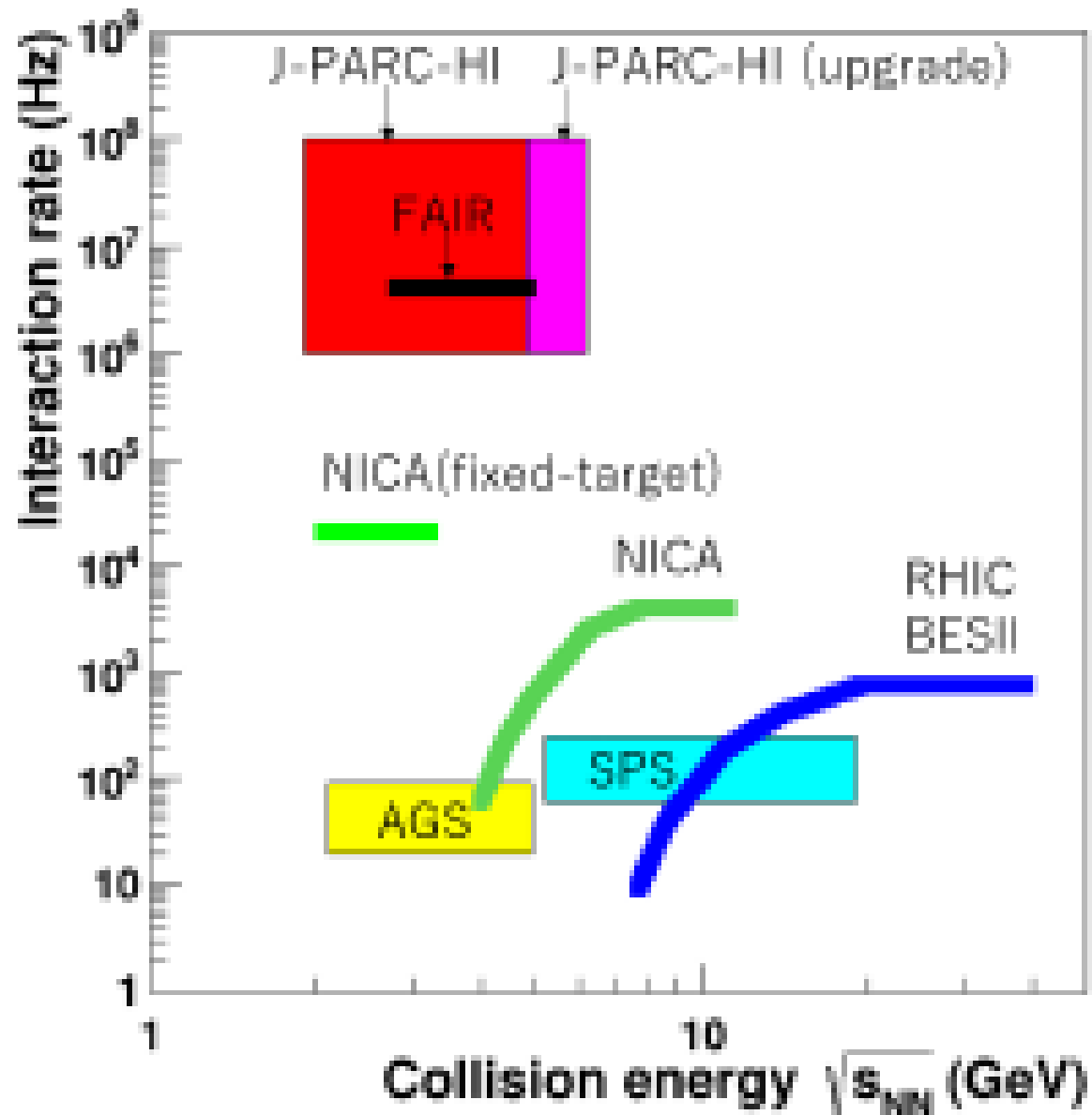


J-PARC-HI 提案書に関するコメント

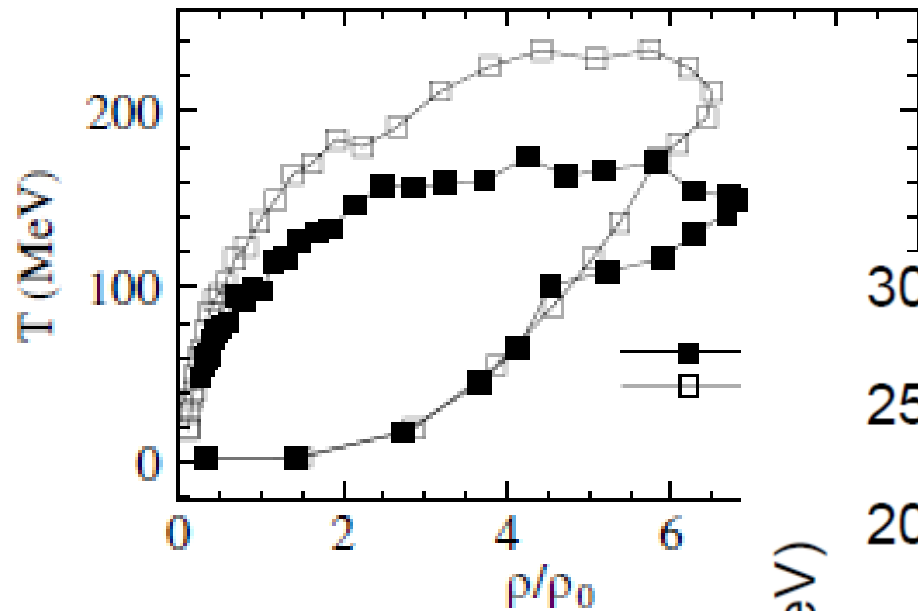
京都大学基礎物理学研究所 大西 明

J-PARC-HI が拓く 高密度物質とストレンジネスの物理
(2018/12/15)

J-PARC-HI の性能 (提案書より)



$\sqrt{s_{NN}}=(5-20)$ GeV: Golden Region to Study Dense Matter



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

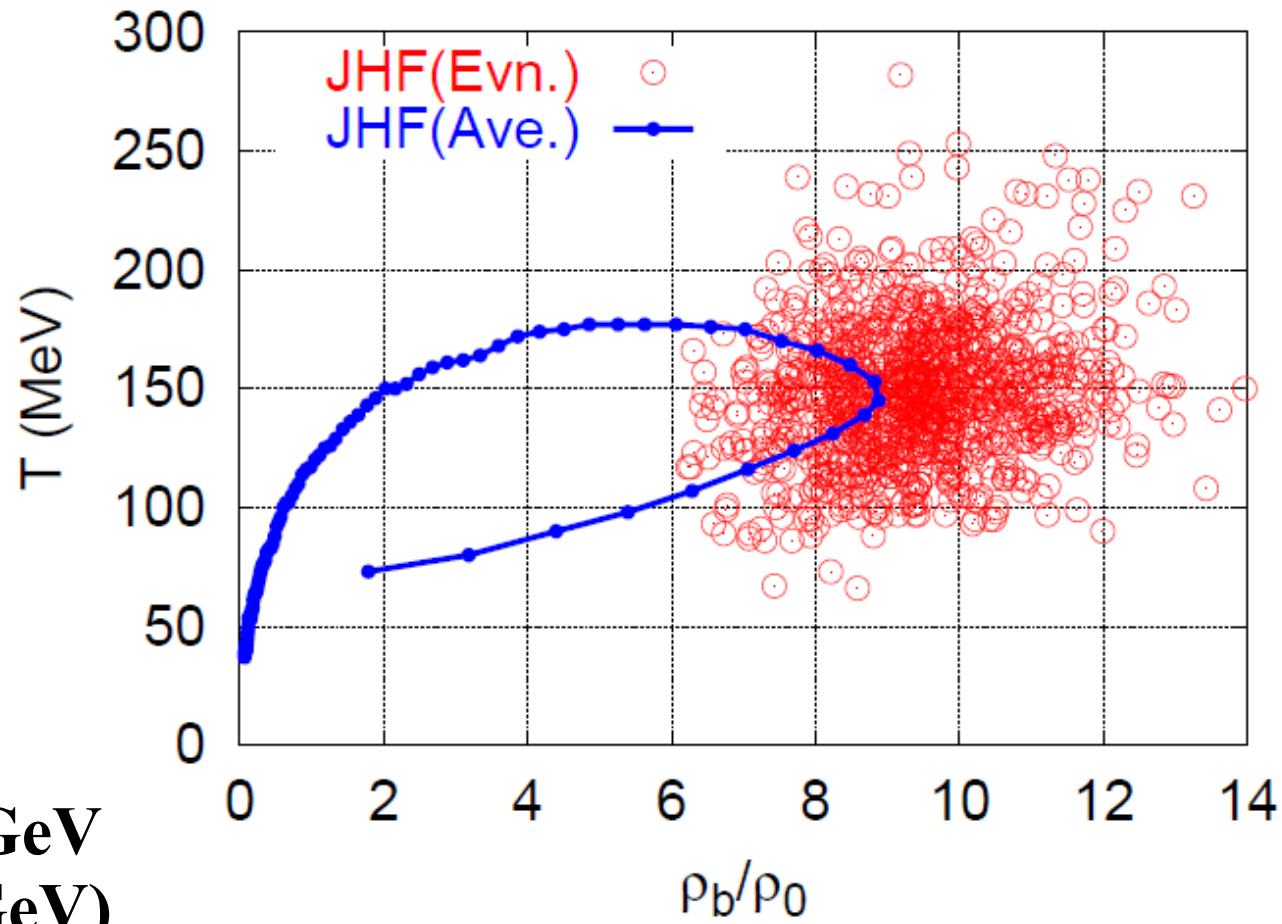
**$E_{inc}=10.6$ AGeV
($\sqrt{s_{NN}}\sim 4.9$ GeV)**

