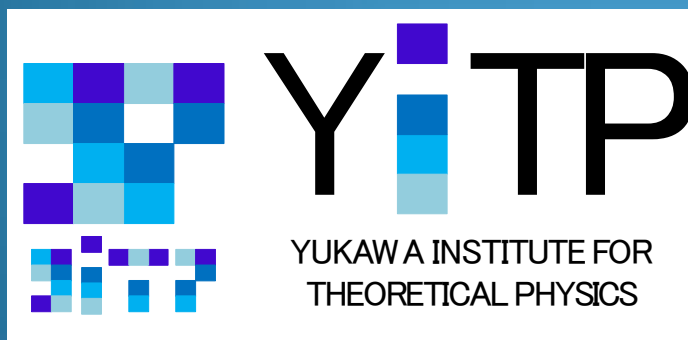


# 混合磁場を持った中性子星の安定性

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

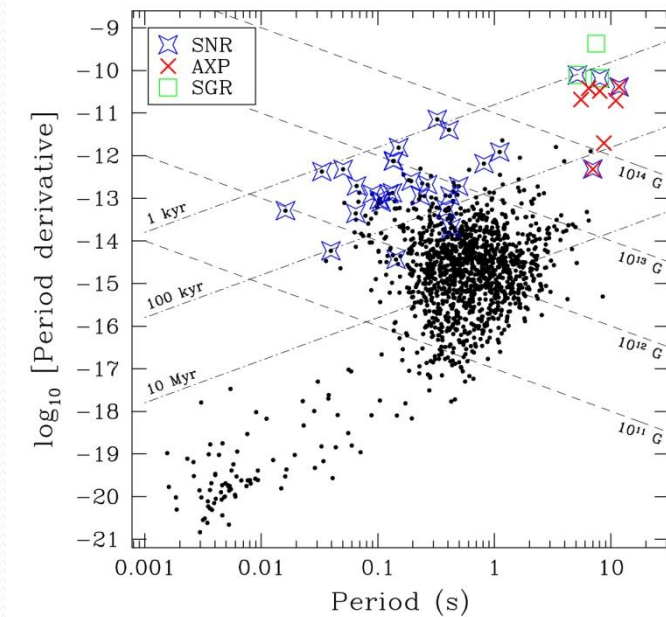
#### 2.1 ポロイダル／トロイダル磁場エネルギー比

#### 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  $t_A$

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

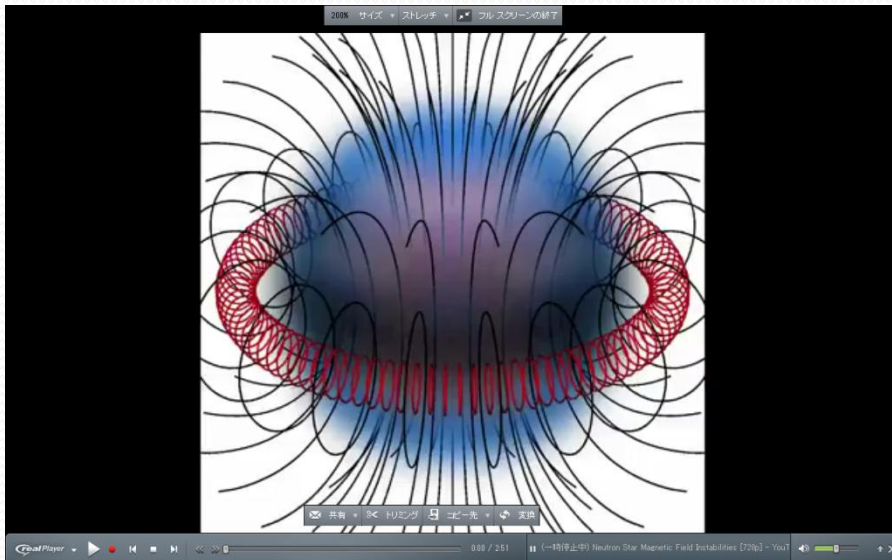
中性子星磁場はどのように安定に存在しているか？

# 純磁場の安定性

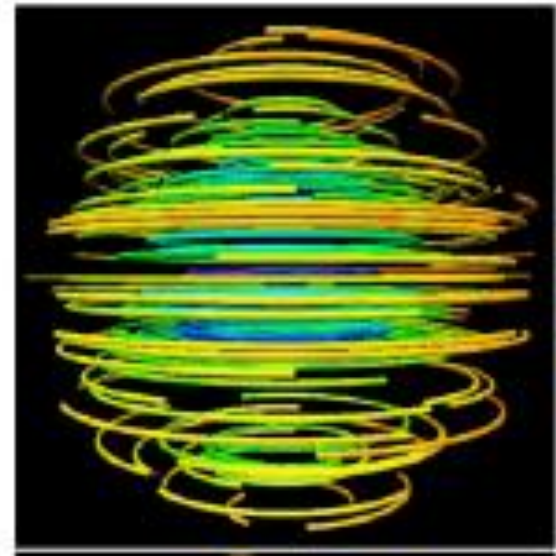
純磁場 = ポロイダル or トロイダル 成分のみ

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)



