

クォーク・ハドロン混合相における 微細構造効果と 高密度天体の構造

Finite size effects on quark-hadron phase transition and structures of compact stars

NAOJ

安武 伸俊

JAEA

丸山 敏毅

Kyoto Univ.

巽 敏隆

Waseda University

木内 建太

NAOJ

固武 慶

Contents

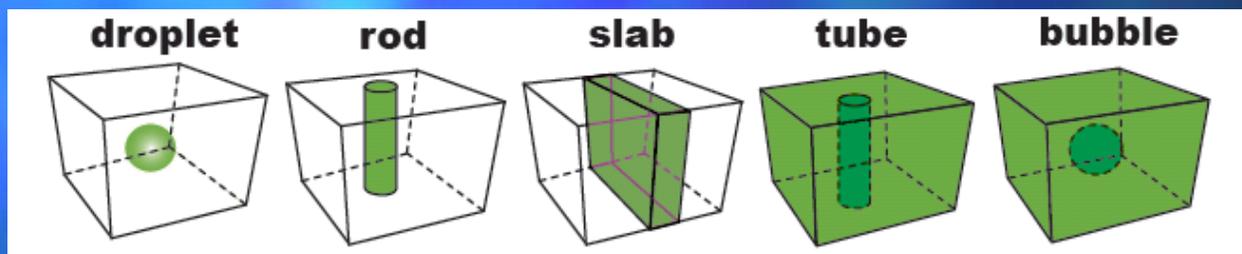
- § 1. イントロダクション
 - クォーク・ハドロン混合相における Pasta 構造
 - 強磁場(回転)中性子星
- § 2. セットアップ
 - 状態方程式
 - 磁場回転をもつ相対論的な回転平衡形状
- § 3. 結果
 - クォーク・ハドロン混合層をもつ高密度天体の構造
- § 4. まとめ & 議論



§ 1. Introduction

Pasta Structure

- 多粒子系での一次相転移では、非一様な微細構造 (いわゆる“パスタ構造”) が現れると考えられている。



期待されるサイト

Liquid-gas : supernovae matter

Neutron drip: neutron stars inner crust

Meson condensation: neutron stars outer core

Quark-hadron: neutron stars inner core (Hybrid stars)

→ 本日の内容

Neutron stars topics



3D simulation of SN
(Iwakami et al. 2008)

■ 超新星

- 最近の研究を見るとニュートリノ加熱、磁場、回転などの非球対称的な効果が超新星爆発には本質的に重要。

→ “**回転**” や “**磁場**”

■ マグネター (表面磁場 $\sim 10^{14}\text{G}$)

- 起源？
- **構成物質、内部構造？**

Our study is a first one of

“**Magnetized Rotating compact stars w/wo exotic matter**”

式

§ 2. Formulation

EOSs :

MIT bag model and BHF hadron EOS

ハドロン相: Brueckner Hartree Fock
(Baldo et al.(1999), ハイペロンの有無を考慮)

+

クォーク相: MIT bag model
(Free fermions - bag constant)

クォーク = ハドロン混合層では以下を全て考慮して最低エネルギーをもつ構造が実現される。

・ “クォーク相互作用” や “表面張力” のバランス

・ 荷電中性

・ バリオン数の保存

・ 相平衡 (右)

$$\mu_n + \mu_e = \mu_\Delta = \mu_p$$

$$\mu_p + \mu_e = \mu_n = \mu_\Delta = \mu_\Sigma + 2\mu_\Lambda$$

$$\mu_{\Sigma^-} + \mu_p = 2\mu_n$$

EOSs :

Uncertainty for surface tension

- MIT bag model を用いた optimistic な見積もり (Farhi & Jaffe 1984; Berger & Jaffe 1987)
- 有限温度のもとでの格子QCD (Kajantie et al. 1991; Huang et al. 1990, 1991)