$\rightarrow \rho_{max}=7\rho_0$

**$E_{inc}=25$ AGeV
($\sqrt{s_{NN}}\sim 7.1$ GeV)**

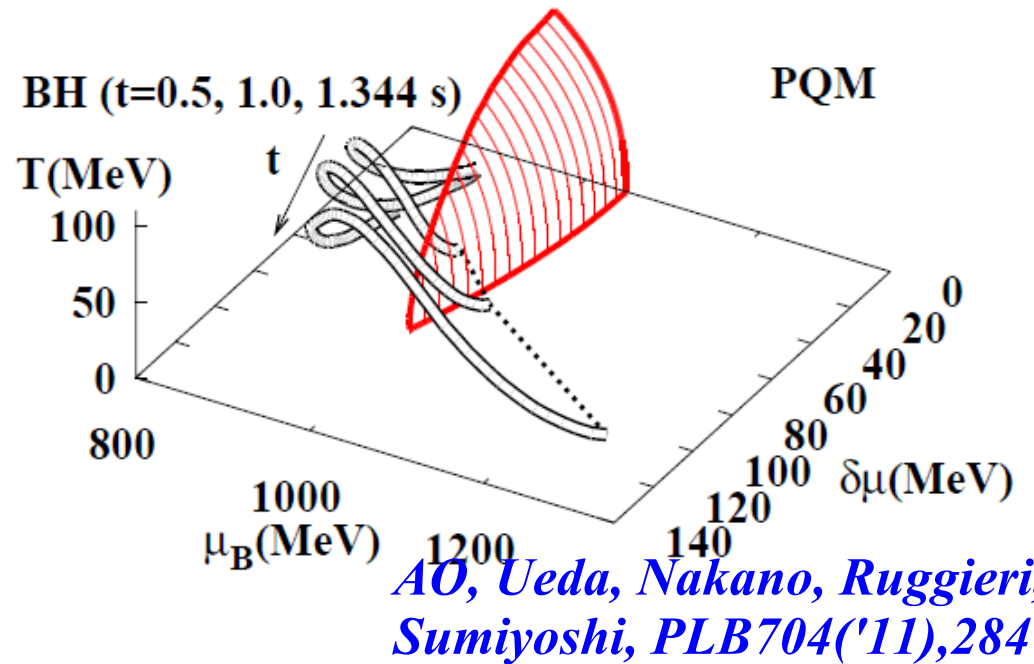
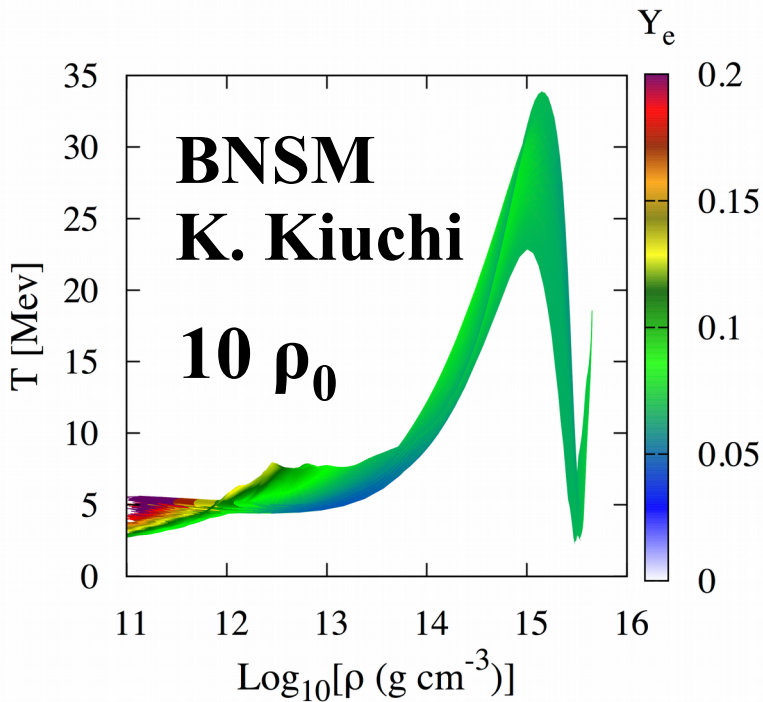
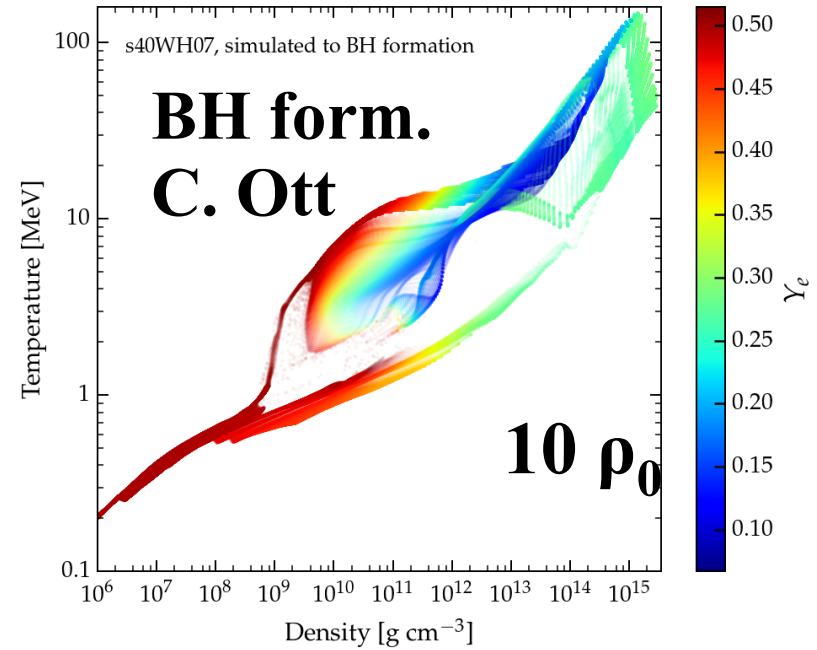
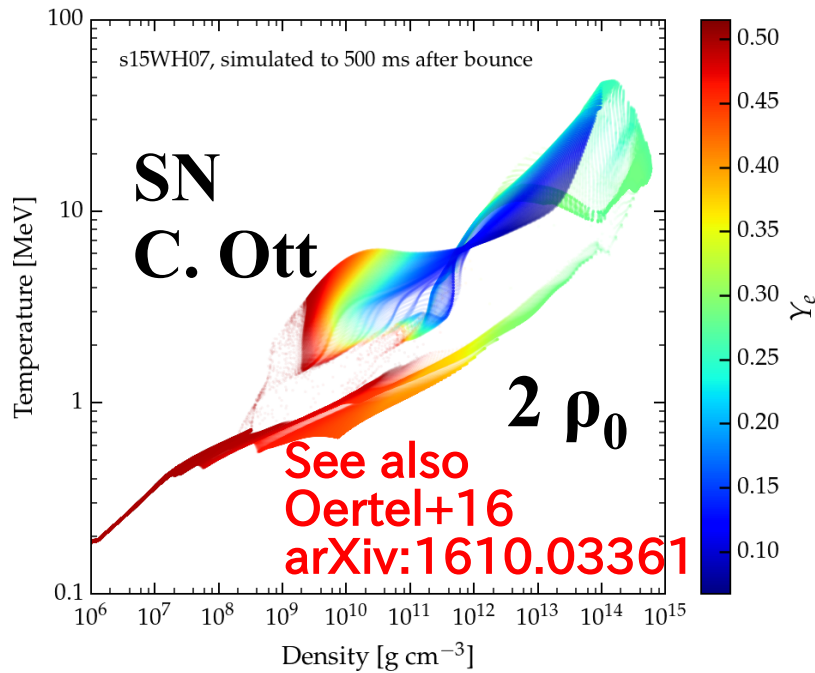
$\rightarrow \rho_{max}=8.5\rho_0$

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

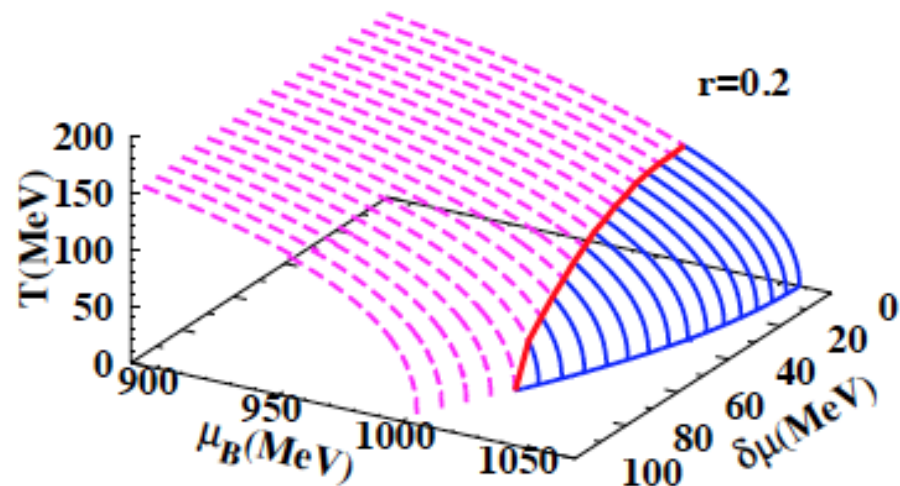
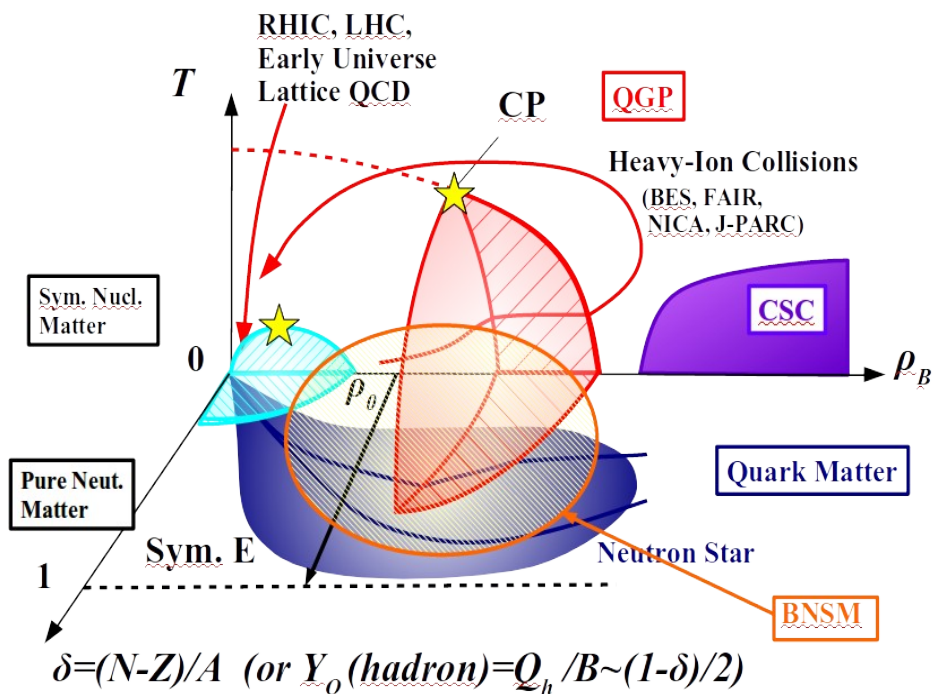


Central 1 fm³ cube.

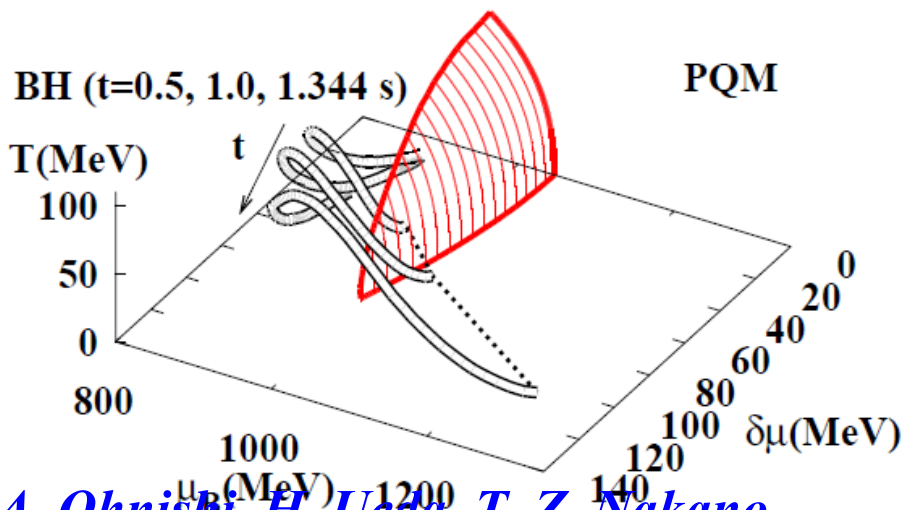
(ρ, T, Y_e) during SN, BH formation, BNSM



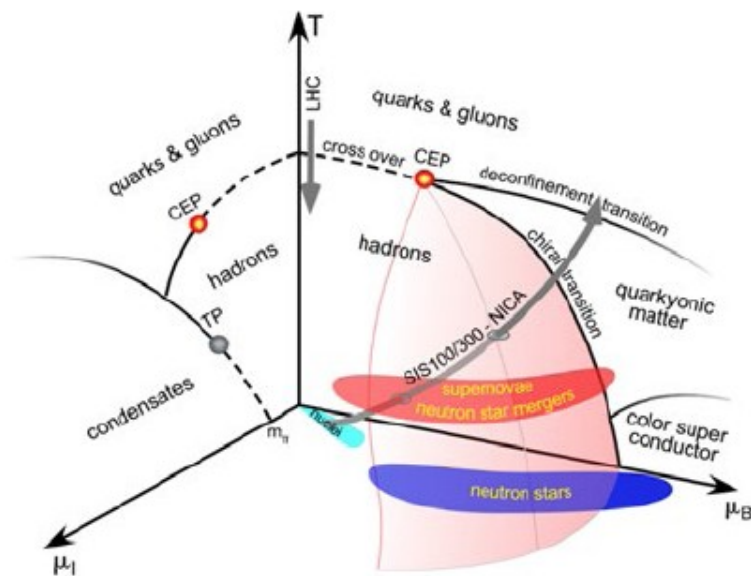
3次元 QCD 相図



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

*HIC @ $E_{inc}=10-25$ AGeV ($\sqrt{s_{NN}}=4.9-7.1$ GeV)
is a Quantum Simulator of*