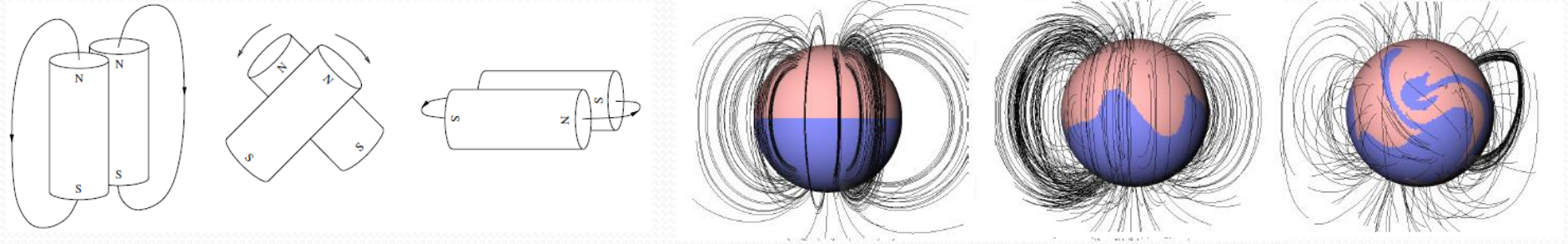
トロイダル磁場 (Duez+ 10)



# 純磁場の安定性

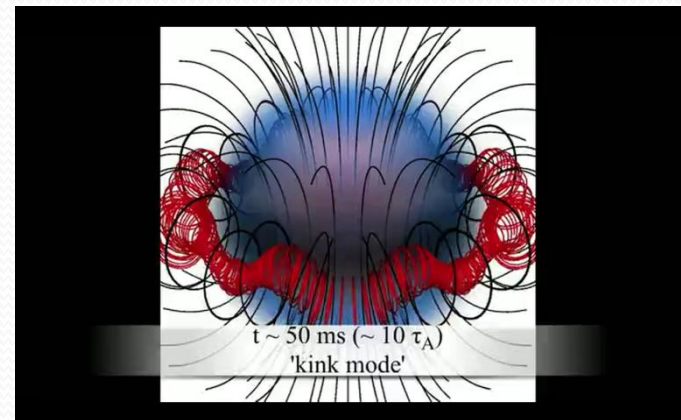
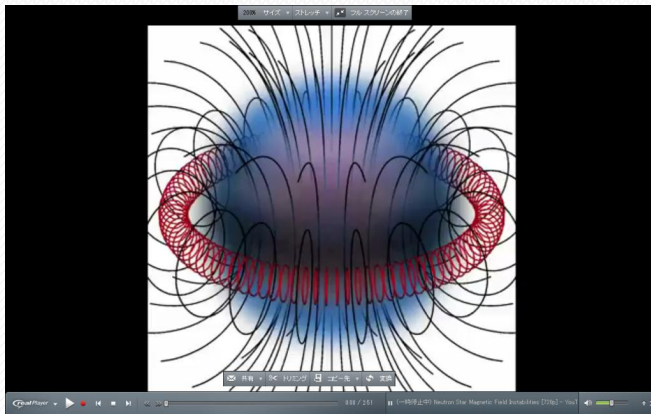
✓ポロイダル磁場： Flowers-Ruderman不安定性 (Flowers-Ruderman 77)

(Braithwaite & Spuruit 06)



✓ポロイダル磁場： ‘sausage’ and kink 不安定性 (Wright 73, Markey and

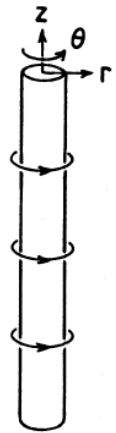
Taylor 73, Lasky+ 11, Ciolfi+ 11 )



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)



