

研究計画

京都大学基礎物理学研究所 大西 明

京都大学セミナー (2018/12/13)

高密度核物質の物理

重イオン衝突

輸送模型とその拡張による
フローの分析 → $(5-10)\rho_0$ での
1次相転移の可能性

径路最適化とニューラルネットワ
ークの組み合わせにより、符号問題に
対処できる可能性が出てきた。

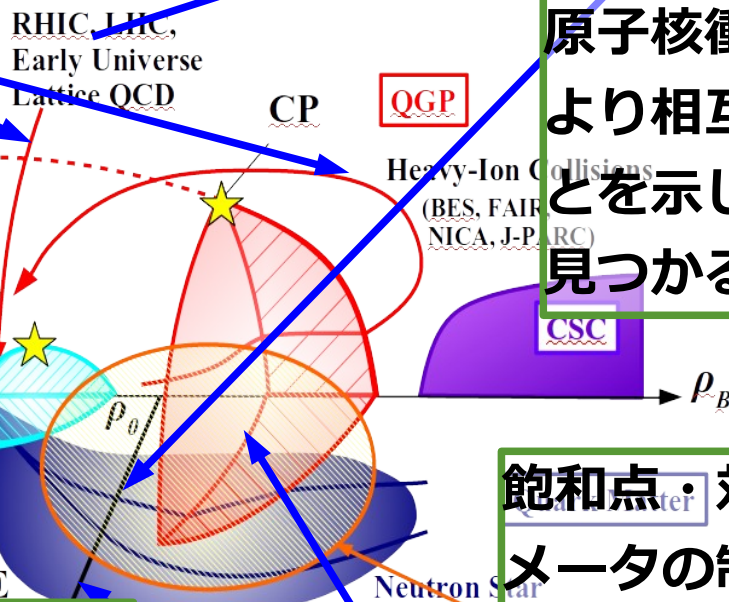
QCD 相図と符号問題

ストレンジネス核物理

原子核衝突からの粒子相関に
より相互作用が制限できるこ
とを示した。ダイバリオンが
見つかるかも。

飽和点・対称エネルギーパラ
メータの制限から得た EOS から
中性子星半径は $R_{1.4} = (10.6-
12.2)$ km と予想される。
NICER や次の BNSM に期待。

中性子星の物理



研究計画 (応募書類より)

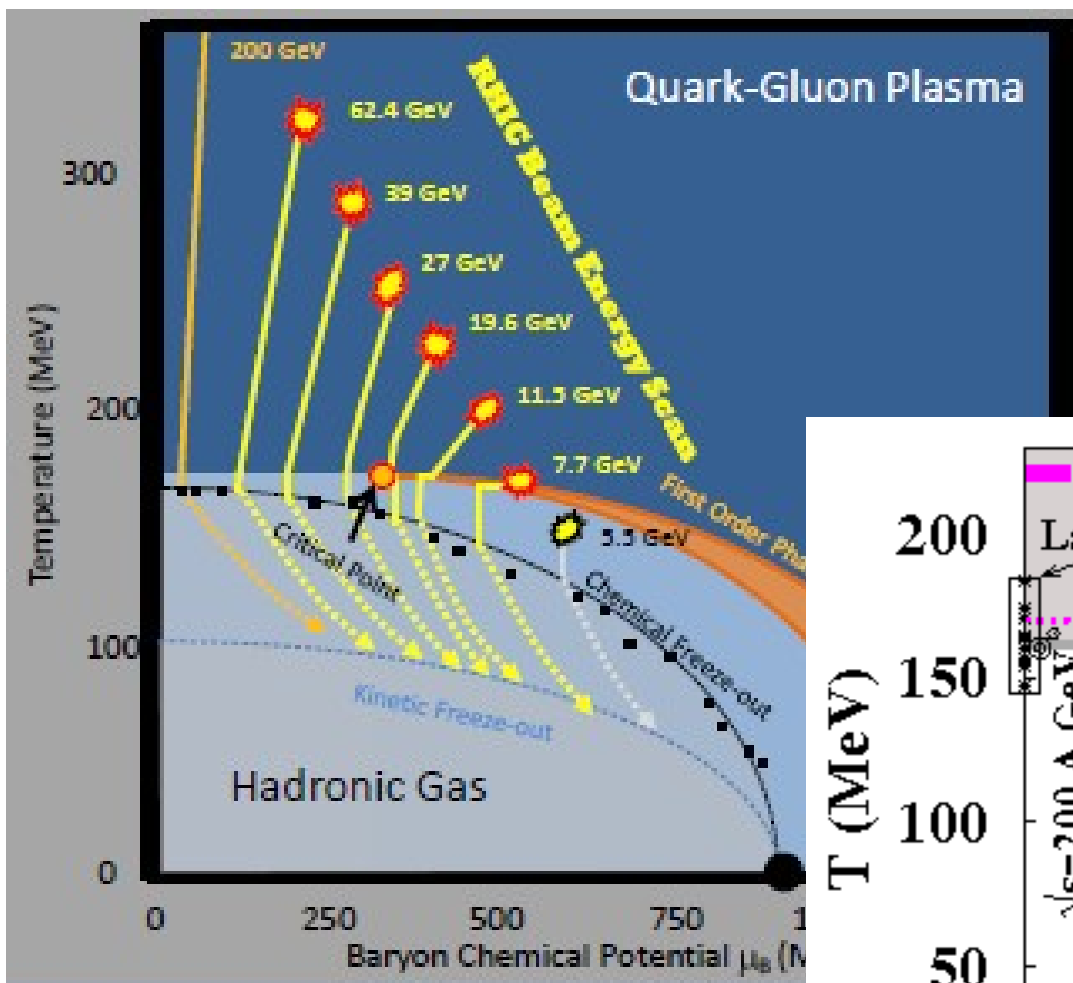
- J-PARC エネルギーの重イオン衝突と低密度 - 高密度状態方程式
- 2粒子相関からハドロン間相互作用へ
- 径路最適化法による有限密度 QCD の研究
- 古典場の熱化

大きな目標を一言でいえば、

「実験・観測に基づく 3次元 QCD 相図の決定を目指す」

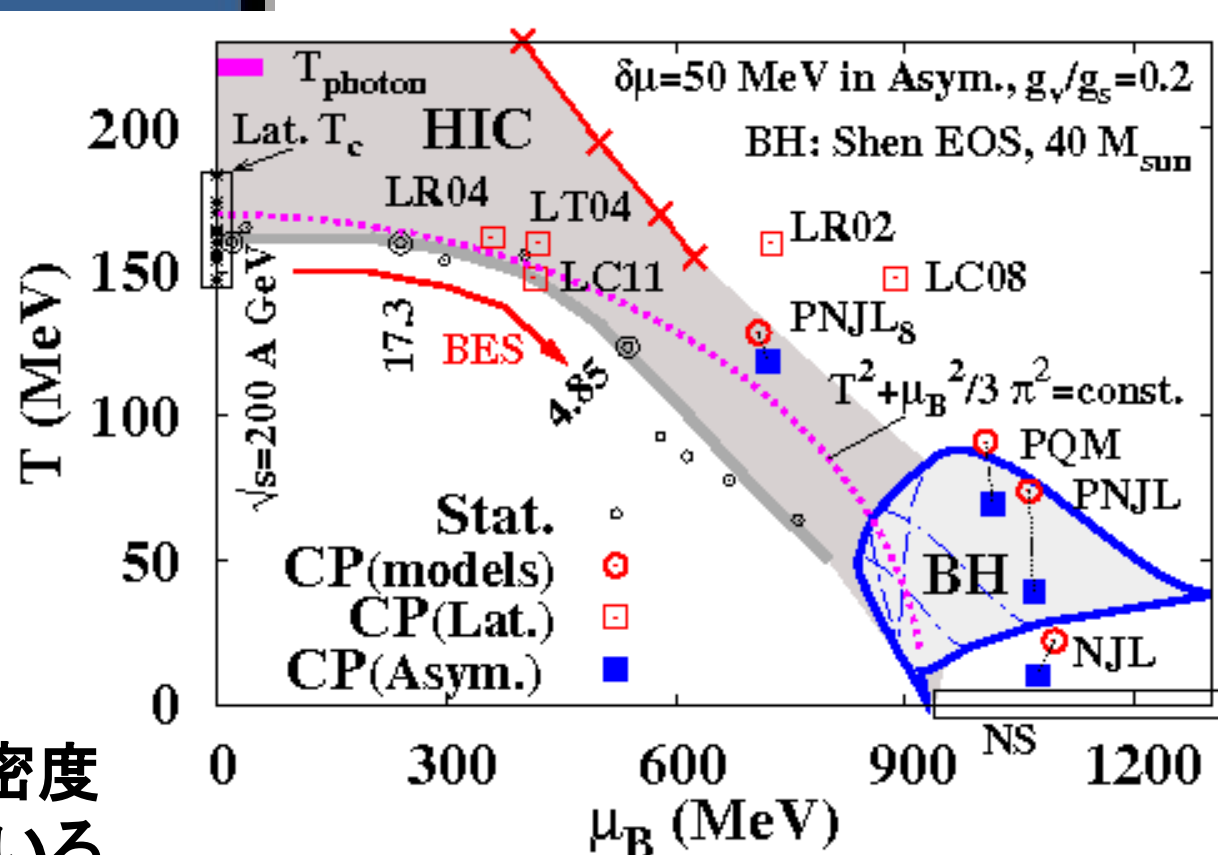
J-PARC エネルギーの重イオン衝突と 低密度 - 高密度状態方程式

QCD phase diagram (Exp. & Theor. Studies)



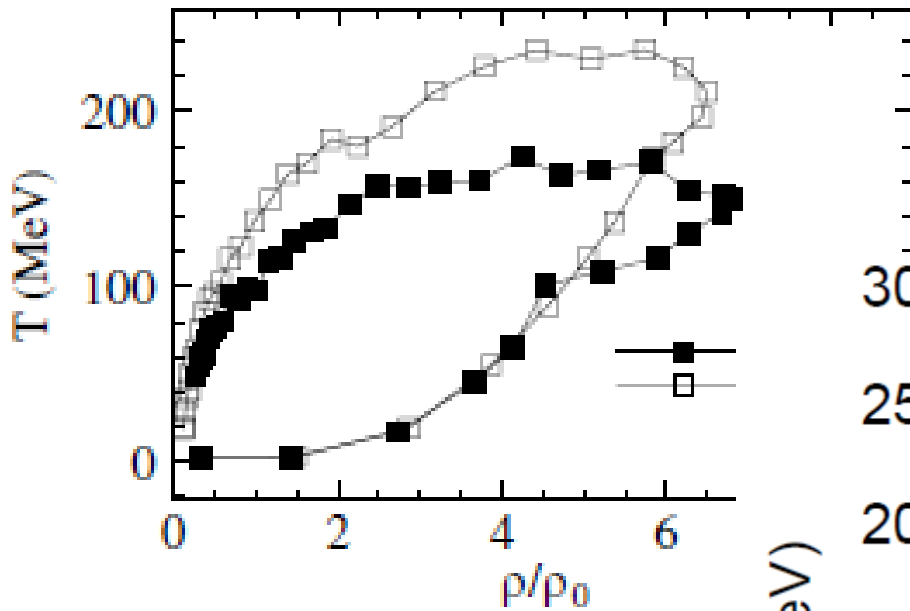
E.g. Odyniec ('12)

