

J-PARC 重イオン衝突実験と 中性子星の物理

京大基研 大西 明

実験核物理領域, 理論核物理領域, ビーム物理領域合同シンポジウム
J-PARC 重イオン衝突実験が拓く
高密度・稀現象の物理
Sep.21, 2016, JPS @ Miyazaki

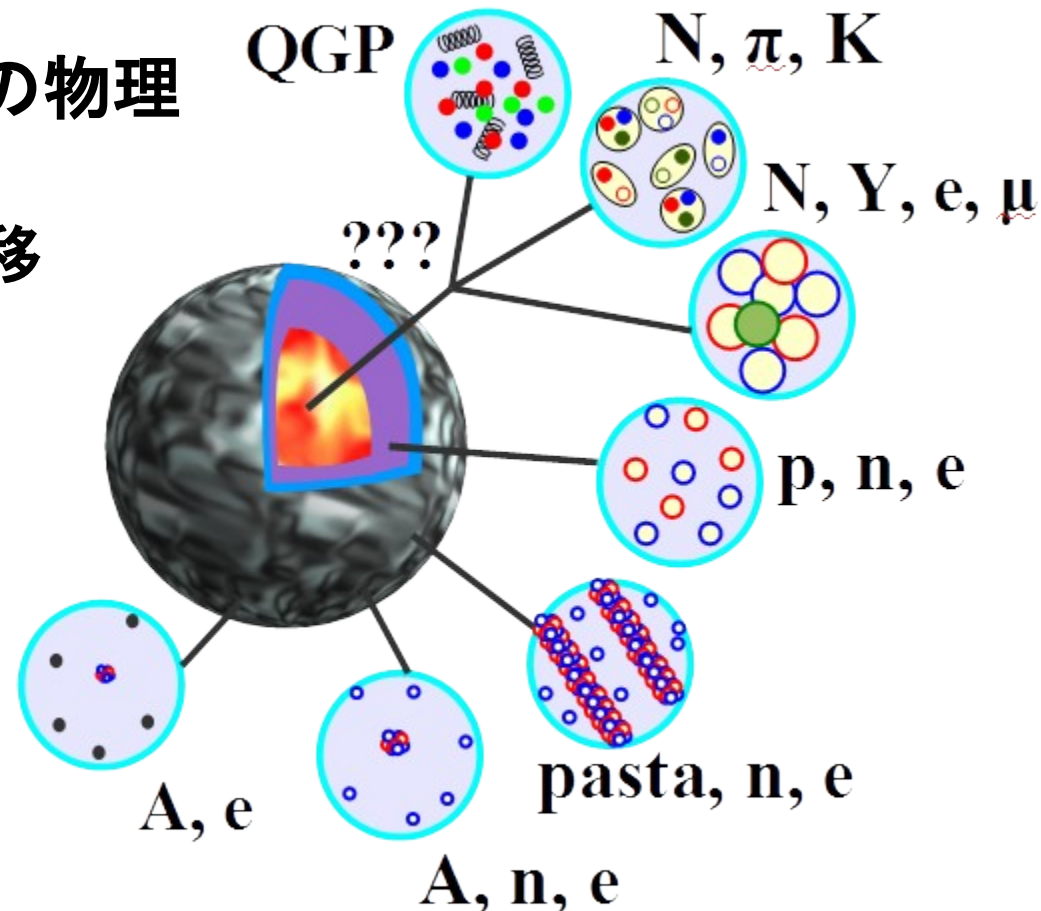
- Introduction
- J-PARC エネルギー重イオン衝突
- Hyperon puzzle と重イオン衝突
- Summary

J-PARC-HI と中性子星

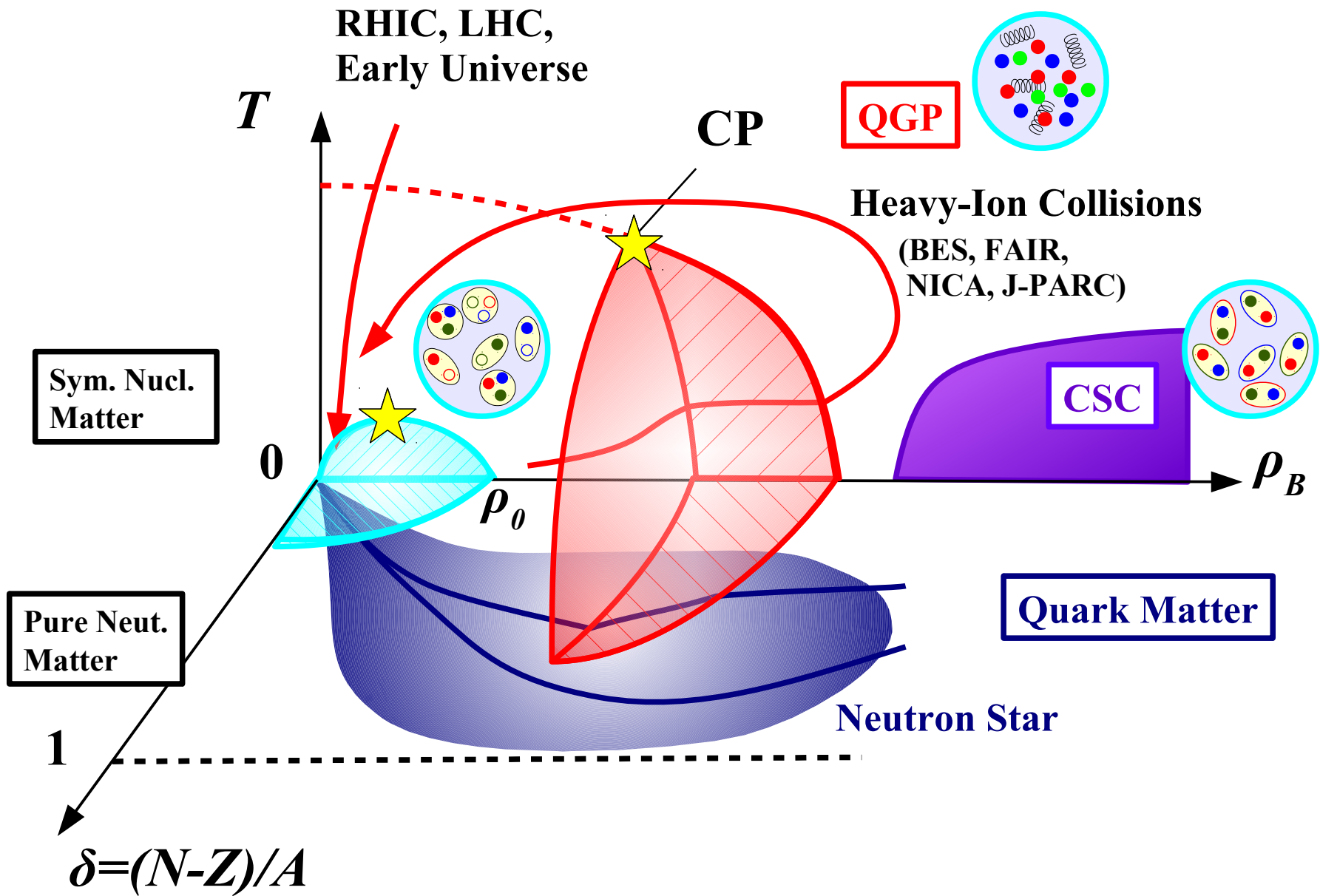
- J-PARC-HI での物理 : QCD 相転移と高密度物質 (佐甲)
 - QCD 相転移探索 : 臨界点、一次相転移 (北沢、奈良、坂口)
 - 高密度におけるハドロン物理 (安井)
 - ハイパー核物理 (田村)

- 中性子星の物理
低温・高密度・中性子過剰物質の物理

- 高密度領域:
ハイペロンパズル、QCD 相転移
- 低密度領域:
対称エネルギー、対相関
- 天体物理学:
質量・半径曲線、
中性子星振動、中性子星合体



QCD Phase Diagram

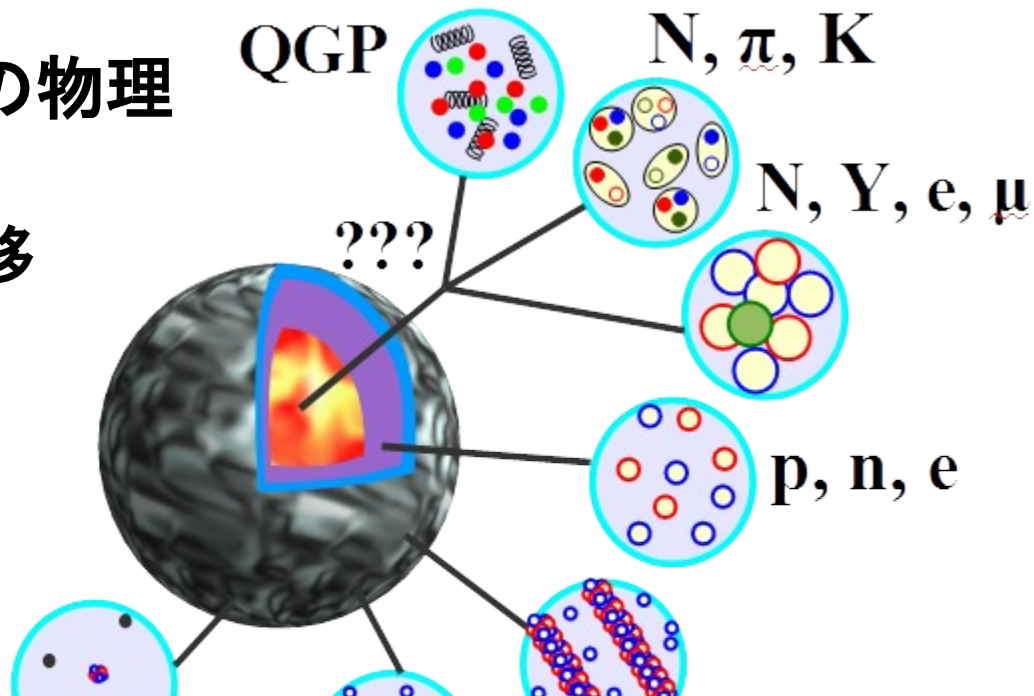


J-PARC-HI と中性子星

- J-PARC-HI での物理 : QCD 相転移と高密度物質 (佐甲)
 - QCD 相転移探索 : 臨界点、一次相転移 (北沢、奈良、坂口)
 - 高密度におけるハドロン物理 (安井)
 - ハイパー核物理 (田村)

- 中性子星の物理
低温・高密度・中性子過剰物質の物理

- 高密度領域:
ハイペロンパズル、QCD 相転移
- 低密度領域:
対称エネルギー、対相関
- 天体物理学:
質量・半径曲線、
中性子星振動、中性子星合体



直接中性子星物質は作れないが、実際の高密度状態が作れる。
→ J-PARC エネルギー重イオン衝突の大きなメリット

高密度領域での問題:ハイペロン・パズル

- ハイペロンを含む状態方程式では、重い中性子星 ($M \sim 2 M_{\odot}$) の中性子星が支えられない。

Demorest et al. (2010), Antoniadis et al. (2013)

→ 中性子星物理における最大のパズル

- 提案されている解決方法

- ハイペロンを含む3体力 (incl. 密度依存結合定数)

Bednarek et al. ('12), Jiang et al. ('12); Long et al. ('12); Yamamoto et al. ('14); Lonardonì et al. ('15); Tsubakihara et al. ('13), ...

