

研究紹介（大西）

- 1964 年神戸生まれ、1992 年京都大学博士（理学）、1993 年北海道大学助手、2008 年京都大学基礎物理学研究所教授。
- これまでの研究課題
 - （大学院）重イオン衝突の輸送模型（指導教員：堀内昶）
 - （ポスドク）重イオン衝突と波束の統計力学（阪大 RCNP, LBL）
 - （北大）ハイパー核生成反応シミュレーション、高エネルギー重イオン衝突、高密度天体物質 EOS、強結合格子 QCD。
 - （基研 → 現在）
 - ◆ ハイパー核 → 相関関数を用いたハドロン間相互作用
 - ◆ 強結合格子 QCD → 符号問題（経路最適化法）
 - ◆ 高エネルギー重イオン衝突 → 古典ヤンミルズ場の熱化・レプリカ法
 - ◆ 高密度天体物質 → 中性子星物質 EOS（対称エネルギー、ハイペロン）

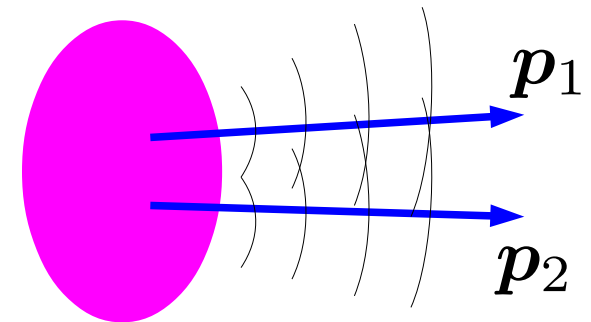
■ ストレンジネス核物理の面白さ

- 異なる構成粒子・相互作用からくる構造の変化
→ エキゾチック核、エキゾチック・ハドロン
- 様々なハドロン間相互作用 → 一般化した「核力」の理解
- 高密度物質でのストレンジネス → ハイペロン・パズルの解決を目指す

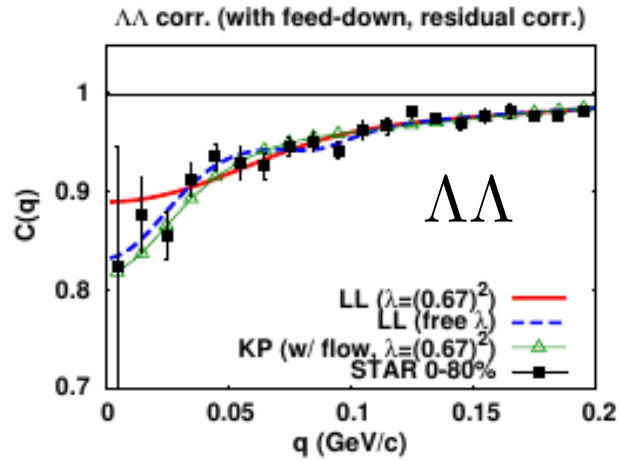
■ 相関関数を利用したハドロン間相互作用 (HHI) の研究

$$C(\mathbf{q}) = \frac{N_{12}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{N_1(\mathbf{p}_1)N_2(\mathbf{p}_2)} = \frac{N_{12}^{\text{same}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{N_{12}^{\text{mixed}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)} = \int d\mathbf{r} S(\mathbf{r}) |\psi(\mathbf{r})|^2$$

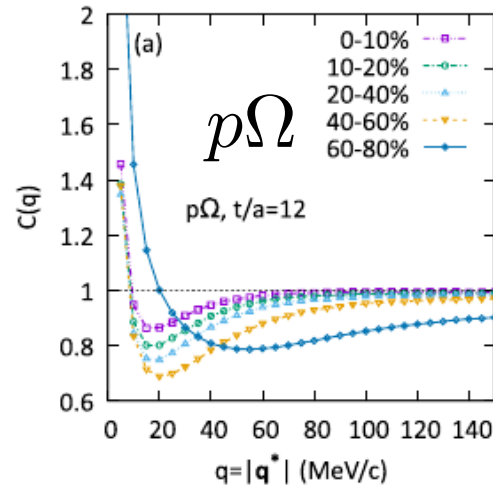
- |波動関数 $|\psi|^2$ に相互作用の情報を含む。
- 様々なハドロン対に適用可能。
- ソース関数 $S(\mathbf{r})$ に不定性あり。
低運動量で大きな変化 → s 波相互作用のみ。



