

Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars with Strangeness

ハドロン物質の諸相と状態方程式 -中性子星の観測に照らして-

@京都大学基礎物理学研究所

2012.8.30-9.1

益田晃太 東大理

初田哲男 理研

高塚龍之 岩手大

[arXiv:1205.3621](https://arxiv.org/abs/1205.3621) [nucl-th]

目次



背景



動機



問題



研究の特色



ハドロソ相



クォーク相



主な結果



まとめ



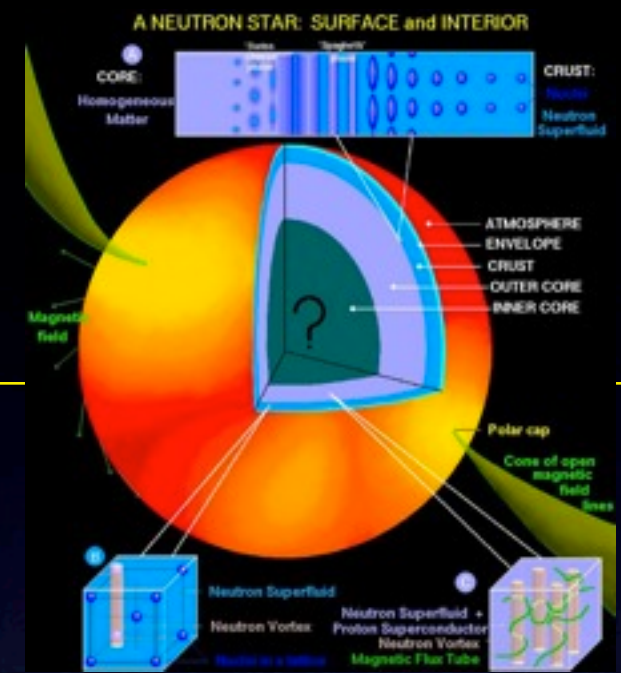
今後

背景 ~理論と観測~

観測

中性子星の質量

制限



Demorest et al. (2010)

理論

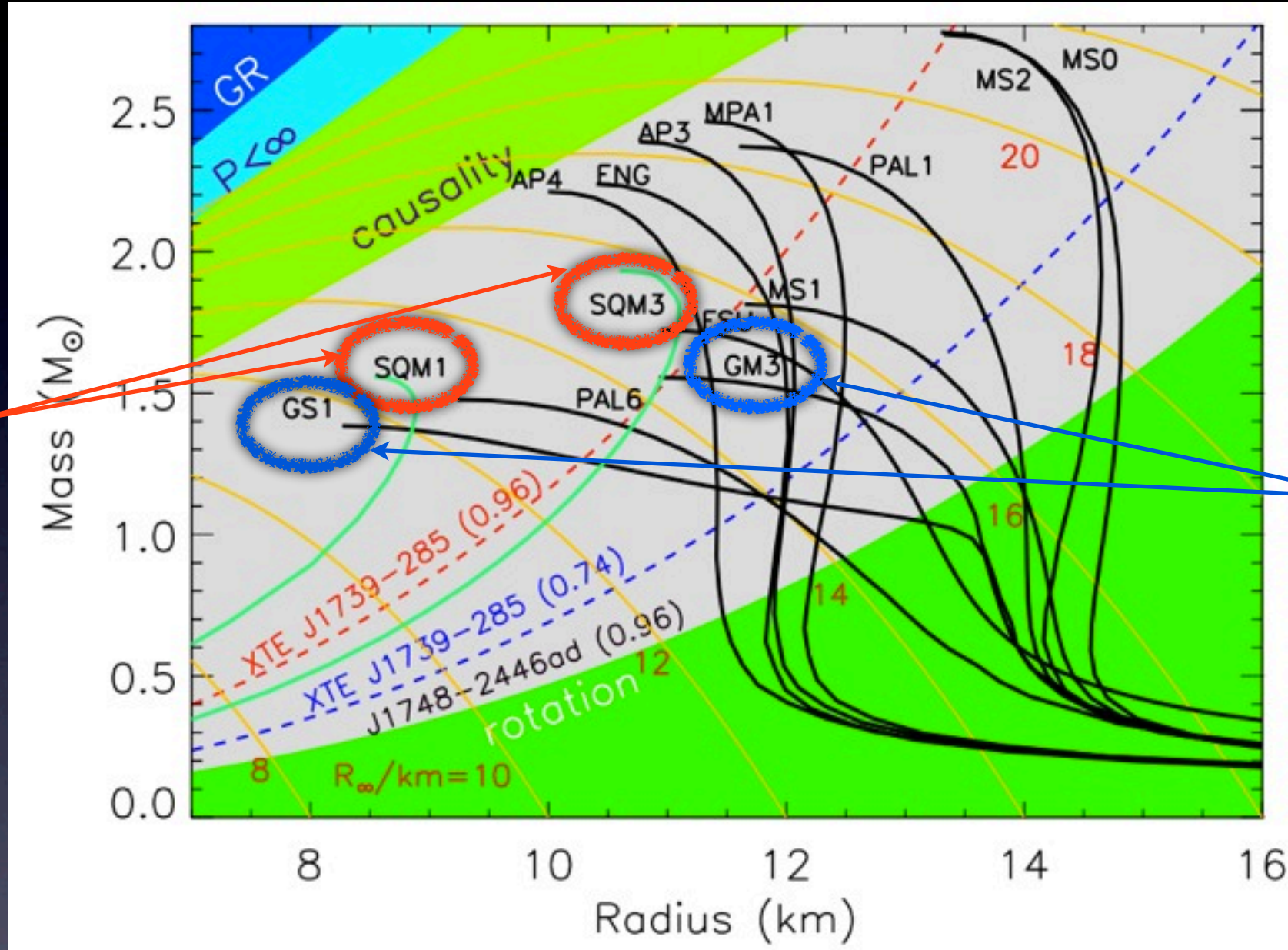
状態方程式 (EOS): $P = f(\varepsilon)$

Tolman-Openheimer-Volkov 方程式 (TOV eq.):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = - (M + 4\pi P r^3) (\varepsilon + P) \left(\frac{r^2}{G} - 2Mr \right)^{-1} \\ M = \int 4\pi r^2 \varepsilon(x) dr \end{array} \right.$$

背景 ～観測結果～

従来の中性子星連星系での典型的質量: $1.4M_{\odot}$



クォーク星
(with s)

ストレッチ を含む

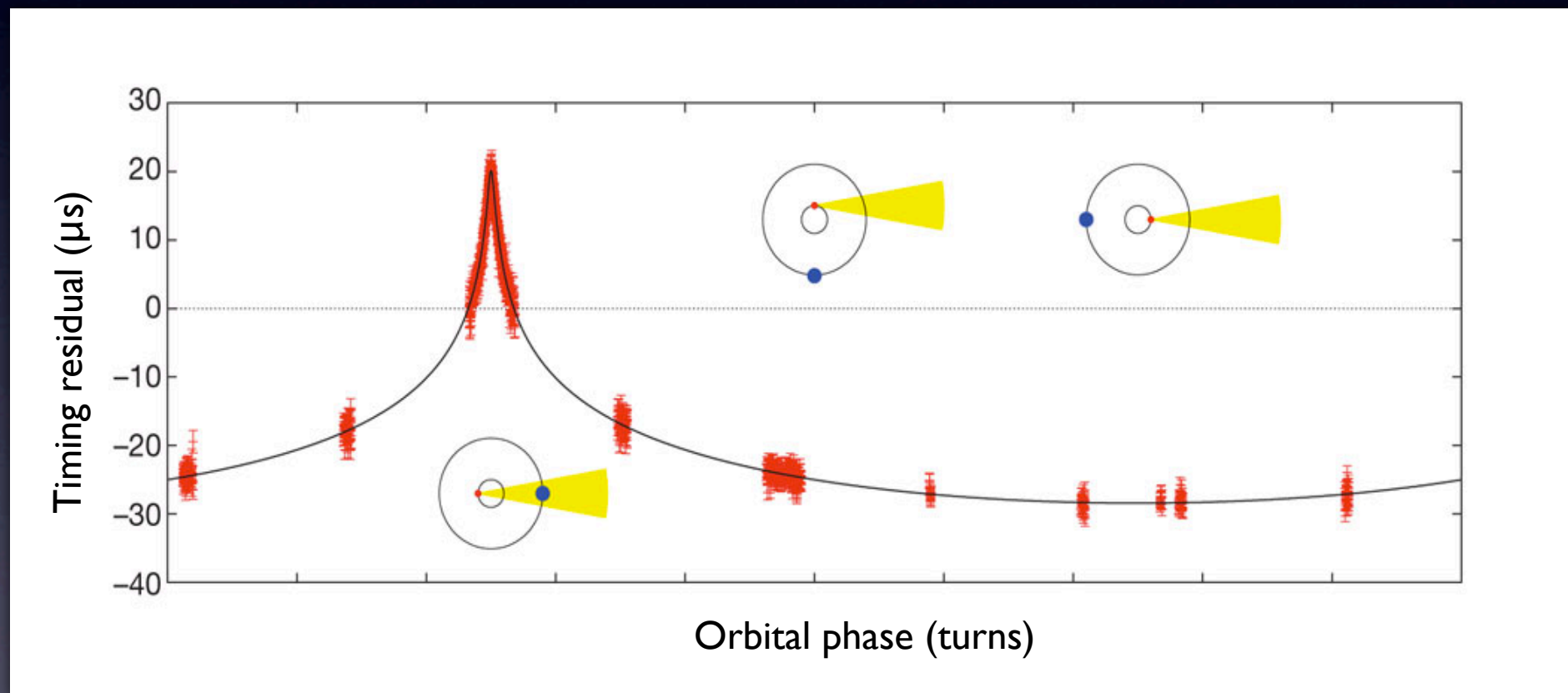
Lattimer and Prakash (2007)

