スカラー・テンソル理論における中性子星の質量ー半径関係

森﨑宗一郎[1,2]、須山輝明[1,2]

1. Research Center for the Early Universe (RESCEU), Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan
2. Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

研究背景・目的

研究背景

- 太陽系での高精度実験[1]
  - ➢ 弱い重力場では一般相対性理論(GR)が高精度で正しい。
- 重力波の初検出[2]
  - ➢ 中性子星内部などの強重力場における重力理論の検証が今後可能になる。
- 2太陽質量の中性子星の存在[3]
  - ➢ 重力理論の修正による説明の可能性

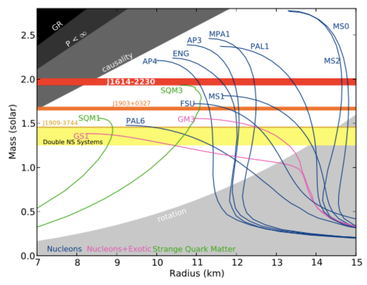


図1. 中性子星の質量の観測結果と、様々な状態方程式モデルが予言する質量−半径関係[3]

研究目的

① 太陽系実験による制限を逃れつつ、中性子星内部でGRからのズレが顕著になる重力理論において、中性子星の構造がどのように変化するか調べる。
② 重力理論を修正することで中性子星の最大質量を増加させる。

自発的スカラー化

スカラー・テンソル理論

重力の自由度にスカラー場ϕを追加

$$S=\int\sqrt{-g}d^4x\left(\frac{R}{16\pi G}-\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi-V(\phi)\right)+\int\sqrt{-\tilde{g}}d^4x\mathcal{L}(\tilde{g}_{\mu\nu},\Psi_m),\ \tilde{g}_{\mu\nu}\equiv A^2(\phi)g_{\mu\nu}.$$

($g_{\mu\nu}$の運動方程式)

$$G_{\mu\nu}=8\pi G\left[-\left(\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi+V(\phi)\right)g_{\mu\nu}+\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi+\underline{A^2(\phi)}\tilde{T}_{\mu\nu}\right],\ \tilde{T}_{\mu\nu}\equiv-\frac{2}{\sqrt{-\tilde{g}}}\frac{\delta S_m}{\delta\tilde{g}^{\mu\nu}}.$$

この値が小さいほど重力は弱まる。

(ϕの運動方程式)

$$\Box_g\phi-V_{\mathrm{eff},\phi}=0,\ V_{\mathrm{eff}}(\phi)\equiv V(\phi)-\frac{1}{4}A^4(\phi)\tilde{T},\ \tilde{T}\equiv\tilde{g}^{\mu\nu}\tilde{T}_{\mu\nu}.$$

⟶ スカラー場は環境に依存する有効ポテンシャルを感じる。

有質量スカラー場による自発的スカラー化[4]

$V(\phi),\ A^2(\phi)$ の関数形を以下のように仮定

$$V(\phi)=\frac{1}{2}m_\phi^2\phi^2,\ A^2(\phi)=1-\eta+\eta\exp\left[-\frac{\phi^2}{2M^2}\right],\ 0<\eta\leq 1.$$

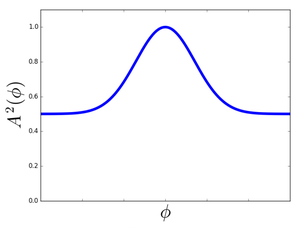


図2. $A^2(\phi)$ のグラフ

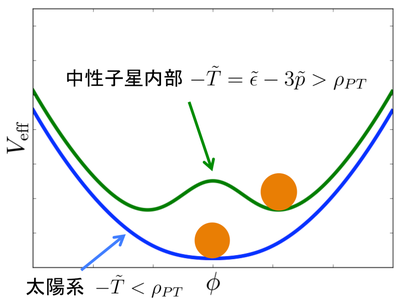


図3. 太陽系と中性子星内部での有効ポテンシャルの概略図

太陽系では $\phi\simeq 0.$ ⟶ ほぼGRに一致

中性子星内部では $A^2(\phi)<1.$

⟶ 重力が弱まり、中性子星の最大質量が増加し得る。

$\lambda_\phi\equiv m_\phi^{-1}$:スカラー場のコンプトン波長

η :GRからのズレの大きさ

$\rho_{PT}\equiv\dfrac{2m_\phi^2M^2}{\eta}$:自発的スカラー化の臨界密度

先行研究と本研究との比較

✓ $\lambda_\phi>100\mathrm{km}$ の場合の中性子星の内部構造は既知[5]
✓ $\lambda_\phi\lesssim 10\mathrm{km}$ の場合、振動するスカラー場が暗黒物質の存在を説明可能[4]

