
冷却原子と中性子物質

*E. E. Kolomeitsev, J. M. Lattimer, AO, I. Tews,
arXiv:1611.07311*

現実的な中性子物質 EOS 構築へ向けて

■ 中性子過剰物質物質のキーワード

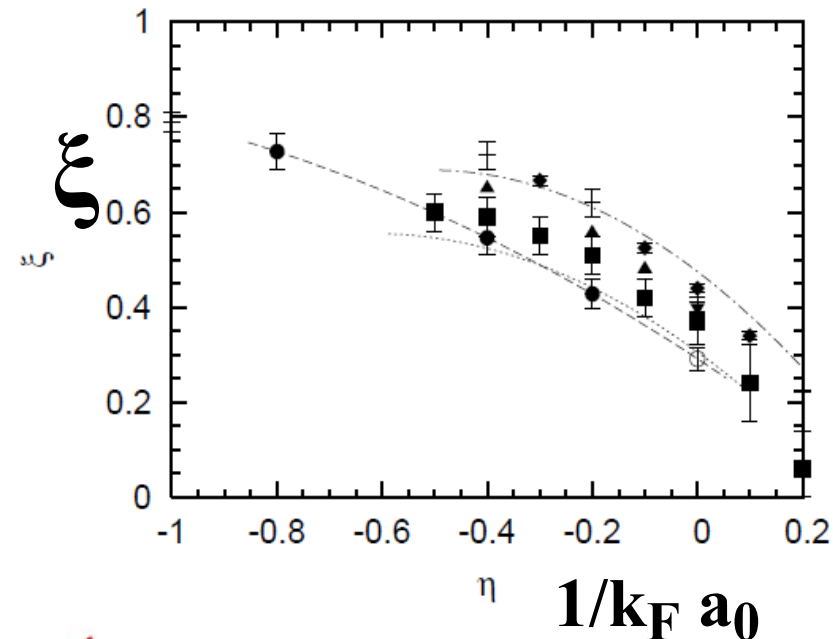
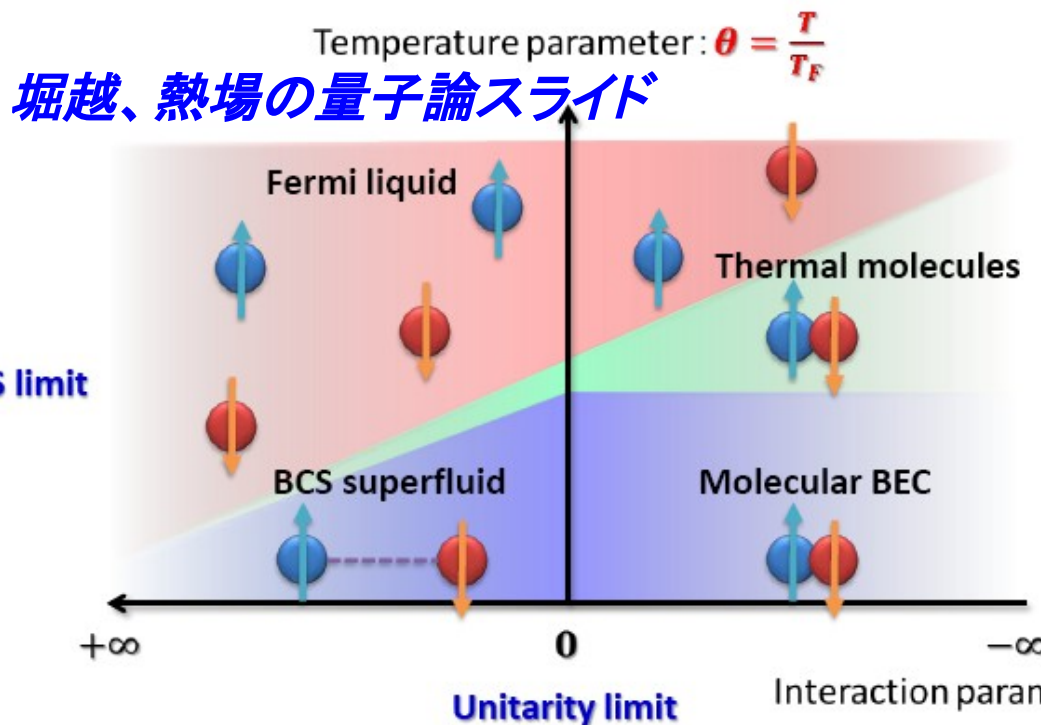
= 対称エネルギー・微視的相互作用・普遍性

● 低密度純中性子物質: 第一原理計算が可能 (e.g. Abe, Seki ('09); Takano)

● 大きな散乱長 ($a_0 \sim -16$ fm) \rightarrow 中性子物質 \sim ユニタリーガス

$$E^{Unitary} = \xi E^{Free} \quad \xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

