

現実的な中性子星構造を用いた混合磁場の安定条件

城 壮一郎 (東京大学), 藤澤 幸太郎 (東京工科大学), 諏訪 雄大, 徳野 鷹人 (東京大学)

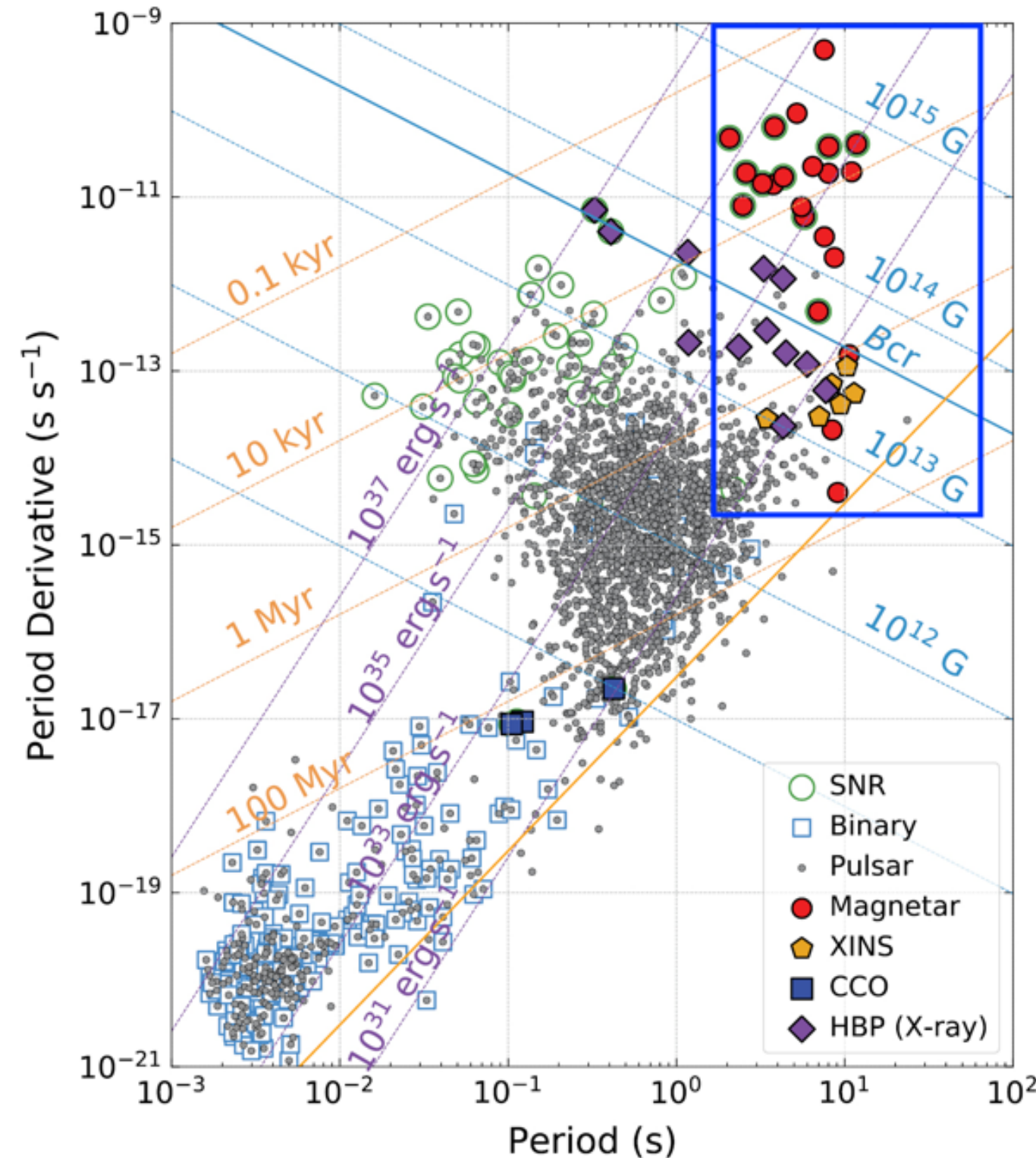
Abstract

強磁場中性子星 (マグネター) の内部には、表面付近の双極子磁場 (10^{14-15} G) より強い、最大 10^{16} G に達する磁場が存在する可能性が指摘されている。安定性の観点から、マグネター内部の磁場はトロイダル成分とポロイダル成分が共存する構造をとるとされているが、その具体的構造や安定条件は十分に解明されていない。磁場の安定には星の密度成層が重要な役割を果たすが、先行研究は密度と圧力を簡略化したモデルの解析にとどまっている。本研究では、原子核物理に基づく現実的な状態方程式を用いて中性子星内部構造を構築し、その構造のもとで先行研究と同様の手法によりトロイダル・ポロイダル混合磁場の安定性を再評価した。その結果、現実的な内部構造が磁場の安定性に与える影響を定量的に示した。

強磁場中性子星 (マグネター)

- 強い磁場を持つ中性子星 (表面付近の双極子磁場 $\sim 10^{14-15}$ G)
- 磁場をエネルギー源として X 線やガンマ線を放射する
 - 磁場が星の活動を特徴づける重要な要素となっている
- 強磁場環境の実験場になりうる
 - 10^{14-15} G $>$ $B_{\text{crit}} \sim 4 \times 10^{13}$ G: 量子電磁力学の摂動展開が破綻
 - Photon splitting など、強磁場環境特有の現象が起こりうる

マグネター磁場の性質の理解は重要



観測されている中性子星の回転周期とその時間微分を表した図 (Enoto et al. 2019 を改変)。図の右上の青い長方形で囲んだ領域にマグネターが分布する。