衝突エネルギーの減少 → 高密度
Freeze-out (T, μ) で見えている



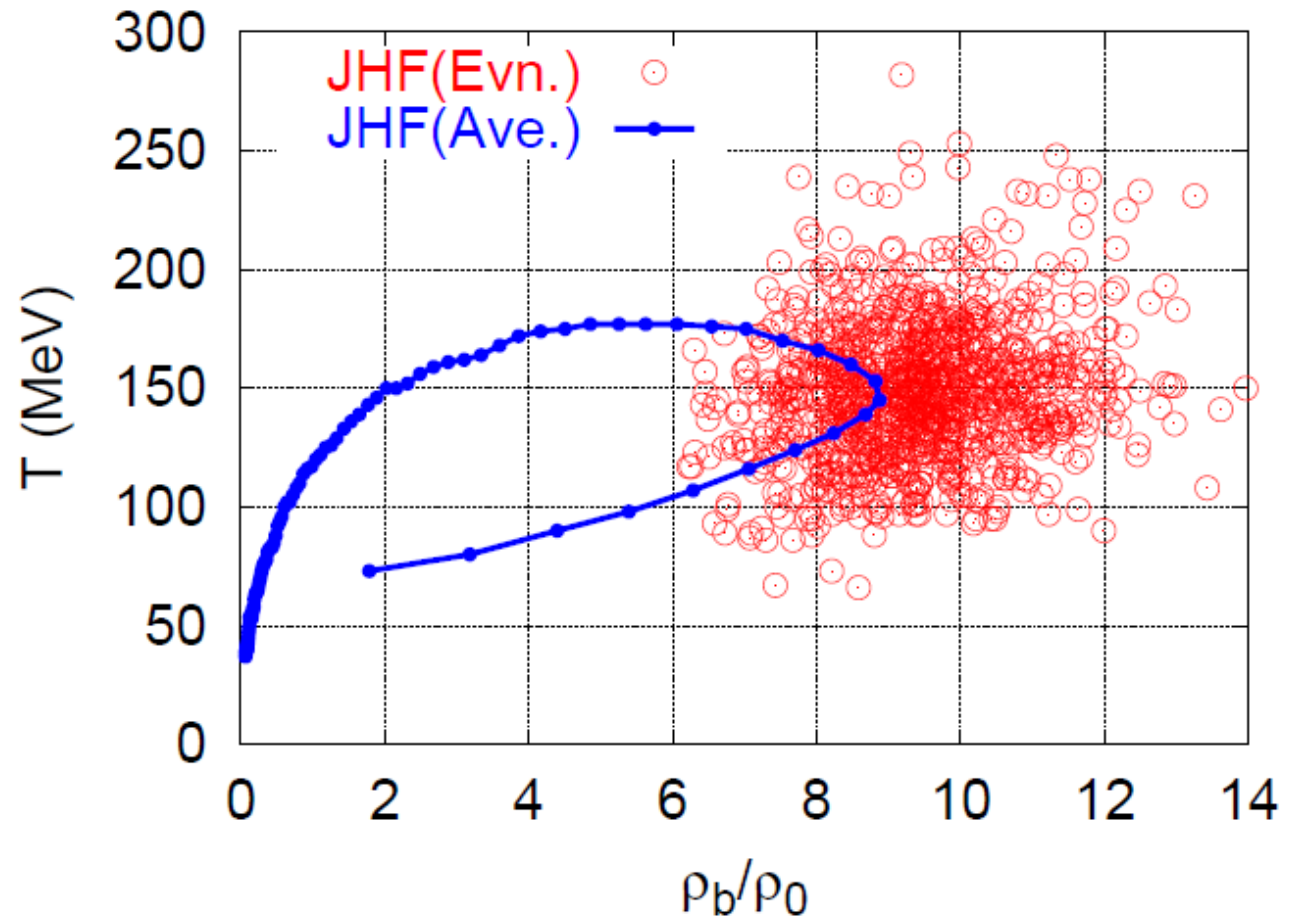
AO, PTPS 193('12)1

Highest Density Matter at J-PARC ?



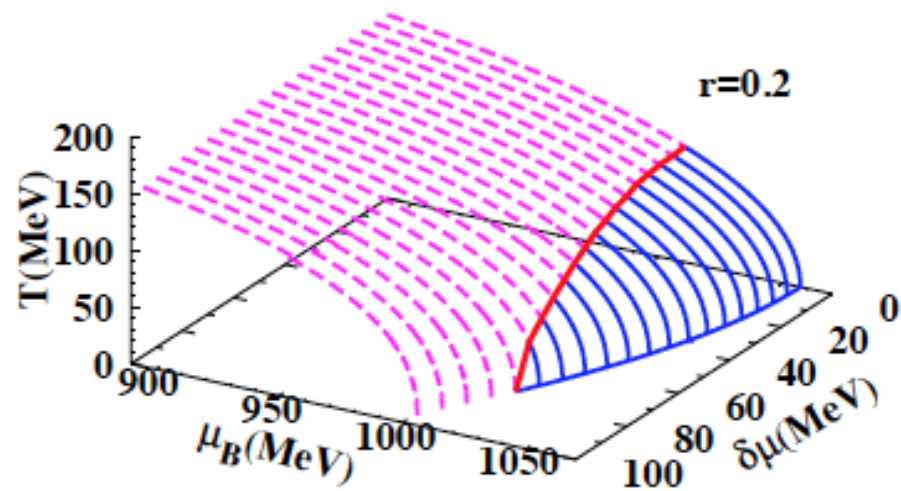
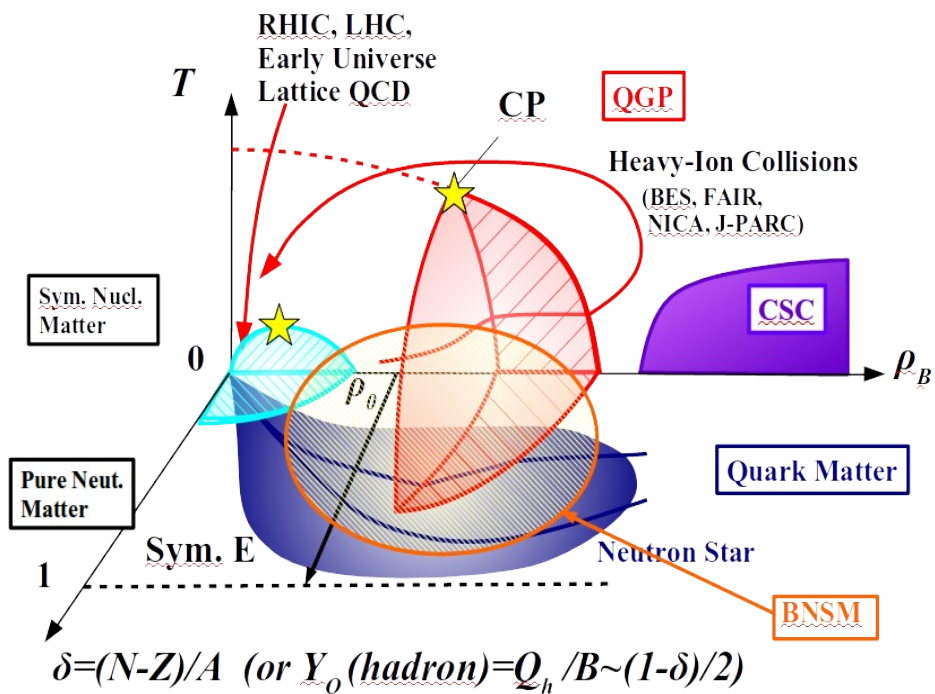
*Nara, Otuka, AO,
Maruyama ('97)*

*AO, JHF workshop ('02);
J. Phys. Conf. Ser. 668 ('16)012004*

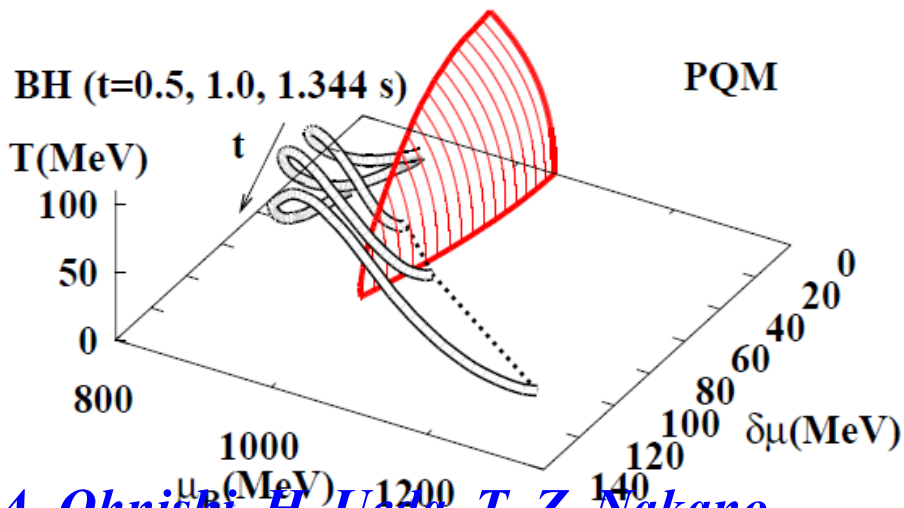


Central 1 fm³ cube.

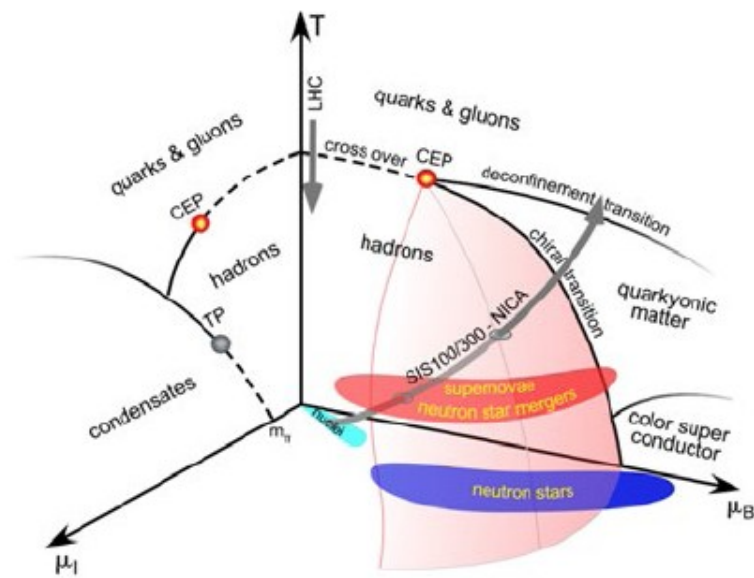
3次元 QCD 相図



H. Ueda, T.Z. Nakano, A.O., M. Ruggieri, K. Sumiyoshi, PRD88('13), 074776

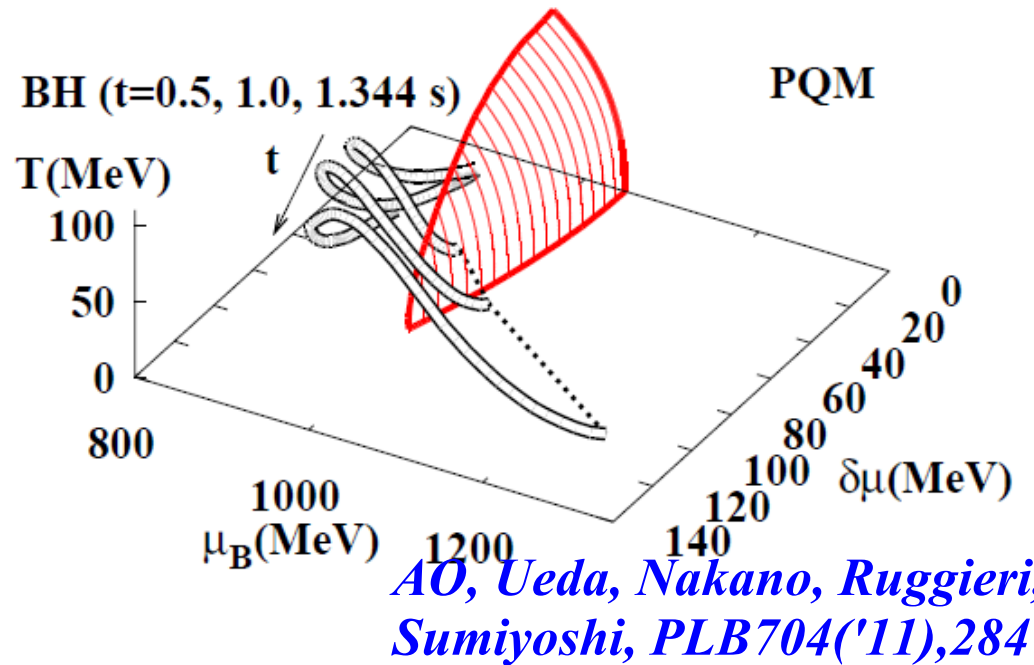
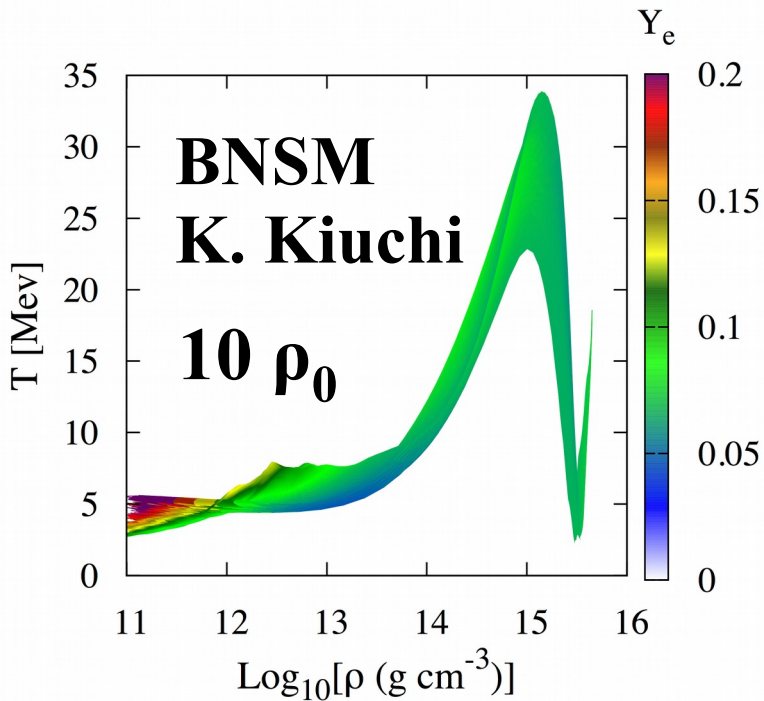
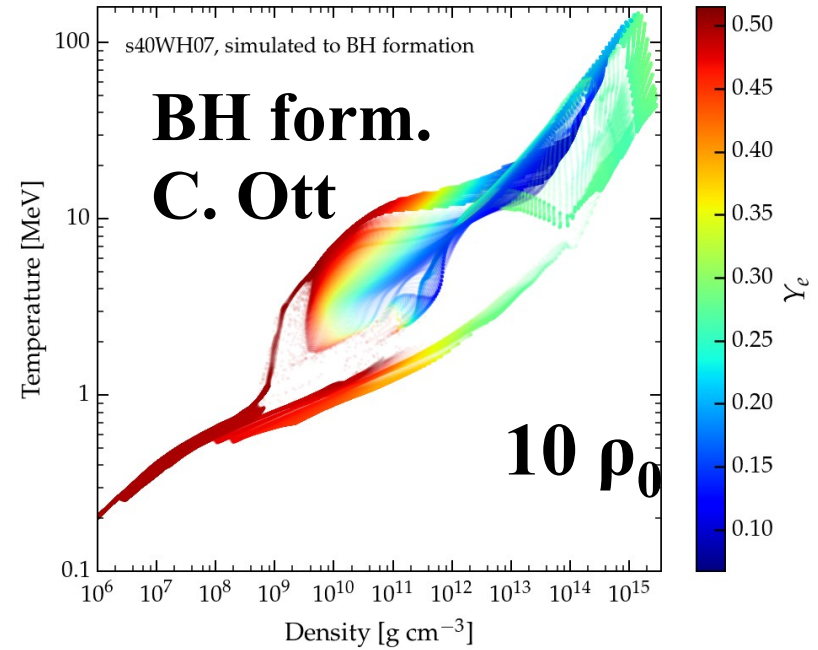
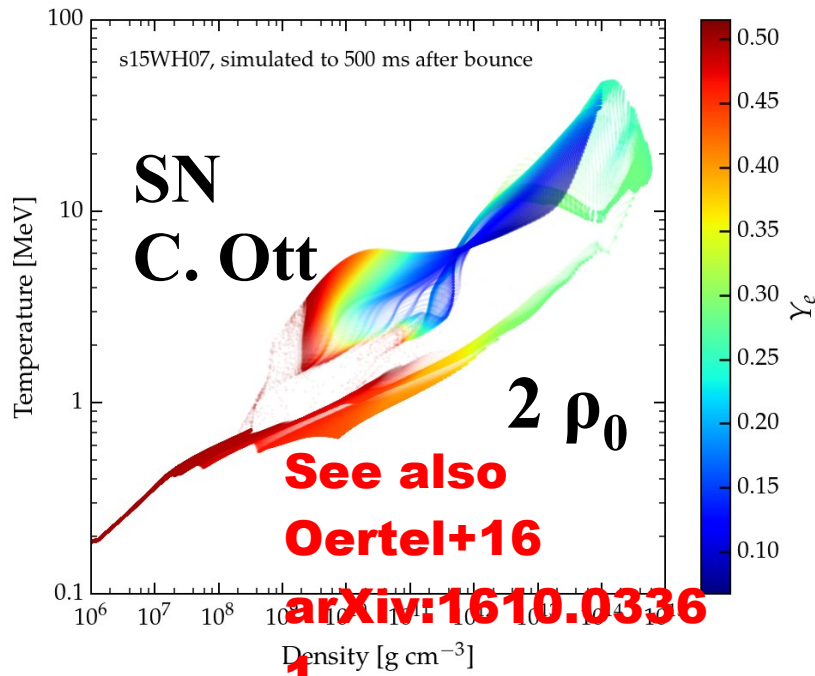