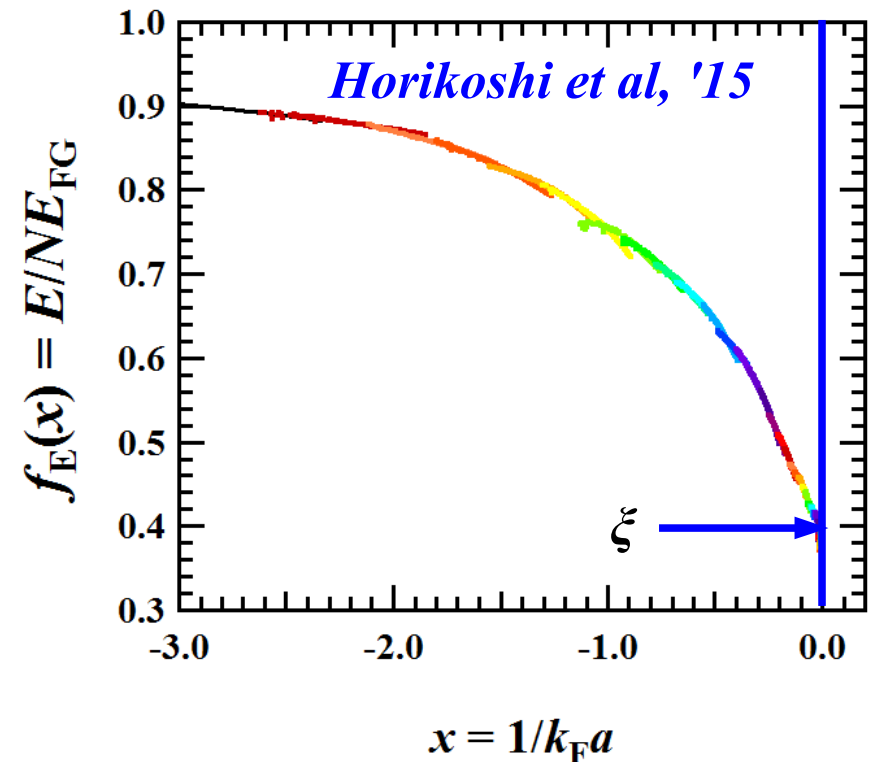
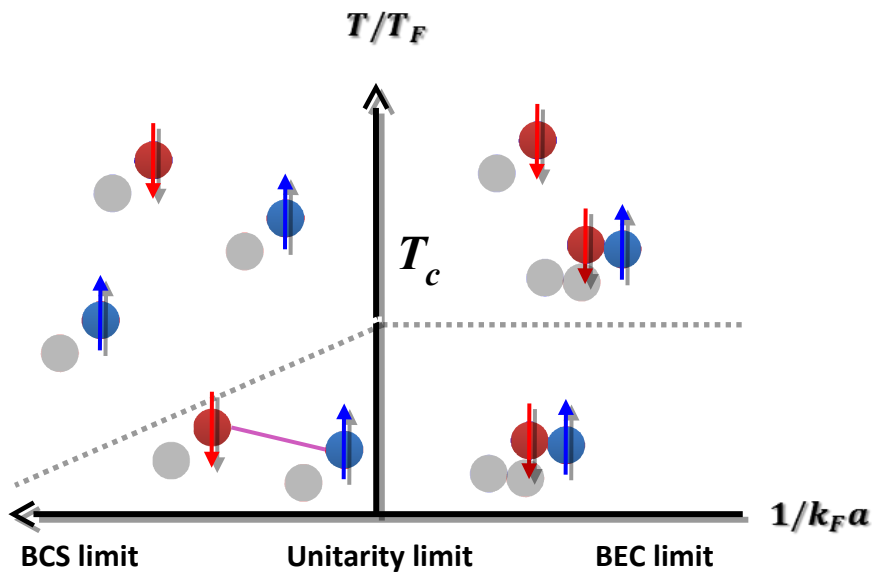
\rightarrow 理論計算手法のテスト、*finite* a_0 , r_{eff} を含む普遍的関数の探索



Abe, Seki ('09)



Cold Atom EOS

- $E = \xi E_{FG}$ ($\xi \sim 0.4$) in the unitary limit ($1/k_F a_0 \rightarrow 0$, $k_F r_{eff} = 0$)
 - ξ : Bertsch parameter (INT workshop)
- EOS measurement off unitary limit
Horikoshi et al., 2016
- How can we use the cold atom EOS in the context of NS matter ?