マグネターの磁場構造

磁場をポロイダル成分 (子午面成分: B_p) とトロイダル成分 (方位角成分: B_φ) に分解して考える

外部磁場: 双極子 (=ポロイダル) 磁場

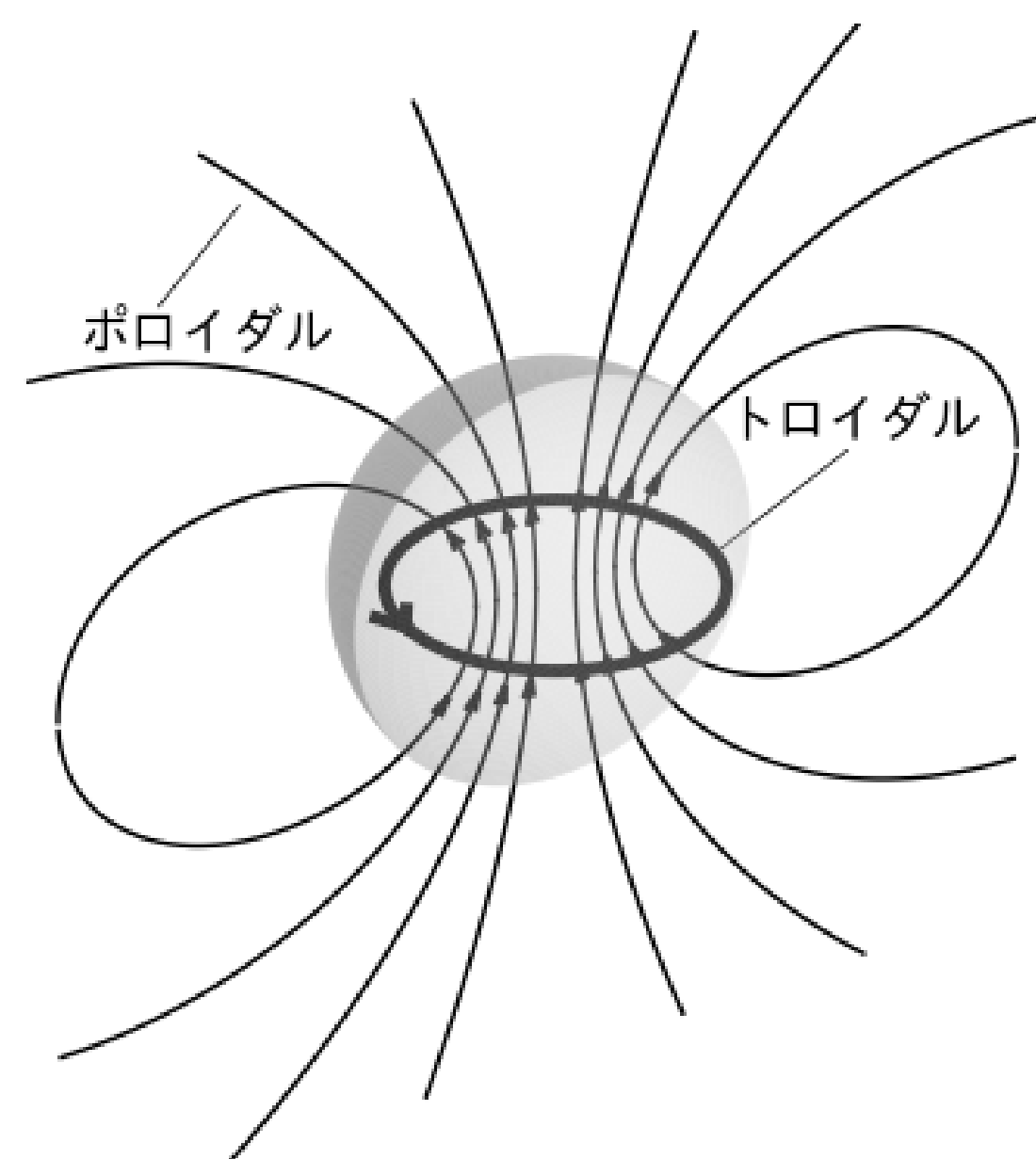
- 磁気双極子放射を仮定し、回転周期とその時間微分から強度が推定可能

$$B_p \sim 1.0 \times 10^{14} \sqrt{\left(\frac{P}{1\text{s}}\right) \left(\frac{\dot{P}}{1.0 \times 10^{-14} \text{s s}^{-1}}\right)} \text{ G}$$

内部磁場: 混合磁場構造 (ポロイダル磁場 + トロイダル磁場) が期待される

- 直接観測は不可能
- 純粋なトロイダル磁場・純粋なポロイダル磁場は理論的に不安定 (e.g., Tayler 1973; Wright 1973)
- マグネター歳差運動 (下の説明も参照) など、内部トロイダル磁場の存在を示唆する観測報告