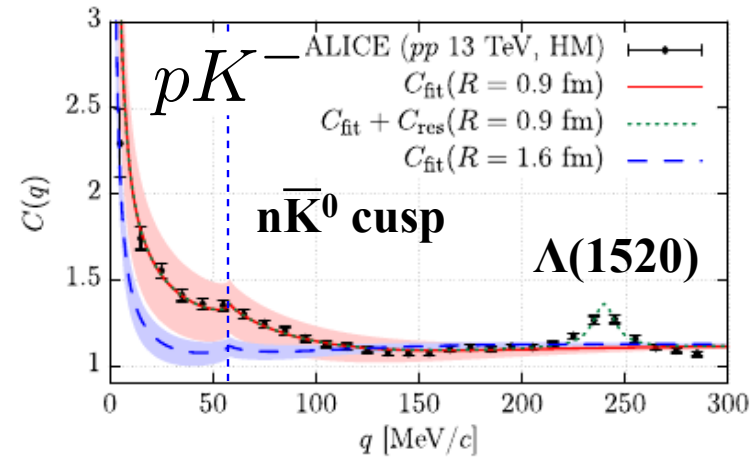
これまでの成果



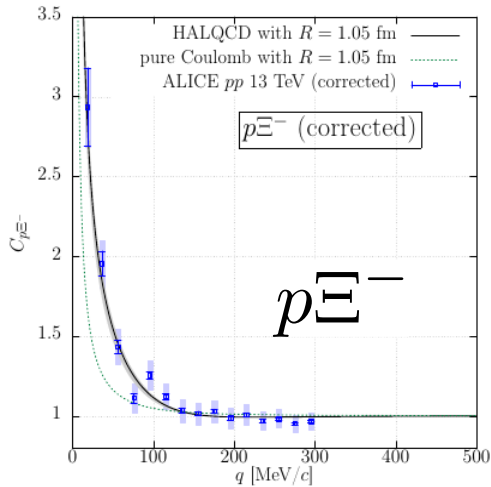
K. Morita, T. Furumoto, AO, PRC 91('15)024916 (Editors' Suggestion); AO, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA954('16)294.



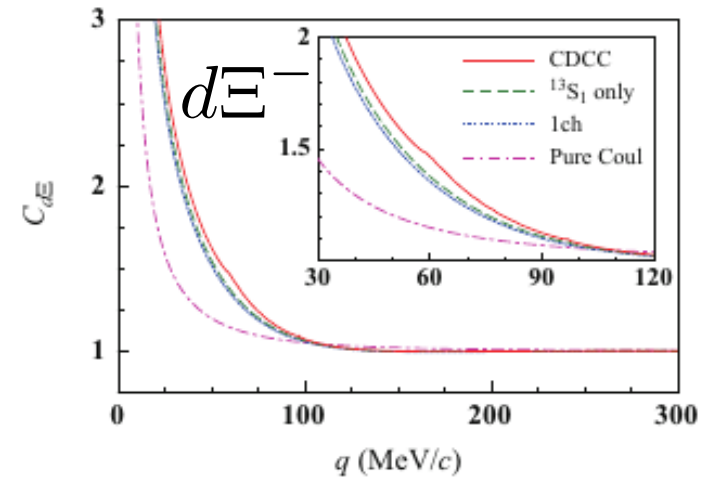
Morita+('16); K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, Y. Kamiya, AO, PRC101('20), 015201 (Editors' Suggestion).



Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, AO, W. Weise, PRL124('20)132501



