

高密度中性子物質の状態方程式 —成分プラズマモデルとのアナロジー—

高知大学 総合人間自然科学研究科 理工学専攻 M2 角田 幹樹

指導教員 飯田 圭

目次

中性子星とは

中性子星物質の状態方程式

中性子物質と一成分プラズマ

結果

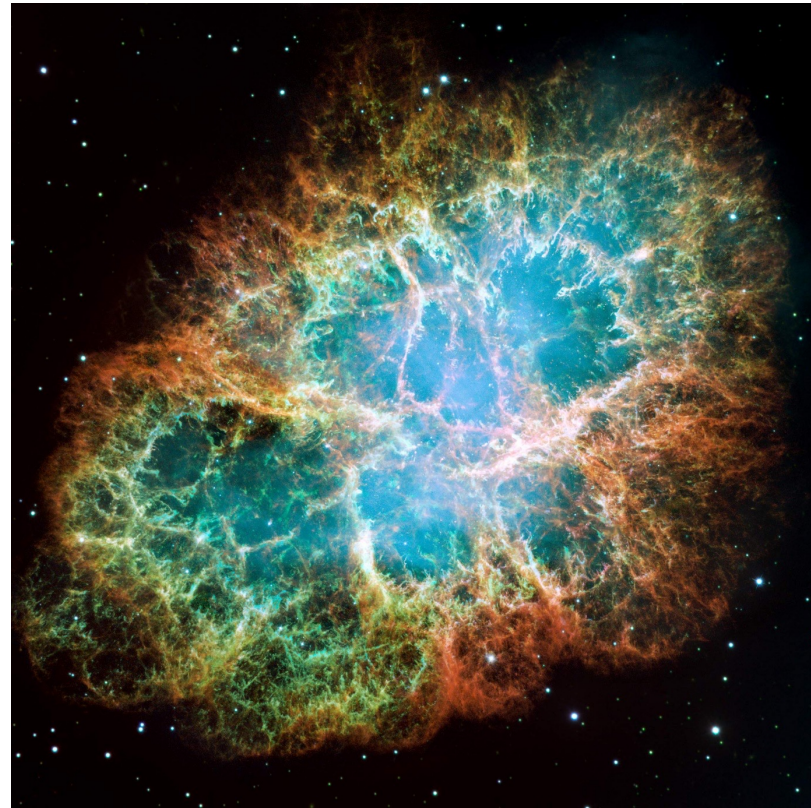
結論

参考文献

中性子星とは①

中性子星

太陽質量の 8 倍以上の恒星が超新星爆発を起こした際に残る
超高密度の天体



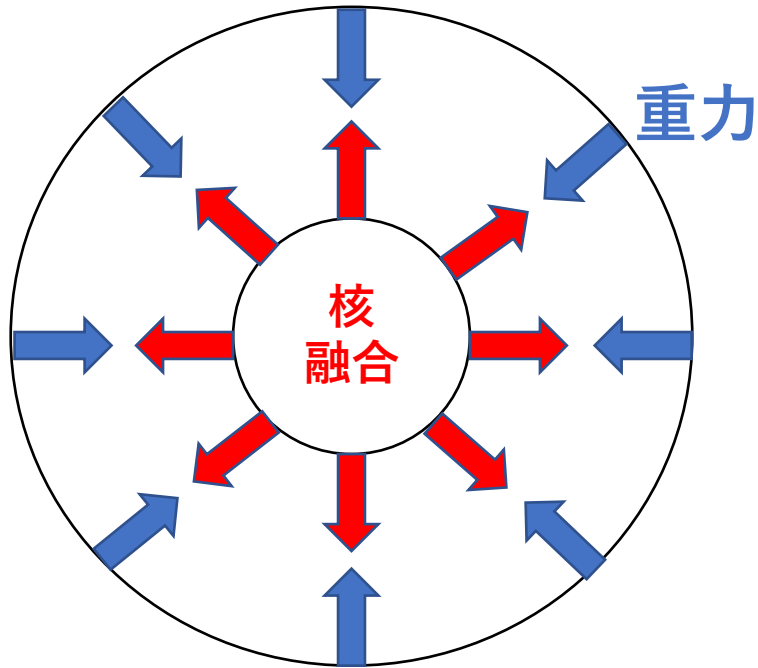
超新星残骸かに星雲〔1〕

NASA

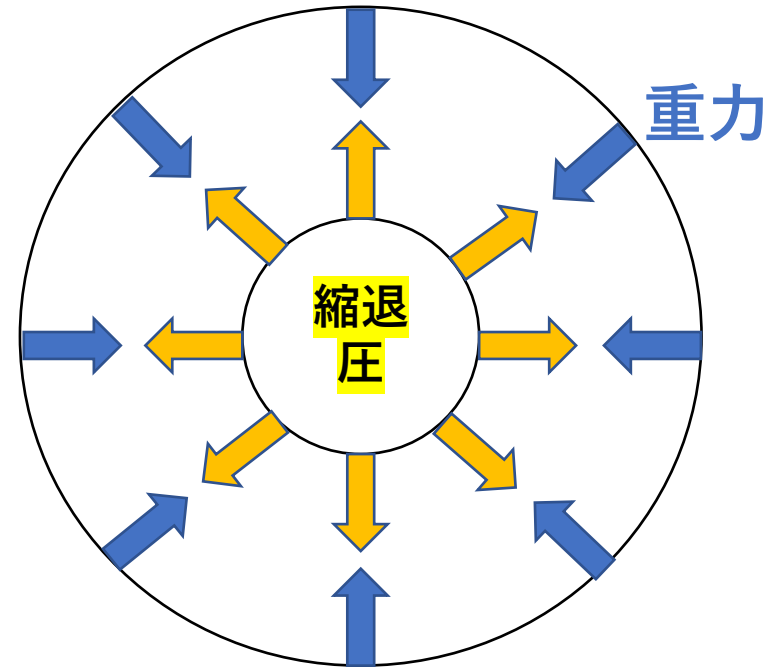
https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_460.html