Comparison with Pure Neutron Matter EOS

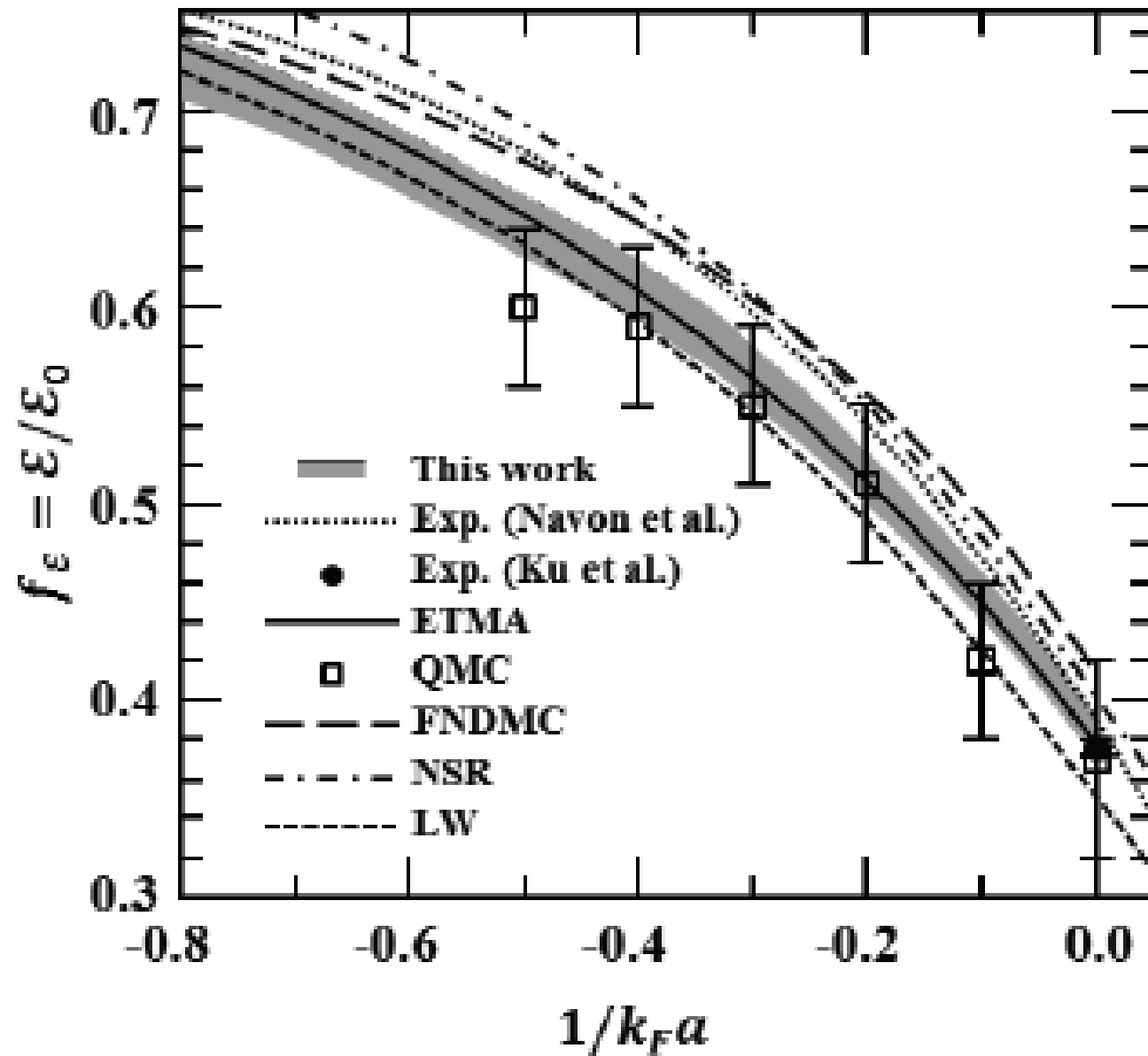
表 1: 冷却原子と希薄中性子物質

	冷却原子 (${}^6\text{Li}$)	希薄中性子物質
		
粒子系	スピン 1/2 フェルミ粒子	スピン 1/2 フェルミ粒子
質量 (mc^2)	5600MeV	940MeV
力の種類	電磁気力	核力
ポテンシャルサイズ (r_0)	$\sim 2 \text{ nm}$	$\sim 2 \text{ fm}$
平均粒子間距離 ($d = n^{-1/3}$)	$\sim 250 \text{ nm}$	$> 2.3 \text{ fm}$ ($n = n_0/2$)
温度 (T)	$\sim 100 \text{ nK}$	$10^5 \sim 10^7 \text{ K}$
熱的波長 ($\lambda_T = \frac{\hbar}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$)	$\sim 350 \text{ nm}$	100~900 fm
散乱長 (a)	$-\infty \sim +\infty$	-18.5 fm
有効長 (r_e)	4.7 nm	2.75 fm
ポテンシャル形状	短距離型	短距離型
温度パラメータ (T/T_F)	< 0.1	~ 0
相互作用パラメータ ($1/k_F a$)	$-\infty \sim +\infty$	$-\infty \sim -0.04$ ($0 \sim n_0/2$)
有効長パラメータ ($k_F r_e$)	~ 0.05	< 3.7

※飽和核密度： $n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$

大橋 *et al.* ('16)[原子核研究]