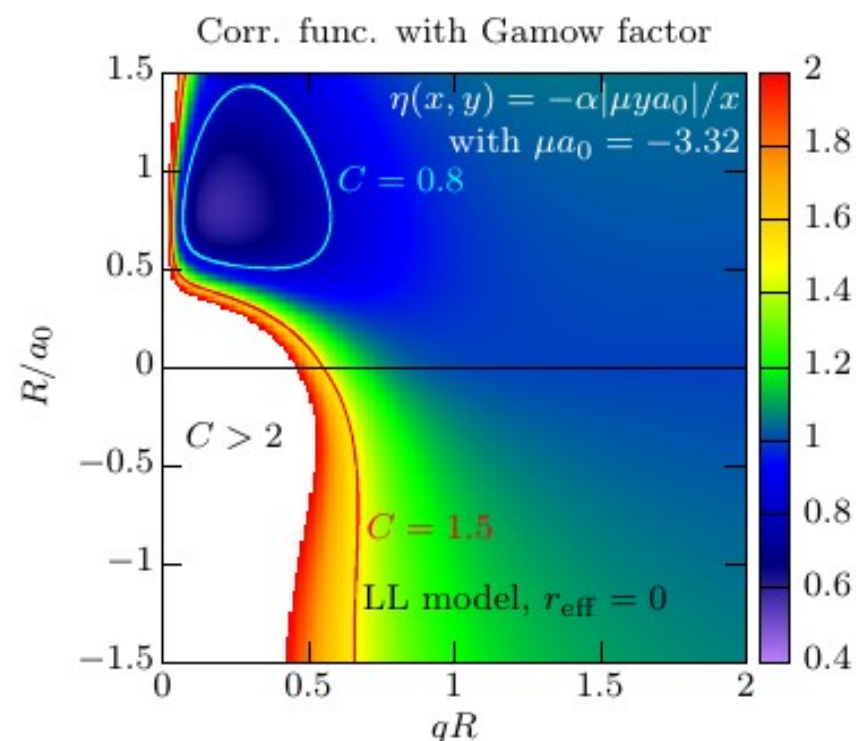
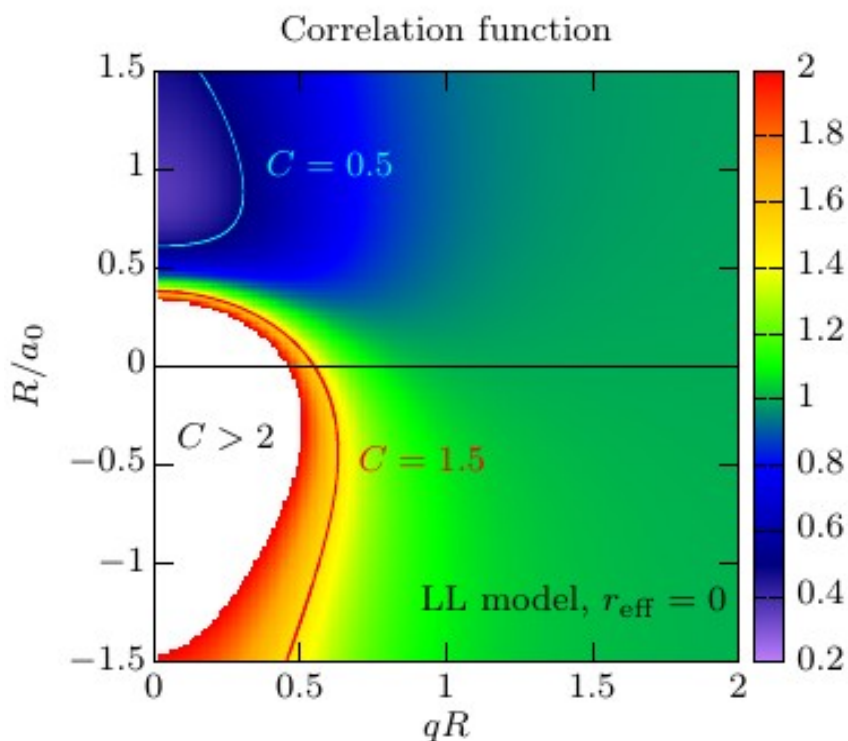
Hatsuda+('17); Y. Kamiya, K. Sasaki, T. Fukui, T. Hyodo, K. Morita, K. Ogata, A. Ohnishi, and T. Hatsuda, arXiv:2108.09644.



K. Ogata, T. Fukui, Y. Kamiya, AO, PRC103 ('21), 065205.

面白い点

- 様々な種類のハドロン間相互作用について実験から情報が得られる
- pp 衝突と AA 衝突からの相関関数から、束縛状態 (ハドロン分子状態) の有無について推定できる
- 重イオン研究者とハドロン研究者の橋渡しができる



これからの研究 (予定)

■ Charm を含むハドロン間相互作用

- 実験で測定が予定されている。

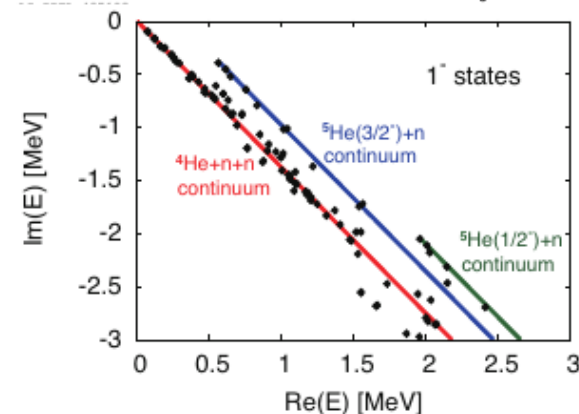
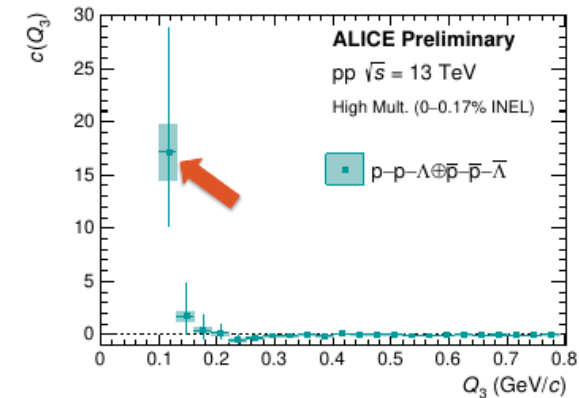
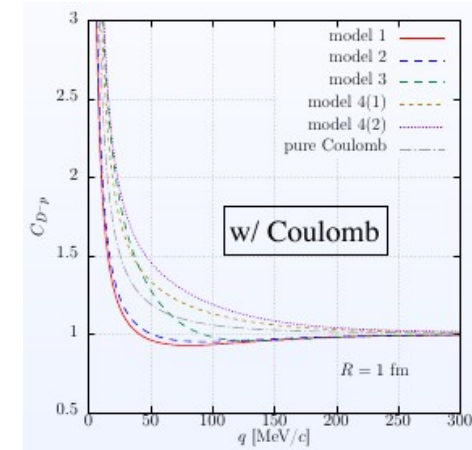
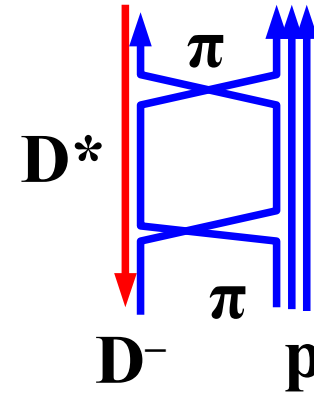
$$D^- p, D^+ p, DK, \bar{D}K, \dots$$