A. Ohnishi, H. Ueda, T. Z. Nakano, M. Ruggieri, K. Sumiyoshi, PLB704 ('11), 284



NuPECC, Long Range Plan 2017

(ρ, T, Y_e) during SN, BH formation, BNSM



重イオン衝突とコンパクト天体現象

■ 重イオン衝突からの示唆

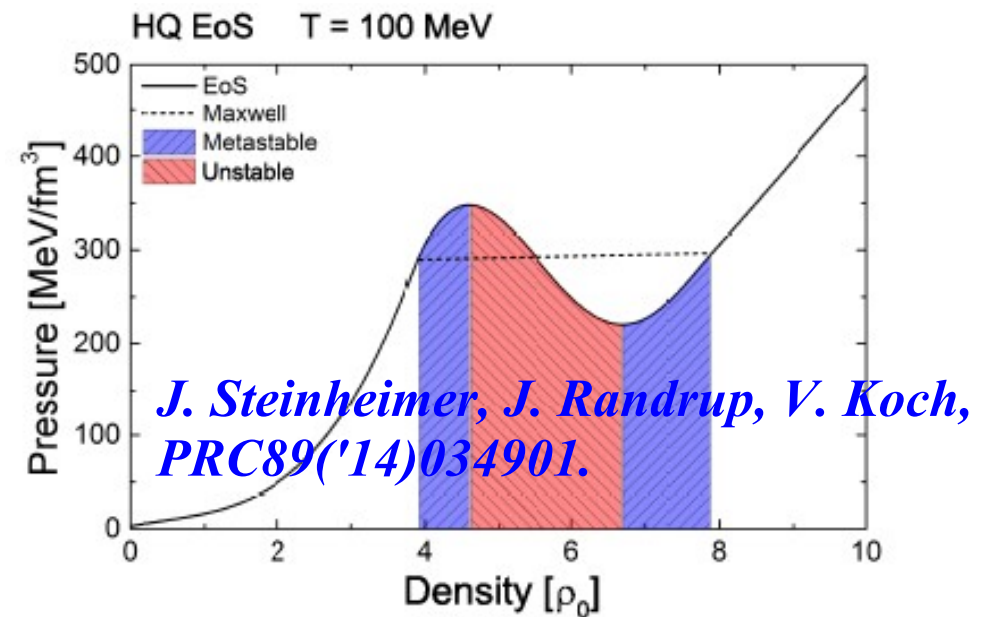
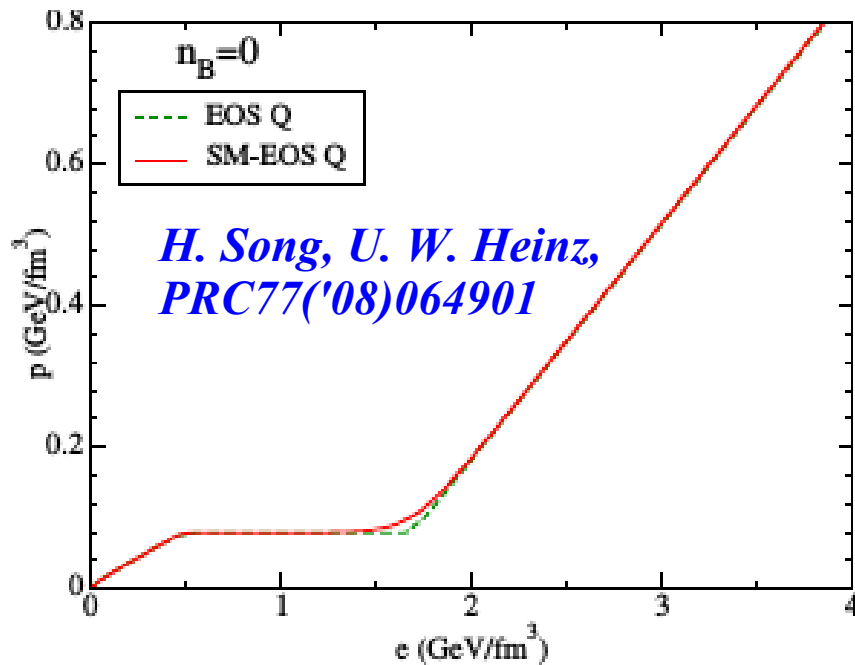
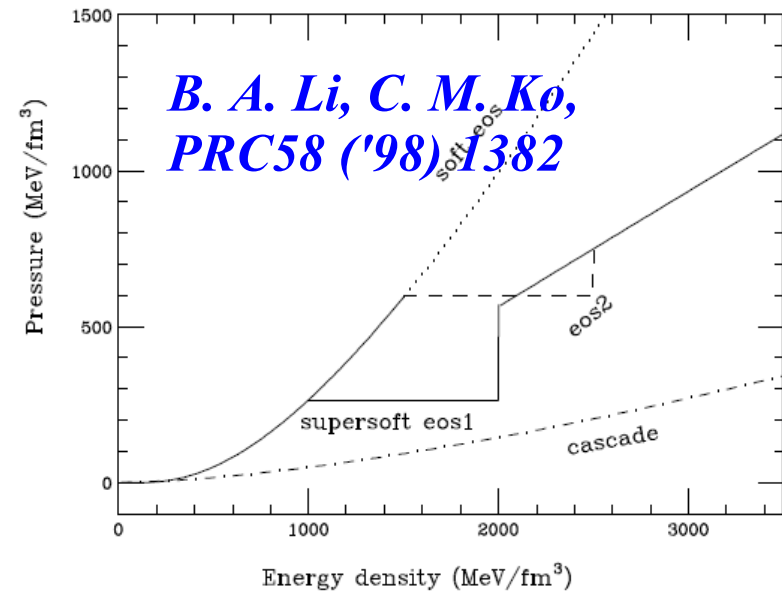
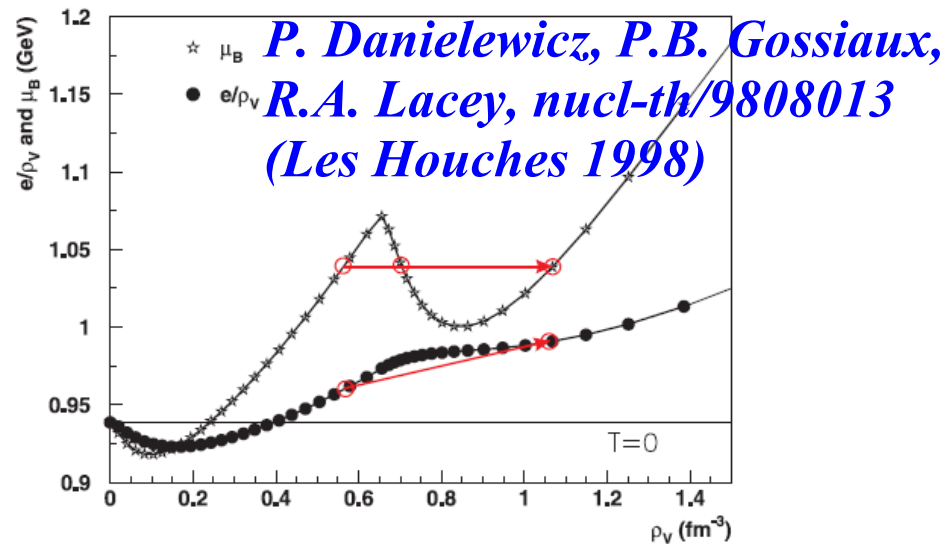
- (ほぼ) 対称核物質では $(5-10)\rho_0$ において相転移がありそう。
- ただし使われている EOS は低密度にしか使えないものが多い

■ コンパクト天体現象

- 超新星爆発では $2\rho_0$, 中性子星コアは $5\rho_0$ 程度、ブラックホール形成・中性子星合体では $10\rho_0$ 程度にまで達する
- 低温での中性子過剰物質の状態方程式の制限はついてきた。

核物質の飽和性・対称エネルギーを正確に表し、
対称中性子星の質量・半径条件を満たし、
低密度では格子 QCD からの EOS に漸近する
低密度 - 高密度状態方程式を作り、
実験・観測と比べていく段階！

QCD 一次相転移に伴う EOS の softening



Previous analyses: $\rho_B = (3-10) \rho_0$, $P = (80-700) \text{ MeV/fm}^3$

低密度 - 高密度状態方程式

■ 現在使われている EOS

- 高温・低密度: ハドロン共鳴ガス (HRG) から格子 QCD EOS に接続
- 低温・高密度: 様々な理論 EOS

■ 低密度 - 高密度状態方程式

= 低温でのフェルミ運動量展開 EOS から HRG EOS に接続し
QCD 相転移を導入

- Non-Rel. 運動エネルギーを相対論的な表式に置き換える
- 核子以外のハドロンポテンシャルを中性子星の性質を満たすよう導入 (ハイペロンパズル)
- 臨界点の埋め込み (浅川・野中)、または関数系での接続により QCD 相転移を導入