*Direct Black Hole formation
and
Binary Neutron Star Mergers
(非対称度は異なりますが...)*

Sec. 2 J-PARC-HI の物理 (提案書より)

■ 高密度物質の探索

- 粒子フローによる超高密度物質の状態方程式の決定
- 保存量のゆらぎによる QCD 相構造の探索
- (仮想)光子および重クォーク対による超高密度物質の内部状態の探索
- 究極の超高密度物質の探索にむけて

■ ハドロン・ストレンジネス核物理

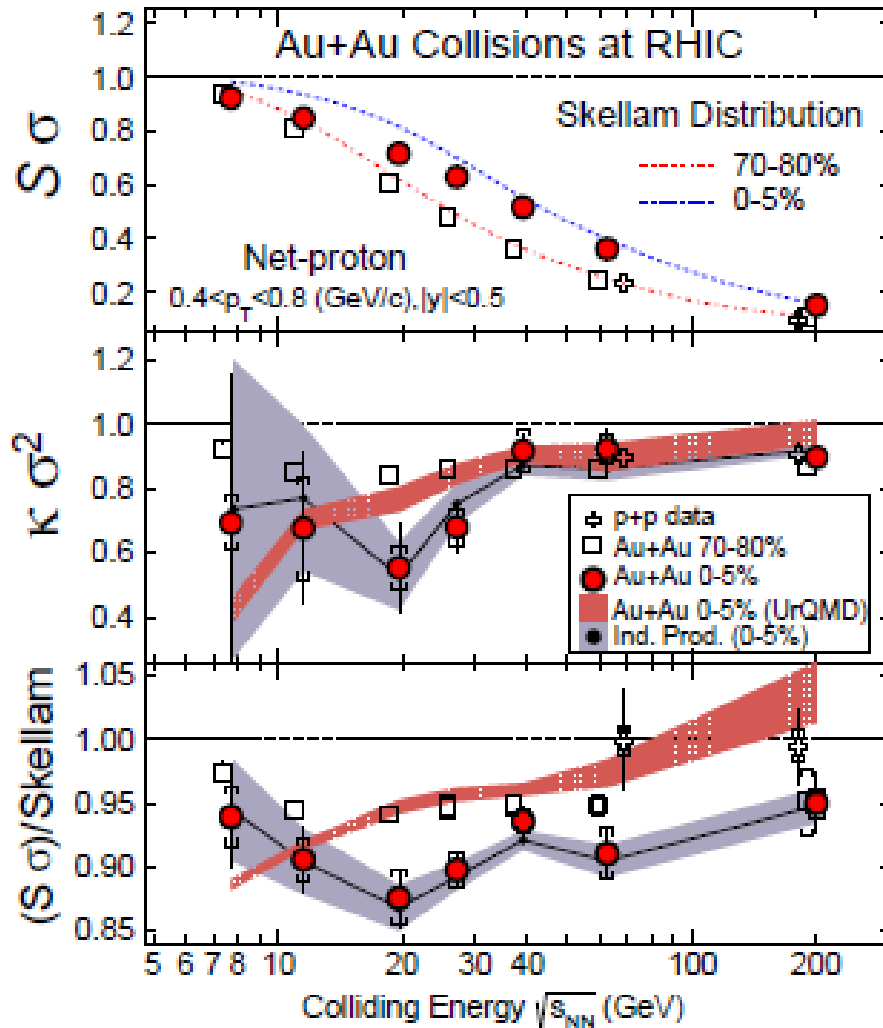
- ハイパー核とエキゾティック粒子の研究
- 粒子相関によるハドロン間力の測定

■ QCD の励起状態の測定

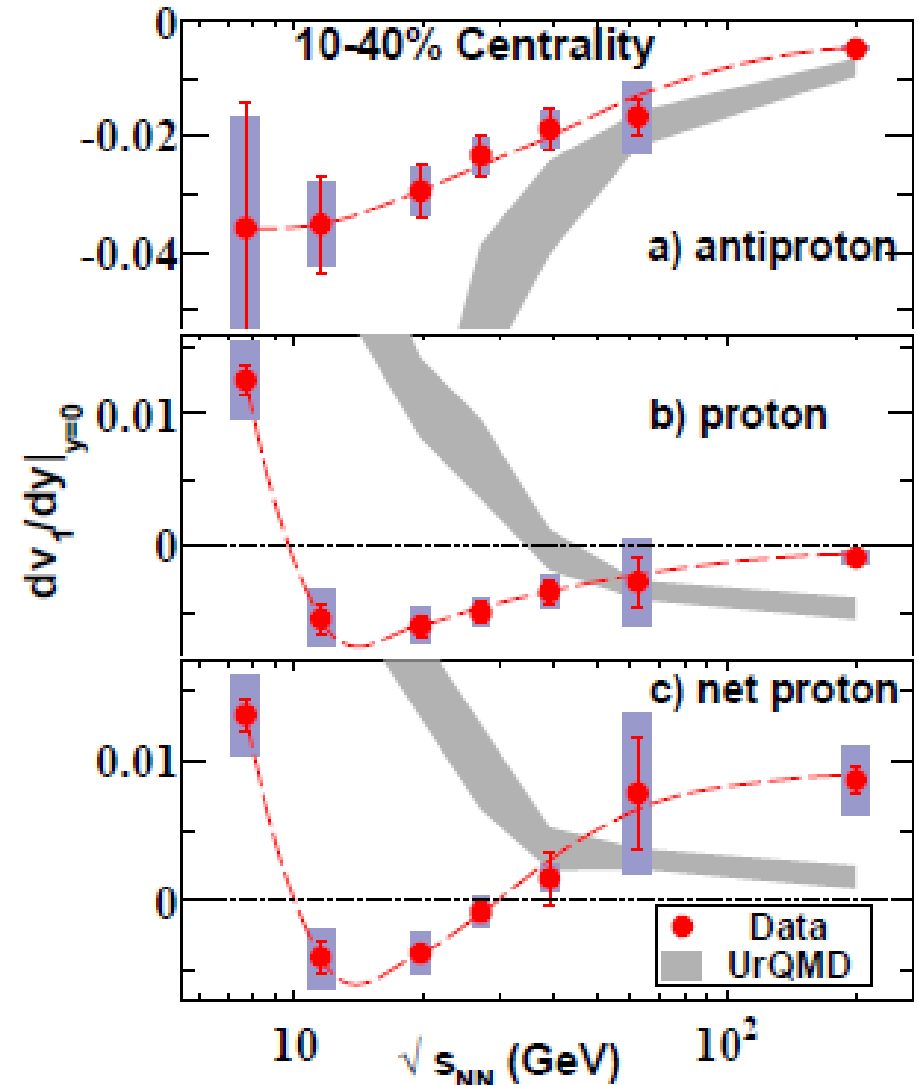
**「粒子フローによる
超高密度物質の状態方程式の決定」
へのコメント**

QCD 一次相転移は見たか？

- 衝突エネルギー関数として非単調性が見えている ($\kappa\sigma^2$, dv_1/dy)



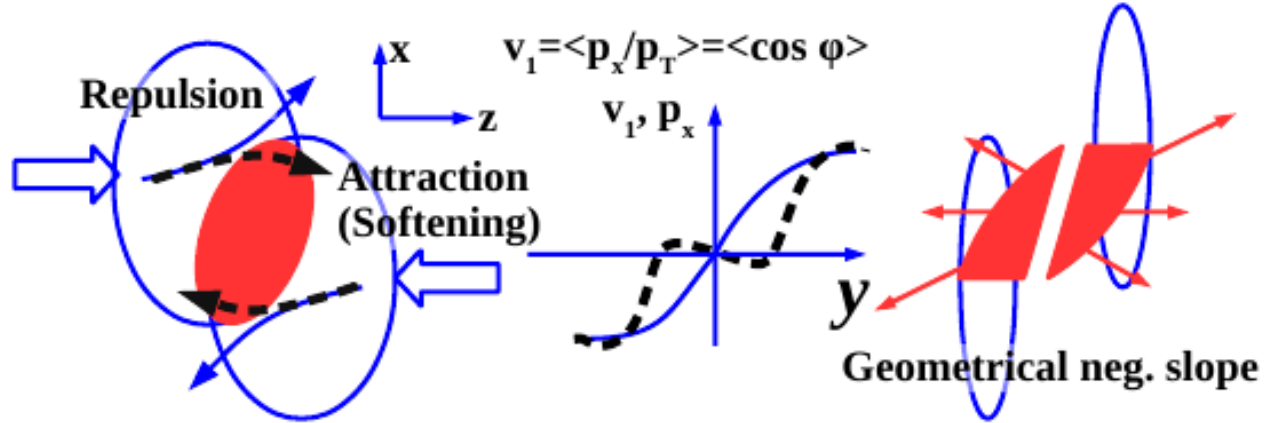
STAR Collab., PRL 112('14)032302.



STAR Collab., PRL 112('14)162301.

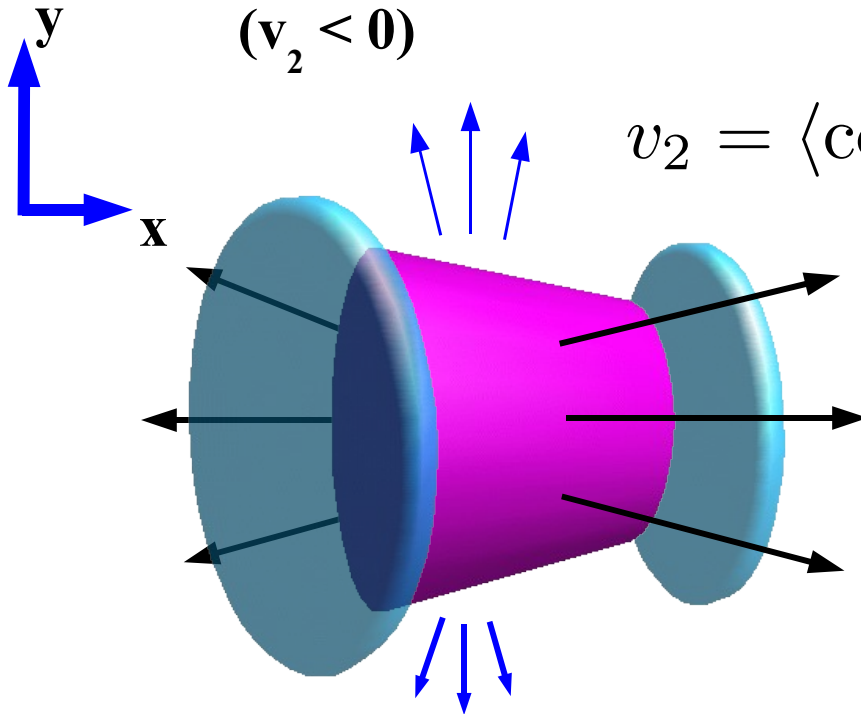
- Directed flow ($v_1, \langle p_x \rangle$), Elliptic flow (v_2)

→ 衝突初期に作られ、高密度の状態方程式 (EOS) に敏感



Out-of-Plane Flow
($v_2 < 0$)