- 有限密度におけるバリオンの変化

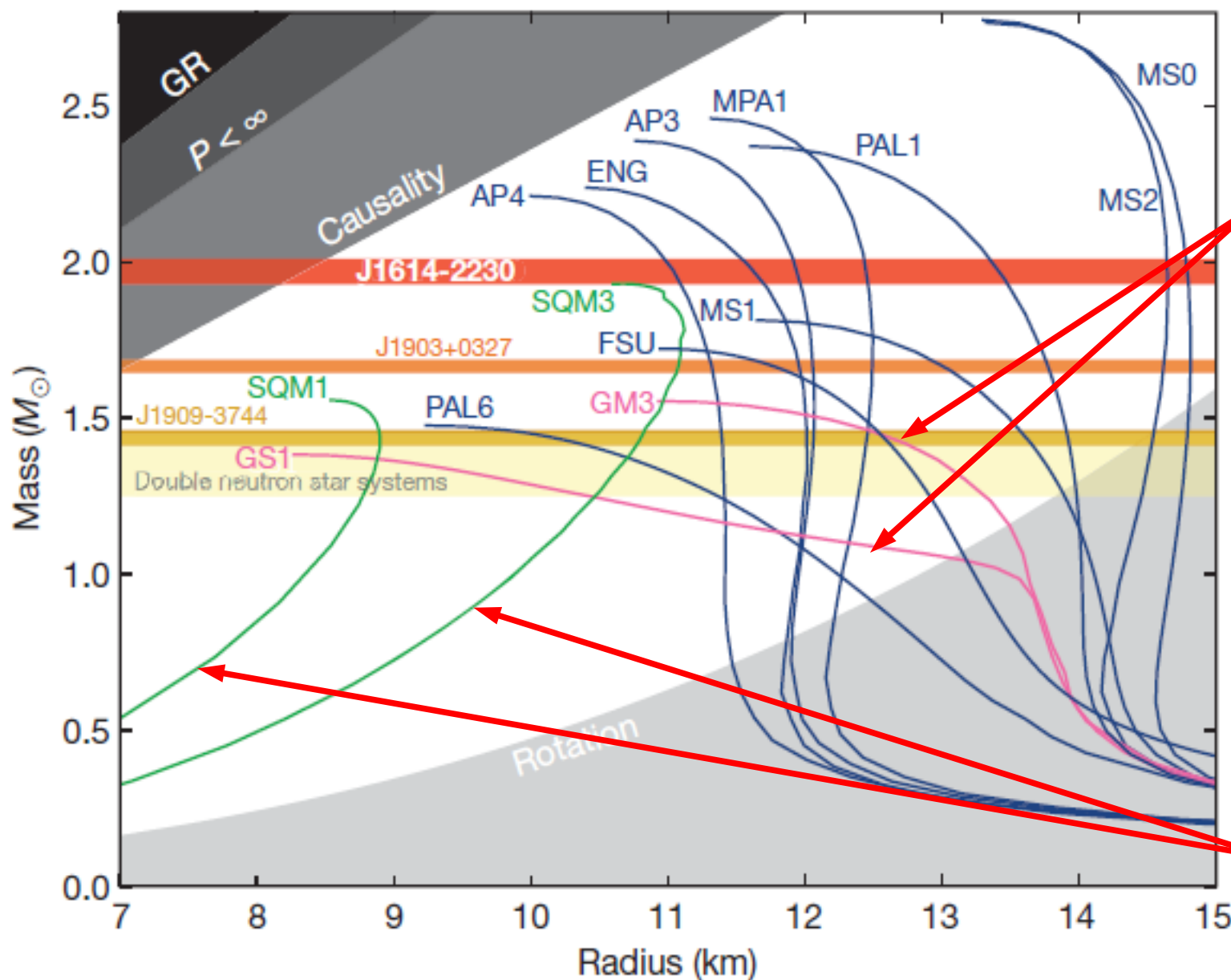
T. Miyatsu et al. ('13), ...

- クォーク物質への相転移

Bonanno et al.('12); Masuda et al. ('13); Bejger et al.('16), ...

Massive NS Puzzle (or Hyperon Crisis)

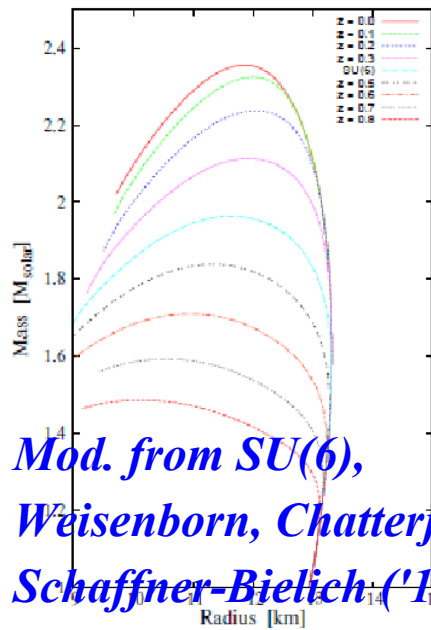
Demorest et al., *Nature* 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).



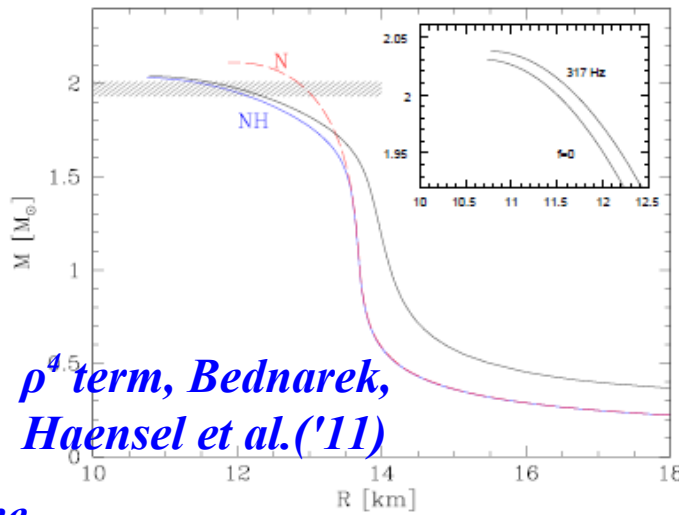
EOS with hyperons or Kaons

Quark matter EOS

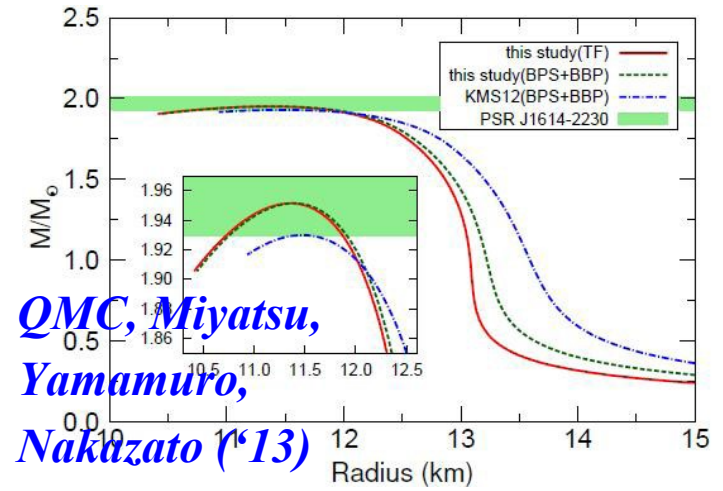
Massive Neutron Stars with Hyperons



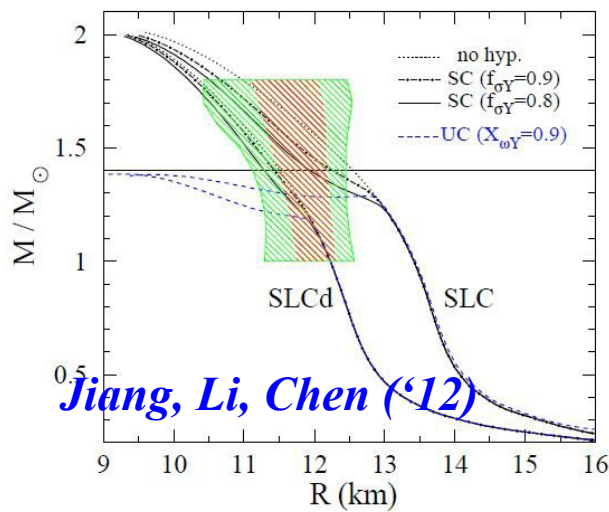
Mod. from SU(6),
Weisenborn, Chatterjee,
Schaffner-Bielich ('11)



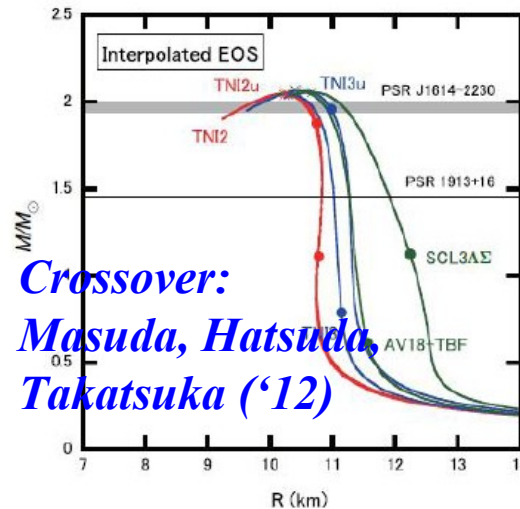
ρ^4 term, Bednarek,
Haensel et al. ('11)



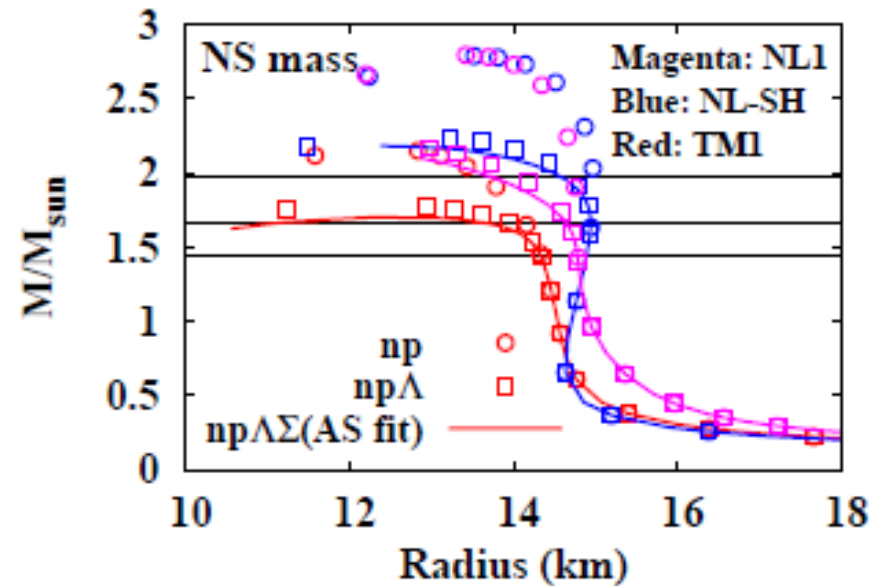
QMC, Miyatsu,
Yamamuro,
Nakazato ('13)



Jiang, Li, Chen ('12)



Crossover:
Masuda, Hatsuda,
Takatsuka ('12)



Tsubakihara, Harada, AO, arXiv:1402.0979

高密度領域での問題:ハイペロン・パズル

- ハイペロンを含む状態方程式では、重い中性子星 ($M \sim 2 M_{\odot}$) の中性子星が支えられない。

Demorest et al. (2010), Antoniadis et al. (2013)

→ 中性子星物理における最大のパズル

- 提案されている解決方法

- ハイペロンを含む3体力 (incl. 密度依存結合定数)

Bednarek et al. ('12), Jiang et al. ('12); Long et al. ('12); Yamamoto et al. ('14); Lonardonì et al. ('15); Tsubakihara et al. ('13), ...