中性子星とは②

主系列星（太陽など）
重力 VS 熱的な圧力



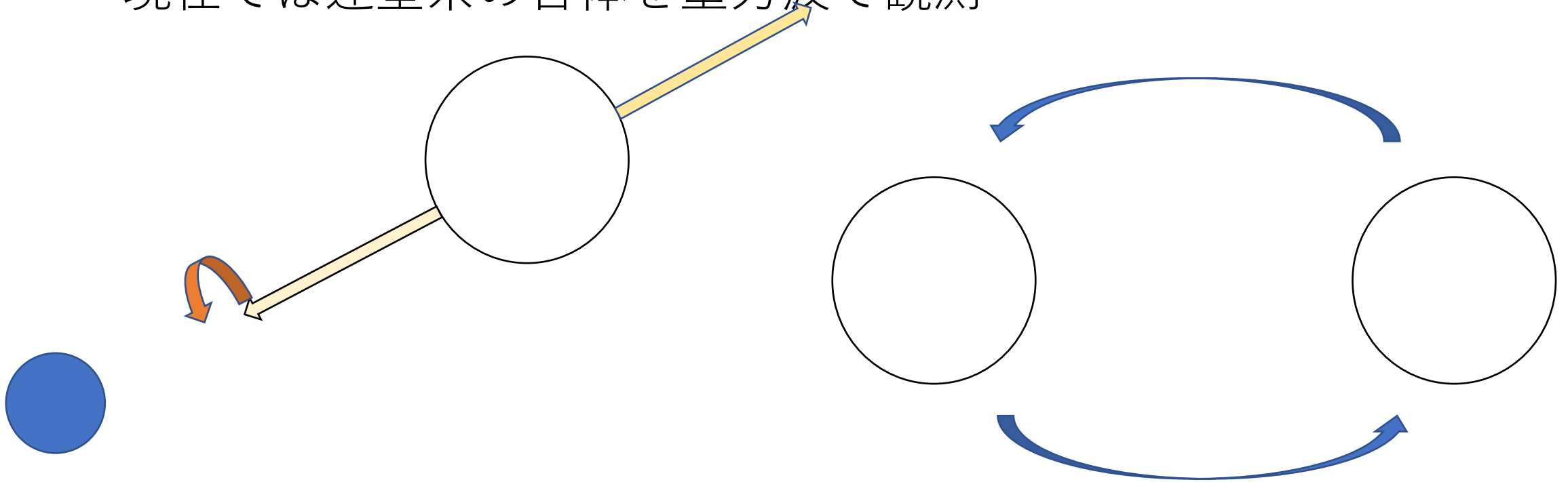
中性子星
重力 VS 中性子の縮退圧



中性子星とは③

観測

パルサーによって発見（当時は何か分からなかった）
現在では連星系の合体を重力波で観測



中性子星とは④

なぜ注目されるのか

地球上では再現できない高密度物質の実験室！

状態方程式

磁氣的性質

超流動性

超巨大な原子核 ...