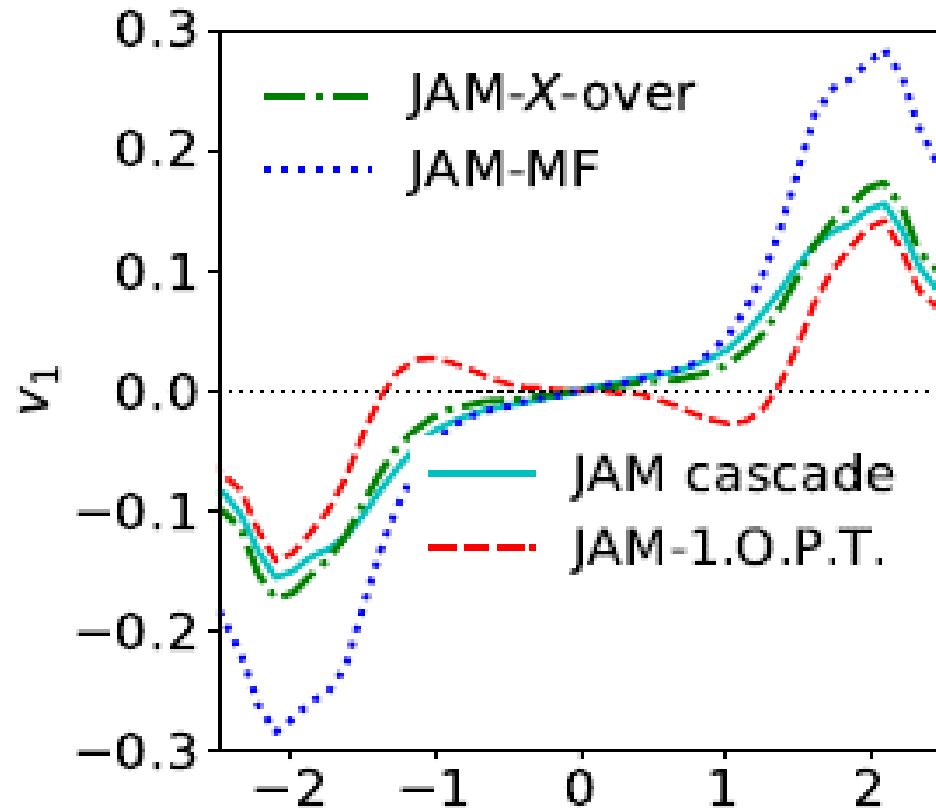
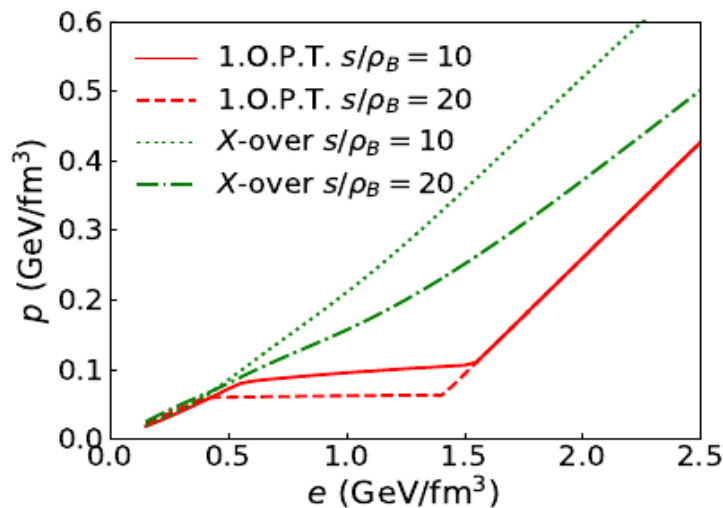
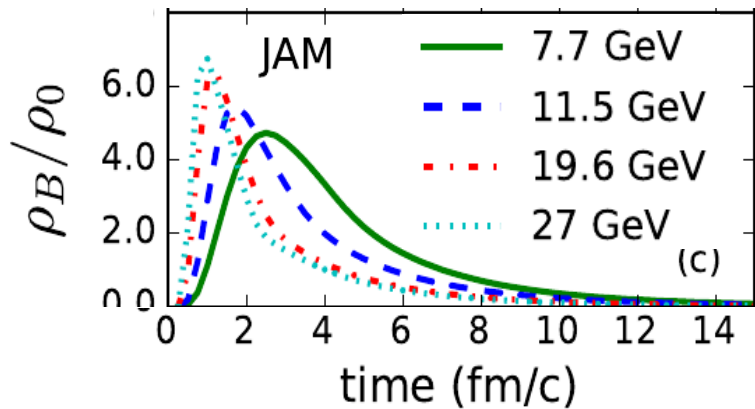
$$v_2 = \langle \cos 2\phi \rangle$$



In-Plane Flow
($v_2 > 0$)

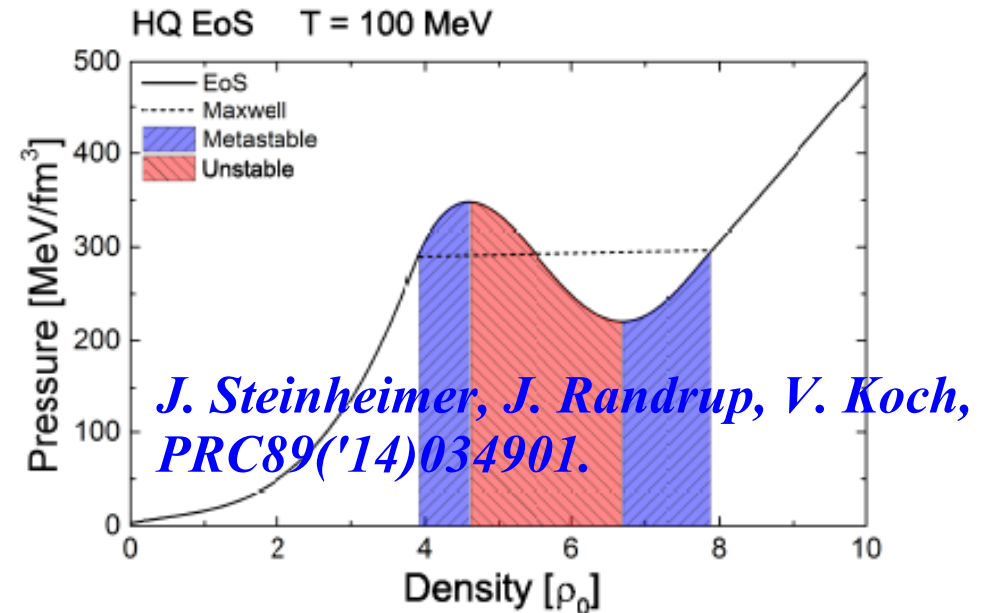
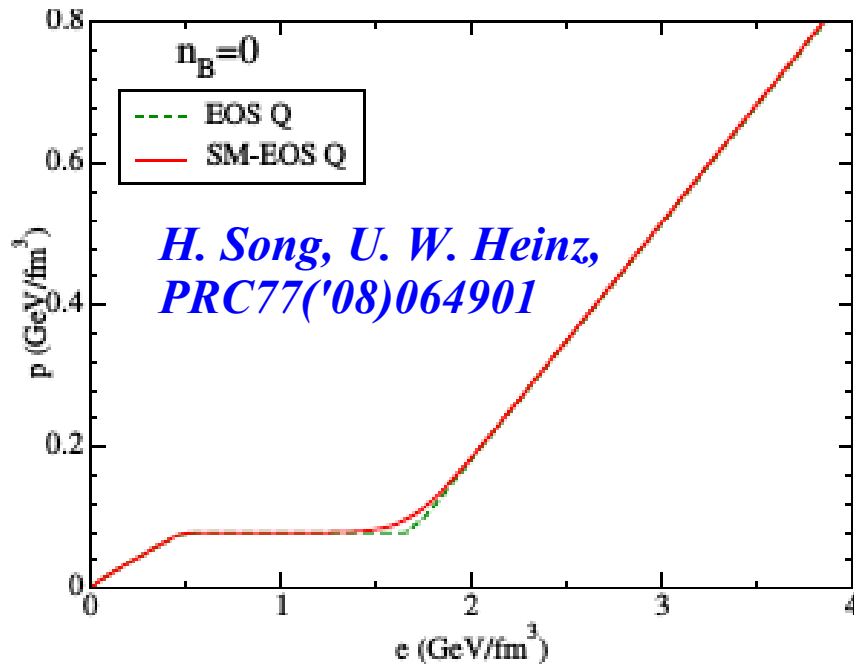
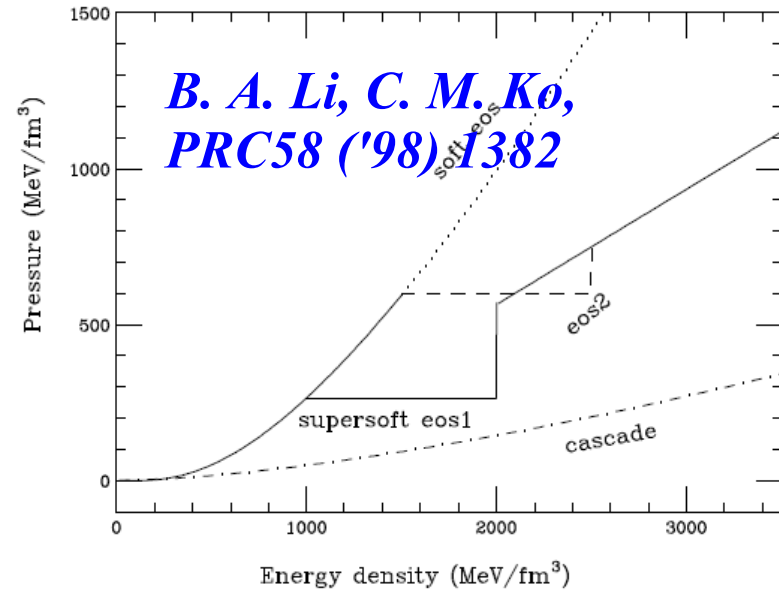
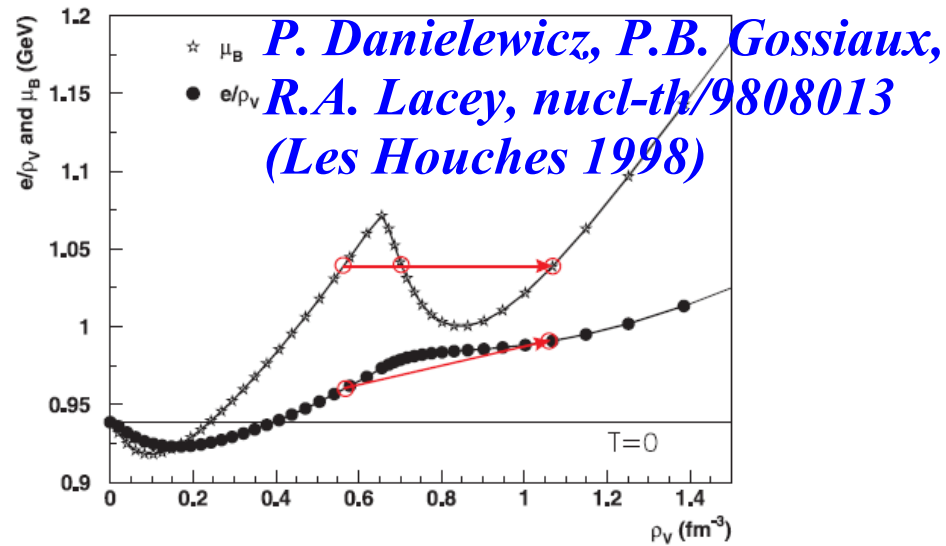
負のフローとEOSの軟化

- ビリアル定理を使って任意のEOSを取り込めるように理論を拡張
- $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$ GeVで見られる負のフロー ($dv_1/dy < 0$)
 → $(5-10)\rho_0$ において急激なEOSの軟化があれば説明可能



Y.Nara, H.Niemi, AO, H.Stoecker, PRC94('16)034906.
Y. Nara, H. Niemi, AO, J. Steinheimer, X.-F. Luo,
H. Stoecker, EPJA 54 ('18)18