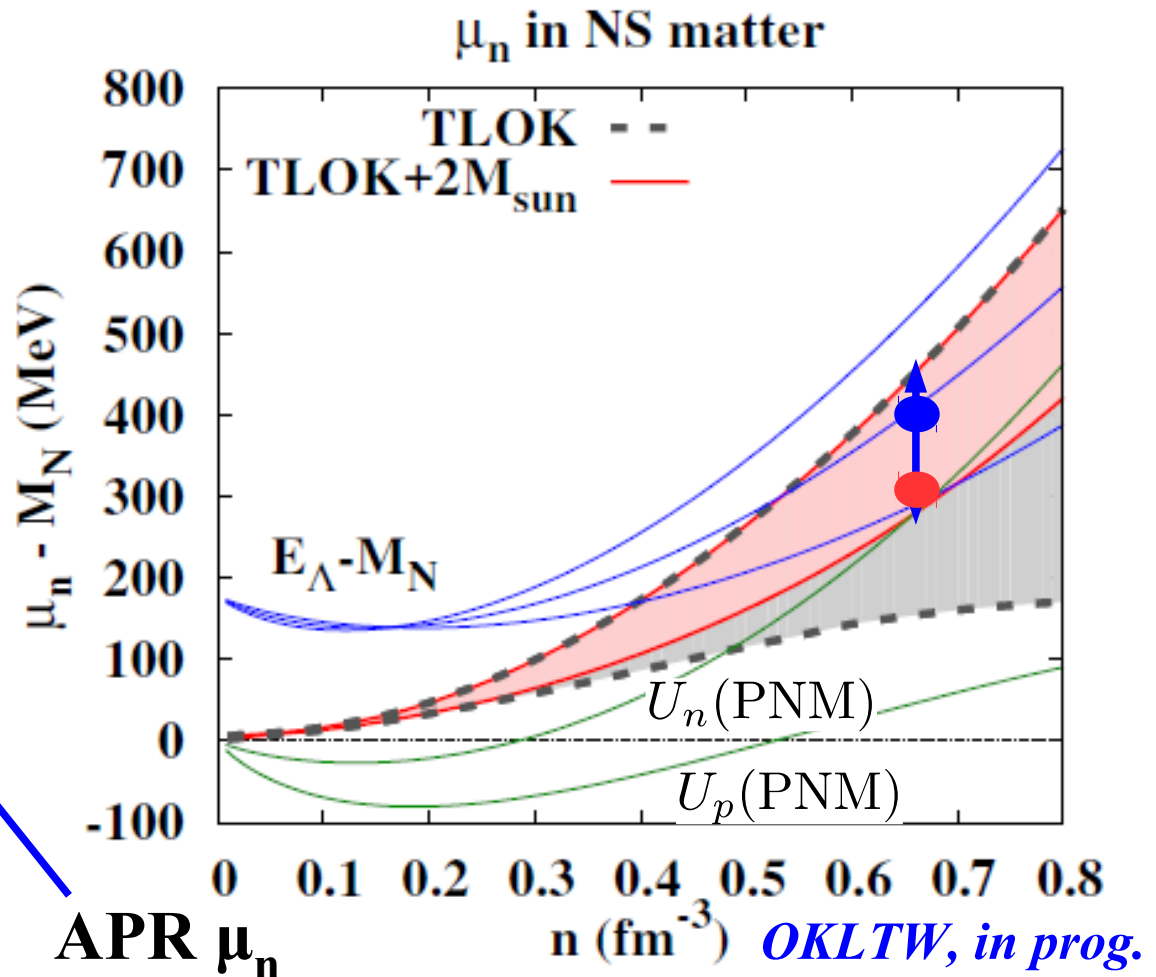
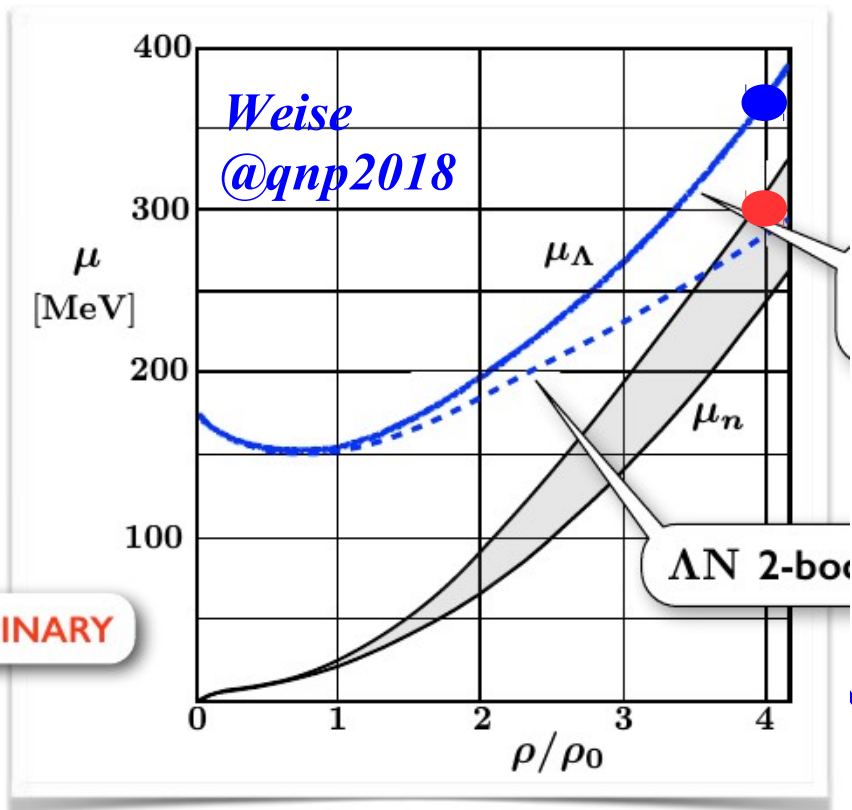
■ 用いる動的模型

= J-PARC-HI 理論グループで開発している統合模型

*Y. Akamatsu, M. Asakawa, T. Hirano, M. Kitazawa, K. Morita,
K. Murase, Y. Nara, C. Nonaka, AO, PRC98('18)024909*

Neutron Chemical Potential in NS

- Λ appears in neutron stars if $E_{\Lambda}(p=0) = M_{\Lambda} + U_{\Lambda} < \mu_n$
- U_{Λ} in χ EFT (2+3 body) is stiff.
- But μ_n is larger with TLOK+ $2M_{\odot}$ constraints



*W. Weise, NFQCD2018 (2018.06);
Gerstung, Kaiser, Weise, in prog.*

Neutron Chemical Potential in NS

Neutron Chemical Potential

$$\mu_n + M_N = \frac{\partial(nE)}{\partial n_n} = E + u \frac{\partial E}{\partial u} + 2\alpha(1 - \alpha)S(u)$$

Single particle potential

$$U_\Lambda(u) = \frac{\partial(nV)}{\partial n_\Lambda}$$

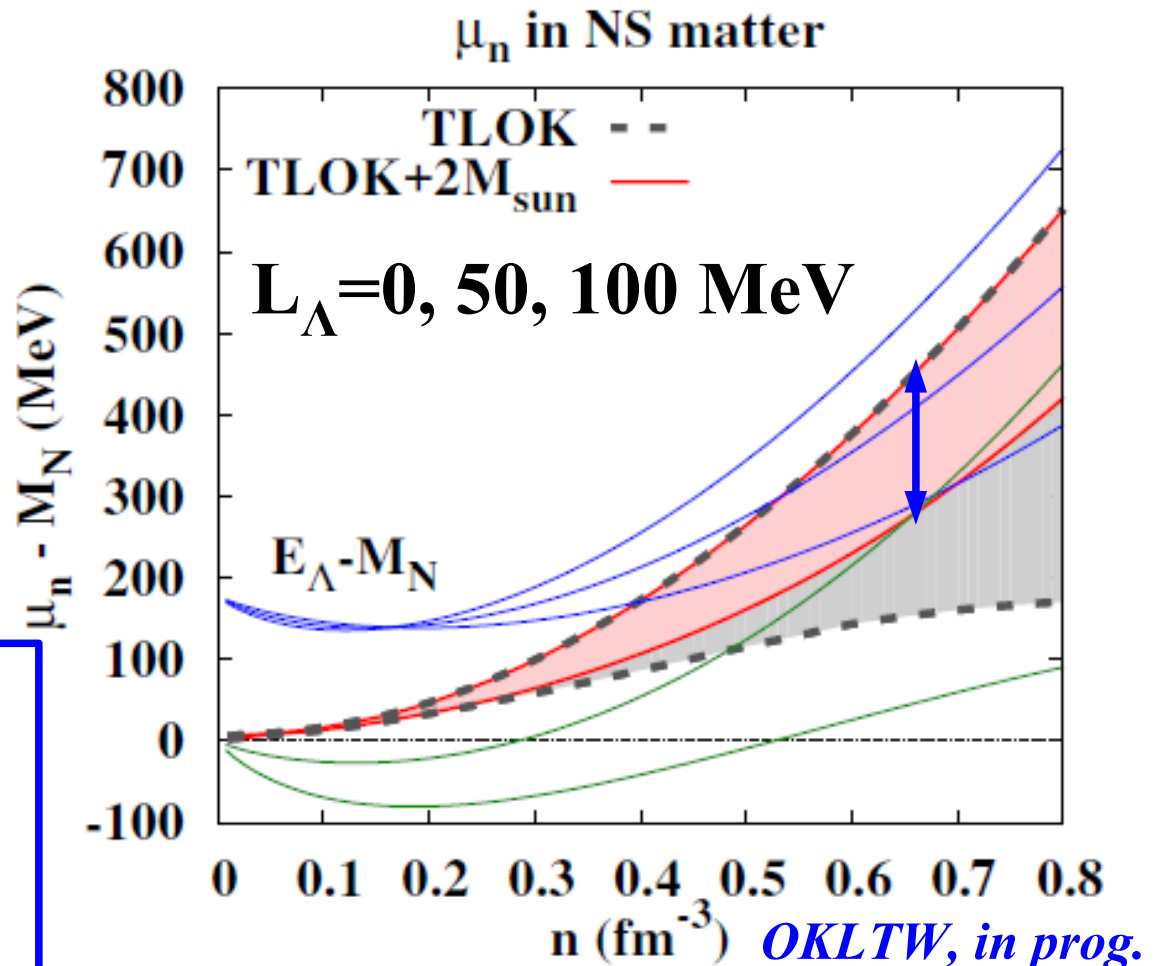
$$\simeq U_{0\Lambda} + \frac{L_\Lambda}{3}(u - 1)$$

$$U_{0\Lambda} \simeq -30 \text{ MeV}$$

$$L_\Lambda = ???$$

($L_\Lambda < 0$ in most of RMF before 2010)

Sym. E. and L_Λ determine the onset density of Λ . (Already mentioned in Millener, Dover, Gal paper)



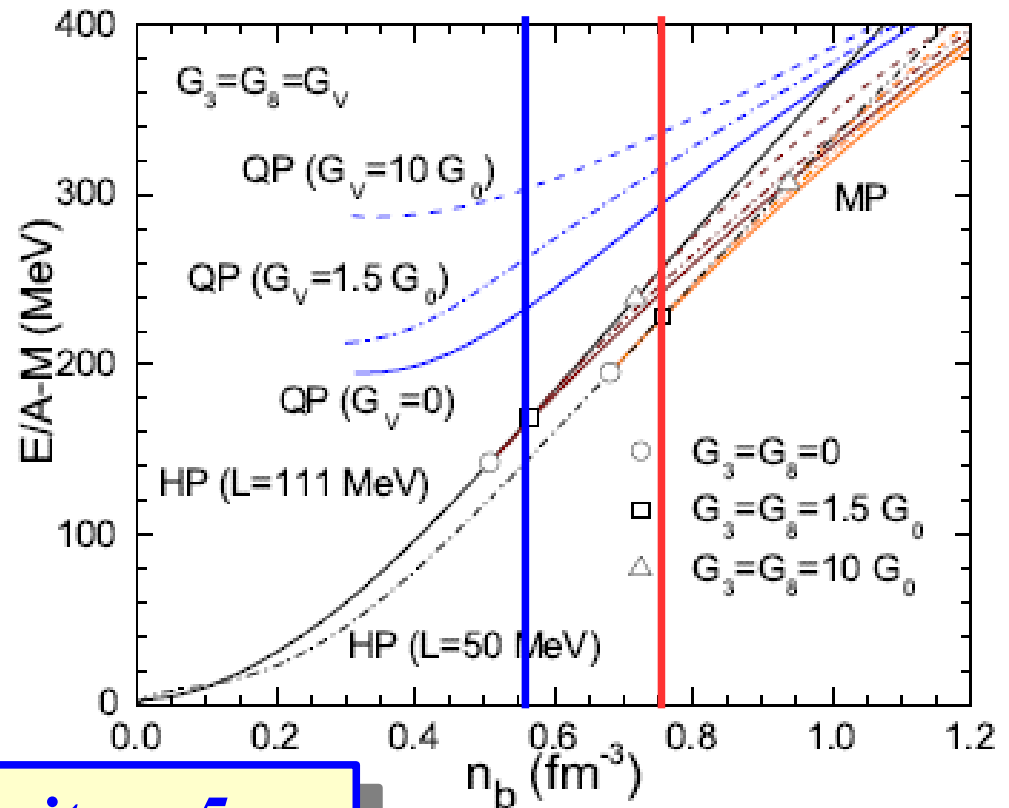
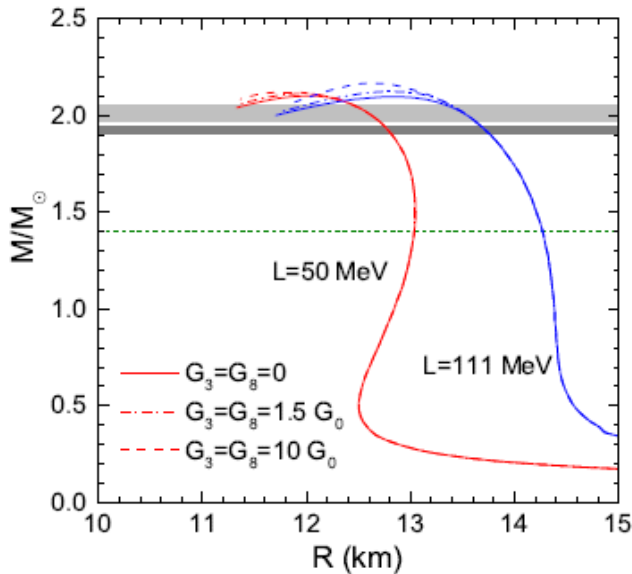
Isospin & Hypercharge Sym. E in quark matter