- 有限密度におけるバリオンの変化

T. Miyatsu et al. ('13), ...

- クォーク物質への相転移

Bonanno et al.('12); Masuda et al. ('13); Bejger et al.('16), ...

- 問題点

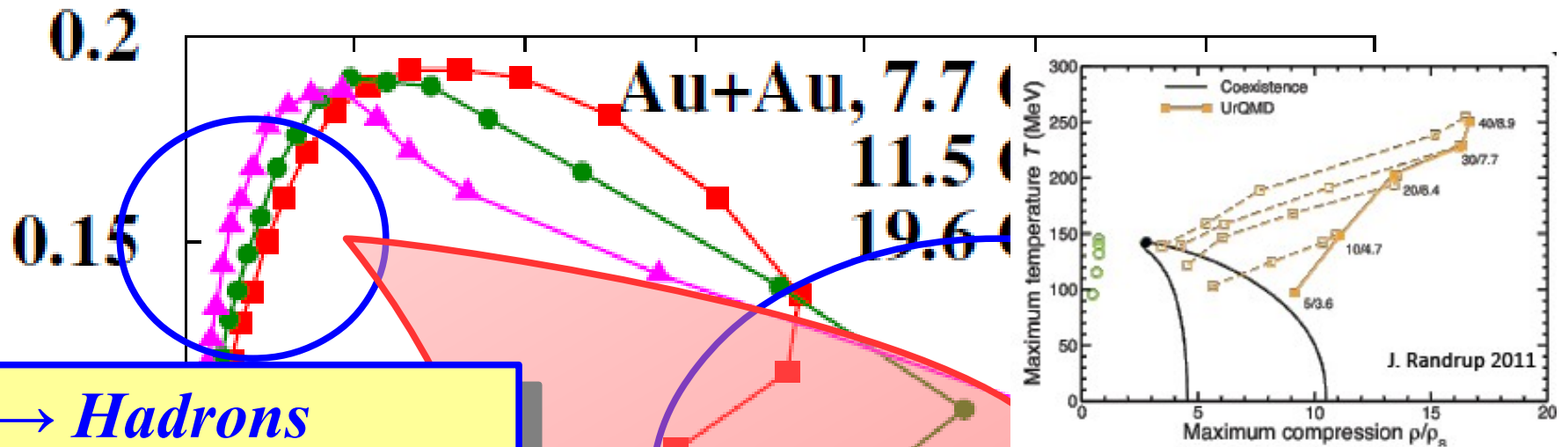
- 導入されている3体力・密度依存性を確かめるには？
- QCD 相転移は中性子星コア密度で起こるのか？

実験的検証が必要！ → *J-PARC-HI* (?)

- Introduction
- J-PARC エネルギーの重イオン衝突で探る有限密度 QCD 相転移 (c.f. 奈良氏講演)
- Hyperon puzzle と重イオン衝突
 - 有限密度 QCD 相転移 : Crossover or 1st order ?
 - 高密度領域におけるハイペロンポテンシャルと3バリオン力
 - J-PARC-HI への期待
- まとめ

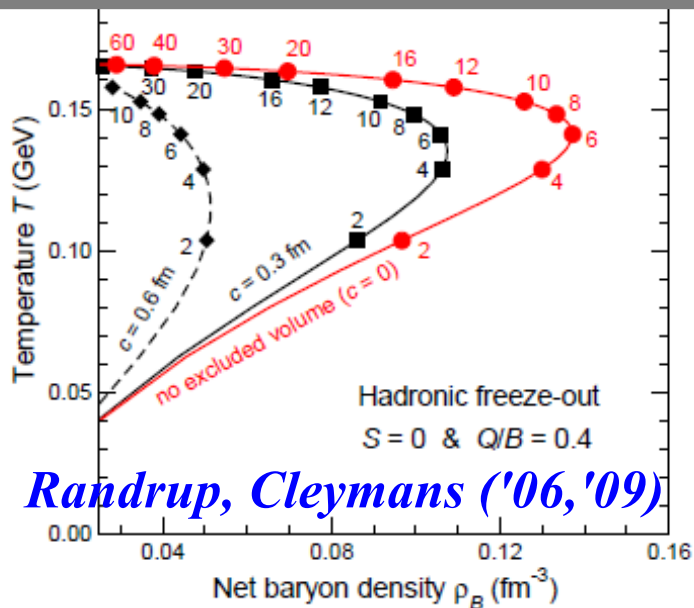
J-PARC エネルギーの重イオン衝突で探る 有限密度 *QCD* 相転移

Two ways to probe QCD phase transition



QGP \rightarrow Hadrons
Final State Observables
Cumulants, ...

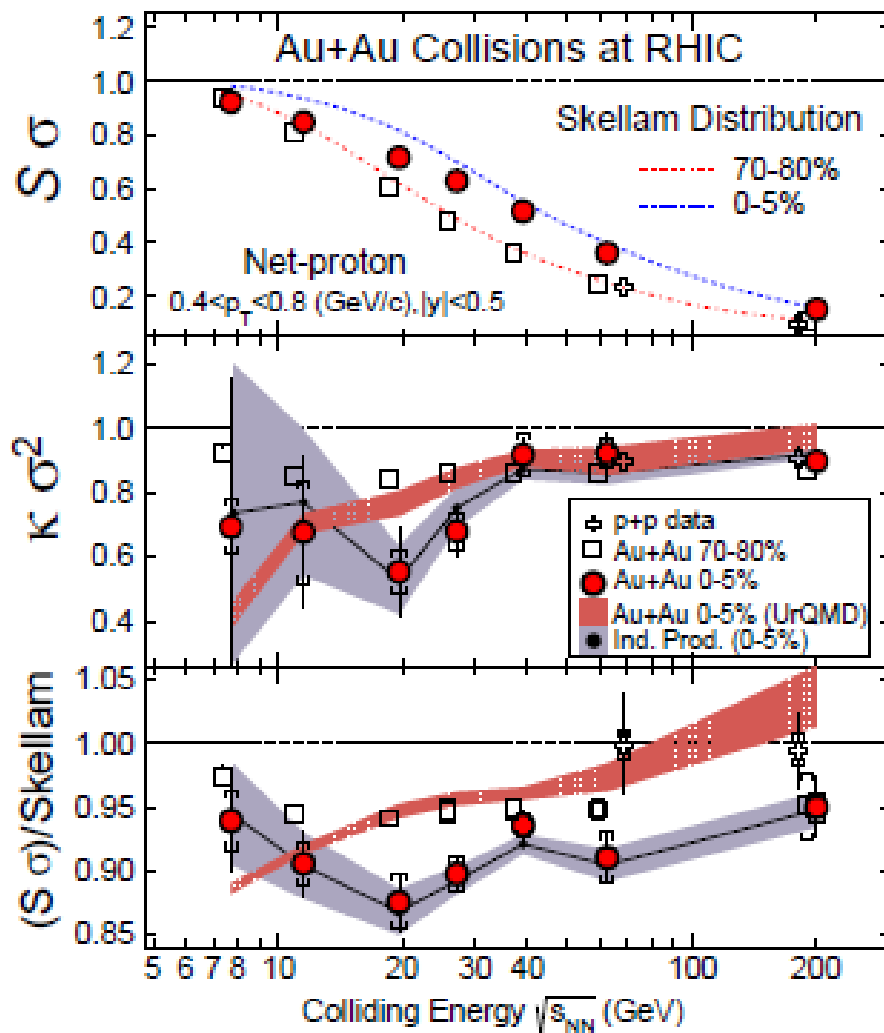
Hadrons \rightarrow QGP
Early Stage Observables
Caution: (Partial) Equilibration
is necessary!