- これまでに相互作用の実験的情報は皆無 (励起状態のエネルギーと幅を除く)

- 2π 交換など引力を生み出す機構の実験的検証

■ 3 体相関関数

- 実験で測定され始めた。
- ハイペロンパズルを解く上で鍵となる
3 体力についての情報が得られる可能性あり。
- クーロン力を含む 3 体連続状態の波動関数を計算する必要あり。複素スケーリング?
(一からの枠組構築となります。)



有限密度 QCD

■ 有限温度・密度 QCD 物質の状態方程式と相図

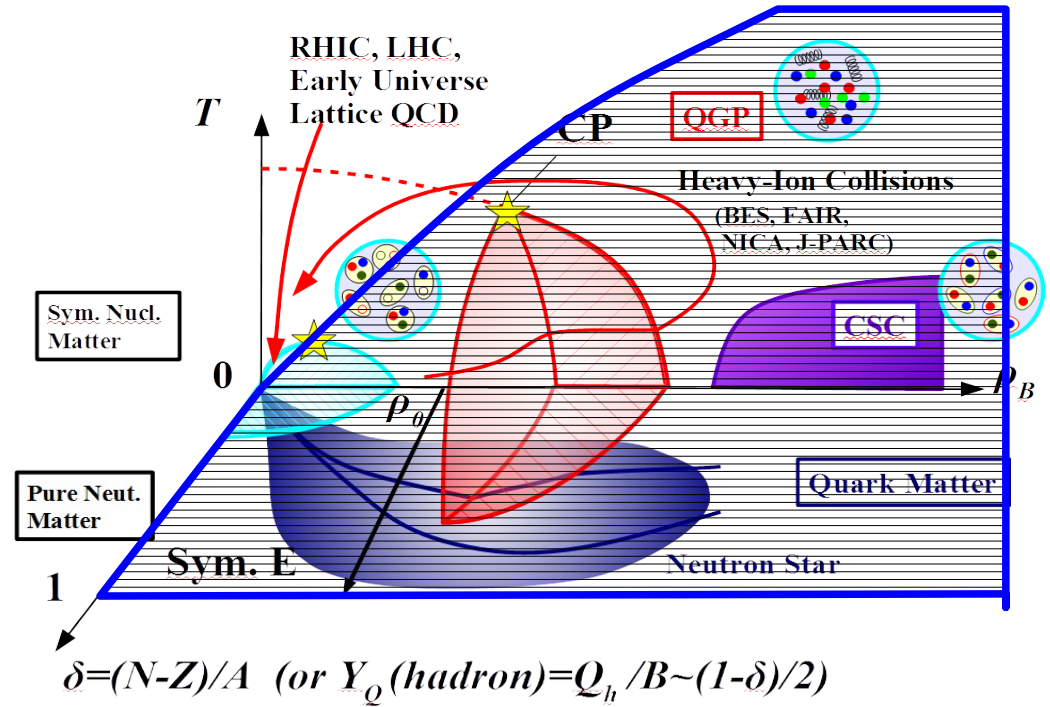
- 原子核、重イオン衝突、中性子星、中性子星合体 ... などで重要
- 有限密度では符号問題のため格子 QCD での正確な計算が困難

$$\det D(\mu) = (\det D(-\mu^*))^* \rightarrow S_{\text{eff}} = S_{\text{boson}} - \log \det D \in \mathbb{C}$$

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}x e^{-S(x)}, |\mathcal{Z}| \ll \mathcal{Z}_{\text{pq}} = \int \mathcal{D}x |e^{-S(x)}| \quad (\text{at large } V)$$

