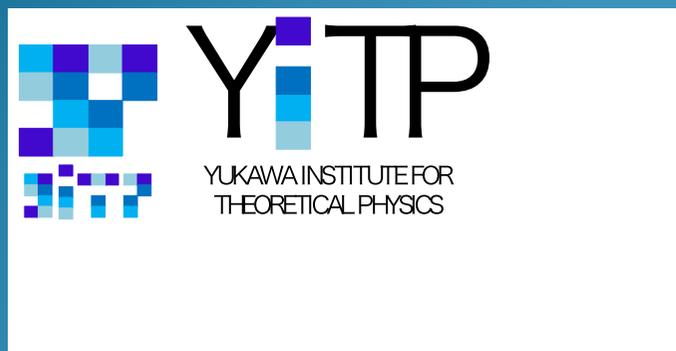


混合磁場を持った中性子星の安定性

木内建太 (YITP)

Collaborators : 吉田至順 (東北天文), 柴田大 (YITP)



0. 序章

1. 純磁場の安定性

2. 混合磁場の安定性

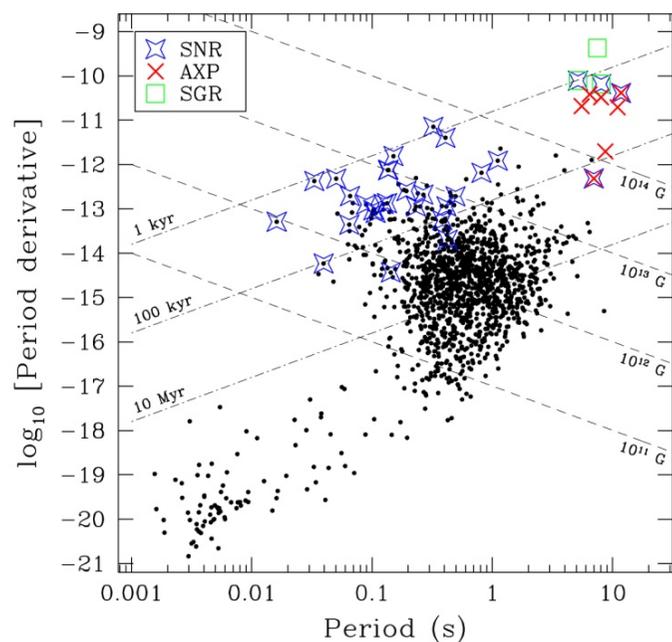
2.1 ポロイダル／トロイダル磁場エネルギー比

2.2 磁気ヘリシティ

3. まとめ

序章

$P - \dot{P}$ Diagram



✓ 中性子星磁場 $\sim 10^{11-15} \text{ G}$
(Manchester 04, Woods & Thompson 04)

✓ 様々な磁気流体不安定性
(後述) (Parker 66, Tayler 73,
Wright 73)

不安定性成長時間スケール =
アルフベン時間 t_A

$$t_A \sim 1\text{s} (B/10^{13}\text{G})^{-1} (\rho/10^{15}\text{g/cm}^3)^{1/2} (R/10\text{km}) \ll t_{\text{lifetime}}$$

