

中性子星の内部磁場構造研究と 磁場進化研究のこれまでとこれから

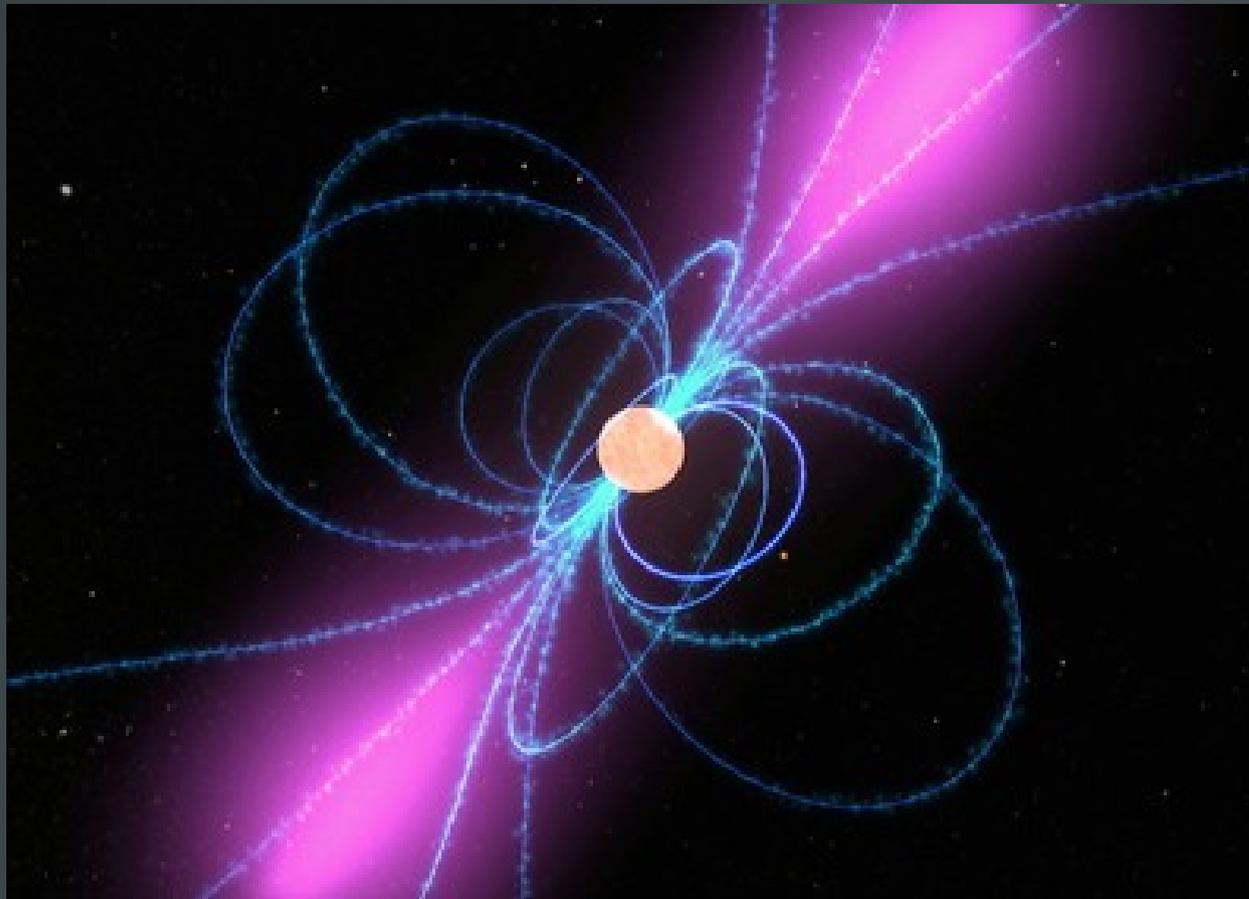
藤澤幸太郎
東京大学駒場

和田智秀(国立天文台)
木坂将大(東大宇宙線研)
加藤祐悟(広島大学理)

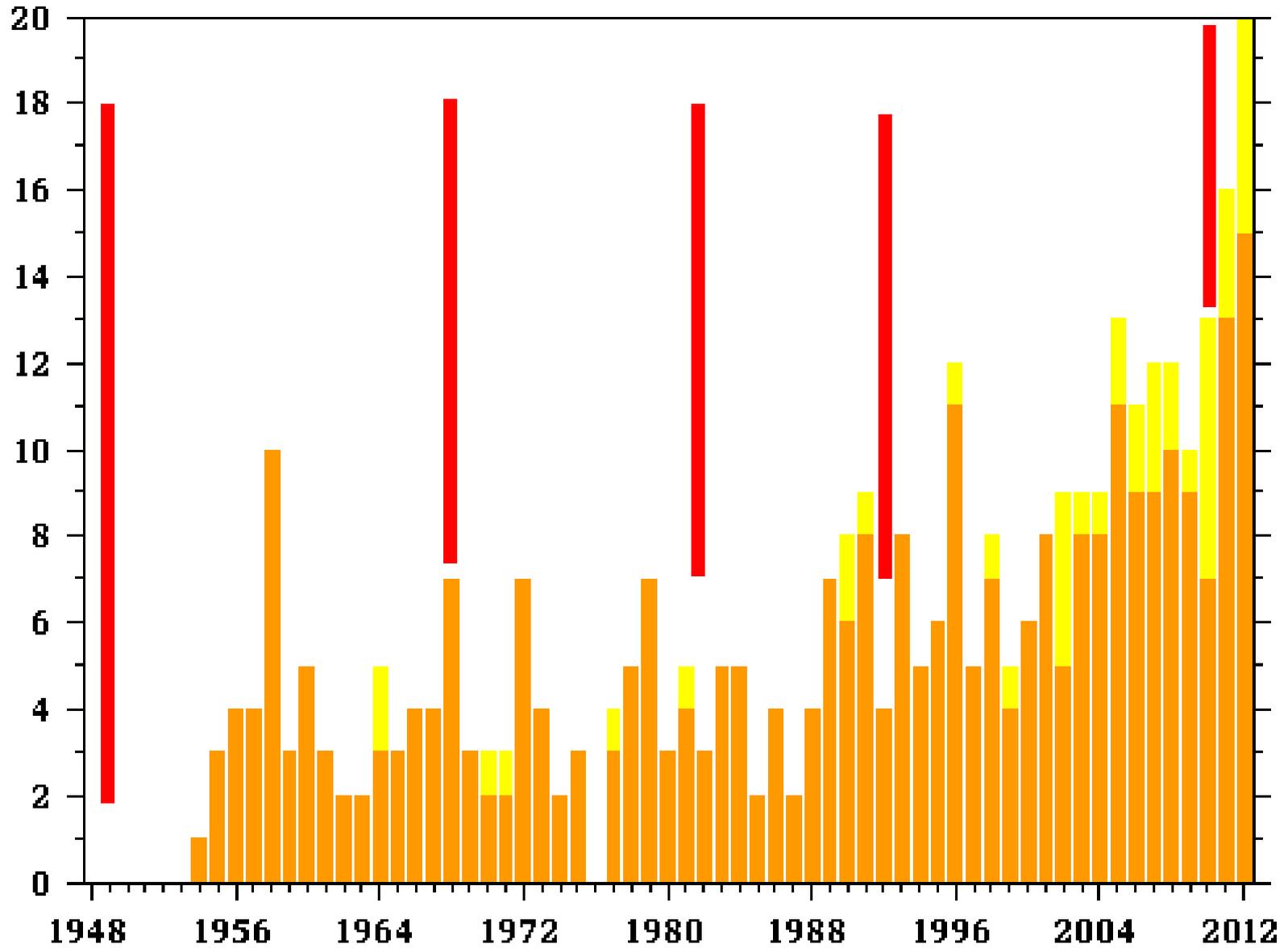


中性子星の磁場構造と進化

大局的には双極子磁場である



Citations/Publication Year for 1953ApJ...118..116C



(Chandrasekhar & Fermi 1953)



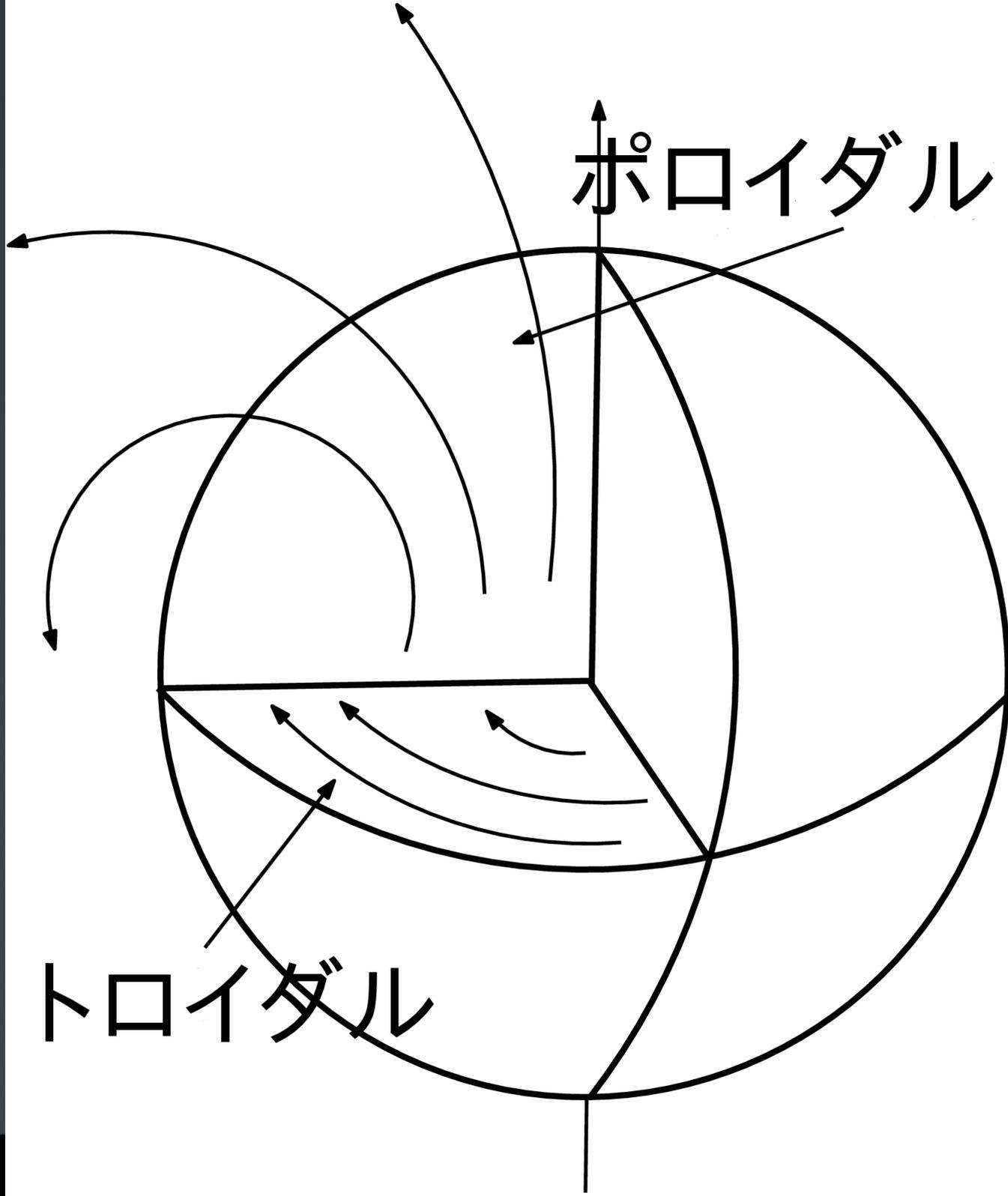
今、マグネターの磁場が熱い!

Kouveliotou, Duncan & Thompson (2003)

Scientific America の表紙

ポロイダル

トロイダル



磁場星の発見と初期の研究

1947年

- Babcock (1949): 太陽以外の星で磁場を発見



Chandrasekhar らによる初期の研究

- Chandrasekhar & Fermi (1953)
- Ferraro (1954)
- Chandrasekhar (1956)
- Deutsch (1955): 傾いて回転する磁場星の放射



最大の磁場の強さ

(Chandrasekhar & Fermi 1953)