マグネター

グリッチ現象

バスタ構造の原子核

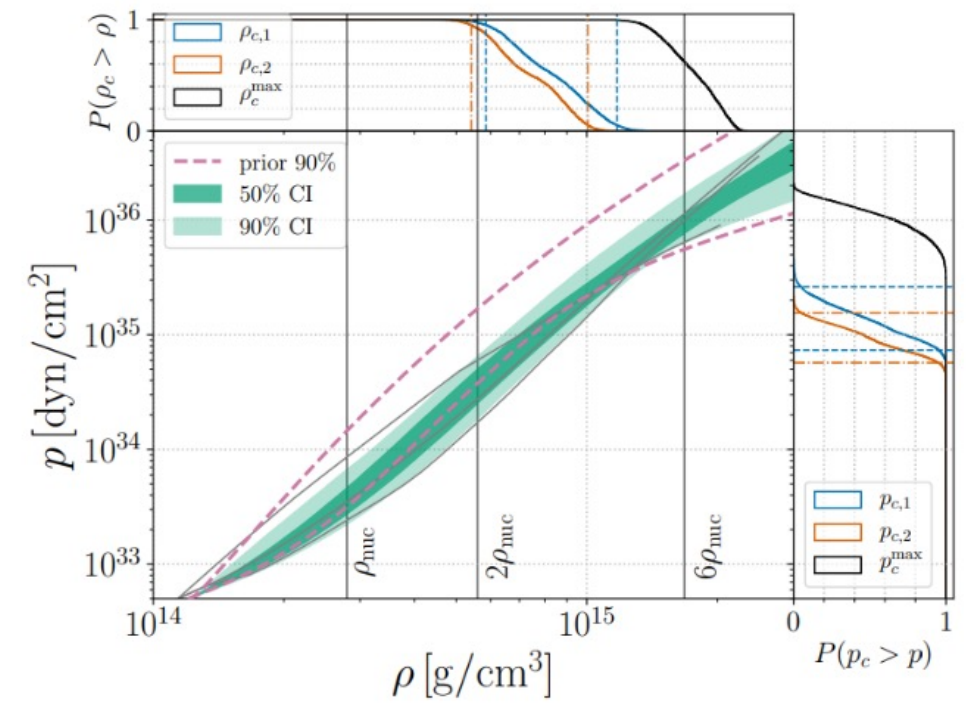
中性子星物質の状態方程式①

中性子星の連星系の合体による重力波 GW170817
1.97M_⊙の質量をもった中性子星（当時最大級）



中性子物質の状態方程式

音速 $c_s^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho}$



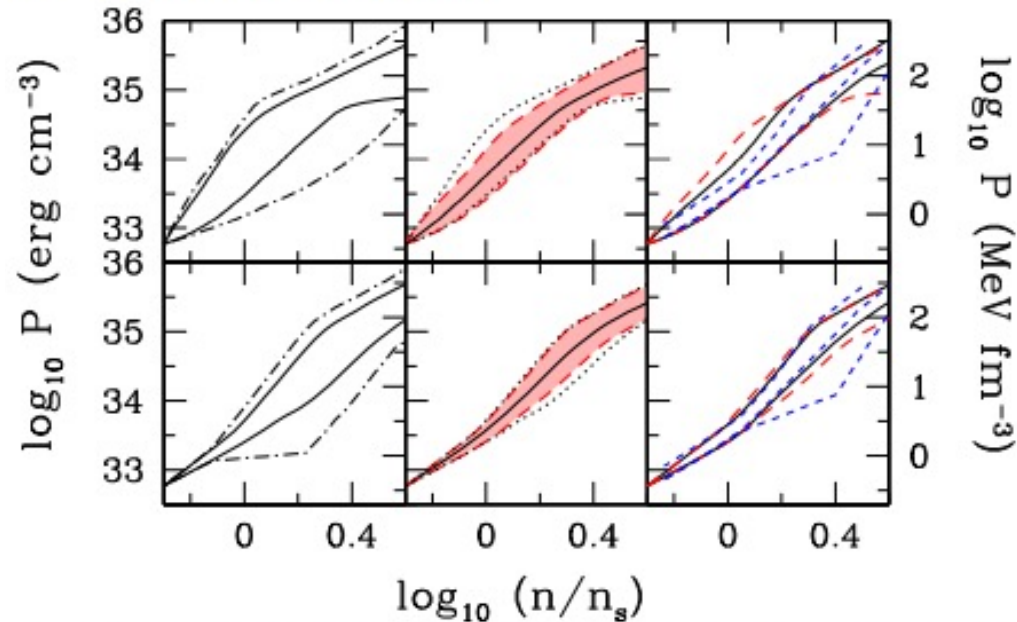
中性子星物質の状態方程式
〔2〕 B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 161101 (2018)

中性子星物質の状態方程式②

NICERによるX線観測結果とも一致

NICER (**N**eutron star **I**nterior **C**omposition **E**xpl**o**re**R**)

中性子星観測装置。精密なX線観測で中性子星の質量と半径を決定できる。

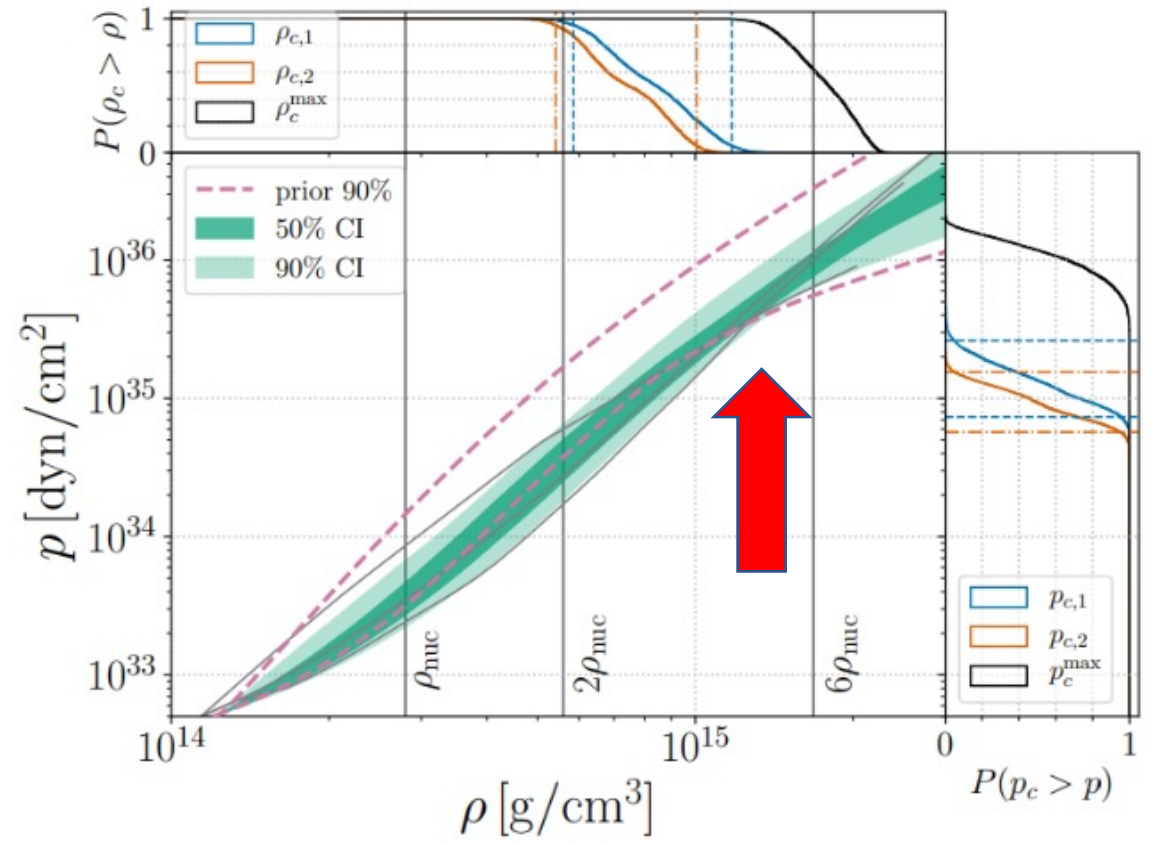


NICERによる観測で得られた状態方程式
〔3〕 M. C. Miller et al., *Astrophys. J.* **887**. L24 (2019)

中性子星物質の状態方程式③

原子核密度の5倍あたりで折れ曲
がりがみられる

なぜ？



中性子星物質の状態方程式
〔2〕 B. P. Abbott et al. , Phys.
Rev. Lett. **121**, 161101 (2018)