- Two types of vector int. in NJL \rightarrow Isospin & Hypercharge Sym. E

X.Wu, AO, H.Shen, PRC to appear (arXiv:1806.03760)

$$\mathcal{L}_v = -G_0(\bar{q}\gamma_\mu q)^2 - G_v \sum_i [(\bar{q}\gamma_\mu \lambda_i q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5 \gamma_\mu \lambda_i q)^2]$$

$$E = \alpha^2 S(n) + \alpha_Y^2 S_Y(n), \quad \alpha = -2\langle T_z \rangle / B, \quad \alpha_Y = \langle B + S \rangle / B$$



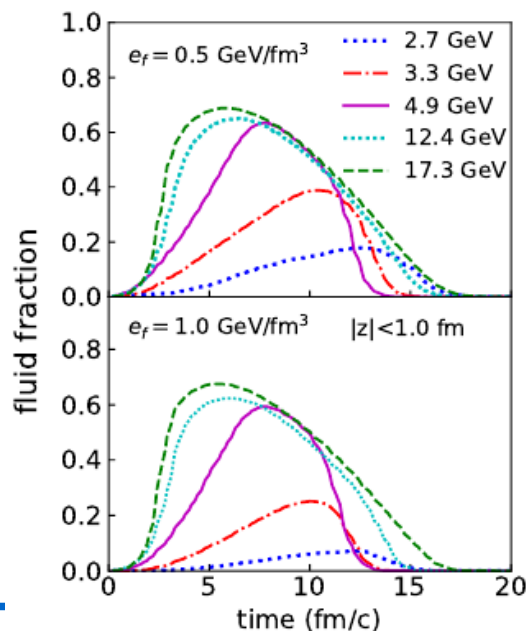
$L=50$ MeV \rightarrow transition density $\sim 5 n_0$

Dynamically Integrated Transport Approach

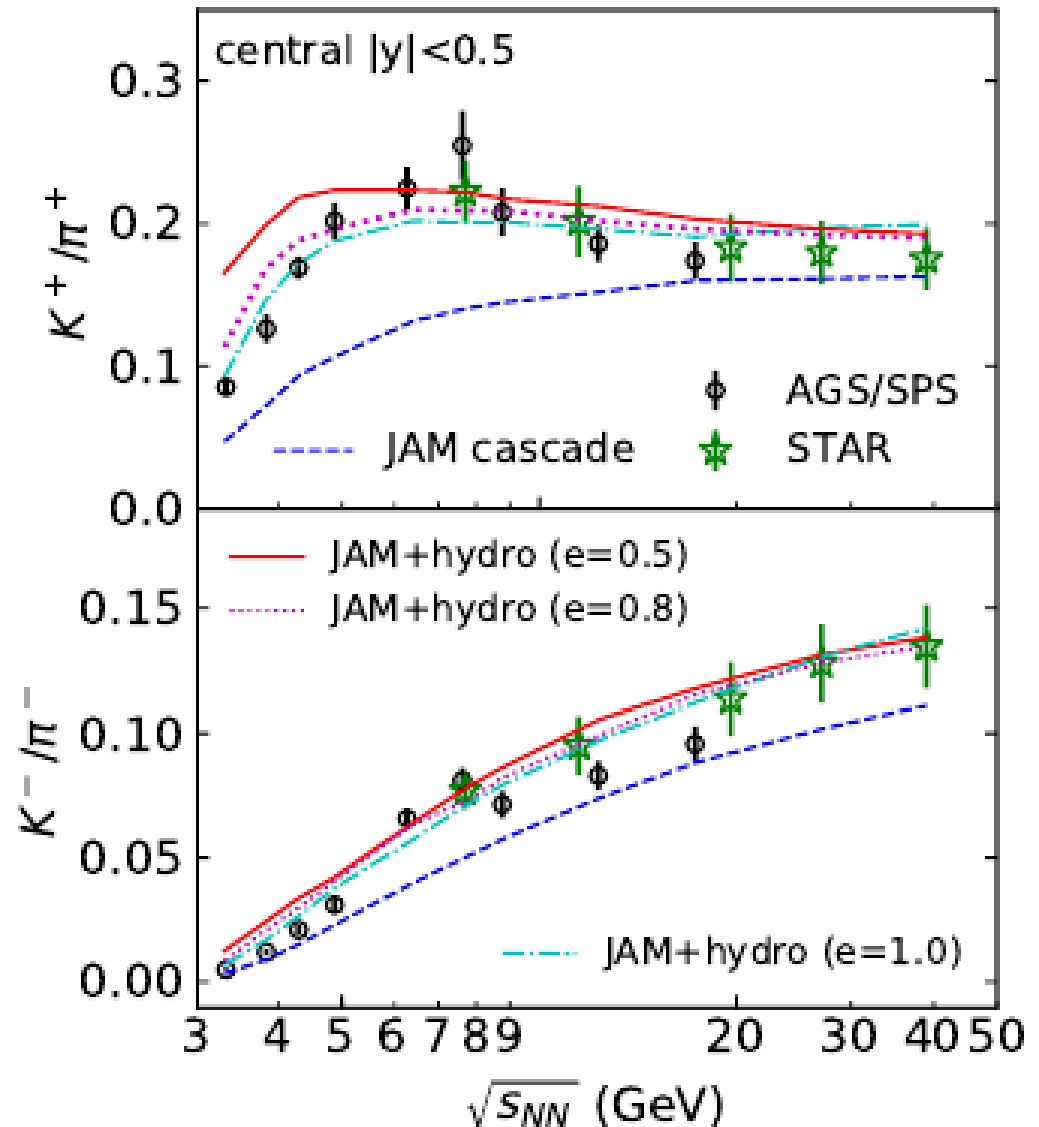
■ 流体モデルと粒子シミュレーションを同時に解く

- エネルギー密度がしきい値を超えると粒子を流体に変換
- 粒子のエネルギー損失は流体のソース項として考慮
- エネルギー密度が下がると流体を粒子に変換

■ ストレンジネスを持つ粒子の生成量が十分に大きくなる



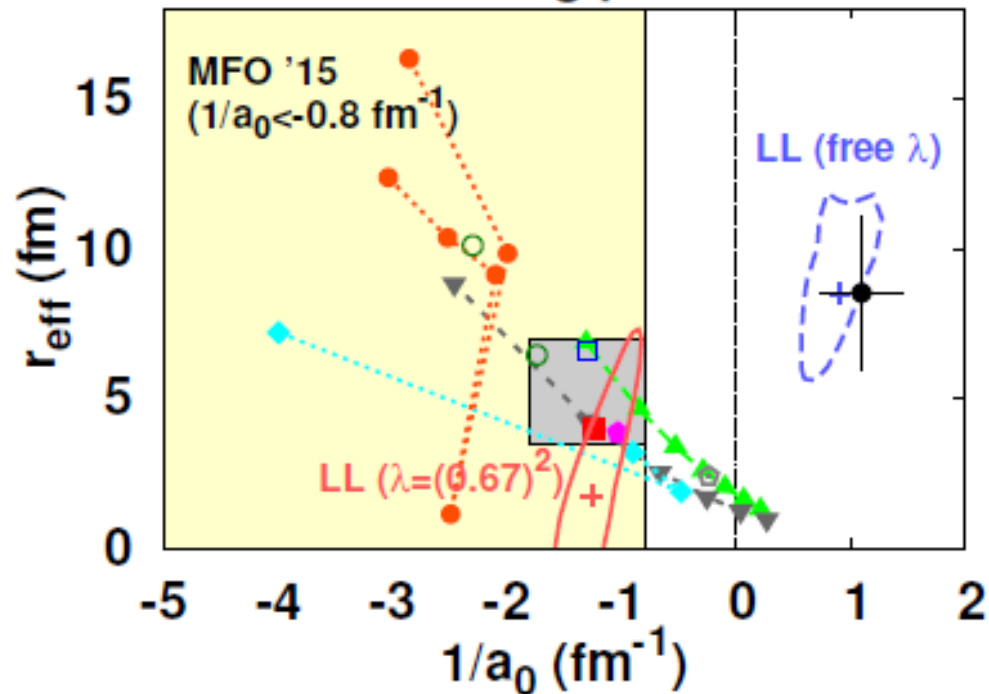
Akamatsu+('18)



2 粒子相関からハドロン間相互作用へ

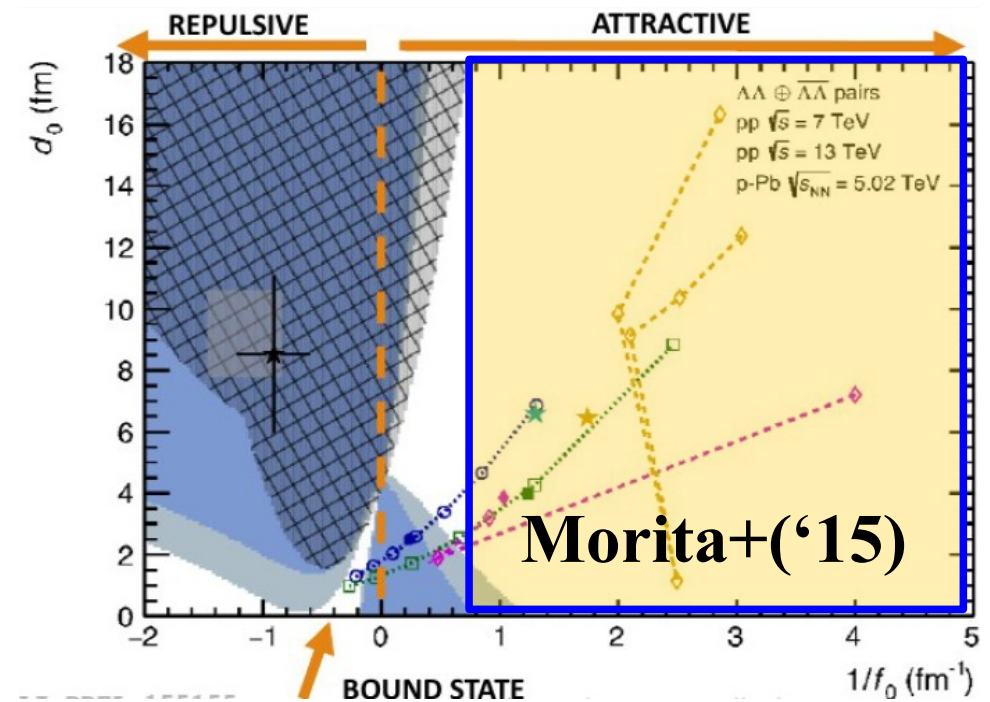
New Data from LHC-ALICE

$\Lambda\Lambda$ scattering parameters



$$q \cot \delta = -1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + \mathcal{O}(q^4)$$

Morita, Furumoto, AO ('15); AO+('16)

