

多体結合を含むRMFによる 中性子星とハイパー核

大西明，椿原康介^A，原田融^B

京大基研，東工大科学技術創生研究院^A，大阪電通大工^B

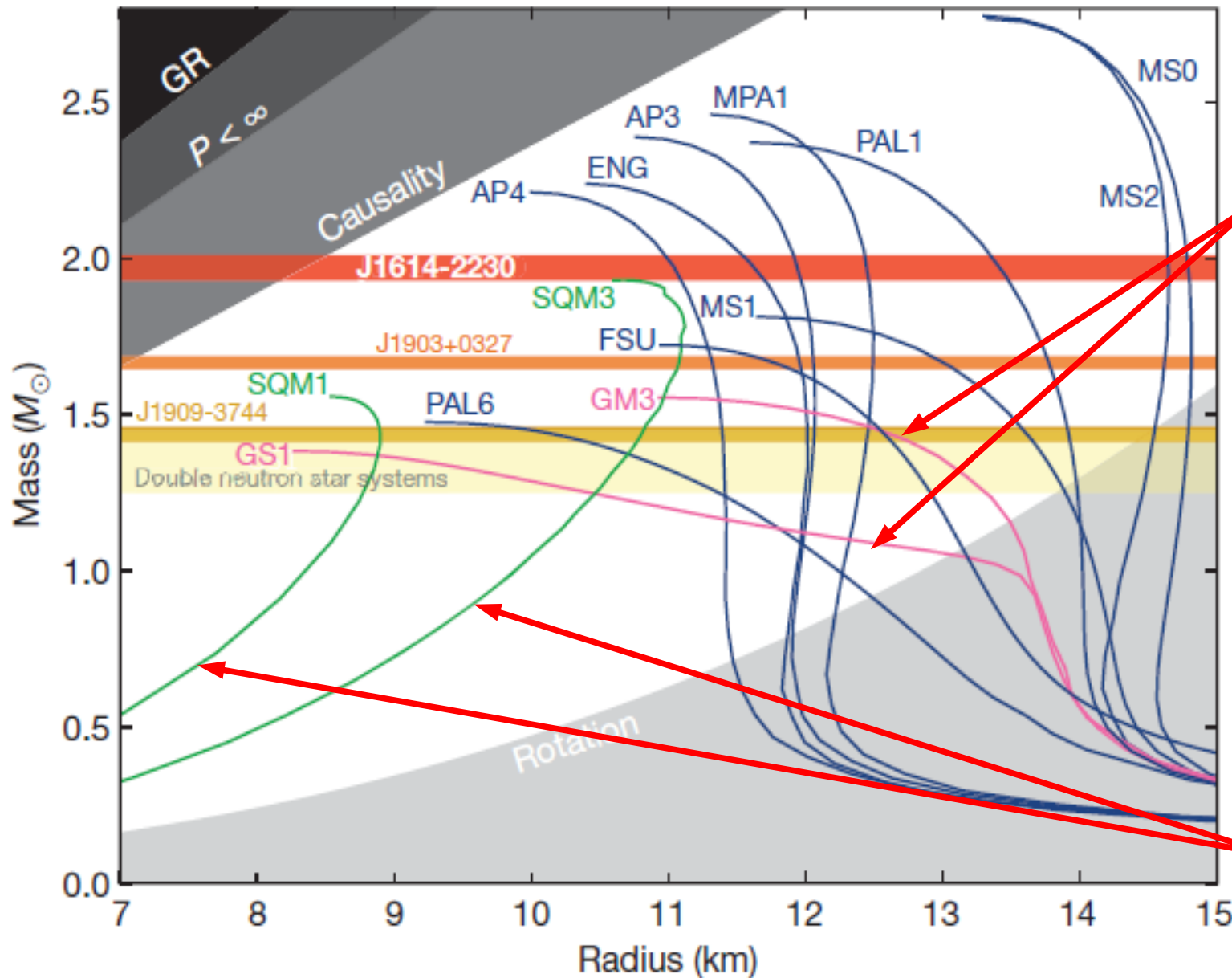
日本物理学会 2017年秋季大会 @ 宇都宮大学
2017年9月12-15日

*AO, K. Tsubakihara, T. Harada,
JPS Conf. Proc. 14 (2017), 020811
AO, K. Tsubakihara, T. Harada, work in prog.*



Hyperon Puzzle

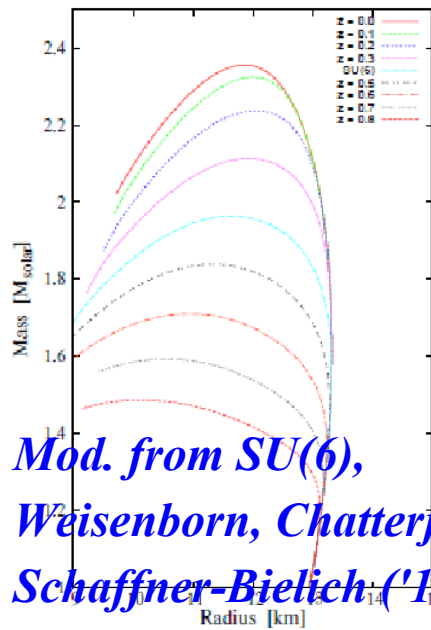
Demorest et al., *Nature* 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).



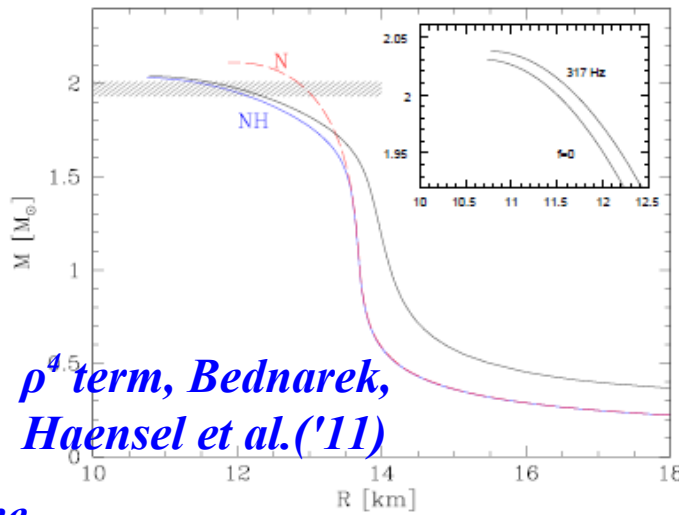
EOS with hyperons or Kaons

Quark matter EOS

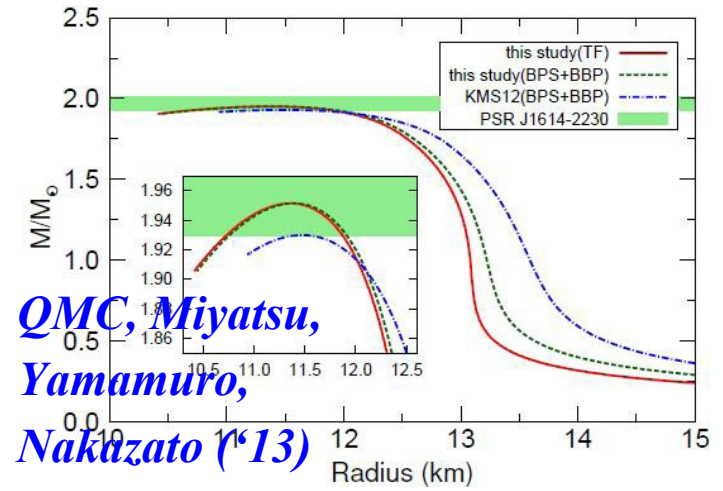
Massive Neutron Stars with Hyperons



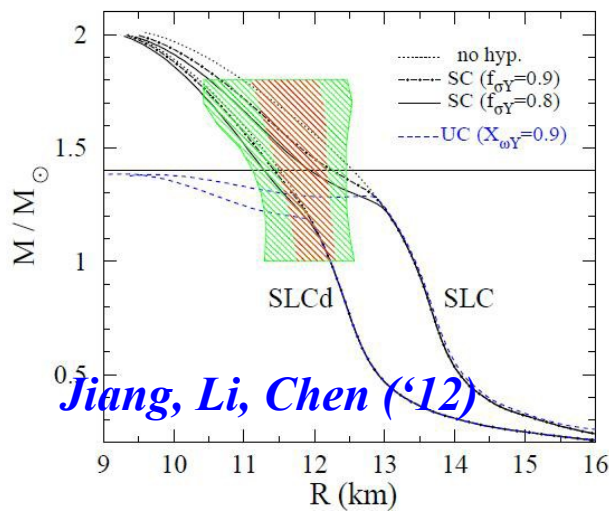
Mod. from SU(6),
Weisenborn, Chatterjee,
Schaffner-Bielich ('11)



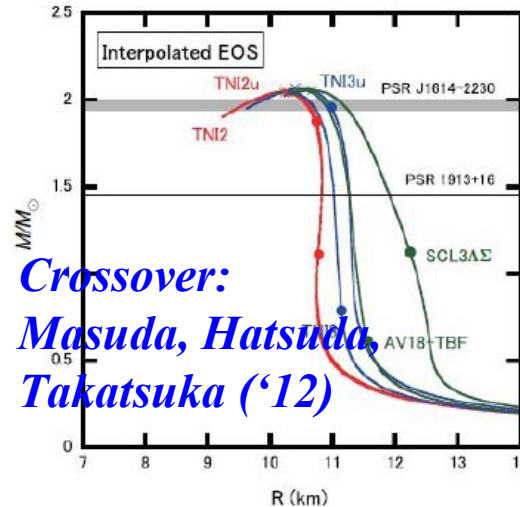
ρ^4 term, Bednarek,
Haensel et al. ('11)