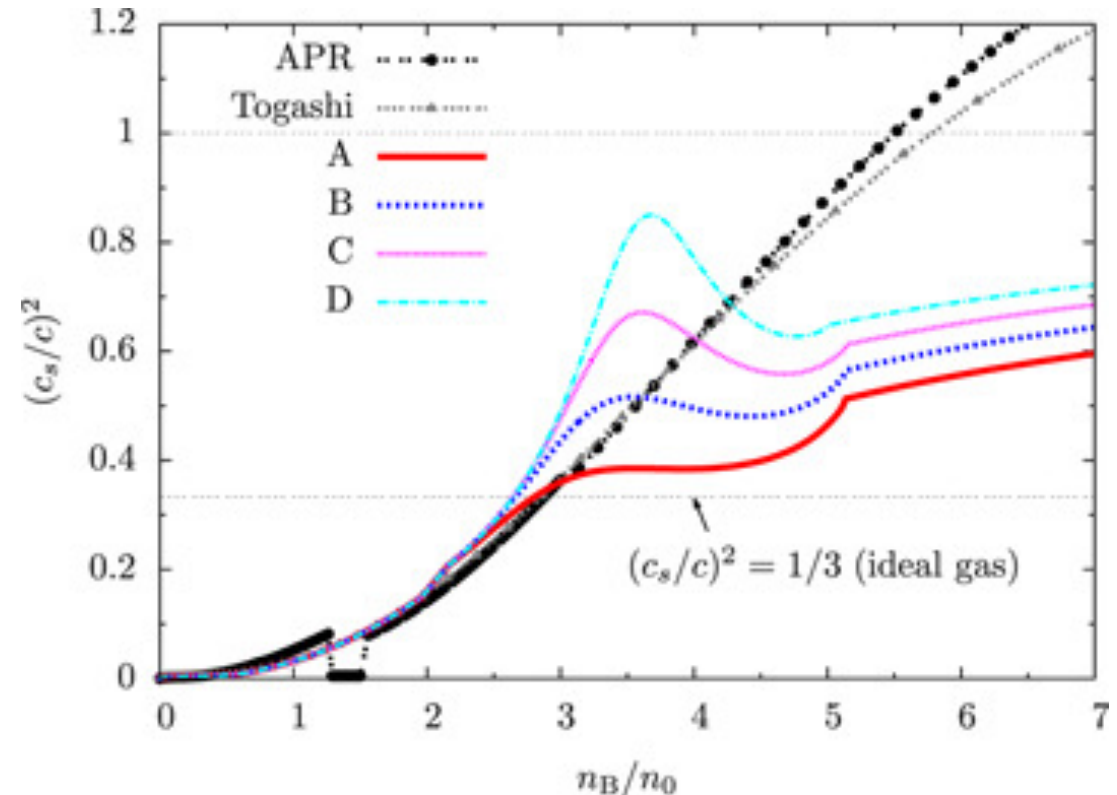
中性子星物質の状態方程式④

折れ曲がりなぜ起きるのか

クォーク物質の出現によるもの？

Quark-Hadron Crossover

ハドロン物質からクォーク物質
へ相転移を経ずに連続的に変化



Quark-Hadron Crossoverの一例

[4] G. Baym et al., *Astrophys.J.* **885**. 42 (2019)

中性子星物質の状態方程式⑤

本当にクォーク物質を考えることが必要だろうか？



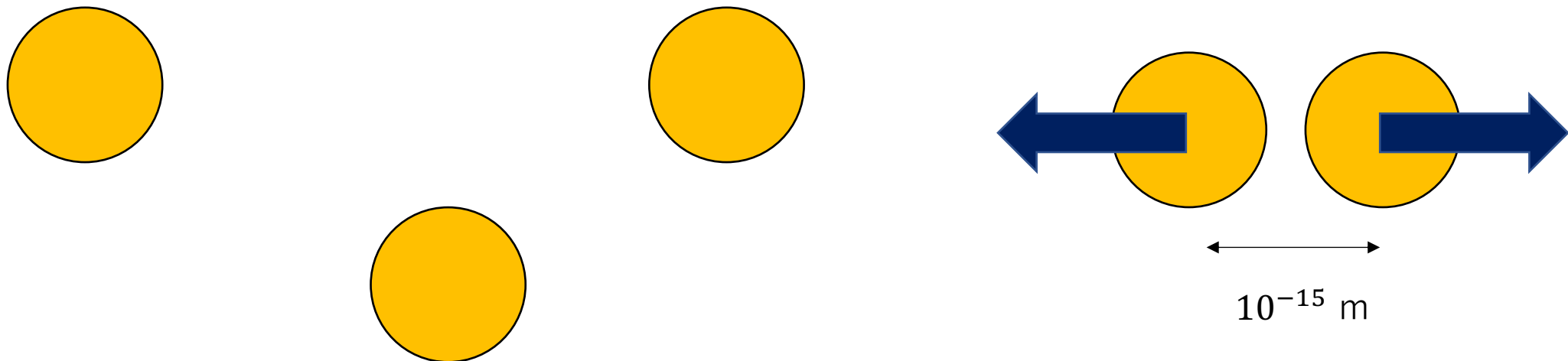
ハドロンのみで説明できないか？

中性子物質と一成分プラズマ①

簡単のため中性子星は中性子のみでできているとする

中性子星内部の中性子

ある程度まで近づくと…急激に斥力がはたらく



中性子物質と一成分プラズマ②

中性子間の相互作用

量子ハドロン力学 (QHD)

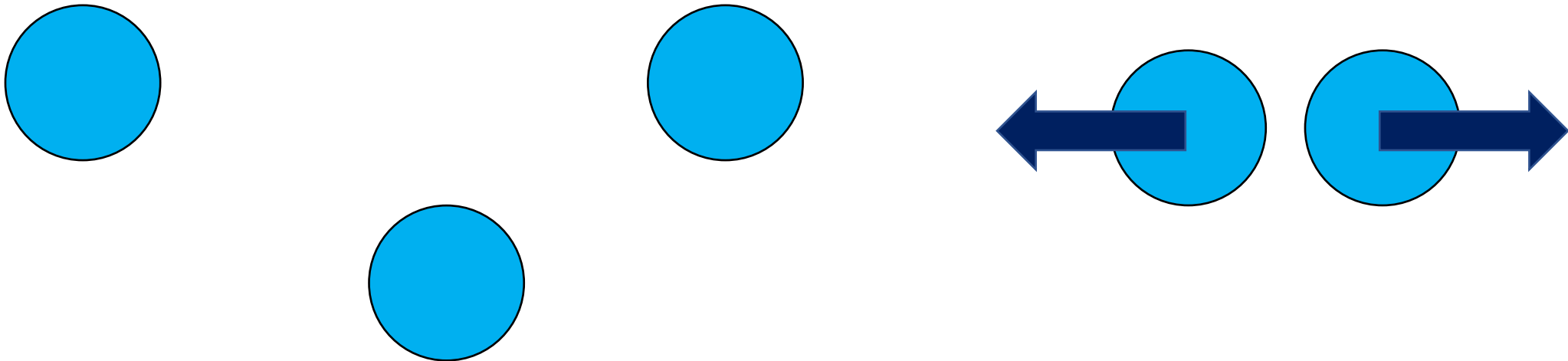
核子多体系を扱う枠組み

ここでは中性子-中性子のカップリングを扱う

$$V_{eff}(r) = \frac{g_v^2 e^{-m_v r}}{4\pi r} - \frac{g_s^2 e^{-m_s r}}{4\pi r}$$