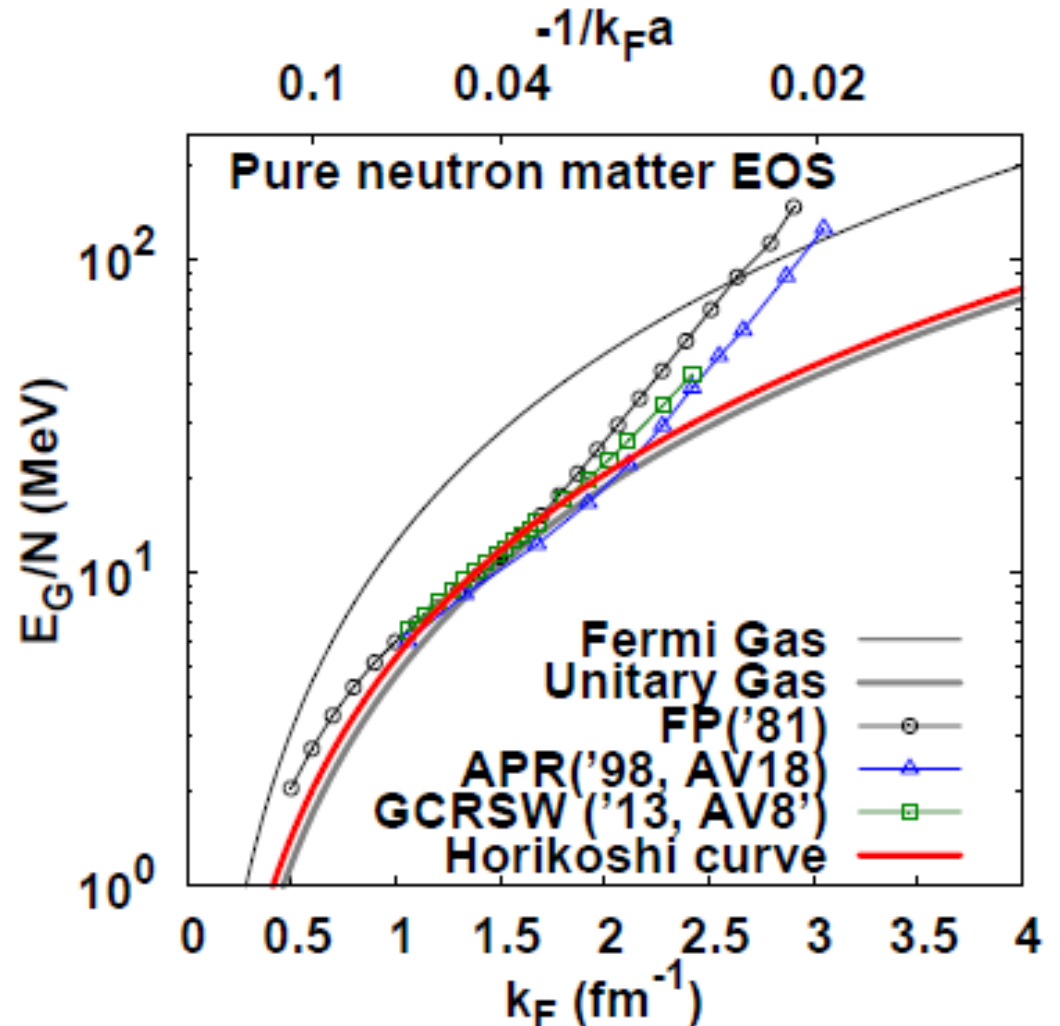
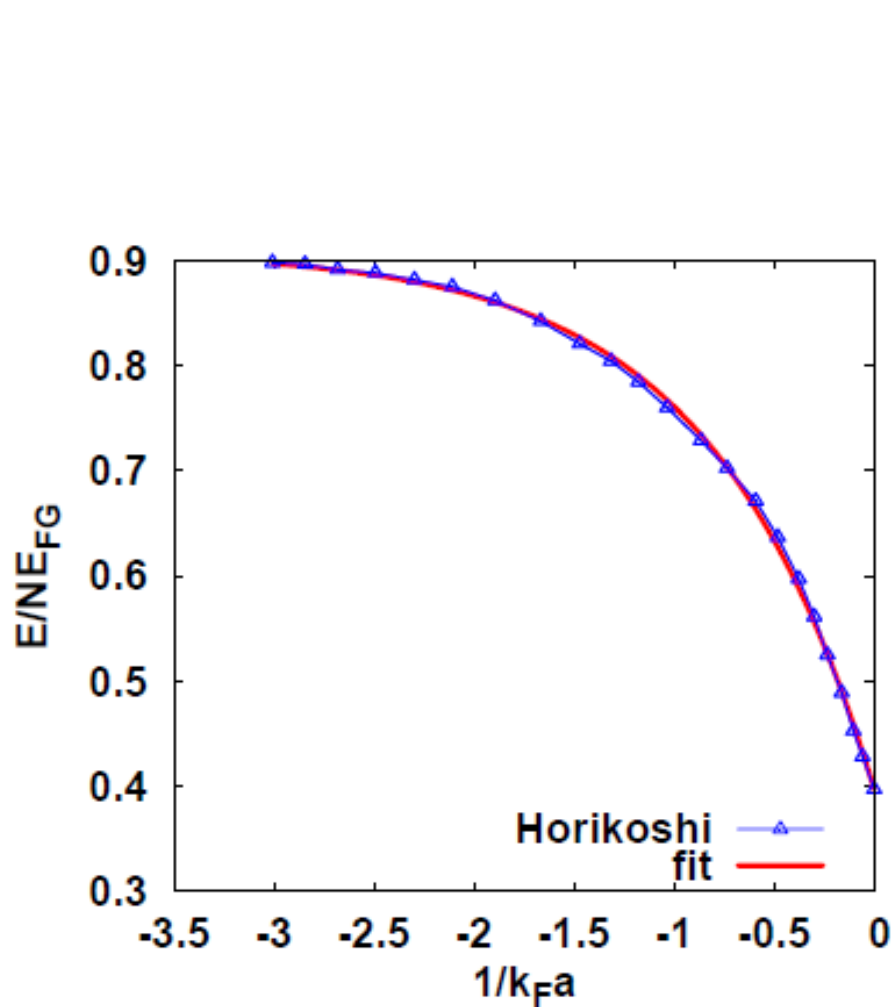
Cold Atom EOS