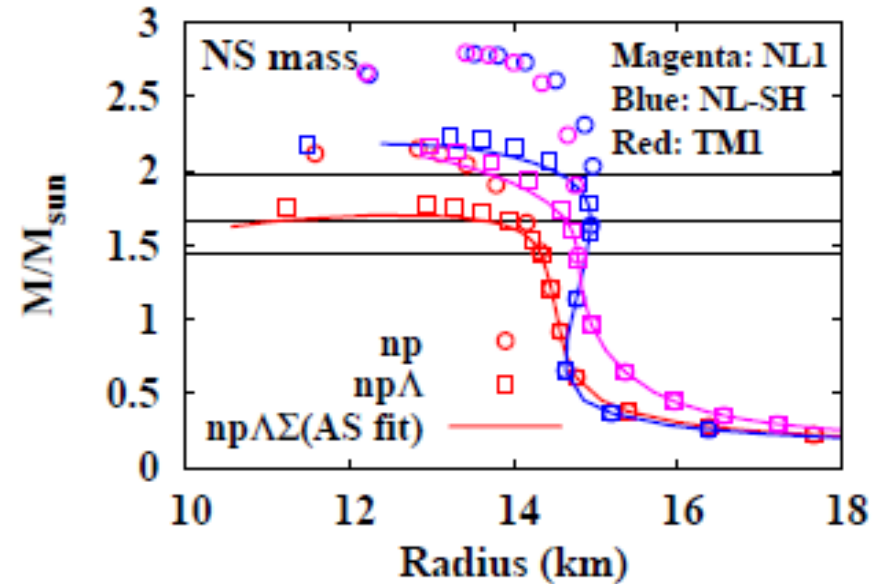
QMC, Miyatsu,
Yamamuro,
Nakazato ('13)



Jiang, Li, Chen ('12)

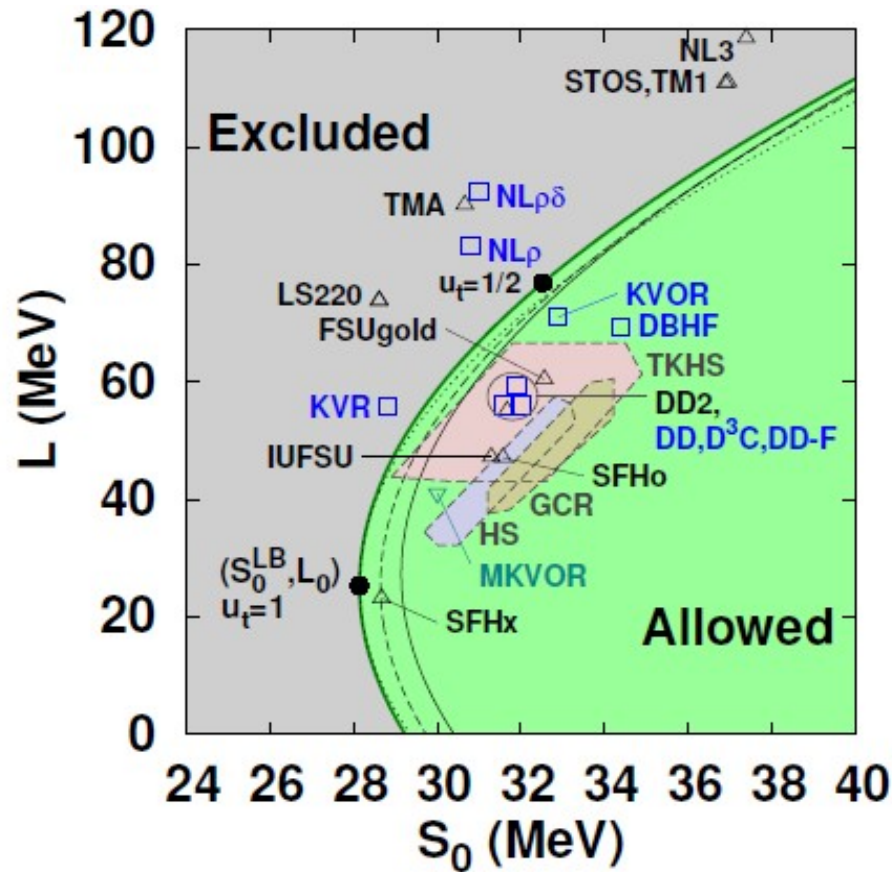


Crossover:
Masuda, Hatsuda,
Takatsuka ('12)

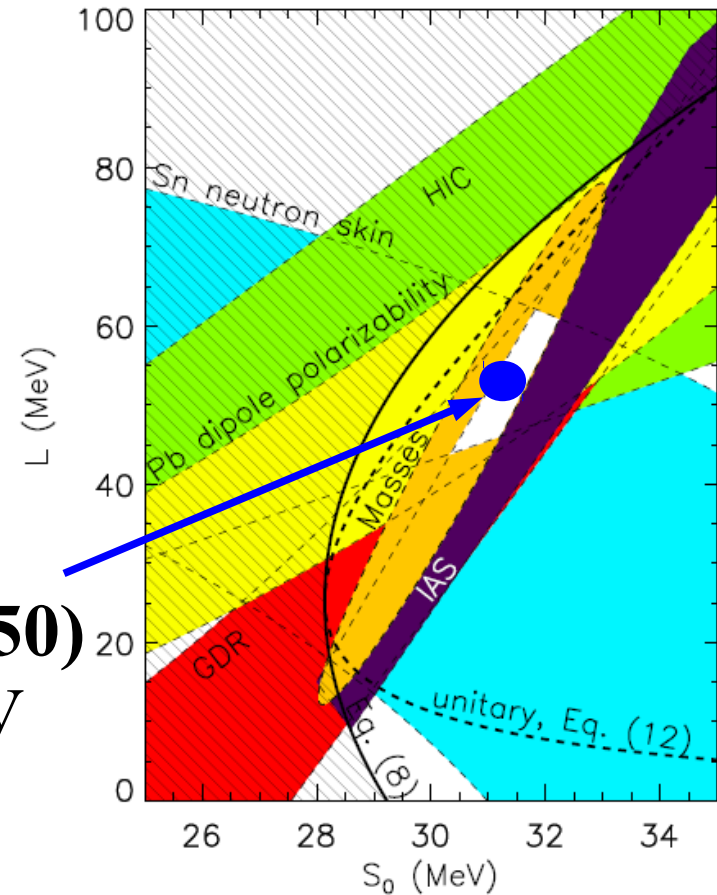


Tsubakihara, Harada, AO, arXiv:1402.0979

Symmetry Energy Constraints



(31,50)
MeV



Many of EOSs in active astrophysical use do not satisfy recent symmetry energy constraint or $2 M_{\odot}$ constraint.
 → *SFHo, SHFx, DD2*

Tews, Lattimer, AO, Kolomeitsev ('17)

Ohnishi @ JPS, Utsunomiya, Sep.13, 2017 4

ハイペロンパズルの解決に向けて

■ ハイペロン・パズル

- ハイパー核の性質を説明する「標準的」な理論の枠組みで得た EOS は、 $2M_{\odot}$ の中性子星を支えられない。
- 3 体力、クォーク物質、修正重力、...

■ 多体結合を含む RMF を用いて解決を目指す

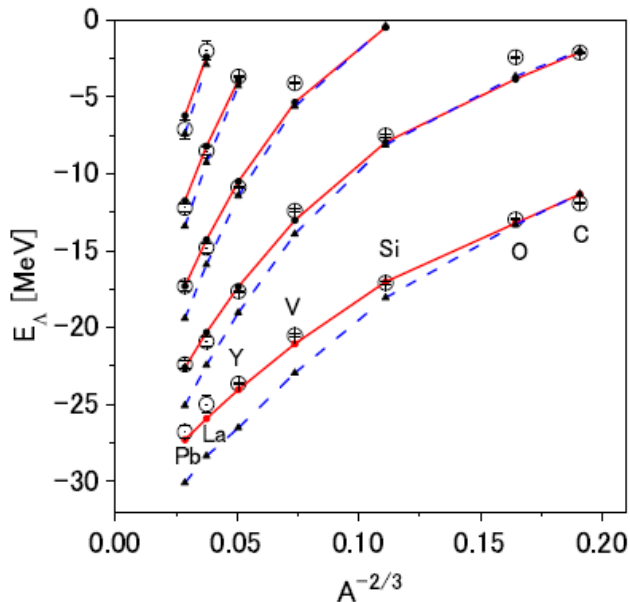
- 飽和点 (ρ_0, E_0, K)、対称エネルギー (S_0, L)
- 有限核 (M, R)、ハイパー核 (S_{Λ})
- 中性子星の (M, R)
- 低密度で第一原理計算と consistent