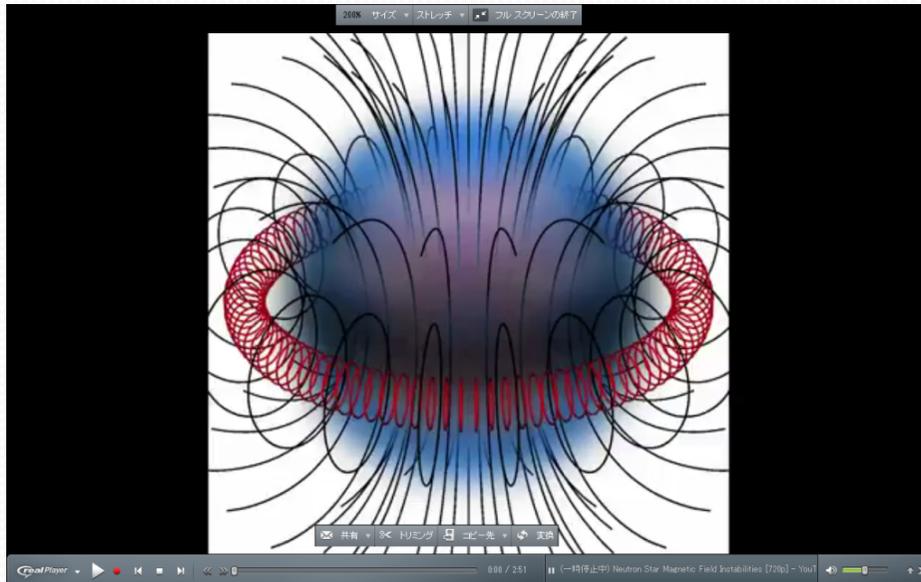
中性子星磁場はどのように安定に存在しているか？

純磁場の安定性

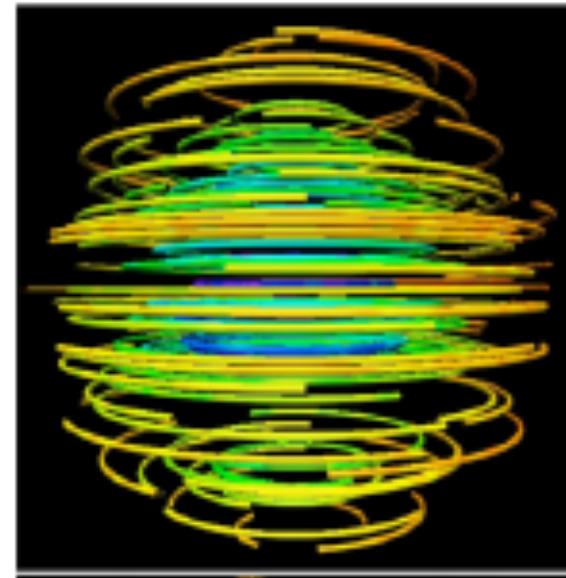
純磁場 = ポロイダル or トロイダル 成分のみ

磁気流体不安定性の摂動解析 : ほぼ純磁場のみ

ポロイダル磁場 (Lasky+ 11)



トロイダル磁場 (Duez+ 10)

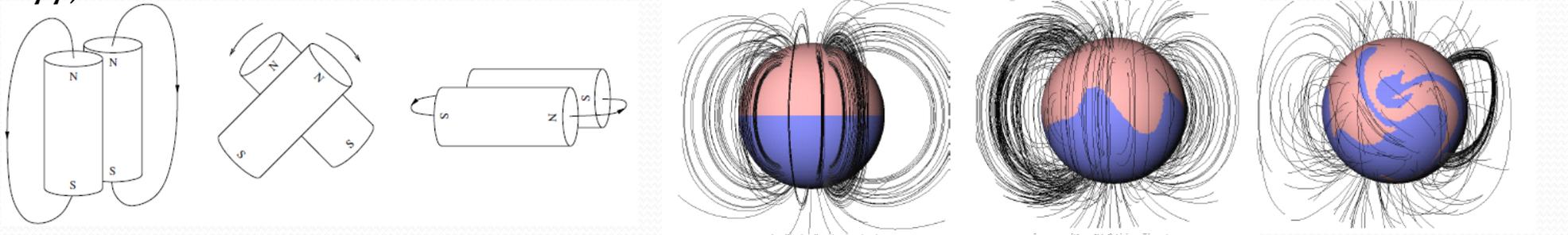


純磁場の安定性

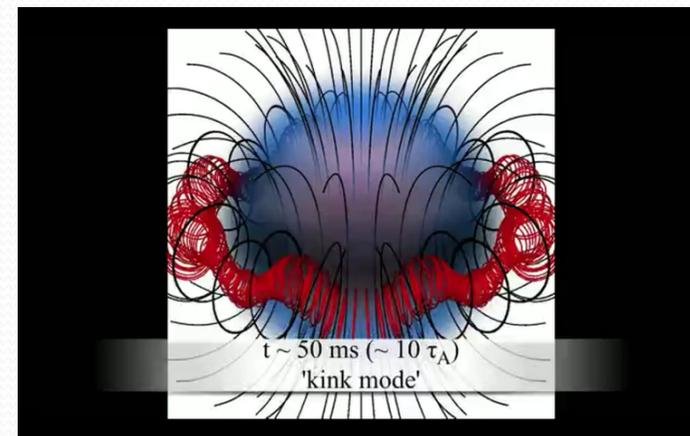
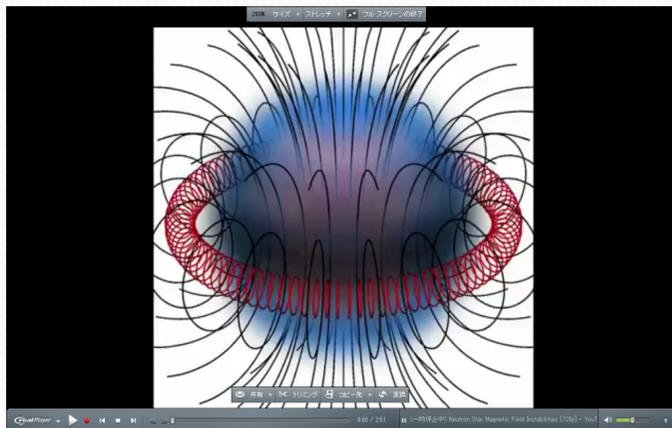
✓ポロイダル磁場： Flowers-Ruderman不安定性 (Flowers-Ruderman

(Braithwaite & Spuruit 06)

77)