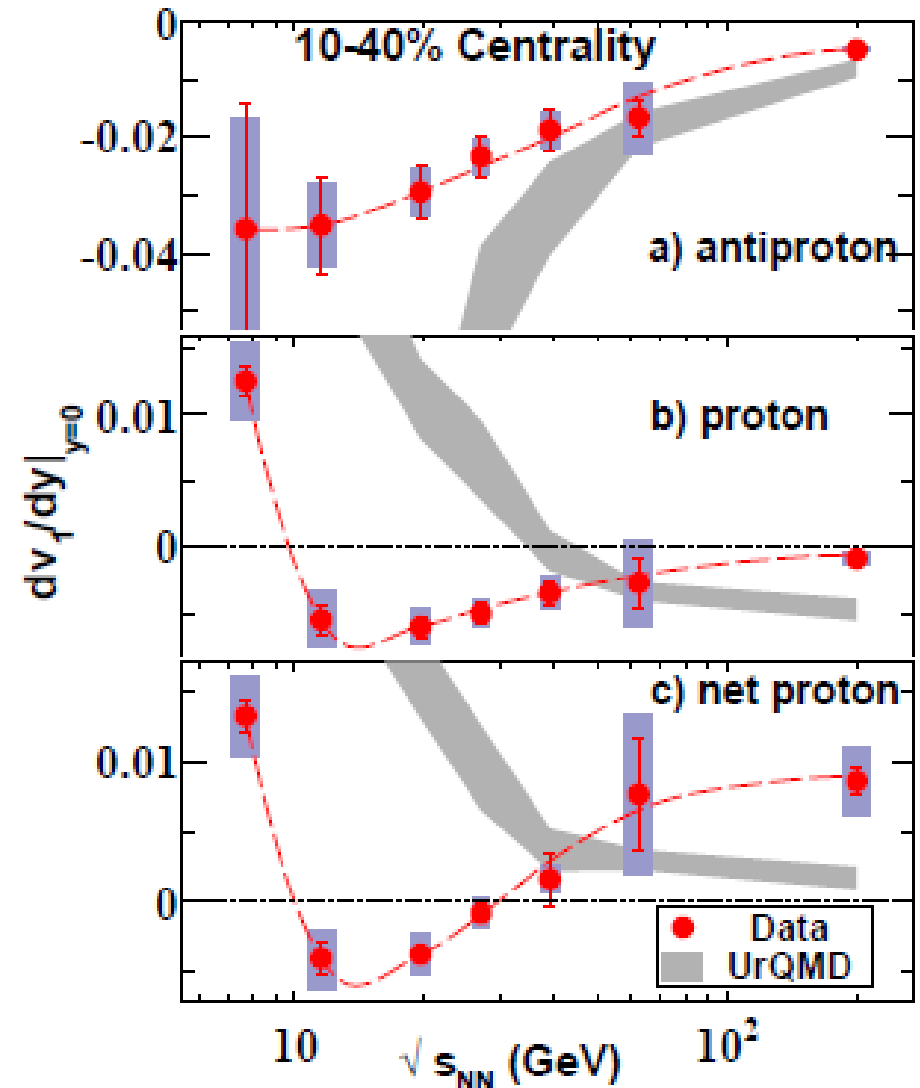
4 6 8 10 12 14

ρ_B/ρ_0

Net-Proton Number Cumulants & Directed Flow

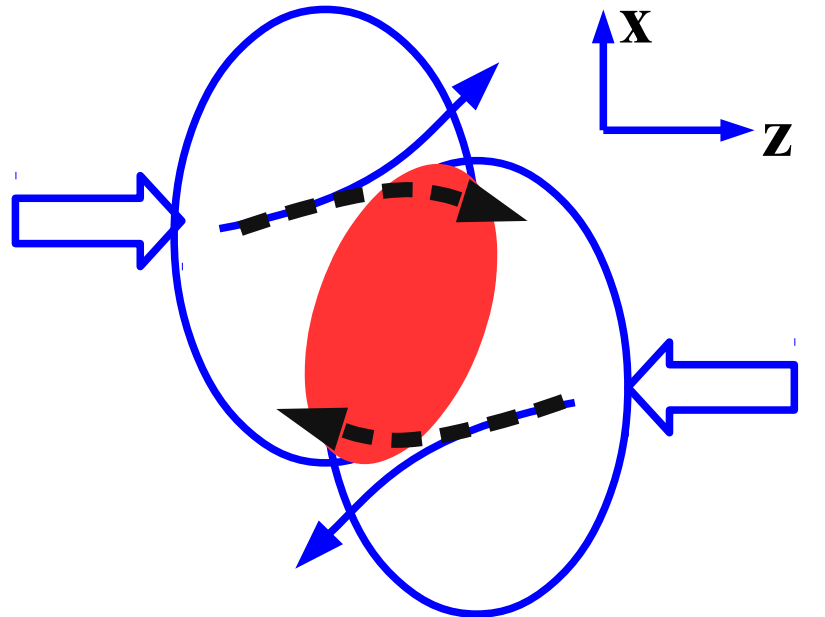


STAR Collab. PRL 112('14)032302

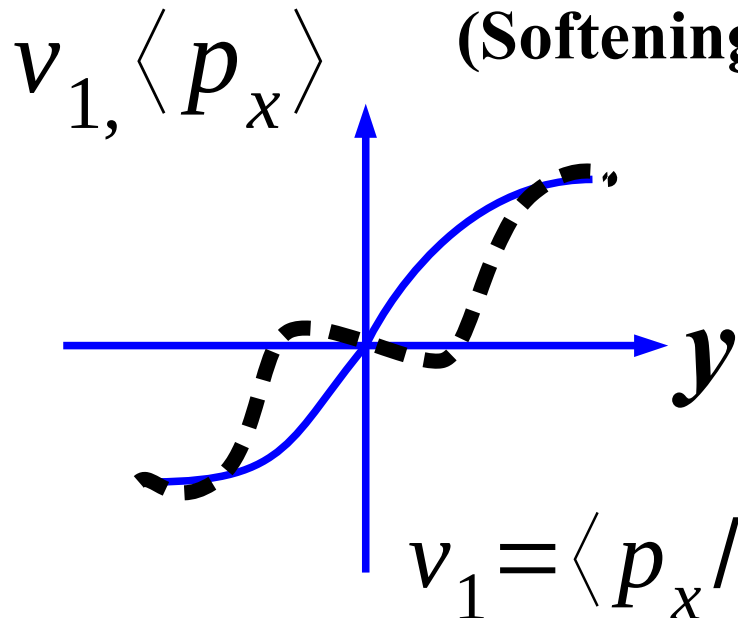


STAR Collab., PRL 112('14)162301.

What is directed flow ?



Attraction
(Softening)



- v_1 or $\langle p_x \rangle$ as a function of y is called directed flow.
- Created in the overlapping stage of two nuclei
→ Sensitive to the EOS in the early stage.
- Becomes smaller at higher energies.

How can we explain non-monotonic dependence of dv_1/dy ?
→ *Softening or Geometry*

Softening Effects via Attractive Orbit Scattering

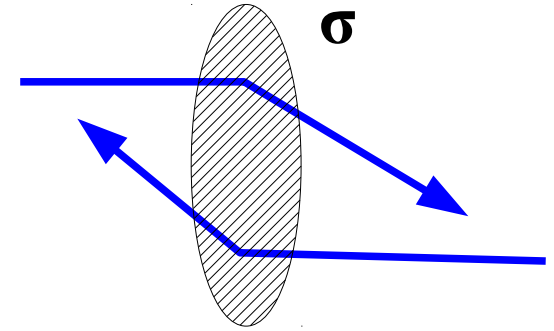
- Attractive orbit scattering simulates softening of EOS

P. Danielewicz, S. Pratt, PRC 53, 249 (1996)

H. Sorge, PRL 82, 2048 (1999).

$$P = P_f + \frac{1}{3TV} \sum_{(i,j)} (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{r}_i + \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{r}_j)$$

(Virial theorem)



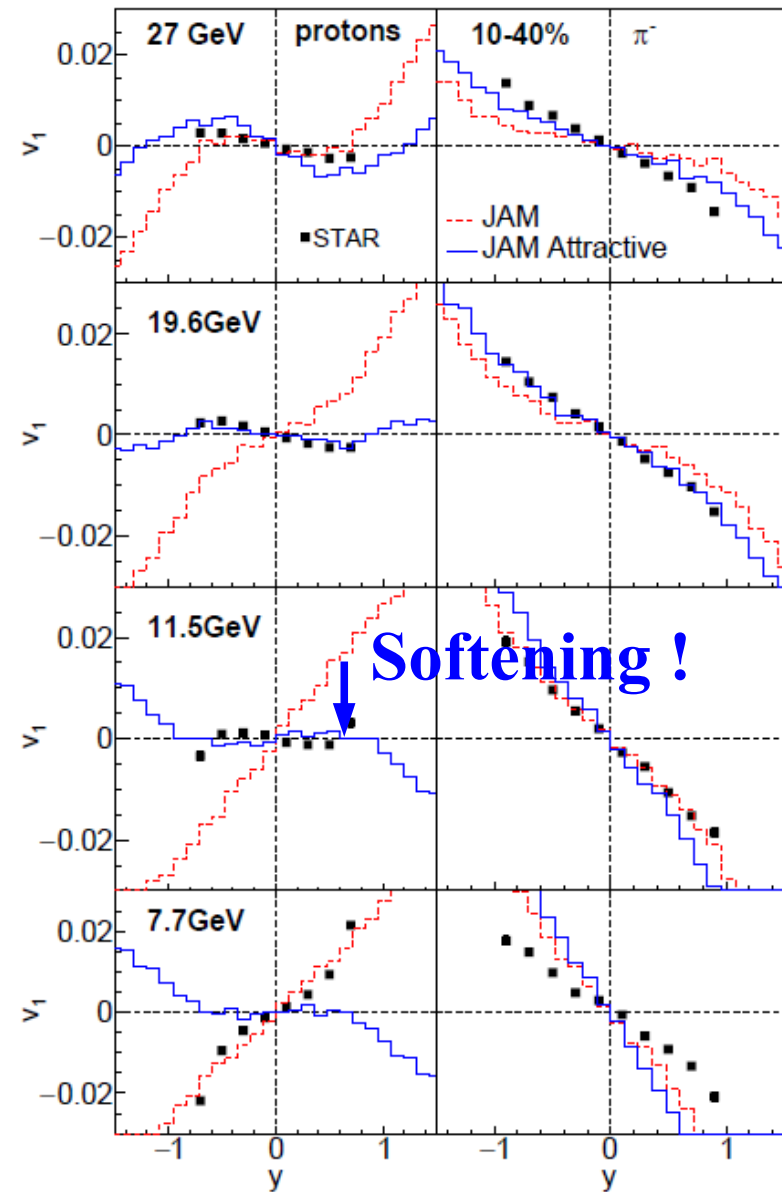
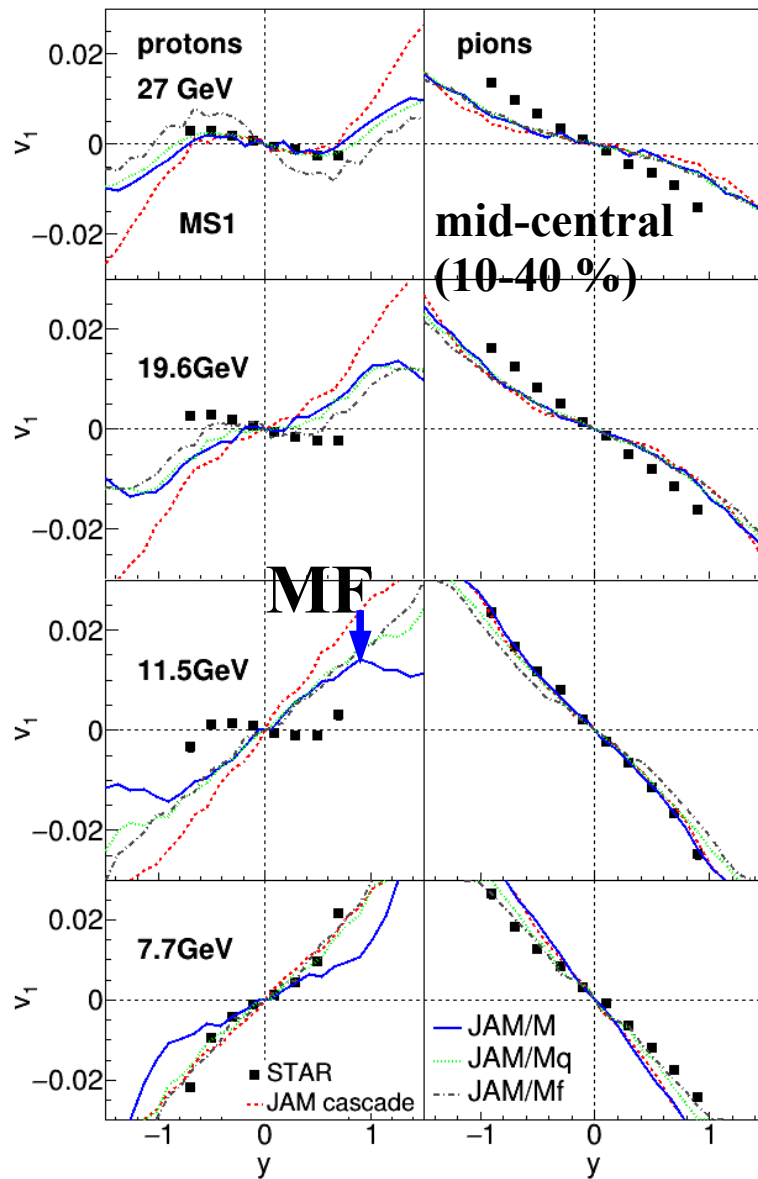
- With attractive orbit, particle trajectories are bended toward denser region.

→ *Attractive orbit scattering simulates time evolution with softer EOS !*

Let us examine the EOS softening effects, which cannot be explained in hadronic mean field potential, by using attractive orbit scatterings !