'Sausage' mode



kink mode

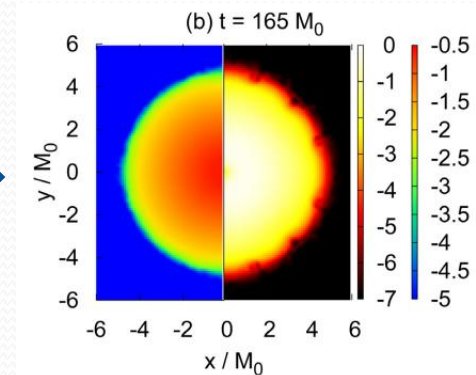
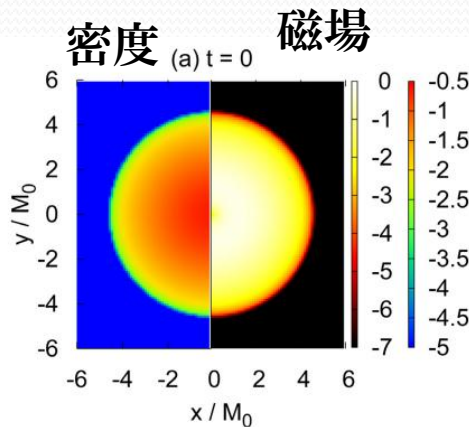
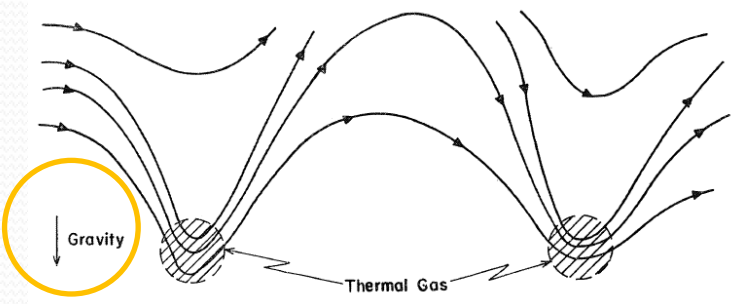


Flux tube

Current

✓ 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？

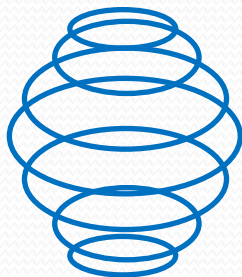
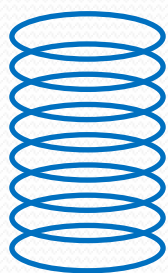
## Key ingredients

- ✓ Stratification vs Parker 不安定性  $N^2 \propto \left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_{\rho, Y_l} \left(\frac{ds}{dr}\right)_{\text{amb}} + \left(\frac{\partial P}{\partial Y_l}\right)_{\rho, s} \left(\frac{dY_l}{dr}\right)_{\text{amb}} > 0$

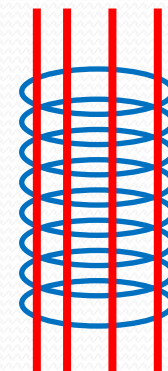
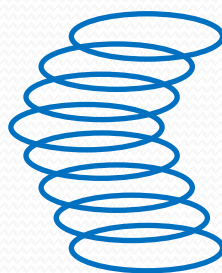
$N \sim 500$  Hz (Reisenegger & Goldreich 92) for Neutron Star

- ✓ 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



磁力線

ユーザーズミーティング

# 混合磁場の安定性

Braithwaite 09

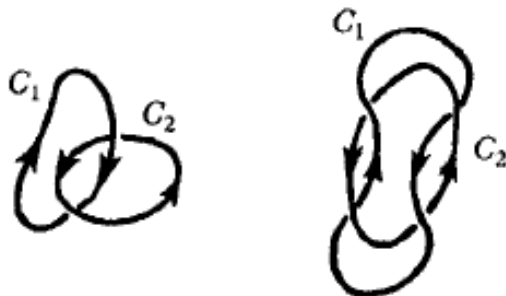
⇒ (ポロイダルエネルギー) / (全磁場エネルギー) =  $E_p / E$  の閾値

✓ 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  $E_p / E$  で異なる配位の磁場がありえる。

磁気ヘリシティ  $H = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} d^3x$ ,  $A$  : 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、 $A_\phi=0$