QCD 一次相転移に伴うEOSのsoftening



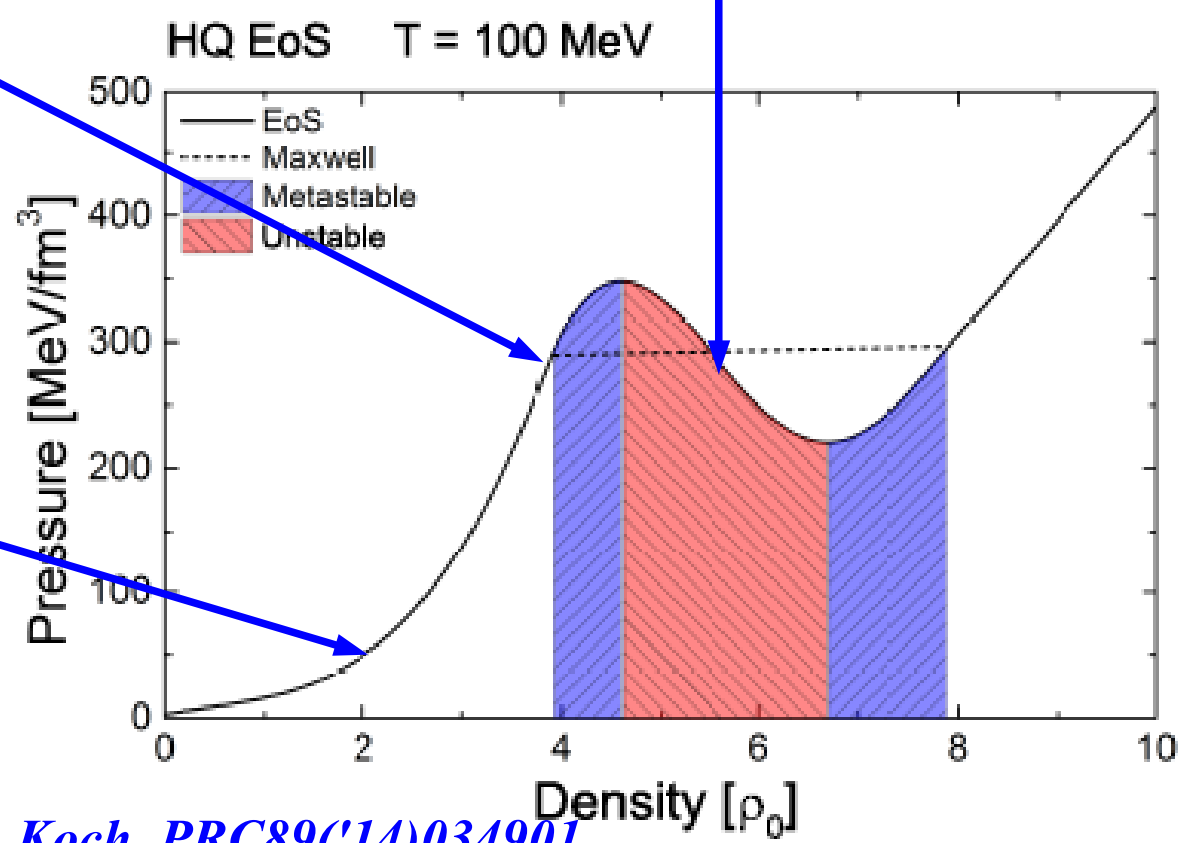
Previous analyses: $\rho_B = (3-10) \rho_0$, $P = (80-700) \text{ MeV}/\text{fm}^3$

J-PARC では”*Most Unstable*” 領域には届かないだろう。
 しかし *Onset Density* には届くかもしれない。
 シグナルは？

Onset energy
 $\sqrt{s_{NN}} = ?$

Most unstable
 $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 \text{ GeV}$

$\sqrt{s_{NN}} = 2m_N + 150 \text{ MeV}$
 ($E_{\text{inc}} = 300 \text{ A MeV}$)

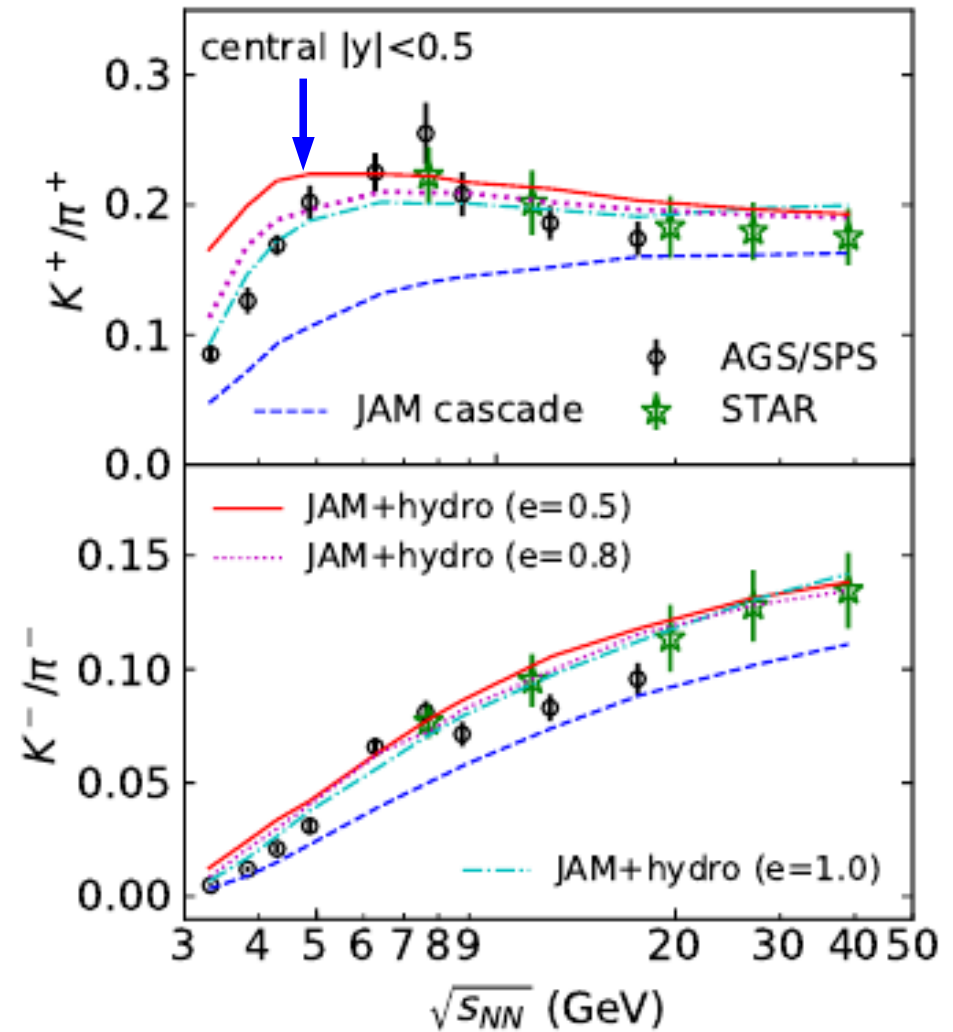
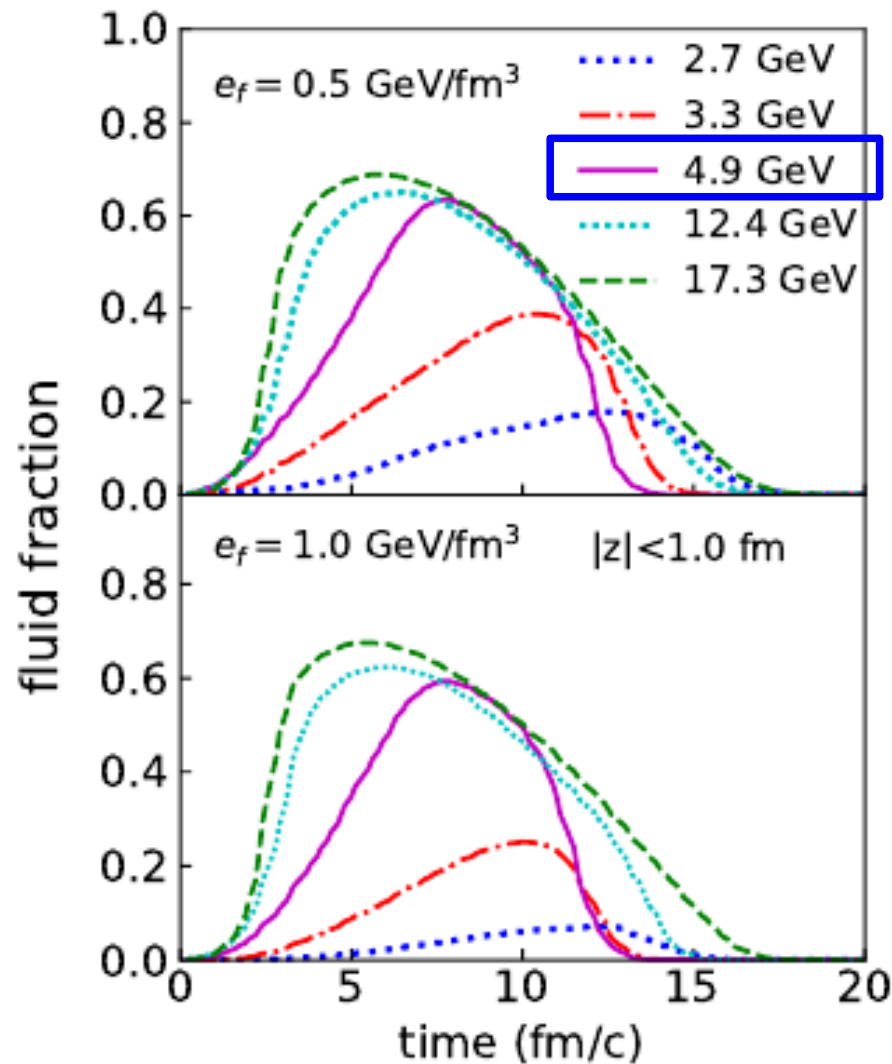


J. Steinheimer, J. Randrup, V. Koch, PRC89('14)034901.

HIC @ J-PARC-HI で「流体」は作られるか？

■ Dynamically Integrated Transport Approach

Akamatsu+('18)



「粒子相関によるハドロン間力の測定」 へのコメント

2 粒子相関関数 (Chaotic Source)

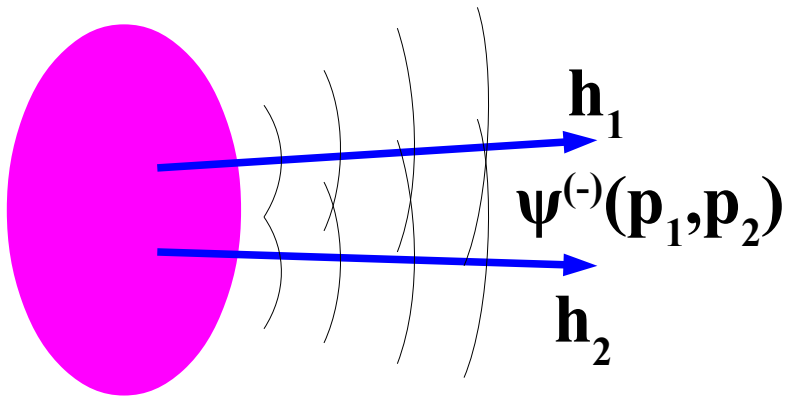
2 粒子相関関数

Koonin ('77); Pratt+('90); Lednicky+('82)