一般的にハイペロンやクォーク相の出現により
自由度が増えると最大質量は低下

動機

2010年, WD-NS 連星系 (PSR J1614-2230) で重いNSが観測

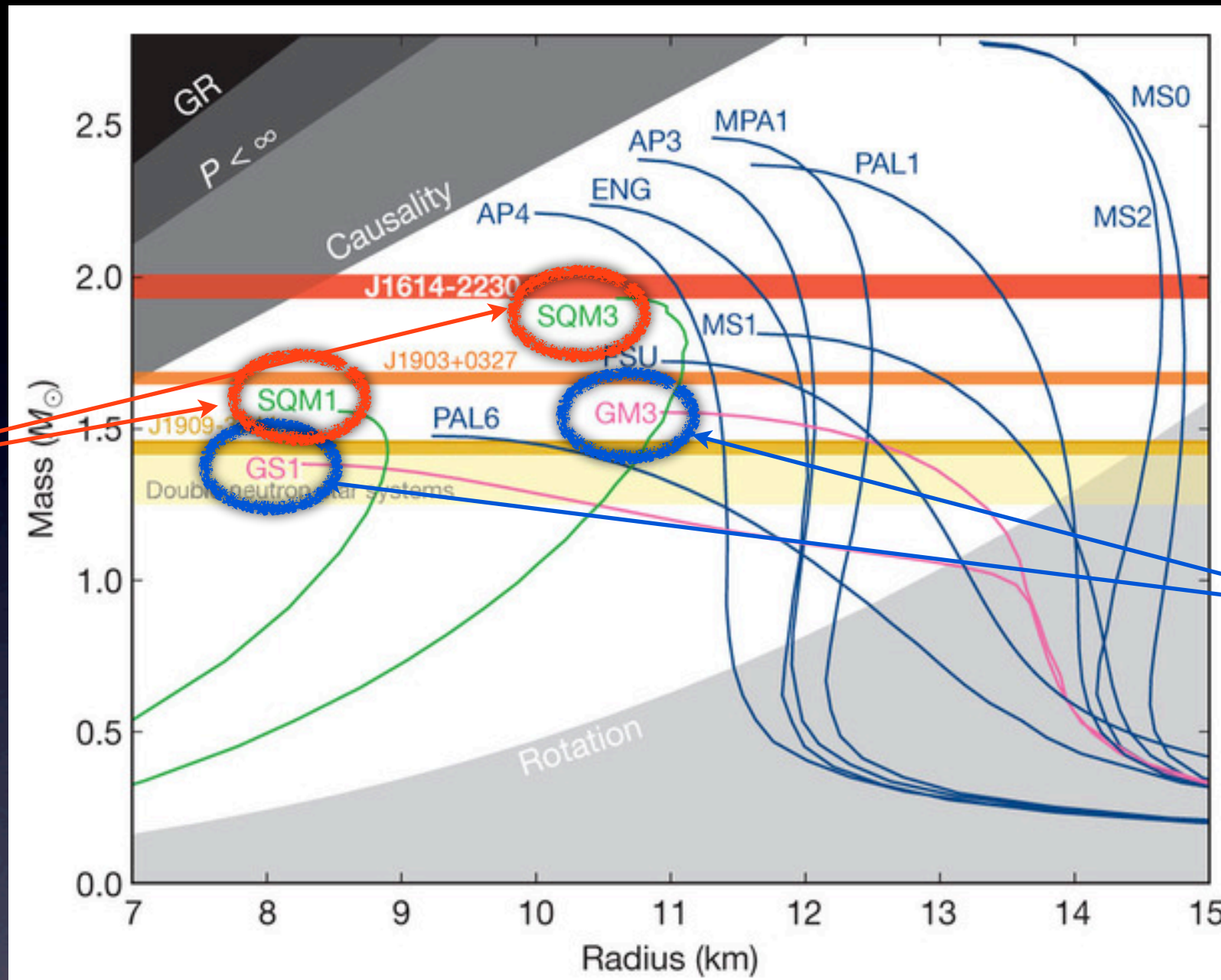
$M = (1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ ← Shapiro delay



Demorest et al. (2010)

問題点

クォーク星
(with s)



ストレンジ
を含む

Demorest et al. (2010)

問題点:

1. どのような EOS なら $2M_{\odot}$ の NS を支えられる?
2. クォーク相は NS 内部で存在?

研究の特色 ~扱う問題~

高密度領域で出現すると思われる

• ハイペロン → ユニバーサル三体力

• クォーク相
を扱う

(1) ハドロン相における問題

(2) クォーク相における問題

転移付近でまだ強く相互作用しているモデルで

クォーク相を扱う

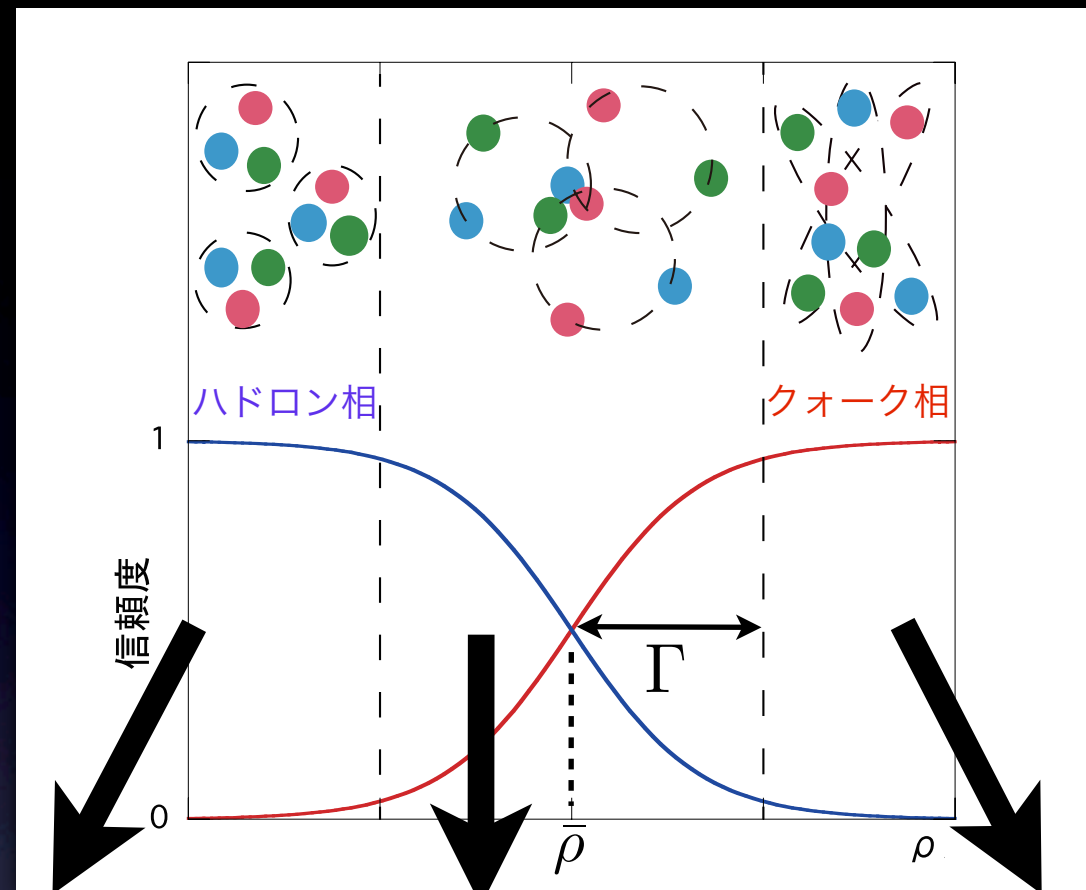
=NJL模型

0K付近で予測されるクロスオーバーを扱う

↔ 1次相転移 (3) 中間領域における問題

(Maxwell/Gibbs condition)