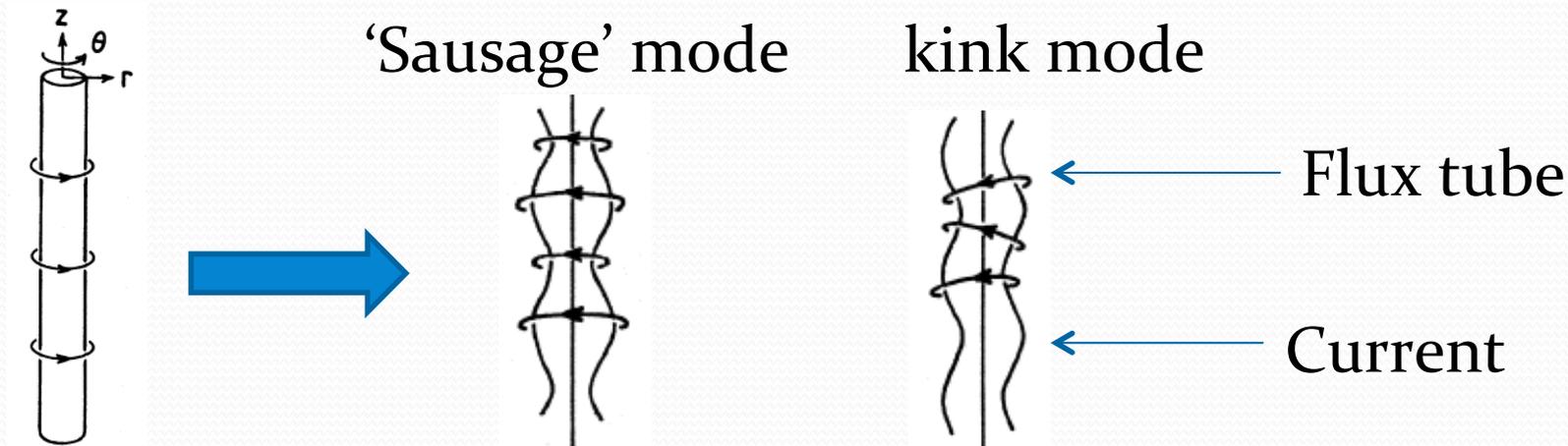
✓ポロイダル磁場： ‘sausage’ and kink 不安定性 (Wright 73, Markey and Tayler 73, Lasky+ 11, Cioffi+ 11)



不安定性は 中立点($B=0$)から発生

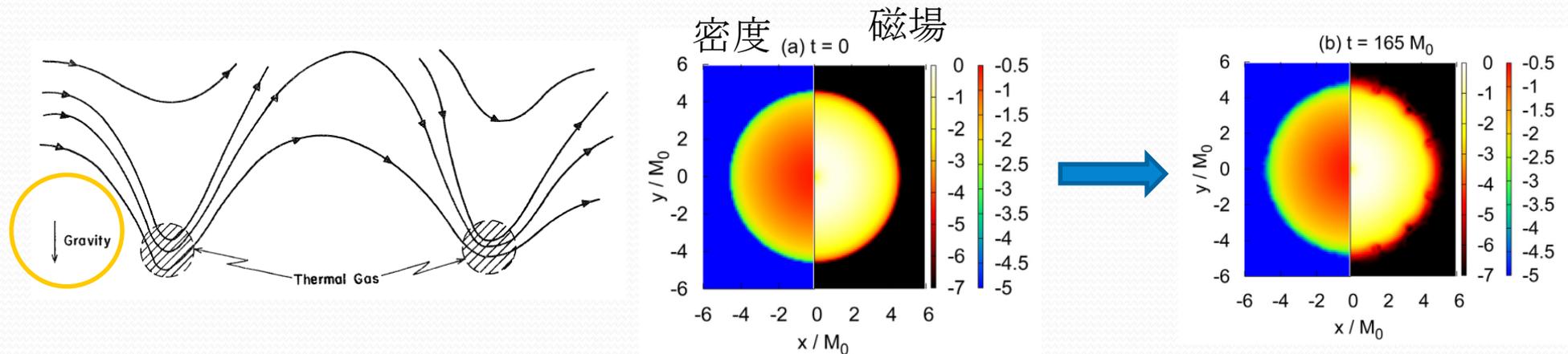
純磁場の安定性

✓ トロイダル磁場： ‘sausage’ and kink 不安定性 (Taylor 73)



✓ Parker 不安定性 (Parker 66)

トロイダル磁場 (KK+ 11)



不安定性のまとめ

- ✓ ポロイダル磁場 ⇒ ‘sausage’ or kink不安定性 @ 中立点
- ✓ トロイダル磁場 ⇒ Parker不安定性 @ 表面 or ‘sausage’ or kink instability @ 磁軸

どのように磁場を安定化するか？

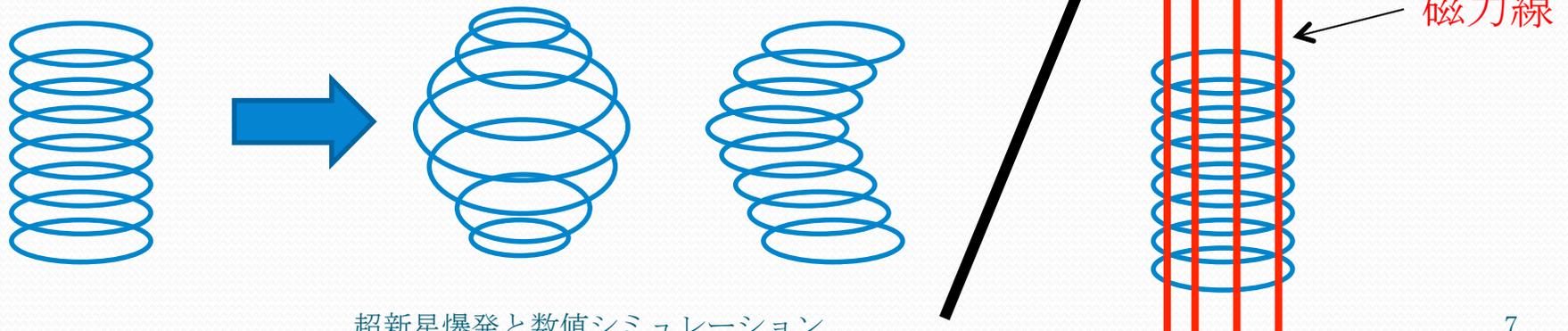
Key ingredients

$$N^2 \propto \left(\frac{\partial P}{\partial s} \right)_{\rho, Y_l} \left(\frac{ds}{dr} \right)_{\text{amb}} + \left(\frac{\partial P}{\partial Y_l} \right)_{\rho, s} \left(\frac{dY_l}{dr} \right)_{\text{amb}} > 0$$