$$C(q) = \frac{E_1 E_2 dN_{12}/dp_1 dp_2}{(E_1 dN_1/dp_1)(E_2 dN_2/dp_2)}$$

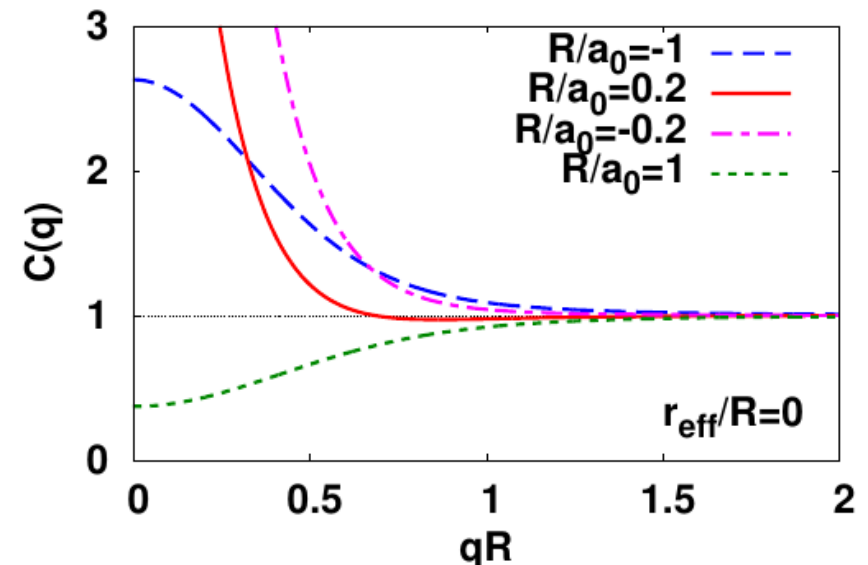
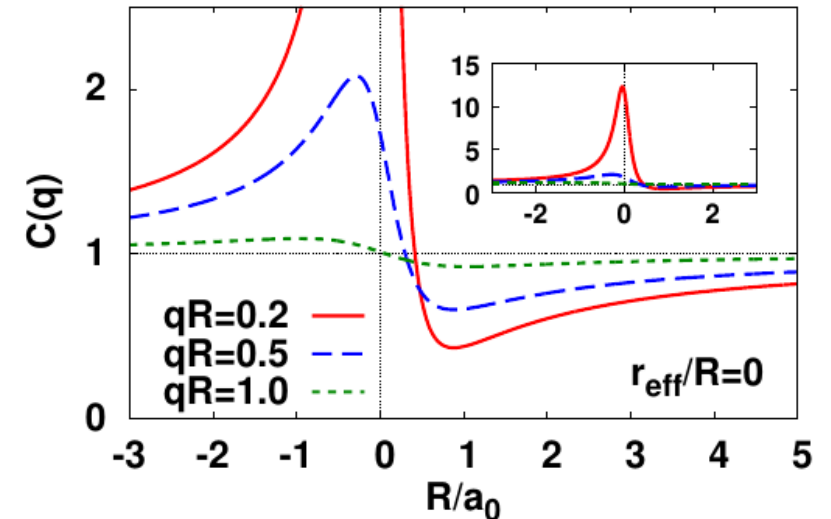
$$\simeq \int dr \underbrace{S_{12}(r)}_{\text{Source fn.}} \underbrace{|\psi_{12}^{(-)}(r, q)|^2}_{\text{int.} \rightarrow \text{rel. w.f.}}$$

q: 相対運動量



静的なガウス源

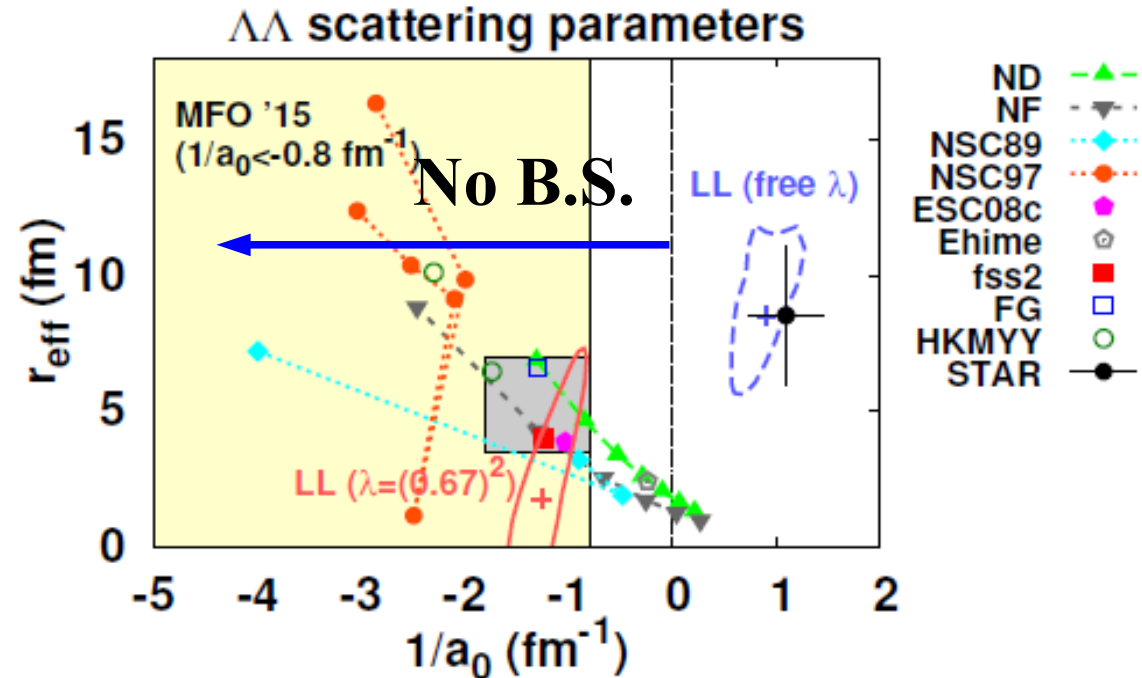
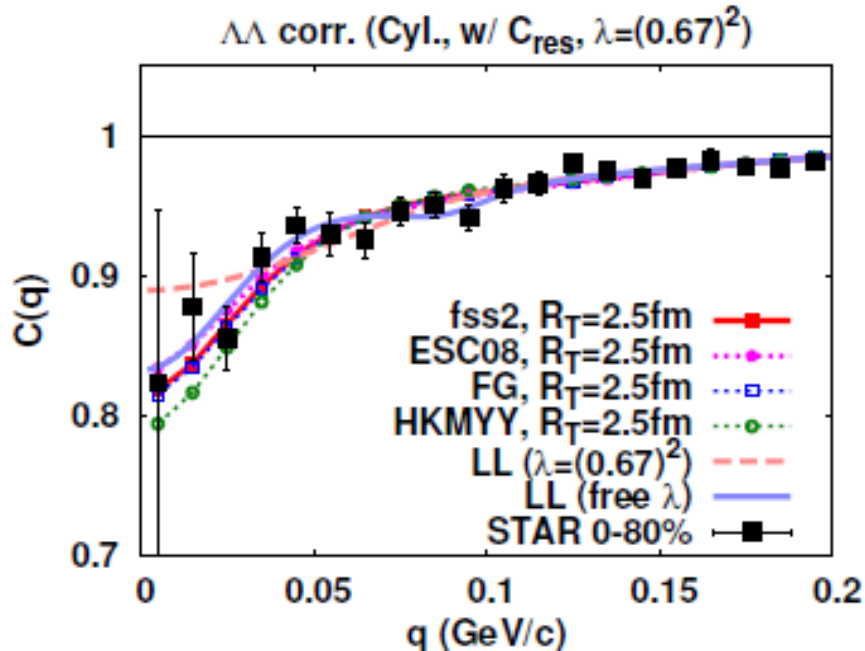
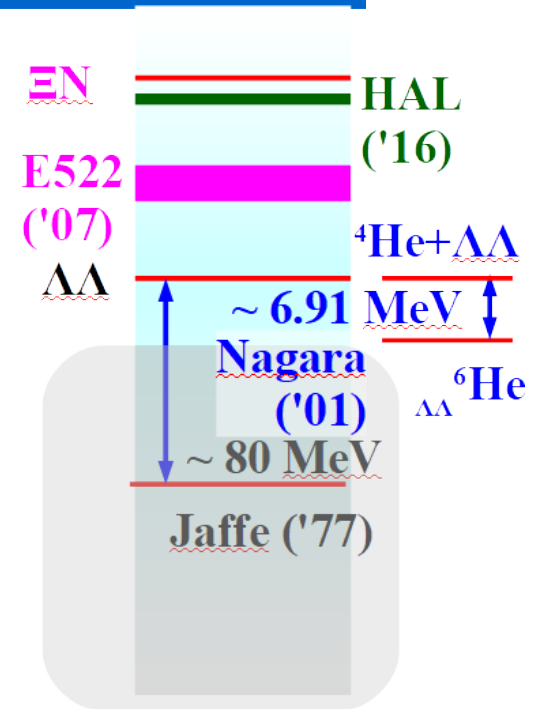
$$q \cot \delta = -1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + \mathcal{O}(q^4)$$



散乱長の大きさによって相関関数は大きく変化

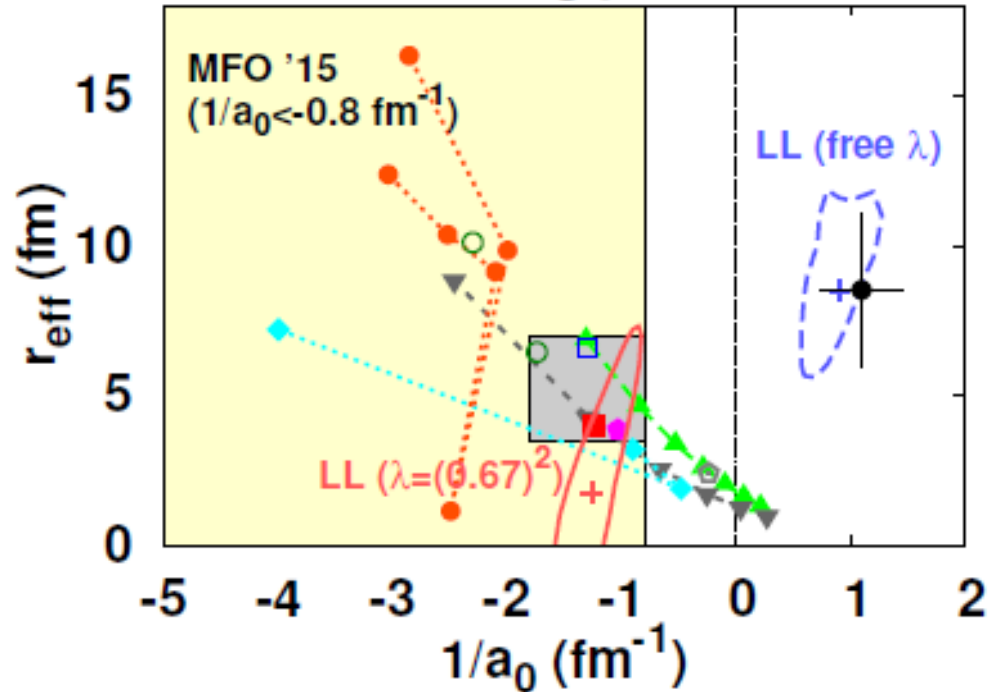
$\Lambda\Lambda$ 相関関数と $\Lambda\Lambda$ 相互作用

- H 粒子 (uuddss) は存在するか？
 - Jaffe の予言 ('77) : 深く束縛
 - Nagara イベントで否定 *Takahashi+*('01)
 - 共鳴状態？ *Yoon+* ('07); *HAL QCD* ('16)
- $\Lambda\Lambda$ 相関関数 → 弱い引力
 - 実験 *Adameczyk+* (*STAR*) ('15)
 - 理論 *Morita, Furumoto, AO* ('15); *AO+*('16)