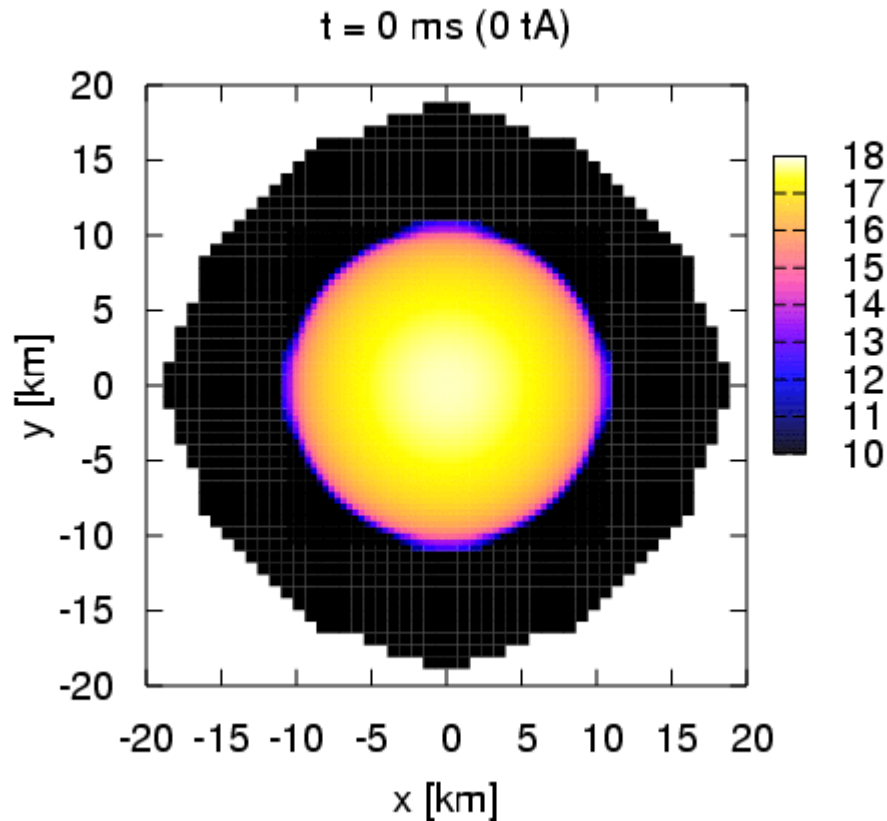
# 混合磁場の安定性 (KK<sub>+12</sub> in prep.)

## 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 :  $E_p / E \simeq 0.24 \Rightarrow$  Braithwaite criterion による  
と安定
- ヘリシティ  $H_1$ 、 $H_2 (< H_1)$  の2モデル  
H<sub>2</sub>モデルの磁場はH<sub>1</sub>より形状が複雑  $H = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} d^3x \Rightarrow H_1$ の方がより  
安定と予想
- ✓ 3D GRMHD simulation

# 数値計算結果(KK+12 in prep.)

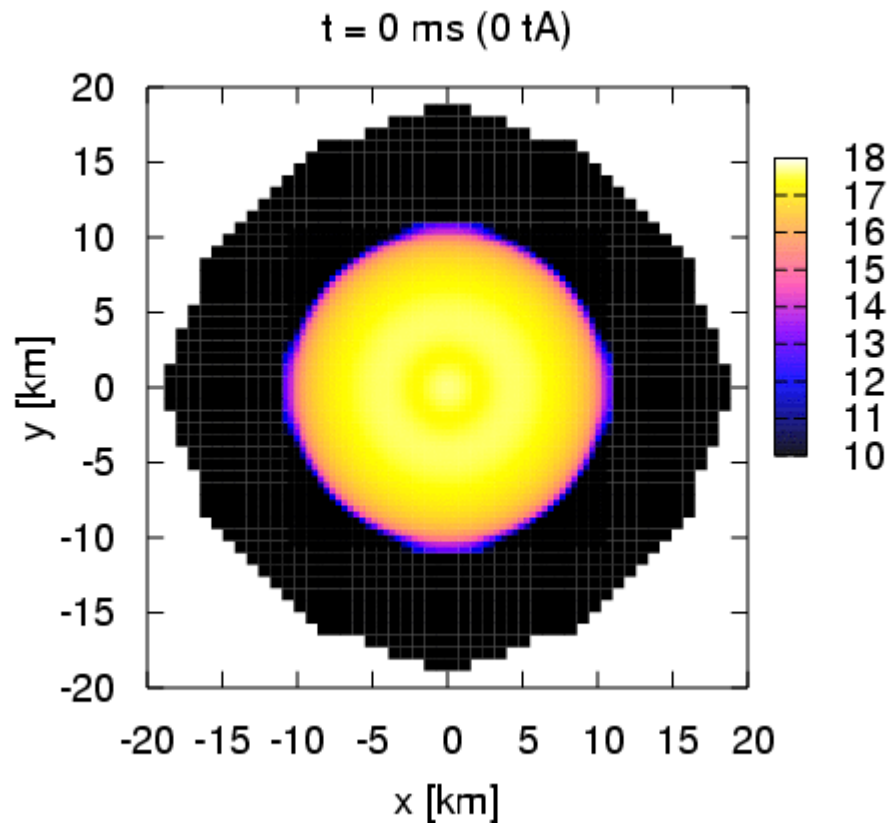
H1 model :  $|B|$  on the equatorial plane