大橋 *et al.* ('16) [原子核研究]

Comparison with Pure Neutron Matter EOS

- Cold Atom EOS is consistent with MC result.
- How can we evaluate the effective range correction ?
- Does it have other impacts in neutron star physics ?



Low Density Neutron Star Matter EOS

- Nuclei & electron ($\rho < 4 \times 10^{11}$ g/cc)

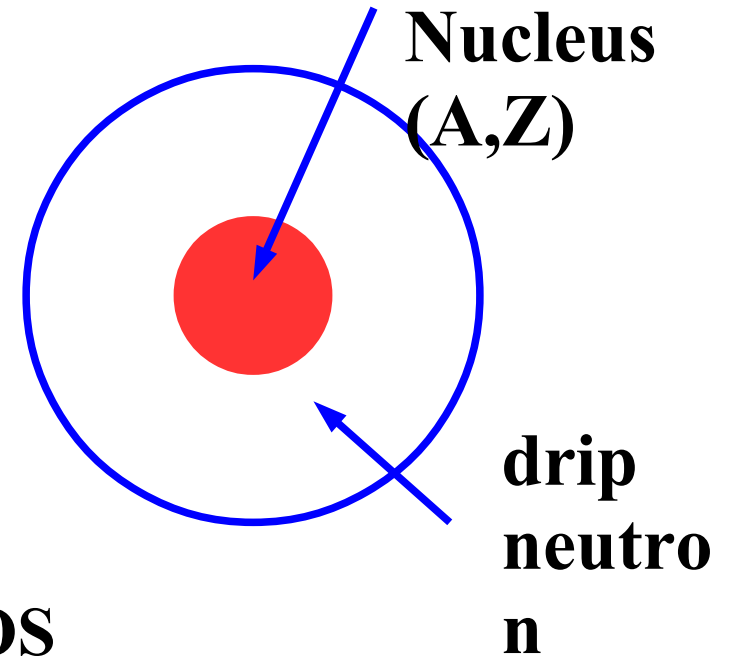
- Nuclei, drip neutron, electron (4×10^{11} g/cc $< \rho < 2.5 \times 10^{14}$ g/cc)
→ pure neutron matter EOS

- Uniform nuclear matter ($\rho > 2.5 \times 10^{14}$ g/cc)
→ nuclear matter EOS at $Z \ll N$

- “Standard” (low density) NS matter EOS

G. Baym, H.A. Bethe, C. J. Pethick, NPA175('71),225.

Bulk pure neutron matter EOS



$$W(k, 0) \approx \frac{19.74k^2}{\text{kin. E}} - k^3 \frac{(40.4 - 1.088k^3)}{(1 + 2.545k)}$$

↑
↑

Fermi mom.
 $\propto \rho$

Another way to use Cold Atom EOS

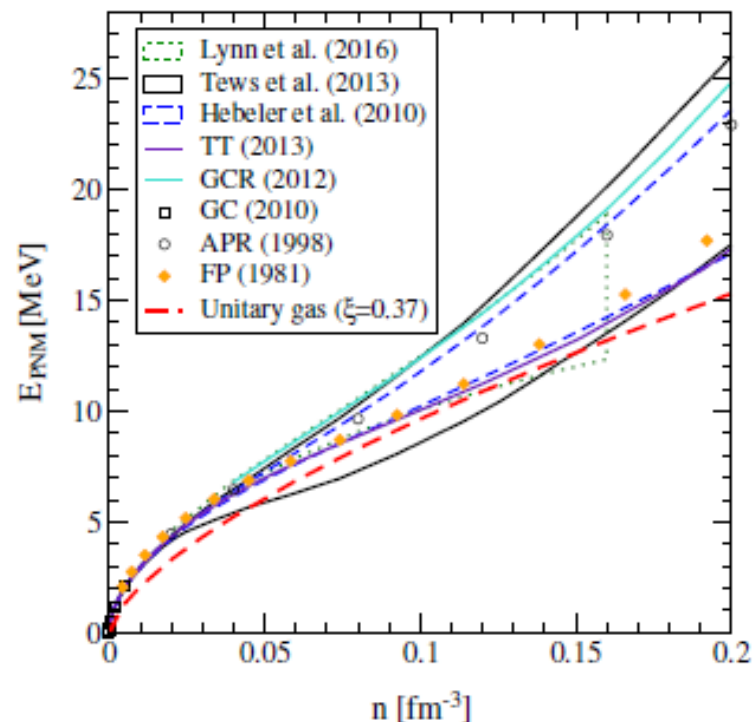
- Unitary gas EOS は ab initio pure neutron matter EOS の lower bound を与えているように見える。(Conjecture)