中性子物質と一成分プラズマ③

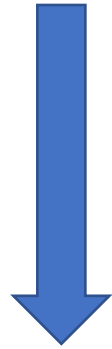
ある程度まで近づくと急激に斥力がはたらく
→ 一成分プラズマ



中性子物質と一成分プラズマ④

一成分プラズマのクーロン系

状態方程式が精度よく計算されている

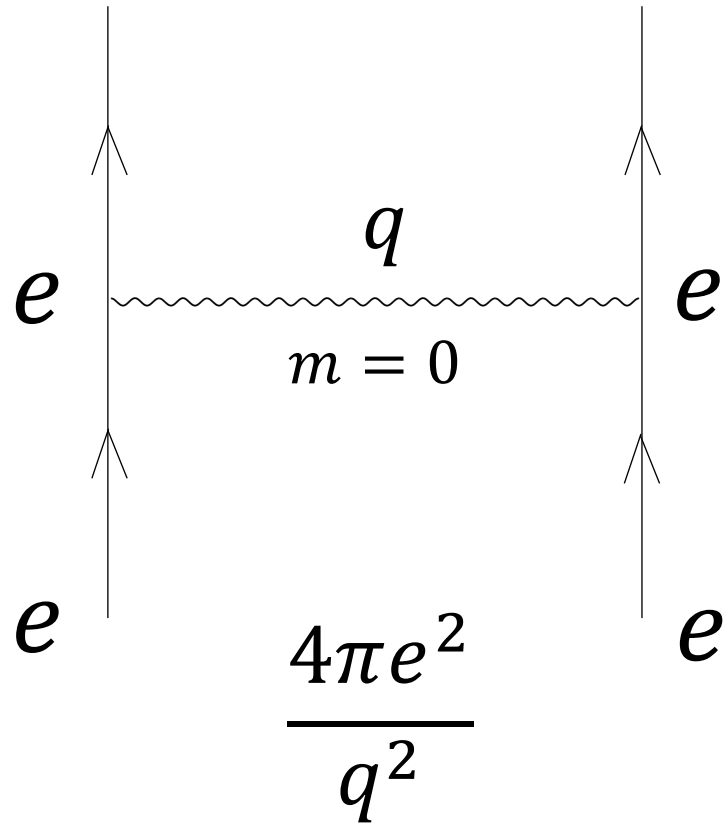


質量、相互作用をQHDで書き換える

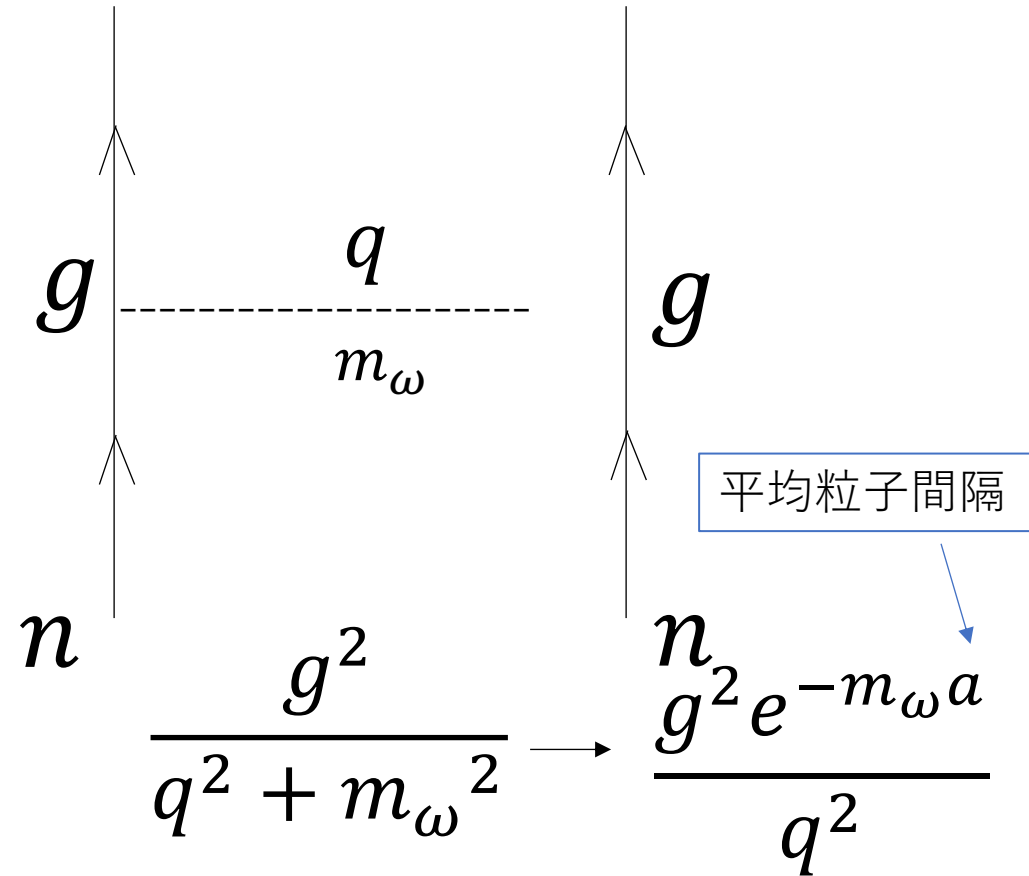
中性子物質の状態方程式 ← 評価

中性子物質と一成分プラズマ⑤

一成分プラズマ



中性子物質



中性子物質と一成分プラズマ⑥

書き換えの正当性

$$\frac{q^2}{k^2 + k_D^2}$$

クーロン系 $k_D^2 = \frac{3 \cdot 4\pi n_e e^2}{2E_F}$

中性子系 $k_D^2 = \frac{3n_n g^2}{2E_F}$

• 典型的な n に対して、 $m_\omega^2 \leq$ 中性子系 k_D^2

中性子物質と一成分プラズマ⑦

一成分プラズマの状態方程式

$$F = F_0 + F_{xc}$$

$$= F_0 + F_x + F_c$$

$$F_0 = \frac{3n_e \hbar^2}{10m} (3\pi^2 n_e)^{2/3} \quad \rightarrow \quad E_0(r_s) \sim \frac{1}{r_s^2}$$