- ✓ 表面を除いて大局的に安定 (重力に垂直方向の磁気浮力)

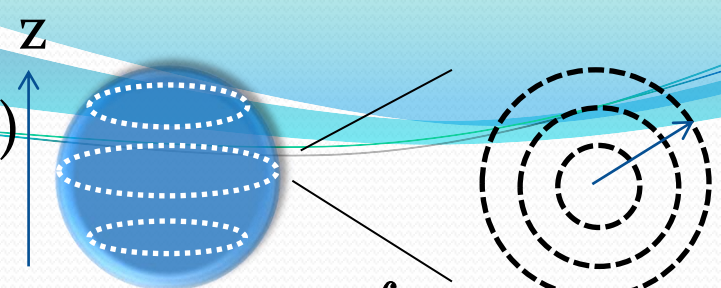
# 数値計算結果(KK+12 in prep.)

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

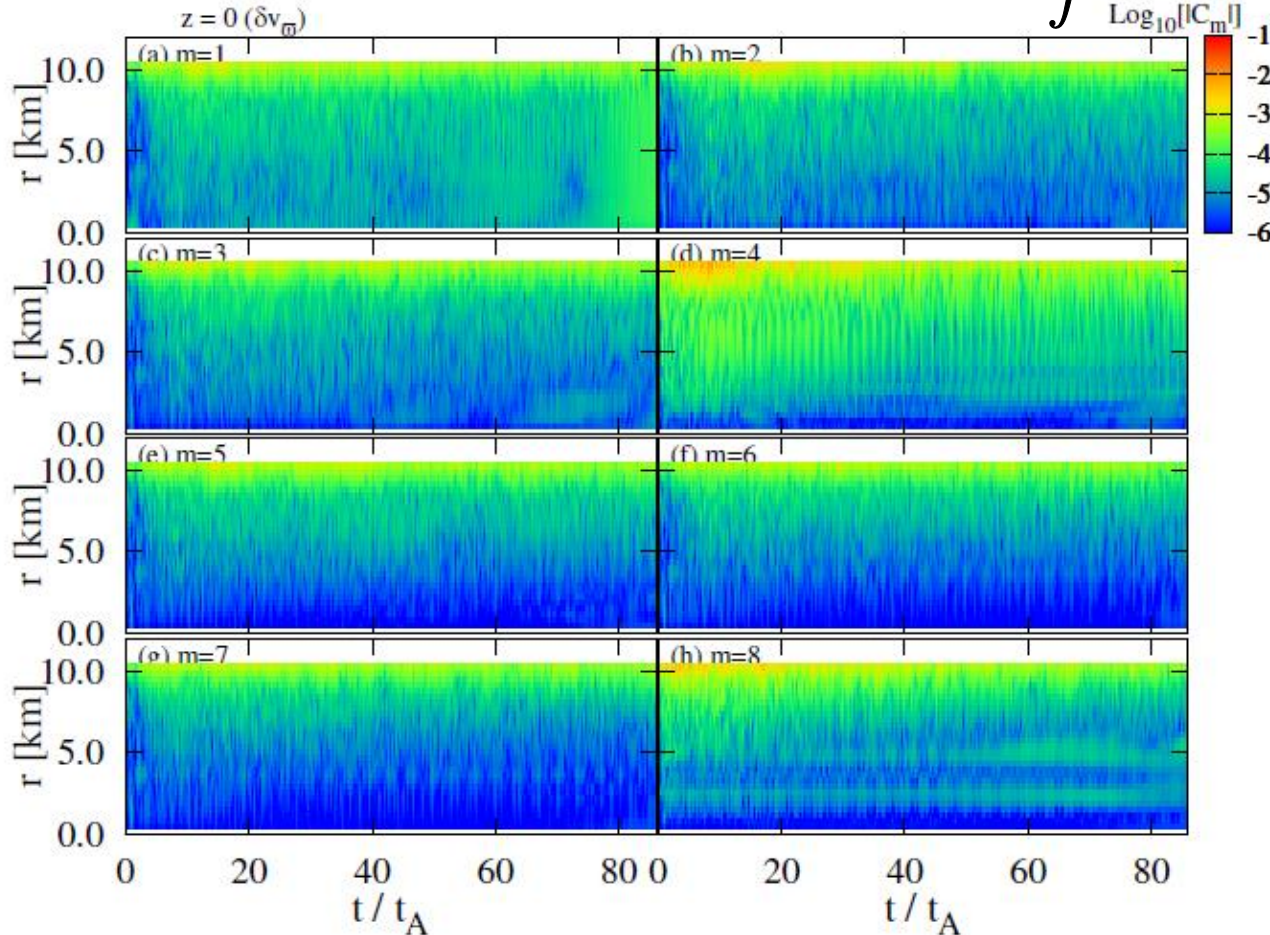
$$C_m(\omega, z_0) = \int \delta Q(\omega, z_0, \varphi) e^{im\varphi} d\varphi$$