前回まで
核物質 → 原子核
今回
まとめて fit

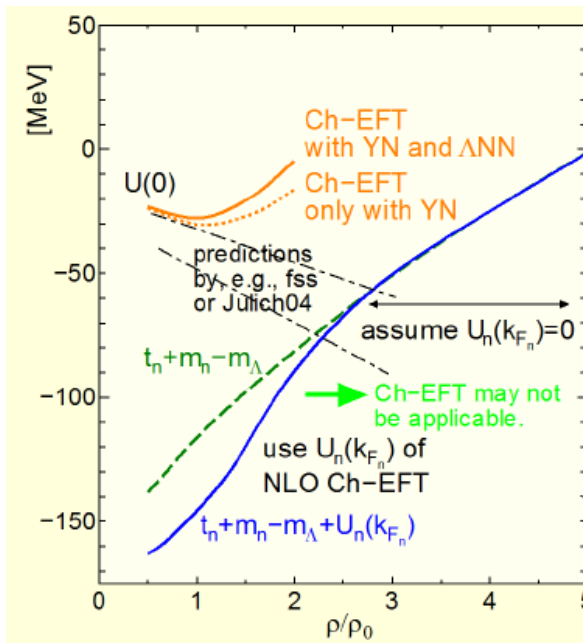
Λ の結合定数を調整
→ S_{Λ} と M_{\max} の関連は？

先行研究

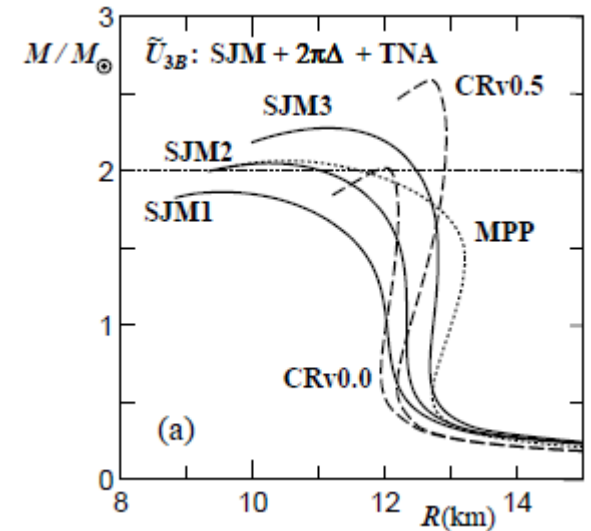
- Universal 3 体斥力 (NNN, YNN, ...)
- Chiral EFT based: Σ 経由 2π 引力の Pauli blocking による減少
- Quark cluster 模型での 3 体力
Nakamoto, Suzuki ('16), AO, Kashiwa, Morita ('17)
- 高次項を含む RMF
S. Typel et al. ('99), Steiner et al. ('13)



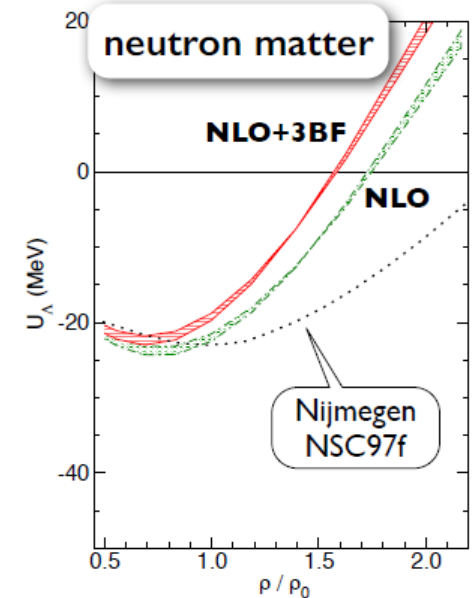
Yamamoto, Furumoto, Yasutake, Rijken ('17)



Kohno (SCHDM2017)



Takatsuka, Nishizaki ('17)

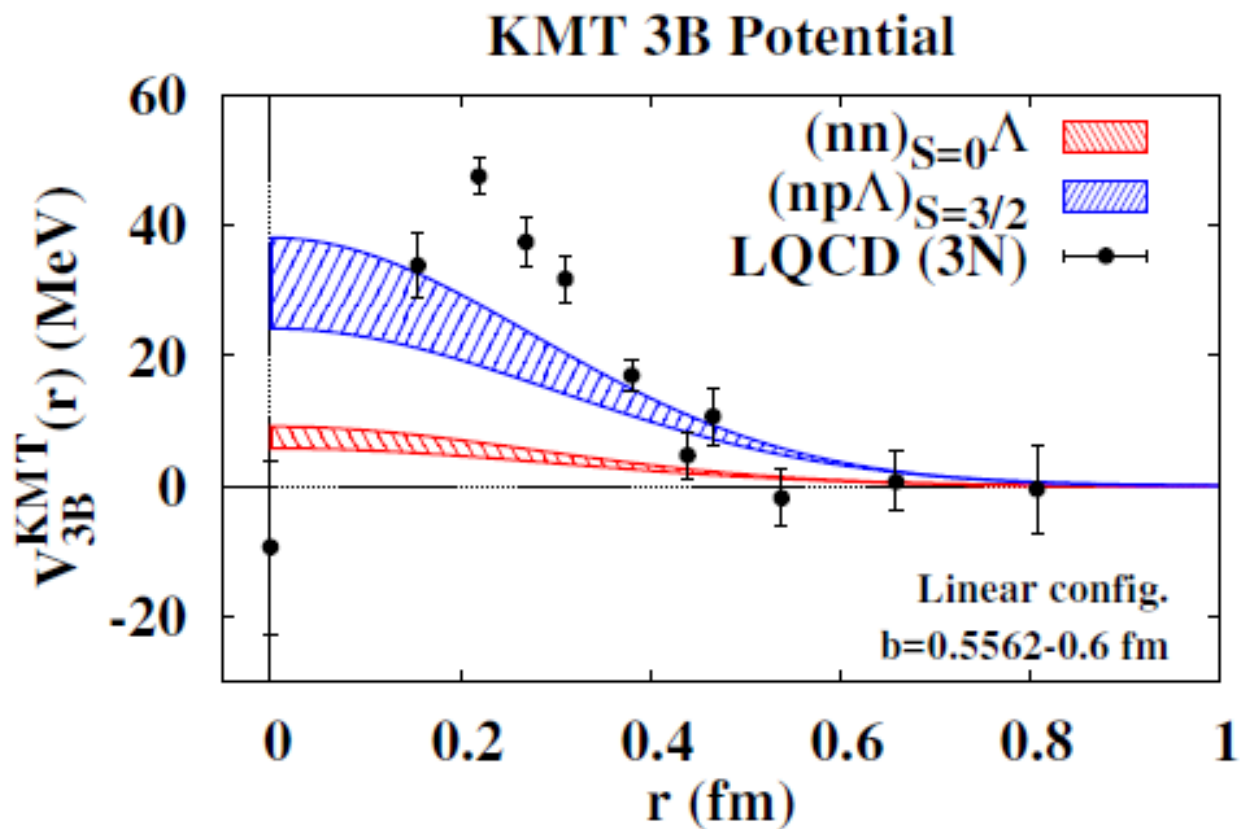
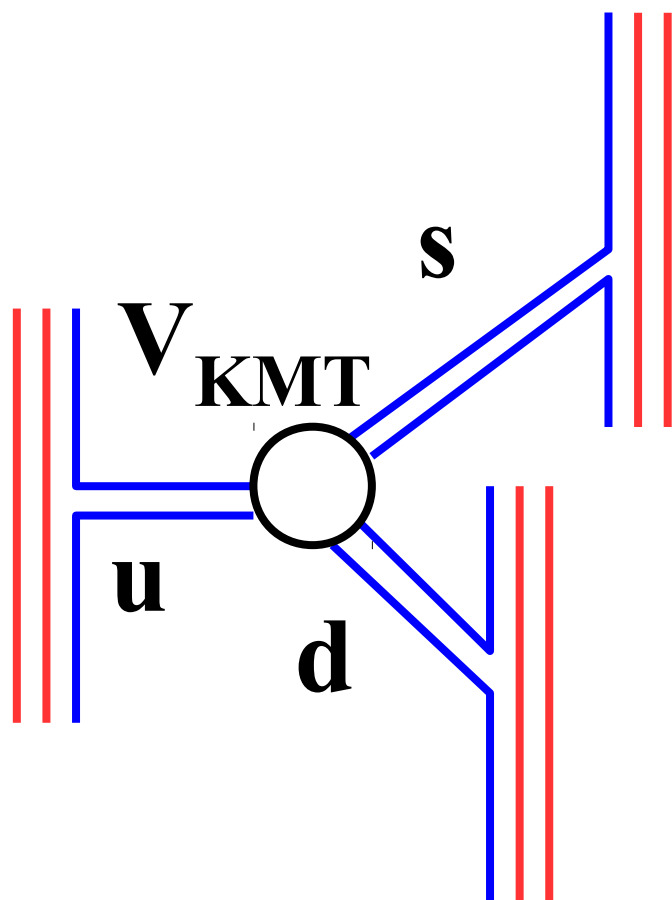


Haidenbauer, Meissner, Kaiser, Weise ('17)

3B potential from KMT interaction

Kobayashi, Maskawa ('70), 't Hooft ('76)

Kobayashi-Maskawa-'t Hooft 3q int. \rightarrow 3 baryon int.