⟶ $\lambda_\phi\lesssim R_{NS}\simeq 10\mathrm{km}$ のパラメター領域で中性子星の内部構造を調べる。

数値計算のセットアップと手法

$$ds^2=g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu=-e^{\nu(r)}dt^2+\frac{dr^2}{1-\frac{2\mu(r)}{r}}+r^2d\Omega^2,\ \phi=\phi(r)$$

運動方程式

$$\mu'=2\pi G(r(r-2\mu)\psi^2+r^2m_\phi^2\phi^2)+4\pi GA^4(\phi)r^2\tilde{\epsilon},$$
$$\nu'=4\pi Gr\psi^2+\frac{1}{r(r-2\mu)}(8\pi Gr^3A^4(\phi)\tilde{p}-4\pi Gr^3m_\phi^2\phi^2+2\mu),\ \tilde{p}'=-\frac{\tilde{\epsilon}+\tilde{p}}{2}\left(\nu'+2(\ln A(\phi))'\right),$$
$$\psi'=\frac{m_\phi^2(4\pi Gr^2\phi^2\psi+r\phi)+rA^4(\phi)(4\pi Gr(\tilde{\epsilon}-\tilde{p})\psi+\alpha(\phi)(\tilde{\epsilon}-3\tilde{p}))}{r-2\mu}-2\frac{r-\mu}{r(r-2\mu)}\psi,\ \phi'=\psi.$$

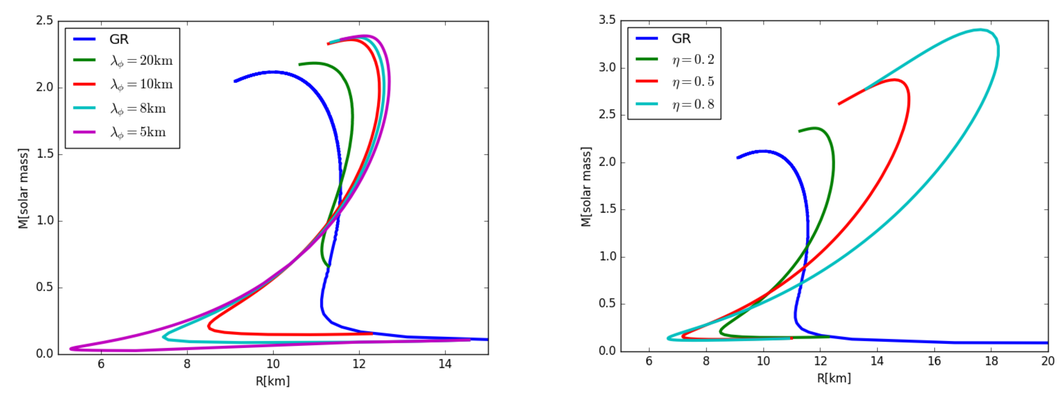
(ここでψは$\psi\equiv\phi'$により定義した。)

初期条件・境界条件

$$\mu(0)=0,\ \nu(0)=0,\ \tilde{p}(0)=p_c,\ \psi(0)=0.$$
$$\lim_{r\to\infty}\phi(r)=0.$$ ⟶ シューティング法

結果

質量−半径関係



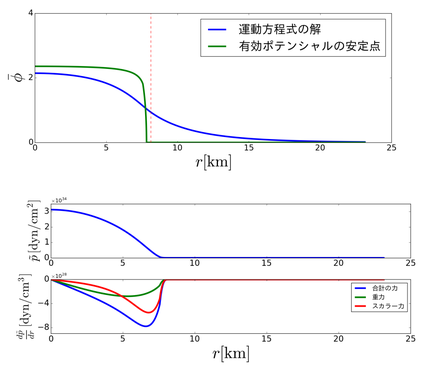
(a)λ_ϕに対する依存性 ($\eta=0.2,\ \rho_{PT}=10^8\ \mathrm{MeV}^4$)

