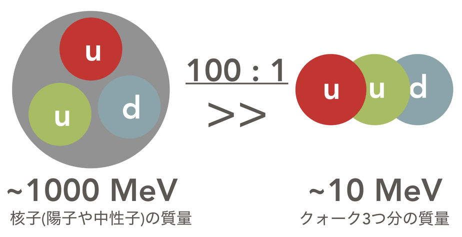
Constructing neutron star equations of state by connecting a parity doublet nuclear model and Nambu—Jona-Lasinio type model: observational constraints on the nucleon chiral invariant mass

南川拓哉 (名大・D1), 共同研究: 原田正康(名大), 古城徹(CCNU)

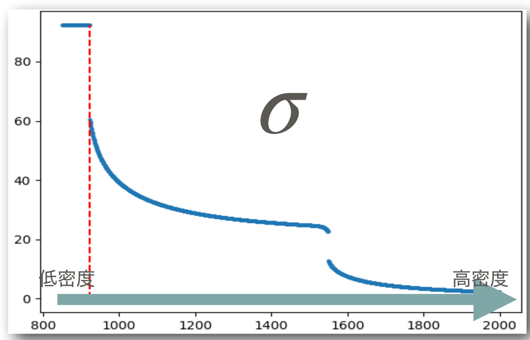
導入：カイラル不変な質量

- 有効模型の解析によれば、**核子の質量** M_N は**"カイラル対称性の自発的対称性の破れ"の秩序変数** σ **(シグマ中間子の凝縮)から現れる。**



- 例えば、有名な模型の1つであるNJL模型によると、核子質量は σ に比例して減っていく。

$$M_N \sim \sigma$$ [Nambu, Jona-Lasinio 1961]



破れた相 $\sigma \neq 0$ 　　　　回復相 $\sigma = 0$

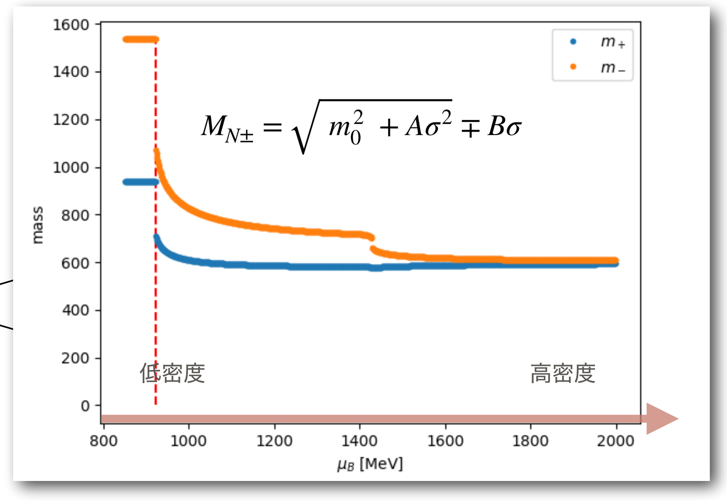
$M_N \neq 0$ → $M_N = 0$ in some models

有限に残る → $M_N = m_0 \neq 0$ in PDM

- 一方、**カイラル対称性が回復しても**
核子質量が有限に残ることが示唆されている。
(格子QCDによる計算 [Aarts, et al. 2015])

- これを取り入れた有効模型のひとつに、**"パリティ二重項模型"**がある。[DeTar, Kunihiro 1989]

$$M_N = \sqrt{m_0^2 + A\sigma^2} - B\sigma \quad \rightarrow \quad m_0 \quad (\sigma \rightarrow 0)$$



模型：パリティ二重項模型 (PDM)

- パリティ二重項模型とは、
2種類の核子を持つ**カイラル対称なハドロン有効模型**で、[DeTar, Kunihiro, 1989]
カイラル不変な質量の寄与を m_0 として含んでいる。[Jido, Oka, Hosaka, 2001]

(一般的に用いられる質量項)

$$m\bar{\psi}\psi = m(\bar{\psi}^L\psi^R + \bar{\psi}^R\psi^L)$$

$$\rightarrow \ m(\bar{\psi}^L L^\dagger R\psi^R + \bar{\psi}^R R^\dagger L\psi^L)$$