研究の特色 ~手法~



ハドロン相

- ハイペロン
- ユニバーサル
三体力

中間領域

Key Concept
クロスオーバー

↑↓
1次相転移 Maxwell/Gibbs
condition

クォーク相

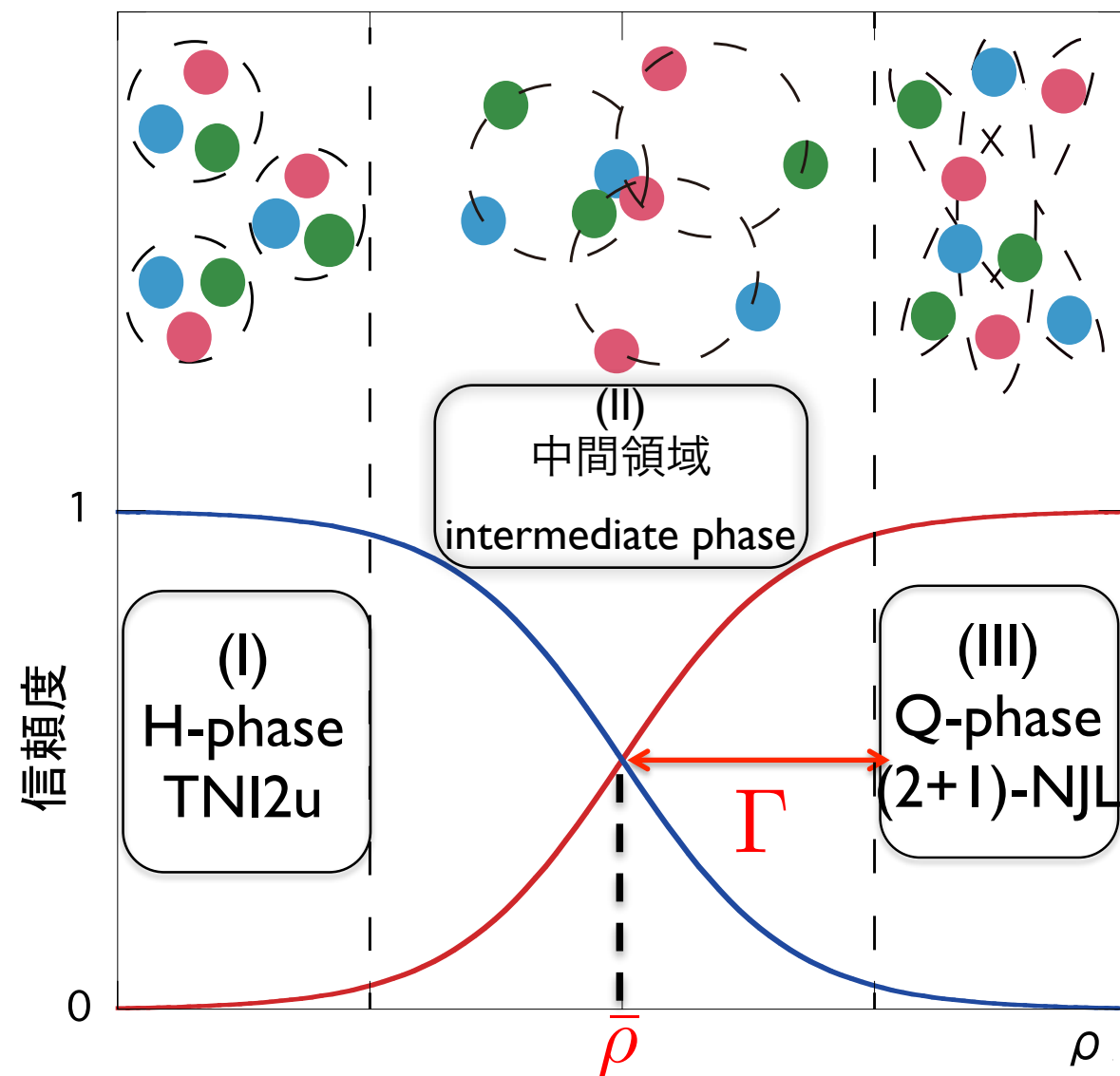
強く相互作用
↓
しているモデル
(2+1)-flavor NJL

$$P = P_H \times \frac{1 - \tanh\left(\frac{\rho - \bar{\rho}}{\Gamma}\right)}{2} + P_Q \times \frac{1 + \tanh\left(\frac{\rho - \bar{\rho}}{\Gamma}\right)}{2}, \quad P = \rho^2 \frac{\partial(\varepsilon/\rho)}{\partial \rho}$$

Asakawa & Hatsuda

Phys. Rev. D55 (1997), 4488

研究の特色 ~手法~



条件:

1. beta-equilibrium
2. charge neutrality
3. $\bar{\rho} - 2\Gamma > \rho_0$

ρ_0 : 原子核密度

原子核密度で十分

ハドロンの描像が成立

Key concept: Hadron-Quark crossover



Region(II): Intermediate phase

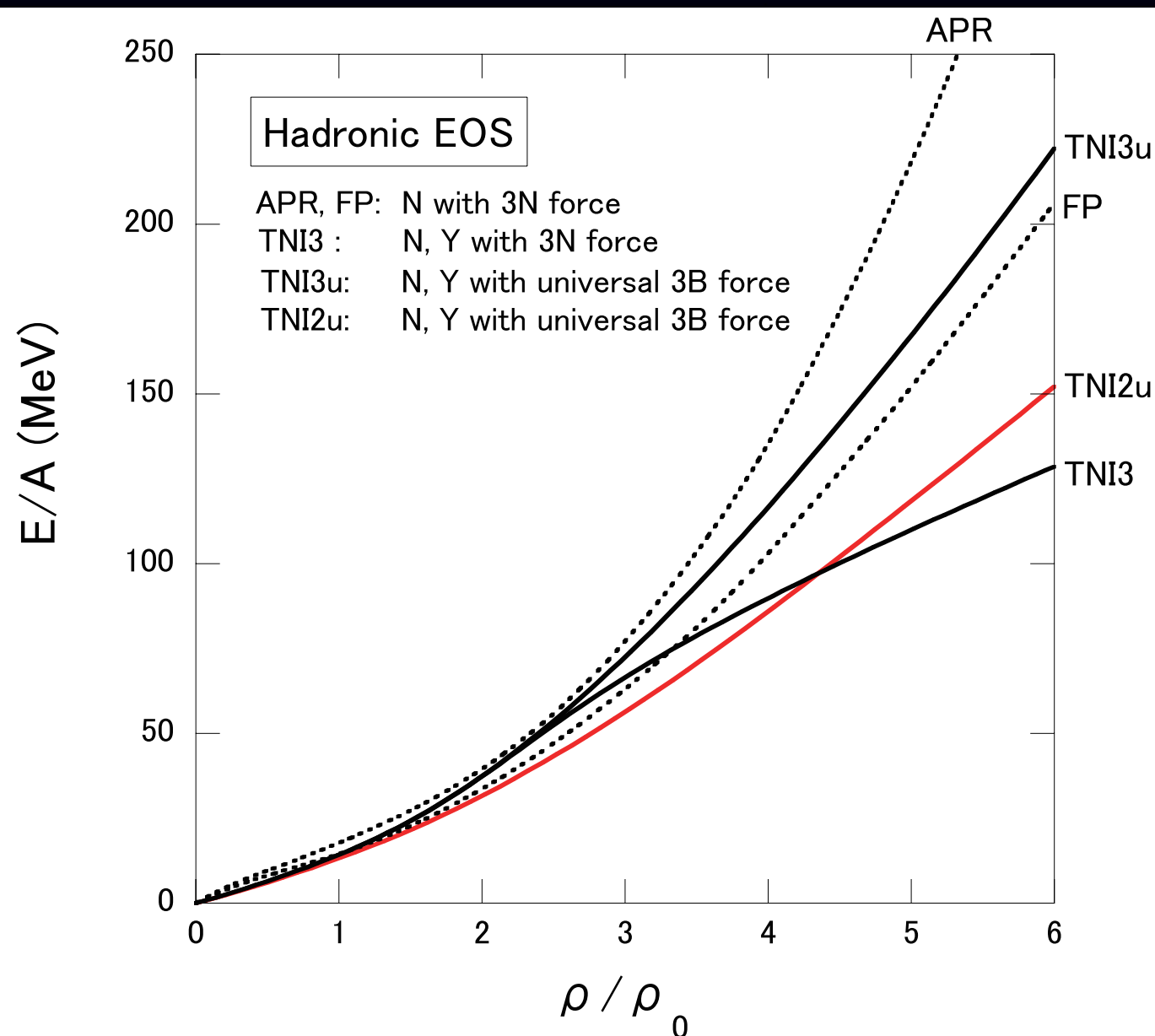
$$\begin{cases} P = p_H \times f_- + p_Q \times f_+ \\ P = \rho^2 \frac{\partial(\varepsilon/\rho)}{\partial \rho} \end{cases}$$

$$f_{\pm} = \frac{1 \pm \tanh(\frac{\rho - \bar{\rho}}{\Gamma})}{2}$$

free parameters

ハドロン相 ~TNI2u~

核子、ハイペロン間に3体力を取り入れることで
ハイペロンを含むかたいEoSを構築



APR, FP
(Yを含まない、3体力)

~

TNI3u $\kappa = 300 \text{ MeV}$
 $1.82 M_{\odot}$

TNI2u $\kappa = 250 \text{ MeV}$
 $1.52 M_{\odot}$

$4\rho_0$ 程でハイペロン出現

クォーク相 ~Lagrangian~

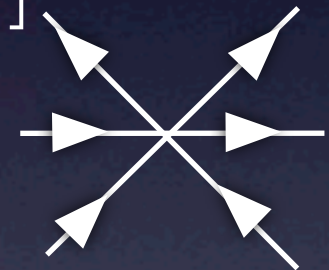
(2+1)-flavor NJL Lagrangian (u,d,s, e^- , μ^-)

$$L_{NJL} = \bar{q}(i\not{\partial} - m)q$$

$$+ \frac{G_s}{2} \sum_{a=0}^8 [(\bar{q}\lambda^a q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\lambda^a q)^2]$$

$$- \frac{G_v}{2} \sum_{a=0}^8 [(\bar{q}\gamma_\mu\lambda^a q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\gamma_\mu\lambda^a q)^2]$$

$$+ G_D [\det \bar{q}(1 + \gamma_5)q + \text{h.c.}]$$



Parameter sets

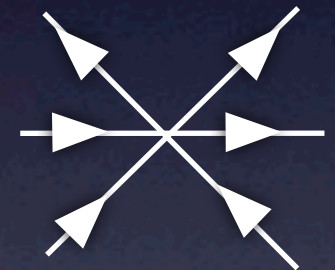
cutoff (MeV)	$G_s\Lambda^2$	$G_D\Lambda^5$	$m_{u,d}(MeV)$	$m_s(MeV)$
631.4	3.67	9.29	5.5	135.7

Hatsuda and Kunihiro (1994)

クォーク相 ~Lagrangian~

(2+1)-flavor NJL Lagrangian (u,d,s, e^- , μ^-)

$$\begin{aligned}
 L_{NJL} = & \bar{q}(i\not{\partial} - m)q \\
 & + \frac{G_s}{2} \sum_{a=0}^8 [(\bar{q}\lambda^a q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\lambda^a q)^2] \\
 & - \frac{g_v}{2} (\bar{q}\gamma^\mu q)^2 \\
 & + G_D [\det \bar{q}(1 + \gamma_5)q + \text{h.c.}]
 \end{aligned}$$



Parameter sets

cutoff (MeV)	$G_s\Lambda^2$	$G_D\Lambda^5$	$m_{u,d}(MeV)$	$m_s(MeV)$
631.4	3.67	9.29	5.5	135.7