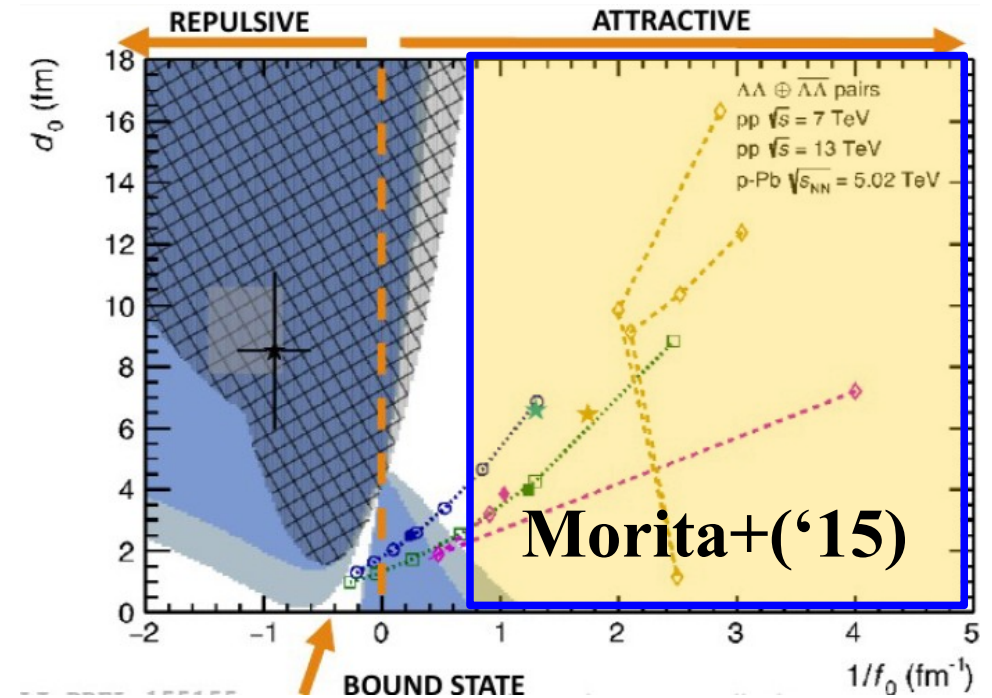
New Data from LHC-ALICE

$\Lambda\Lambda$ scattering parameters



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

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

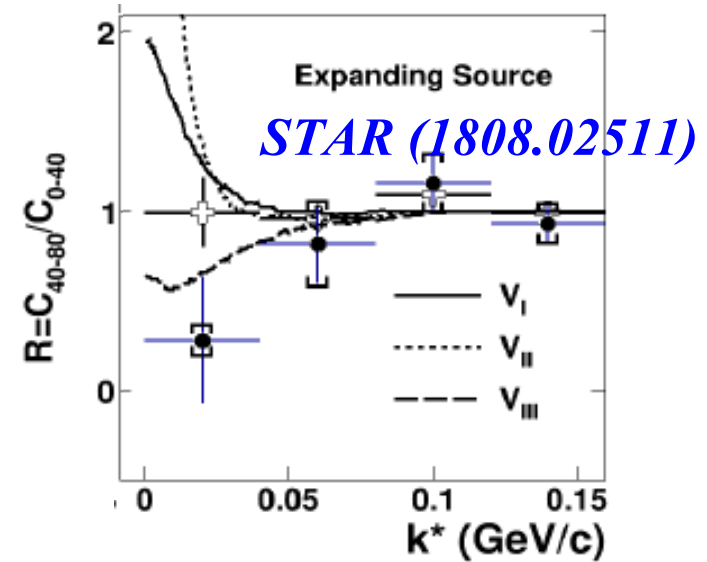
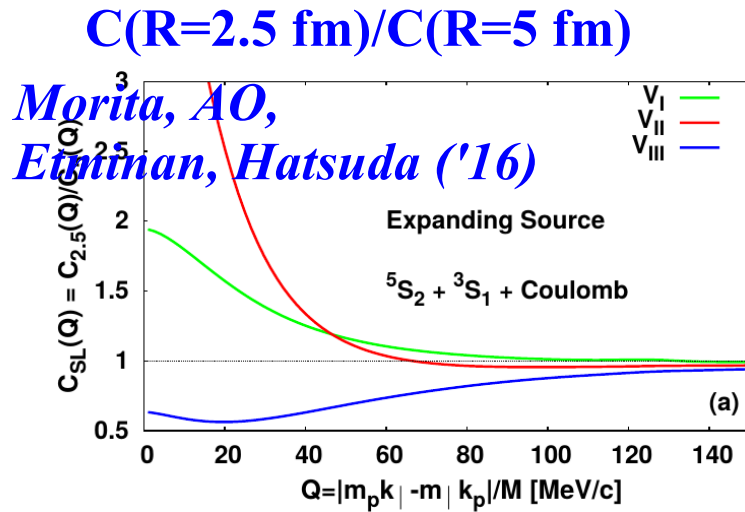


$$q \cot \delta = +1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + \mathcal{O}(q^4)$$

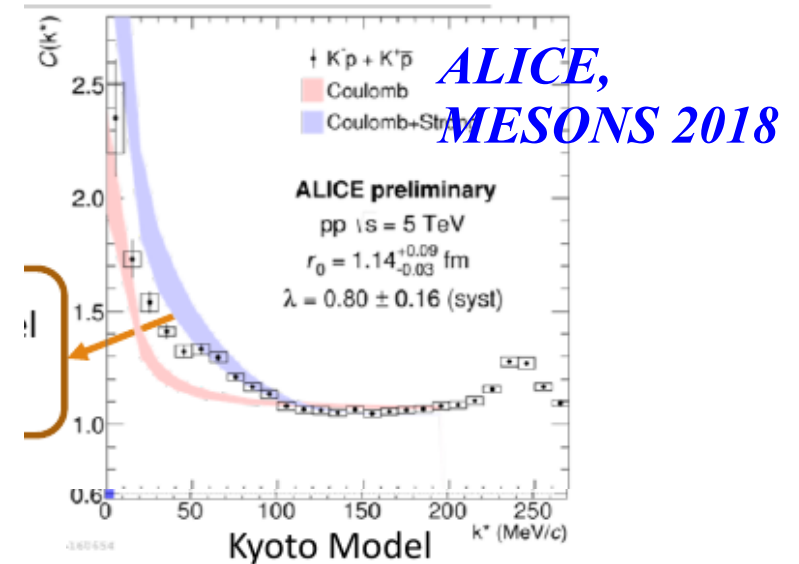
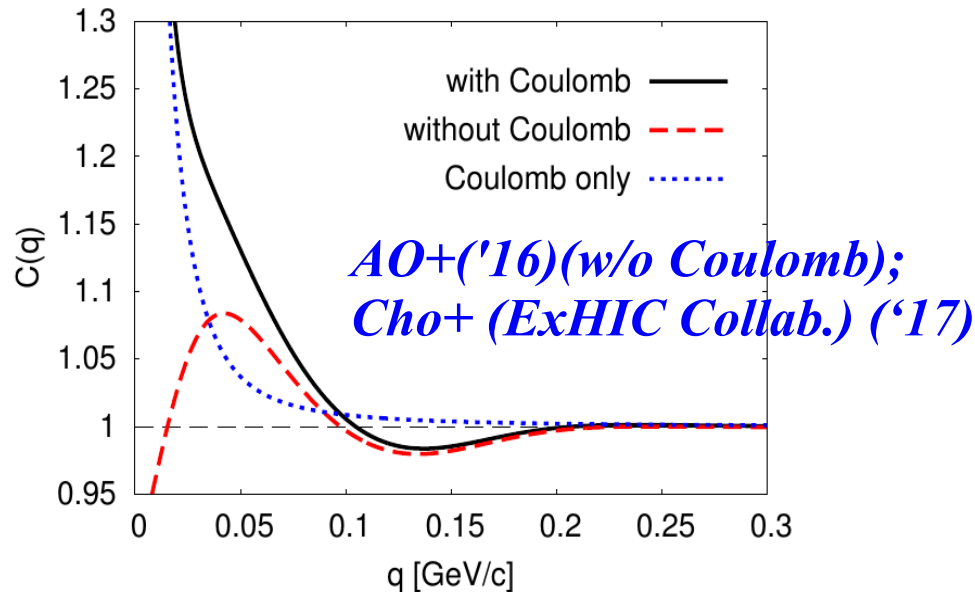
*V. M. Sarti (ALICE), MESONS 2018
ALICE Collab., in prep.*

Ω -p, K^- -p 相関

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

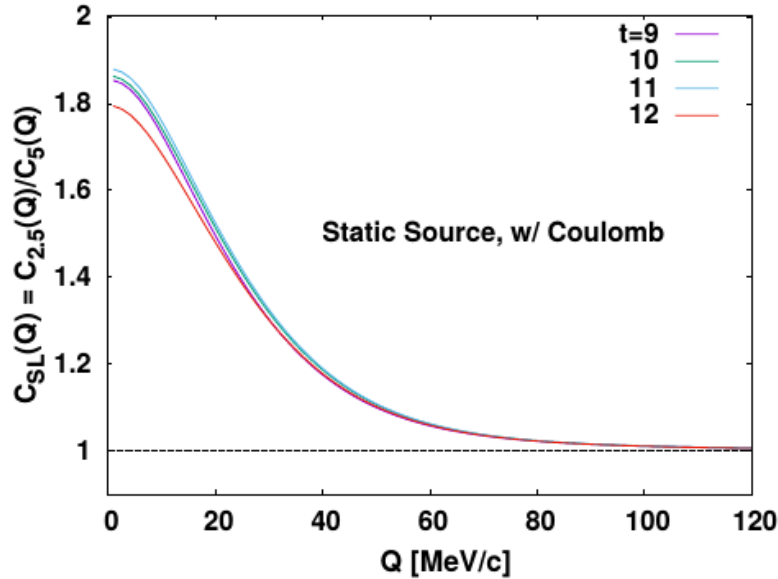


- K^- -p 相関 (束縛状態 $\Lambda(1405)$ をもつ。Chiral Unitary+Coulomb)

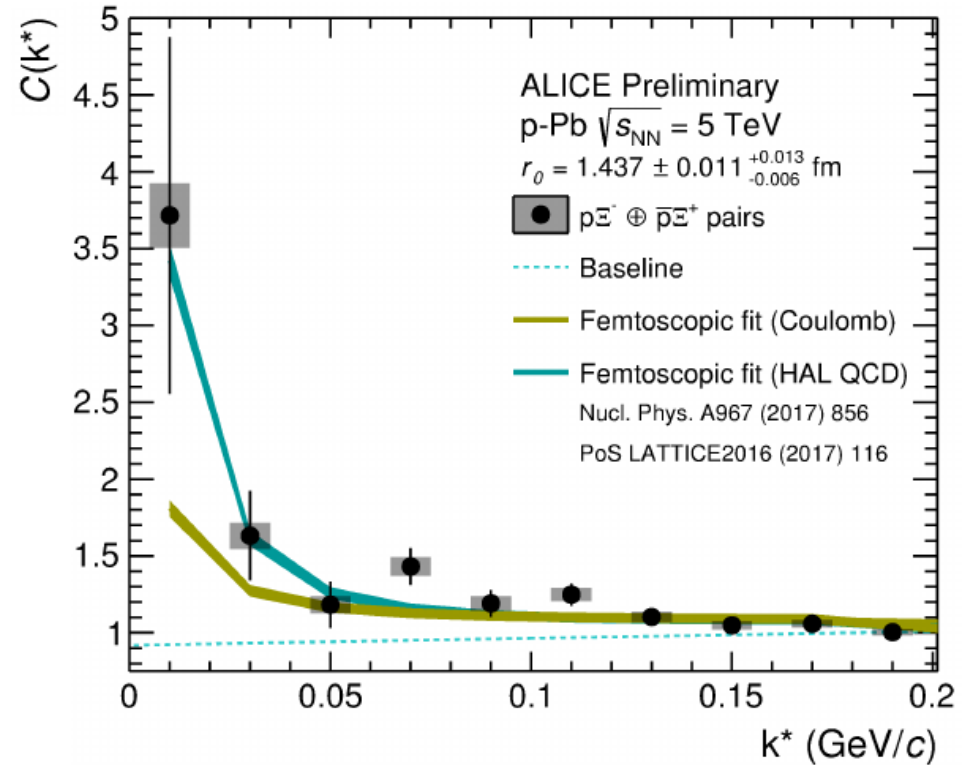


$\Xi^- p$ 相関

■ $\Xi^- p$ 相関 (ΞN 束縛状態としての H 粒子は?)