- virial 定理と星のエネルギーが負という条件から,

$$M/|W| < 1$$

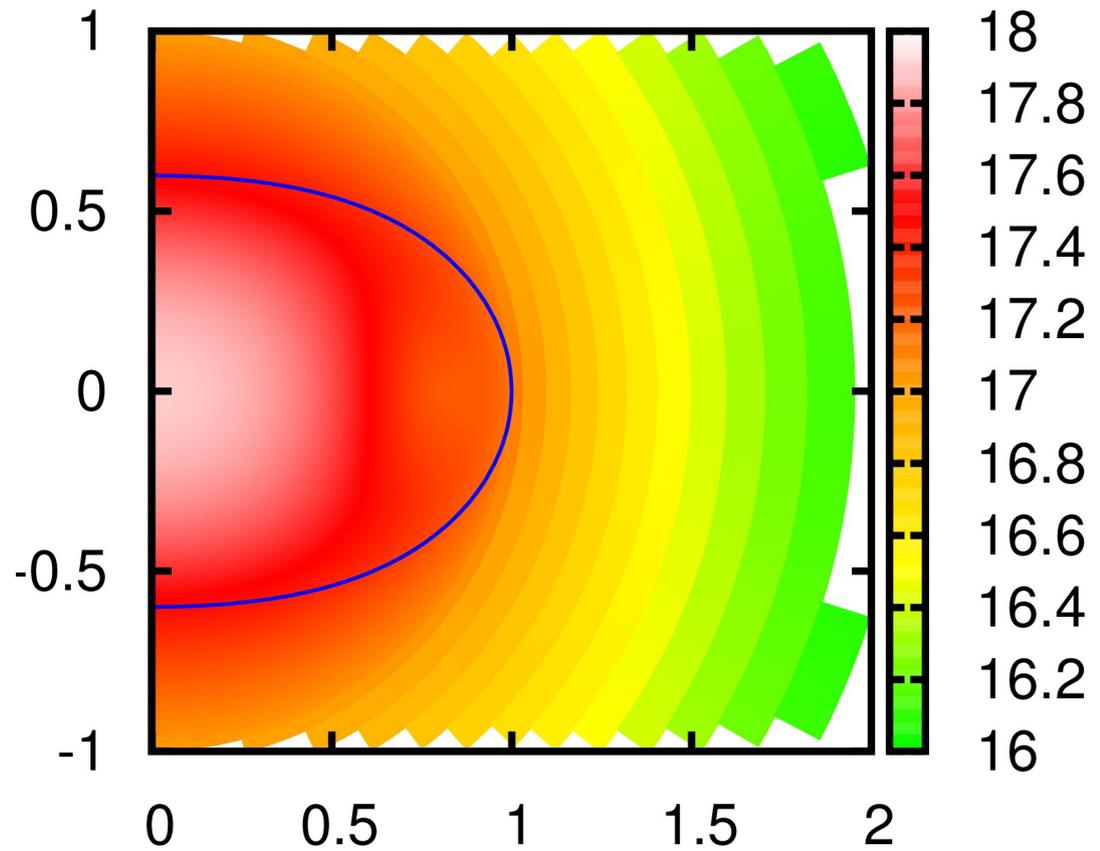
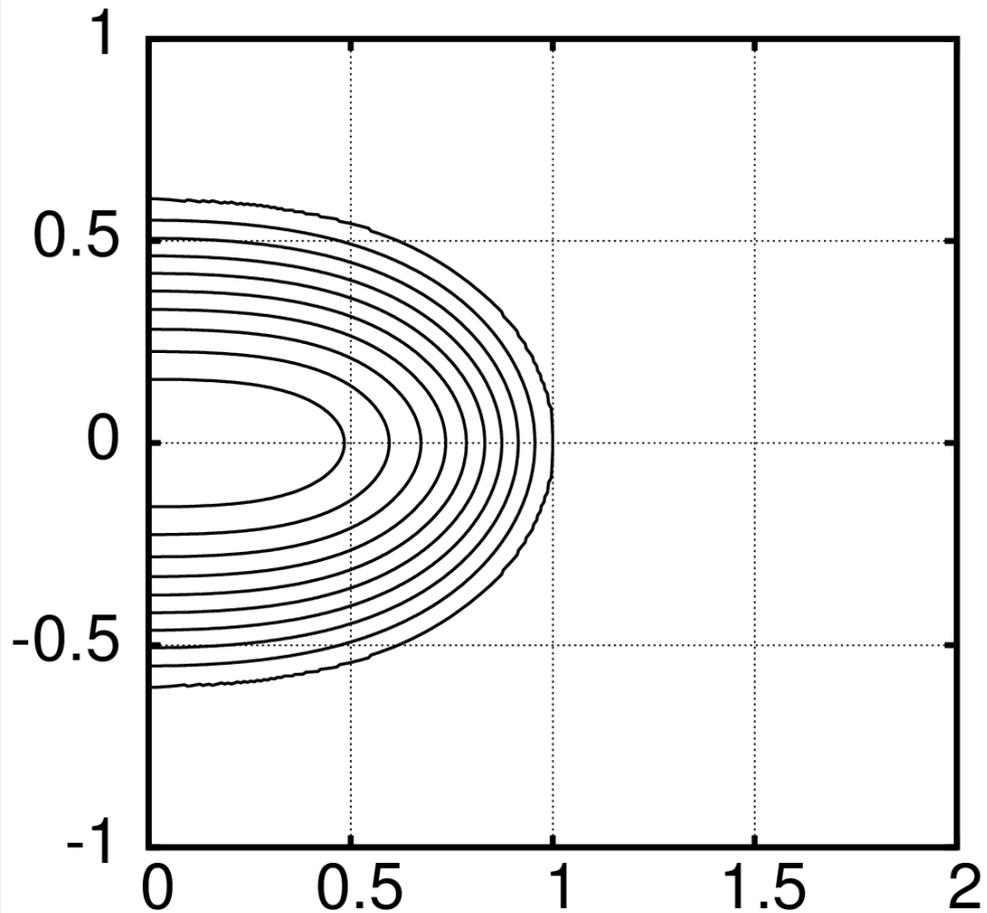
$$M/|W| \sim (B_s^2 R^3 / 8\pi) \times (GM^2 / R)^{-1}$$

$$1 \sim \left(\frac{B_s}{10^{18} \text{G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10^6 \text{cm}} \right)^4 \left(\frac{M}{1.4 M_\odot} \right)^{-2}$$



M/WI ~ 0.14 の定常解

$\log_{10} |B|$ (G)



cf. Tomimura & Eriguchi (2005)

磁場の定常的な構造の計算

(Ferraro 1954; Chandrasekhar 1956 など)

- 電気伝導度無限、定常軸対称を仮定

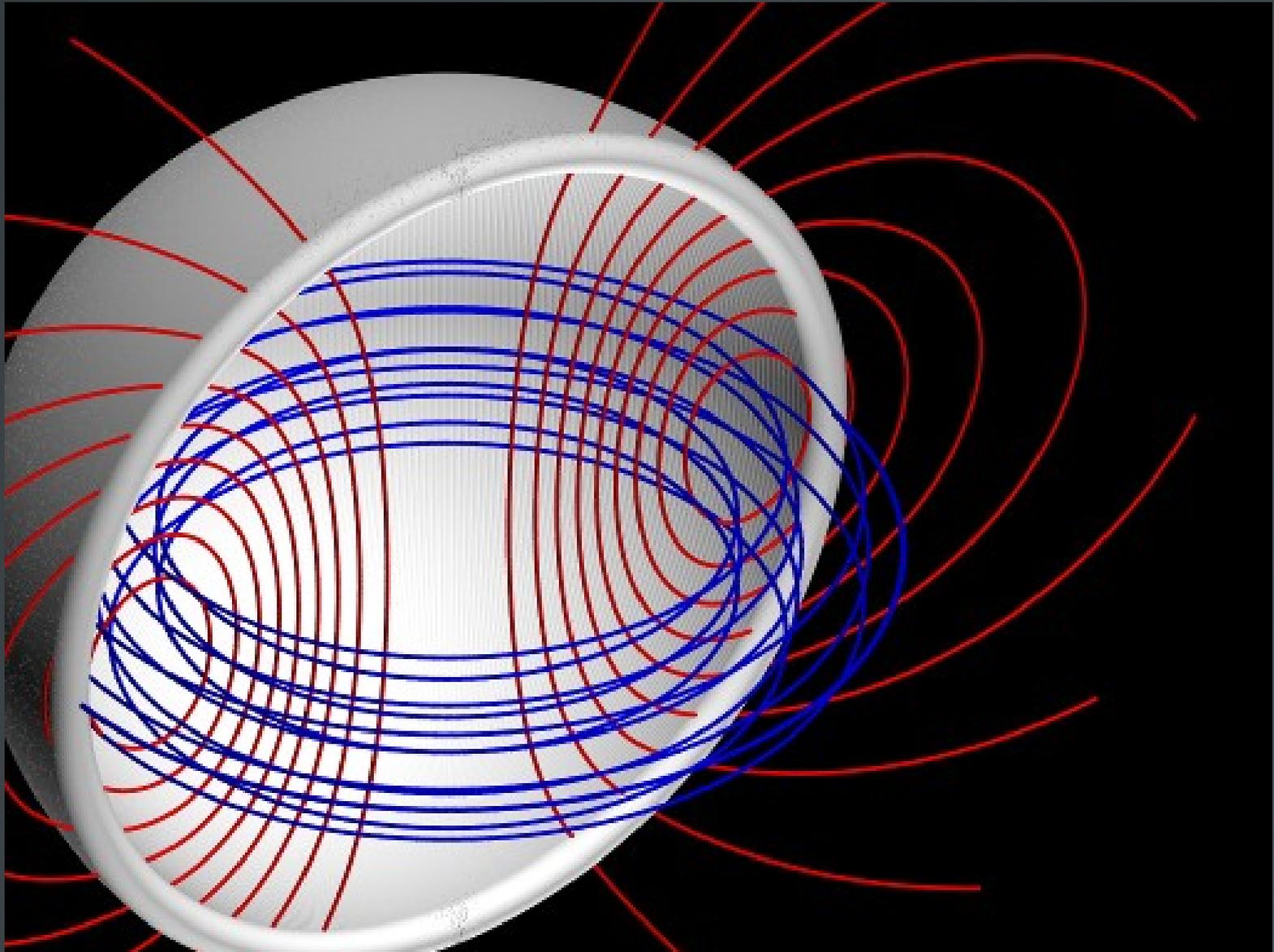
$$\nabla \times \vec{B} = 4\pi \vec{j} / c \quad \nabla \times \vec{A} = \vec{B}$$

$$\Delta A_\varphi - \frac{A_\varphi}{R^2} = -\frac{4\pi}{c} j_\varphi$$

- この楕円型方程式(GS方程式)を解く
(cf Grad & Rubini 1958; Shafranov 1966)



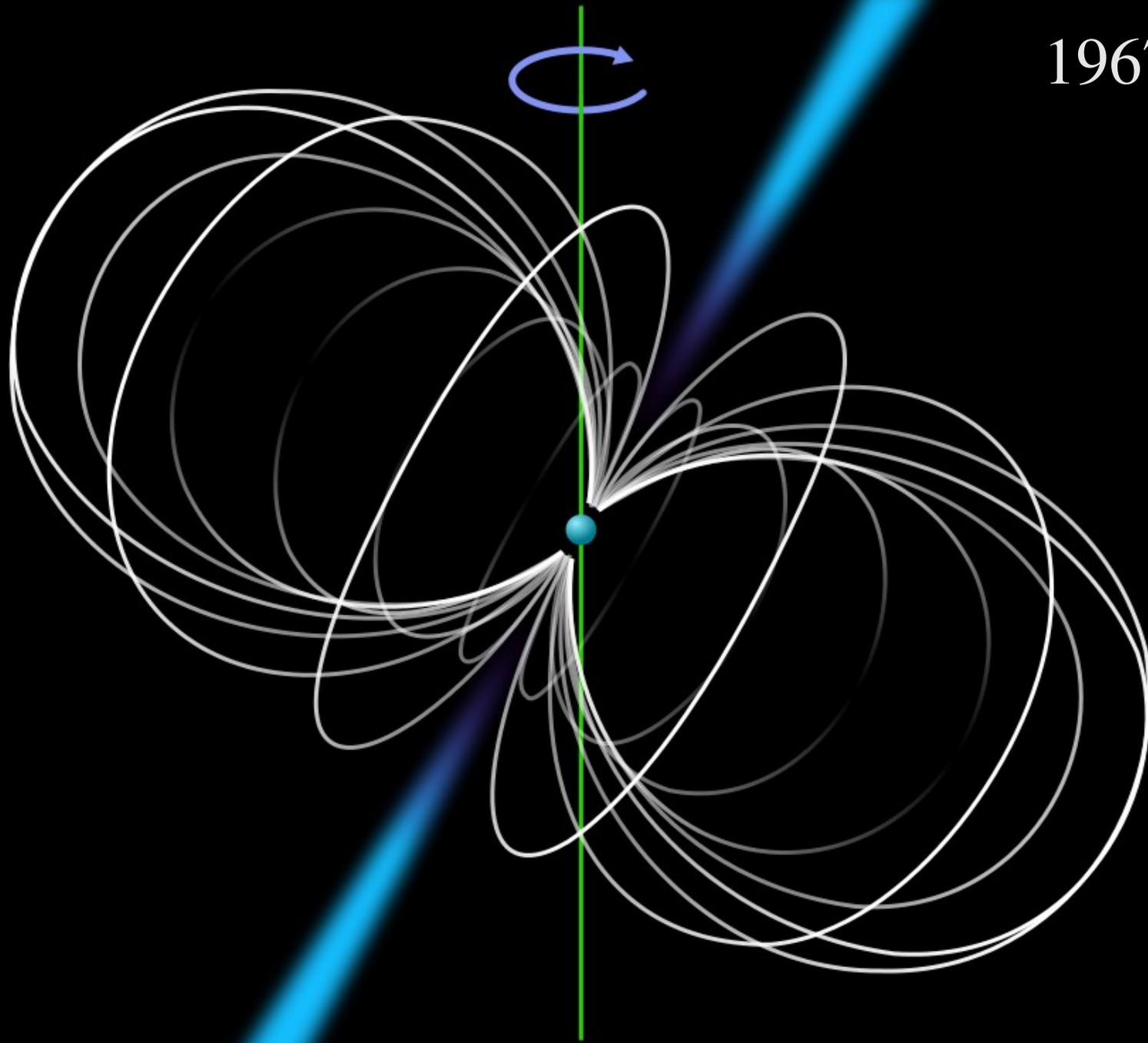
計算例



cf. Fujisawa et al.(2012)

パルサーの発見

1967年



パルサーの発見

1967年

- 高速回転する天体の発見

中性子星の磁場に関する研究

- Baym et al. (1969) : 超流動、超電導など
- Goldreich & Jullian (1969) : 磁気圏



中性子星の内部

Baym et al. (1969a) Baym et al. (1969b)

- コア部の電気伝導度が非常に高い

$$\sigma \sim 1.5 \times 10^{29} \text{ s}^{-1} \quad (T = 10^8 \text{ K}, \rho = 10^{13} \text{ g cm}^{-3})$$