Hatsuda and Kunihiro (1994)

$$0 \leq g_v \leq 1.5G_s$$

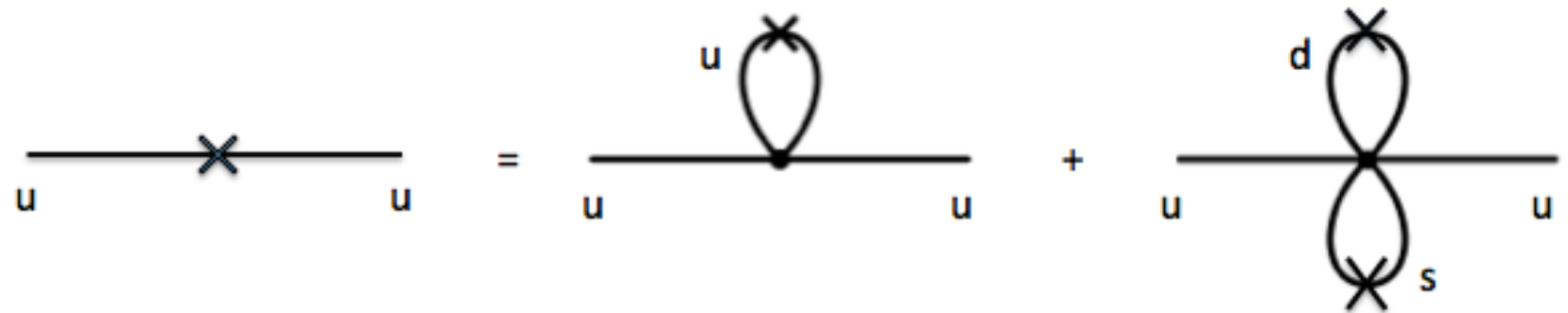
Nino M. Bratovic, T. Hatsuda,
W. Weise (2012)

クォーク相 ~Lagrangian~

平均場近似の下でLagrangianを計算

Constituent
mass

NJL Gap Equation



$$M_i = m_i - 2G_s \frac{\langle \bar{q}_i q_i \rangle}{\phi_i} - 2G_D \langle \bar{q}_j q_j \rangle \langle \bar{q}_k q_k \rangle$$

(i=u,d,s)

Effective
chemical potential

$$\mu_i \rightarrow \mu_i^{\text{eff}} \equiv \mu_i - g_v \frac{\sum_i \langle q_i^\dagger q_i \rangle}{n}$$

クォーク相 ~Lagrangian~

Thermodynamical potential Ω :

$$\Omega = -\frac{T}{V} \ln Z$$

$$= \Omega_q(M, \mu^{\text{eff}}) + \Omega_l + G_s \sum \langle \bar{q}_i q_i \rangle^2 + 4G_D \langle \bar{q}_i q_i \rangle \langle \bar{q}_j q_j \rangle \langle \bar{q}_k q_k \rangle$$

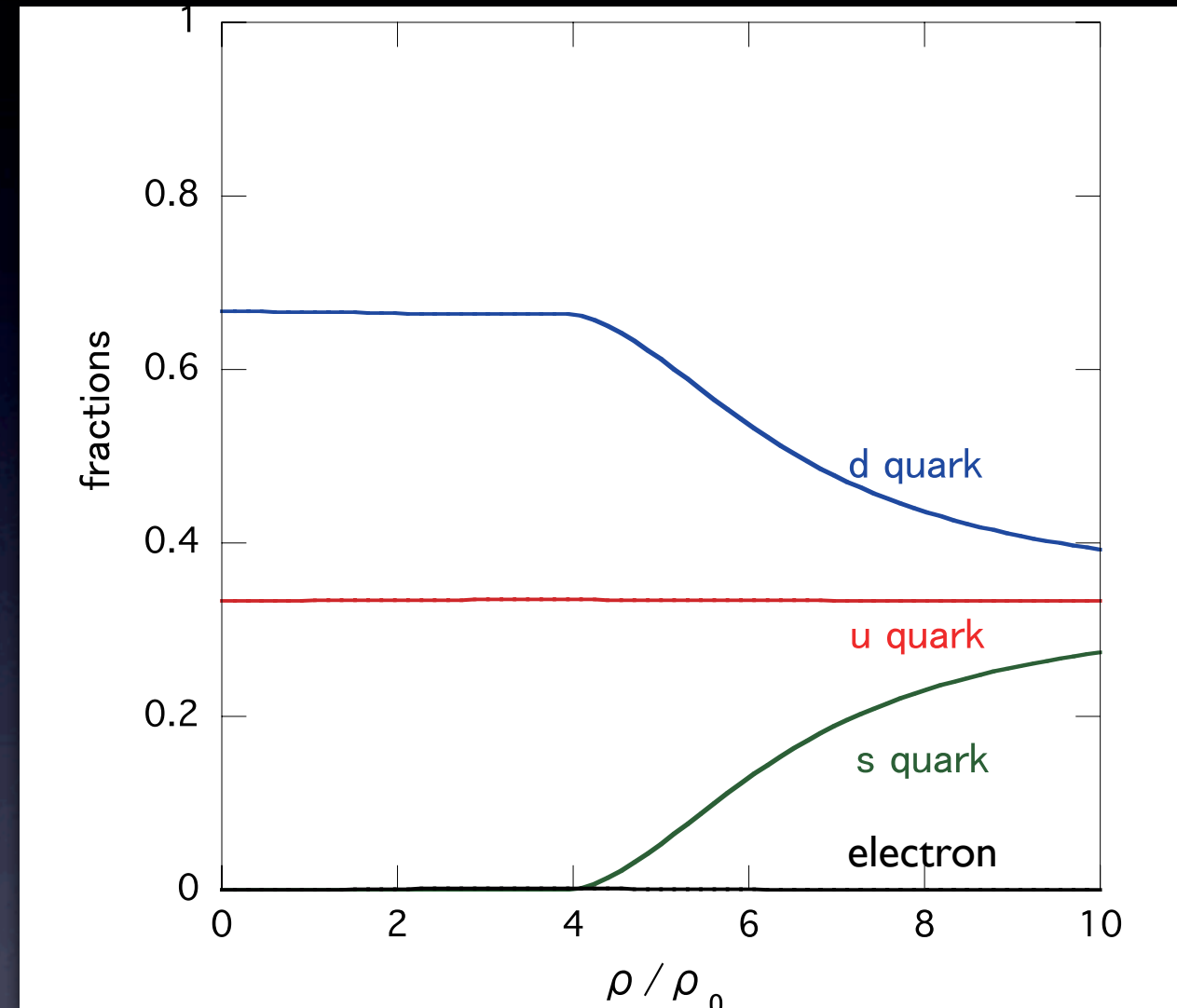
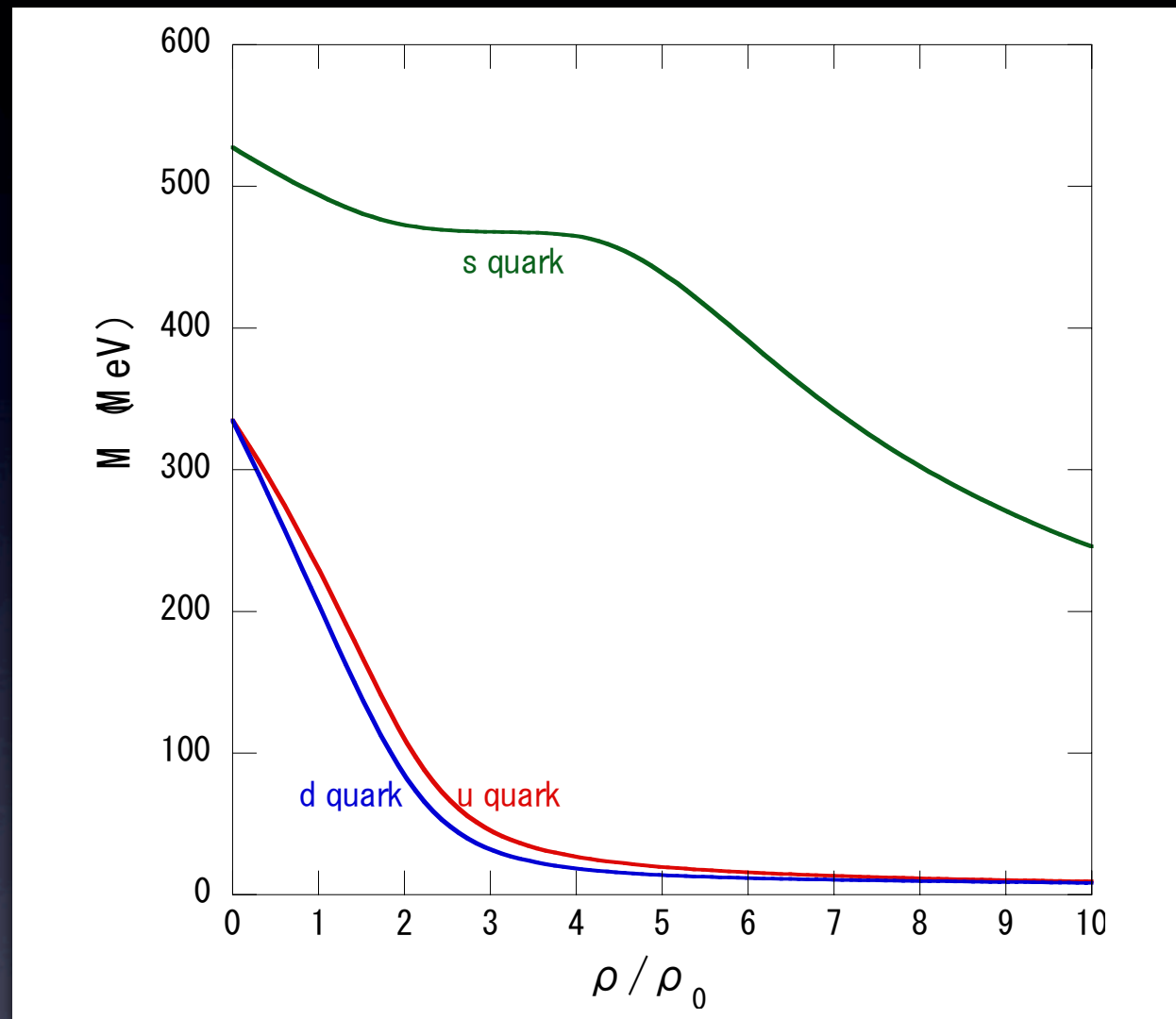
$$\Omega_q(M, \mu^{\text{eff}}) = -T \sum_n \int \frac{d^3 p}{(2\pi^3)} \text{Tr} \ln \left(\frac{1}{T} S^{-1}(i\omega_n, \vec{p}) \right)$$

$$S^{-1} = \not{p} - \mu^{\text{eff}} \gamma^0 - M, \quad p^0 = i\omega_n = (2n+1)\pi T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Omega}{\partial \phi_i} = \frac{\partial \Omega}{\partial n} = 0 \\ p = -\Omega, \quad \varepsilon = -p + \mu n \quad (T = 0) \end{array} \right.$$