AO, Kashiwa, Morita, PTEP('17); arXiv:1610.06306
Lattice data: Doi et al. (HAL QCD) ('07)

Ohnishi @ JPS, Utsunomiya, Sep.13, 2017 7

Relativistic Mean Field with Multi-body couplings

Naive dimensional analysis (NDA) and naturalness

Manohar, Georgi ('84)

The vertex is called “natural” if $C \sim 1$ (consistent with pQCD).

$$L_{\text{int}} \sim (f_{\pi} \Lambda)^2 \sum_{l,m,n,p} \frac{C_{lmnp}}{m! n! p!} \left(\frac{\bar{\psi} \Gamma \psi}{f_{\pi}^2 \Lambda} \right)^l \left(\frac{\sigma}{f_{\pi}} \right)^m \left(\frac{\omega}{f_{\pi}} \right)^n \left(\frac{R}{f_{\pi}} \right)^p$$

FST truncation

R. J. Furnstahl, B. D. Serot, H. B. Tang, NPA615 ('97)441.

Truncation the index

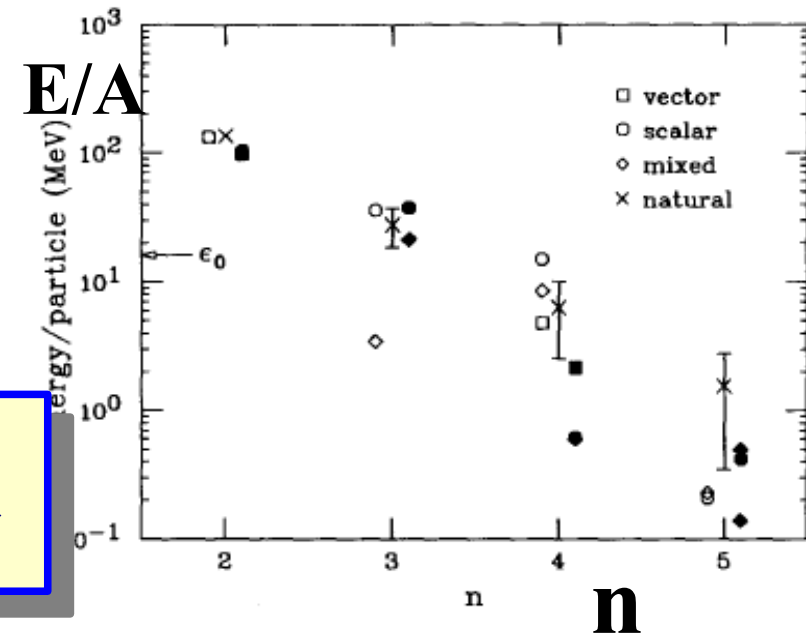
$$n = B/2 + M + D$$

(B: baryon, M: Non NG boson, D: derivatives)

Natural $\rightarrow V \sim \rho^n/n!$

\rightarrow small for large n

通常の RMF $\rightarrow n=2$ 項と σ^3, σ^4
 今回 $\rightarrow n=2, 3$ 項の多くと $n=4$ 項の一部



Relativistic Mean Field with Multi-body couplings

- $\sigma\omega\rho$ model +std. non-linear terms + multi-body couplings

Scalar polarizability (A. Thomas)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M_N - U_s - \gamma^\mu U_\mu)\psi + \mathcal{L}_{\sigma\omega\rho},$$

ω^2 scalar (Typel)

$$\mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} = \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma - \frac{1}{4}\omega_{\mu\nu}\omega^{\mu\nu} - \frac{1}{4}R_{\mu\nu} \cdot R^{\mu\nu} - \mathcal{V}_{\sigma\omega\rho},$$

$$U_s = -g_\sigma\sigma \left[1 - r_{\sigma\sigma}\sigma/f_\pi \right] + g_\sigma\omega^\mu\omega_\mu \left[r_{\omega\omega} - r_{\sigma\omega\omega}\sigma/f_\pi \right],$$

DD coupling (Ring)

$$U_\mu = g_\omega\omega_\mu \left[1 - r_{\sigma\omega}\sigma/f_\pi + r_{\omega 3}\omega^\nu\omega_\nu/f_\pi^2 \right]$$

$$+ g_\rho\tau \cdot R_\mu \left[1 - r_{\sigma\rho}\sigma/f_\pi + r_{\omega\rho}\omega^\nu\omega_\nu/f_\pi^2 \right],$$

$$\mathcal{V}_{\sigma\omega\rho} = \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - a_\sigma f \log(\sigma/f_\pi) + \frac{1}{4}c_{\sigma 4}\sigma^4 + \frac{1}{3}c_{\sigma 3}f_\pi\sigma^3$$

$$- \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu \left[1 - c_{\sigma\omega}\sigma/f_\pi \right] - \frac{1}{4}c_{\omega 4}(\omega^\mu\omega_\mu)^2$$

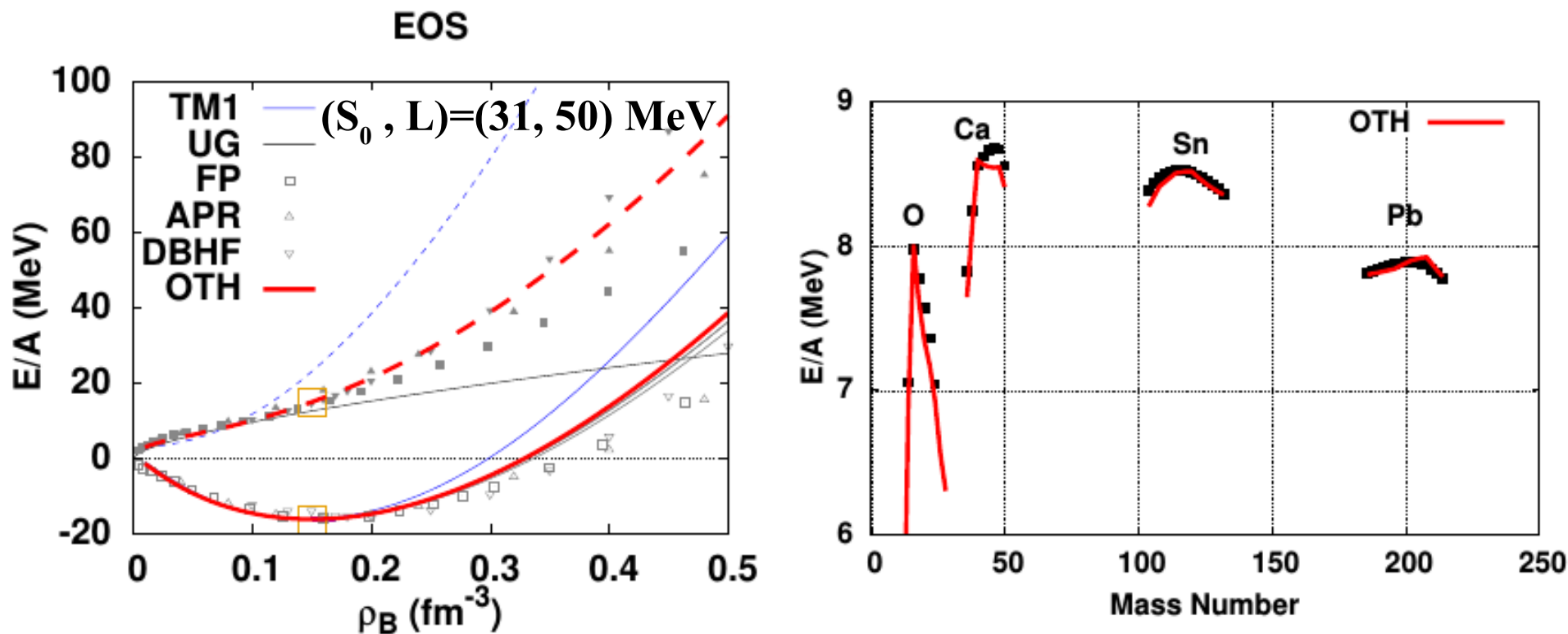
ρ^4 term

$$- \frac{1}{2}m_\rho^2 R^\mu \cdot R_\mu \left[1 - c_{\sigma\rho}\sigma/f_\pi + c_{\omega\rho}\omega^\mu\omega_\mu/f_\pi^2 \right] - \frac{1}{4}c_{\rho 4}(R^\mu \cdot R_\mu)^2,$$

DD meson mass (e.g. Steiner, Fischer, Hempel)

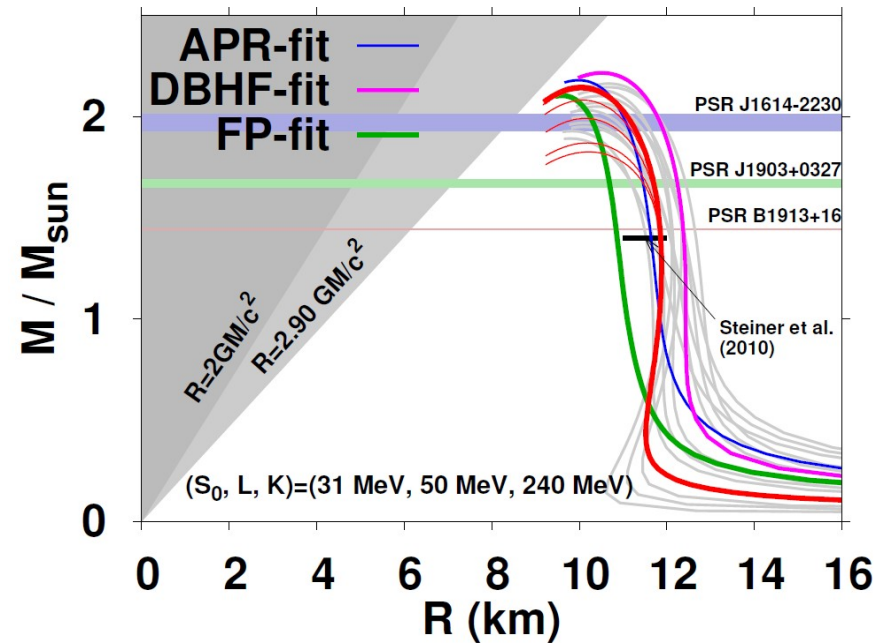
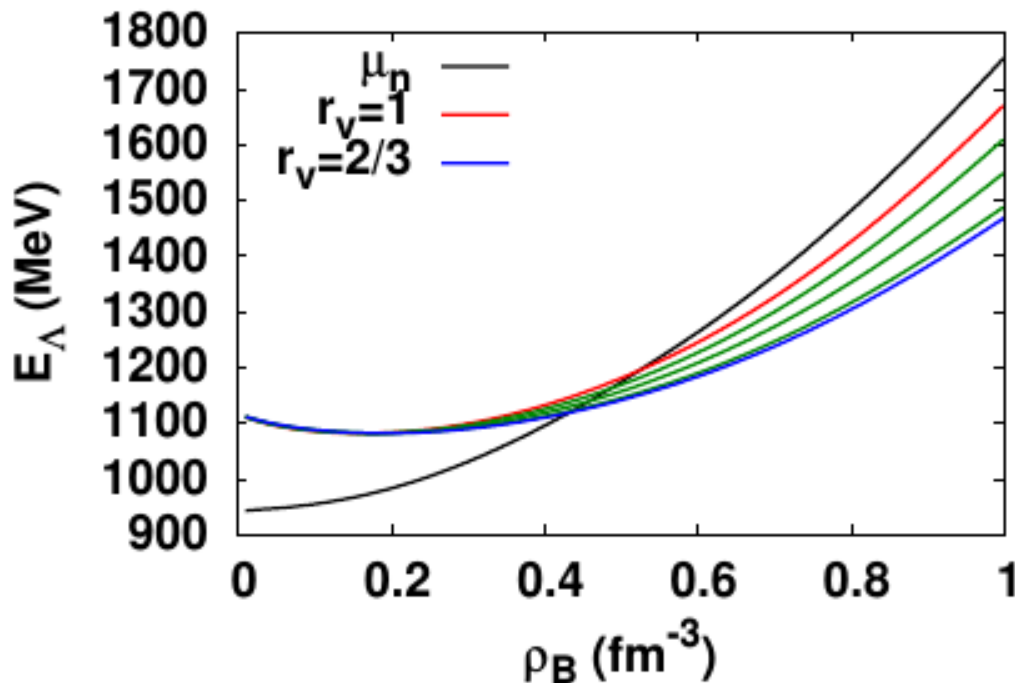
Simultaneous Fit to EOS and Finite Nuclei