→ しかし、具体的な内部磁場の形状やその安定性は完全にはわかっていない



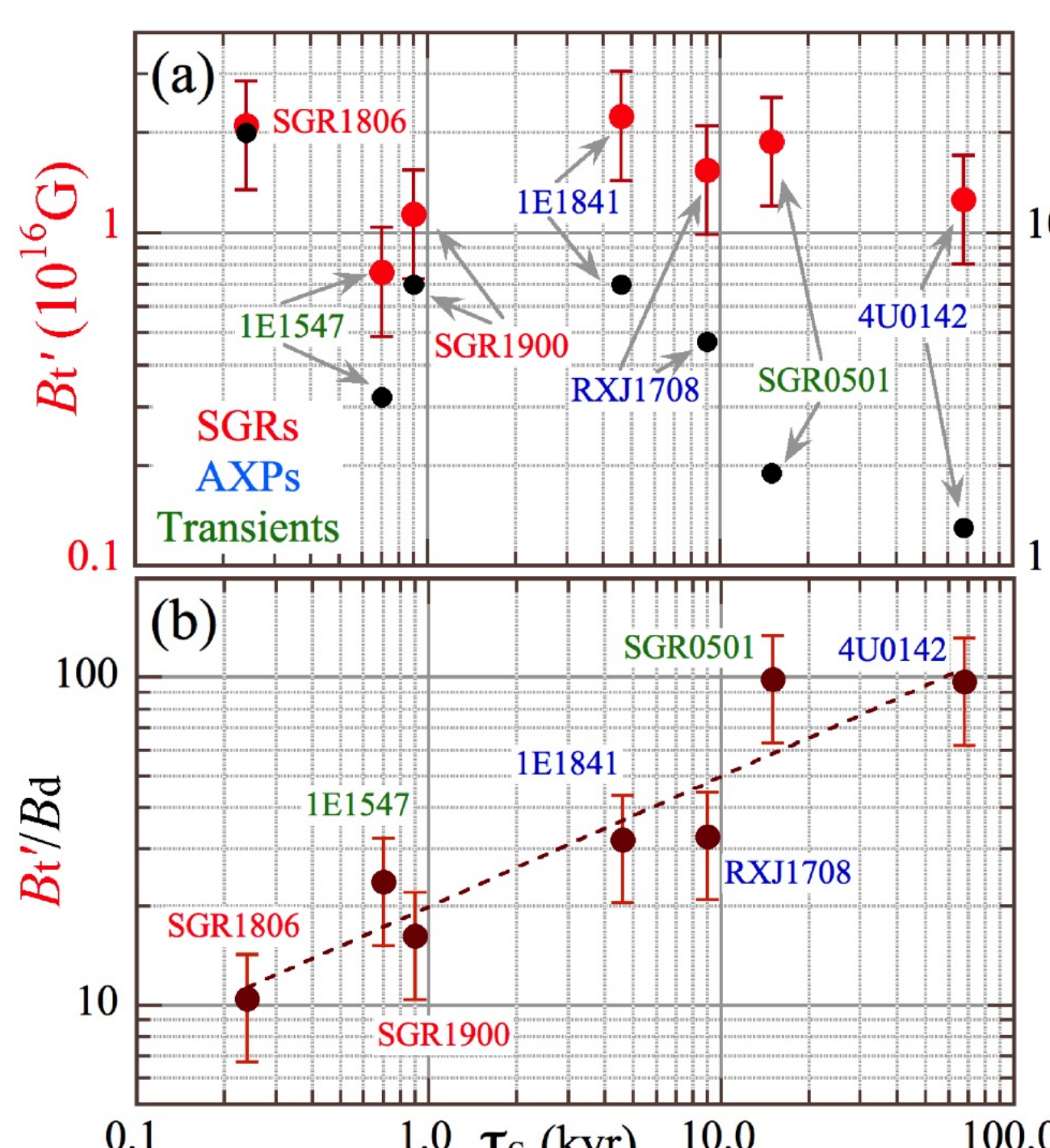
マグネターの内部磁場として期待される構造の模式図。星の子午面に対し平行なポロイダル磁場 B_p と垂直なトロイダル磁場 B_φ が混合した構造をとる。

マグネターの自由歳差運動

マグネターのパルスから位相変調を検出 (e.g., Makishima et al. 2014)

→ マグネター内部に強力なトロイダル磁場 ($\sim 10^{16}$ G) が存在する可能性を示唆

- マグネター内部の強力なトロイダル磁場 $\sim 10^{16}$ G により星が縦長に変形
- マグネターは自由歳差運動し、パルスが位相変調する



左: パルスから位相変調が検出されたマグネターについて、推定された年齢およびトロイダル・ポロイダル磁場強度をプロットしたもの (Makishima et al. 2024 より引用)。上パネルに推定された磁場の成分ごとの強度、下パネルにポロイダル磁場強度で規格化したトロイダル磁場強度を示してある。右: マグネター自由歳差運動モデルの模式図 (Makishima et al. 2014 より引用)。

✉ jo-soichiro334@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

エネルギー変分法による磁場の安定性解析