Y. Nara, H. Niemi, AO, H. Stöcker, PRC, in press; arXiv:1601.07692 [hep-ph]

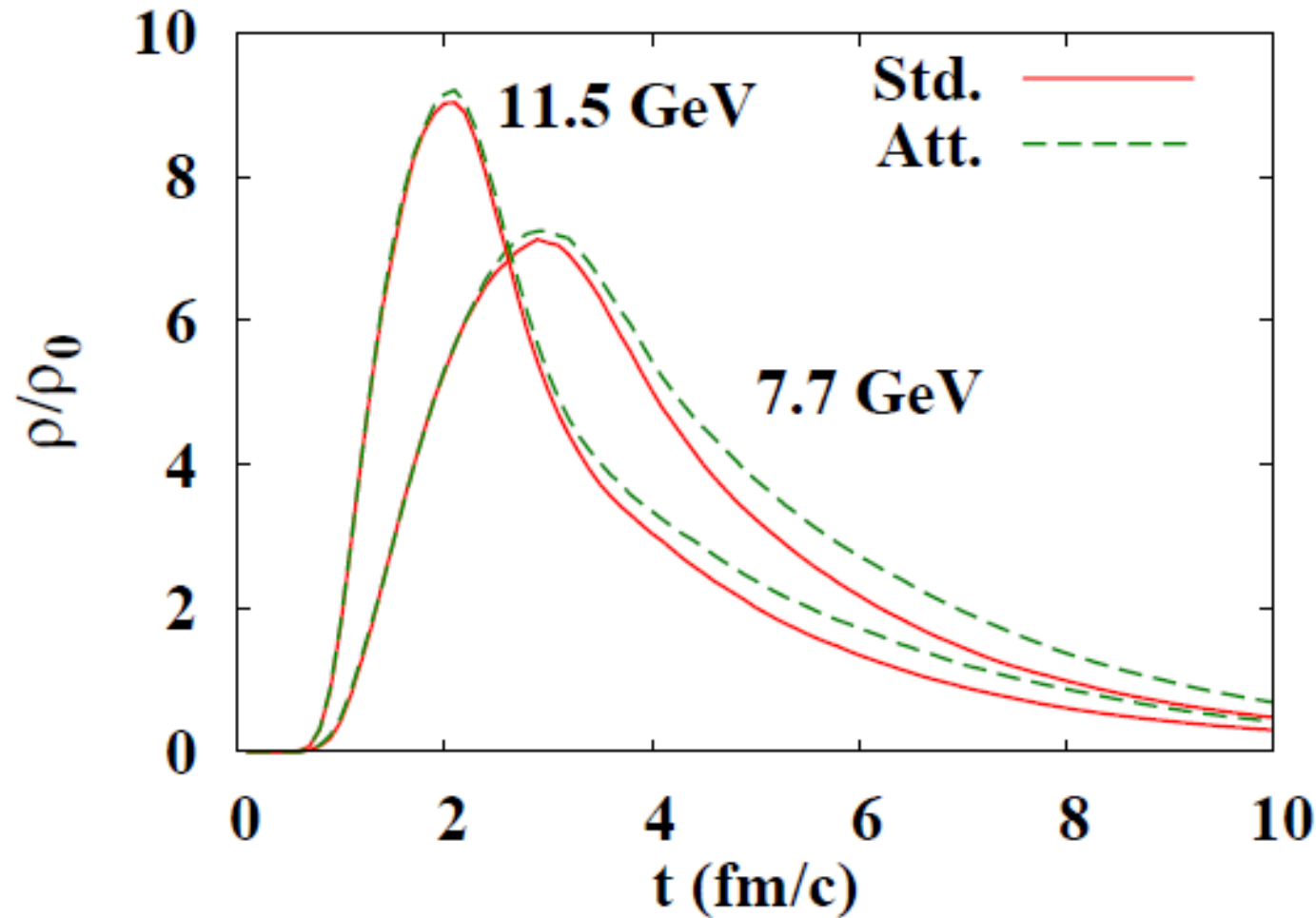
Directed Flow with Attractive Orbits



Y. Nara, AO, arXiv:1512.06299 [nucl-th] (QM2015 proc.)

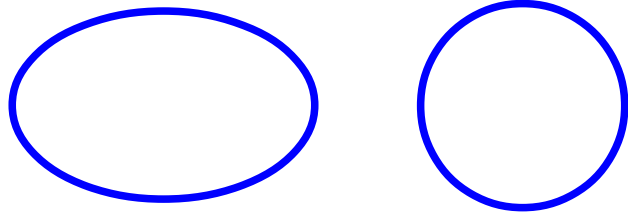
Nara, Niemi, AO, Stöcker ('16)

Time-dependence of density

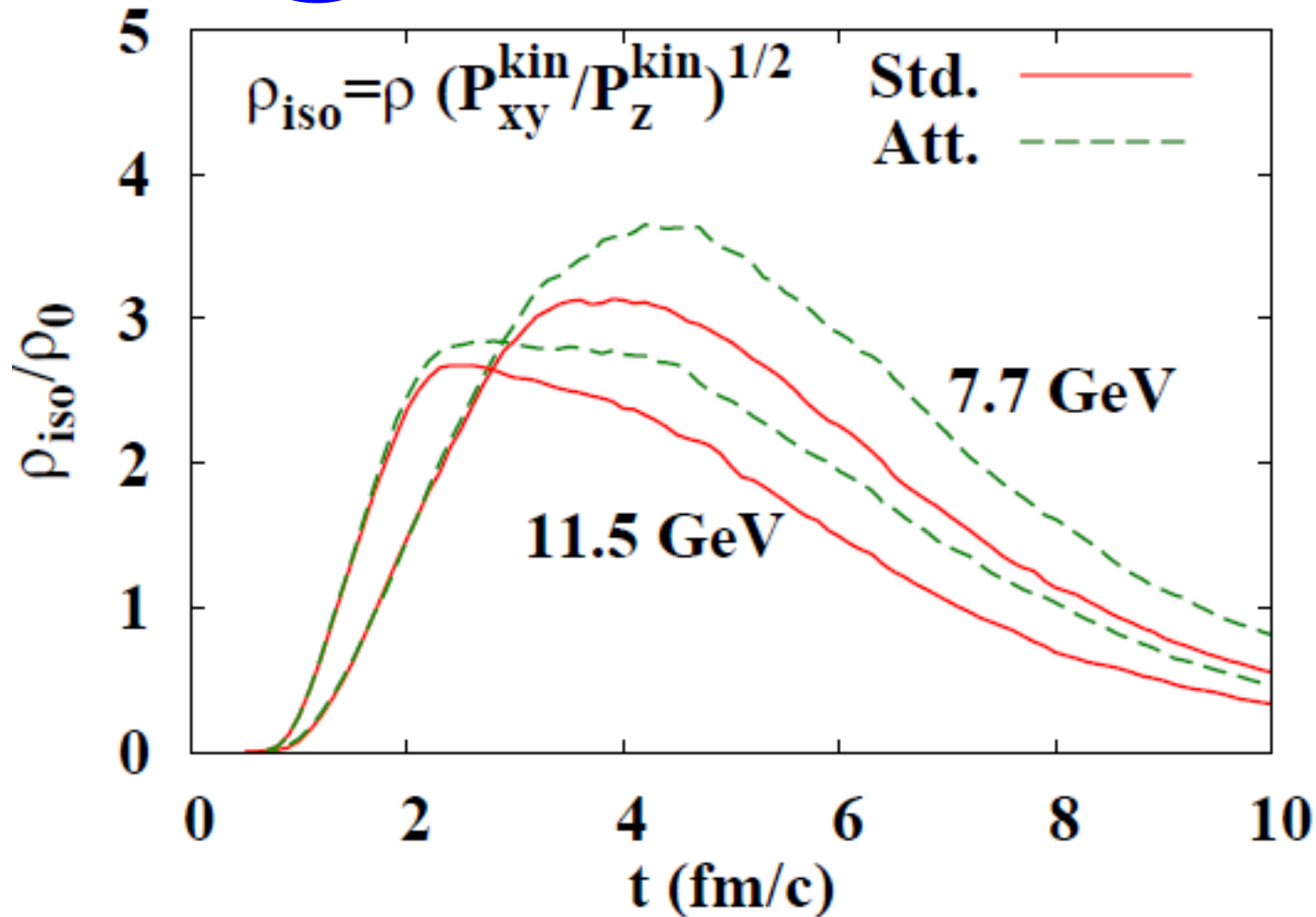


Gaussian smeared,
CM ($x,y,z=0$),
Collided/created hadrons,
incl. those in formation time

Time-dependence of density



Anisotropy correction
of the Fermi Sphere



J-PARC エネルギーでの QGP 探索

- J-PARC エネルギー ($\sqrt{s_{NN}}=3-10$ GeV) において、様々なシグナルが不思議な振る舞いを見せている。
- Directed flow のエネルギー依存性は高密度状態で EOS の softening が起こっていることを示唆している。
- ハドロン自由度のカスケードモデルでは不十分であり、Cascade-Hydro Integrated model の開発が必要と思われる (c.f. 奈良さんの講演)。
- 相転移の同定には高密度領域の EOS と揺らぎに敏感な物理量を見つけることが必須 (c.f. 坂口さん、北沢さんの講演)。

Hyperon puzzle と重イオン衝突

中性子星における QCD 相転移

クォーク物質で支える中性子星コア

- 一次相転移: 十分硬いハドロン物質 EOS が必要
→ 中性子星半径は $R \sim (14-16)$ km
(観測データは $R \sim (11-12)$ km @ $M = 1.4 M_{\odot}$ を支持)

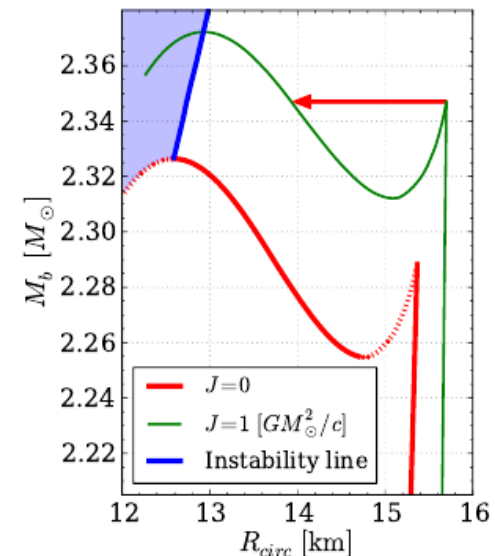
L. Bonanno, A. Sedrakian, *Astron. Astrophys.* 539 (2012) A16; M. Bejger, D. Blaschke, P. Haensel, J. L. Zdunik, M. Fortin, arXiv:1608.07049.

- クロスオーバー: なめらかな転移により硬化
→ Directed flow との整合性は?

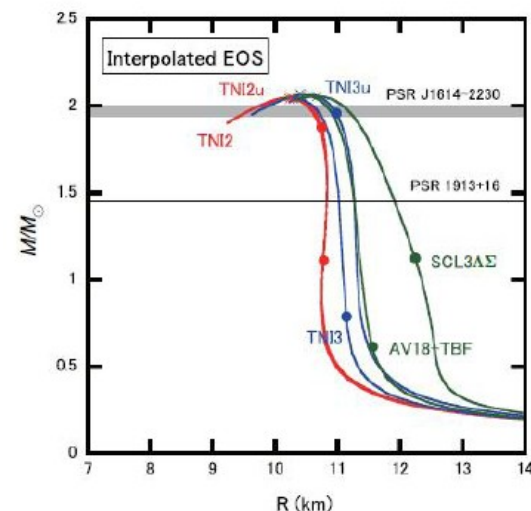
K. Masuda, T. Hatsuda, T. Takatsuka, *ApJ* 764 (2013) 12; *PTEP* 2013 (2013) 073D01.