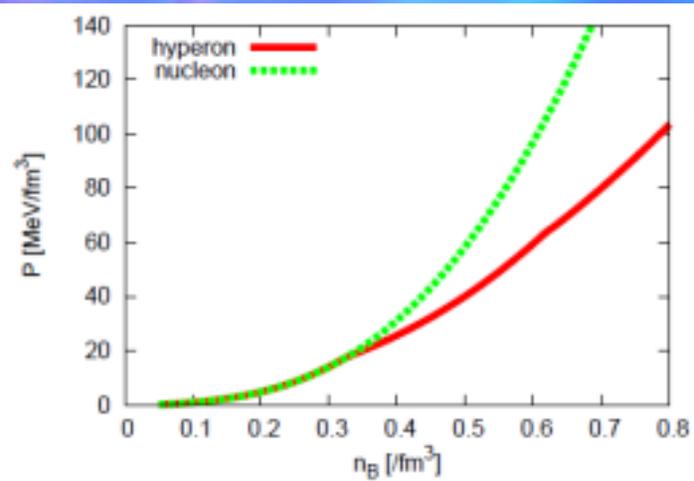
$$= 10 - 100 \text{ MeV/fm}^2$$

- しかし、パスタ構造なども考慮した上でEOSを構築すると $> 40 \text{ MeV/fm}^2$ で、ほとんど変化はみられない (Maruyama et al. 2007)。
- 以上のことから我々は

$$= 10, 40 \text{ MeV/fm}^2$$

$EOS(T=0 \text{ MeV}, Y_l=0)$:

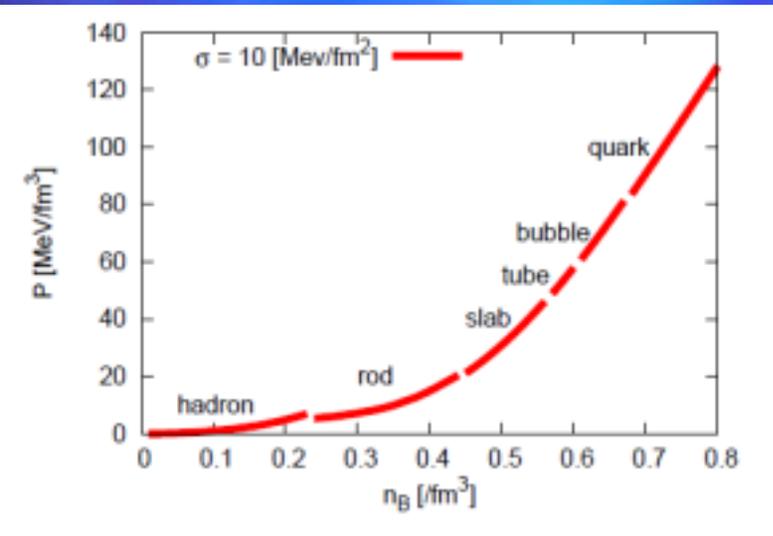
Brueckner Hartree Fock (Baldo et al.(1999), w/wo hyperon)



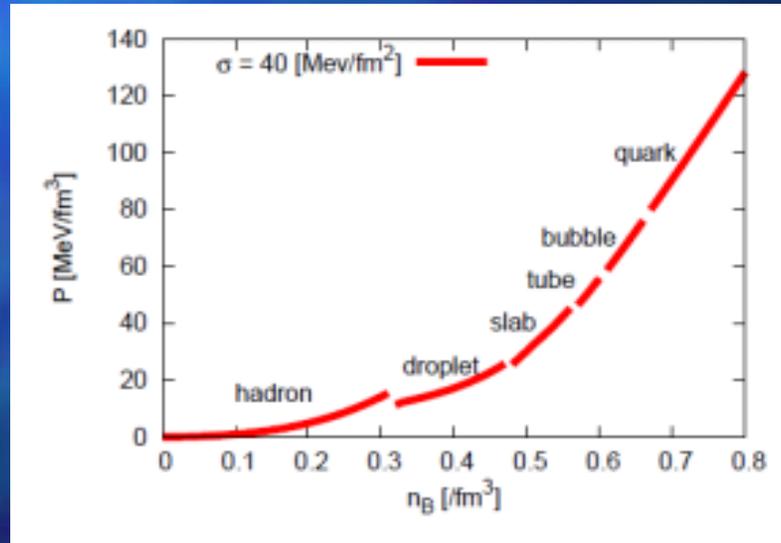
BHF(ハイペロンあり)
 QH pasta ($\sigma = 10 \text{ MeV/fm}^2$)
 QH pasta ($\sigma = 40 \text{ MeV/fm}^2$)
 BHF(ハイペロンなし)

↓ EOSの硬さ

Quark-Hadron pasta EOSs



“Droplet” は現れない。



“Rod” は現れない。

Formulation of magnetized rotating star equilibrium

Kiuchi & Yoshida (2008) MNRAS

~~Grad-Shafranov eq.~~



$$A = 0$$

トロイダル磁場のみ!!