- Ohm散逸のタイムスケールは宇宙年齢

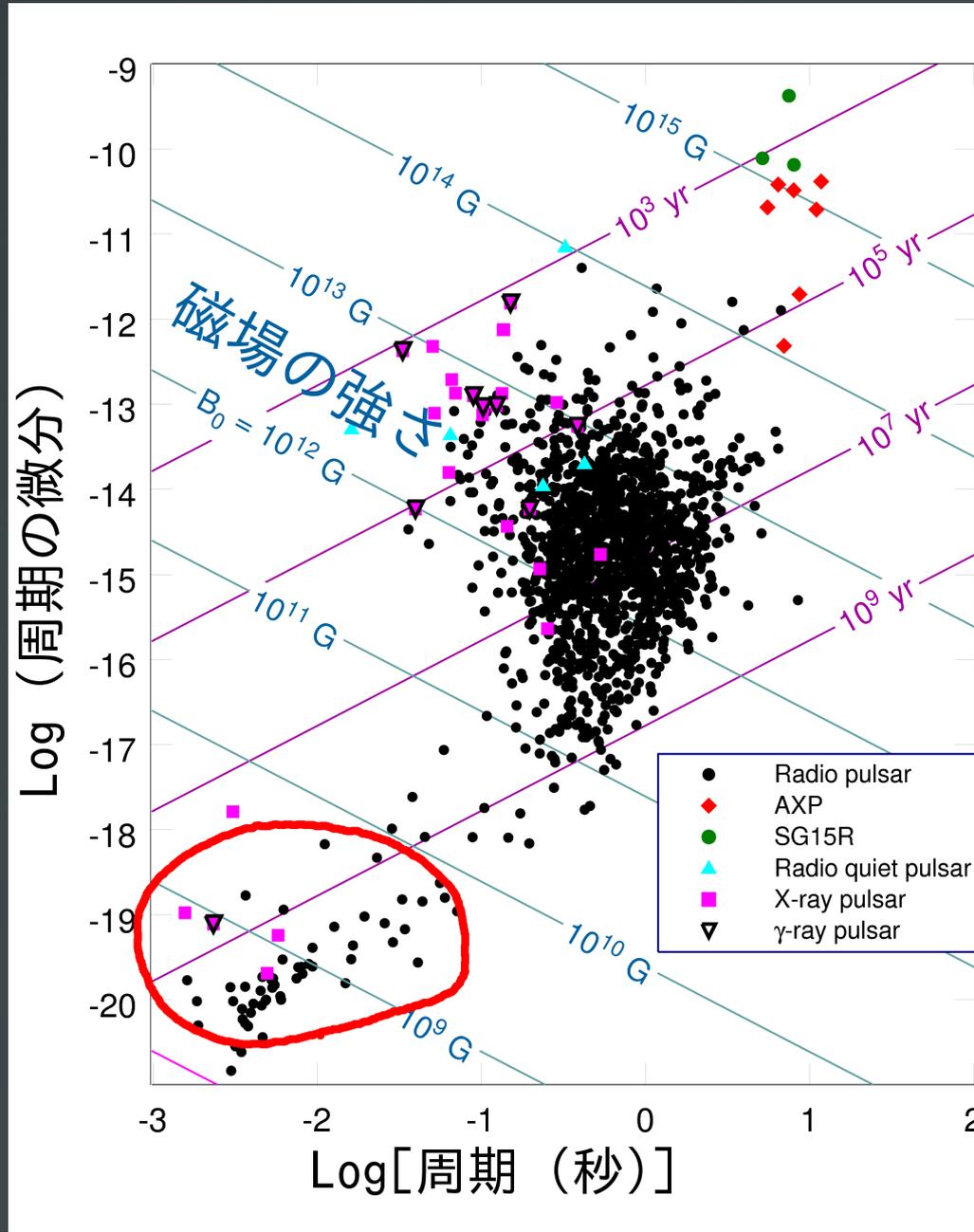
$$t_d \sim \frac{4\pi\sigma L^2}{c^2} \sim 10^{13} \text{ yr}$$

- マイスナー効果のタイムスケールも長い

$$t_m = t_d \left(\frac{B}{H_c} \right)^2 \sim 10^7 \text{ yr} \quad H_c \sim 10^{15} \text{ G}$$

ミリ秒パルサーの発見

1982年



磁場の進化

Jones (1988), Goldreich & Reiceneegger (1992)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \vec{E}$$

$$\nabla \mu_p = -m_p \nabla \Psi + e \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}_p}{c} \times \vec{B} \right) - \frac{m_p \vec{v}_p}{\tau_{pn}} - \frac{m_p (\vec{v}_p - \vec{v}_e)}{\tau_{pe}}$$

$$\nabla \mu_e = -e \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}_e}{c} \times \vec{B} \right) - \frac{m_e \vec{v}_e}{\tau_{en}} - \frac{m_e (\vec{v}_e - \vec{v}_p)}{\tau_{ep}}$$

$$\nabla \mu_n = -m_n \nabla \Psi$$



磁場の進化

Jones (1988), Goldreich & Reiceneegger (1992)

$$\begin{aligned}\vec{E} = & \frac{\dot{j}}{\sigma} - \frac{\left(\frac{\vec{j} \times \vec{B}}{n_c c} - \nabla(\Delta\mu) \right)}{c \left(m_p / \tau_{pn} + m_e / \tau_{en} \right)} \times \vec{B} \\ & + \left(\frac{m_p / \tau_{pn} - m_e / \tau_{en}}{m_p / \tau_{pn} + m_e / \tau_{en}} \right) \frac{\vec{j} \times \vec{B}}{n_c e c} \\ & + \frac{(\tau_{pn} / m_p) \nabla \mu_p - (\tau_{en} / m_e) \nabla \mu_e}{e(m_p / \tau_{pn} + m_e / \tau_{en})}\end{aligned}$$

$$\Delta\mu \equiv \mu_p + \mu_e - \mu_n$$



磁場の進化の3要素

Jones (1988), Goldreich & Reicenegger (1992)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \overset{\text{Ohmic decay}}{-c \nabla \times \left(\frac{\vec{j}}{\sigma_0} \right)} + \overset{\text{Ambipolar diffusion}}{\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})}$$

$$- \overset{\text{Hall drift}}{\left(\frac{m_p / \tau_{pn} - m_e / \tau_{en}}{m_p / \tau_{pn} + m_e / \tau_{en}} \right) \nabla \times \left(\frac{\vec{j} \times \vec{B}}{n_e e} \right)}$$

Ohmic decay

$$t_{\text{ohm.}} \sim \frac{4\pi\sigma_0 L^2}{c^2}$$

$$\sigma_0 = 4.2 \times 10^{28} \left(\frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^{-2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\sim 2 \times 10^{11} \left(\frac{L}{10^5 \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^{-2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^3 \text{ yr}$$

$$\rho_0 = 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

- 局所的な磁場、もしくは温度が高くなる必要がある

Ambipolar diffusion

$$t_{\text{amb.}}^{\text{s}} \sim 3.0 \times 10^9 \left(\frac{B}{10^{12} \text{G}} \right)^{-2} \left(\frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^2 \left(\frac{L}{10^5 \text{cm}} \right)^2 \text{yr}$$
$$\sim 3.0 \times 10^3 \left(\frac{B}{10^{15} \text{G}} \right)^{-2} \left(\frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^2 \left(\frac{L}{10^5 \text{cm}} \right)^2 \text{yr}$$

- コアで効く.
- 磁場が強くないと効かない.
- 超流動が存在していると抑制される (10^{26} yr !)

Glampedakis et al. (2011)



Hall drift

$$\tau_{pn} \rightarrow 0, \quad \tau_{en} \rightarrow \infty$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{c}{4\pi n_c e} \nabla \times [(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}] + \frac{c^2}{4\pi\sigma_0} \Delta \vec{B}$$

$$t_{\text{hall}} \sim 5 \times 10^8 \left(\frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right)^{-1} \left(\frac{L}{10^5 \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \text{ yr}$$

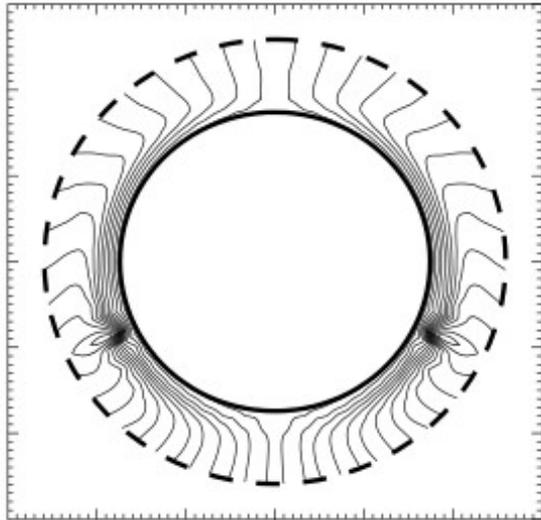
- 直接散逸には関わらない.
- 磁場を移流して散逸を促進.
(Naito & Kojima 1994)
- コアよりもクラストでよく効く.



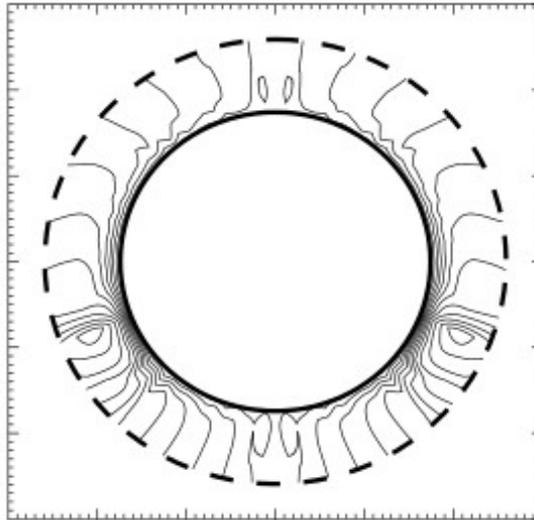
Hall効果の入った計算1

Pons & Geppert (2007)

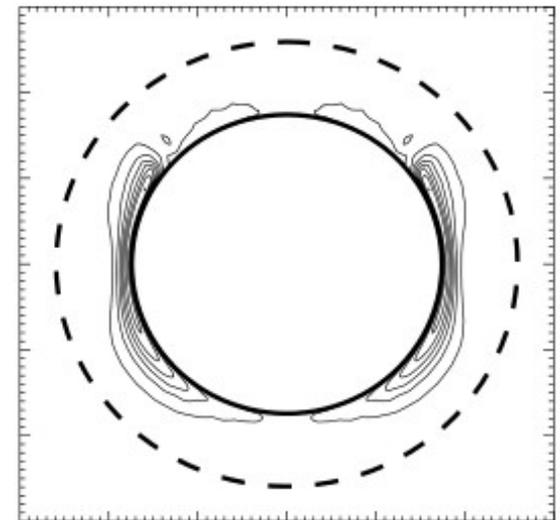
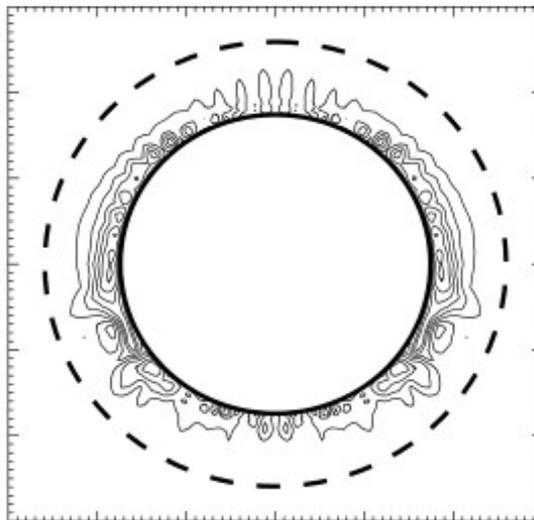
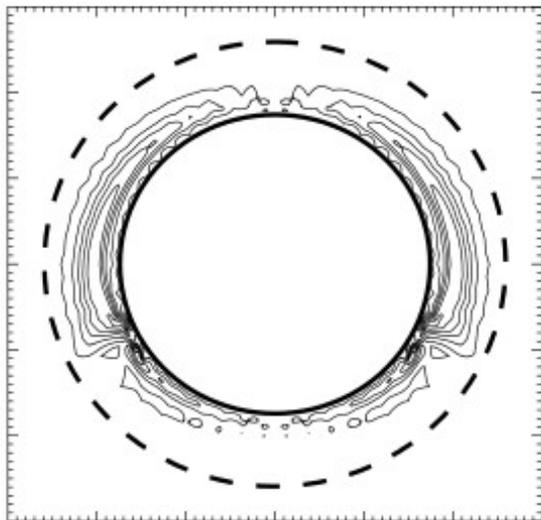
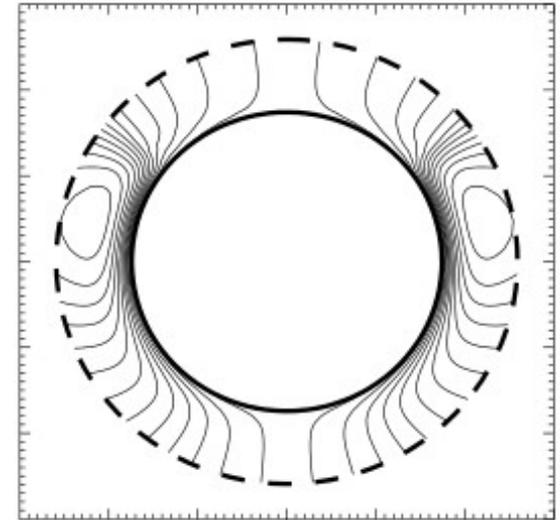
10 kyr