安定性解析手法 (Akgün et al. 2013; 右図も参照)

- 球対称な静水圧平衡状態に軸対称磁場を摂動として与える
- 摂動によるエネルギー変分 $\delta W > 0$ が全摂動モードに対し成り立てば安定

先行研究: 星の密度成層と磁場安定性の関連

- 密度成層が磁場の安定化に役立つ可能性を示唆 (Tayler 1973)
- $\rho_0 \propto (1-r^2)$ での安定性解析 (Akgün et al. 2013)
- $\Gamma = 2$ の Polytropic EoS (i.e., $p_0 \propto \rho_0^2$) での安定性解析 (Herbrink & Kokkotas 2017)

→ 簡単な密度・圧力構造のモデルの解析にとどまっており、現実的な密度・圧力構造のもとで安定性を検討する必要がある

本研究で目指すこと

- 原子核物理に基づく現実的な状態方程式を用いて中性子星内部構造を構築
- 2.1 で構築した現実的な星モデルのもとで磁場の安定性を解析

The spherically symmetric equilibrium system

$$d_r m_0 = 4\pi r^2 \rho_0$$

$$d_r p_0 = -\rho_0 m_0 / r^2$$

$$d_r \Phi_0 = -d_r p_0 / \rho_0$$

Equation of State (EoS)

