で分解.



- 縮約公式
 - 時間方向の伝搬行列を構成
 - n 周ループ \sim 伝搬行列の固有値の n 個の積



カノニカル分配関数

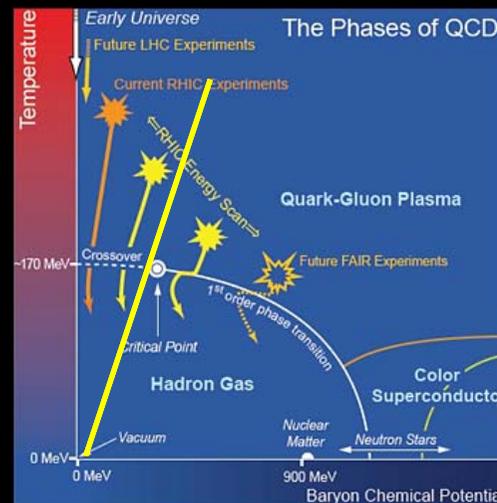
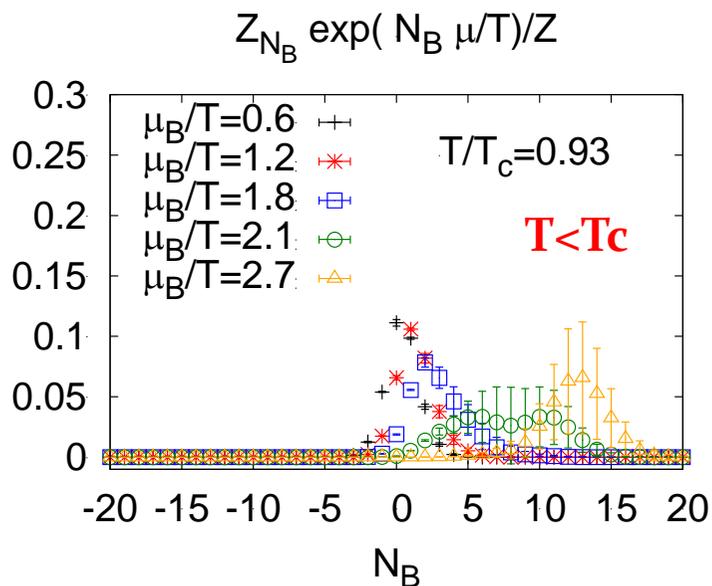
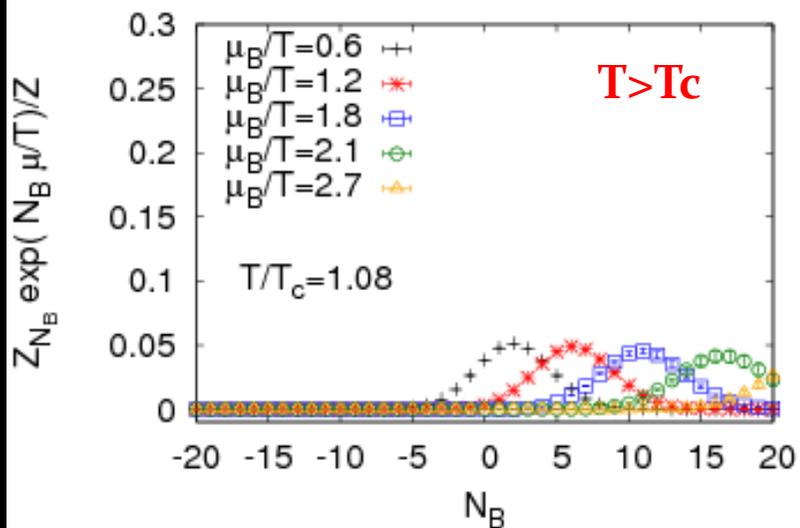


- T_c 近傍で形状の変化
 - $T > T_c : Z_n \sim \exp(-n^2)$
 - $T < T_c : Z_n \sim \exp(-|n|)$

2フレーバ
 Wilsonフェルミオン
 格子サイズ $8^3 \times 4$
 $V \sim (2\text{fm})^3$
 $m\pi/m\rho = 0.8$
 [Nagata, et.al. PTEP01A103('12)]