50 kyr

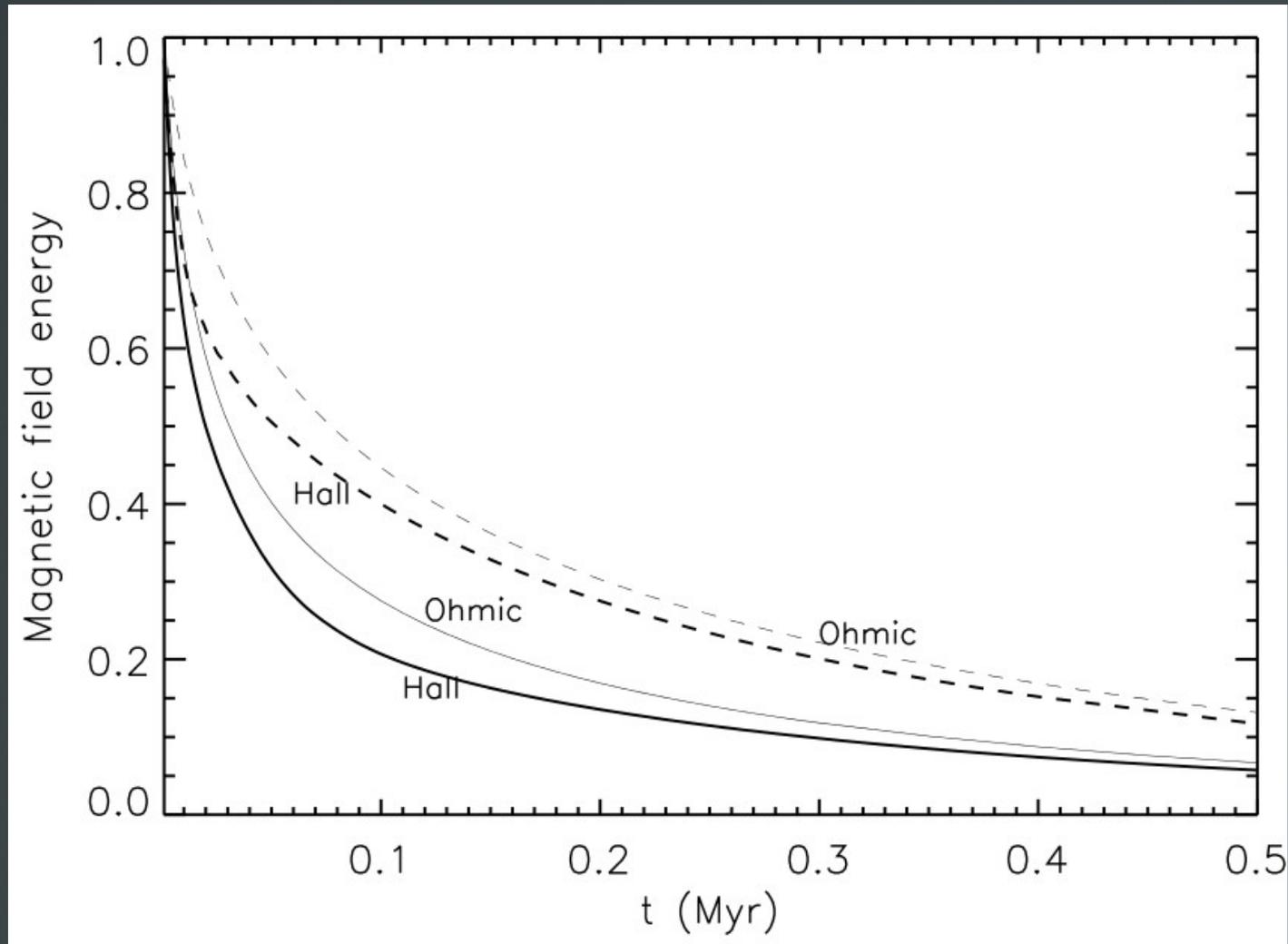


500 kyr



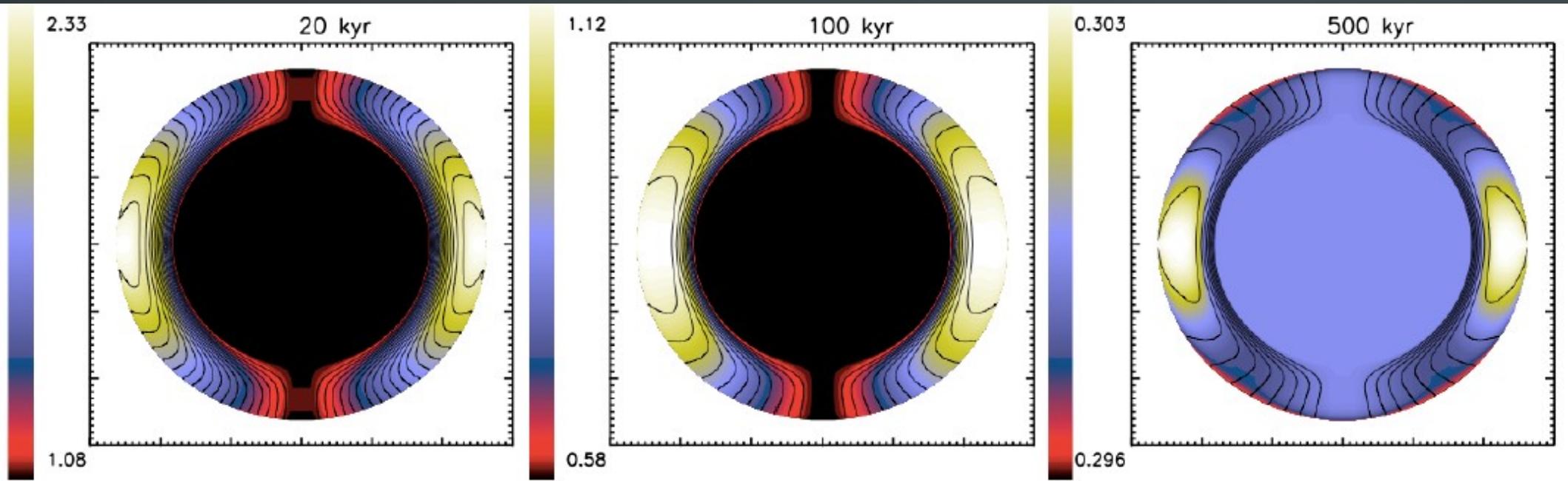
Hall効果の入った計算1

Pons & Geppert (2007)



Hall効果の入った計算2

Pons et al. (2009)

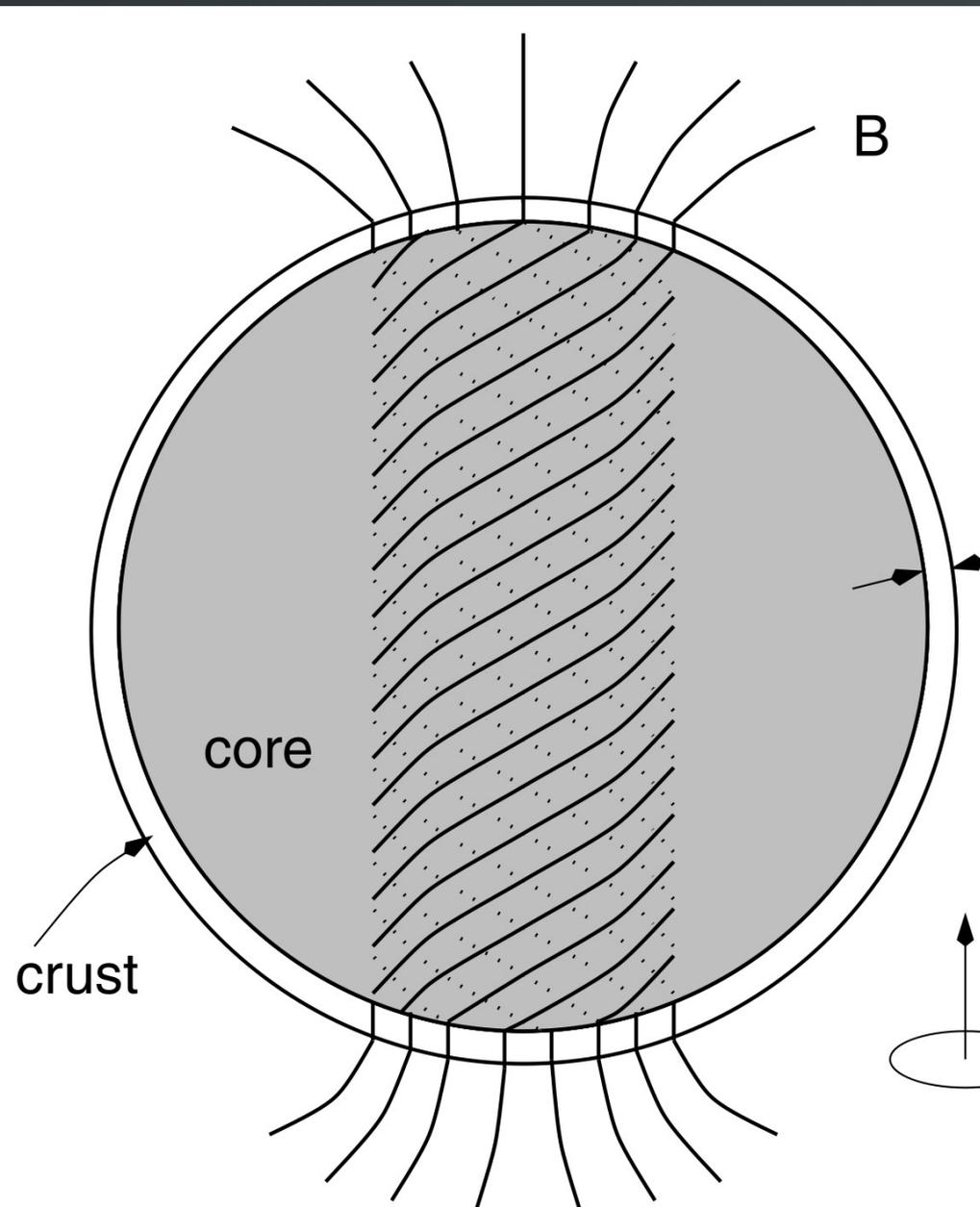


強いトロイダル磁場は有意に加熱する

Pons et al. (2009) 散逸による加熱も考慮

マグネター仮説

Thompson & Duncan (1992)

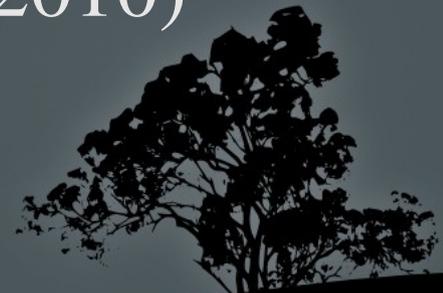


Thompson & Duncan (2001)



中性子星の磁場の起源

- 化石磁場
- 差動回転による増幅
Thompson & Duncan (1992)
- 熱磁気不安定性による増幅
Blandford et al. (1983)
- 磁性体
Makishima et al. (1999); Tatsumi (2010)



強磁場を作る

ball of subatomic particles.

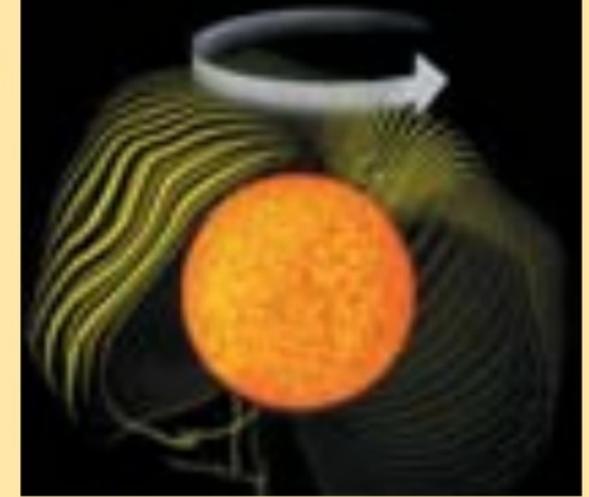
NEWBORN
NEUTRON
STAR



MAGNETAR

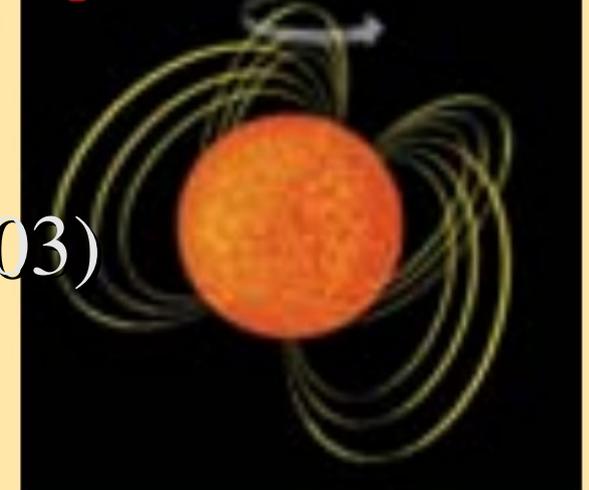
ORDINARY PULSAR

Age: 0 to 10 seconds



3 B: If the newborn neutron star spins slowly, its magnetic field, though strong by everyday standards, does not reach magnetar levels.

Age: 0 to 10 seconds



Kouveliotou, Duncan & Thompson (2003)

Scientific America

強磁場を作る

- Spruit(1999, 2002)

ball of subatomic particles.

NEWBORN
NEUTRON
STAR

MAGNETAR

Age: 0 to 10 seconds

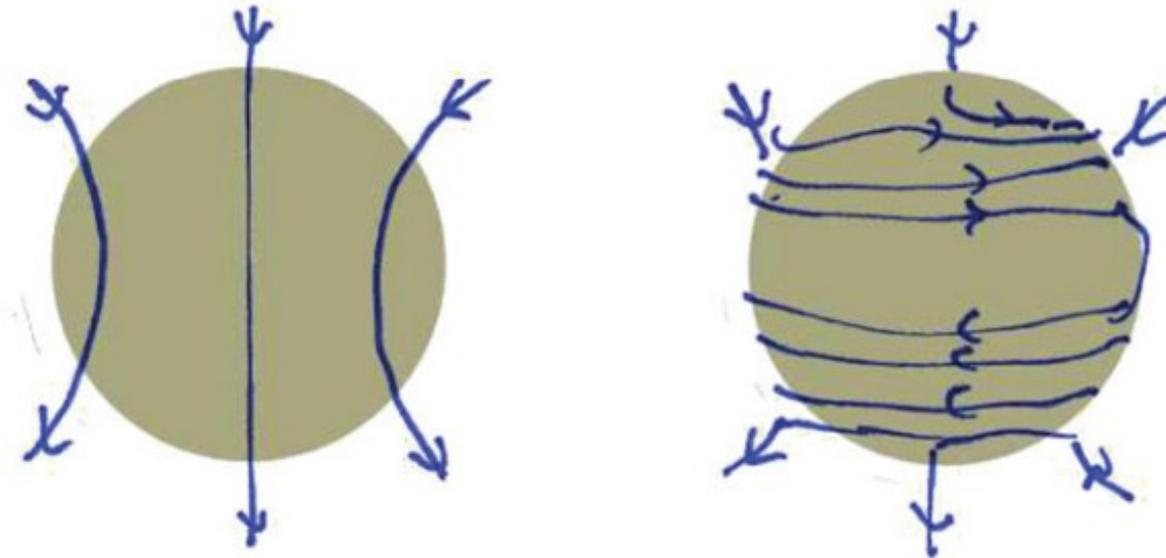
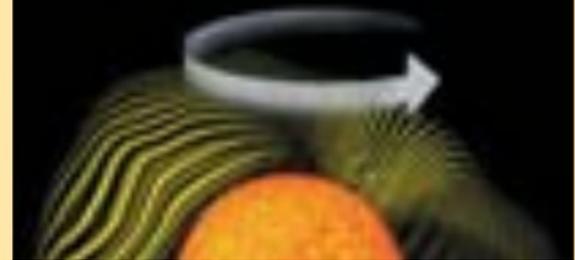
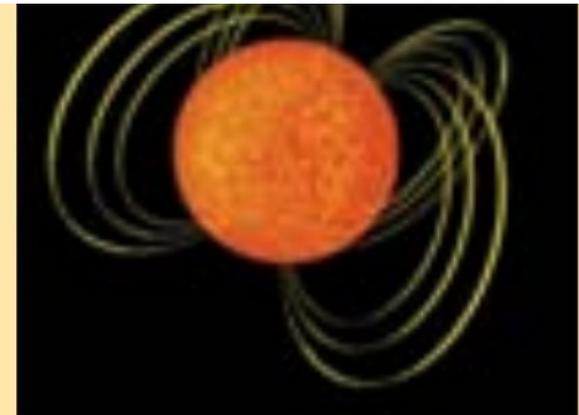


Figure 1. 'Winding up' of a poloidal field by differential rotation. The field lines are stretched into a stronger azimuthal field inside the star. The surface field remains unchanged.