2つの可能性

- ハドロン物質で支える
→ ハイペロンを含む3体力
 - クォーク物質で支える
→ 相境界のアイソスピン依存性
- J-PARC-HI による検証へ!**



Bejger, Blaschke, Haensel, Zdunik, Fortin, 1608.07049v2



Masuda, Hatsuda, Takatsuka ('13)

ハイペロンを含む3体力

- 3核子力に加えて、ハイペロンを含む普遍的3体力が必要

Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02)

- 3核子力 = state of the art

*Kohno('10); Heidenbauer+('13);
Doi+(HALQCD,'12).*

- ハイペロンを含む3体力 = 現象論

- Quant. MC study: 強い YNN 斥力

Lonardon et al.('14)

- Multi Pomeron 交換:
BBB で共通、重イオン散乱から強度

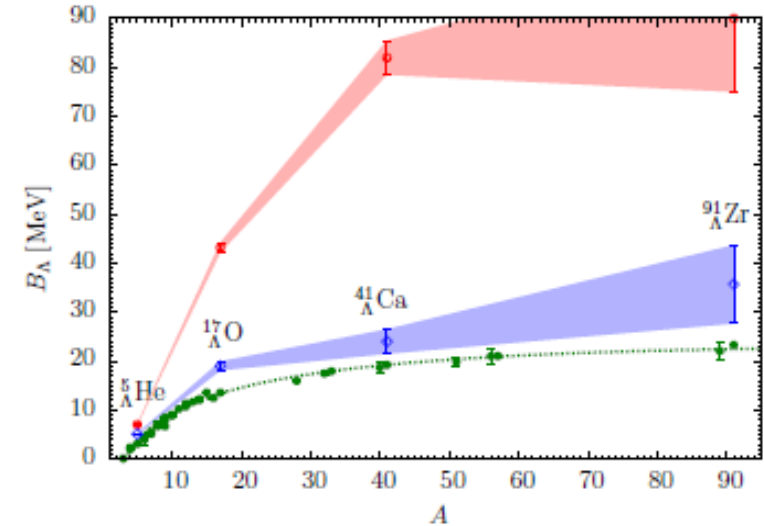
Yamamoto, Furumoto, Yasutake, Rijken ('14)

- Quark Meson Coupling: Ξ の重要性

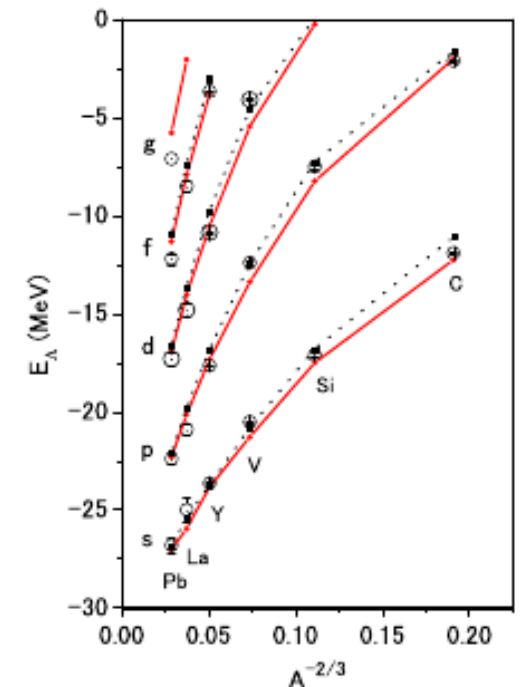
Miyatsu et al.('13); Thomas.

- Quark model 3 体力 : norm kernel

Nakamoto, Suzuki ('16).



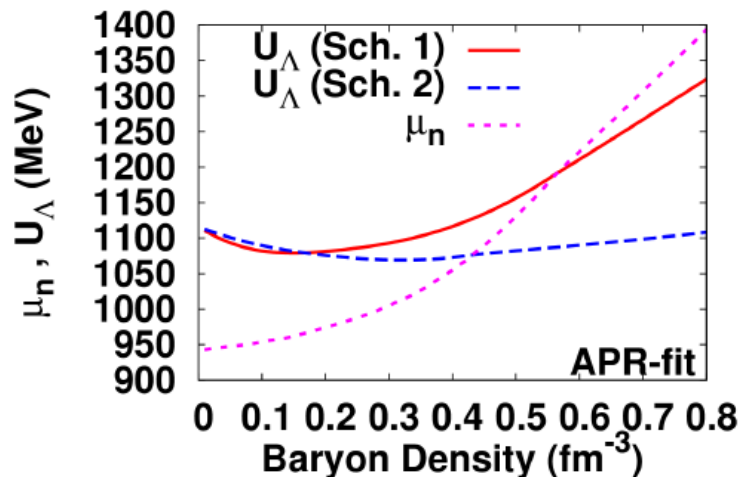
Lonardon et al.('14)



Yamamoto et al. ('14)

ハイペロンを含む3体力の検証

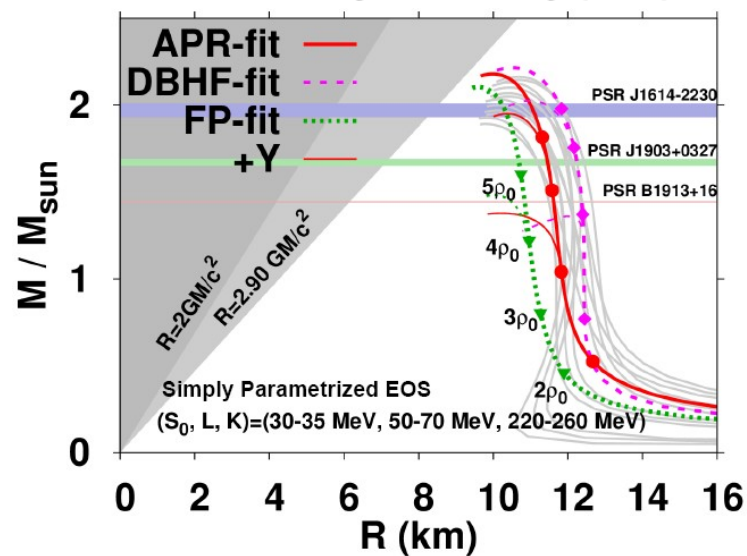
- Λ separation energy の精密測定 (J-PARC, JLab)
ハイパー核少数系の精密計算
E.g. E. Hiyama, Y. Kino, M. Kamimura, PPNP51('03)223.
→ $\rho < \rho_0$ における Λ -核ポテンシャル



Collective flow of Hyperons

“精密”な3体力

- Chiral EFT *Haidenbauer et al. ('13)*
→ LEC 決定には豊富なデータが必要
- Lattice 3B *Doi et al. (HAL QCD)('12)*
→ Phys. point 計算には多大な時間
- Quark model 3BF *Nakamoto, Suzuki ('16)*
→ 3B Pauli blocking 効果は小
- Quark model 3B force with KMT *AO, Kashiwa, Morita (in prep.)*

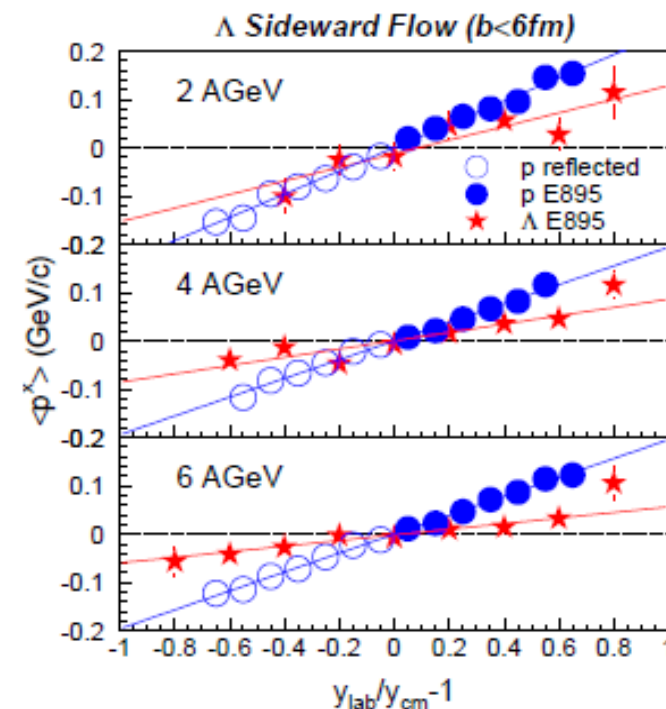


AO, Tsubakihara, Harada, (NIC proc.)

Hyperon Flow at J-PARC-HI

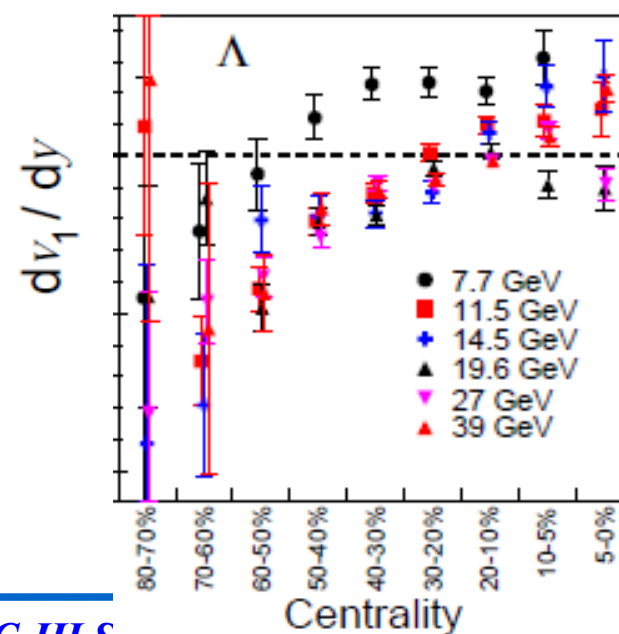
Directed flow of Λ

- $E=2,4,6$ AGeV (AGS)
Pinkenburg et al.('01)
(Λ の PID は invariant mass)
- $\sqrt{s_{NN}} = 62$ GeV (RHIC)
J.Chen (STAR), JPG35('08)044072
- Beam Energy Scan
Shanmuganathan (STAR)('15)