✓ Stratification vs Parker 不安定性

$N \sim 500$ Hz (Reisenegger & Goldreich 92) for Neutron Star

✓ 混合磁場(ポロイダルトロイダル磁場) (Prendergast 56)
 磁力線(@中立点 or @磁軸) ‘sausage’ kink



混合磁場の安定性

Braithwaite 09

⇒ (ポロイダルエネルギー) / (全磁場エネルギー) = E_p / E の
閾値

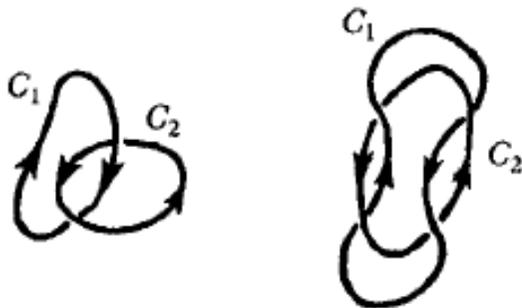
✓ 3D Newtonian MHD simulation of stably stratified star

Heuristic criterion : $10^3 E / |W| < E_p / E < 0.8$, W = 束縛エネルギー

これで十分か? ⇒ No! 同じ E_p / E で異なる磁場の配位がありえる。

磁気ヘリシティ

$$H = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} d^3x, \quad \mathbf{A} : \text{Vector potential}$$



ヘリシティ = 磁力線の絡み具合 (Moffatt 69)

純磁場では $H=0$ (例) トロイダル磁場、

$$A_\phi = 0$$

混合磁場の安定性 (KK+12 in prep.)

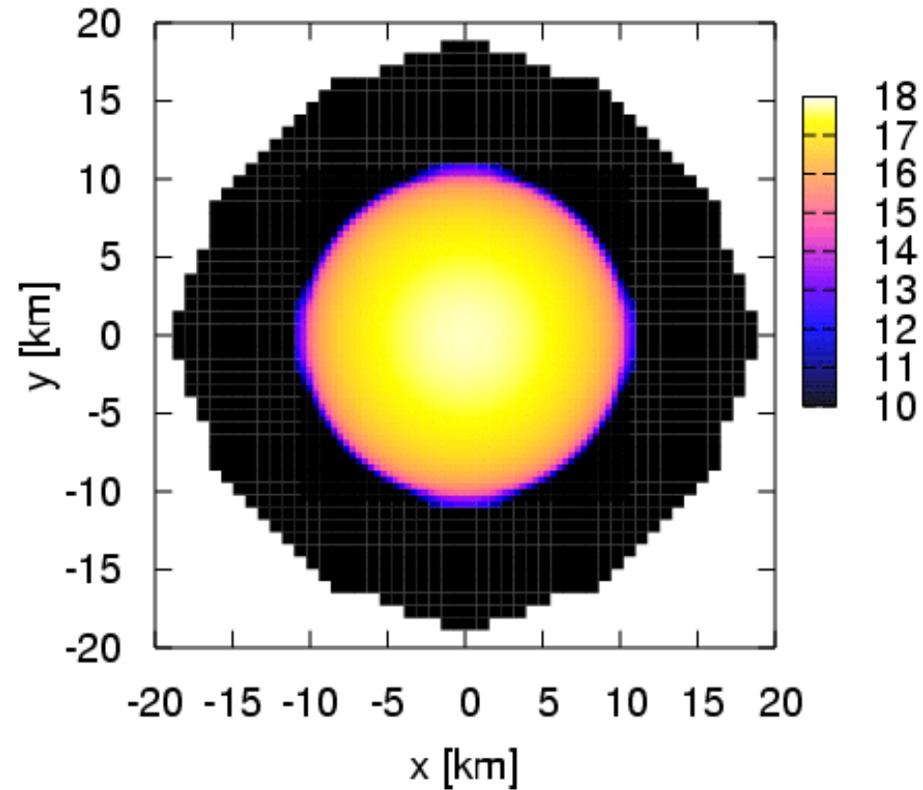
Set up

- ✓ 初期条件 : 磁場平衡解 (摂動) (Yoshida+, in prep.)
- Stably stratified models : $P = K \rho^\gamma$, $\varepsilon = P/\rho/\Gamma - 1$ with $\gamma \neq \Gamma$
- 磁力線が星内部に閉じ込められている。 (Ioka & Sasaki 04)
- 磁場エネルギー : $E_p / E \approx 0.24 \Rightarrow$ Braithwaite criterion によると安定
- ヘリシティ H_1 、 $H_2 (< H_1)$ の 2 モデル
H2モデルの磁場はH1より形状が複雑 $H = \int A \cdot B d^3x \Rightarrow H_1$ の方がより安定と予想
- ✓ 3D GRMHD simulation

数値計算結果(KK+12 in prep.)