磁場構造と安定性

- トロイダル磁場が優勢だろう

$$t_A = \sqrt{4\pi\rho R/B}$$

$$\sim 0.1s \left(\frac{\rho}{10^{15} \text{g/cm}^3} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{10^6 \text{cm}} \right) \left(\frac{B}{10^{15} \text{G}} \right)^{-1}$$

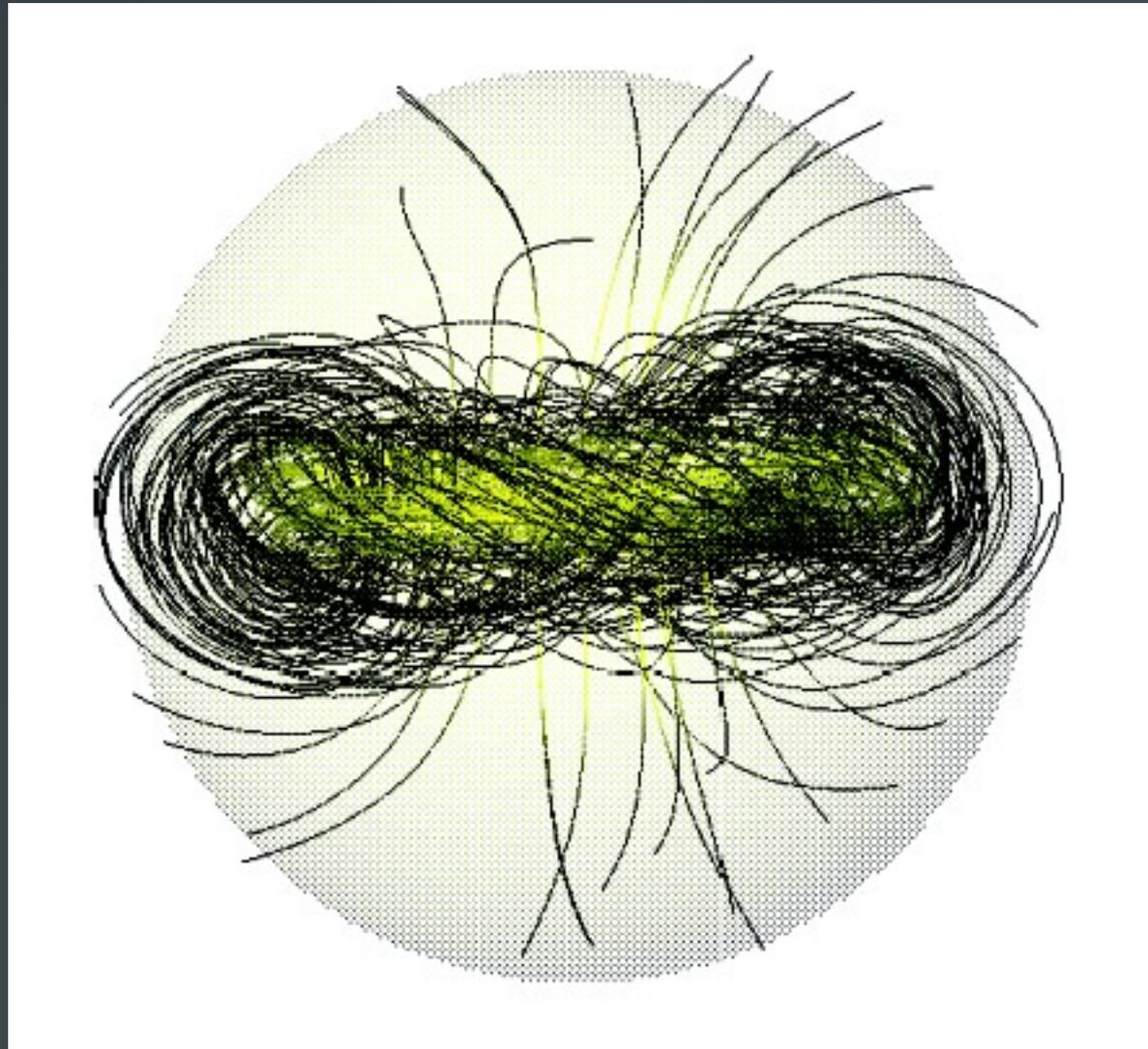
- 安定条件 (Braithwaite 2009)

$$a(M/|W|) < M_p/M < 0.8$$



安定な磁場構造

Braithwaite (2009)



中性子星内部の磁場構造

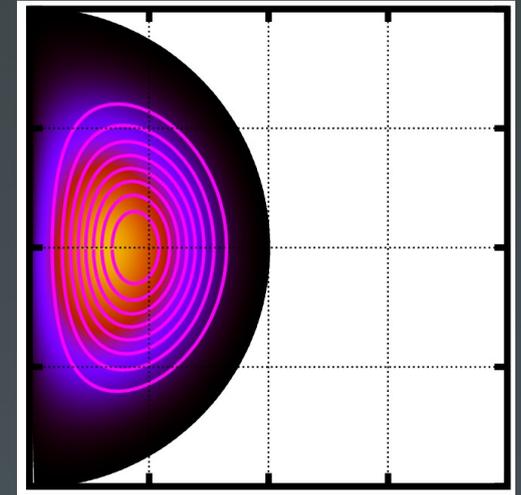
- 磁場構造

- Ioka & Sasaki (2004)

- Tomimura & Eriguchi (2005)

- Ciolfi et al. (2009)

- Uryu et al. (次の発表)



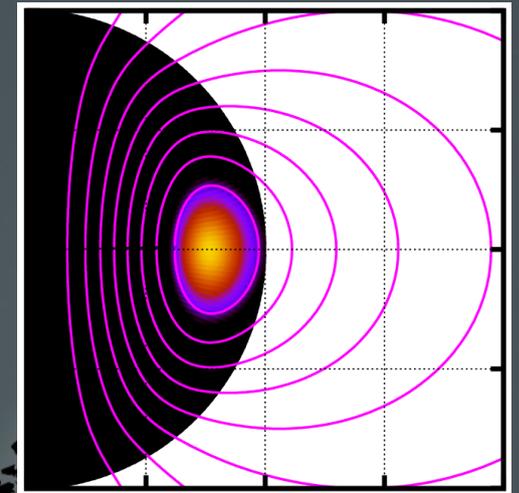
- 安定性(シミュレーションによる)

- Braithwaite & Spruit (2004)

- Braithwaite (2008, 2009)

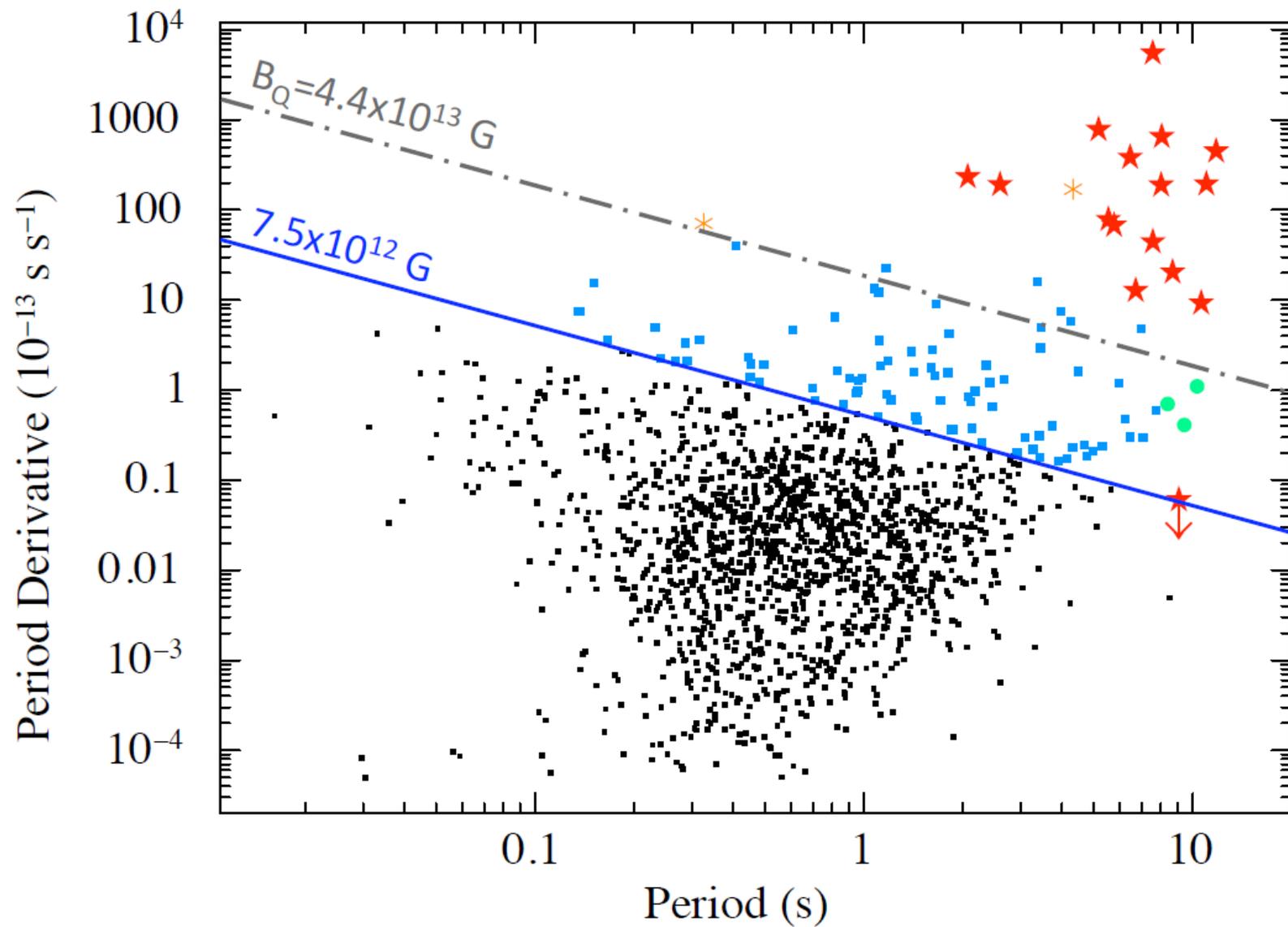
- Kiuchi, Yoshida & Shibata (2011)

- Ciolfi et al.(2011)



磁場が弱いマグネター

Rea et al. (2010)



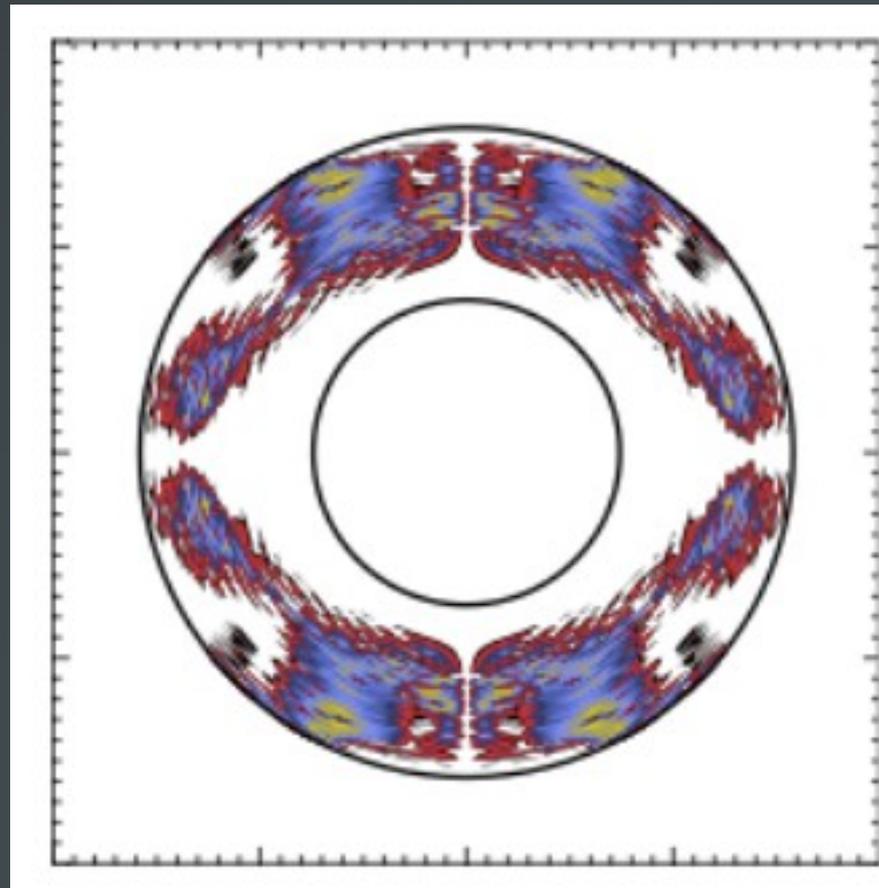
中性子星のHall効果による磁場進化

- Pons & Geppert (2007)
- Reisenegger et al. (2007)
- Pons, Miralles & Geppert (2009)
- Perna & Pons (2011)
- Kojima & Kisaka (2012)
- Vigano & Pons (2012)
- Vigano, Pons & Miralles (2012)