Einstein eq.

... Similar to Komatsu Eriguchi Hachisu scheme(1989)

Bernoulli eq.

$$\int_0^{P(\epsilon)} \frac{dP}{\epsilon + P} - \ln u^0 + \frac{1}{4\pi} \int \frac{K(u)}{u} \frac{dK}{du} du = C,$$

- integrable condition
- no meridional flow



B f ()

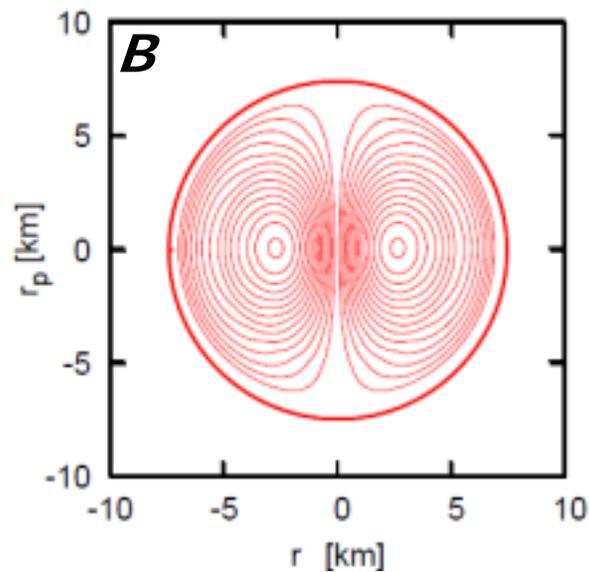
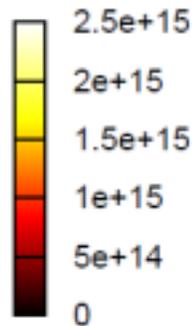
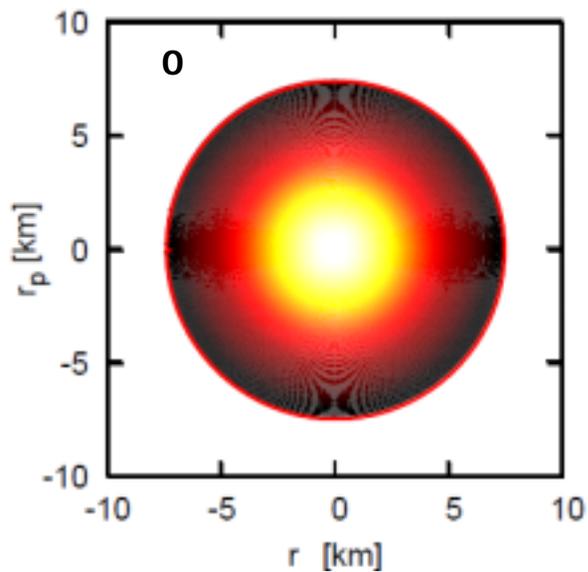
【仮定】

1. 定常, 軸対称性
2. 完全流体, 電気伝導度無限
3. 子午面流なし
4. barotropic EOS



§ 3. Result

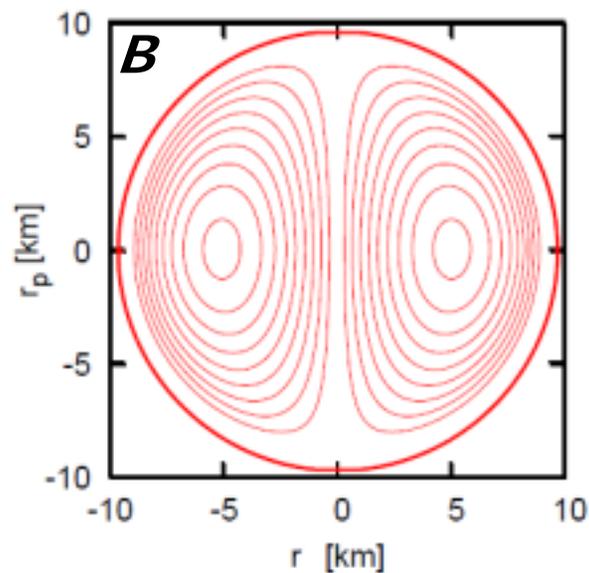
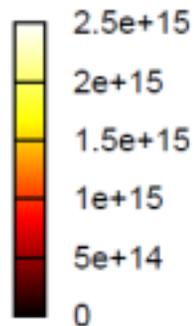
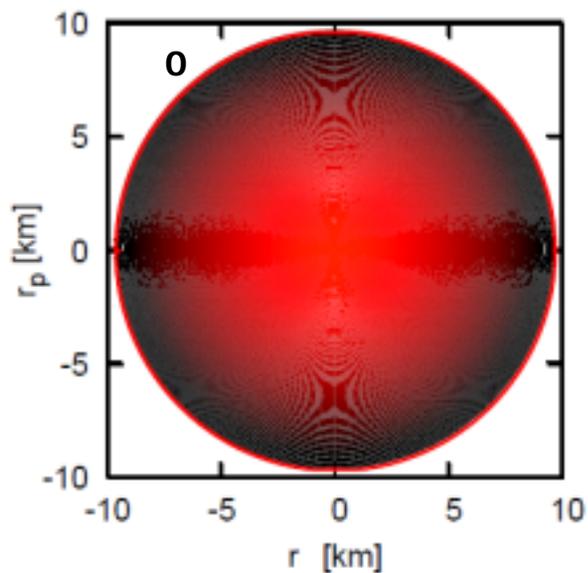
Neutron Stars with hyperons