カイラル対称性を破る

	$L \in SU(N_f)_L$ 左巻き	$R \in SU(N_f)_R$ 右巻き
核子 ψ_1 $(1/2^+)$	$\psi_1^L \rightarrow L\psi_1^L$	$\psi_1^R \rightarrow R\psi_1^R$
核子 ψ_2 $(1/2^-)$	$\psi_2^L \rightarrow R\psi_2^L$	$\psi_2^R \rightarrow L\psi_2^R$

(パリティ二重項模型に現れる特有の項)

$$m_0(\bar{\psi}_1\gamma_5\psi_2 - \bar{\psi}_2\gamma_5\psi_1) = m_0(\bar{\psi}_1^L\psi_2^R + \bar{\psi}_1^R\psi_2^L + \mathrm{h.c.})$$

$$\rightarrow \quad m_0(\bar{\psi}_1^L \cancel{L^\dagger} \cancel{L}\psi_2^R + \bar{\psi}_1^R \cancel{R^\dagger} \cancel{R}\psi_2^L + \mathrm{h.c.})$$

カイラル対称性を破らない

EOSの構成(1)：核物質の構成と熱力学量

- 模型に含まれる結合定数などのパラメータは、
"核物質(核子と核力のみを考えた無限多体系)"の実験的性質 **"飽和条件"** から定まる。
- (具体的な計算方法:)
ラグランジアンに相対論的平均場近似(RMF)を行い、ギャップ方程式を解いて平均場を求める。
熱力学量は熱場の理論に従って分配関数から計算できる。

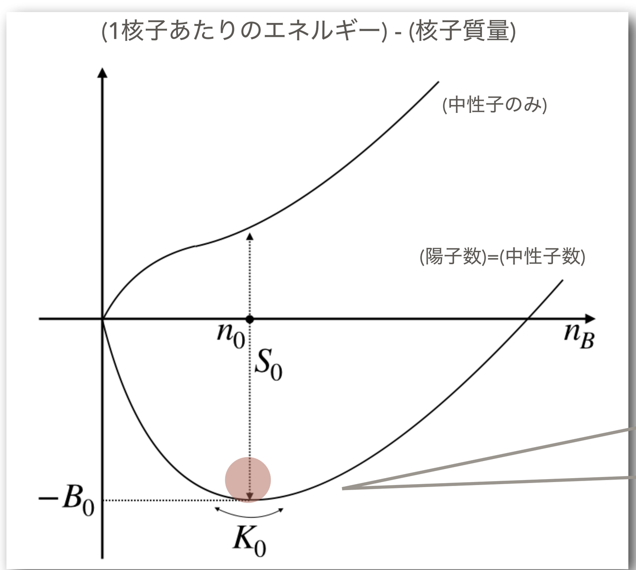
飽和条件

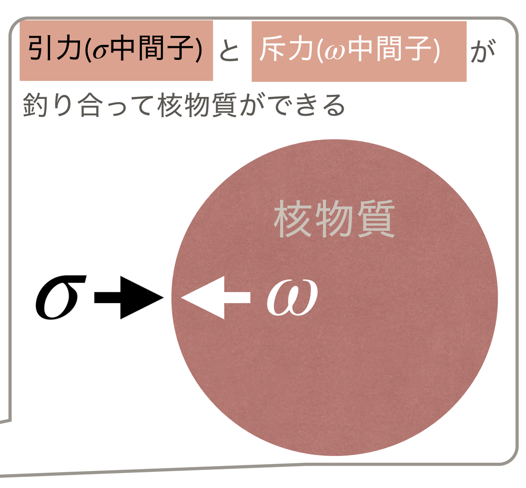
標準原子核密度: $n_0 = 0.16\,\mathrm{fm}^{-3}$

束縛エネルギー: $B_0 = 16\,\mathrm{MeV}$

対称エネルギー: $S_0 = 31\,\mathrm{MeV}$

非圧縮率: $K_0 = 240\,\mathrm{MeV}$





残る模型パラメータは m_0 のみ

核物質を構成できるのは、カイラル不変質量m_0が$500\,\mathrm{MeV} \lesssim m_0 \lesssim 900\,\mathrm{MeV}$ の時 [Motohiro, et al. 2015]

各メソン場に平均場近似を施し、中性子星物質の有効ポテンシャルを計算する。

$$\langle\sigma\rangle = \sigma \qquad \langle\pi_a\rangle = 0 \qquad \langle\omega^\mu\rangle = \omega\delta_0^\mu \qquad \langle\rho_a^\mu\rangle = \rho\delta_a^3\delta_0^\mu$$