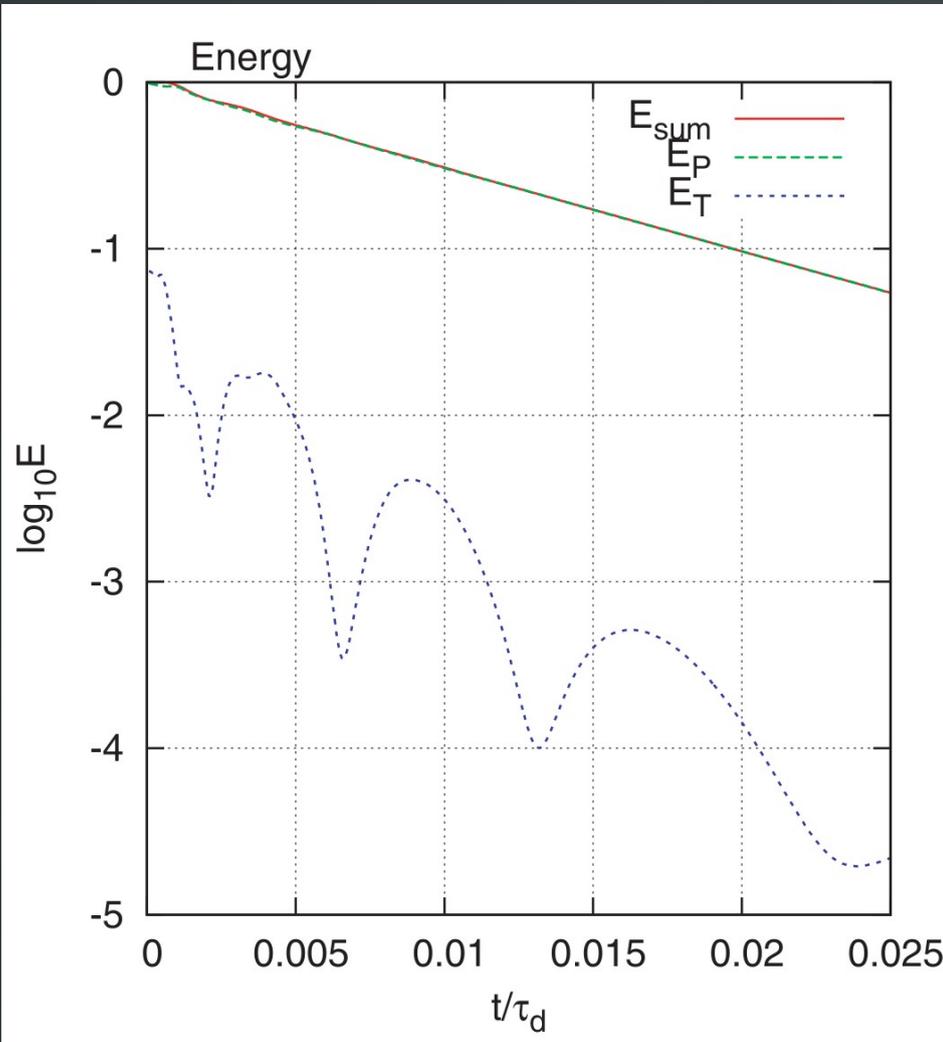
Hall効果の入った計算3

Perna & Pons (2011)

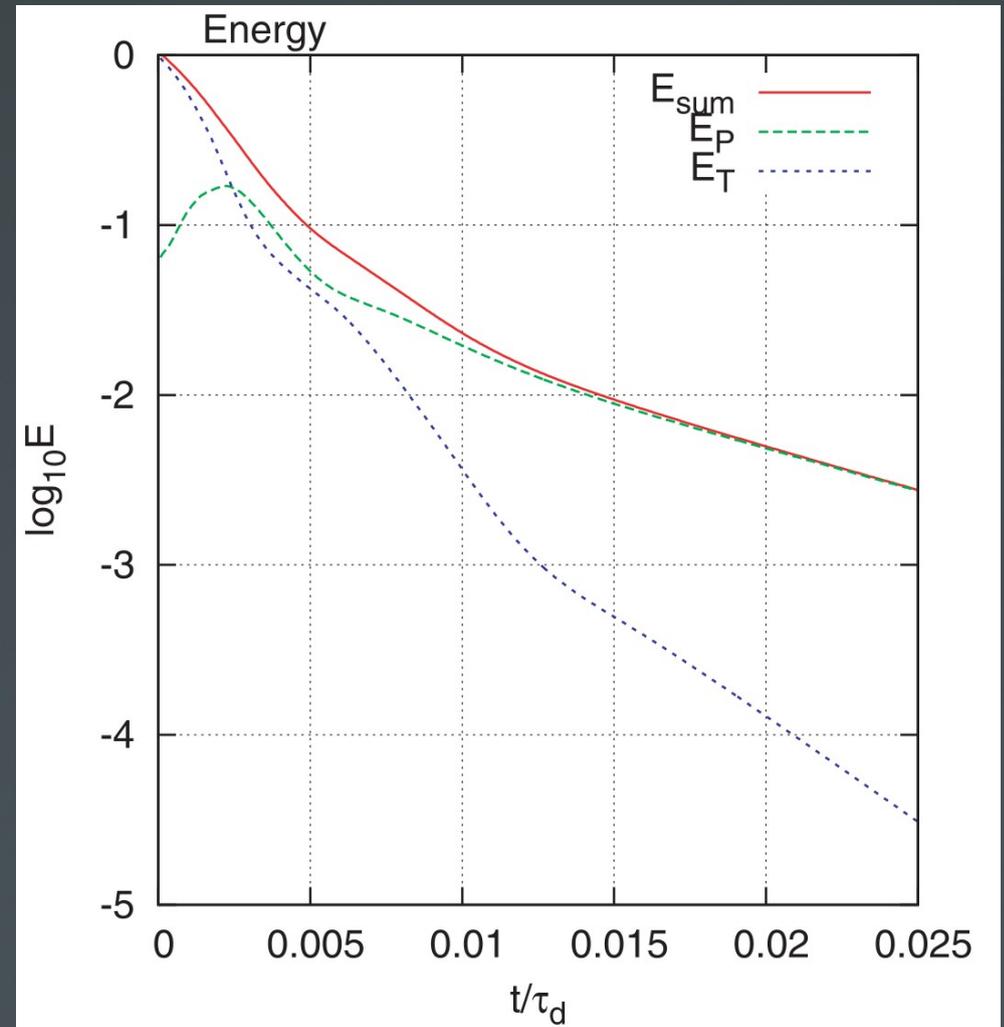


Hall効果の入った計算4

Kojima & Kisaka (2012)



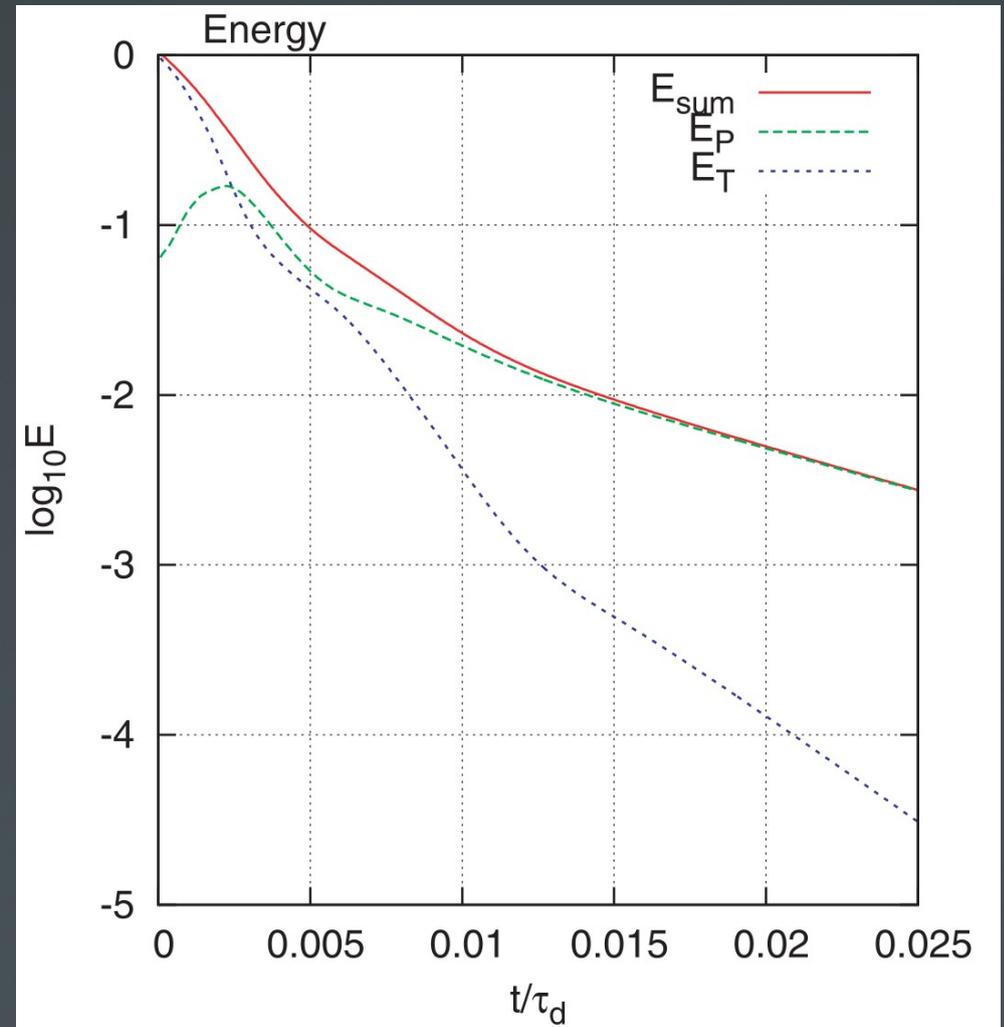
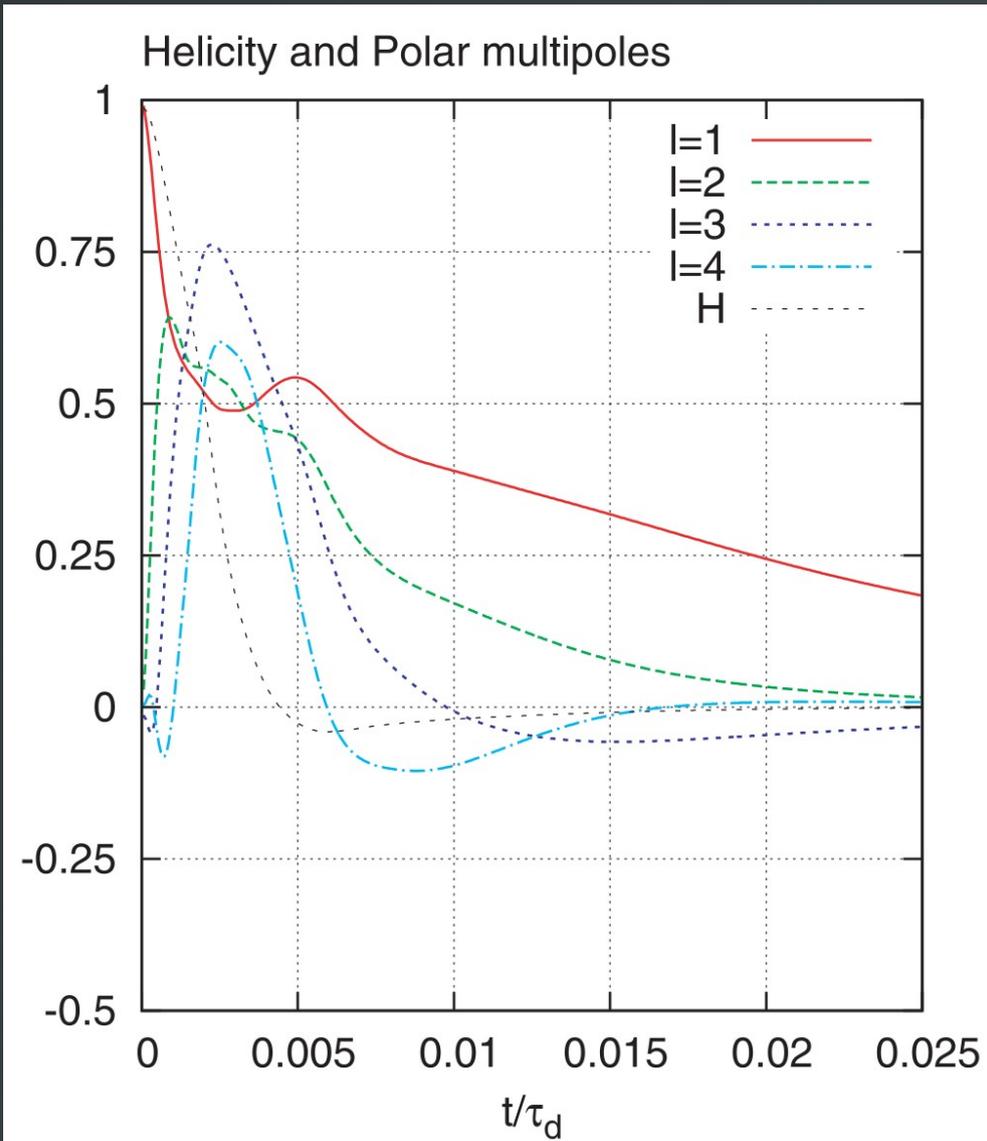
ポロイダル優勢



トロイダル優勢

Hall効果の入った計算4

Kojima & Kisaka (2012)



高次の項が優勢になる!