$$E_{\text{PNM}}(n) \geq E_{\text{UG}}(n)$$

$$E_{\text{UG}}(u) = \frac{3}{5} E_{\text{F}}(n) \xi = \frac{3\hbar^2 k_{\text{F}}^2}{10m_{\text{n}}} \xi = E_{\text{UG}}^0 u^{2/3}$$

$$(\xi \sim 0.37, u = n/n_0)$$

- これが正しいなら、対称エネルギーへの制限が与えられるのでは？



Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311

Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy

- 対称エネルギー = 純中性子物質エネルギー - 対称核物質エネルギー

$$S(u) = E_{\text{PNM}}(u) - E_{\text{SNM}}(u)$$

$$E_{\text{SNM}}(u) = E_0 + K (u - 1)^2 / 18 + \mathcal{O}[(u - 1)^3]$$

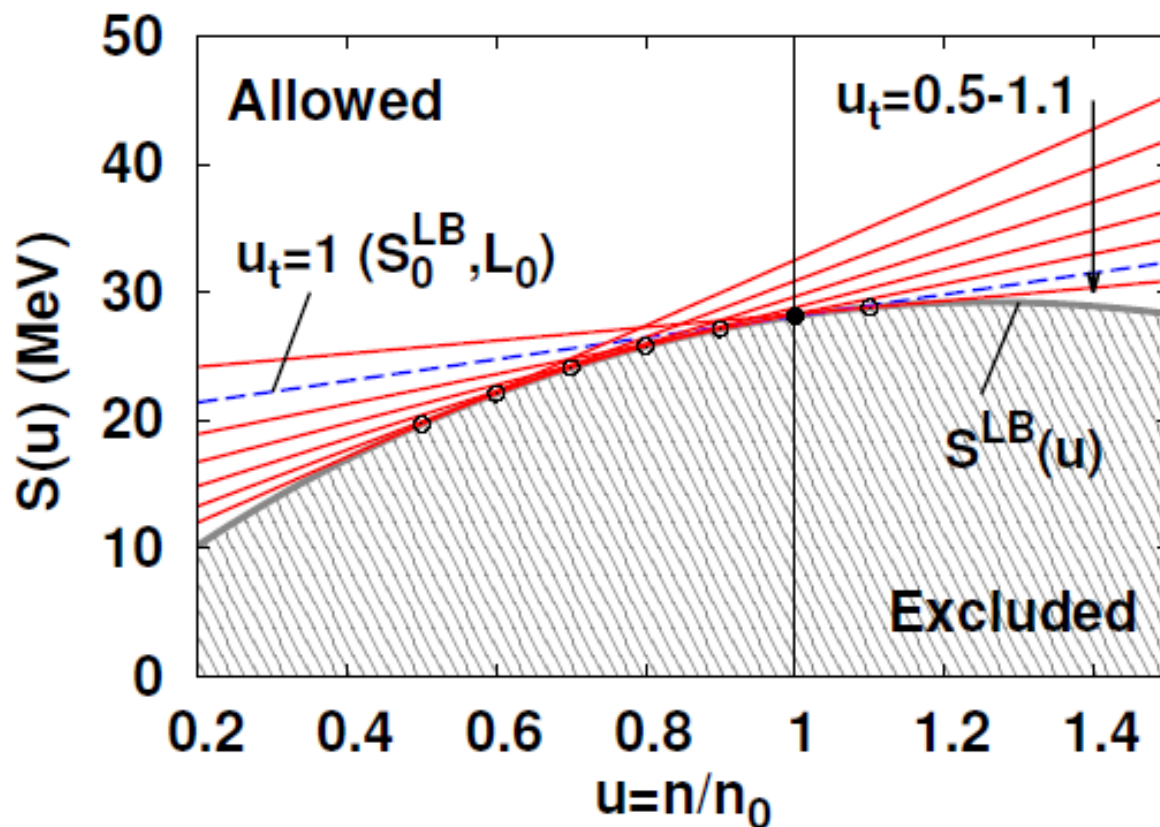
$$S(u) \geq E_{\text{UG}}^0 u^{2/3} - \left[E_0 + \frac{K}{18} (u - 1)^2 \right] \equiv S^{\text{LB}}(u)$$

- S_0 への制限

$$S_0 \geq E_{\text{UG}}^0 - E_0 \equiv S_0^{\text{LB}}$$

- $S_0 > S_0^{\text{LB}}$ では、L への制限

Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews, arXiv:1611.07311



Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy Parameters

■ Symmetry Energy Parameters (S_0, L) への制限

$$S_0 + \frac{L}{3}(u - 1) \geq E_{\text{UG}}^0 u^{2/3} - \left[E_0 + \frac{K_n}{18}(u - 1)^2 \right]$$