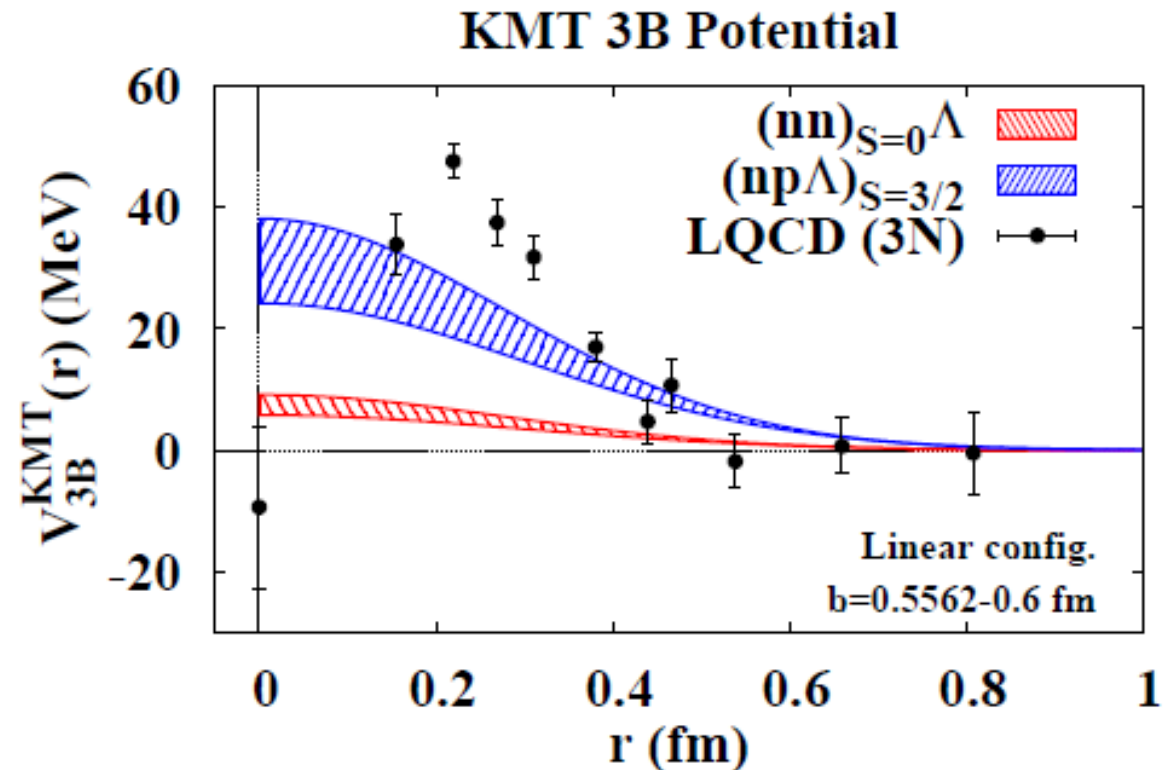
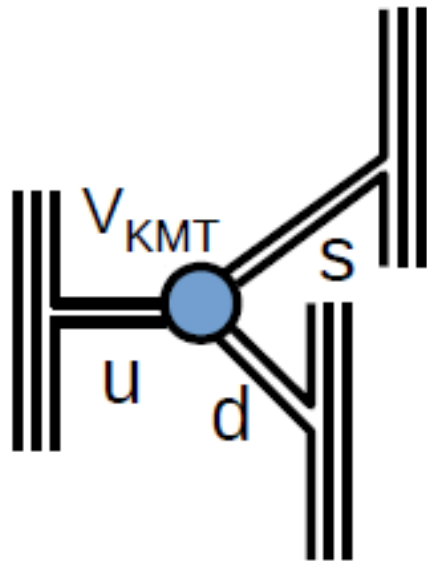
Collective flow of Hyperons at J-PARC-HI

- $\sqrt{s_{NN}} = (5-7)$ GeV
→ 高密度領域 & 高い Λ/π 比
- 高強度ビーム
→ $\Lambda, \Xi, \Sigma, K, \dots$
- 反応平面 & 弱崩壊点決定が必須



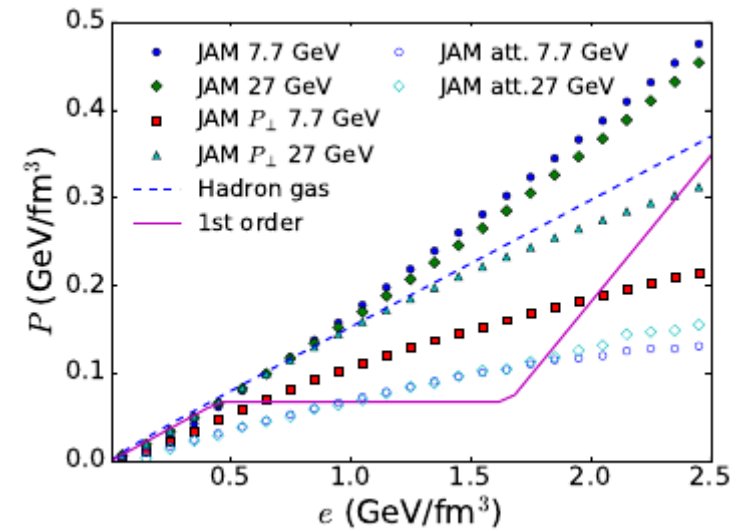
3クォークカから3バリオンカへ

- ハイペロンを含む3体力(3バリオンカ)をクォークの動力学から理解できるか?
- 最近の進展: 3クォーク間の行列式型相互作用(小林-益川-'t Hooft (KMT) 相互作用)からハイペロンを含む3バリオン斥力が現れる
Ohnishi, Kashiwa, Morita, in prep.

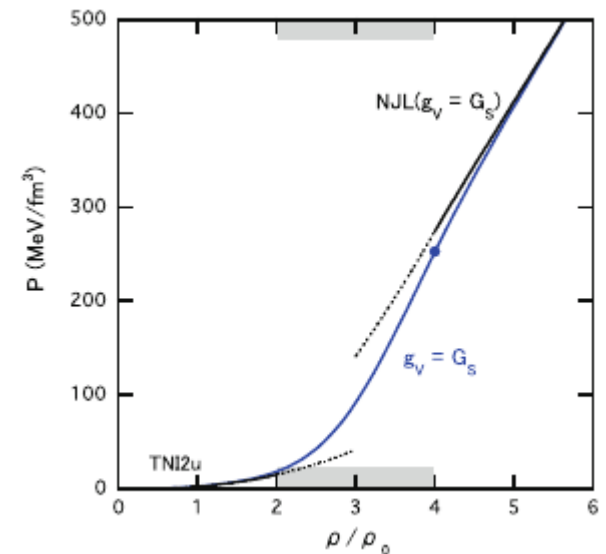


Quark Matter で支える場合: Crossover vs 1st order

- HIC での EOS 軟化と NS での EOS 硬化は矛盾？
 - Directed flow を説明する attractive orbits の導入は高密度での EOS softening を示す *Nara et al. ('16)*
 - $2 M_{\odot}$ を支える Crossover EOS は高密度で EOS hardening を示す *Masuda et al. ('13)*
 - 無矛盾となるには、相境界のアイソスピン化学ポテンシャル ($\delta\mu$) 依存性が必要

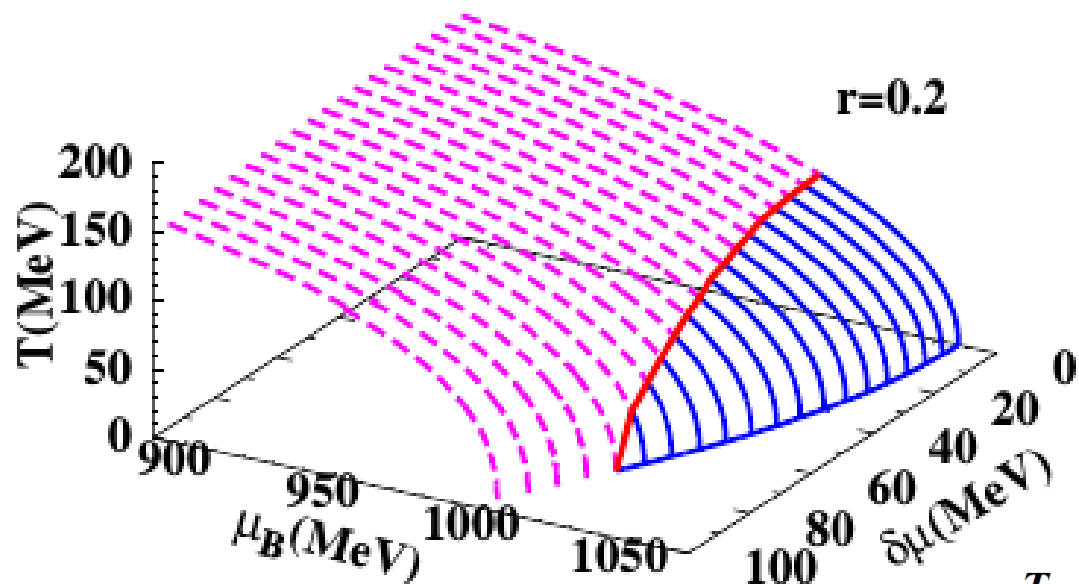


Nara et al. ('16)



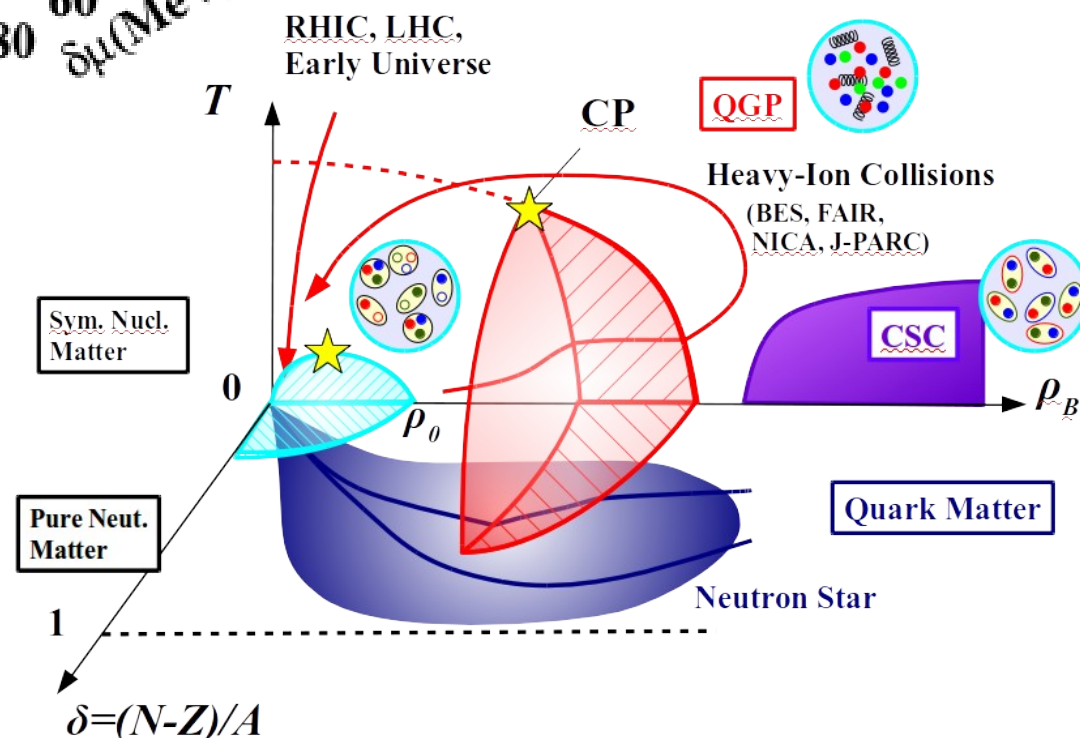
Masuda et al. ('13)