■ 符号問題へのアプローチ

- 変数の複素化を利用する
手法開発が活発
複素ランジュバン法、
レフシェッツ・シンプル法、
経路最適化法



Approaches to the Sign Problem

■ Standard approaches

- Taylor exp., Imag. μ (Analytic cont. / Canonical), Strong coupling

■ Integral in Complexified variable space

- Lefschetz thimble method

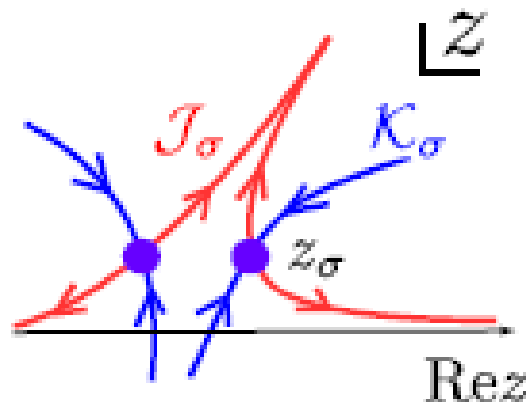
Witten ('10), Cristoforetti+ (Aurora) ('12), Fujii+ ('13), Alexandru+ ('16).

- Complex Langevin method

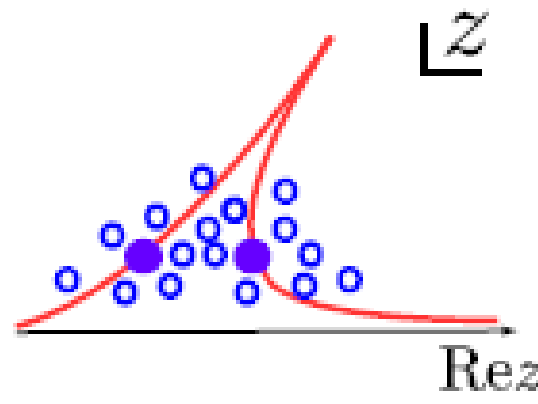
Parisi ('83), Klauder ('83), Aarts+ ('11), Nagata+ ('16); Seiler+ ('13), Ito+ ('16).

- Path optimization method

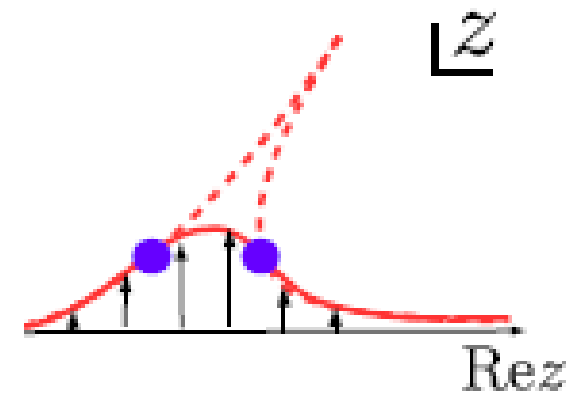
Mori, Kashiwa, AO ('17,'18,'19); Kashiwa, Mori, AO ('18,19); AO, Mori, Kashiwa ('18,'19); Namekawa, Kashiwa, AO, Takase ('21); Alexandru+('18), Bursa, Kroyter ('18)