$$F_x = -\frac{3}{4} \left[\frac{3}{2\pi} \right]^{2/3} \frac{n_e e^2}{a_c} \quad \rightarrow \quad E_x(r_s) \sim \frac{1}{r_s}$$

$$E_c(r_s) = \frac{2\hbar^2}{n_e e^4 m} F_c$$

$$Ry = \frac{e^4 m}{2\hbar^2} = 13.6058 \text{ eV}$$

$$E_c(r_s) = y_0 \left\{ \ln \frac{x^2}{X(x)} + \frac{2b}{Q} \tan^{-1} \frac{Q}{2x+b} \right. \\ \left. - \frac{bx_0}{X(x_0)} \left[\ln \frac{(x-x_0)^2}{X(x)} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2(b+2x_0)}{Q} \tan^{-1} \frac{Q}{2x+b} \right] \right\}$$

$$x = \sqrt{r_s}, \quad X(x) = x^2 + bx + c, \quad Q = \sqrt{4c - b^2}$$

$$y_0 = 0.0621814 \\ b = 13.0720$$

$$x_0 = -0.409286 \\ c = 42.7198$$

$$r_s = \left[\frac{3}{4\pi n_e} \right]^{1/3} \frac{me^2}{\hbar^2}$$

$$a_c = \left[\frac{3}{4\pi n_e} \right]^{1/3}$$

$$\rightarrow r_s^*(n_n)$$

GFMCのデータに基づくVoskoら(Can. J. Phys. **58**, 1200 (1980))のfitting formula

中性子物質と一成分プラズマ⑧

ハートリー項の取り扱い

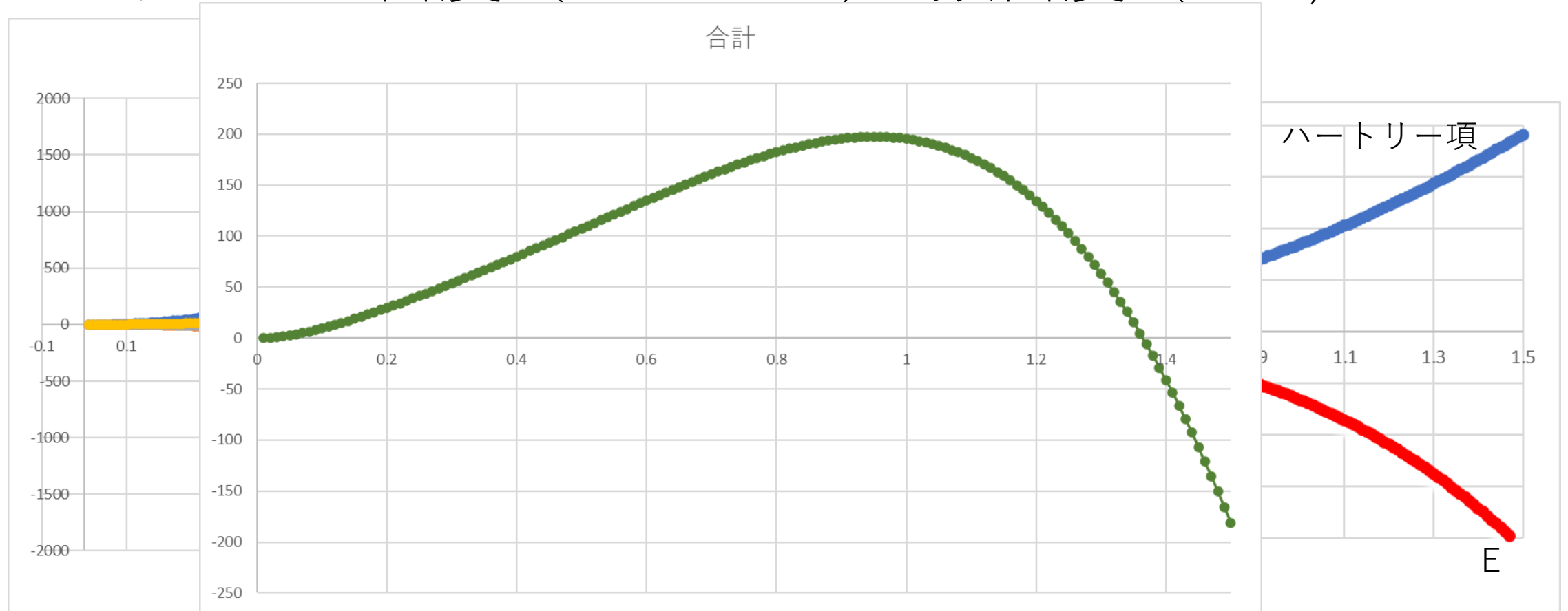
- 一成分プラズマでは消えてしまう項
- 中性子星物質では消えない
- QHDをもとに正の寄与を与える項として追加する