- 飽和点パラメーター (ρ_0, E_0, K, S_0, L) を少数のパラメータでコントロールしつつ、有限核の束縛エネルギーをフィット。
 - 低密度では第一原理 EOS と consistent、高密度では硬いが Shen EOS より柔らかい
 - $n=3, 4$ パラメータは有限核への効果小。初期値を振って試す。



Hypernuclei and Neutron Star MR

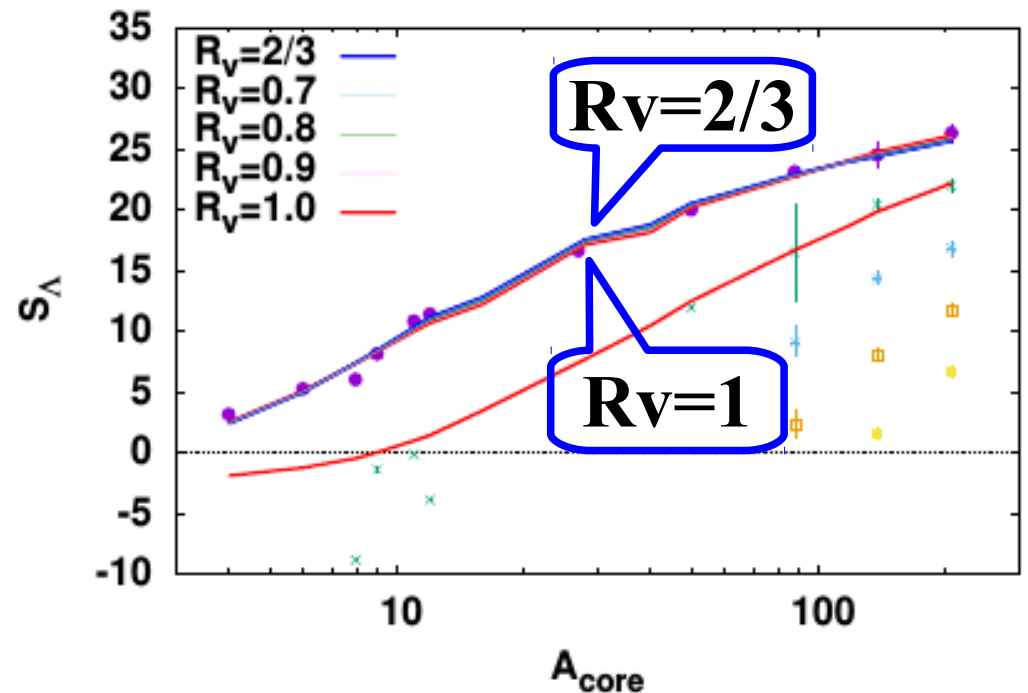
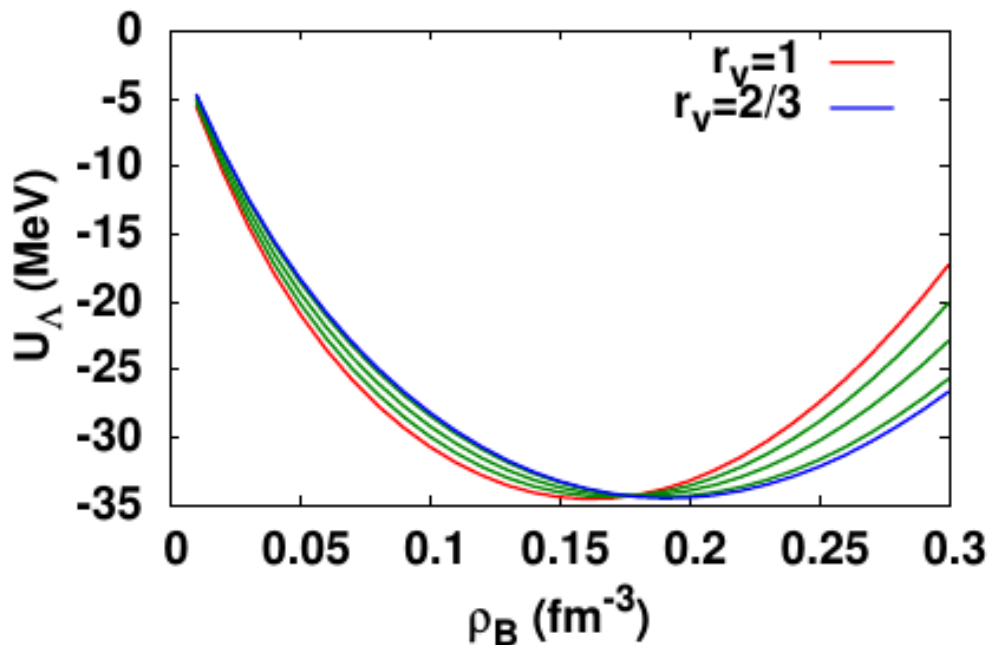
- $R_V = g_{\omega\Lambda} / g_{\omega N} = 2/3 - 1$ を与えて、 $R_S = g_{\sigma\Lambda} / g_{\sigma N}$ を調整してハイパー核データをフィット。他のパラメータは共通とする。
 - Λ は $\rho = 0.4 - 0.5 \text{ fm}^{-3}$ で現れる
 - $R_V > 0.8$ の場合、 $2 M_{\odot}$ 中性子星を支えられる



Can we distinguish ?

■ U_Λ の密度依存性

- U_Λ は ρ_0 近辺から浅くなる (通常の RMF+ Λ と異なる)
- R_V の大きさにより、大きな A での S_Λ の「傾き」が変わる
→ 100-200 keV 程度の精度が必要