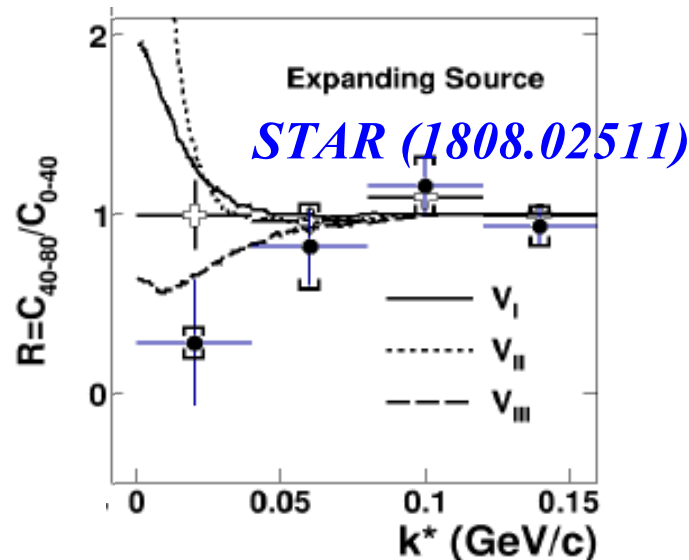
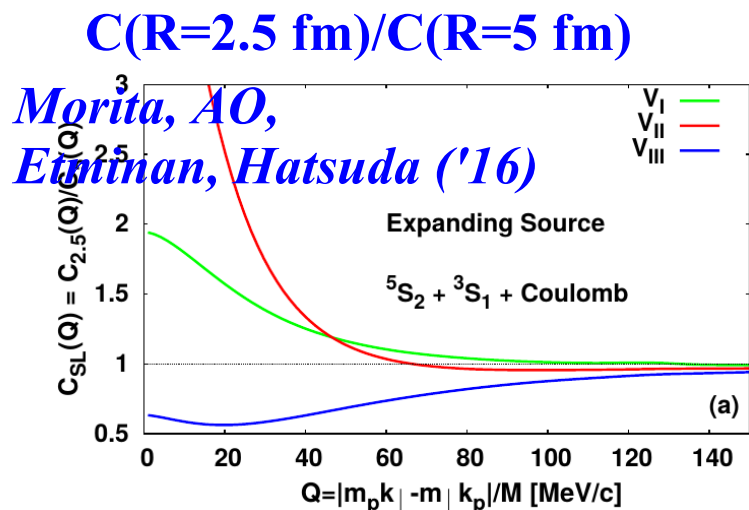


$$q \cot \delta = +1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + \mathcal{O}(q^4)$$

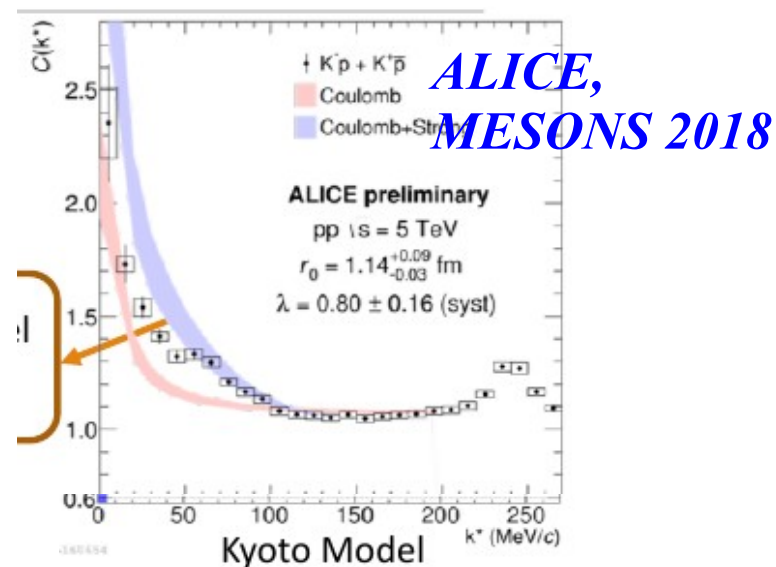
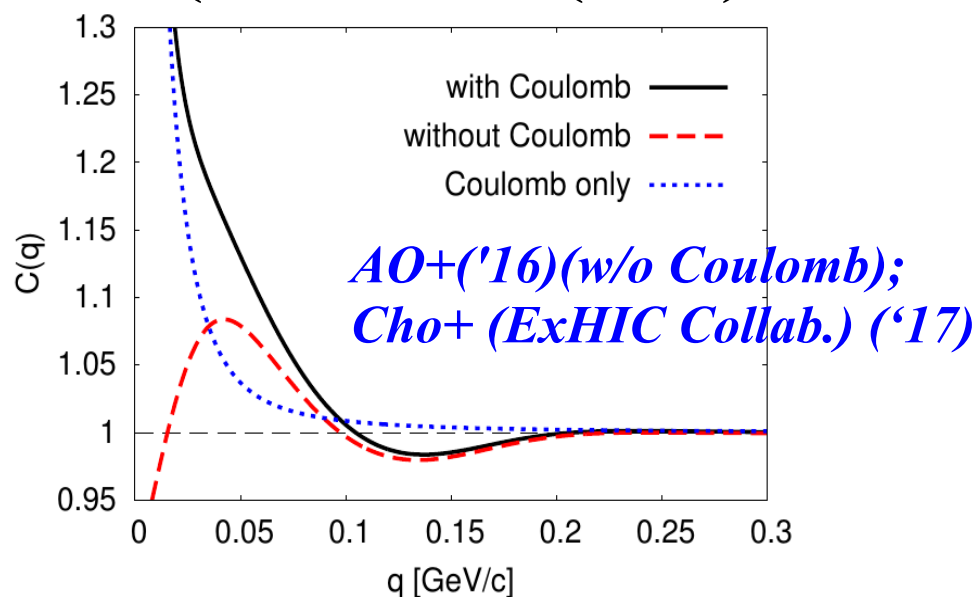
*V. M. Sarti (ALICE), MESONS 2018
ALICE Collab., in prep.*

その後の進展

- Ωp 相関 (dibaryon の存在を期待。 HAL QCD+Coulomb.)

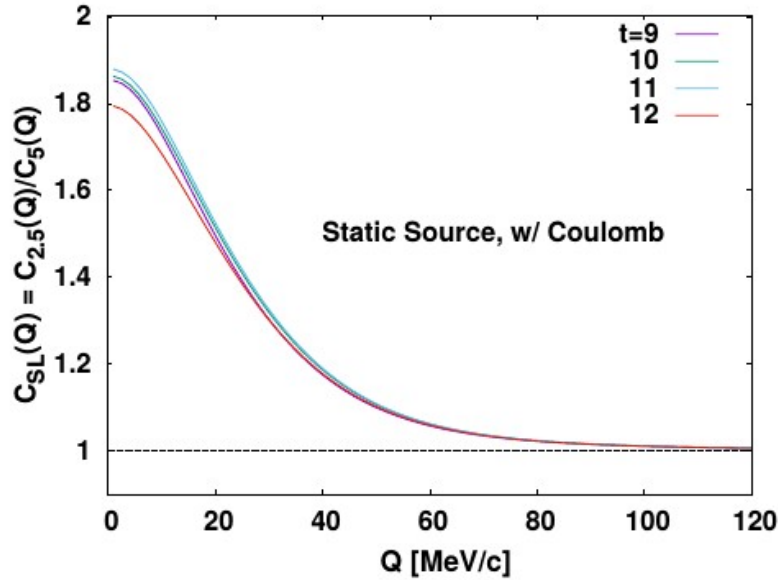


- $K^- p$ 相関 (束縛状態 $\Lambda(1405)$ をもつ。 Chiral Unitary+Coulomb)

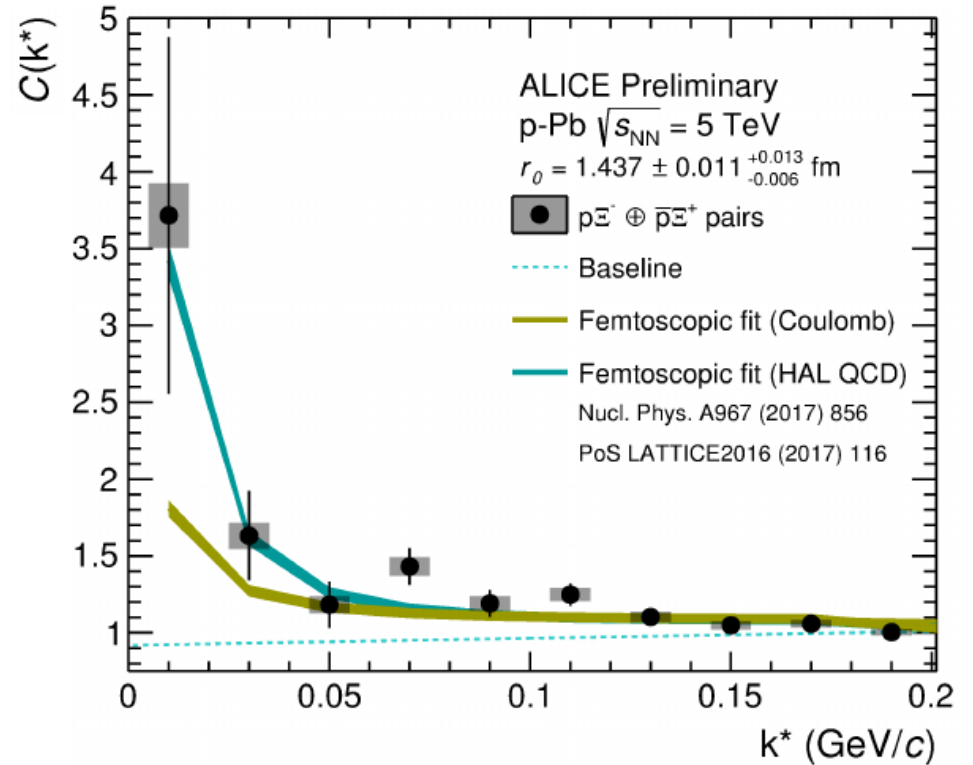


その後の進展 (cont.)

■ Ξ^-p 相関 (ΞN 束縛状態としての H 粒子は?)



*T. Hatsuda, K. Morita, AO,
K. Sasaki, NPA967('17), 856.*



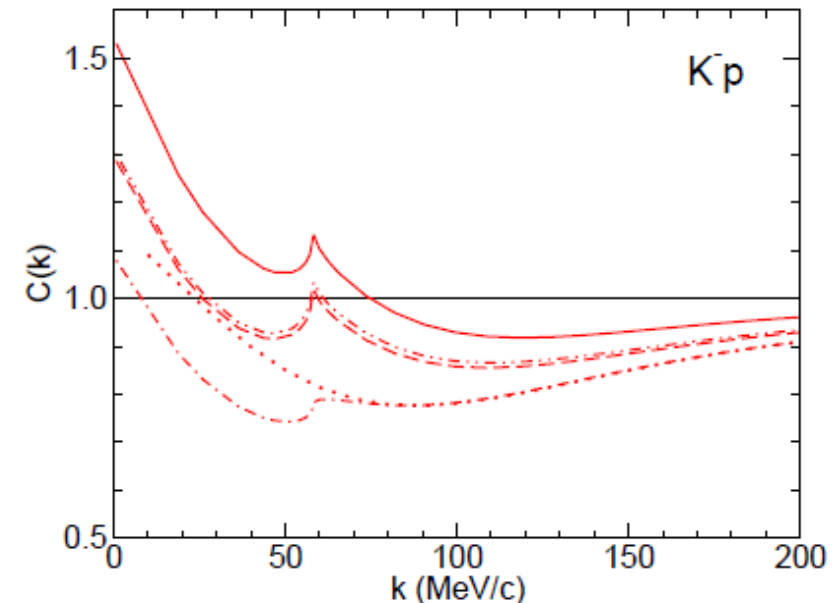
V. M. Sarti (ALICE Collab.), MESONS 2018

相関関数から相互作用へ

- $\Lambda\Lambda$, Ξp , Ωp , $K^- p$ と多くの実験データがでており、先駆者として責任を持って解析を進める
 - Ωp , $\Omega\Omega$: HAL QCD の更新された結果を用いて論文作成中
 - $\Lambda\Lambda$, Ξp : HAL QCD の結果を待って論文作成予定
 - $K^- p$: $\pi\Sigma$ チャネルとの結合を考慮した新たなプログラム開発が必要
J. Haidenbauer (arXiv:1808.05049)

- 新たな対の測定も提案したい

- Λ -nuclear 相関
 - Λ NN3 体力が見れるか？
- $K^- K^+$ 相関
 - 1 GeV 近辺のスカラー、ベクトル中間子の性質解明



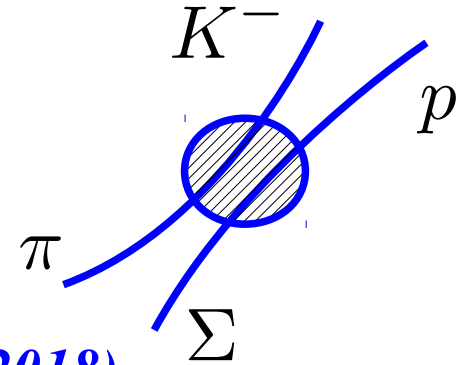
Haidenbauer,
arXiv:1808.05049

Correlation Function with Coupled Channels

- Contribution of the source in other channels

$$C_\alpha(\mathbf{q}) = \sum_\beta \int d\mathbf{r} S_\beta(\mathbf{r}) \left| \psi_{\beta\alpha}^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{q}) \right|^2$$

Source fn.



