

Evolution of magnetic field in magnetars

藤澤幸太郎 (早稲田大学)

共同研究者

矢田部 (早稲田)、木坂 (青山学院)、
安武 (千葉工業大学)

2017年11月23日 (木)

もくじ

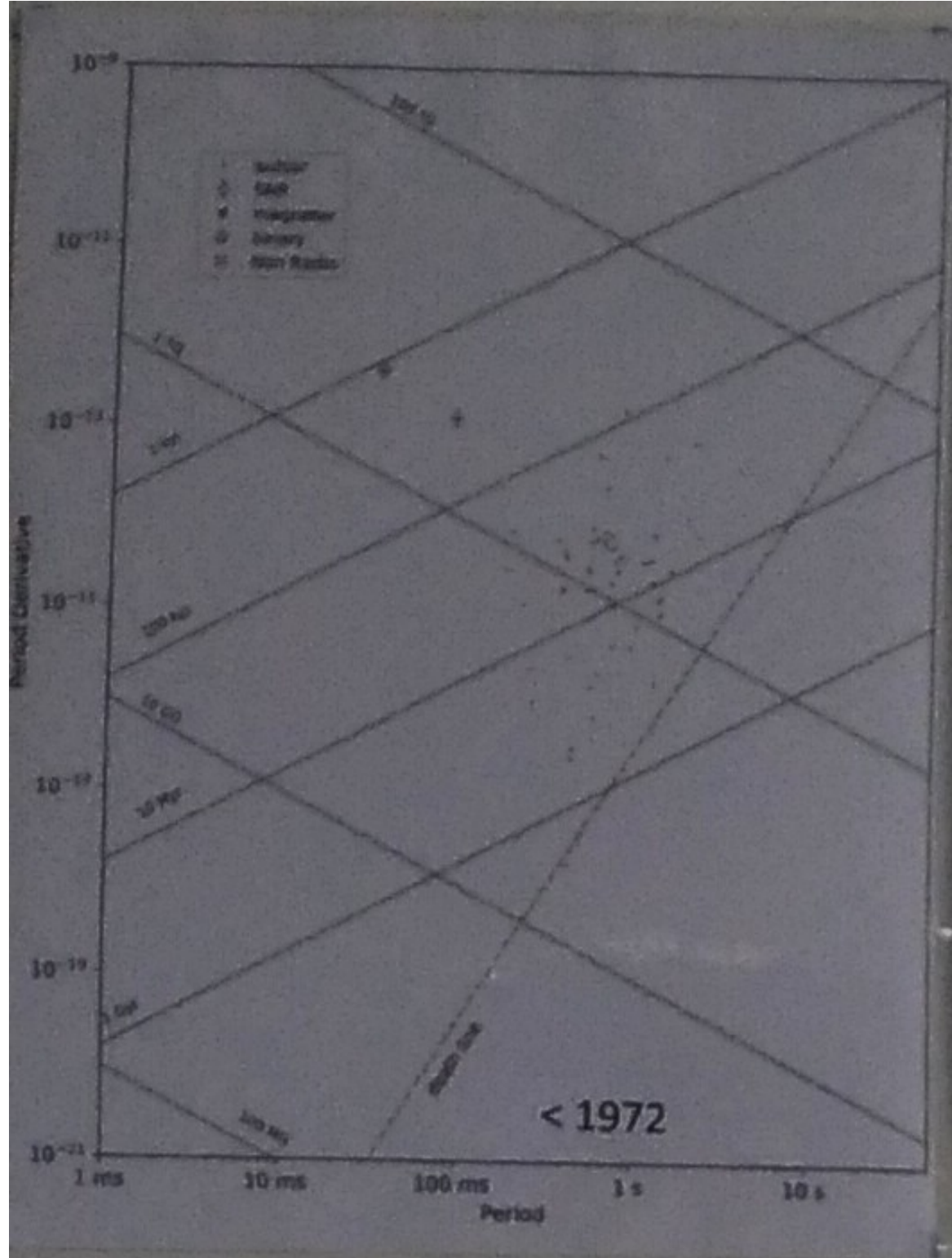
- マグネターの年齢と磁場
- マグネター磁場進化の現象論モデル
- 磁場の起源とその進化
- マグネター磁場進化の現象論モデル II
- Ambipolar 拡散 と磁場進化
- まとめ