(b)η に対する依存性 ($\lambda_\phi=10\ \mathrm{km},\ \rho_{PT}=10^8\ \mathrm{MeV}^4$)

図4. 各パラメターに対する質量−半径関係の依存性を図示した。状態方程式はHB状態方程式[7]を用いた。

- 自発的スカラー化により中性子星の最大質量は増加する。
- λ_ϕ , ρ_{PT} を小さくするか、η が大きくなると、中性子星の最大質量が増加する。
- 低密度側ではGRの場合よりも半径と質量が小さくなる。

内部構造とスカラー力



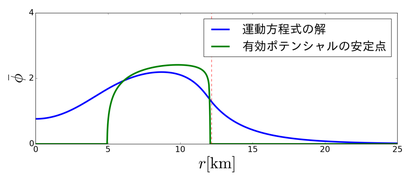
$$\tilde{p}'=-\frac{\tilde{\epsilon}+\tilde{p}}{2}\left(\nu'+\underline{2(\ln A(\phi))'}\right).$$

新たな項＝スカラー力

スカラー力は、スカラー化を終えϕが減少するところで星を縮める方向に働く。コンプトン波長が星の半径より短いと重力に卓越する。

⟶ 低密度の星はスカラー力で縮められ、質量・半径がGRの場合よりも小さくなる。

図5. スカラー場のプロファイル(上図)と圧力・圧力勾配のプロファイル(下図)。
($\lambda_\phi=5\ \mathrm{km},\ \eta=0.2,\ \rho_{PT}=10^8\mathrm{MeV}^4,\ p_c=1.5\times10^8\mathrm{MeV}^4\simeq 3.1\times10^{34}\mathrm{dyn/cm}^2$)



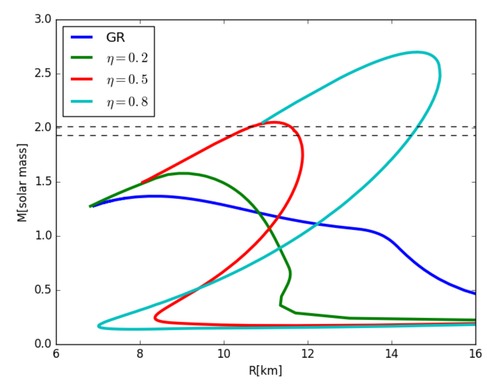
高密度では圧力が大きくなり$-\tilde{T}$ が ρ_{PT} 未満に

⟶ 原点付近でϕは増加し、スカラー力が星を支える。

⟶ (重力が弱まる効果も効いて)最大質量は増加

図6. 高密度中性子星のスカラー場のプロファイル
($\lambda_\phi=5\ \mathrm{km},\ \eta=0.2,\ \rho_{PT}=10^8\mathrm{MeV}^4,\ p_c=3\times10^9\mathrm{MeV}^4\simeq 6.3\times10^{35}\mathrm{dyn/cm}^2$)

エキゾチック物質モデルでの最大質量



K中間子を伴う状態方程式GS1 EOSはGRの枠内では連星パルサーJ1614-2230に含まれる中性子星の質量(図7の点線で囲われた領域)を説明できない。

⟶ 自発的スカラー化により説明可能に

図7. GS1状態方程式を用いた場合の質量−半径関係
($\lambda_\phi=10\ \mathrm{km},\ \rho_{PT}=10^8\ \mathrm{MeV}^4$)

結論

- 有質量スカラー場による自発的スカラー化により、中性子星の最大質量は増加し、エキゾチック物質を伴う状態方程式モデルでも2太陽質量の中性子星の存在を説明できる。
- コンプトン波長が星の半径より短い場合、重力が弱まる効果に加えて、スカラー力の影響も重要となる。

【参考文献】

[1] C. M. Will, Living. Rev. Rel. **4**, 4 (2001).
[2] B. P. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], Phys. Rev. Lett. **116**, 6, 061102 (2016).
[3] P. Demorest *et al.*, Nature **467**, 1081(2010).
[4] P. Chen, T. Suyama and J. Yokoyama, Phys. Rev. D **92**, 124016 (2015).
[5] F. M. Ramazanoglu and F. Pretorius, Phys. Rev. D **93**, 064005 (2016).
[6] J. S. Read et al., Phys. Rev. D **79**, 124033 (2009)