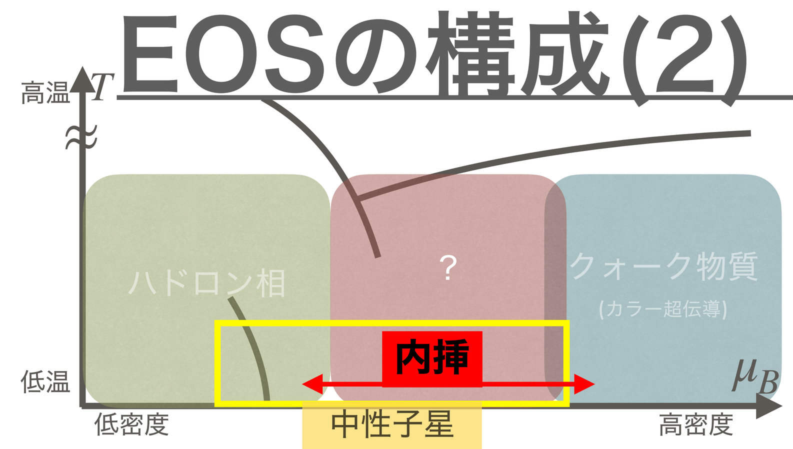
$$P(\mu_B, \mu_Q) = P_{\mathrm{mat.}} + P_{\mathrm{cond.}} + P_{\mathrm{lepton}}(\mu_l = -\mu_Q)$$

ベータ平衡条件

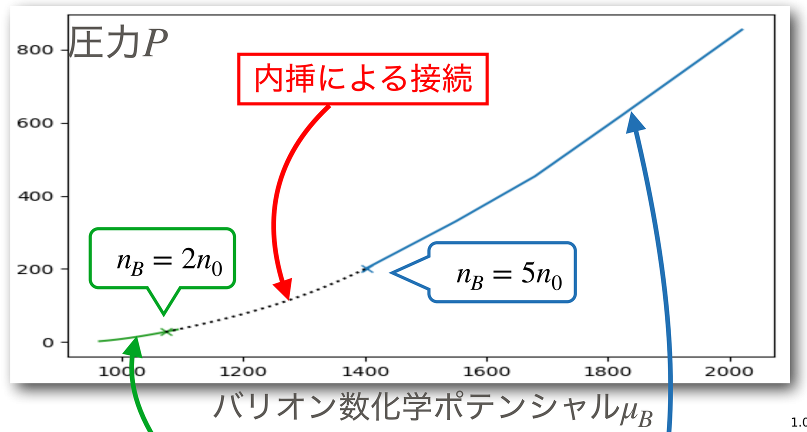
$$\mu_p^* = \mu_Q + (\mu_B - g_{\omega NN}\omega) + \frac{1}{2}(-g_{\rho NN}\rho)$$

$$\mu_n^* = (\mu_B - g_{\omega NN}\omega) - \frac{1}{2}(-g_{\rho NN}\rho)$$

EOSの構成(2)：状態方程式の接続



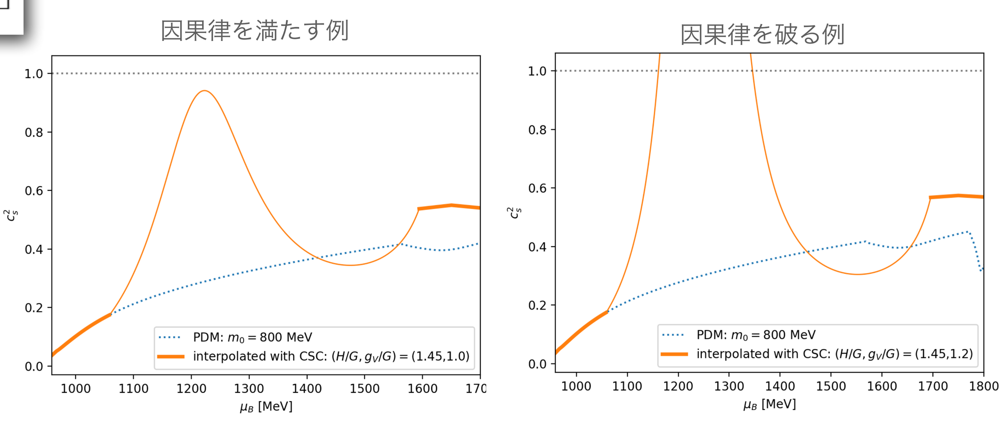
- **低密度ではハドロン描像が良い**一方、充分**高密度ではクォーク物質の描像が良い**と考え、それぞれの領域でそれぞれのEOSを用いる。
- **中間領域**では**クロスオーバー**を仮定し滑らかに内挿。[Baym+ '18]