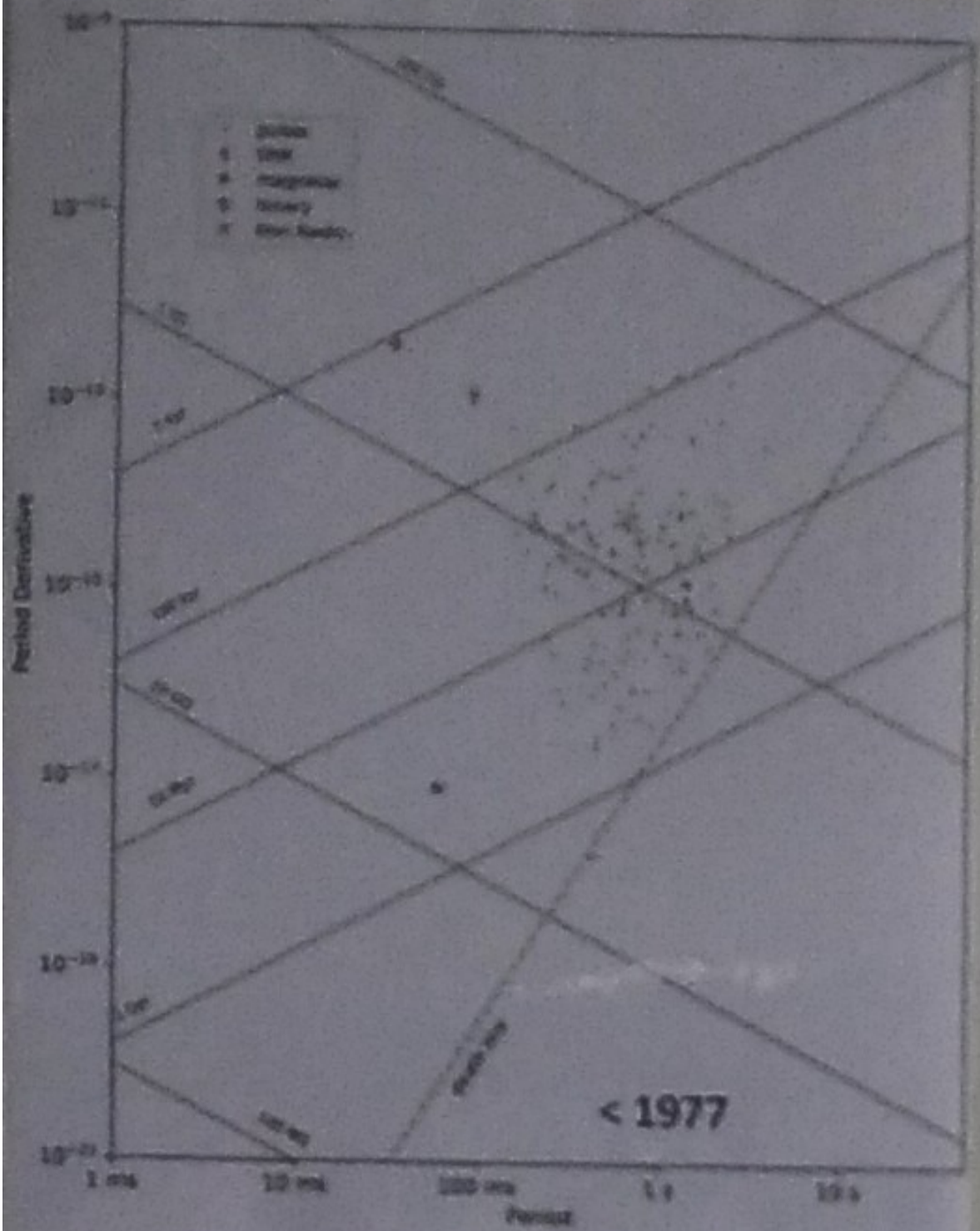
Prepared by Johnson, Cooper & Higgins using the 47th catalogue