m=1

m=3

m=5

m=7



m=2

m=4

m=6

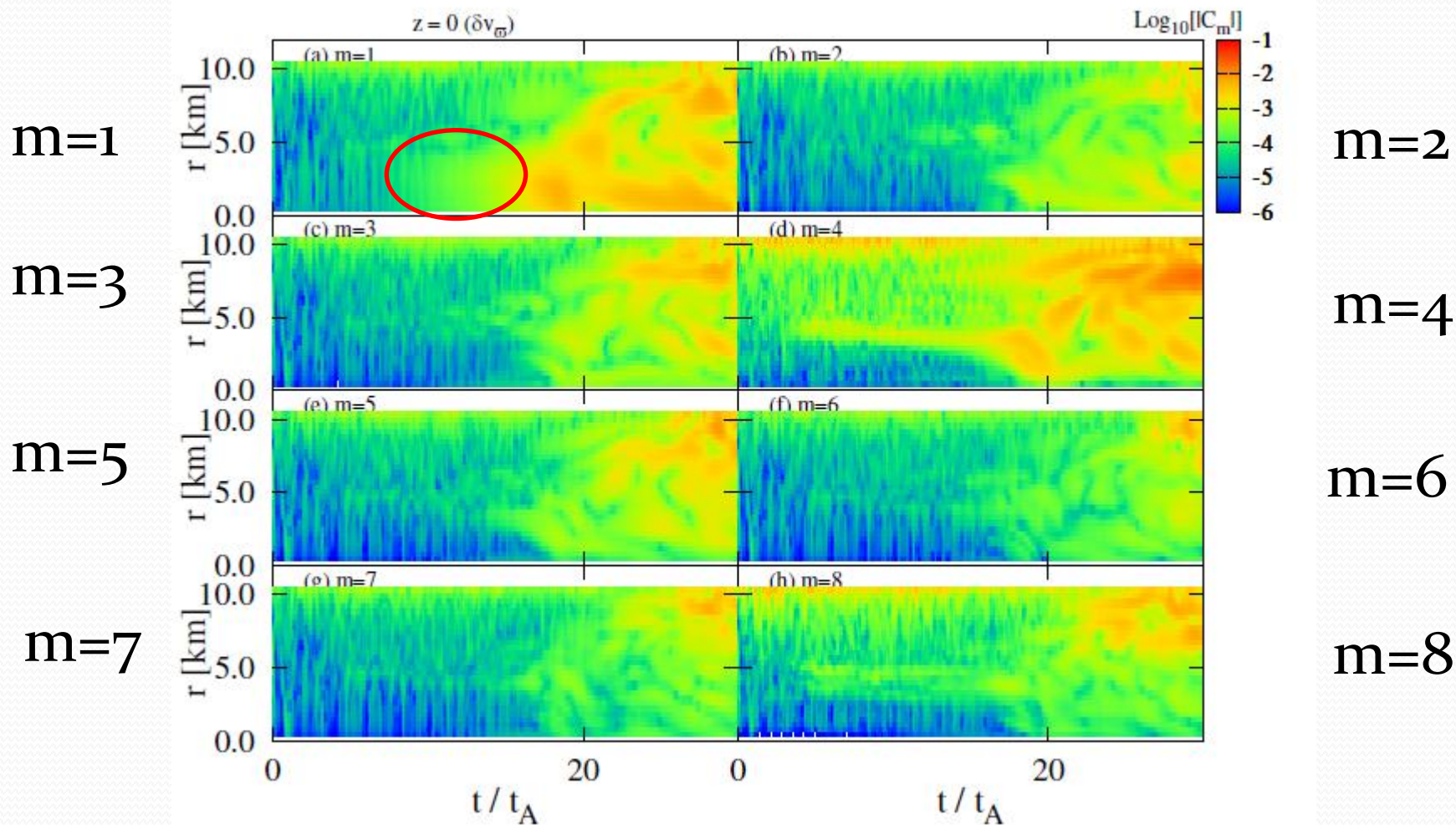
m=8

80 t<sub>A</sub>の間、全モードは安定

ユーザーズ・メーリング

# 数値計算結果(KK+12 in prep.)

## Mode analysis for H<sub>2</sub> model



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