Lefschetz thimble



Complex Langevin

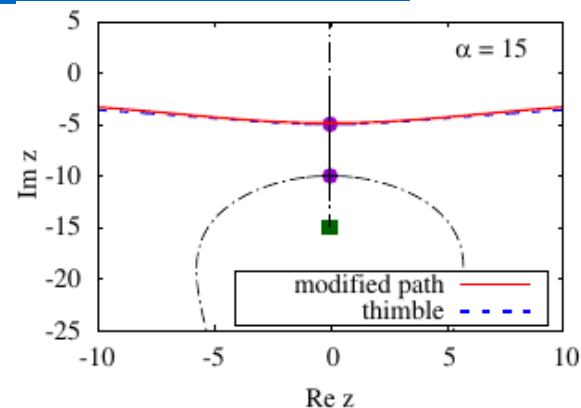


Path Optimization

これまでの成果

■ 振動関数の1次元積分 *Y.Mori, K. Kashiwa, AO ('17)*

- 経路最適化法の提案 $\mathcal{Z} = \int dx (x + i\alpha)^p e^{-x^2/2}$



■ 1+1次元スカラー場理論 *Mori, Kashiwa, AO ('18)*

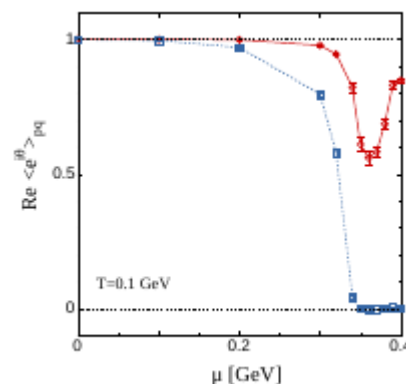
- ニューラルネットワークによる最適化

■ 0+1次元有限密度 QCD *Mori, Kashiwa, AO ('19)*

- ゲージ理論への適用

■ カイラル有効模型

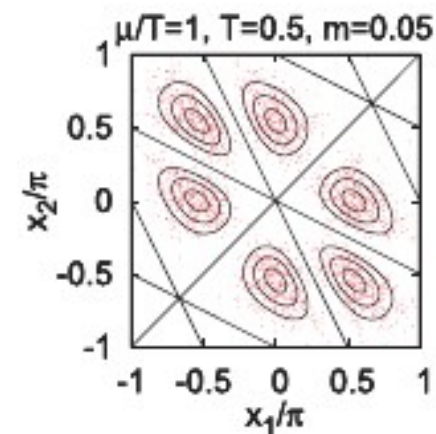
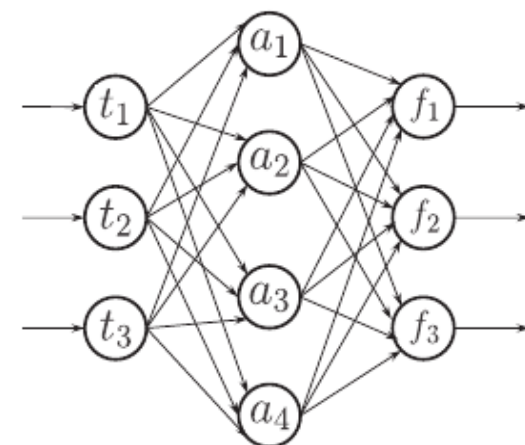
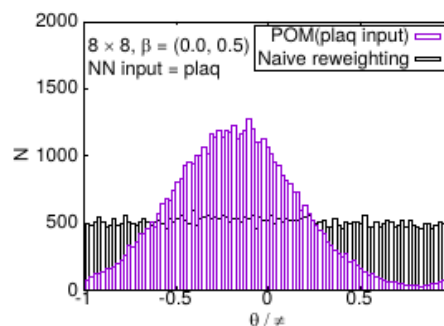
- 相転移近辺での振る舞い



■ 1+1D U(1) ゲージ理論

Namekawa, Kashiwa, AO, Takase ('21)

- ゲージ不変量入力により最適化が進む



これからの研究 (予定)

■ 対称性を尊重した経路最適化による 3+1D での場の理論

● ゲージ不変量入力

plaquette のみ (大きな格子では不十分)

→ 大きなループの導入へ (滑川)

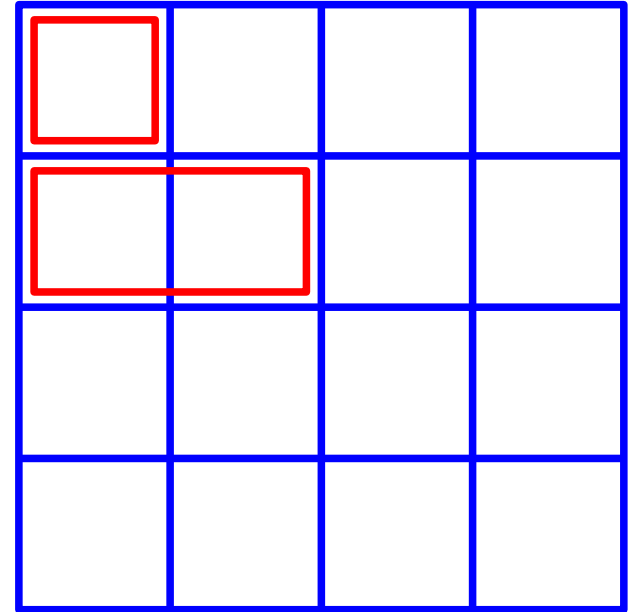
● 並進不変性を取り入れた

ニューラルネットワーク (Who?)