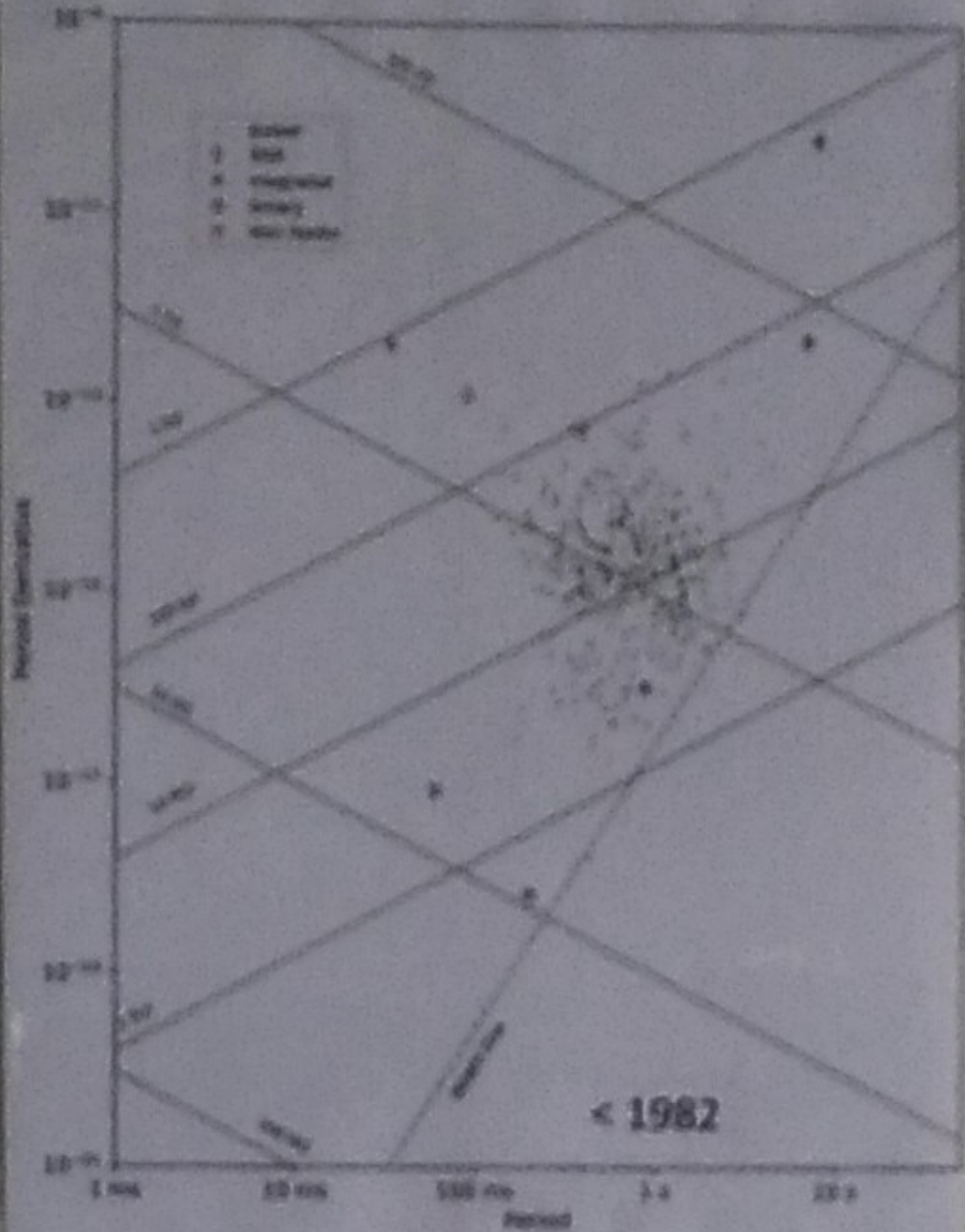


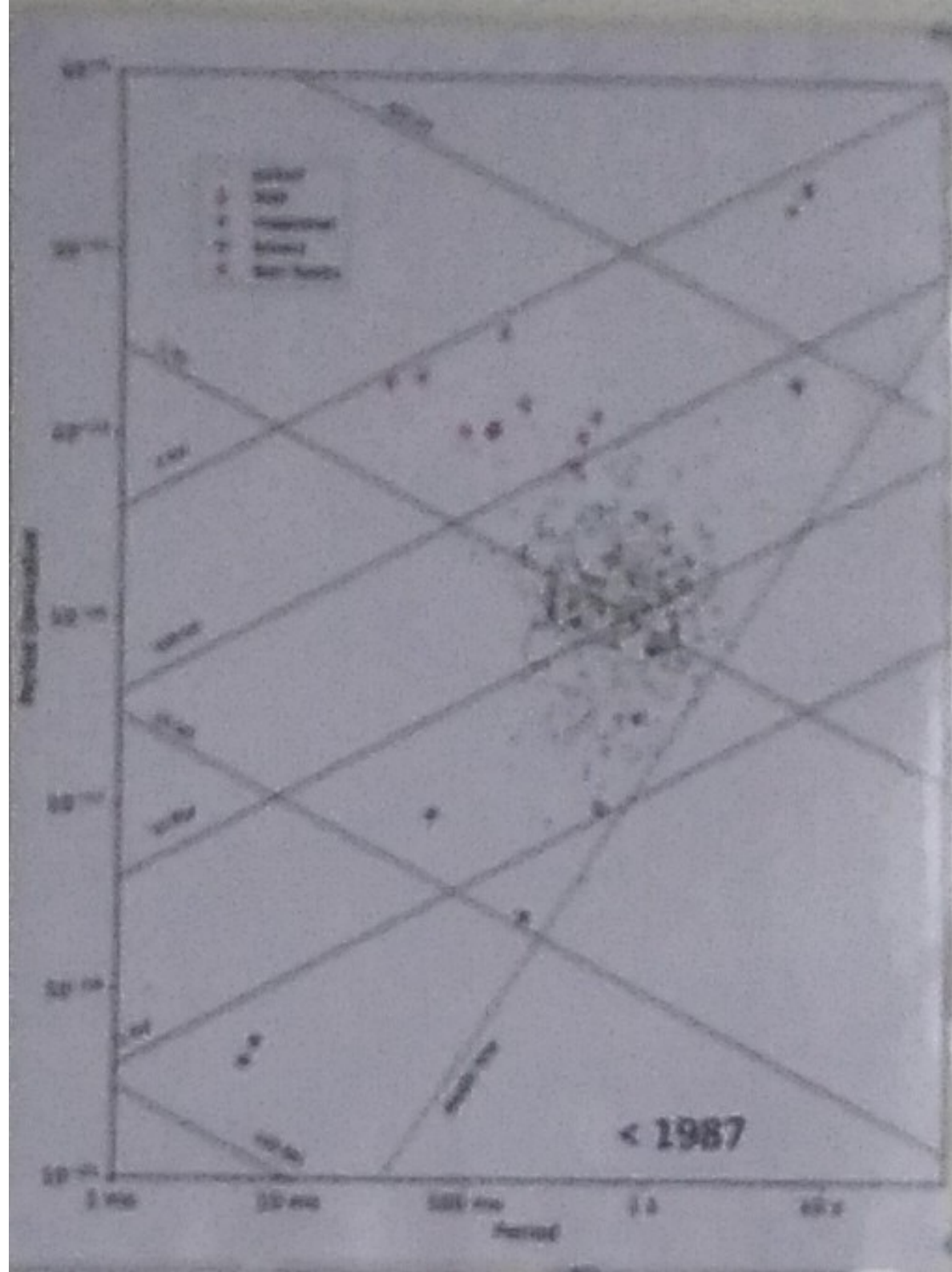
Star Pavilion
AED
Located at Planet
Pavilion Reception