H1 model : $|B|$ on the equatorial plane

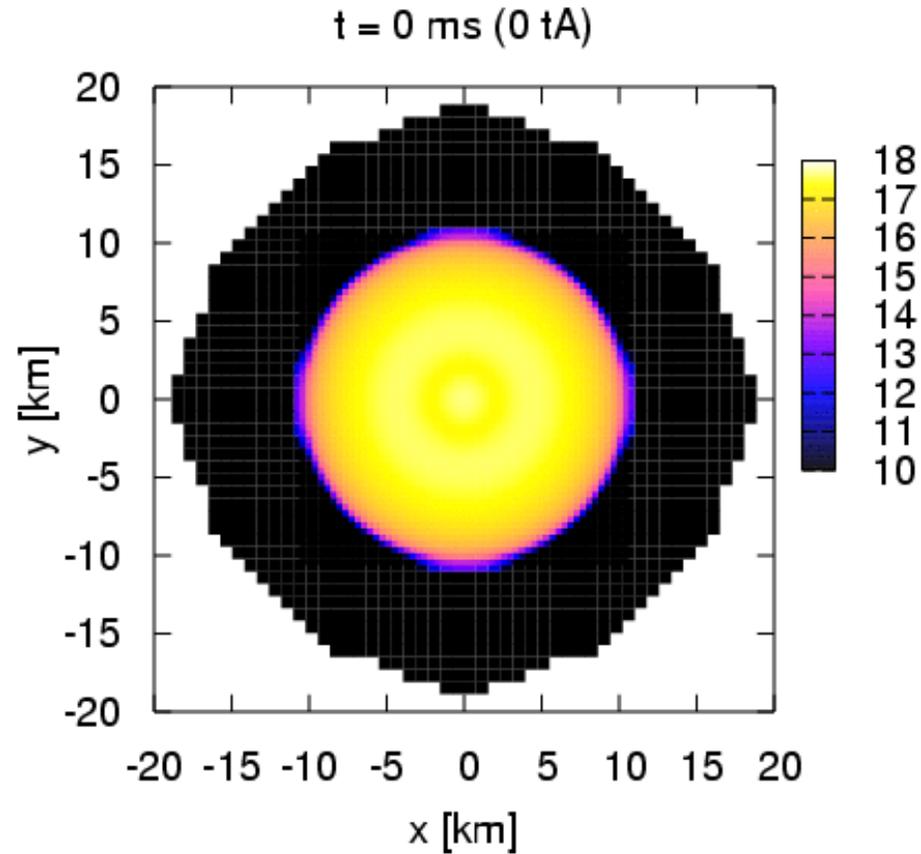
$t = 0$ ms (0 tA)



- ✓ 表面を除いて大局的に安定 (重力に垂直方向の磁気浮力)

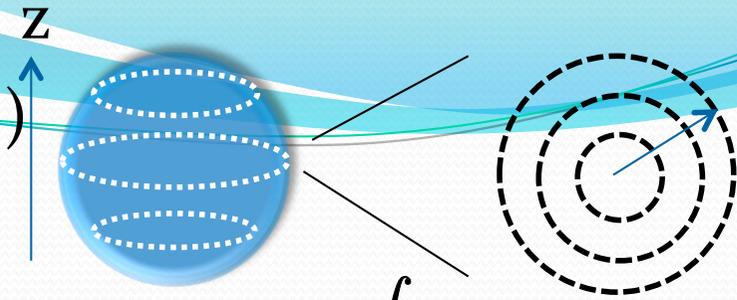
数値計算結果(KK+12 in prep.)