$$M = 1.31 M_s$$
$$B_{max} = 7.1 \times 10^{17} \text{ G}$$

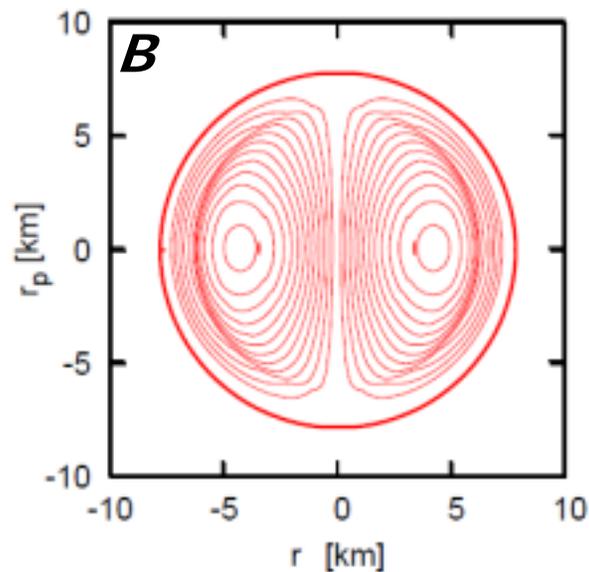
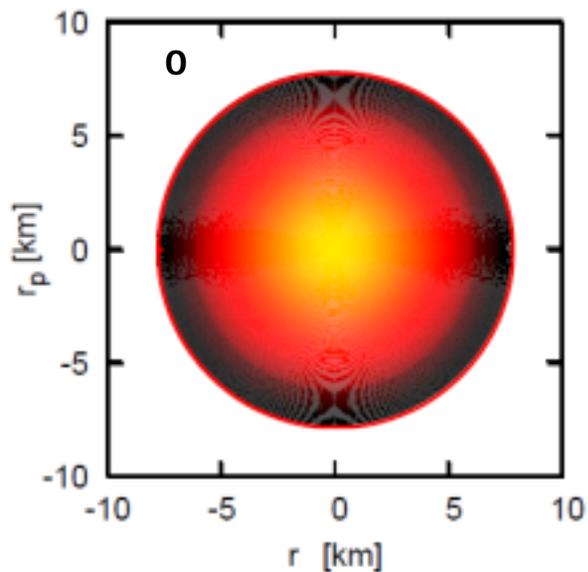
$$M_0 = 1.45 M_s, \quad = 5 \times 10^{29} \text{ G cm}^2$$