クォーク相 ~constituent quark mass~

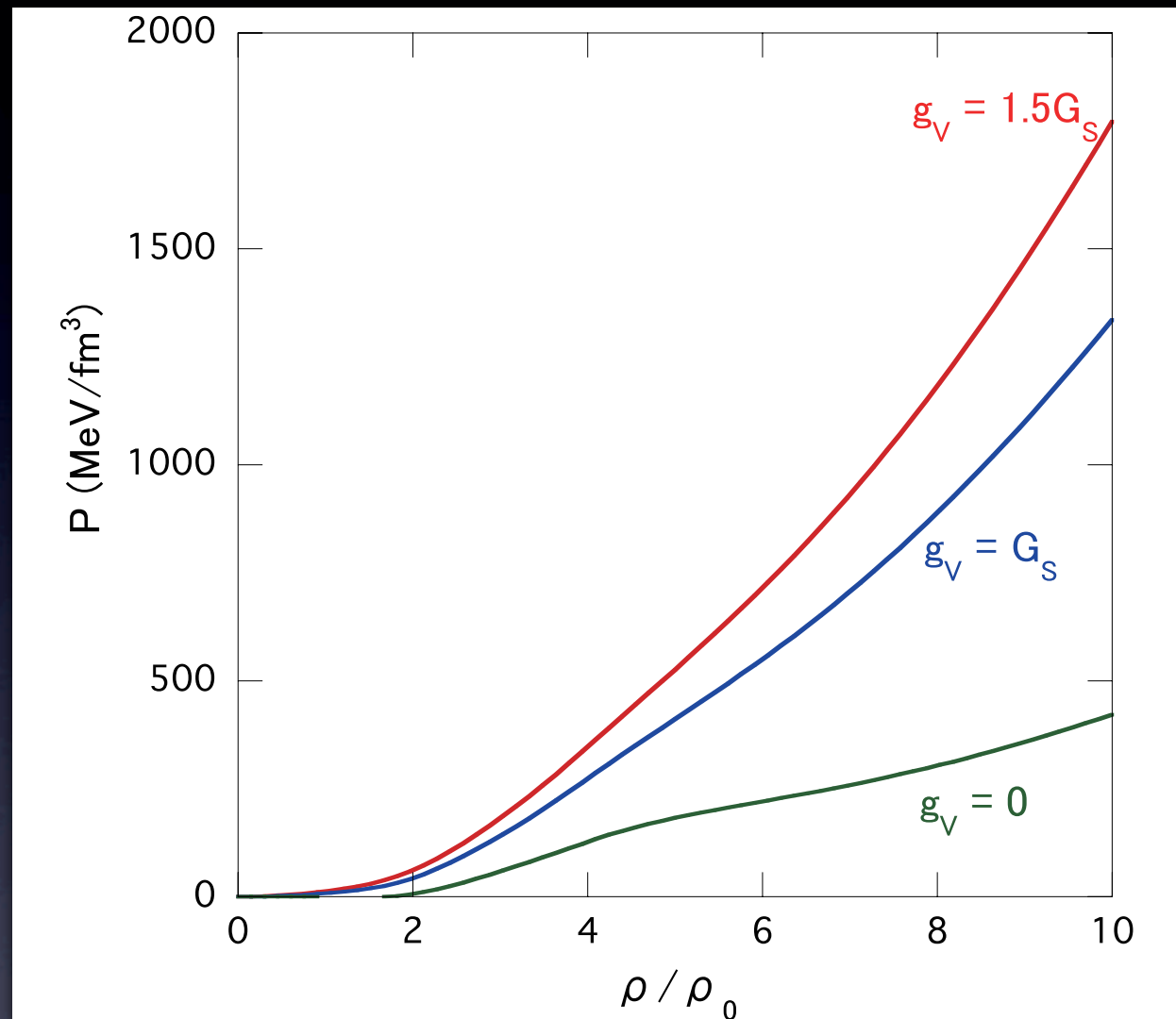
NJL模型におけるconstituent mass



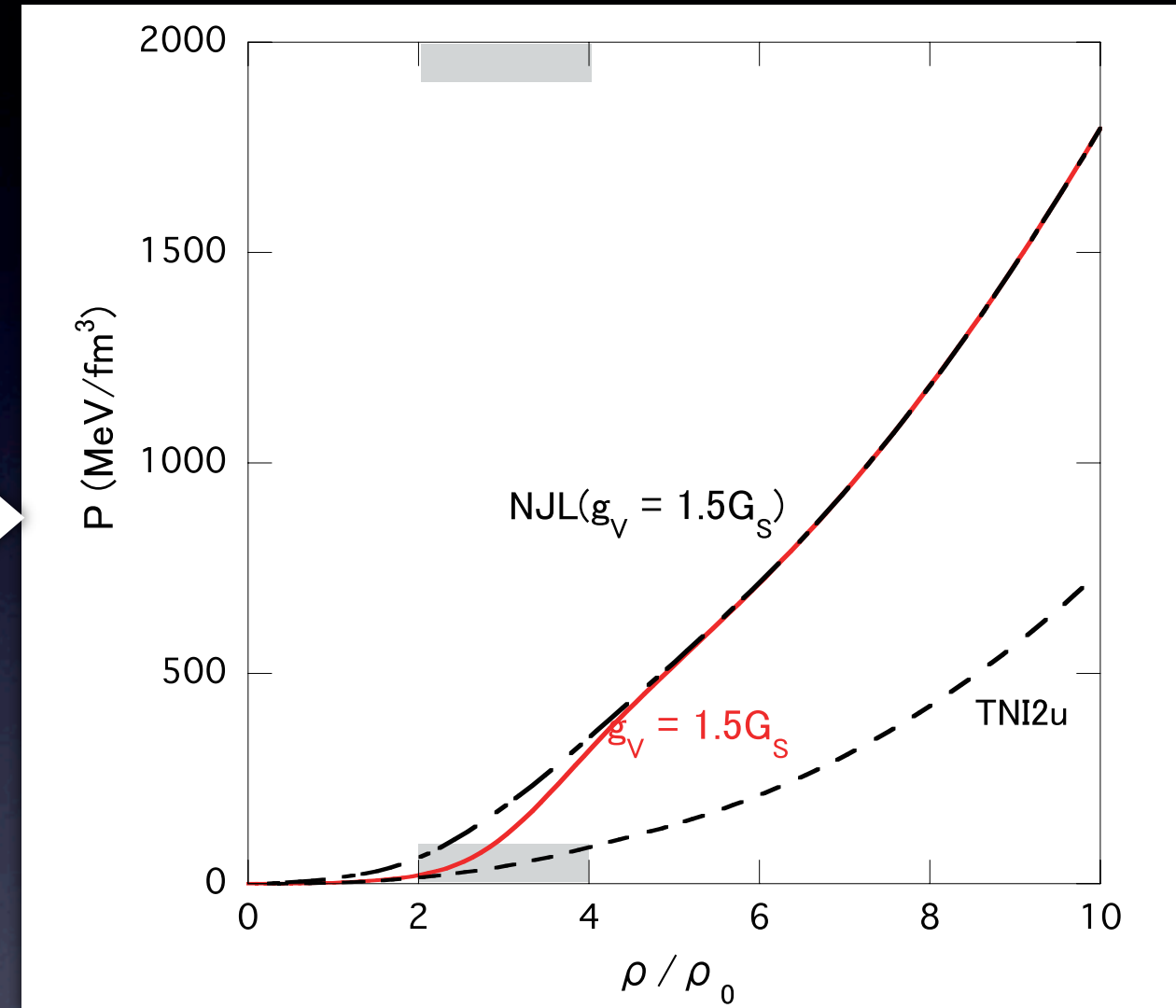
- vector interactionに関わらず同じ振る舞い
- $4\rho_0$ 程でs quarkが出現 ~ TN12u
- muonはs quarkの出現により現れない

