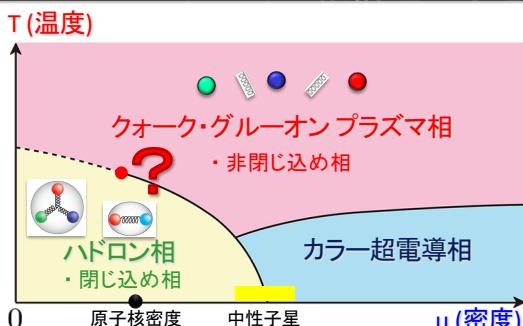


若山 将征(代表:阪大RCNP、高麗大学CENuM)、保坂 淳(副代表:阪大RCNP)、
伊達 進(阪大CMC)、飯田 英明(慶應大学、東大)、中村 純(阪大RCNP、極東連邦大学)
GPUコードならびに多倍長精度アルゴリズムを用いた
有限密度QCDにおける相構造の研究

JHPCN

量子色力学(QCD)の相構造の予想図



研究目的

原子核などの物質を構成するクオーカクやグルーオンの基礎理論である量子色力学(QCD)の相構造は明らかになっていない。本研究ではQCDを非摂動論的に直接解くことができる唯一の方法である格子QCDを用いて、QCDの相構造の決定を目指す。

「符号問題」とその解決策

有限密度系の格子QCDには「符号問題」と呼ばれる困難が存在

μ (密度)	モンテ・カルロ法の適用
$\mu = 0$	○
$\mu > 0$	✗ ←「符号問題」が存在
$\mu^2 < 0$ (純虚数)	○ ←「符号問題」は存在せず格子QCD計算が可能！

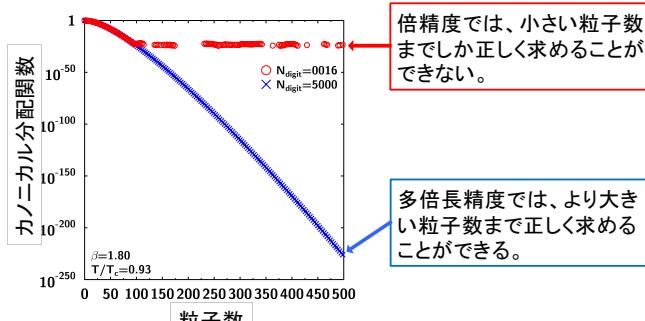
カノニカル法

純虚数密度領域で格子QCD計算から得られた結果をフーリエ変換することで、実密度領域の情報を引き出す。

A. Hasenfratz & D. Toussaint, Nucl. Phys. B371 (1992)

フーリエ変換時に激しい桁落ちが発生！

約5,000桁を保証する多倍長による超高速度計算を行うことで克服！



リー・ヤンの零点

グランドカノニカル分配関数の零点は系の相転移について多くの情報を持つ。

T.D. Lee & C.N. Yang,
Phys. Rev. 87, 404&410 (1952)

グランドカノニカル分配関数

$$Z_{GC}(\mu_q, T, V) = \sum_{n=-N_{max}}^{N_{max}} Z(n, T, V) \xi^n = 0$$

カノニカル分配関数
数値計算では有限

この高次方程式を解くとき
にも高精度計算が必要

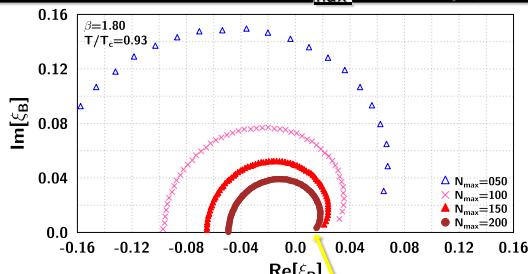
体積 V と N_{max} が無限大の極限で、リー・ヤンの零点が正の実軸上に収束すれば、その点が現実の世界での相転移点を与える。

格子QCD計算の成果

M. Wakayama et al., Phys. Lett. B793, 227(2019)

- GPU計算機を用いた $16^3 \times 4 (=16,384)$ 並列での計算
- 5,000桁を保証する多倍長による超高速度計算
- 6点(温度点)×20点(純虚数密度点)×2,000配位 = 24万配位での高統計量

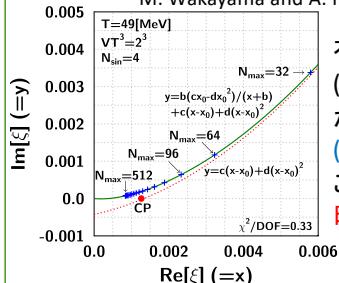
リー・ヤンの零点分布の N_{max} 依存性($T/T_c=0.93$)



N_{max} が増加するにつれて、リー・ヤンの零点は正の実軸上に収束 => 相転移点 : $T/\mu \sim 5-6$

有効模型によるシミュレーションの成果

M. Wakayama and A. Hosaka, arXiv:1905.10956[hep-lat] (2019)



有効模型(南部-ヨナ-ラシニオ(NJL)模型)の下で、カノニカル法から得られたリー・ヤンの零点(青バツ印)に適切な外挿を施すことによって期待される相転移点(赤丸印)を再現できることを確認。

今年度の計画

- 格子QCD計算: より大きい格子サイズかつより軽いクオーカクでリー・ヤンの零点分布の計算を行い、より定量的にQCD相構造の決定を目指す。
 - 有効模型: QCDをより定量的に議論できるボリヤコフループNJL模型を用いて、NJL模型で得られた外挿方法が理論的普遍性を持つかどうか確認する。
- 大阪大学CMCのGPU計算機OCTOPUSを利用。