Unmagnetized background
 ρ_0, p_0, Φ_0

Introduce **B** as a perturbation ξ

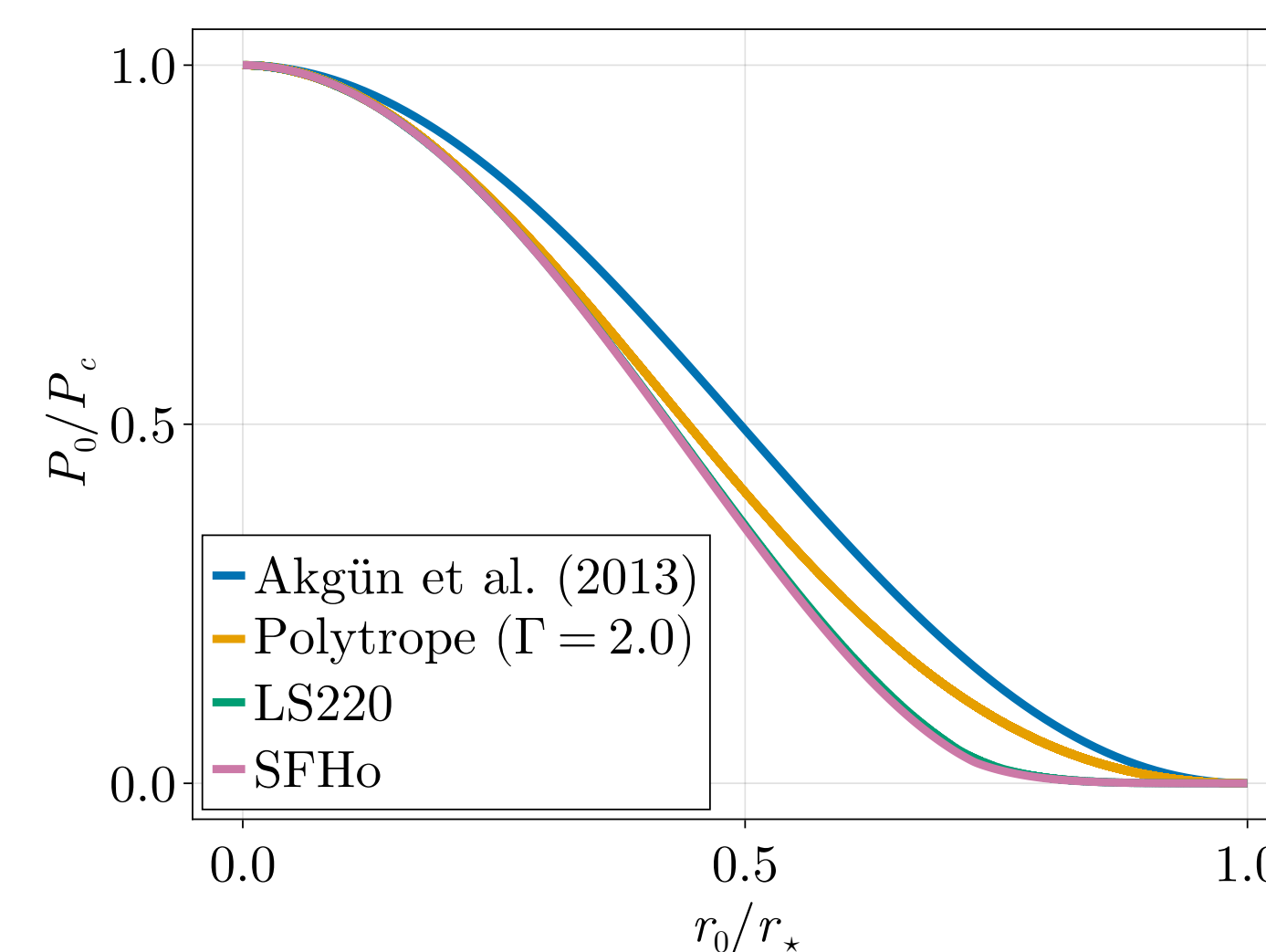