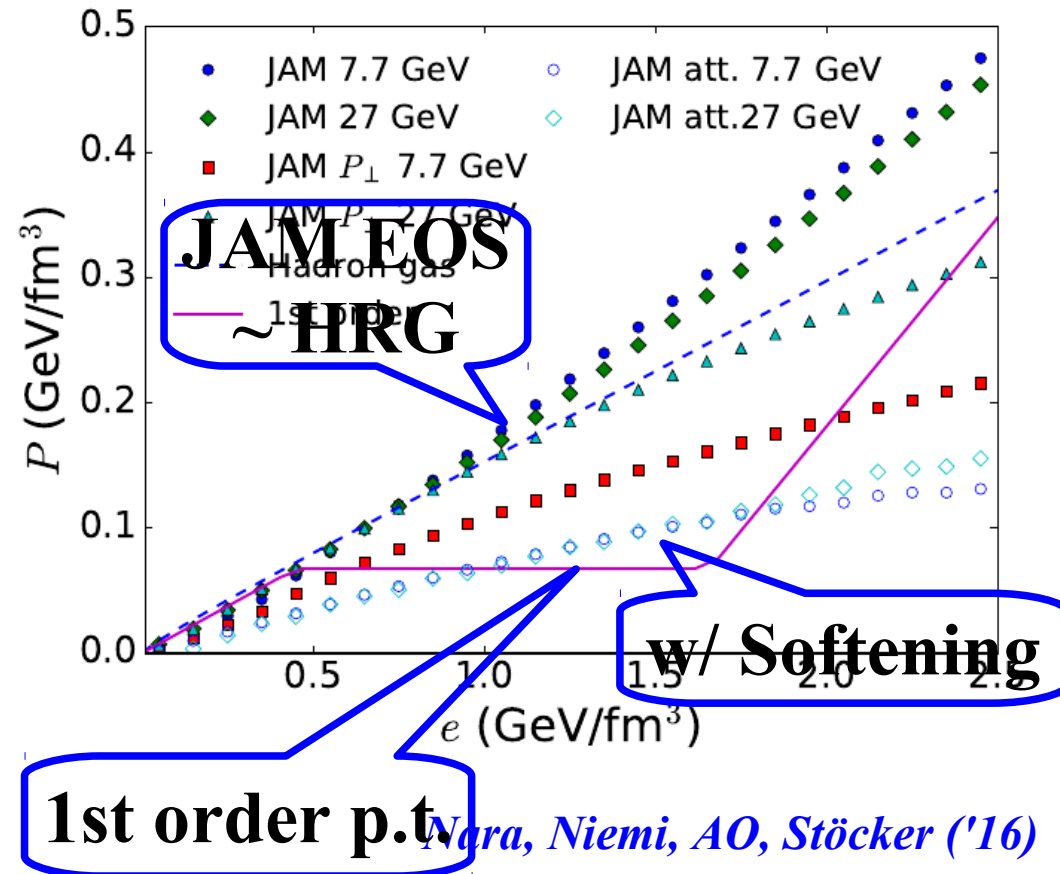
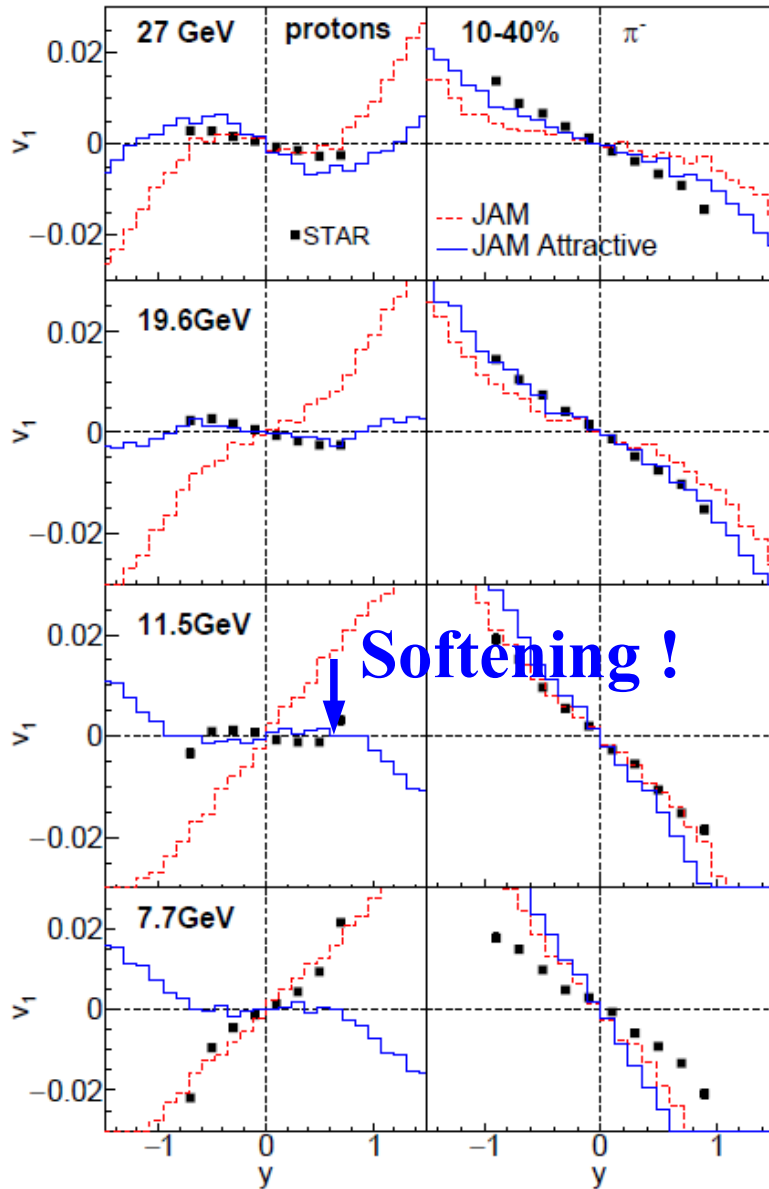


Summary

- データに基づいてハイペロンパズルに答えるには、原子核・ハイパー核・核物質を説明する枠組みが必要。
ここでは現象論的なアプローチ (多体結合を含む RMF) を採用
- 飽和点パラメータ (ρ_0, E_0, K, S_0, L) を再現しつつ、
有限核の束縛エネルギーと半径からパラメータを調整。
(同時最適化が効率的)
- ρ_0 近辺で U_Λ は減少 (より引力的) から増大へ向かい (現象論 & Chiral EFT+G-matrix)、高密度での斥力の増大率によって $2M_\odot$ 中性子星が支えられるかどうかが決まる。
ハイパー核での確認には 100-200 keV 精度での S_Λ 測定が必要。
- 重イオン衝突は高密度 ($\rho > 5\rho_0$) での EOS 軟化を示唆。
低密度 ($\rho < 5\rho_0$) での硬い EOS+ 相転移 ($\rho > 5\rho_0$)?
or 高密度での大きな対称エネルギー?

重イオン衝突でみられるEOSの軟化

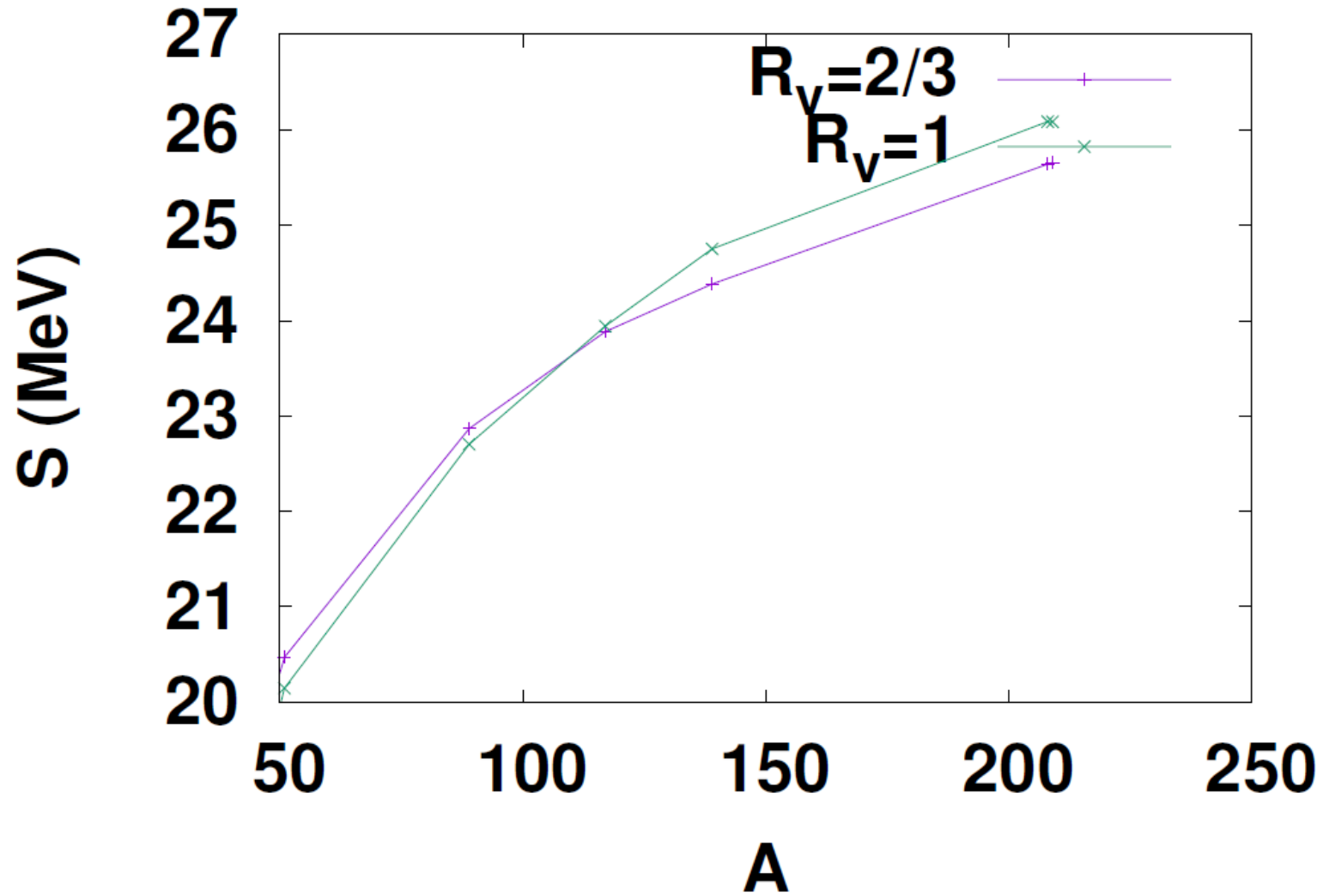
Nara, Niemi, AO, Stöcker ('16)



mid-central (10-40 %)

Nara, Niemi, AO, Stöcker ('16)