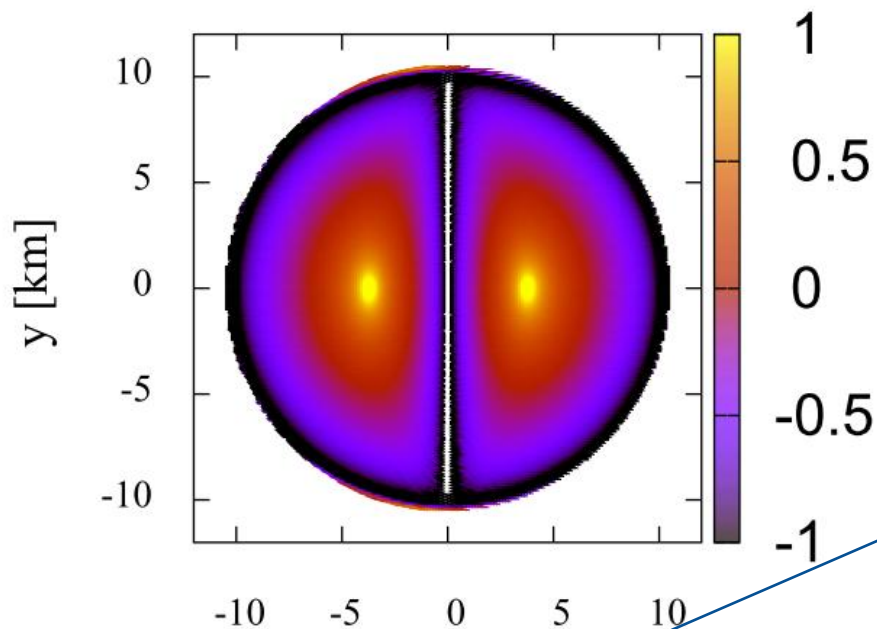
ユーザーズミーティング

# 数値計算結果(KK+12 in prep.)

トロイダル／ポロイダル@子午面

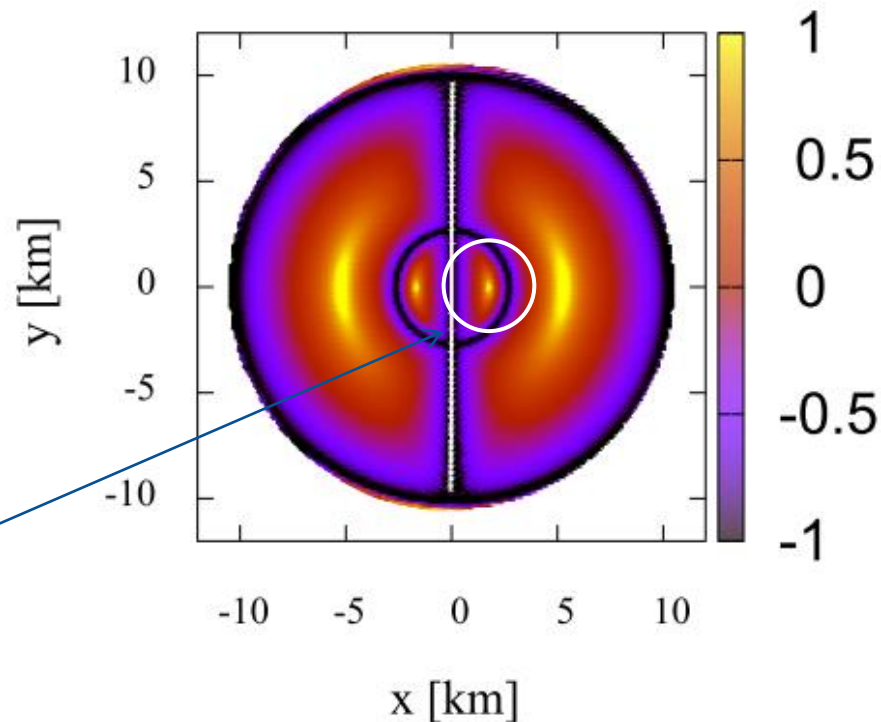
H<sub>1</sub>

Log<sub>10</sub>[|B<sub>T</sub> / B<sub>P</sub>|]