Neutron Stars without hyperons



$$M = 1.32 M_s$$
$$B_{max} = 4.6 \times 10^{17} \text{ G}$$

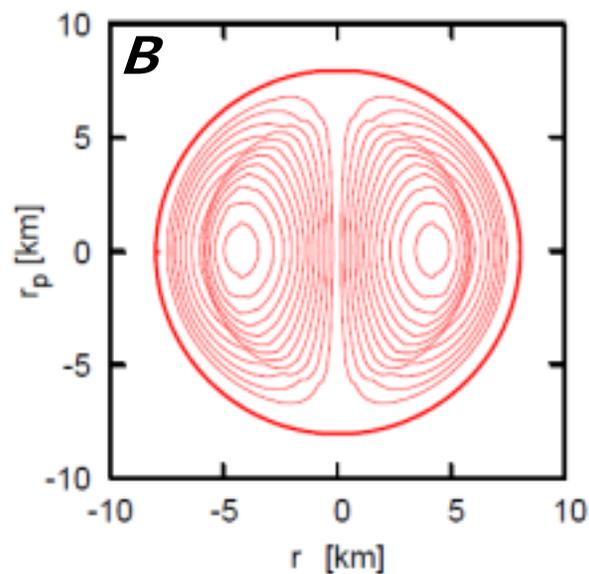
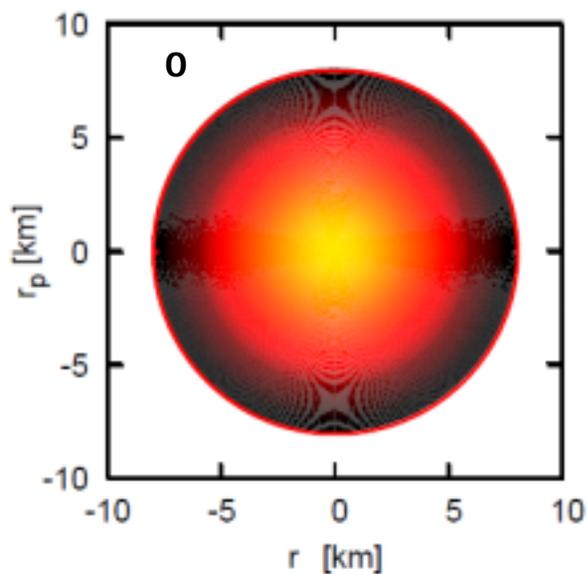
Hybrid Star : $B=100 \text{ MeV}/\text{fm}^3$, $=10 \text{ MeV}/\text{fm}^2$



$M = 1.30 M_s$
 $B_{max} = 6.2 \times 10^{17} \text{ G}$

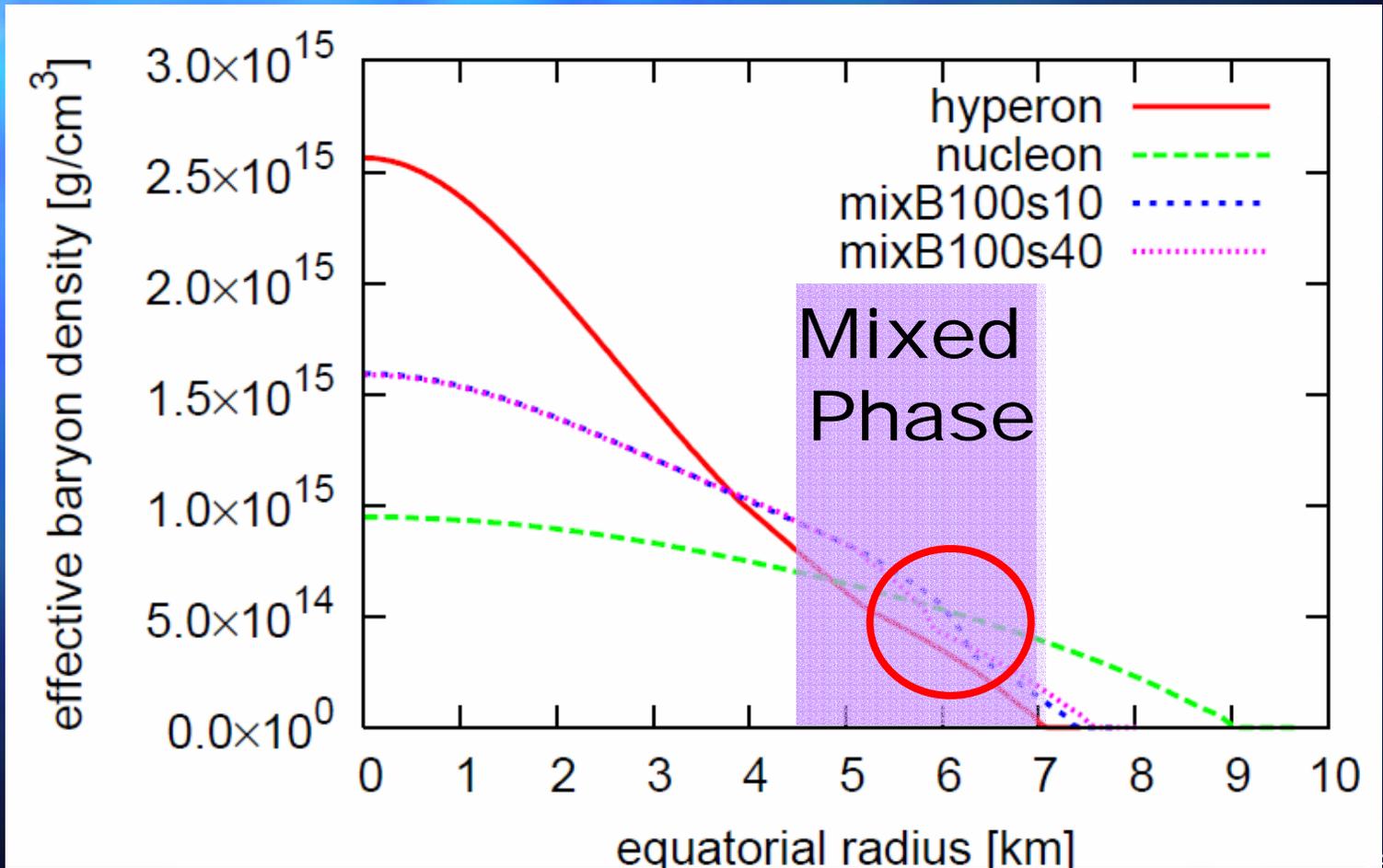
$M_0 = 1.45 M_s$, $= 5 \times 10^{29} \text{ G cm}^2$