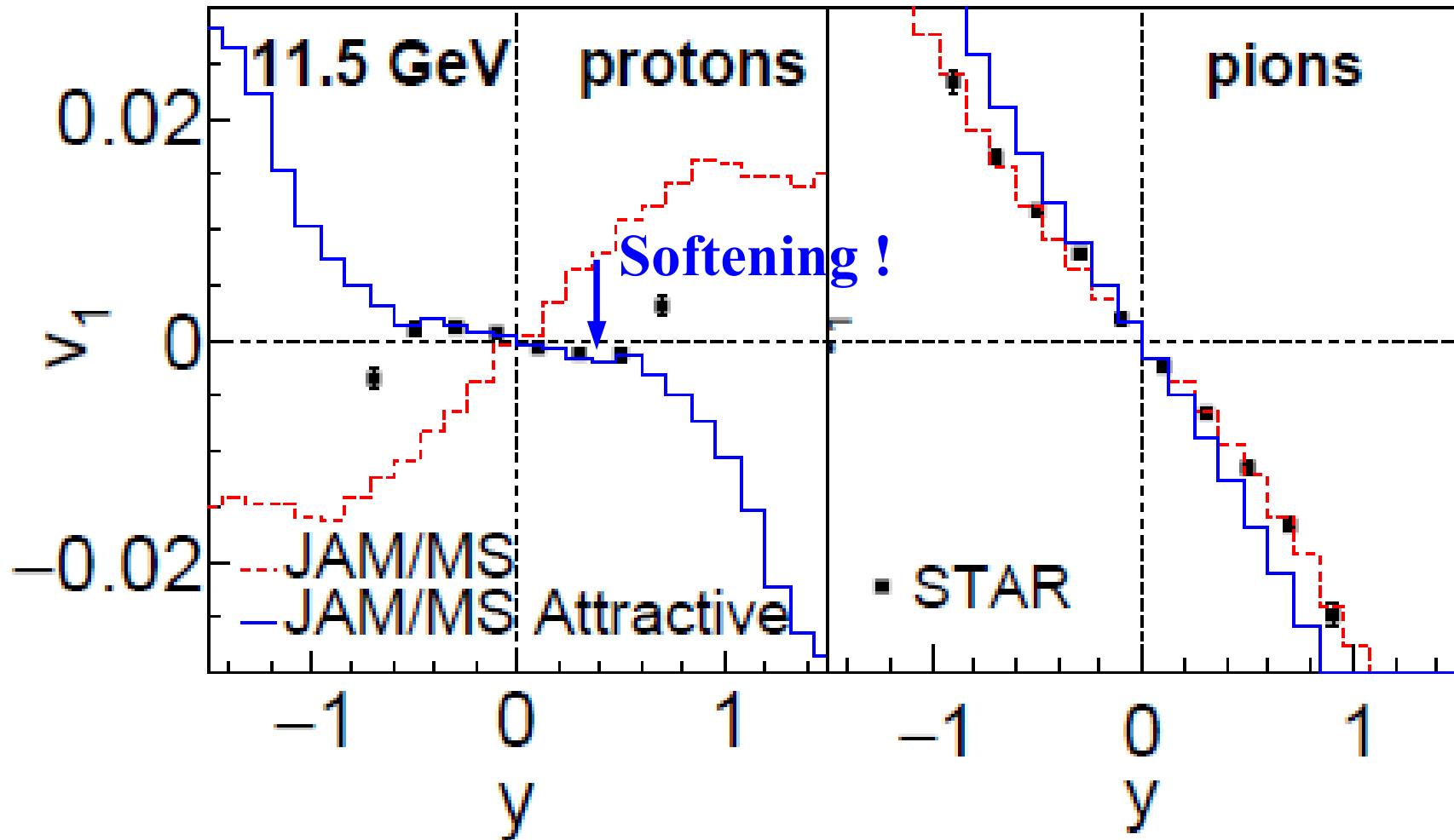
$A-S_A$ relation



Thank you !

Mean Field + Attractive Orbit

Nara, Niemi, AO, Stöcker ('16)

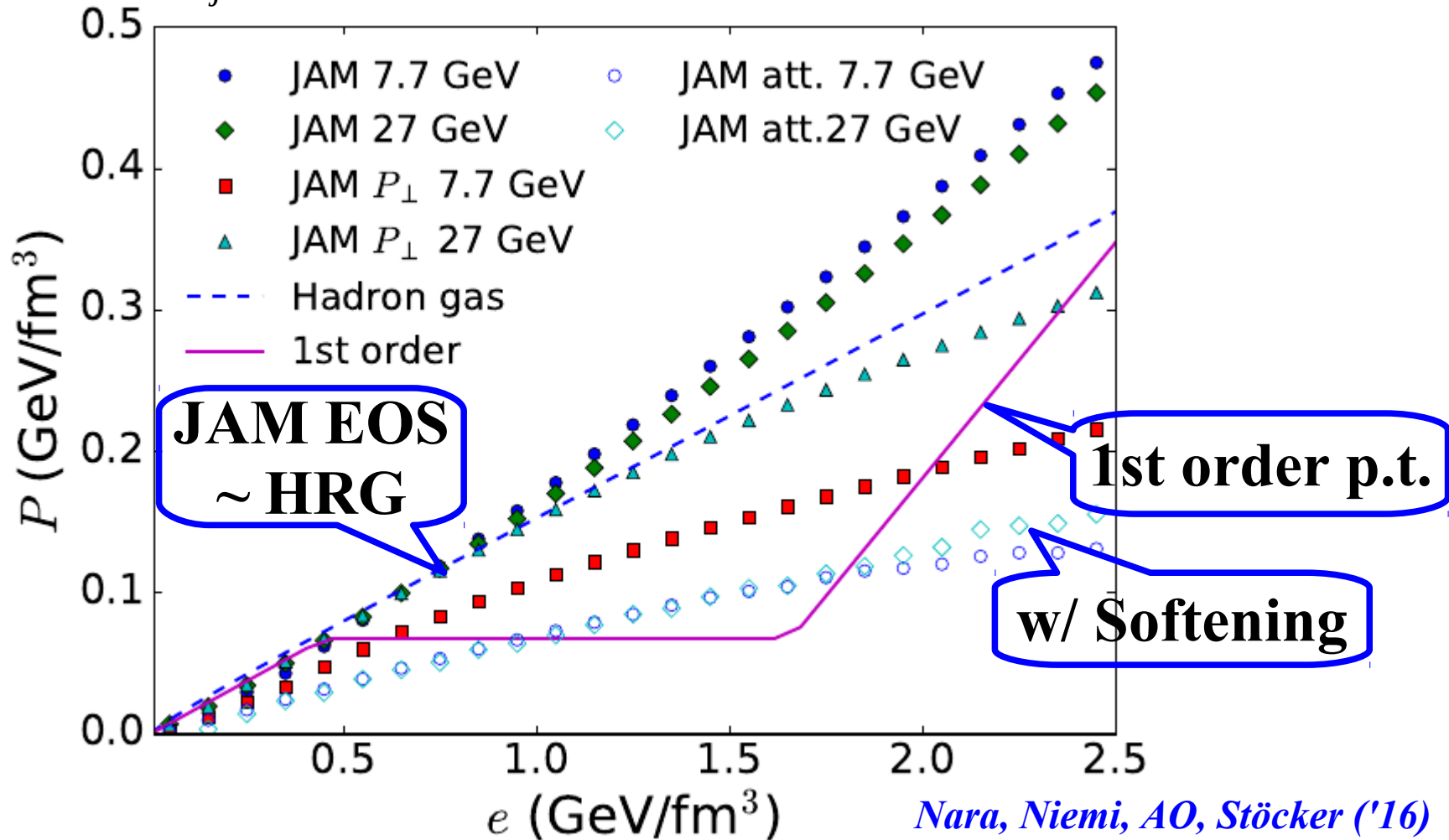


MF+Attractive Orbit make dv_T/dy negative at $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$ GeV

Softening of EOS by Attractive Orbits

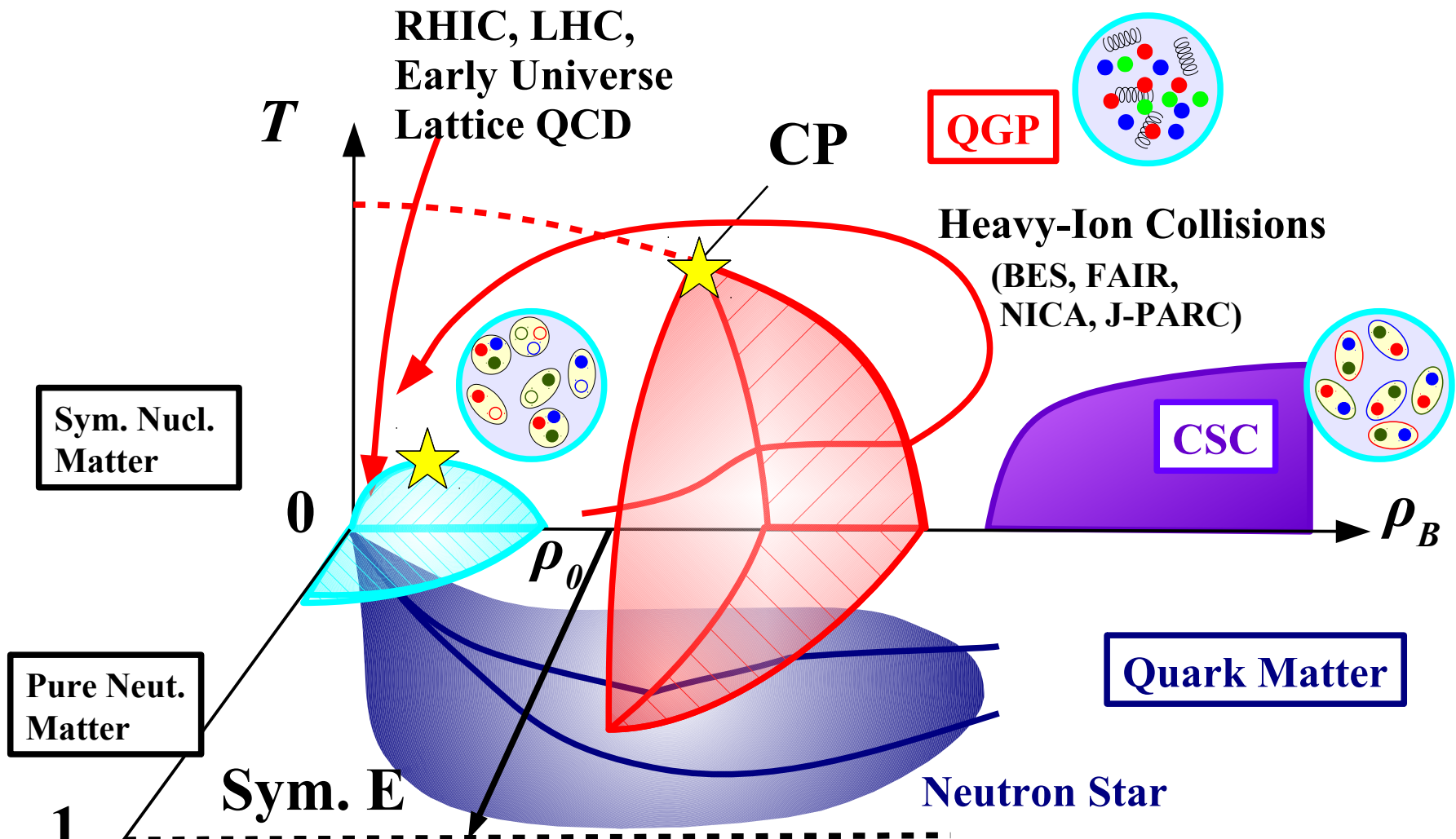
$$\Delta P = - \frac{\rho}{3(\delta\tau_i + \delta\tau_j)} (p_i' - p_i)^\mu (x_i - x_j)_\mu$$