- Asymptotic wave function

K. Miyahara, T. Hyodo, W. Weise, Phys. Rev. C 98, 025201 (2018), arXiv:1804.08269.

$$|\Psi_\alpha^{(\pm)}\rangle = \sum_\beta \psi_{\beta\alpha}^{(\pm)} |\beta\rangle$$

No outgoing w.f. for $\beta \neq \alpha$

$$\psi_{\beta\alpha}^{(+)}(r) \rightarrow \frac{-1}{2ik_\alpha} \left[\delta_{\beta\alpha} \frac{e^{-ik_\beta r}}{r} - \sqrt{\frac{v_\alpha}{v_\beta}} S_{\beta\alpha} \frac{e^{ik_\beta r}}{r} \right] \quad (v_\alpha = k_\alpha/\mu_\alpha)$$

- Asymptotically outgoing wave function

$$\psi_{\beta\alpha}^{(-)}(r) = \frac{1}{k_\alpha} \sum_\gamma \psi_{\beta\gamma}^{(+)}(r) S_{\gamma\alpha}^\dagger k_\gamma \sqrt{\frac{v_\alpha}{v_\gamma}} \rightarrow \frac{1}{2ik_\alpha} \left[\delta_{\beta\alpha} \frac{e^{ik_\beta r}}{r} - \sqrt{\frac{v_\alpha}{v_\beta}} S_{\beta\alpha}^\dagger \frac{e^{-ik_\beta r}}{r} \right]$$

- Difference of \tilde{S} and S^\dagger may lead to different results....

径路最適化法による 有限密度 QCD の研究

径路最適化による符号問題への挑戦

- 符号問題は理論物理学における Grand Challenges の一つ
- 径路最適化法はこれまでに低次元系・少数自由度系で成功
 - 激しく振動する関数の 1 次元積分
 - 1+1 次元複素スカラー理論
 - 0+1 次元 QCD
- より現実的な系への適用
 - QCD 有効模型 (PNJL) Kashiwa, Mori, AO (arXiv:1805.08940)
 - ベクトル結合を含む PNJL (強い符号問題あり)
c.f. Thimble: Mori, Kashiwa, AO, PLB781('18)688
 - 1+1 次元 QCD
 - 3+1 次元 QCD の強結合極限、Heavy-Dense Limit, Hopping parameter expansion,
 - 3+1 次元 QCD (小さな格子)
 -

問題点: 計算コスト

- 径路最適化法では測度 (ヤコビアン) からの複素位相も含めて径路を最適化
→ ヤコビアンに N^3 の計算コスト (N = 自由度)
- 解決方法: 疎行列化

- 虚部が同じ点での実部のみの関数

E.g. Alexandru, Bedaque, Lamm, Lawrence, PRD97('18)094510

Thirring model, 1+1D QED

$$y_i = f(x_i), f(x) = \lambda_0 + \lambda_1 \cos x$$

- 同じ点、および隣の点実部の関数

F. Bursa, M. Kroyter, arXiv:1805.04941

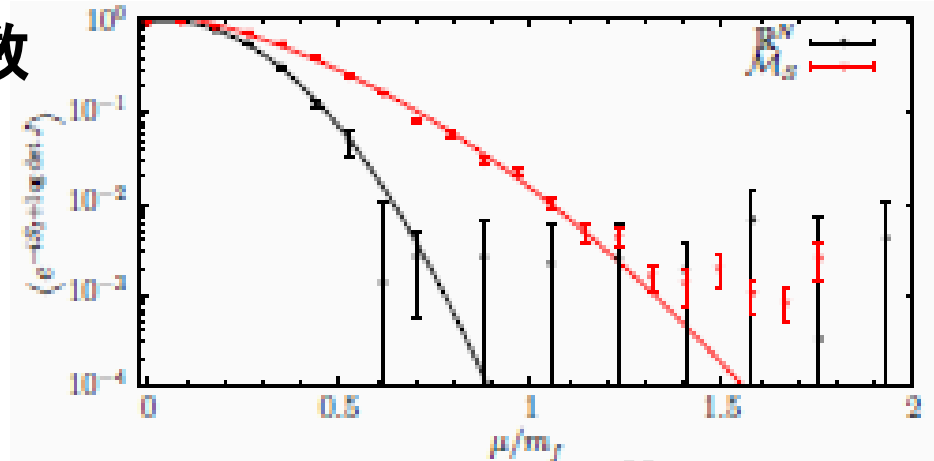
0+1 D ϕ^4 theory

Translational inv. + U(1) sym.

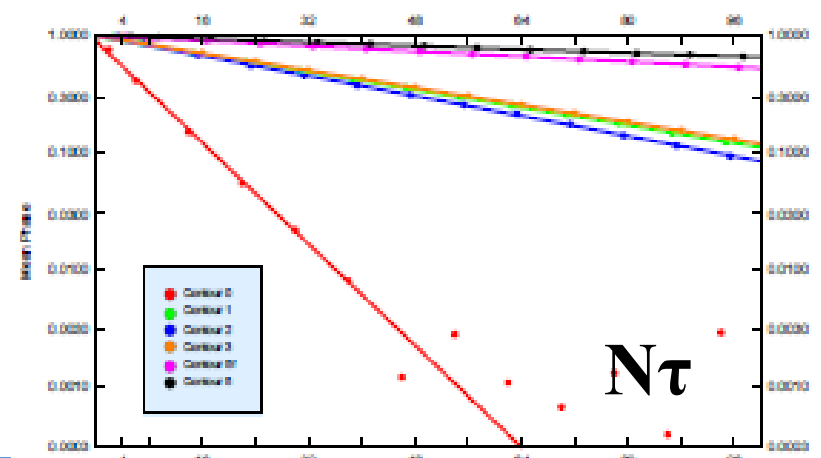
$$y_{a,i} = \frac{\varepsilon_{ab} x_{a,i+1}}{1 + x_{1,i}^2 + x_{2,i}^2}$$

経験の蓄積が必要

Ave. Phase Fact.



Ave. Phase Fact. ^{μ}



古典場の熱化

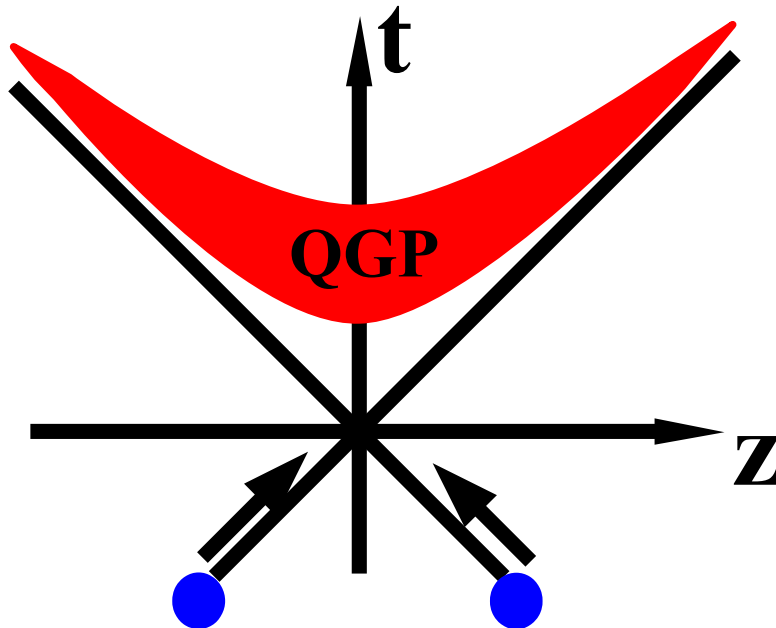
RHIC における2つの驚き

- RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider)
 - 2000 年から稼働している重イオン衝突型加速器
 - クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成を (ほぼ) 確認
- 2つの驚き (1): 強結合 QGP
 - 流体力学が大きな成功、QGP はほぼ完全流体 ($\eta/s \sim 1/4\pi$) 。
→ 高エネルギーで結合定数 g は小さいはずなのに、
小さな平均自由行程が実現

RHIC 稼働前のあるセミナーにて。

“If a miracle happens and the system thermalizes at around $\tau \sim 0.5$ fm/c, hydrodynamics will work to describe the evolution of QGP.”

A miracle happened !

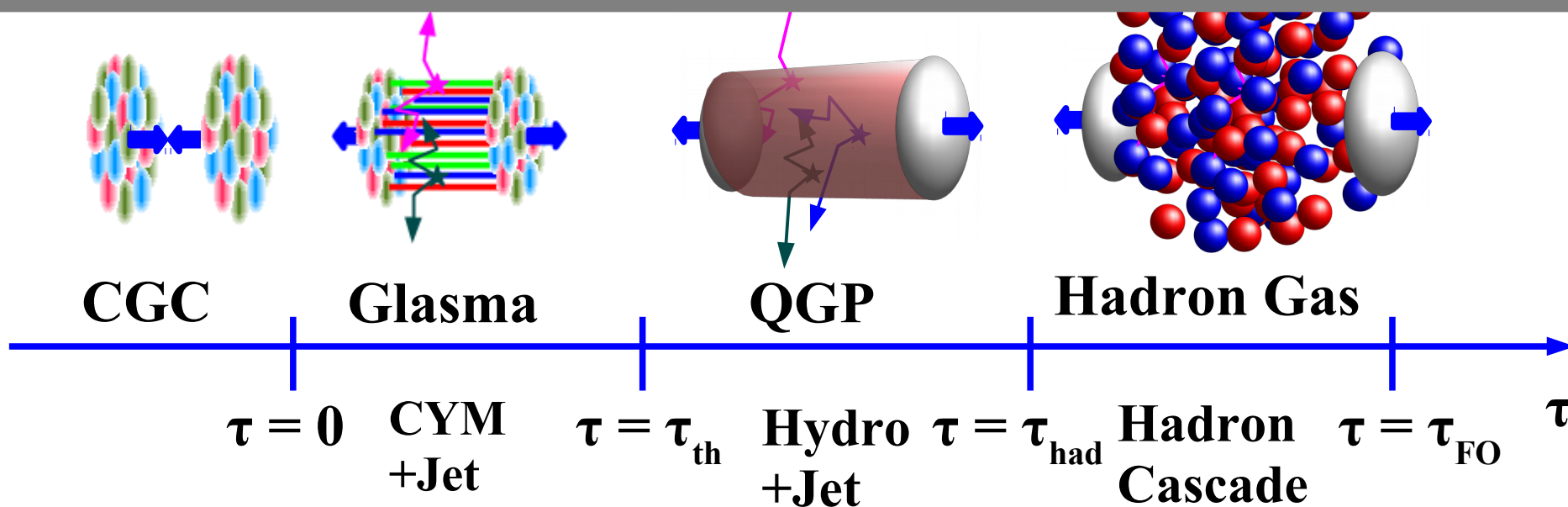


RHIC における2つの驚き (cont.)

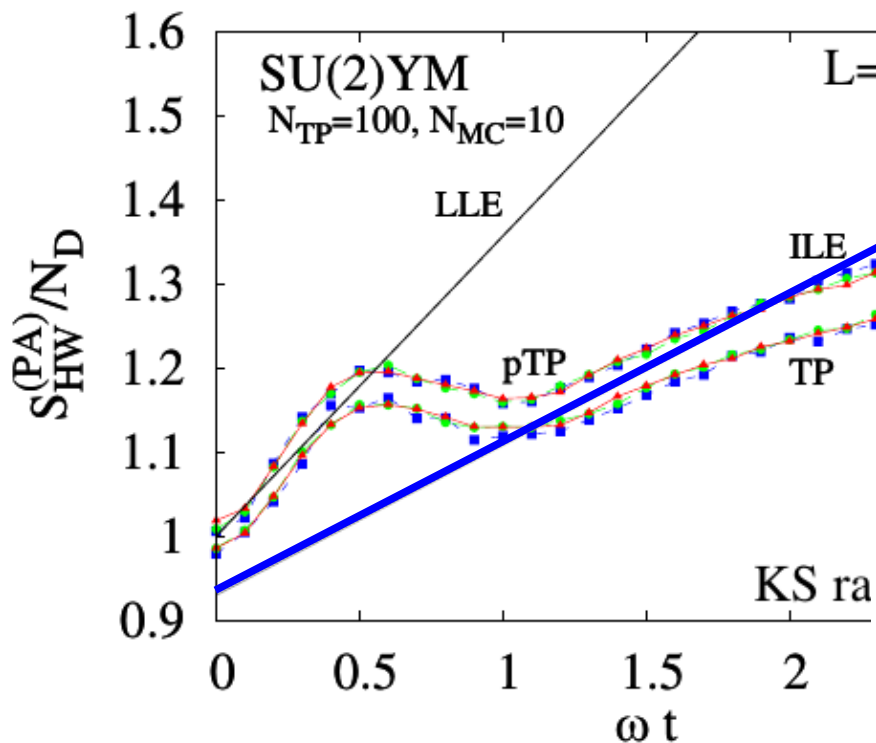
■ 2つの驚き (2): 早い熱平衡化

- 摂動論的 QCD の予言 (2-5 fm/c) に比べて有意に早い時刻 (0.6-1 fm/c) で熱化が起こり、流体力学的時間発展が進む。
→ なぜ早い?
- 高エネルギー重イオン衝突の初期条件 = グラズマ (古典ヤンミルズ場が主要)
- 古典ヤンミルズ場の成長 (不安定性) → 粒子への崩壊 → 熱化?