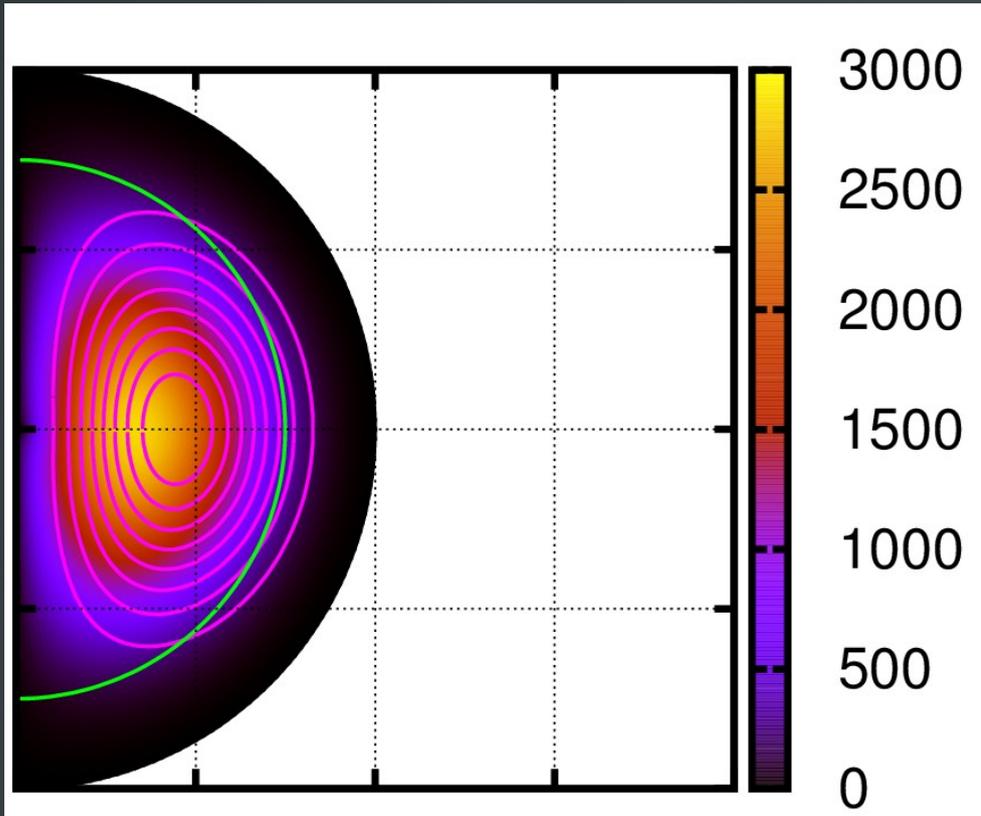
磁場構造の違い

- 中性子星とマグネターは内部の磁場構造が異なるかもしれない。
- 表面の磁場構造は似ていても、内部に強いトロイダル磁場を潜めている可能性がある。
- ポスターへ！

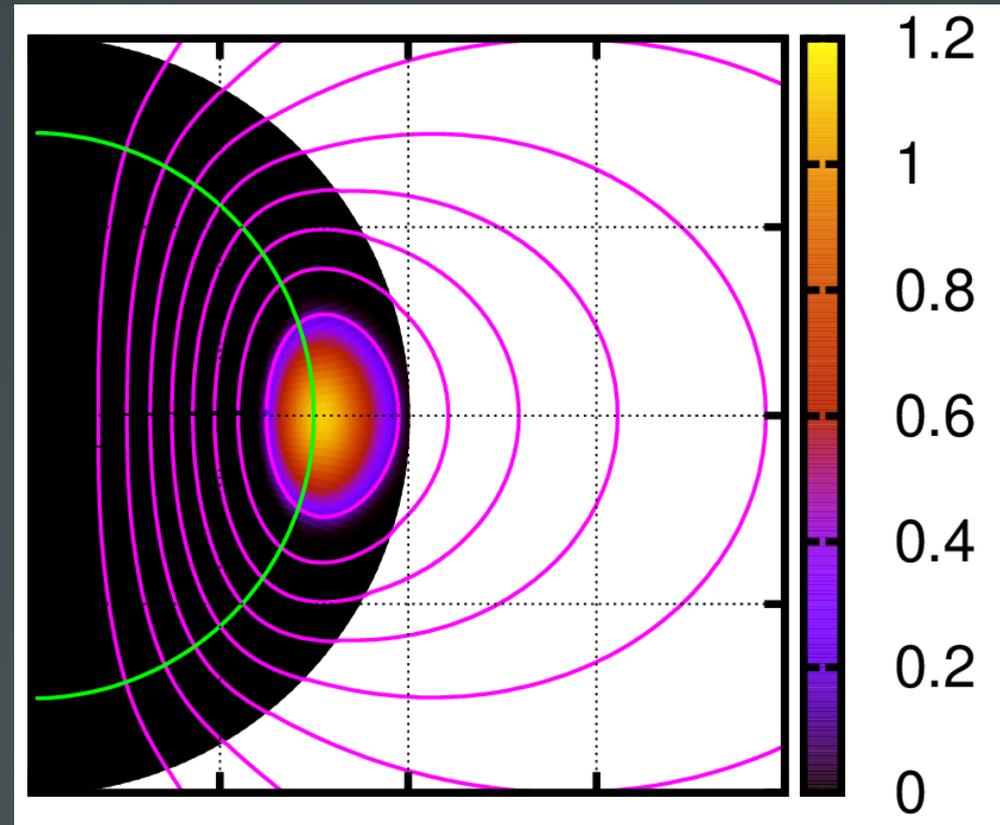


内部磁場の違い

マグネター

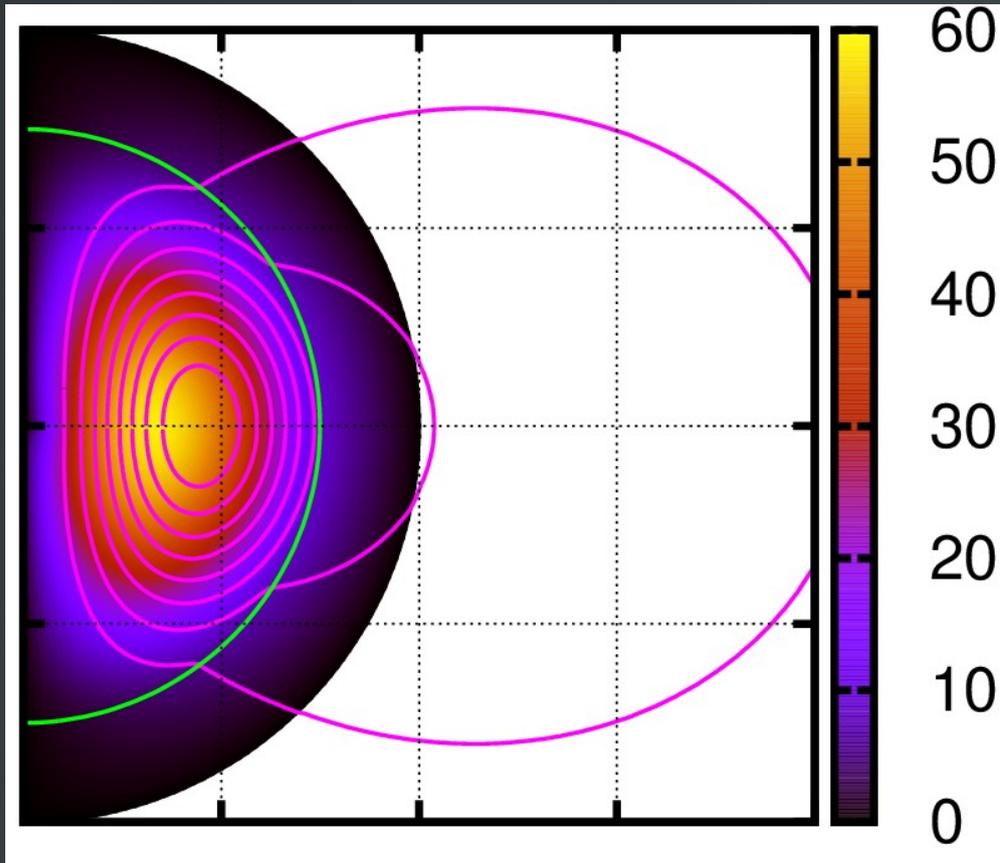


中性子星

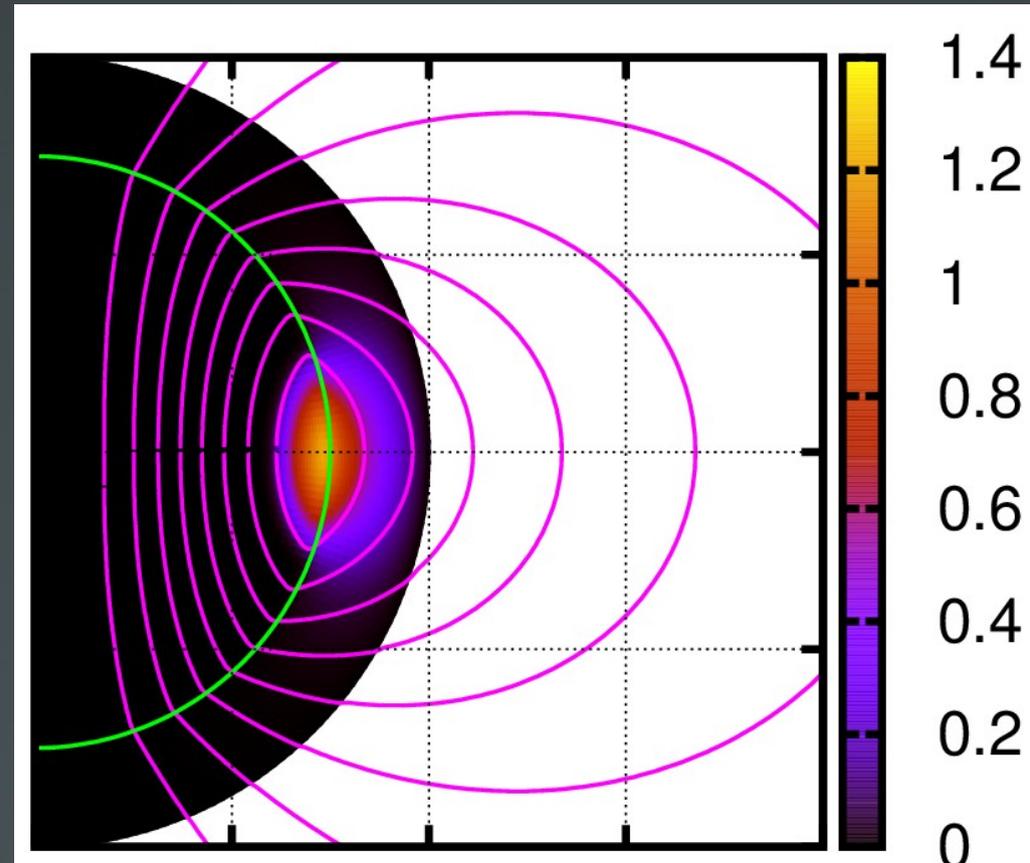


- オーム散逸のみの磁場の進化を追う.
- クラスト部分はコアよりも拡散しやすいとする

マグネター



中性子星



- 星の内部に強力なトロイダル磁場!
- クラスト底部に力がかかる



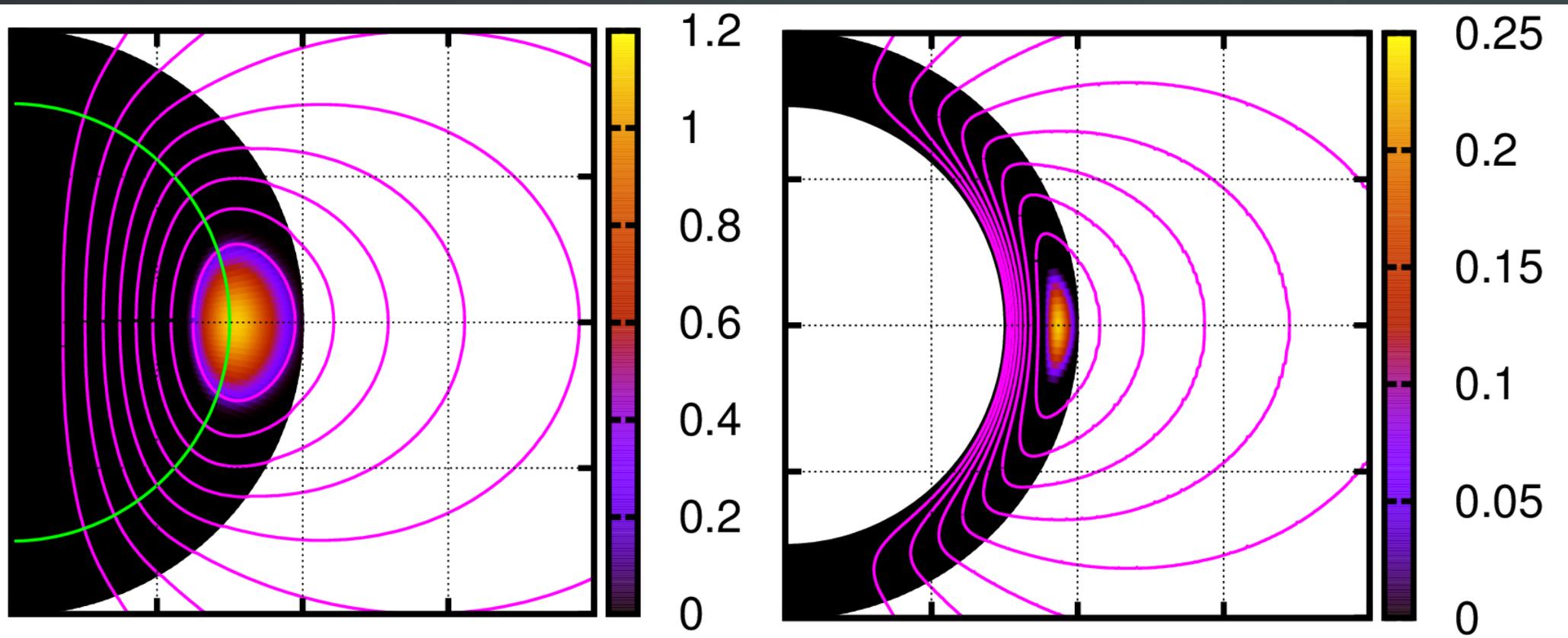
これから何を考えるべきか、



磁場構造研究のこれから

- 初期条件(最初の磁場)
 - 磁場と回転入り親星の計算 + 超新星爆発
 - 磁場構造の種類
 - コア + クラスト 磁場 or クラスト磁場
 - 安定な磁場構造を求める(強いトロイダル磁場)
 - 流体の状態
 - 二流体による計算 (Lander et.al 2012)
 - Stratification を考慮した計算(Yoshida et al. 2012)
 - Hybrid star (Yasutake et al. 2010)
 - 磁性体
- 