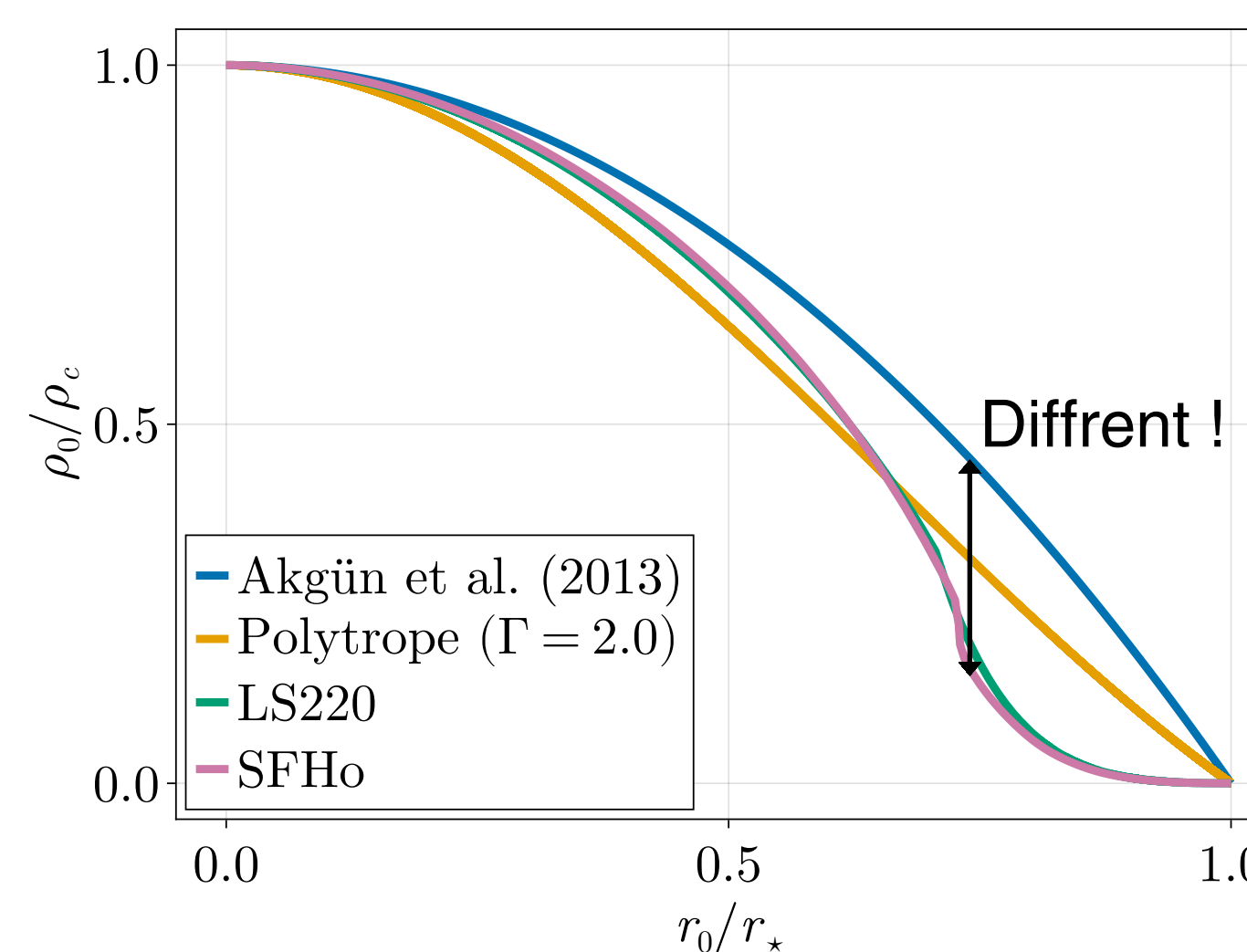
Energy variation δW
 $\delta W > 0, \forall \xi \iff$
stable