H2 model : $|B|$ on the equatorial plane



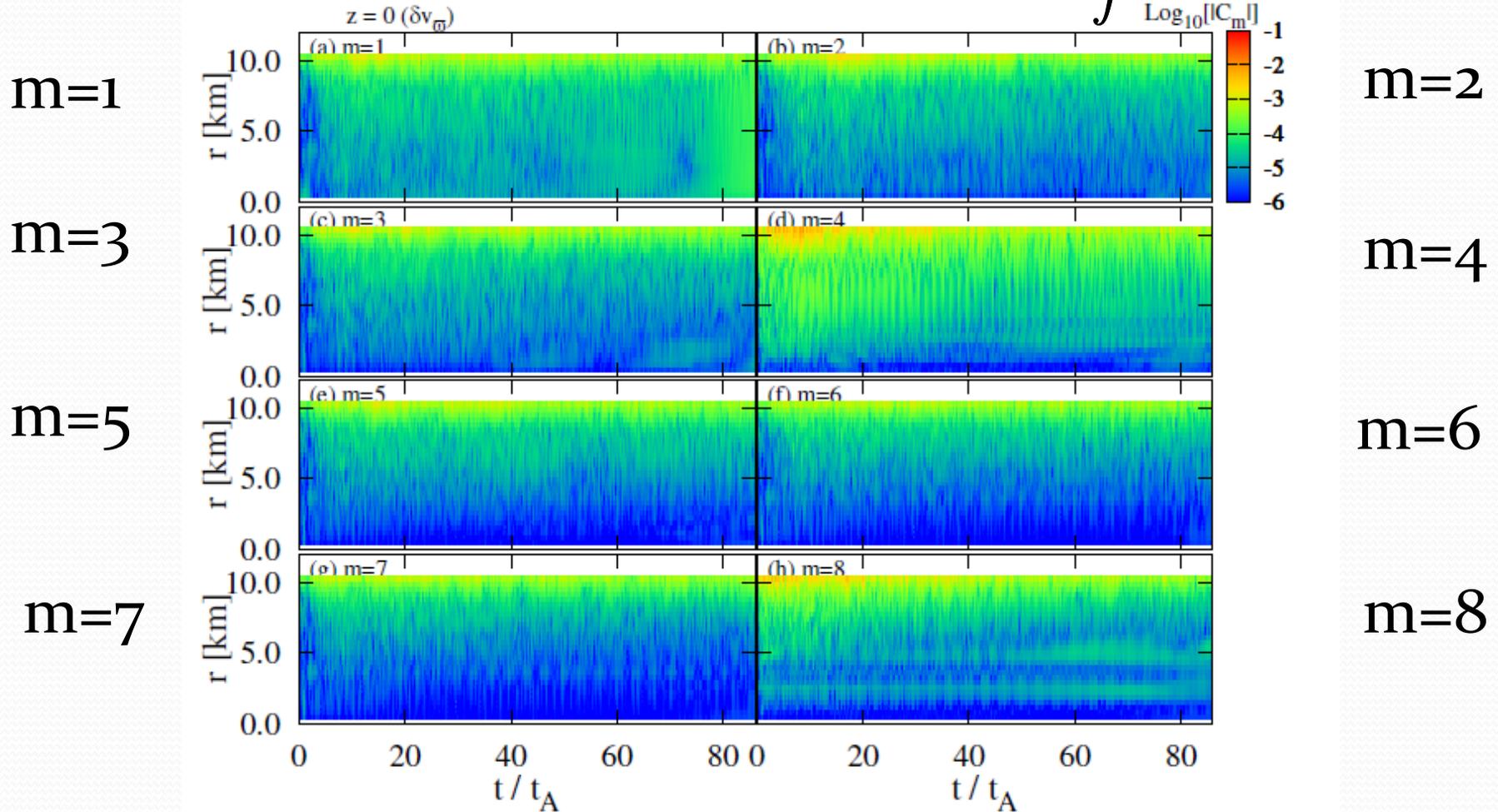
- ✓ 大局的に不安定(中心付近から不安定化)

数値計算結果(KK+12 in prep.)



Mode analysis for H1

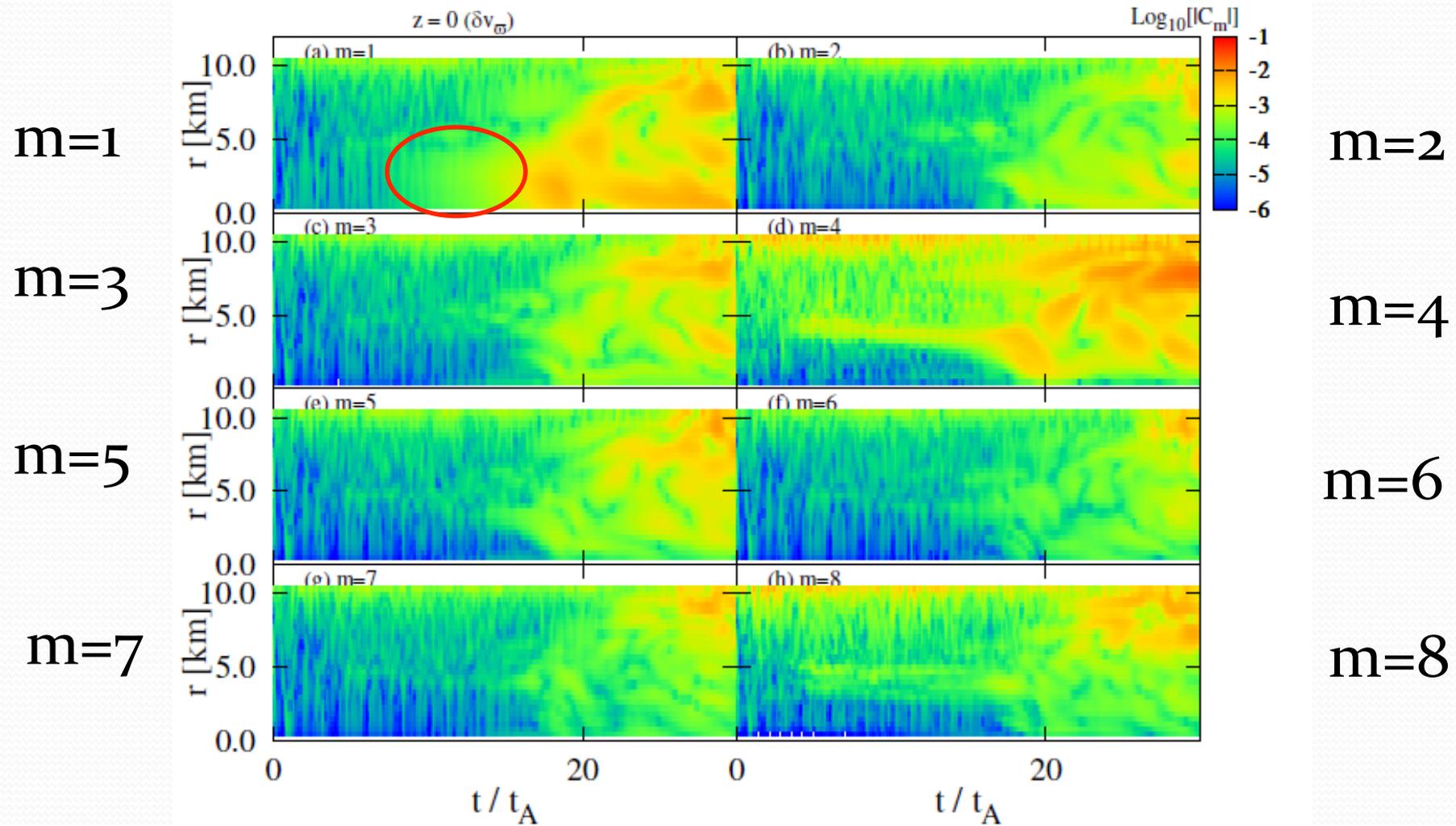
$$C_m(\omega, z_0) = \int \delta Q(\omega, z_0, \varphi) e^{im\varphi} d\varphi$$