ハドロン (パリティ二重項模型)
パラメータ: m_0

クォーク物質 (NJL型模型)
パラメータ: H, g_V

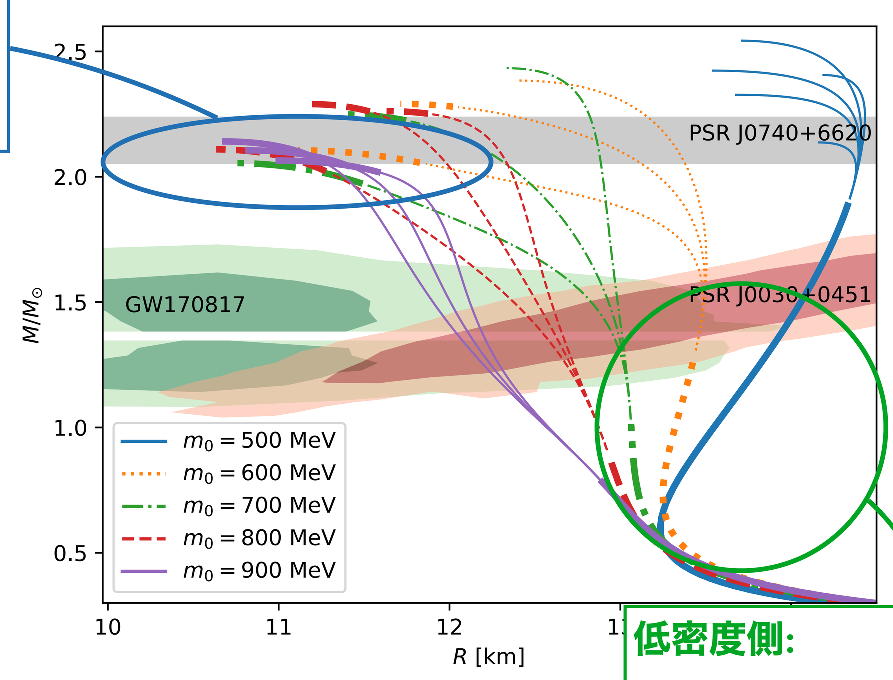
- 内挿による接続は、熱力学的安定性を満たすよう
2次係数まで連続につなぐ。
- パラメータごとに接続を行い、
因果律 $c_s^2 = \dfrac{dP}{d\epsilon} \leq c^2$
を満たさないものは棄却。



結果：得られた中性子星(NS)のMR曲線

高密度側:
クォーク物質が現れている
(ハイブリッド星)

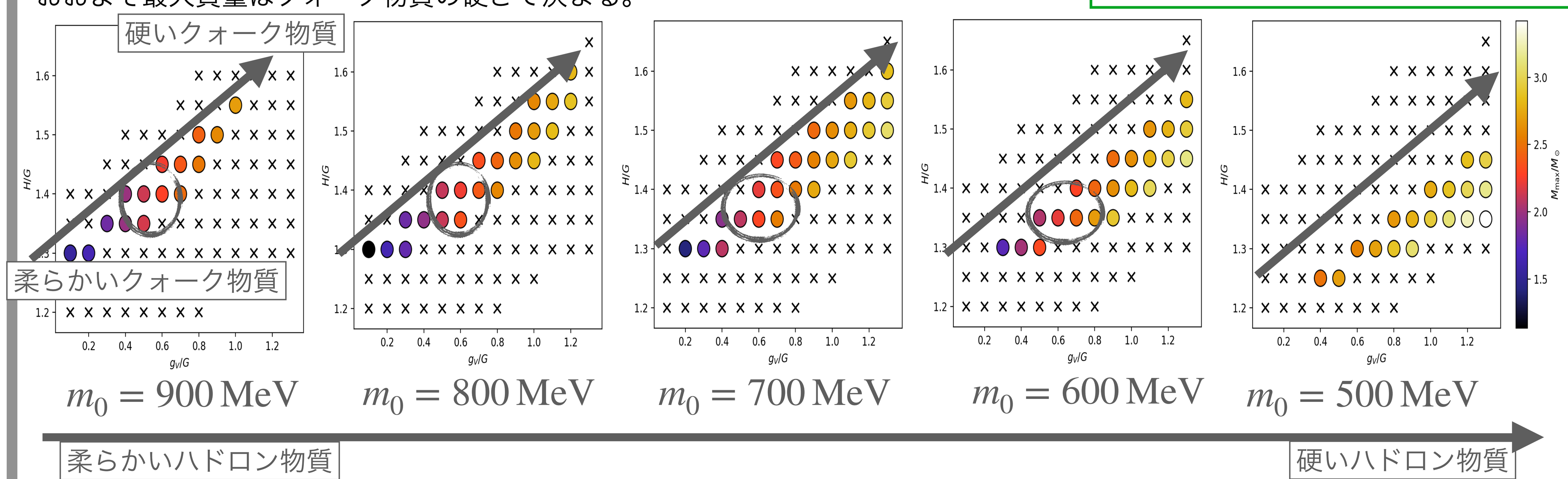
[線の色]: カイラル不変質量m_0(ハドロン物質のパラメータ)
[枝分かれ]: クォーク物質のパラメータ