Hybrid Star : $B=100 \text{ MeV}/\text{fm}^3$, $=40 \text{ MeV}/\text{fm}^2$



$M = 1.31 M_s$
 $B_{max} = 6.2 \times 10^{17} \text{ G}$

Density distributions for equatorial direction



肆

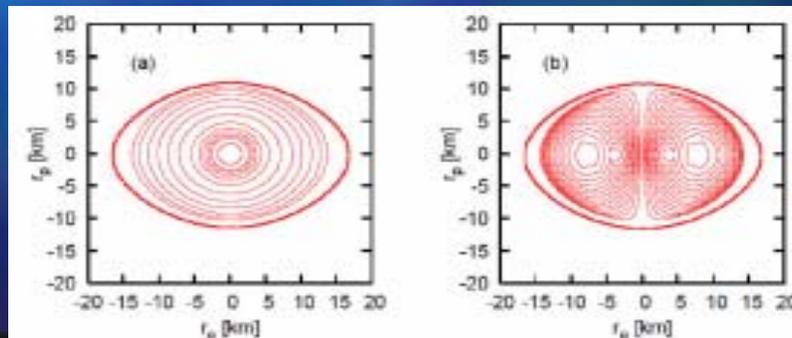
§ 4. Summary & Discussion

Summary

- 磁場をともなった(トロイダル磁場のみ) NSs や HSs の星の構造を計算した。
- クォーク=ハドロン相転移を伴う星では明らかに赤道方向での磁場の分布の仕方が違う。(不連続的に磁場強度が変わる。)
- 表面張力が大きいと混合層領域がなくなり、この磁場の不連続性が大きくなる。

----- other result -----

- 回転の効果



Discussion

- 他のEOS? (MIT→Nambu-Jona-Lasinio, mCFL ...)
 - **有限温度やニュートリノトラップの効果?**
 - 強磁場だとEOSそのものに影響を及ぼす可能性がある。
 - **ポロイダル磁場?** 他の磁場起源?
 - 分子動力学では?
(ただ正確なFermi分布や反粒子の寄与の計算は厳しそう...)
 - 天文現象としては?
 - X-ray burst
 - neutrino cross section
 - **高密度天体の冷却曲線**やSpin-down rate
 - Gravitational Wave
- (ただ今回の磁場の分布の効果はあまり効かないだろう...)

----- Collaborators -----

丸山 敏毅 (JAEA)

巽 敏隆 (Kyoto Univ.)

木内 建太 (Waseda Univ.)

固武 慶 (NAOJ)

----- Acknowledgment -----

M. Baldo, H.-J. Schulze (INFN Catania)

橋本正章, 野田常雄 (Kyushu Univ.)

山田章一 (Waseda Univ.)

梶野敏隆 (NAOJ)

千葉 敏 (JAEA)