80 t_Aの間、全モードは安定

数値計算結果(KK+12 in prep.)

Mode analysis for H₂ model



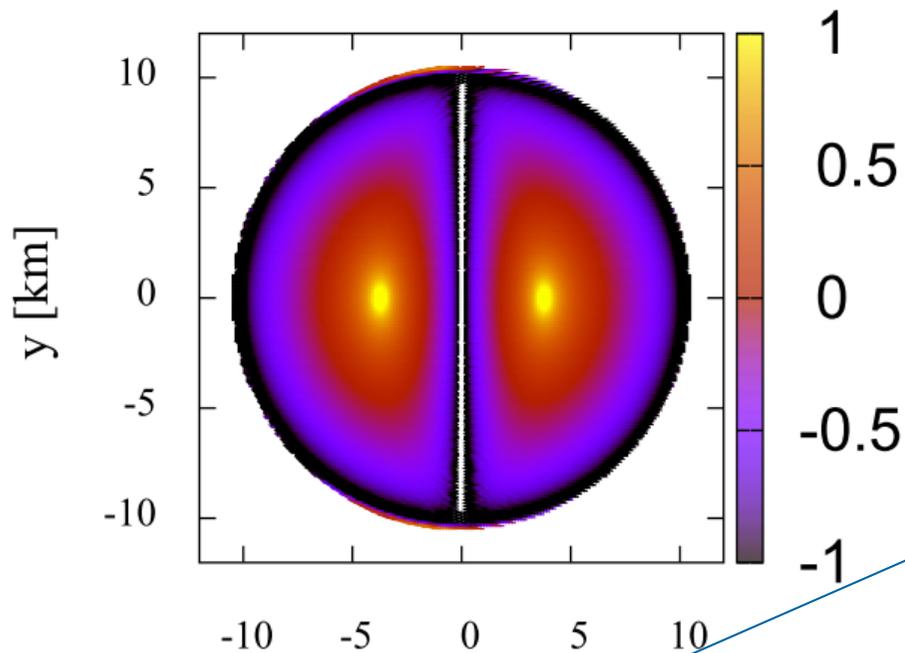
$m=1$ が磁場軸付近で不安定化 \Rightarrow kink不安定性

数値計算結果(KK+12 in prep.)