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots)$$

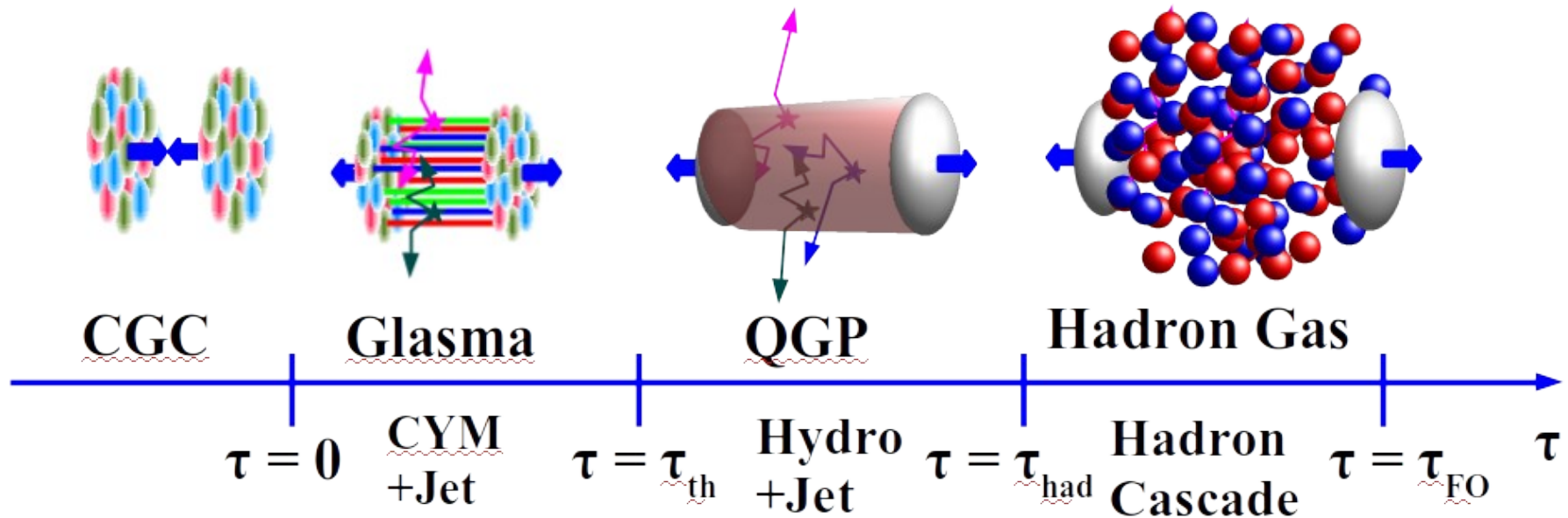
$$\rightarrow y_i = f(x_i, x_{i+\hat{1}}, x_{i-\hat{1}}, \dots)$$

● 実時間発展による有限密度物質の配位生成 (後述)



重イオン衝突

- 高エネルギー重イオン衝突 → 多くのステージを経て終状態へ



- 初期条件：Color Glass Condensate (CGC) から古典場発展
- QGP: 主要部 (コア) は流体力学、周縁部 (コロナ) は粒子的
- ハドロン化後：ハドロン輸送

理想的には、一つの枠組みで最初から最後まで。
実際には、ステージに適したモデルによる記述の組み合わせ。
→ 接続領域でも有効なモデル開発が必要！

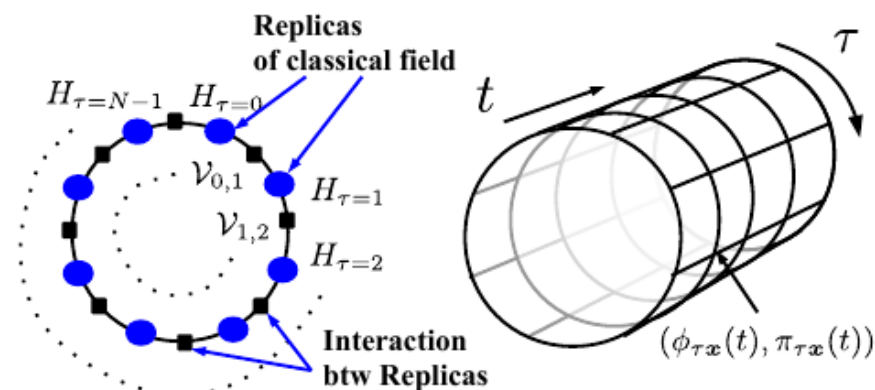
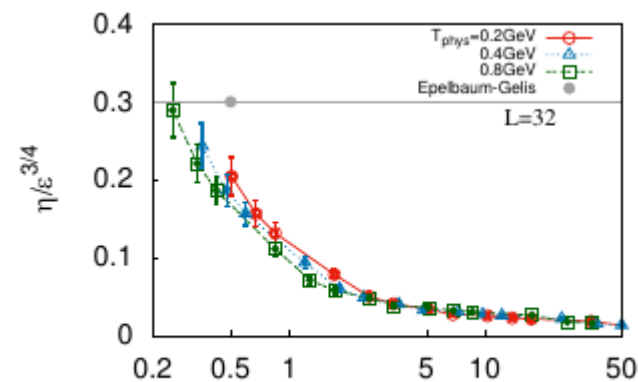
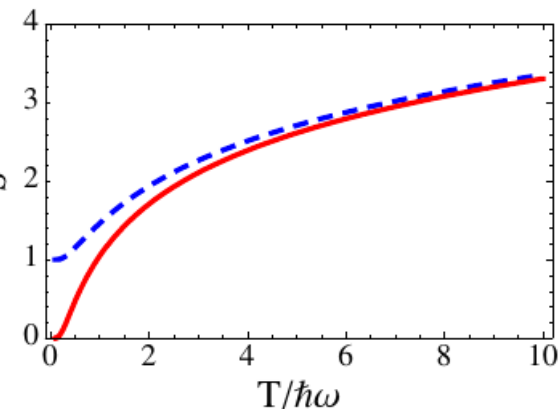
これまでの成果