観測データ:
[Rezzolla et al., 2018]
[Cromartie et al., 2019]
[Abbott et al., 2017]
[Miller et al., 2019]

低密度側:
コアがハドロンのみで
構成されている

クォークのパラメータと最大質量の関係
おおよそ最大質量はクォーク物質の硬さで決まる。



- **典型的なNS半径($M = 1.4M_\odot$での半径)**は小さい m_0 ほど、**ハドロン模型**だけで決まる。
- 逆に、m_0 が大きいほど典型的なNSの内部で**クォーク物質**との混合相になっている。
- 最大質量を持つNSは、クォーク物質のコアを持つ。

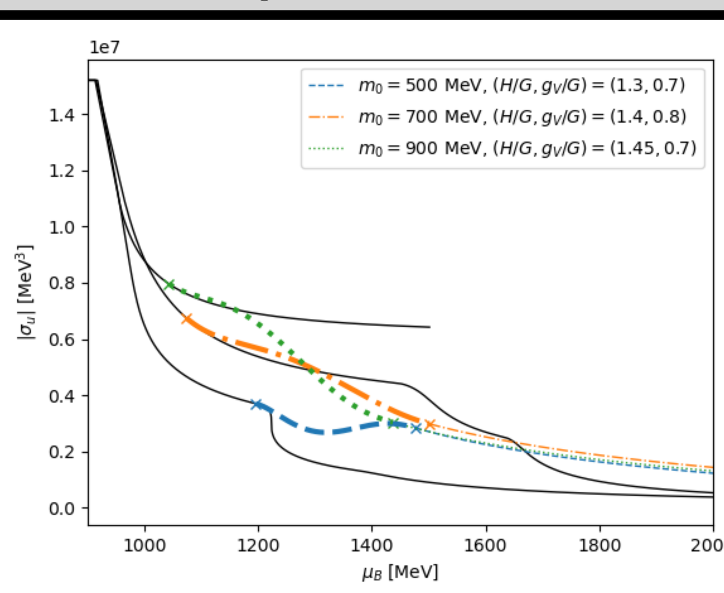
LIGO-Virgo, NICER 両方の誤差範囲内に入るとすると

$$600 \lesssim m_0 \lesssim 900$$

これは、[Marczenko et al. 2019]による $m_0 = $ 7-800 MeV で条件を満たすMR曲線の構成の研究や、
[Yamazaki, Harada 2019]によるカイラル不変質量への制限 $600\,\mathrm{MeV} \lesssim m_0 \lesssim 900\,\mathrm{MeV}$ などの結果と、
模型の違いによる差はあれど無矛盾である。

まとめ

- パリティ二重項模型を用いてNSの状態方程式を計算した。
- それからMR曲線を描き、NSの観測値と比べることで、カイラル不変質量というハドロンの持つ性質に制限が得られた。
- これは先行研究とも矛盾しない結果である。
- ハドロンの模型を改良するときにも、こうした制限を用いることができる。



- future work
$P(\mu_B)$は完全な熱力学関数→ポリトロープとは異なり、内挿領域における微視的な量(chiral condensateなど)も得られる。