トロイダル／ポロイダル@子午面

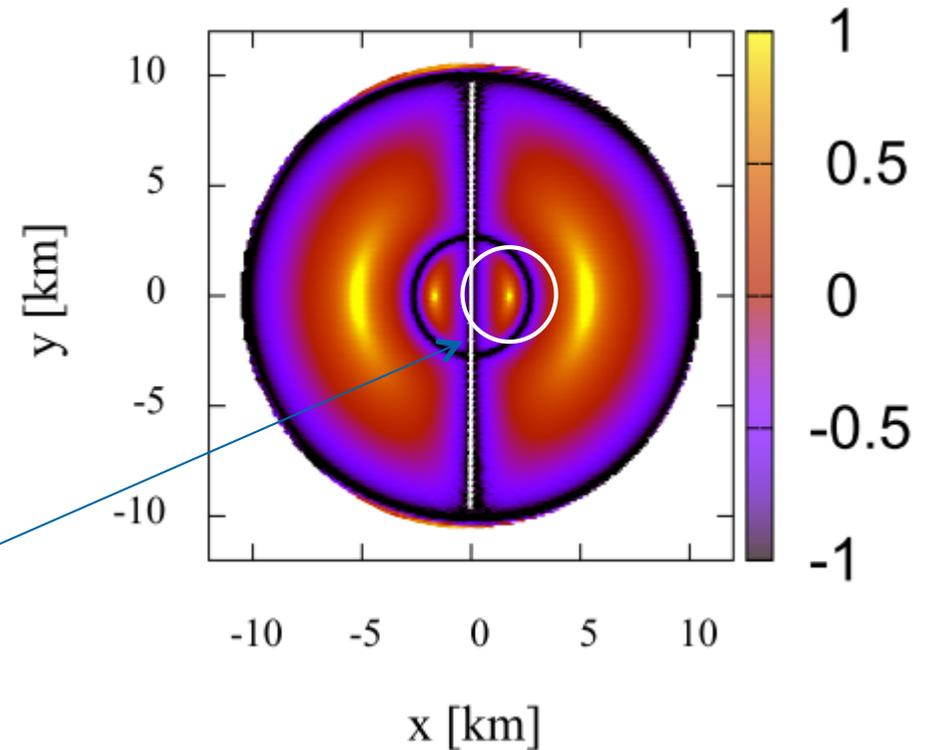
L1

$\text{Log}_{10}[|B_T / B_P|]$



L2

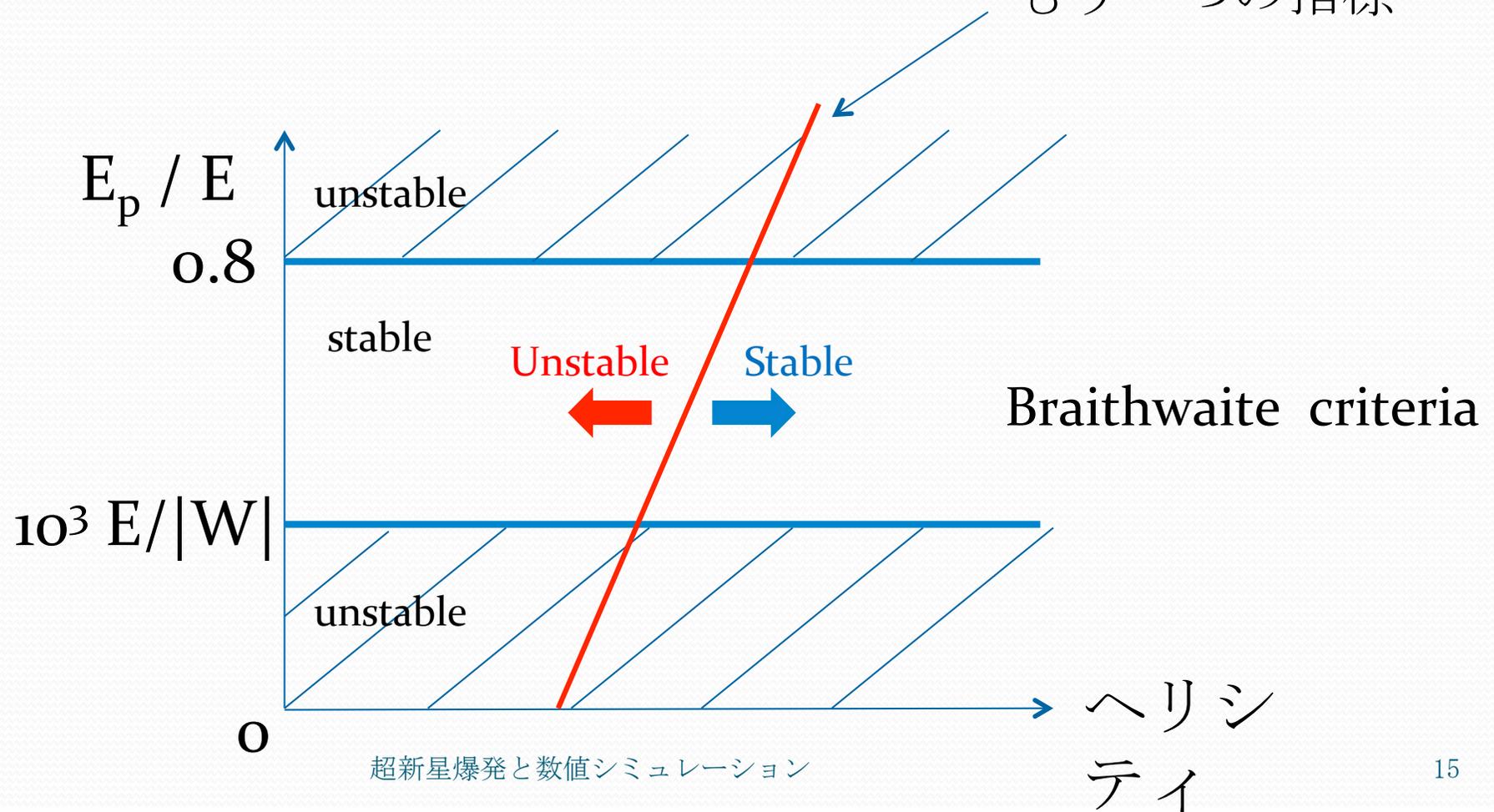
$\text{Log}_{10}[|B_T / B_P|]$



もう一つの中立点 \Rightarrow 軸付近で B_T/B_P が L1 に比べ小さい
 \Rightarrow Kink 不安定性を抑えるにはポロイダルの強さが不十分

数値計算結果(KK+12 in prep.)

- ✓ 磁気ヘリシティ → 中性子星磁場の安定性と関連
- ✓ 安定性はエネルギー比 E_p / E のみからは決まらない
もう一つの指標



まとめ

- ✓ 混合磁場の安定性
 - エネルギー比 E_p / E による安定性指標 (Braithwaite)
 - 磁気ヘリシティによる安定性指標

これから

- E_p / E vs 磁気ヘリシティ相図の完成
- 回転の効果→安定化？
- 磁力線が星の外に出る形状