H. Sorge, PRL82('99)2048.



Pressure in simulated EOS ~ EOS-Q (e.g. Song, Heinz ('08))

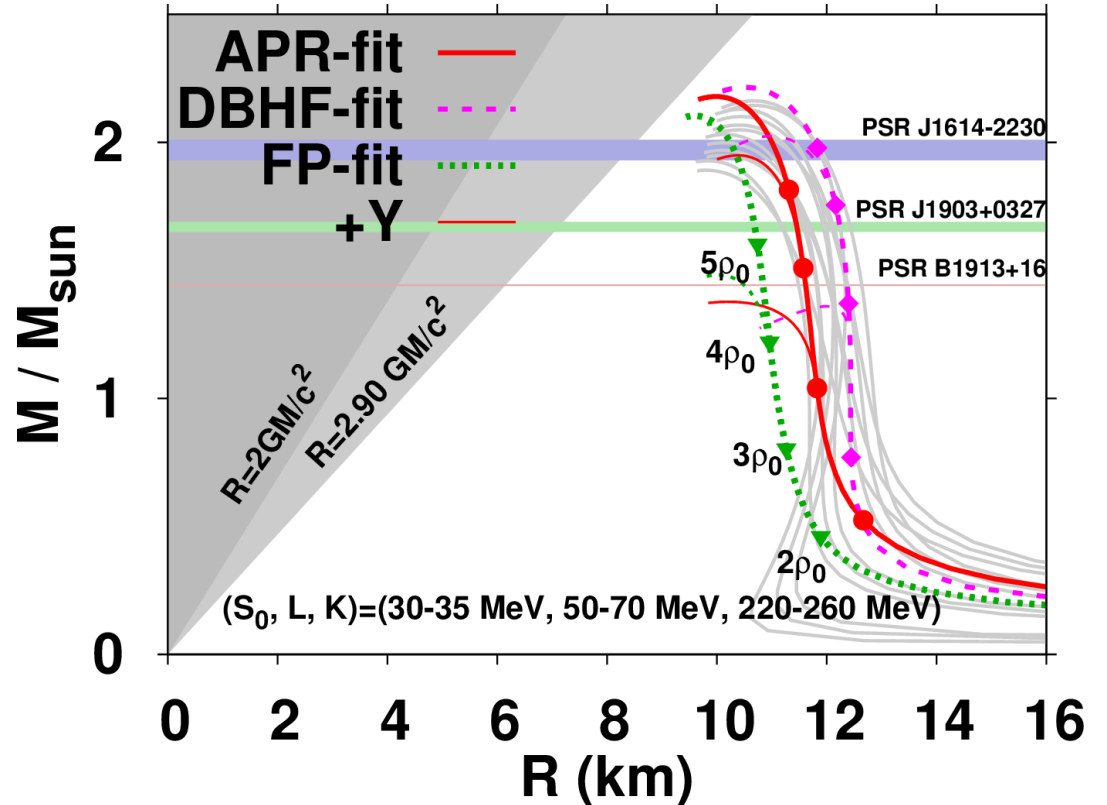
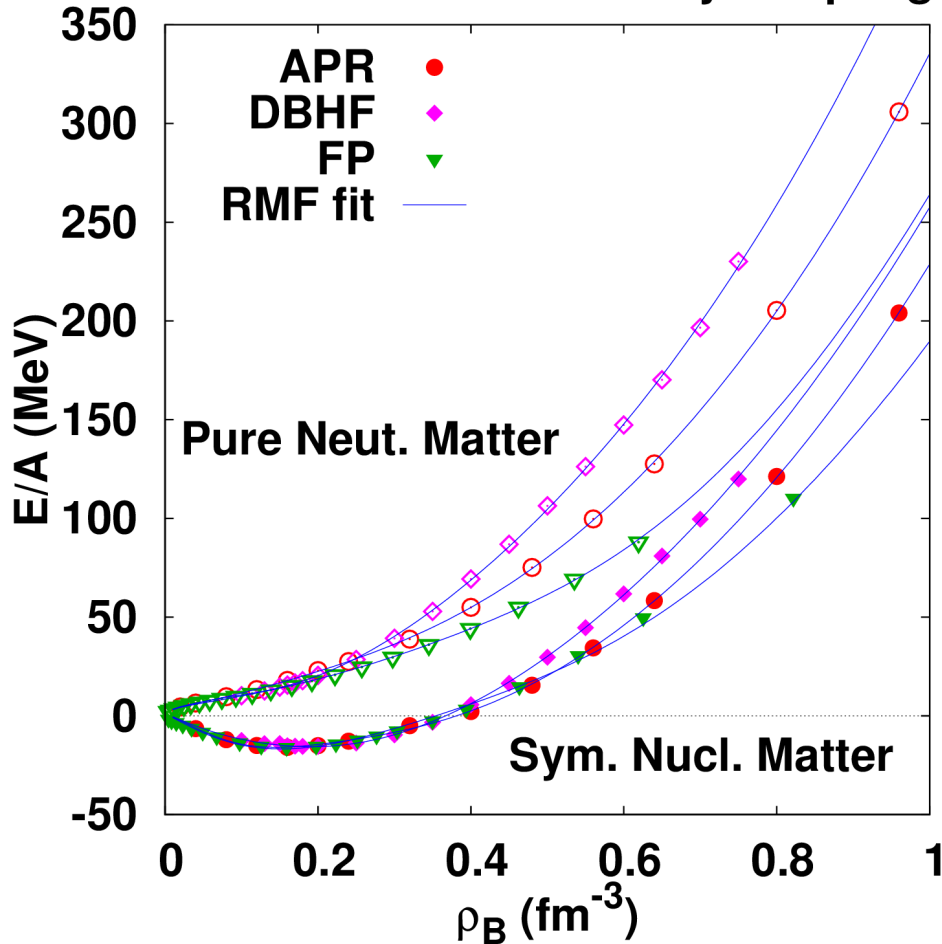
QCD Phase Diagram



$$\delta = (N-Z)/A \quad (\text{or } Y_Q(\text{hadron}) = Q_h/B \sim (1-\delta)/2)$$

Fitting "Ab initio" EOS via RMF

RMF EOS with Multi-Body Coupling



RMF fitting EOS does not necessarily describe finite nuclei....

AO, Tsubakihara, Harada ('16, NIC proc.)

Ohnishi @ JPS, Utsunomiya, Sep.13, 2017 20

Relativistic Mean Field with Multi-body couplings

■ $\sigma\omega\rho$ model +std. non-linear terms + multi-body couplings

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M_N - U_s - \gamma^\mu U_\mu)\psi + \mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} ,$$

$$\mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} = \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma - \frac{1}{4}\omega_{\mu\nu}\omega^{\mu\nu} - \frac{1}{4}R_{\mu\nu} \cdot R^{\mu\nu} - \mathcal{V}_{\sigma\omega\rho} ,$$

$$U_s = -g_\sigma\sigma \left[1 - r_{\sigma\sigma}\sigma/f_\pi \right] + g_\sigma\omega^\mu\omega_\mu \left[r_{\omega\omega} - r_{\sigma\omega\omega}\sigma/f_\pi \right] ,$$

$$U_\mu = g_\omega\omega_\mu \left[1 - r_{\sigma\omega}\sigma/f_\pi + r_{\omega 3}\omega^\nu\omega_\nu/f_\pi^2 \right] + g_\rho\tau \cdot R_\mu \left[1 - r_{\sigma\rho}\sigma/f_\pi + r_{\omega\rho}\omega^\nu\omega_\nu/f_\pi^2 \right] ,$$

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_{\sigma\omega\rho} = & \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 \left[-a_\sigma f \log(\sigma/f_\pi) + \frac{1}{4}c_{\sigma 4}\sigma^4 + \frac{1}{3}c_{\sigma 3}f_\pi\sigma^3 \right] \\ & - \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu \left[1 - c_{\sigma\omega}\sigma/f_\pi \right] - \frac{1}{4}c_{\omega 4}(\omega^\mu\omega_\mu)^2 \\ & - \frac{1}{2}m_\rho^2 R^\mu \cdot R_\mu \left[1 - c_{\sigma\rho}\sigma/f_\pi + c_{\omega\rho}\omega^\mu\omega_\mu/f_\pi^2 \right] - \frac{1}{4}c_{\rho 4}(R^\mu \cdot R_\mu)^2 , \end{aligned}$$