3D Phase Diagram



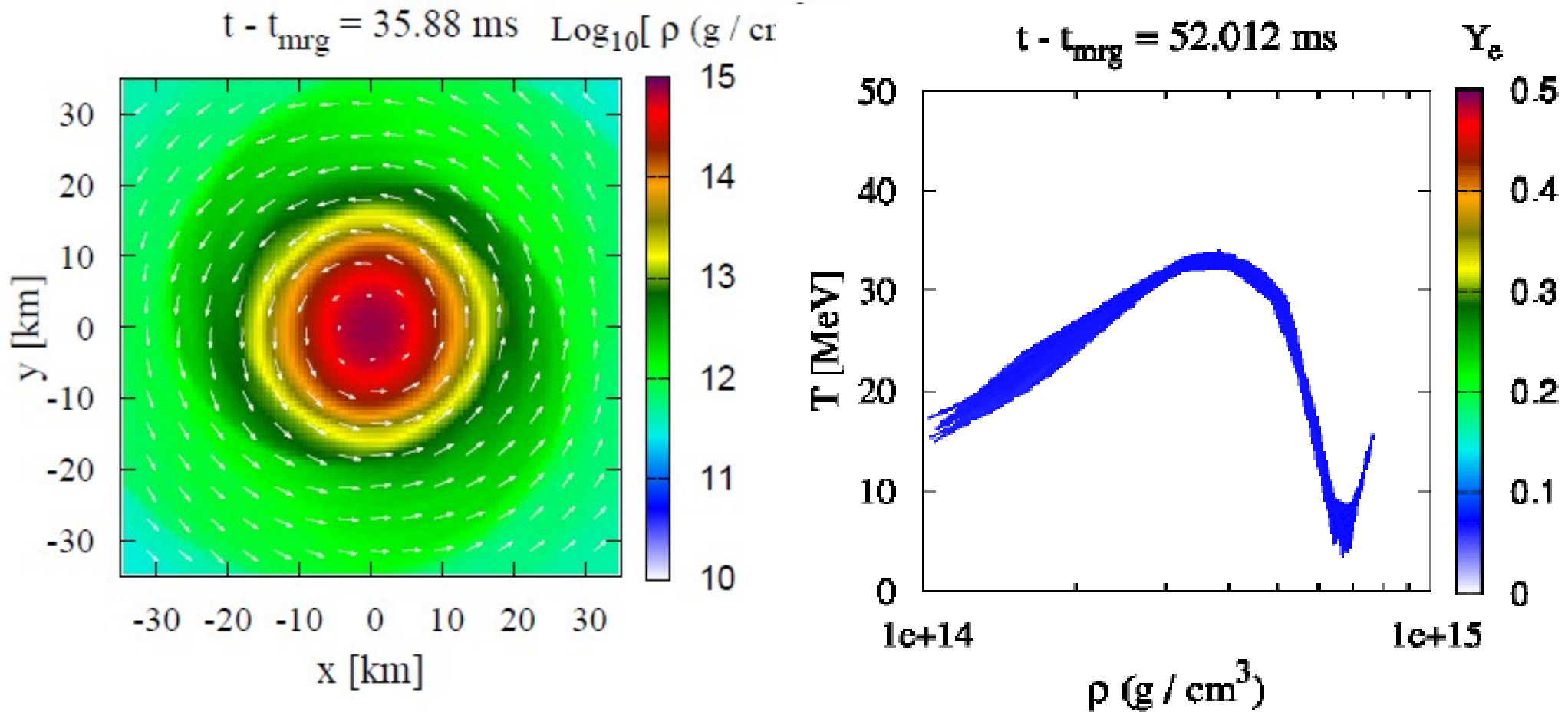
H. Ueda, T. Z. Nakano, AO,
M. Ruggieri, K. Sumiyoshi,
PRD88 ('13) 074006

**QCD 相転移の
アイソスピン依存性は
J-PARC-HI では難しい?
NS-NS merger ?**



Binary Neutron Star Merger

- $T \sim 40$ MeV, $\rho_B \sim 10^{15}$ g/cm³ $\sim 4 \rho_0$ ($\rho_0 \sim 2.5 \times 10^{14}$ g/cm³),
 $Y_e \sim 0.1$



Courtesy of K. Kiuchi

Data are from Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyotoku, M. Shibata, *PRD91('15)064059*.

■ 高密度 QCD の課題

- J-PARC エネルギーの重イオン衝突
- 中性子星コアの物性

→ 2つの首尾一貫した理解が大きな課題

■ 重い中性子星を支える物質は

ハドロン物質なのか、クォーク物質なのか？

の問いに J-PARC 重イオン衝突実験が答えられる可能性がある。

- ハドロン物質 vs 有限密度クォーク物質
- $\rho > \rho_0$ におけるハイペロンポテンシャル
- (様々なハドロン間の相互作用、様々な密度での対称エネルギー…)

■ こうした議論の基盤となるのは動的模型

有限バリオン密度 EOS+ ハドロン輸送 +(viscous) 流体

→ J-PARC-HI 動的模型構築へ向けた議論開始

(北沢、奈良、野中、平野、森田、赤松、大西、浅川、…)

NS matter Grant-in-Aid Study in Japan(2012-)

High ρ (Group A)
head: Tamura, Takahashi

Hypernuclei, Kaonic nuclei
YN & YY int.,
Eff. Interaction
(Heavy-ion collisions)



PI: H. Tamura

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

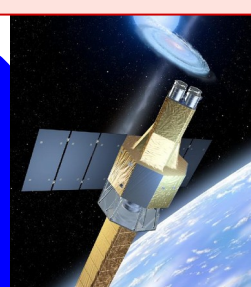
Low ρ (Group B)
head: Murakami,
Nakamura, Horikoshi

Sym. E, Pairing gap,
BEC-BEC cross over,
Cold atom, Unitary gas

NS Obs. (Group C)
head: Takahashi

Radius, Mass,
Temp. (Cooling),
Star quake, Pasta

ASTRO-H



Theory (Group D)
head: Ohnishi

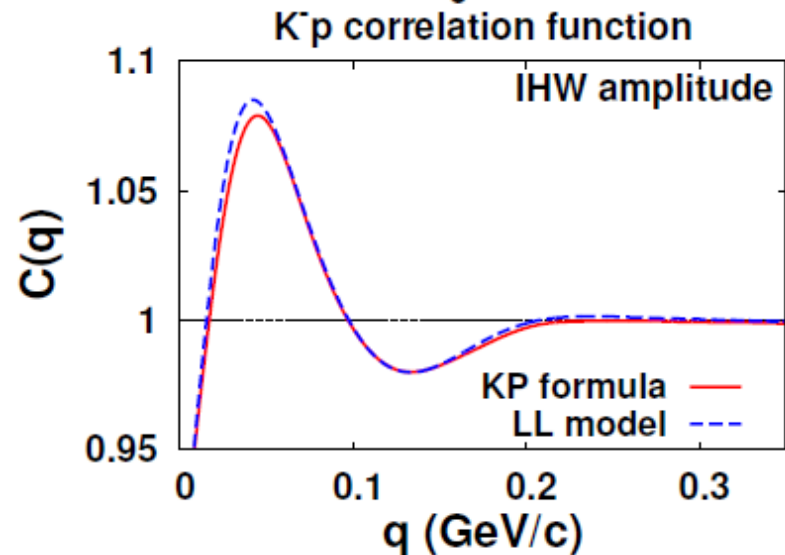
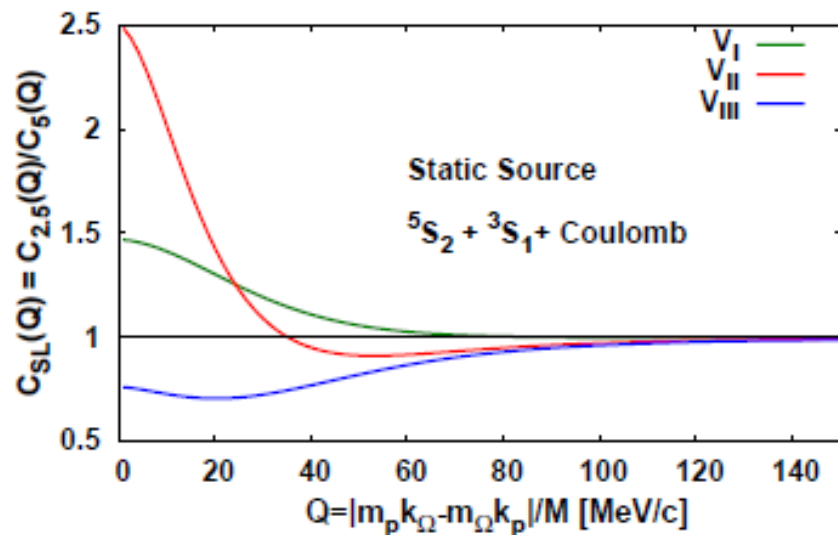
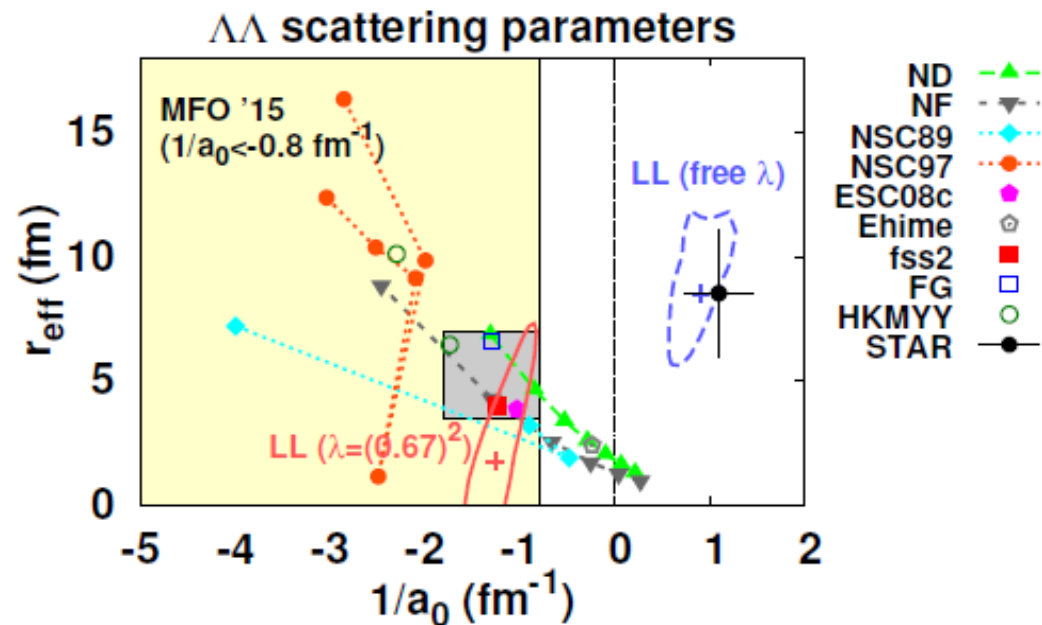
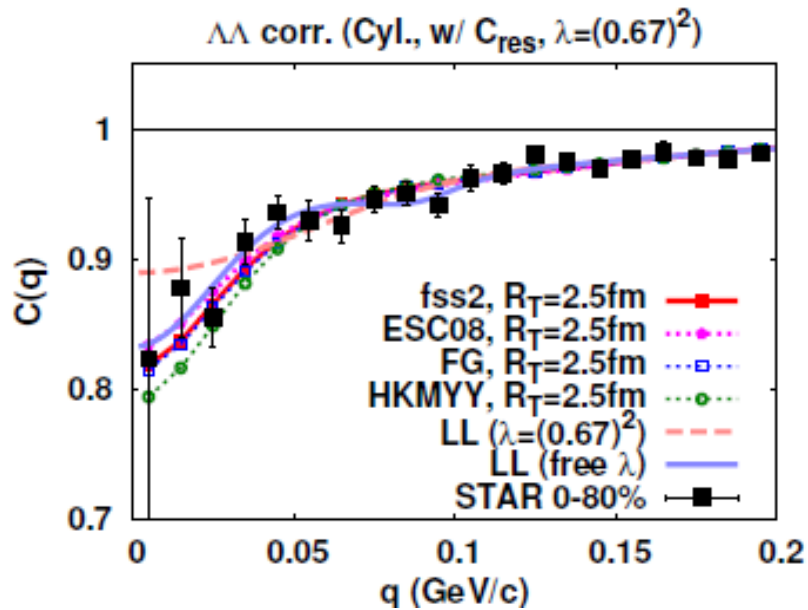
RIBF



US: UNEDF, ICNT, FRIB, RHIC, NICER...

Europe: CompStar, EMMI, FAIR, GANIL, LOFT, ...

Hadron-Hadron Correlation at RHIC



K. Morita, T. Furumoto, AO, PRC91('15)024916;
AO, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA954 ('16), 294;
K. Morita, AO, F. Etminan, T. Hatsuda, PRC94('16)031901®.