主な結果 ~P~ $(\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$

Quark相の圧力P



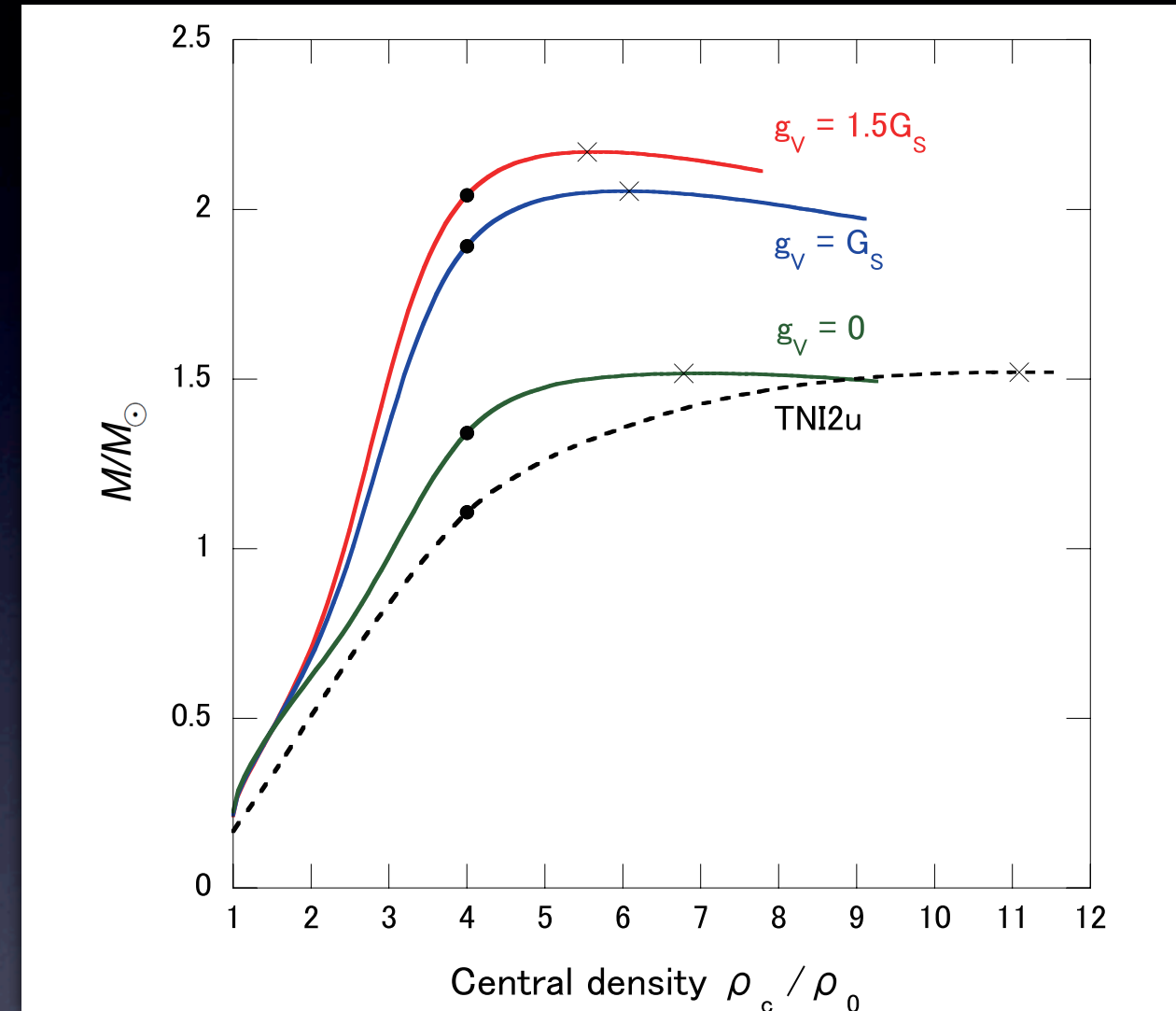
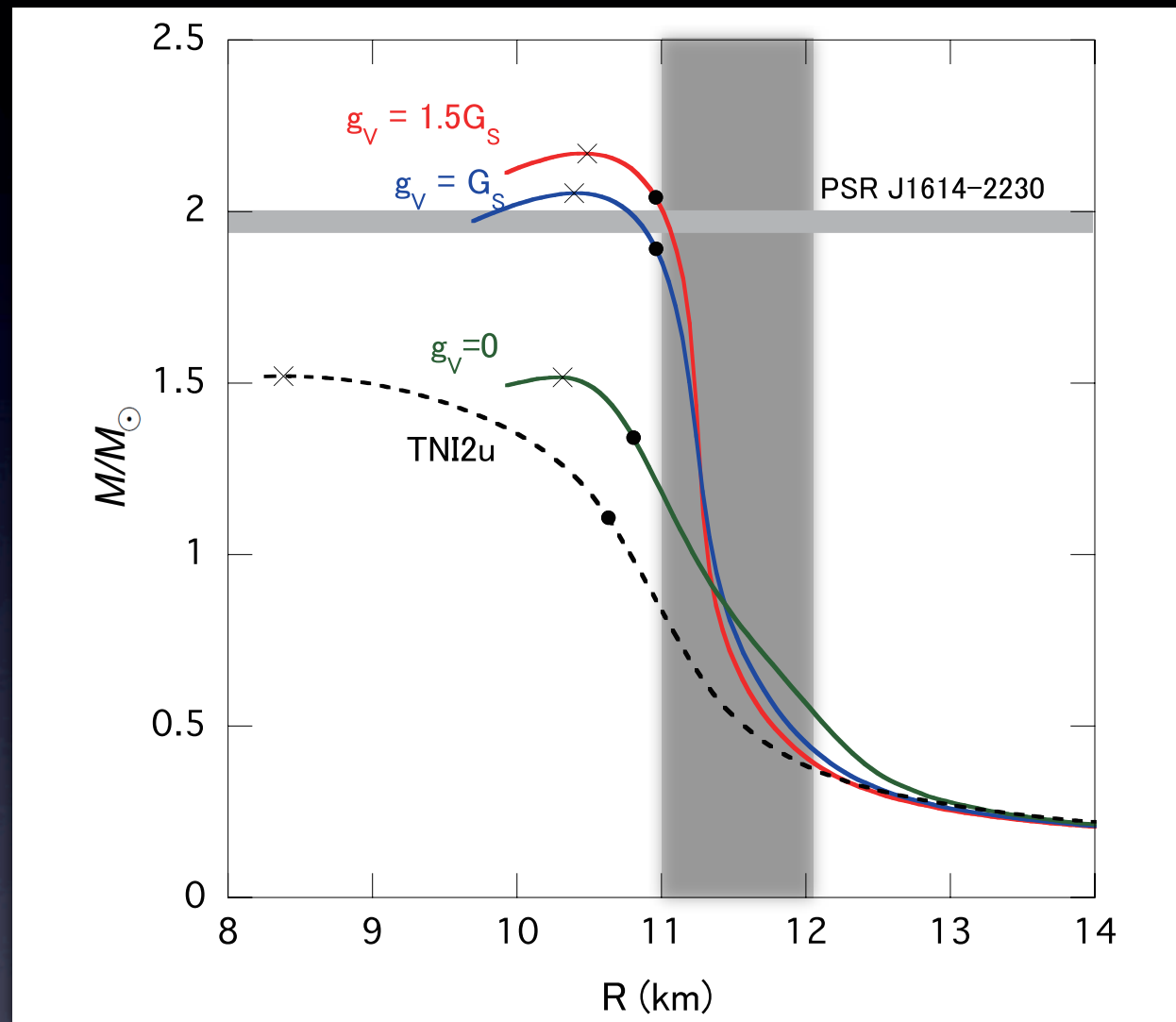
crossover接続による圧力P



- 領域(II)において $\text{TN12u} < \text{接続したP} < \text{NJL}$
↔ 従来のMaxwell constructionとは異なる
- vector interactionの強さが増加 → 圧力増加

主な結果 ~最大質量~ $(\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$

最大質量と半径、中心密度



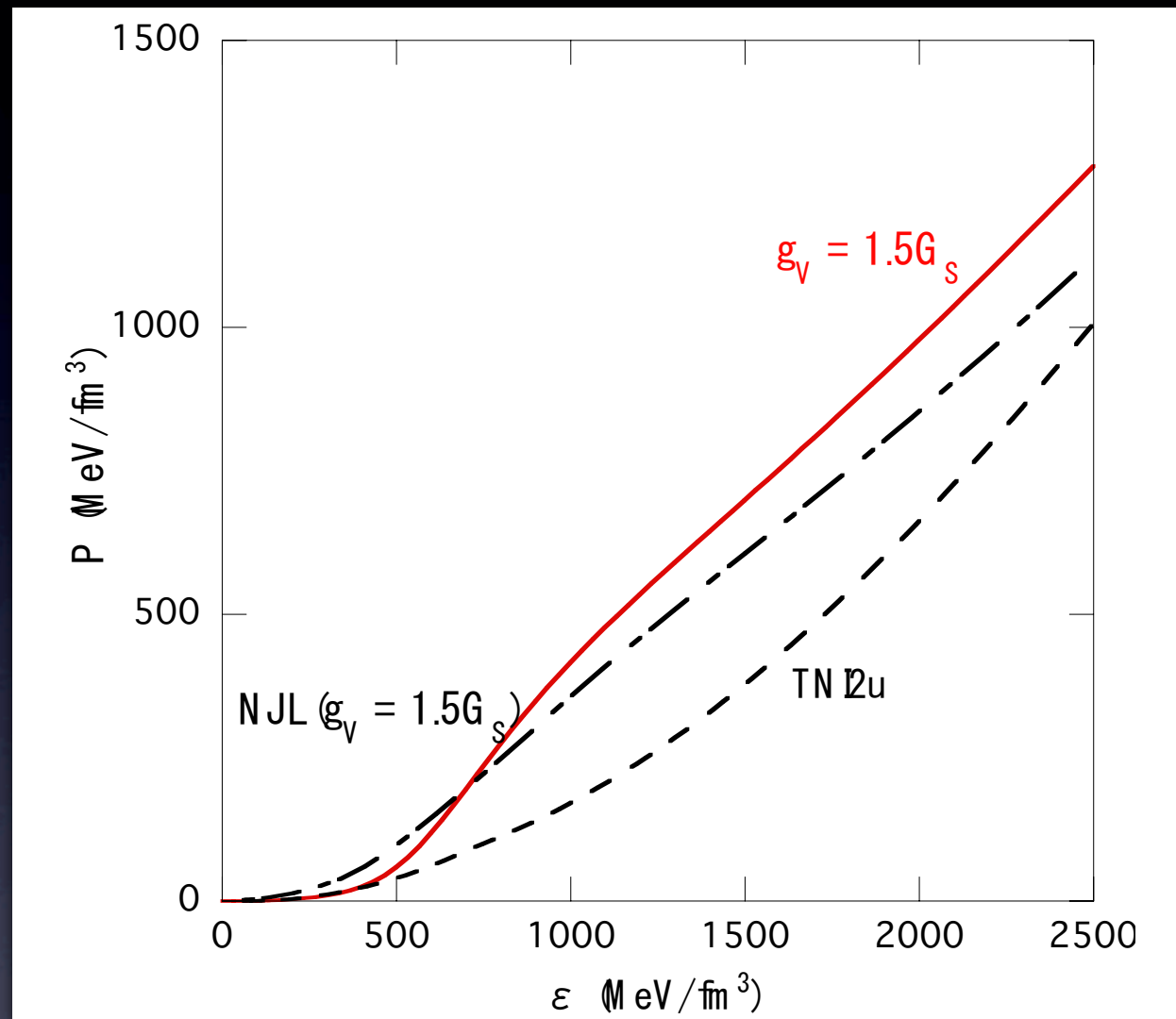
$g_v = G_s, 1.5G_s$ の場合2太陽質量を超える!