H<sub>2</sub>

Log<sub>10</sub>[|B<sub>T</sub> / B<sub>P</sub>|]



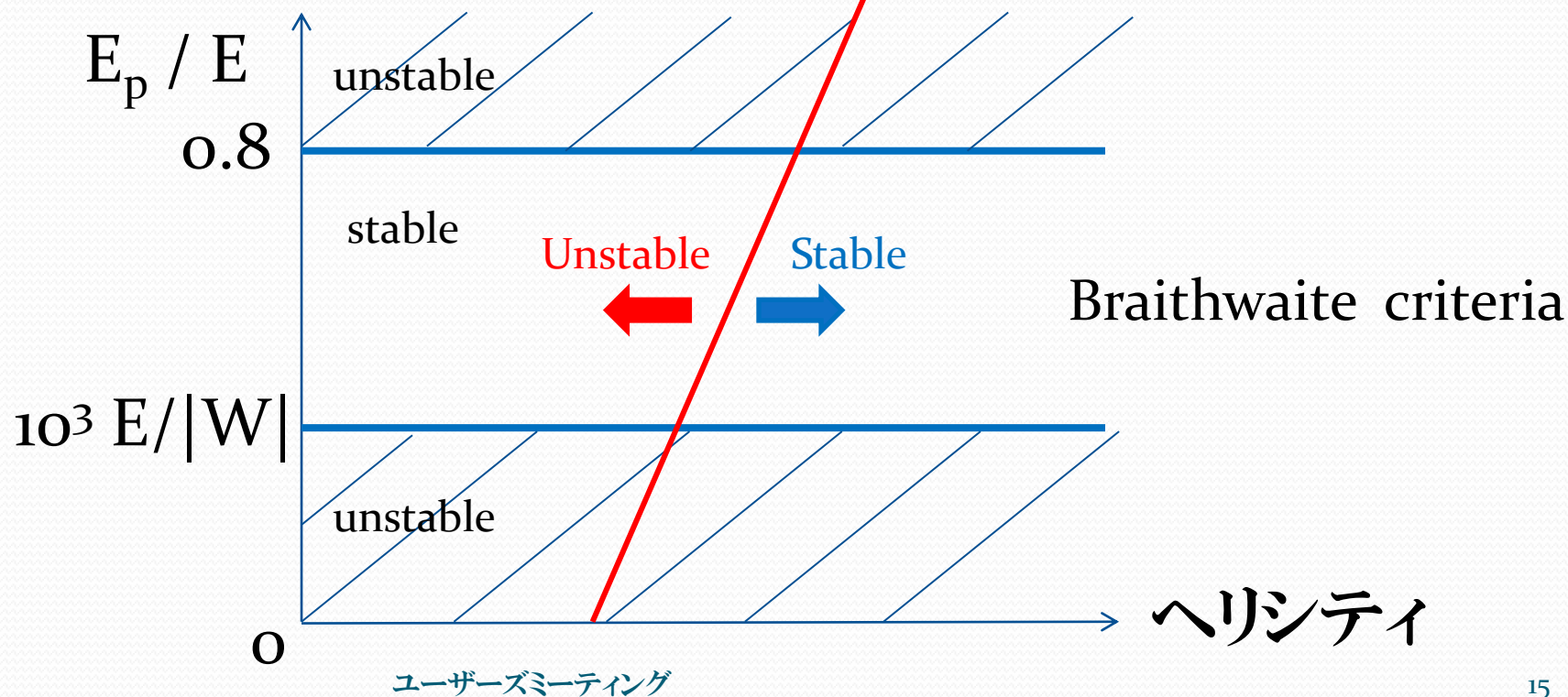
もう一つの中立点  $\Rightarrow$  軸付近で  $B_T/B_P$  が H<sub>1</sub> に比べ小さい  $\Rightarrow$   
Kink不安定性を抑えるにはポロイダルの強さが不十分

# 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に関連

✓ 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