■ 接線条件 $\rightarrow L$ の領域

$$S_0 = \frac{E_{\text{UG}}^0}{3u_t^{1/3}}(u_t + 2) + \frac{K_n}{18}(u_t - 1)^2 - E_0$$

$$L = \frac{2E_{\text{UG}}^0}{u_t^{1/3}} - \frac{K_n}{3}(u_t - 1)$$

■ $(u-1)^3$ を無視しているなので、不等式が成り立つには E_{SNM} を大きく、 E_{UG} を小さく見積もる必要あり。

$$E_0 = -15.9 \pm 0.4 \text{ MeV}, n_0 = 0.164 \pm 0.007 \text{ fm}^{-3},$$

$$K = 230 \pm 40 \text{ MeV}, \xi = 0.370 \pm 0.005$$

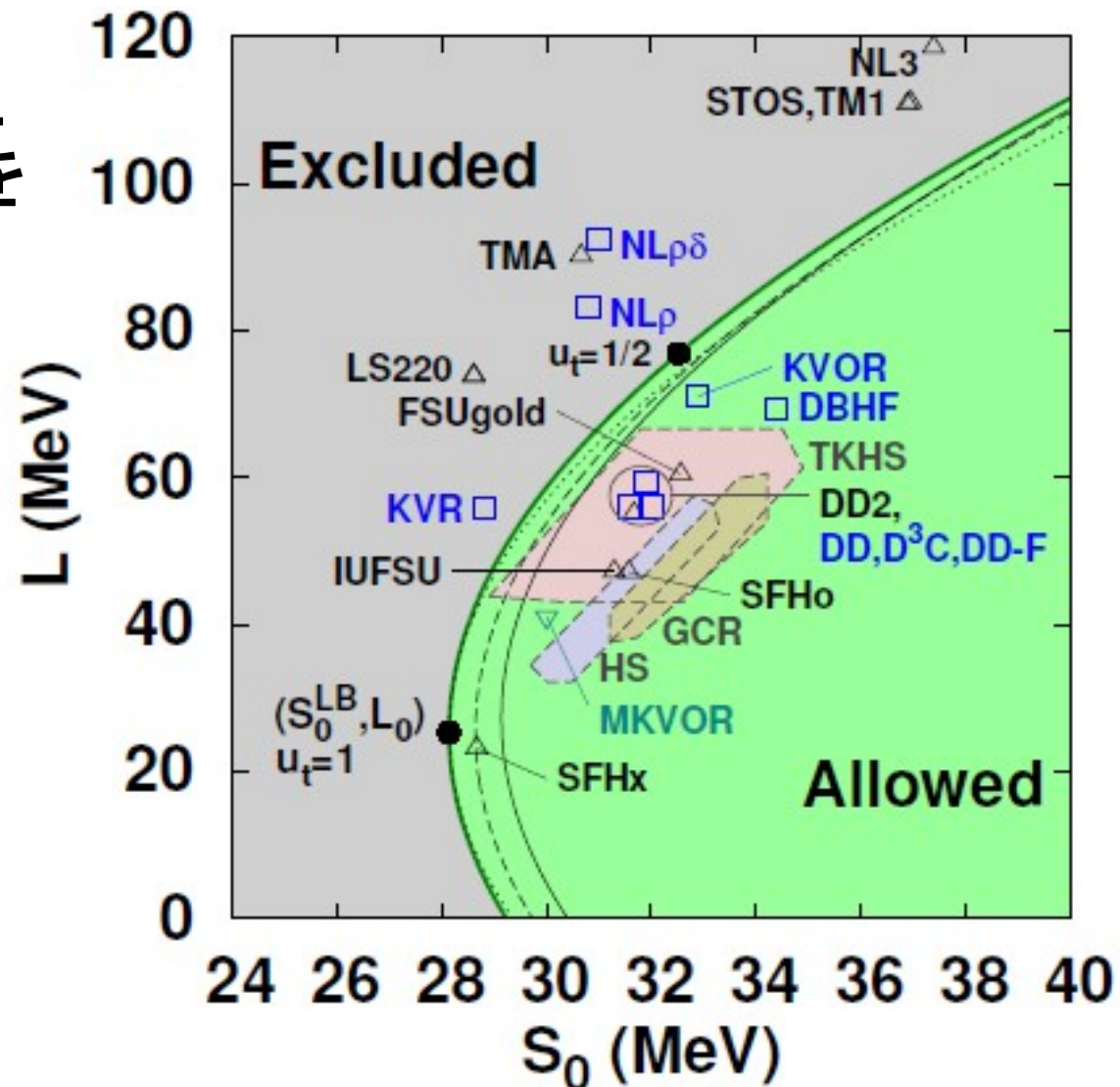
Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy Parameters

- 最も conservative なパラメータ

$$E_0 = -15.5 \text{ MeV}, n_0 = 0.157 \text{ fm}^{-3}, K = 270 \text{ MeV}, \xi = 0.365$$