最大質量の大小関係は

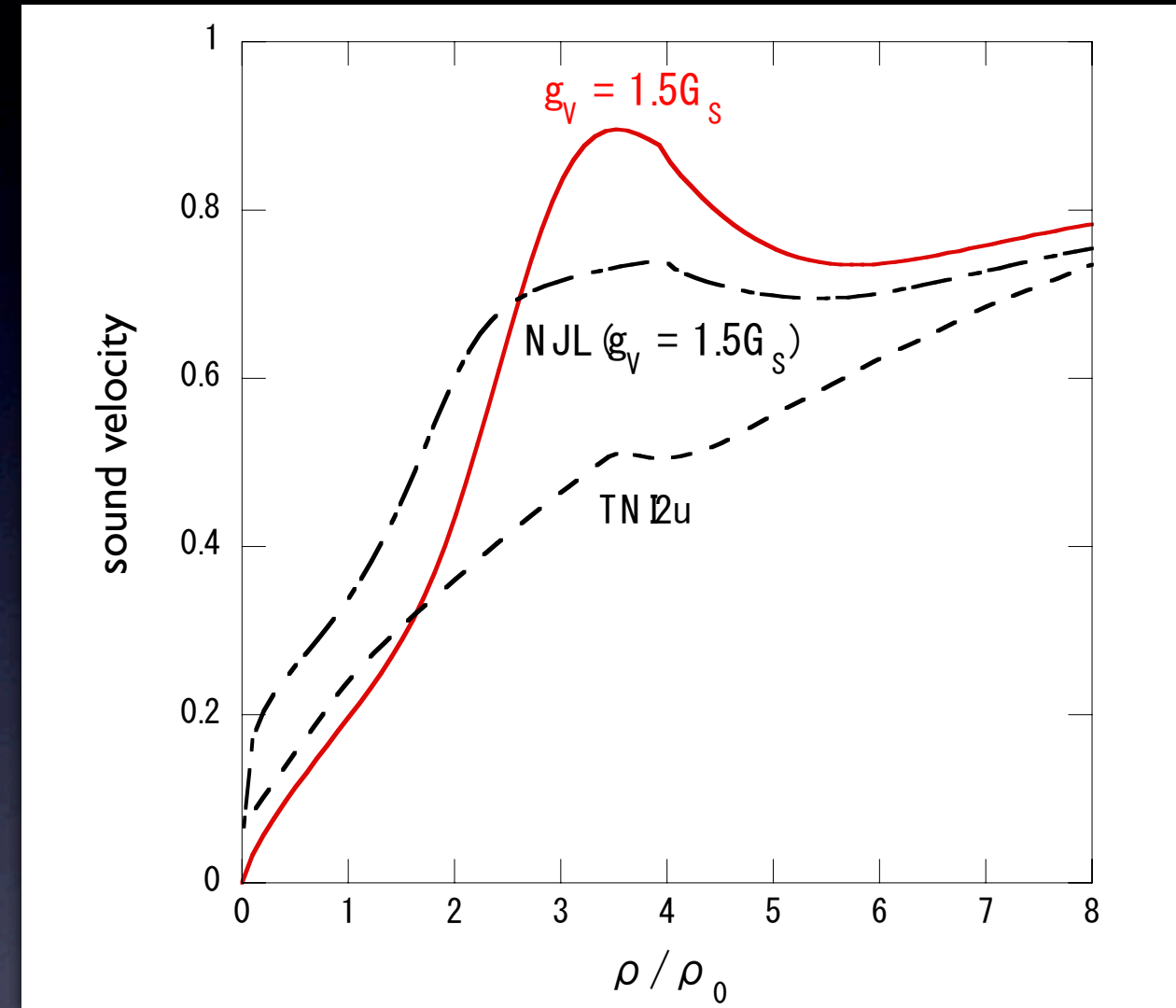
$$g_v = 0 < \textit{TNI2u} < g_v = G_s < g_v = 1.5G_s$$

主な結果 $\sim P$ and $\varepsilon \sim (\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$

エネルギー密度 ε



音速 $\sqrt{dP/d\varepsilon}$

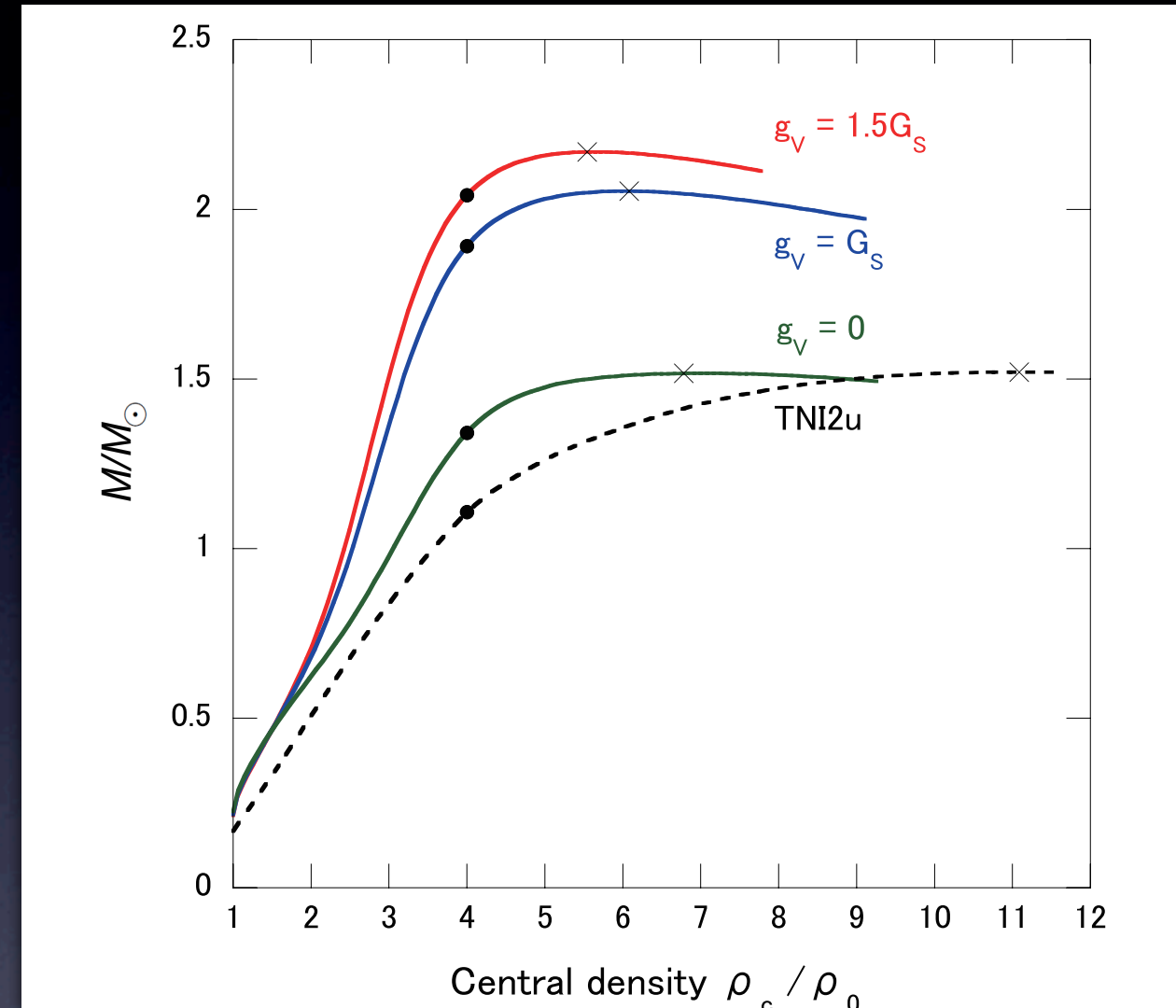
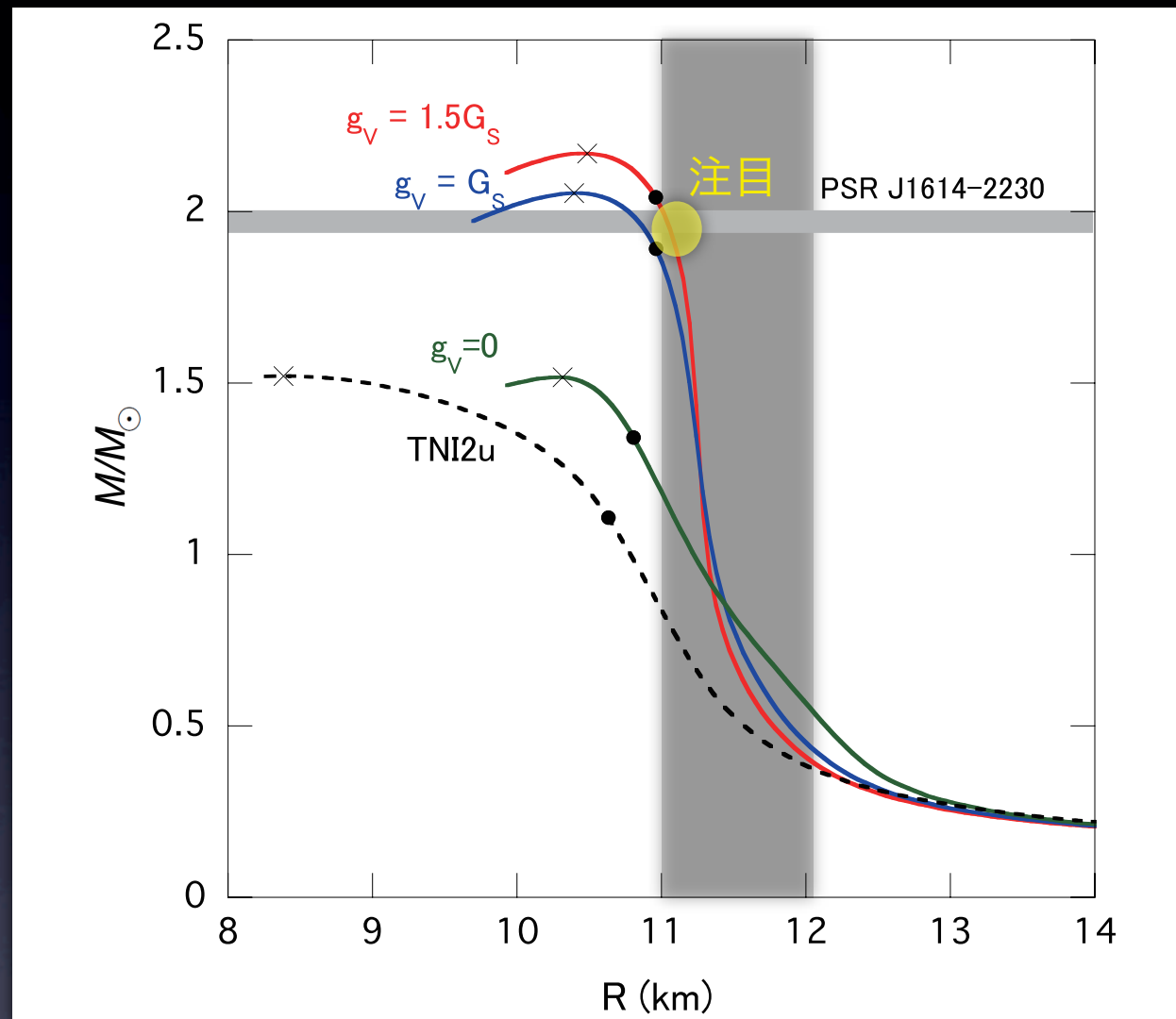