■ ハドロン輸送模型

- AMD(低エネルギー) → JAM(中高エネルギー)
 - Ono+('92, AMD), Nara+('00, JAM), Isse+('05, JAM+MF), Ikeno+('16), Y. Nara, AO (arXiv:2109.07594)*

■ 古典場における熱化

- エントロピー生成・ずり粘性
 - Kunihiro+('09), Tsutsui+('15), Tsukiji+('18), Matsuda+('20,'20)*
- 量子平衡への緩和 (レプリカ発展法)
 - AO, H. Matsuda, T. Kunihiro, T. T. Takahashi ('21)*



$$\mathcal{H} = \sum_{\tau} H_{\tau} + \sum_{\tau} V_{\tau, \tau+1} = \frac{1}{2} \sum_{\tau, \mathbf{x}} \pi_{\tau, \mathbf{x}}^2 + \xi S[\phi]$$

$$Z_R = \int \mathcal{D}\pi \mathcal{D}\phi \exp(-\mathcal{H}/\xi) \propto \int \mathcal{D}\phi \exp(-S[\phi])$$

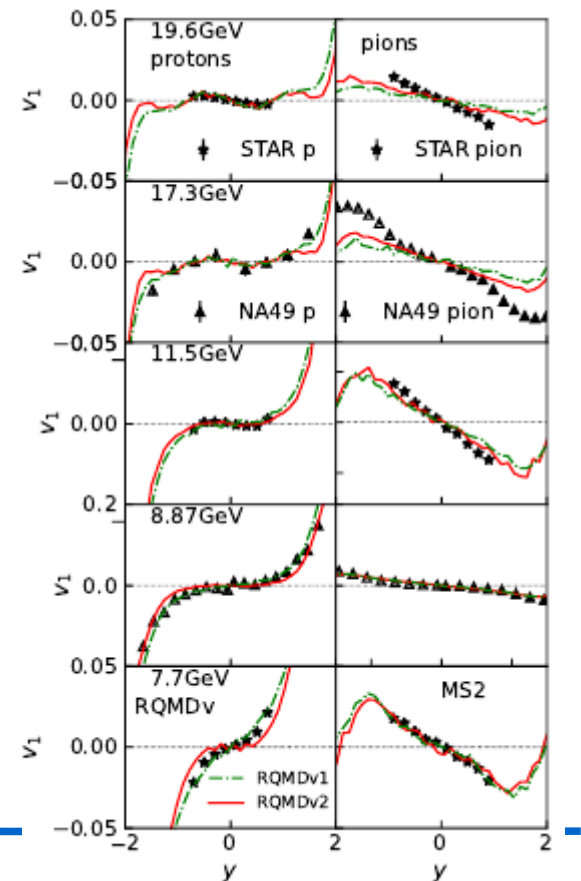
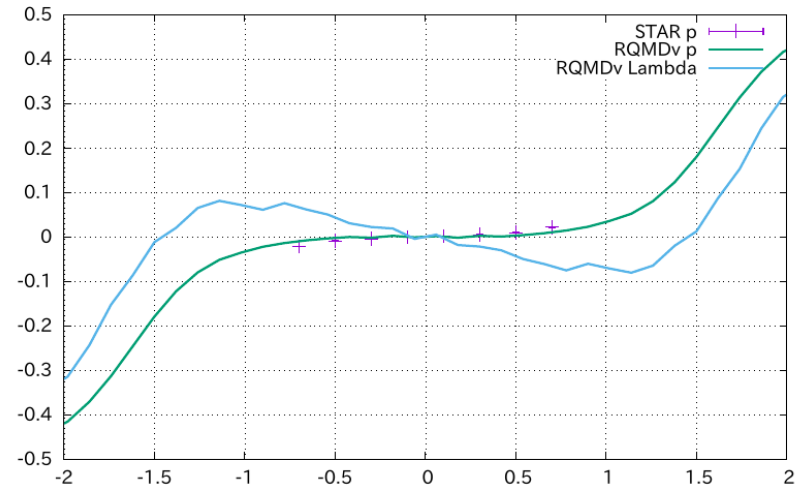
これからの研究 (予定)

■ ハドロン輸送 → ハイペロンパズル

- 核子と共通の平均場を入れると
 Λ の v_1 slope は負 (データは正)
→ 高密度側で核子より斥力的な
ポテンシャルが働いているはず

■ ヤンミルズ場の量子平衡への緩和

- レプリカ発展法のヤンミルズ場への適用
- 量子平衡への緩和時にエントロピーは？



コンパクト天体物質

■ ハイペロンを含むコンパクト天体物質 EOS

C. Ishizuka, AO, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi, S. Yamada ('08)

■ ユニタリーガス制限による対称エネルギーの制限

I. Tews, J. M. Lattimer, AO, E. E. Kolomeitsev ('17)

■ 今後の展開

- ハイペロンパズル、対称エネルギー研究の進展待ち