バリオン数分布

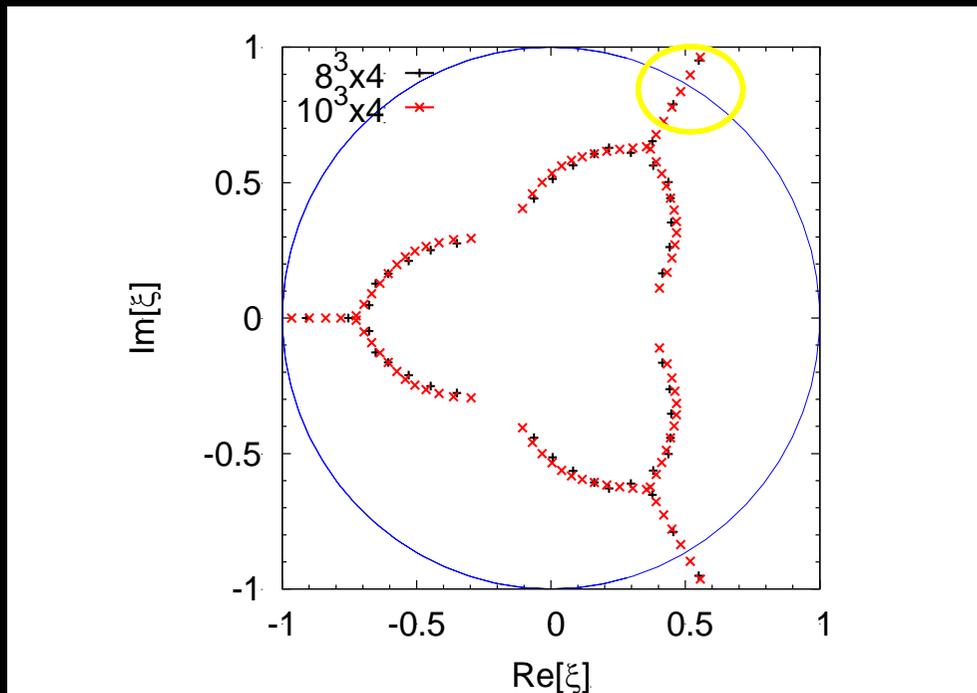
$$Z_n e^{n\mu/T}$$



- 高温
 - (ほぼ)ガウス型.
- 低温
 - ガウシアンからのずれ.
- $\mu=0$ における分布の形状と有限密度での分布に影響.

Lee-Yangゼロ点計算

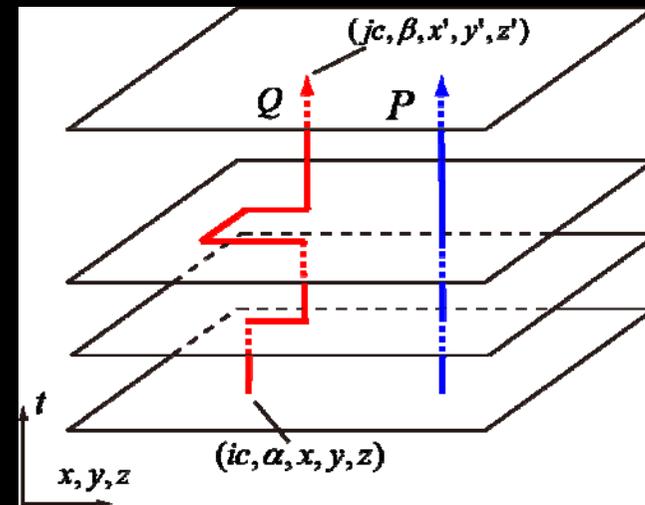
$$Z_{GC}(\mu, T) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_n e^{n\mu/T}$$



虚数化学ポテンシャル
から予想される振る舞
いを再現

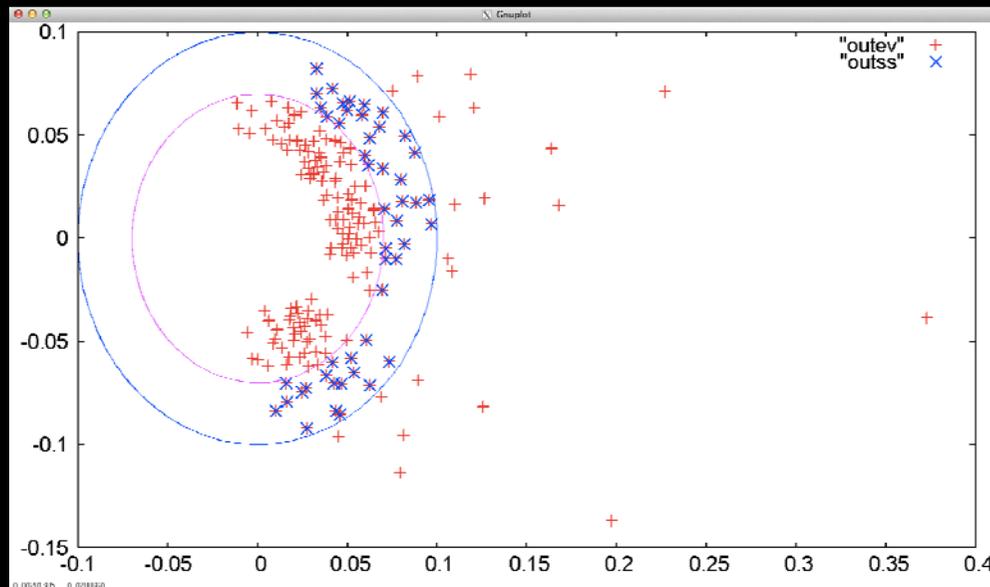
現在(HPCI)での課題

- 相転移のシグナルを得るためには、有限サイズスケールが必要.
- カノニカル分配関数の計算には、クォークの伝搬行列の固有値が必要.
- 固有値計算の大規模化が課題.



大規模化の取り組み

- 物理的なモードの特定
 - 低エネルギーのモード : $\lambda \sim 1$
 - 単位円近傍にギャップ
 - 条件数が小さく、中間領域に重要な固有値がある問題
- 櫻井一杉浦法 : 任意領域の固有値を抜き出す方法



まとめ

- 有限密度系の格子QCDシミュレーション
 - 原子核、中性子星、高エネルギー実験などの応用
 - 符号問題の困難
- 世界的にも多くのグループが有限密度格子QCDの研究に取り組み、近年急速に発展してきている。
- 我々の研究 : フェルミオン行列式の縮約公式
 - カノニカル法～BES実験
 - 他にもいろいろな応用
- 相転移を議論するために、固有値計算の大規模化を行っている。