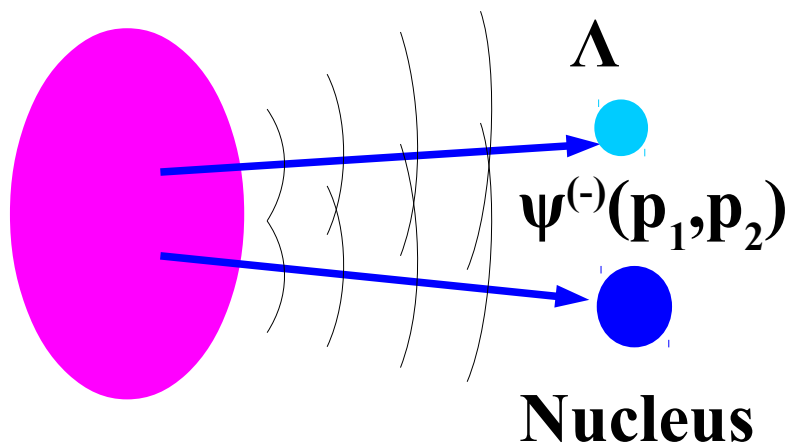
*T. Hatsuda, K. Morita, AO,
K. Sasaki, NPA967('17), 856.*



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

これまで不可能と思われてきた
不安定な粒子間の散乱が
終状態相互作用で起こっており、
相互作用が(ある程度)制限できる！

→ 一番やりたかった散乱が測れるかも
「ハイペロン-原子核散乱」



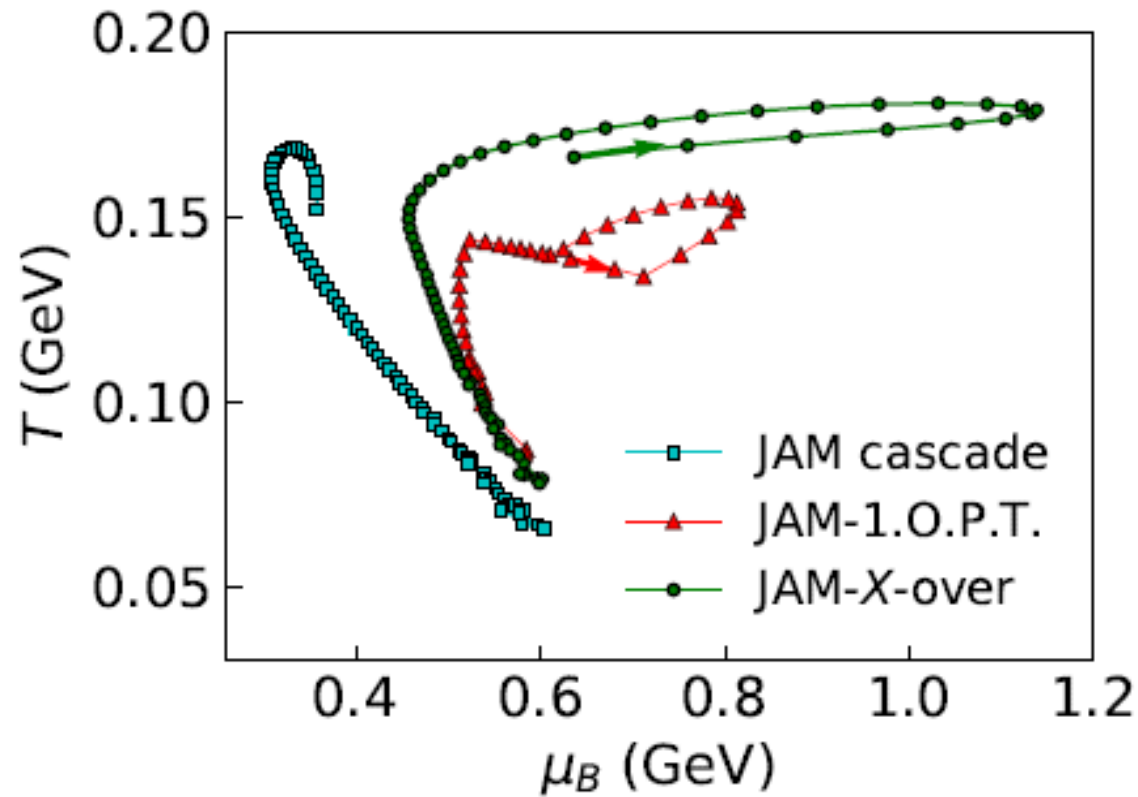
高いエネルギーでも
d, α は比較的大きな確率で
生成される。

(e.g. d/p ~ 1 % @ RHIC)
YNN 相互作用？

まとめ

- 理論的には $\sqrt{s_{NN}}=4.9$ GeV で mixed phase が現れていると考えるのが自然である。
J-PARC-HI では Onset of QGP が調べられると期待。
- J-PARC-HI では軽い原子核も多く作られるはず。
高統計・高ストレンジ率を生かして、終状態相互作用によるハイペロン - 原子核散乱 (ハイペロン - 原子核相関) の測定も期待できる。

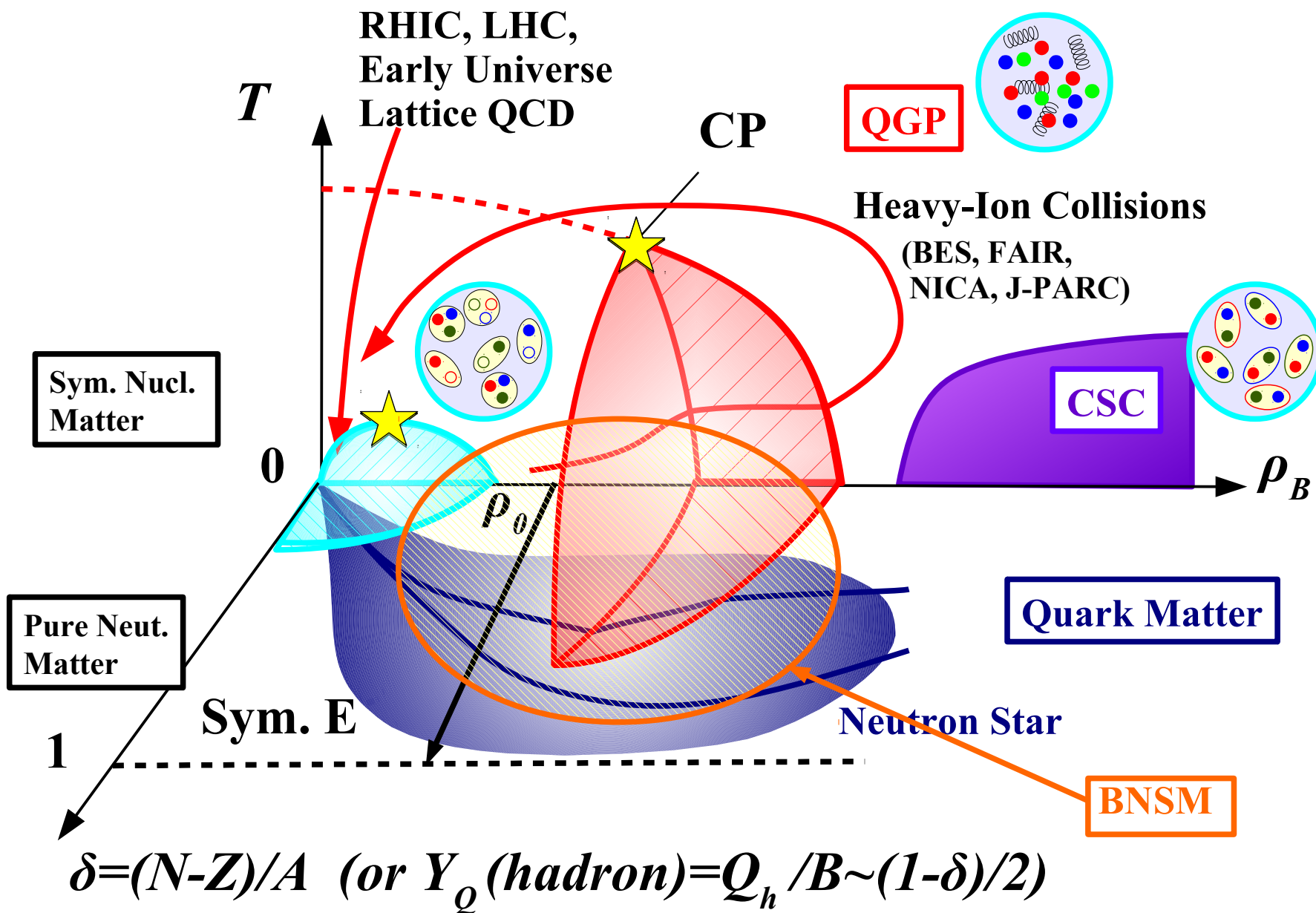
Trajectory in (μ_B, T) plane



Nara et al. ('18)

Thank you for your attention !

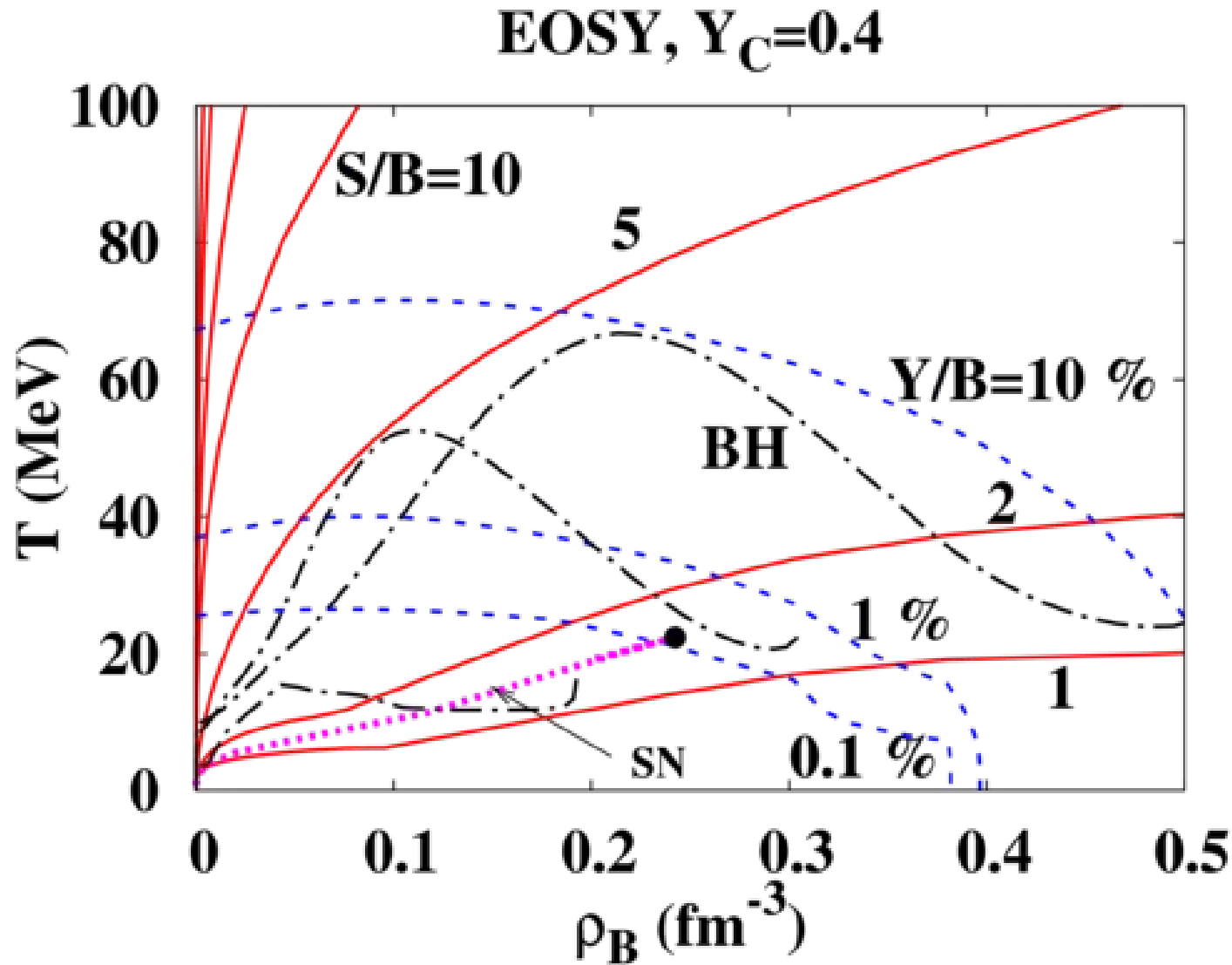
QCD 相図



AO, JPS Conf. Proc. 20 (2018), 011035

A. Ohnishi @ J-PARC-HI, 2018/12/15

(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.