- Unitary Gas からの制限は、コンパクト天体現象の計算に用いられている多くの EOS を rule out

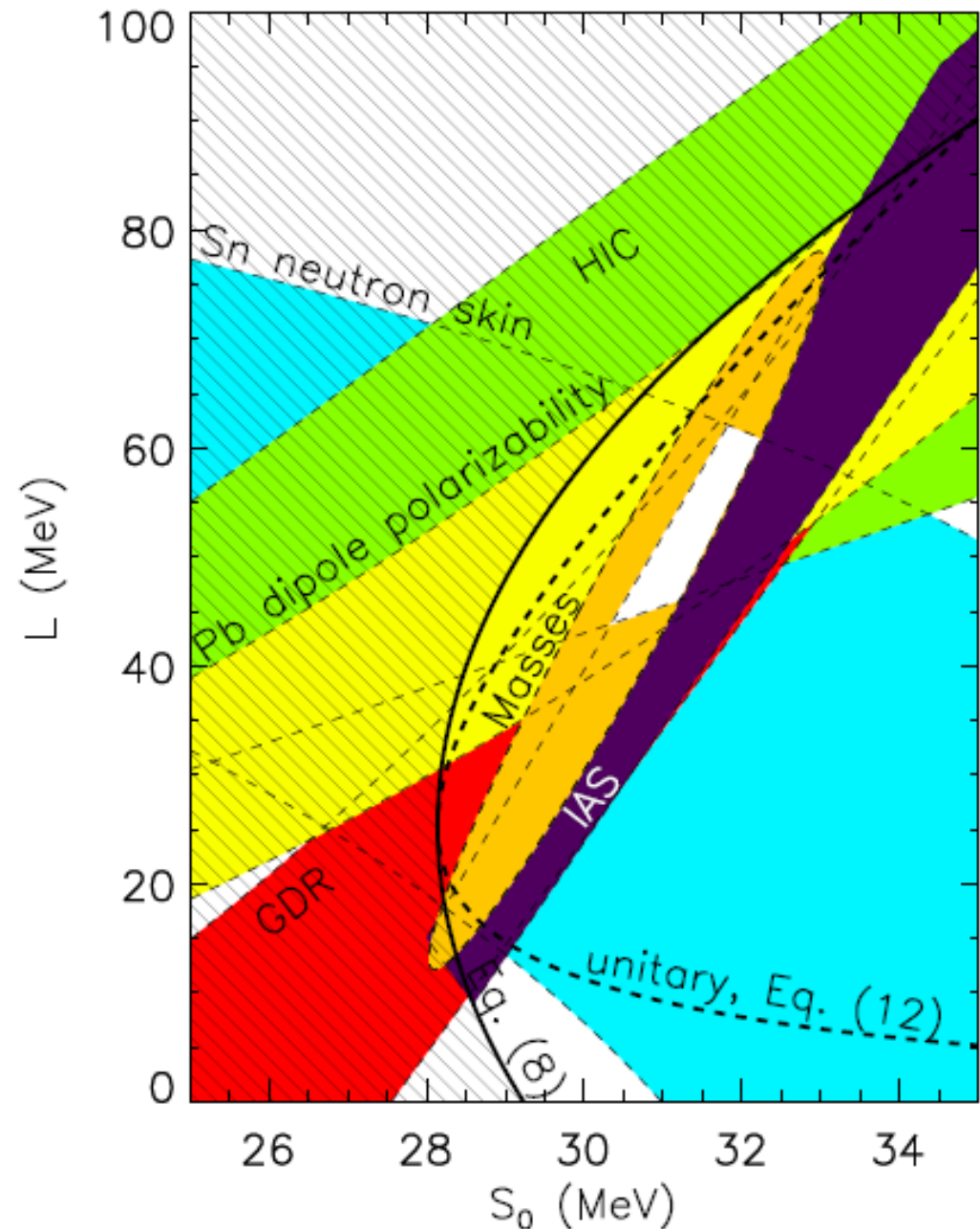
*Fisher et al. ('14),
Klahn et al. ('06)*



*Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311*

Unitary Gas Constraint vs Experimental Constraints

- Unitary gas constraint と実験による制限は consistent (残念ながら、より強い制限を与えることはできなかった。)



Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311

Summary

- 冷却原子は外部磁場を調整することにより散乱長を変化させることができ、中性子物質の「量子シミュレータ」の役割を果たす。
(有効レンジ r_{eff} は一般には非常に小さく、補正が必要。)
- 純中性子物質では散乱長が大きく ($a_0 \sim -18.9 \text{ fm}$)、unitary gas ($1/a_0 k_F = 0, r_{\text{eff}} k_F = 0$) に近い。
- unitary gas のエネルギーが中性子物質エネルギーの下限を与えるとすれば、対称エネルギーへの強い制限が与えられる。
- 有限の a_0 における cold atom energy が求められている。
Horikoshi et al. ('16)
更なる対称エネルギーへの制限ができる可能性があるだろう。