磁場構造研究の問題点



磁場構造研究の問題点

- 初期条件(最初の磁場)
 - 磁場と回転入り親星の計算 + 超新星爆発
- 磁場構造の種類
 - コア + クラスト 磁場 or クラスト磁場
 - 安定な磁場構造を求める(強いトロイダル磁場)
- 流体の状態
 - 二流体による計算 (Lander et al. 2012)
 - Stratification を考慮した計算(Yoshida et al. 2012)
 - Hybrid star (Yasutake et al. 2010)
- 磁性体 **より現実的な議論へ**

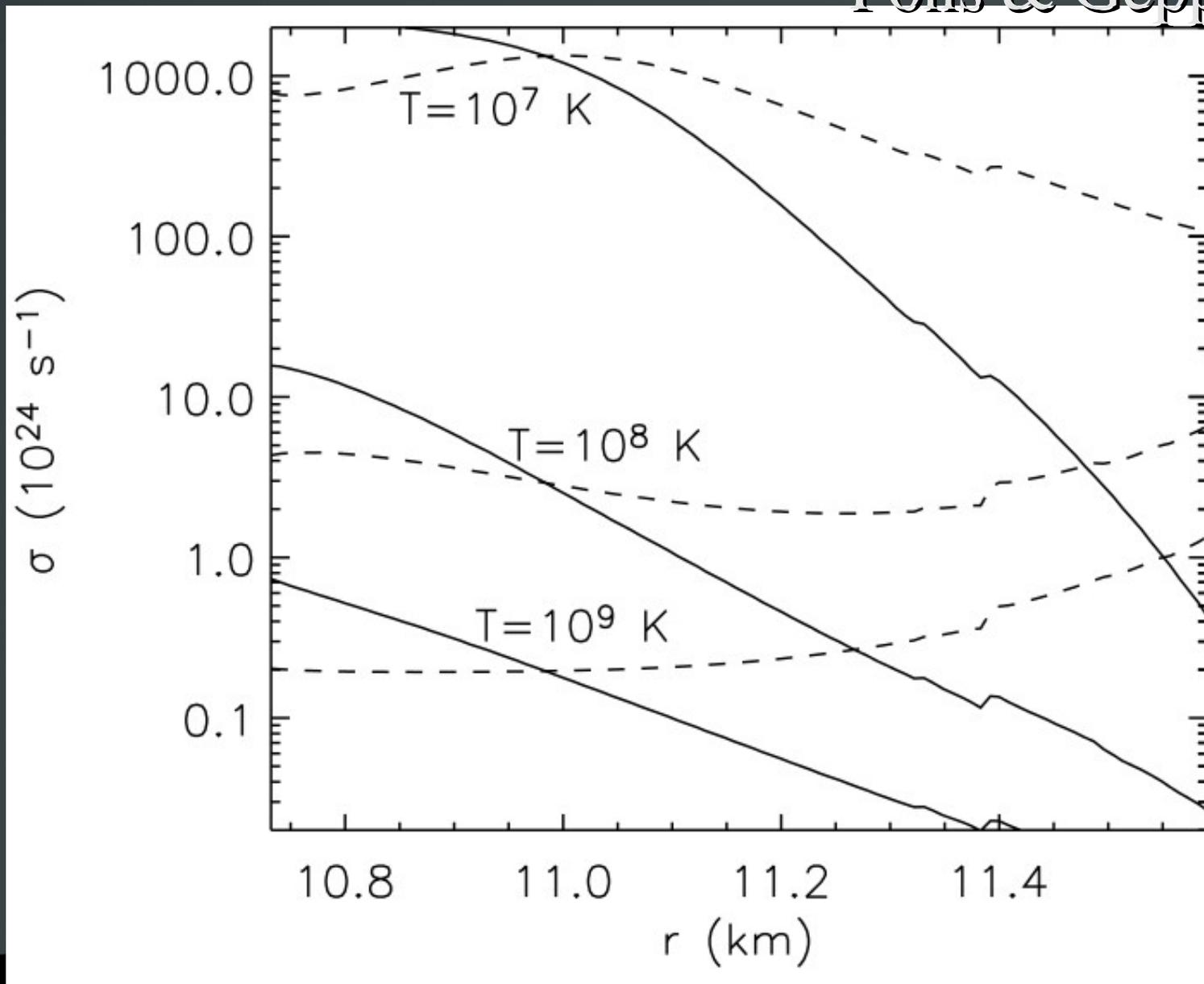
磁場進化研究の問題点

- 定常構造は楕円型方程式、拡散は放物型方程式
 - 境界条件の影響が大きい
 - 非線形拡散方程式を解く
- 適切な初期条件、境界条件
- ミクロな量の影響が大きい
 - プラズマ物理との連携
 - Takahashi, Kotake & Yasutake(2011)



磁場進化研究の問題点

Pons & Geppert (2007)



磁場進化研究の問題点

- 定常構造は楕円型方程式、拡散は放物型方程式
 - 境界条件の影響が大きい
 - 非線形拡散方程式を解く
- 適切な初期条件、境界条件
- ミクロな量の影響が大きい
 - プラズマ物理との連携
 - Takahashi, Kotake & Yasutake (2011)

まずは基礎的な理解を深める





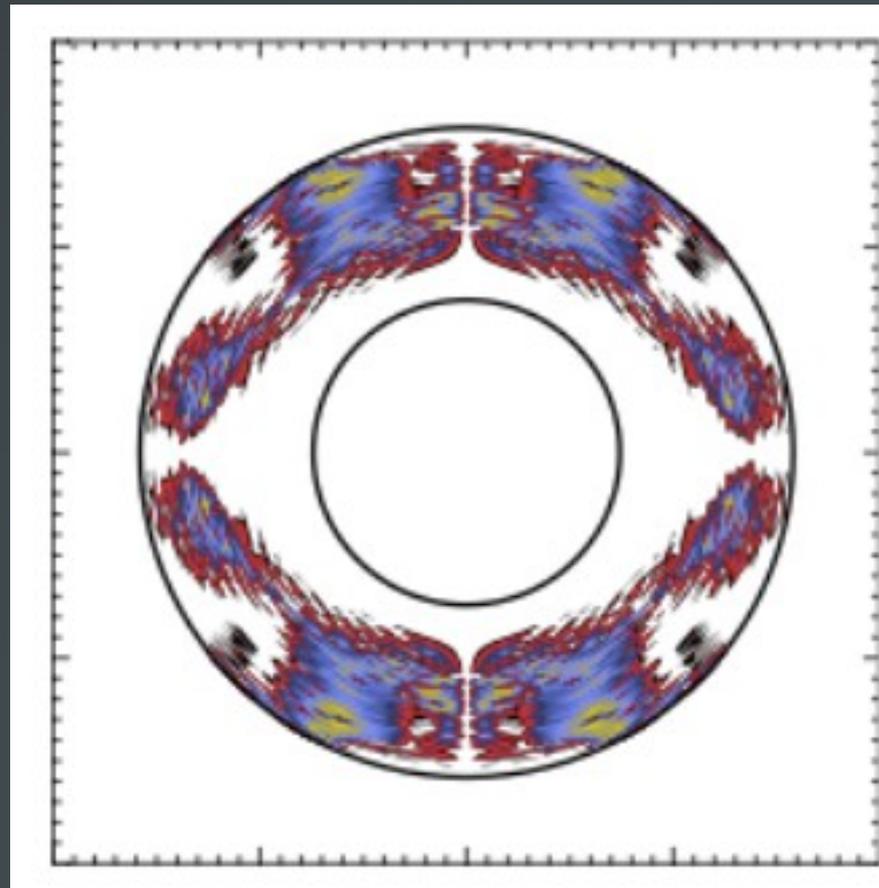


Onigiri

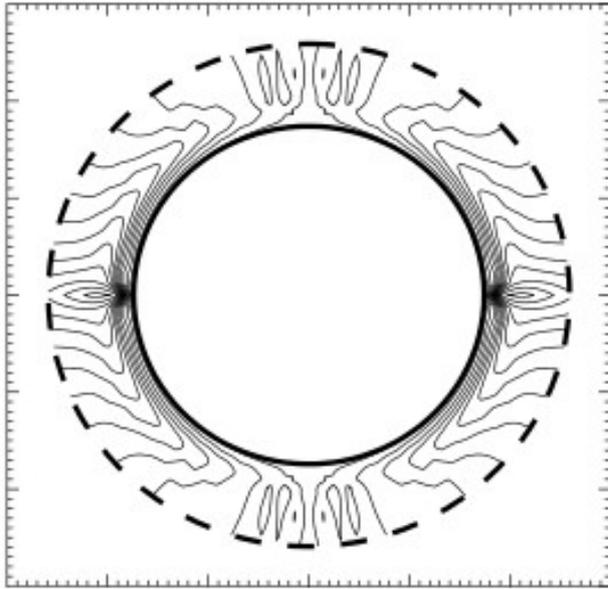


Hall効果の入った計算3

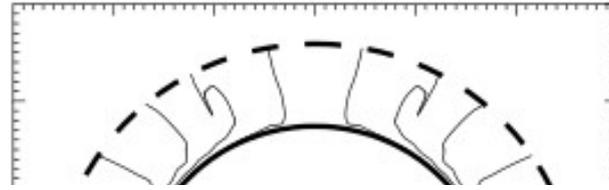
Perna & Pons (2011)



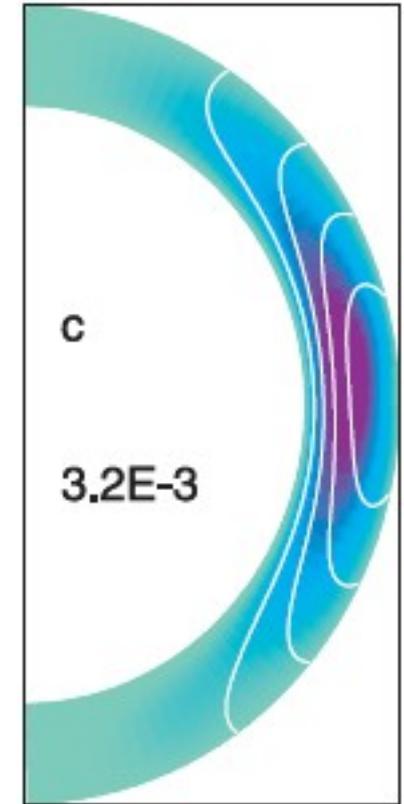
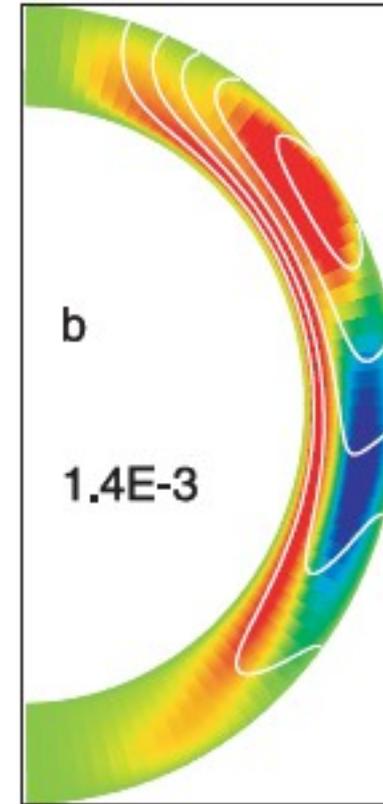
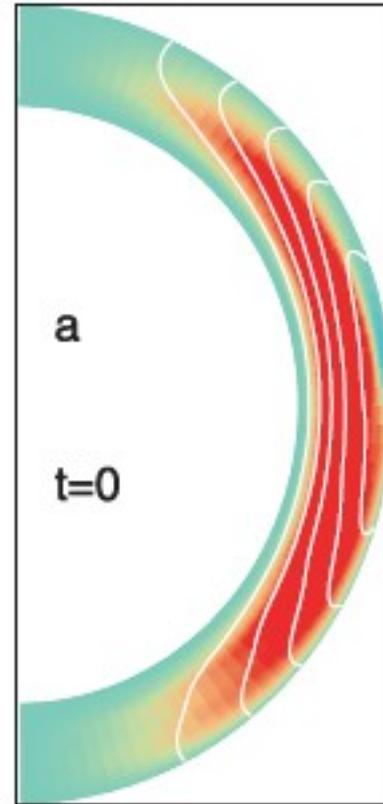
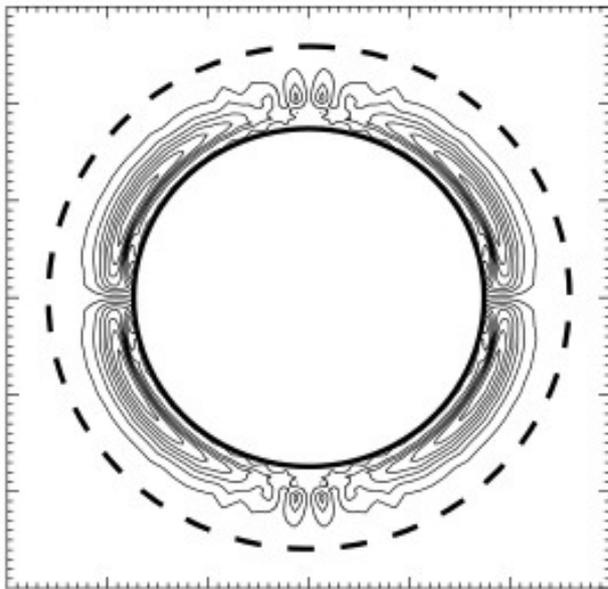
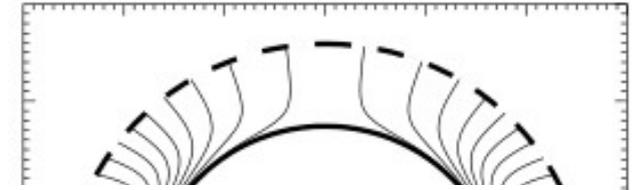
10 kyr



50 kyr



500 kyr



中性子星の磁場のタイムスケール

- 1: MHDのダイナミカルスケール (\sim ms, s)
- 2: Fallback accretion (\sim hr, 0.1 yr)
- 3: クラストでの熱磁気不安定性 (0.1 yr)
- 5: Ambipolar diffusion (100 yr \sim 10^{22} yr ?)
- 6: Hall 効果 ($\sim 10^7$ yr ?)
- 7: Ohm 散逸 ($\sim 10^9$ yr ?)