$$\frac{1}{2}m_\nu^2 V_0^2$$

ベクトル中間子場の期待値（平均場）

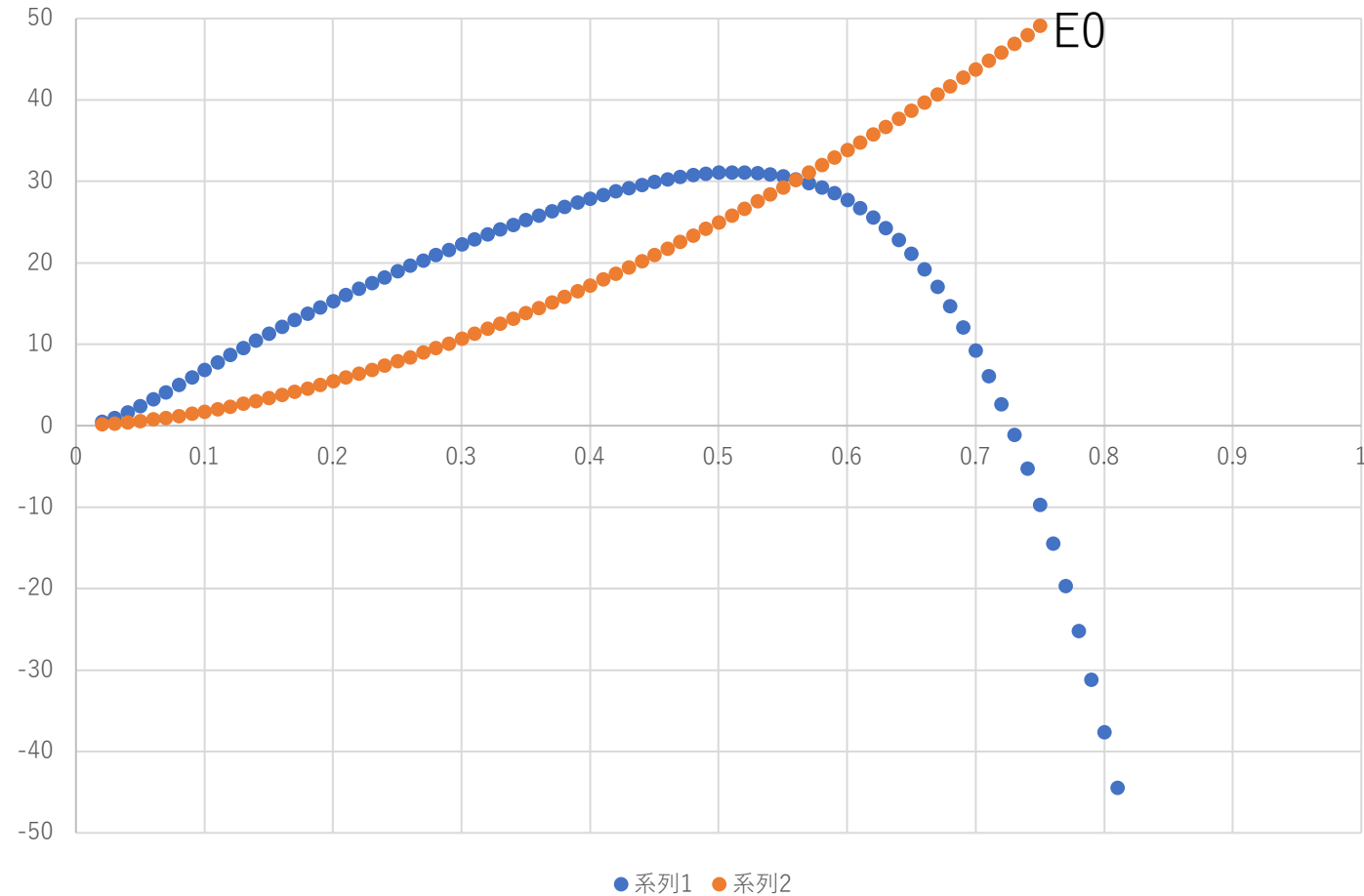
結果①

エネルギー密度 $E(\text{MeV fm}^{-3})$ と数密度 $n(\text{fm}^{-3})$



結果②

圧力 $P(\text{MeVfm}^{-2})$ と 数密度 $n(\text{fm}^{-3})$

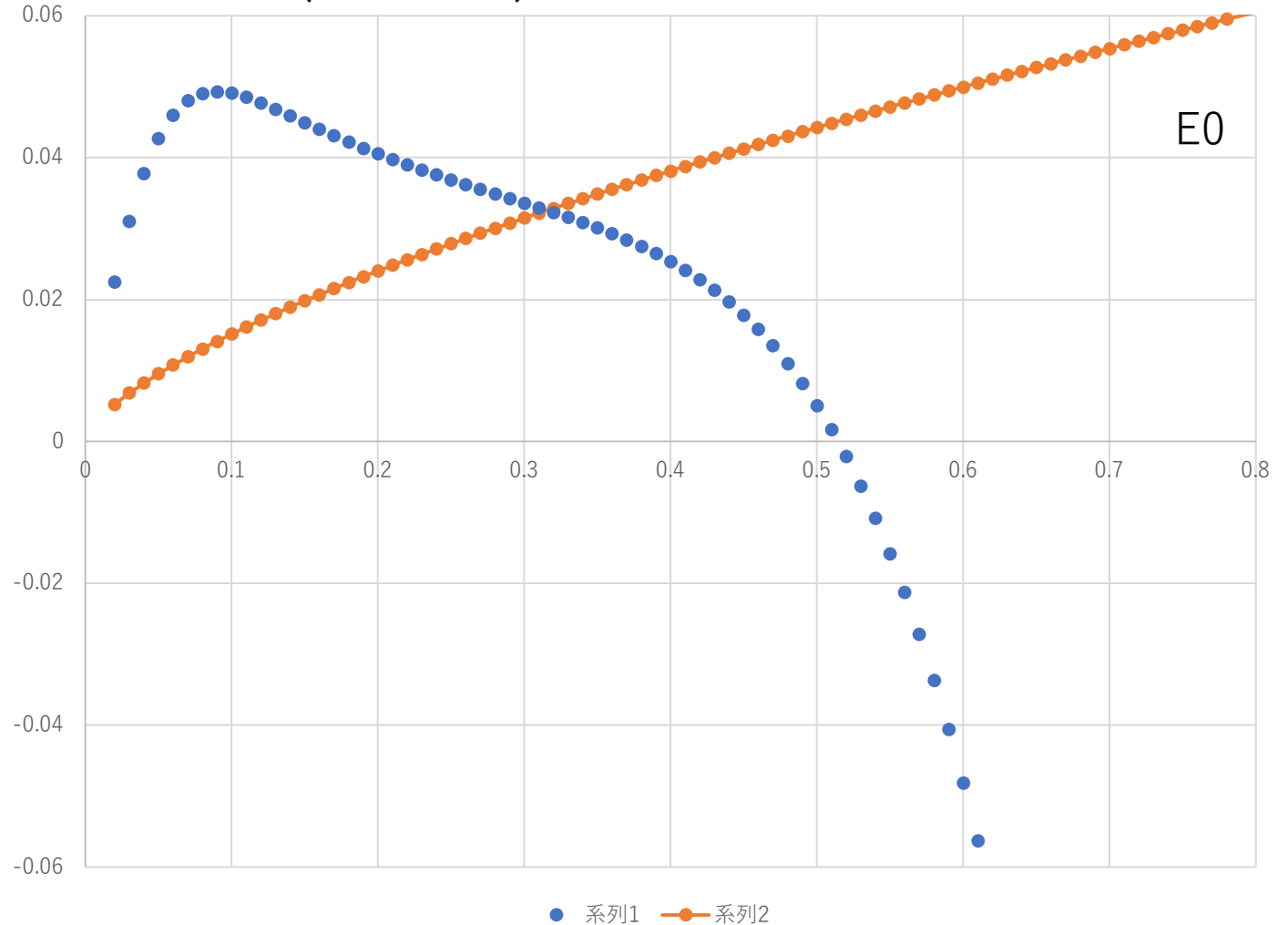


結果③

音速 $(c_s/c)^2$ と数密度 $n(\text{fm}^{-3})$

音速

早い段階でピークを迎え、0.52あたりで0になる
かなりやわらかい系になっている。



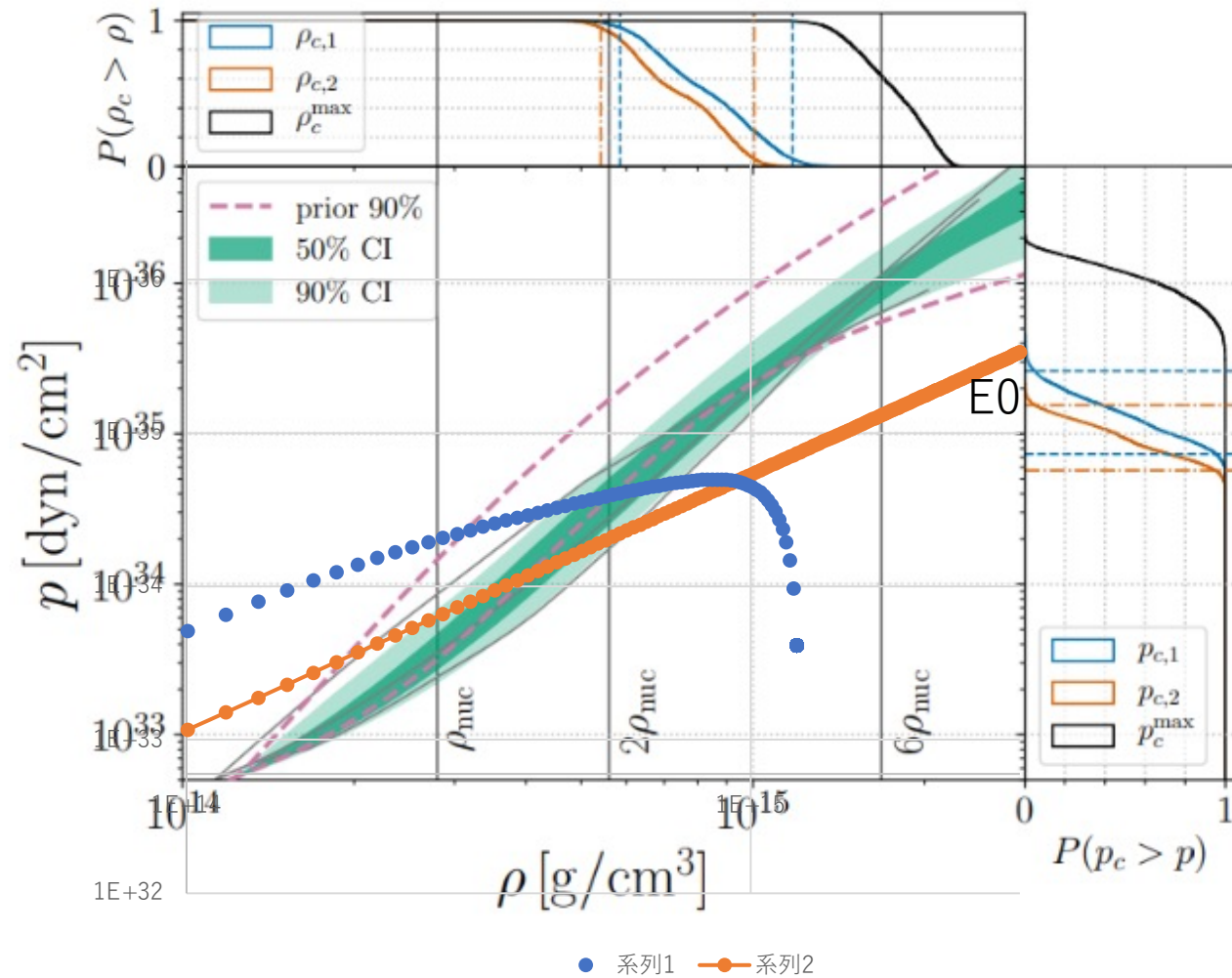
結論

今回のモデルでは再現したい状態方程式よりもやわらかい系になった

中性子だけの系では再現が難しい



やはりクォーク物質などが必要である可能性が高そう



参考文献

- [1] NASA https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_460.html
- [2] B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 161101 (2018)
- [3] M. C. Miller et al., Astrophys. J. **887**. L24 (2019)
- [4] G. Baym et al., Astrophys.J. **885**. 42 (2019)
- [5] B.D. Serot and J.D. Walecka 『ADVANCES IN NUCLEAR PHYSICS VOLUME 16』
Plenum Press(1986)
- [6] S. Ichimaru, Rev. Mod. Phys. **54**, 1017 (1982)

ご清聴ありがとうございました