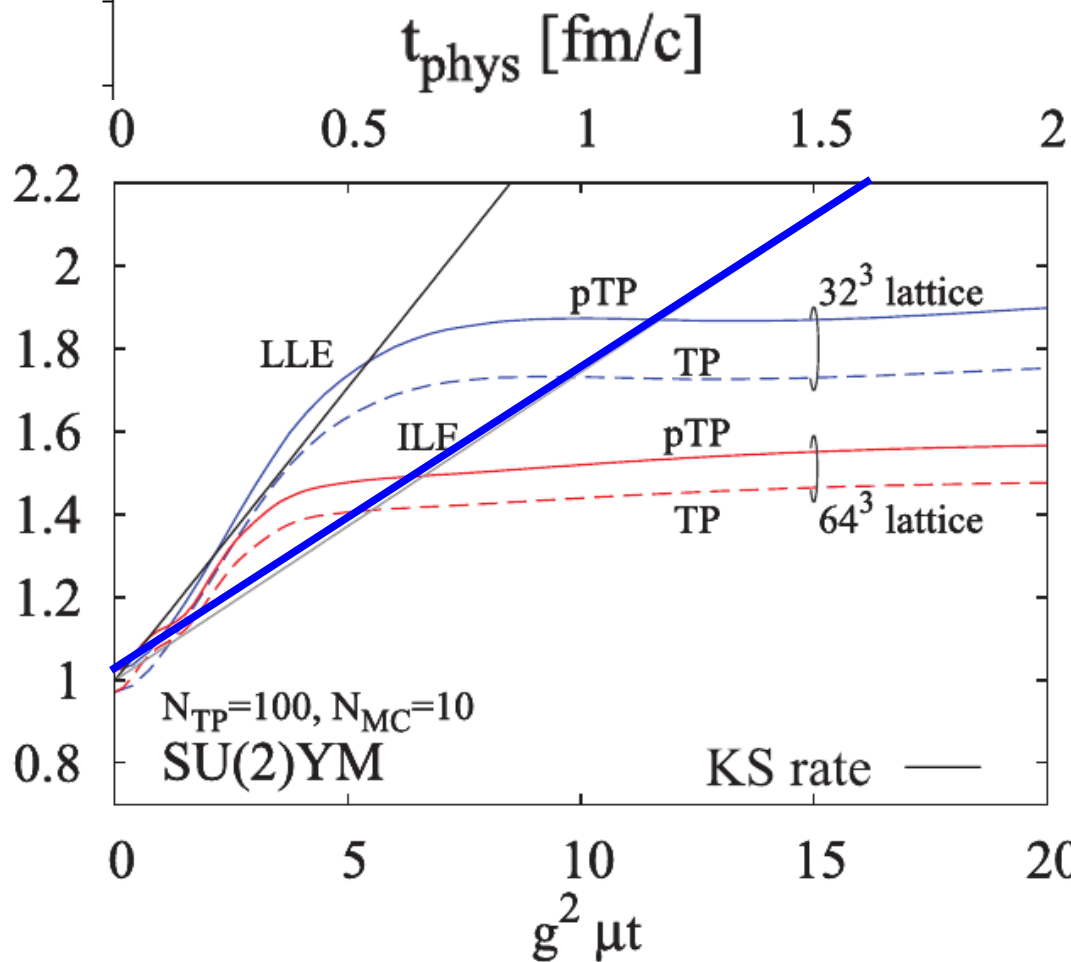
むしろ古典ヤンミルズ場自体がエントロピーを作っているのでは?



ヤンミルズ場の *Husimi-Wehrl entropy*



Random な初期条件
 準定常状態に緩和する段階の
 エントロピー生成率
 = カオス性からの予想と一致
Tsukiji, Kunihiro, Iida, AO, Takahashi ('16)



グラズマ初期条件
 最初期のエントロピー生成で
 ほぼ準定常状態まで到達
 生成率 > カオス性からの予想

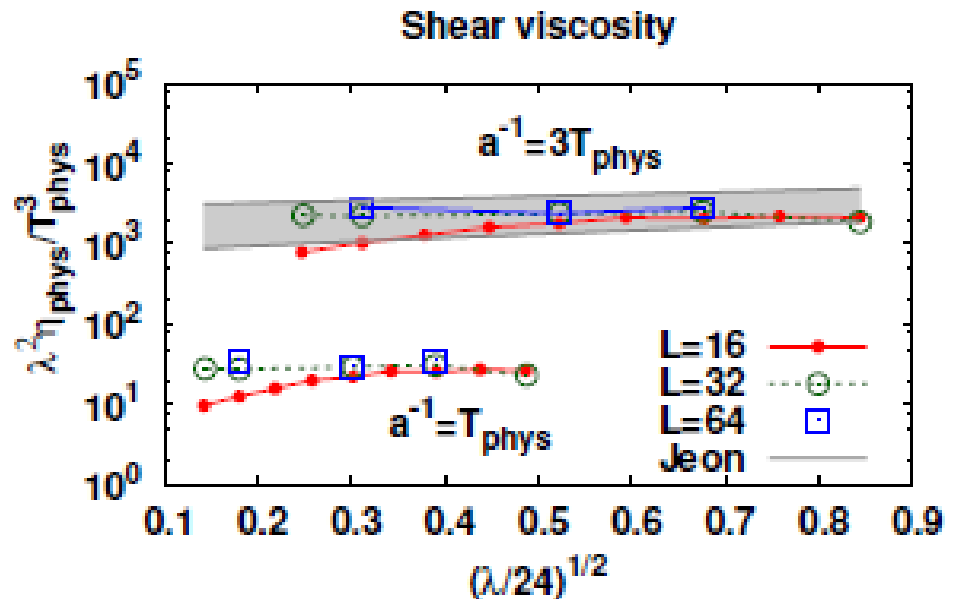
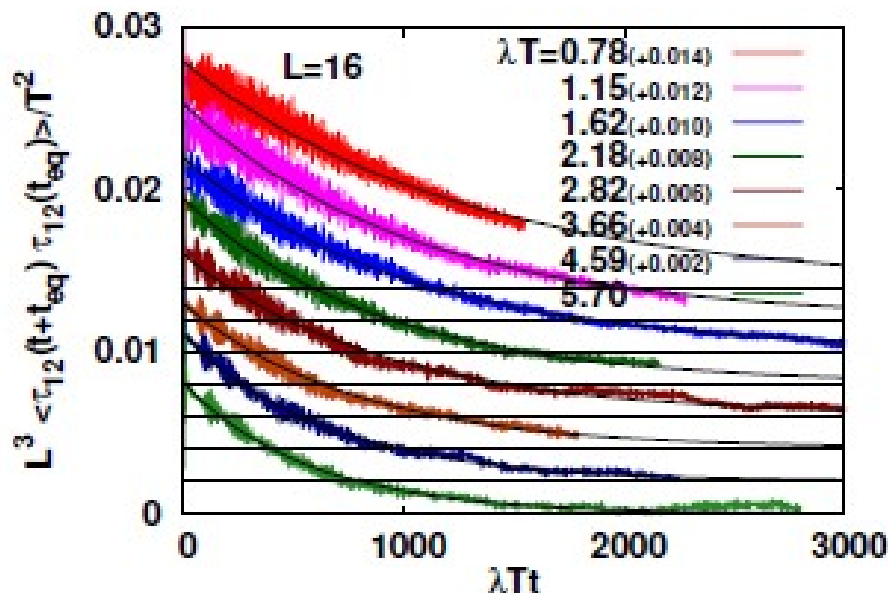
Tsukiji, Kunihiro, AO, Takahashi ('17)

**古典場がエントロピーを持つなら、
輸送係数もあるはずでは？**

**流体の初期条件には古典場の結果を使える。
流体の粘性係数に滑らかにつながるだろうか？**

古典場の輸送係数

- Green- 松原公式
$$\eta = \frac{1}{T} \lim_{\omega \rightarrow 0} \int_0^{\infty} dt \int d^3x e^{i\omega t} \langle T_{12}(\mathbf{x}, t) T_{12}(\mathbf{0}, 0) \rangle$$
- 古典統計シミュレーション
 - 古典場を異なる初期条件で多数回計算し、その平均をとる
- T_{12} の時間相関は指数関数のテールをもつ。
[not confirmed in previous work (Homor, Jacovac, ('15))]
- 古典場のずれ粘性は摂動論の結果より大きく、
最小値よりも 1-2 桁大きい



Matsuda, Kunihiro, AO, Takahashi, in prep.

まとめ

■ 研究計画

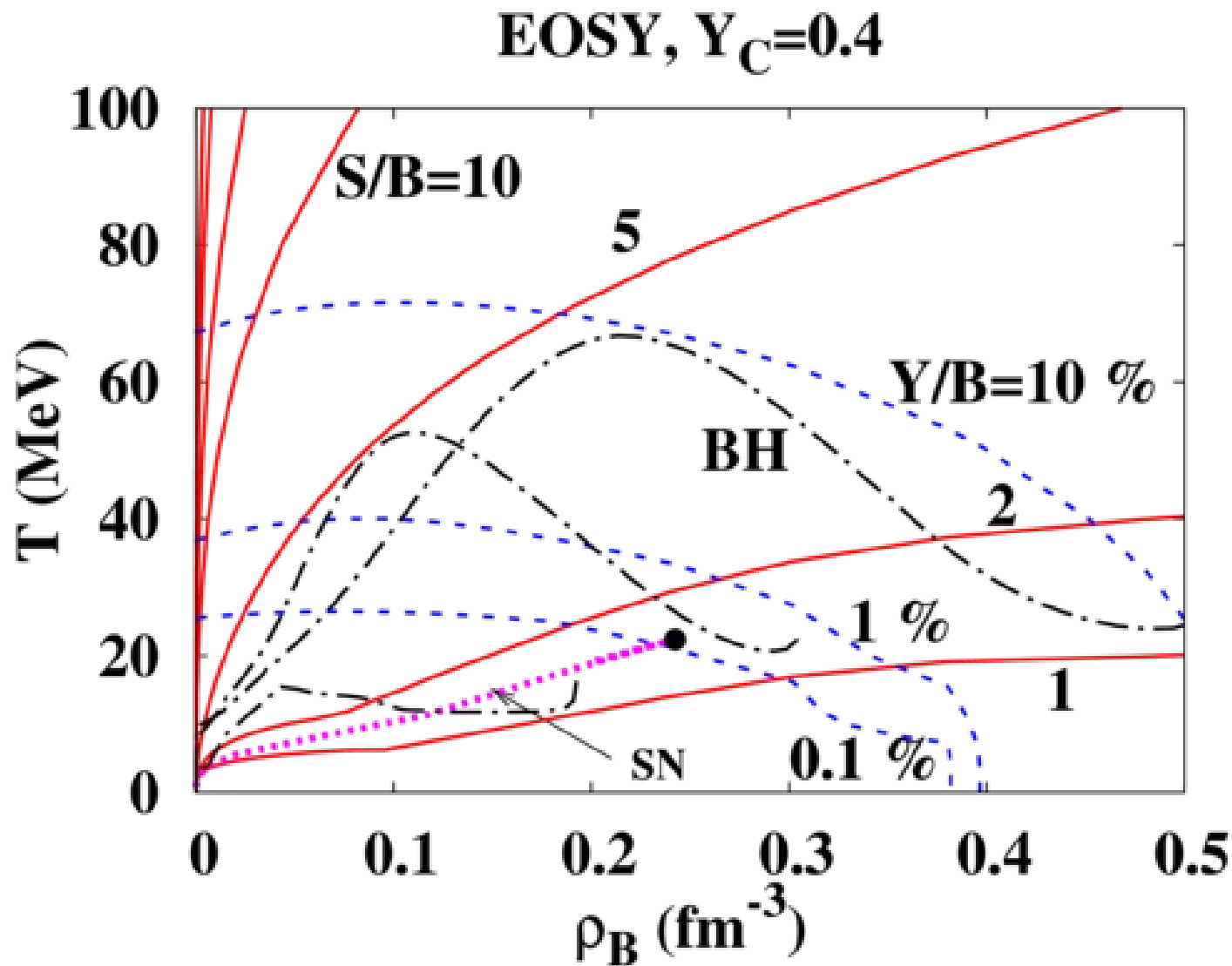
- J-PARC エネルギーの重イオン衝突と低密度 - 高密度状態方程式
 - ◆ 高エネルギー重イオン衝突で用いられている EOS と中性子星を記述する EOS をつなぐ！
- 2粒子相関からハドロン間相互作用へ
 - ◆ 更新された核力・枠組みを用いて、新たなデータを分析
- 径路最適化法による有限密度 QCD の研究
 - ◆ より現実的な系へと進める
- 古典場の熱化
 - ◆ 現在、古典場での輸送係数を研究中。

■ 目標

- 実験・観測に基づく3次元 QCD 相図の決定を目指す
- 符号問題とうまく付き合っ有限密度格子 QCD での結果を得る
- Phys. Rev. A,B,C,D,E の全てに論文を出す。

Thank you for your attention !

(ρ, T) during SN & BH formation



Shen EOS
+ hyperons

Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, JPG 35('08) 085201;
AO et al., NPA 835('10) 374.