Akgün et al. (2013) の手法による安定性解析の手順を示したフローチャート。

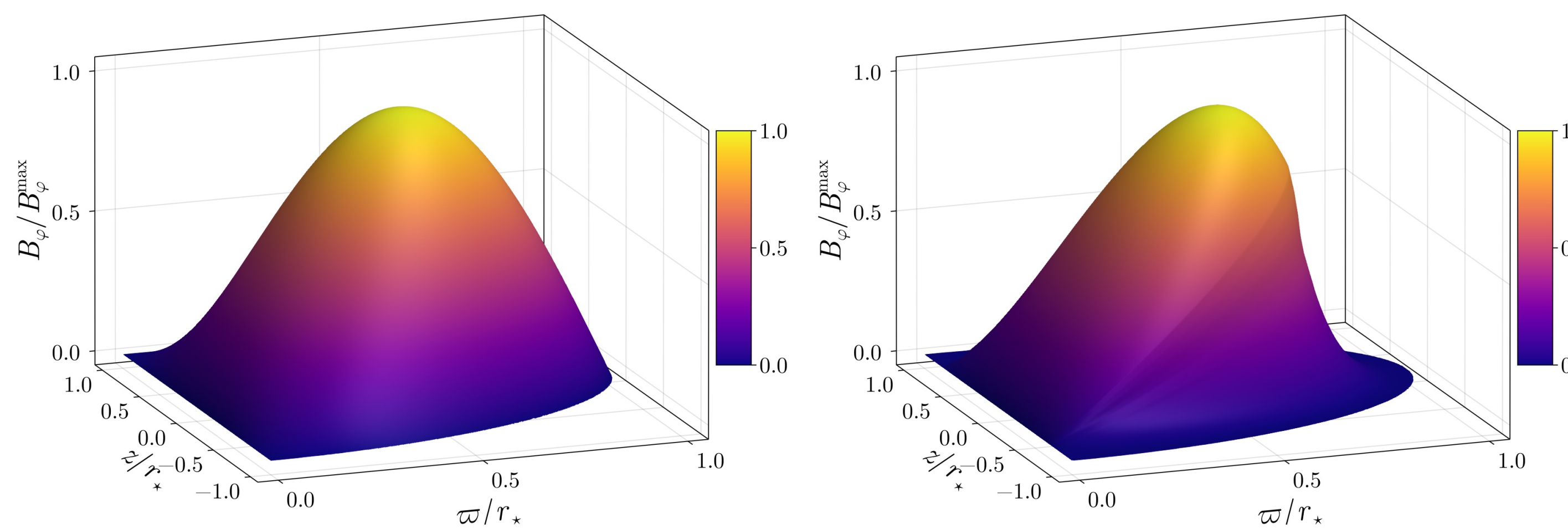
状態方程式ごとの密度・圧力構造の比較

状態方程式を変え、星の背景場の構造を比較

- 現実的 EoS では、 $r_0/r_* \sim 0.75$ で密度、圧力が急減 (=密度成層の効果が大きい)
- 純粋トロイダル磁場 $B_\varphi = B_\varphi^{\text{max}} \rho_0 \varpi$ (Tayler 1973) の空間分布も大きく異なる。



左: 状態方程式ごとの密度構造の比較。横軸は星の半径、縦軸は中心密度で規格化した。線の色が使用した状態方程式に対応し、青: $\rho_0 \propto (1-r^2)$ (Akgün et al. 2013); 橙: $\Gamma = 2$ の Polytrope (Herbrink & Kokkotas 2017); 緑: LS220 (Lattimer & Swesty 1991); ピンク: SFHo (Steiner et al. 2013) を表す。右: 圧力について左と同様の図をプロットしたもの。縦軸は中心圧力で規格化した。



左: Herbrink & Kokkotas (2017) で解析された純粋トロイダル磁場の空間分布。上の 1 次元密度構造を円筒座標 (ϖ, φ, z) に変換し、純粋トロイダル磁場を $B_\varphi = B_\varphi^{\text{max}} \rho_0 \varpi$ で与えた。右: 左と同様の分布を SFHo EoS を使って求めた星の密度構造に対して描いたもの。

Ongoing Research & Future Prospects

- 構築した星のもとで安定性解析を実行中
- 結果の予測
 - 純粋ポロイダル・純粋トロイダル磁場は依然として不安定なはず
 - 密度成層効果が大きいので、混合磁場は安定しやすくなる?