最大質量に密接に関係する物理量は？

また関係する密度領域は？

主な結果 ~最大質量~ $(\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$

最大質量と半径、中心密度

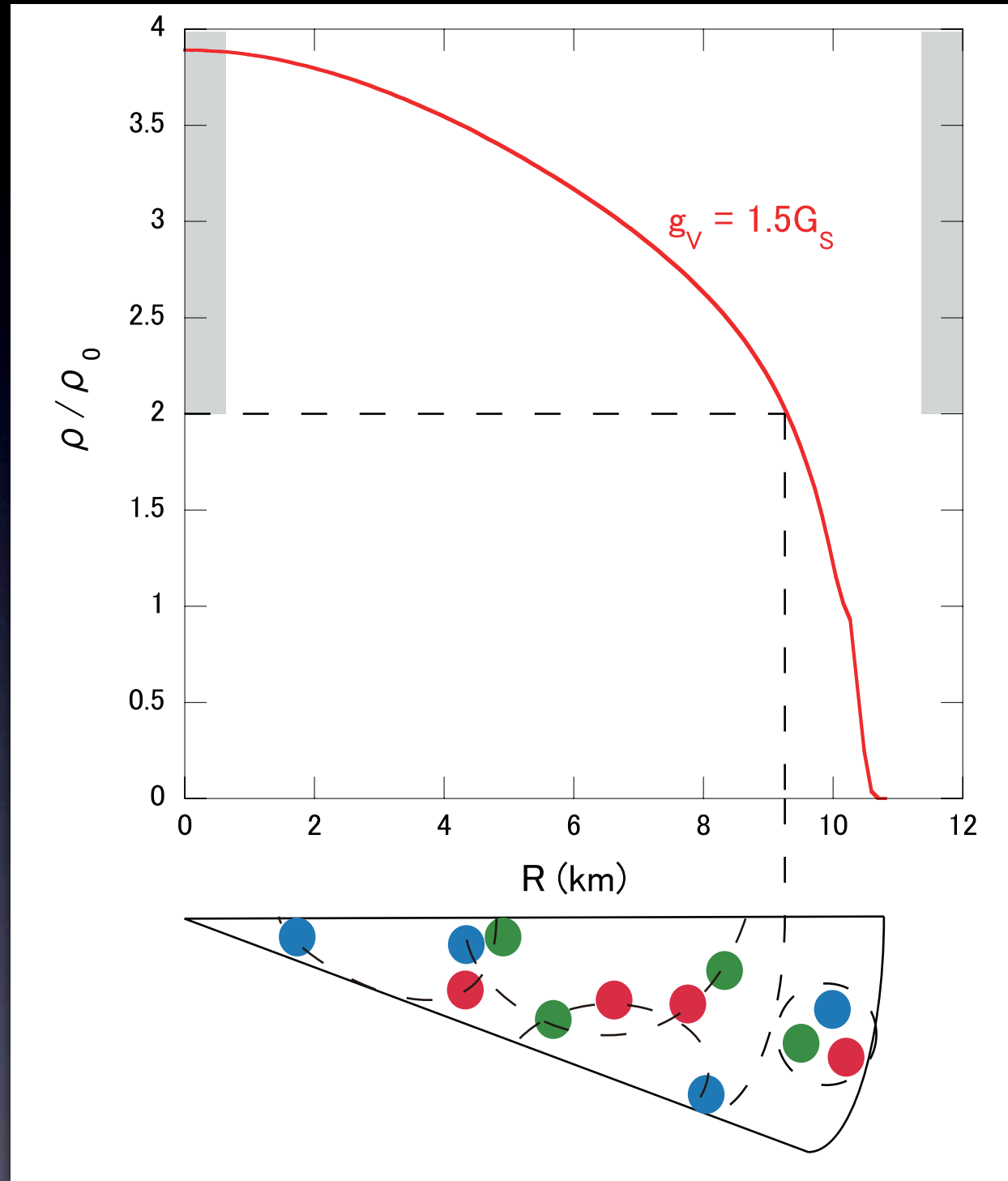


$g_v = G_s, 1.5G_s$ の場合2太陽質量を超える!

最大質量の大小関係は

$$g_v = 0 < TNI2u < g_v = G_s < g_v = 1.5G_s$$

主な結果 $\sim \rho - r \sim (\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0) \quad 2M_\odot$



$2M_\odot$ 以下で

strangeness出現せず

→

hyperon direct Urca
process生じず

→

速い冷却解決

主な結果 ~質量のパラメータ依存性~

最大質量と $\bar{\rho}$, Γ 依存性について

$\bar{\rho}$	$\Gamma/\rho_0 = 1$		$\Gamma/\rho_0 = 2$	
	$g_v = G_s$	$g_v = 1.5G_s$	$g_v = G_s$	$g_v = 1.5G_s$
$3\rho_0$	2.05(6.1)	2.17(5.6)	-	-
$4\rho_0$	1.89(7.2)	1.97(6.8)	-	-
$5\rho_0$	1.73(8.2)	1.79(8.0)	1.74(8.0)	1.80(7.7)
$6\rho_0$	1.60(9.6)	1.64(9.3)	1.62(9.2)	1.66(9.0)

小 $\longrightarrow$ 大 $\longrightarrow$ 大

クォーク相の影響が大きいと最大質量も増加

主な結果 ~ユニバーサル三体力~

ユニバーサル三体力あり (TNI2u)

$\bar{\rho}$	$\Gamma/\rho_0 = 1$	
	$g_v = G_s$	$g_v = 1.5G_s$
$3\rho_0$	2.05(6.1)	2.17(5.6)
$4\rho_0$	1.89(7.2)	1.97(6.8)
$5\rho_0$	1.73(8.2)	1.79(8.0)
$6\rho_0$	1.60(9.6)	1.66(9.0)

なし (TNI2)

$\Gamma/\rho_0 = 1$	
$g_v = G_s$	$g_v = 1.5G_s$
2.04(6.1)	2.16(5.9)
1.87(7.3)	1.96(6.8)
1.70(8.5)	1.77(8.2)
1.57(10.1)	1.62(9.5)



Quark相の影響が強い

ユニバーサル三体力なしでも $2M_\odot$ を支え得る

まとめ

- (1) クロスオーバーが比較的低密度 ($2\rho_0 - 4\rho_0$) で生じる
- (2) クォーク物質が強く相互作用している

という条件下でクォーク相を取り入れると
ハドロン相のみのEOSよりかたいEoSを得られる



クォーク相の存在こそが
重い中性子星の存在のために必要となる



従来の1次相転移を仮定した議論とは反対の結果

今後



最大質量に関する物理量

$$P/\varepsilon?$$

音速?



最大質量に関する密度領域



NJL模型にカラー超伝導の効果



有限温度への拡張



他の観測量 (期待される半径等) からの制限

ありがとうございました