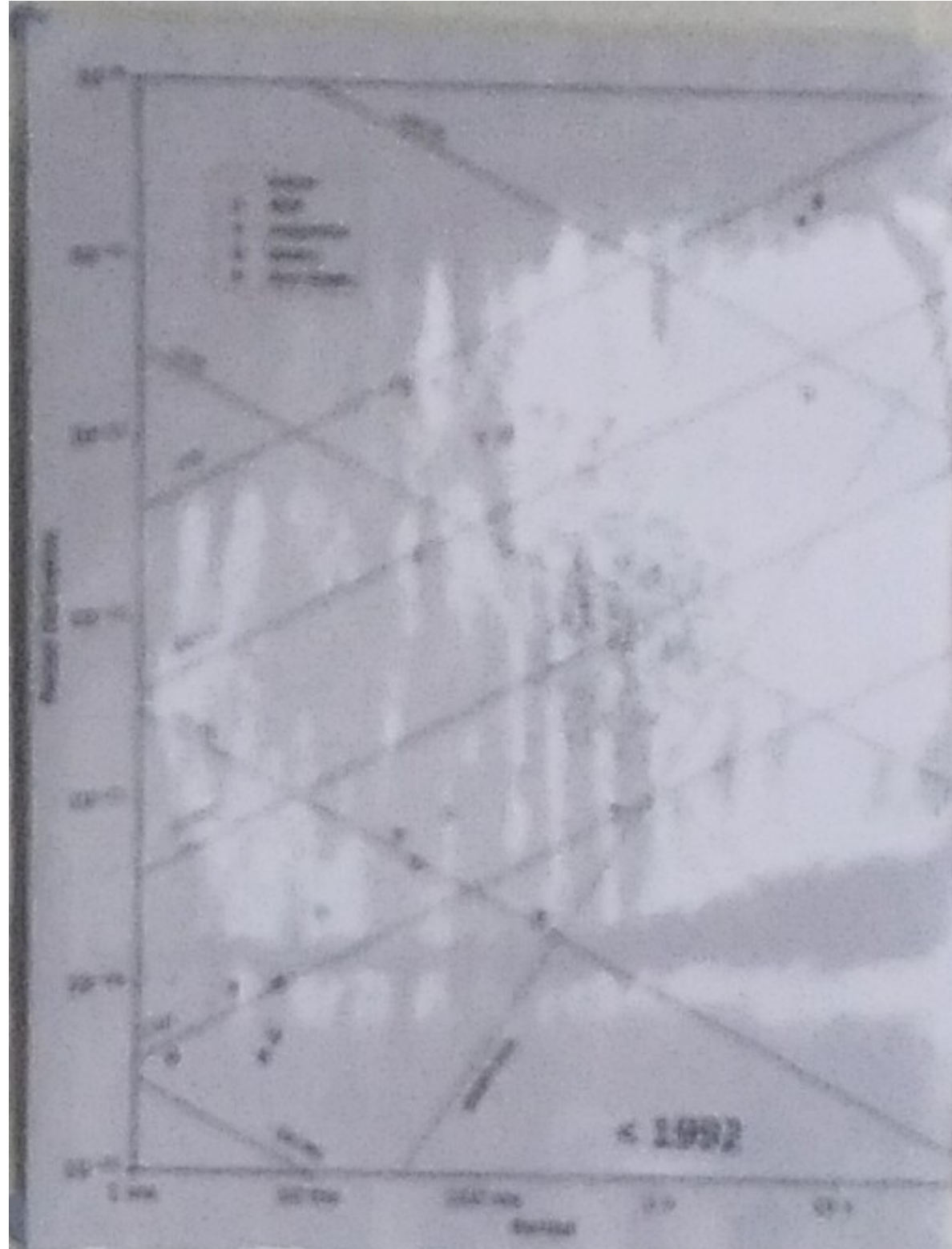
Defibrillator

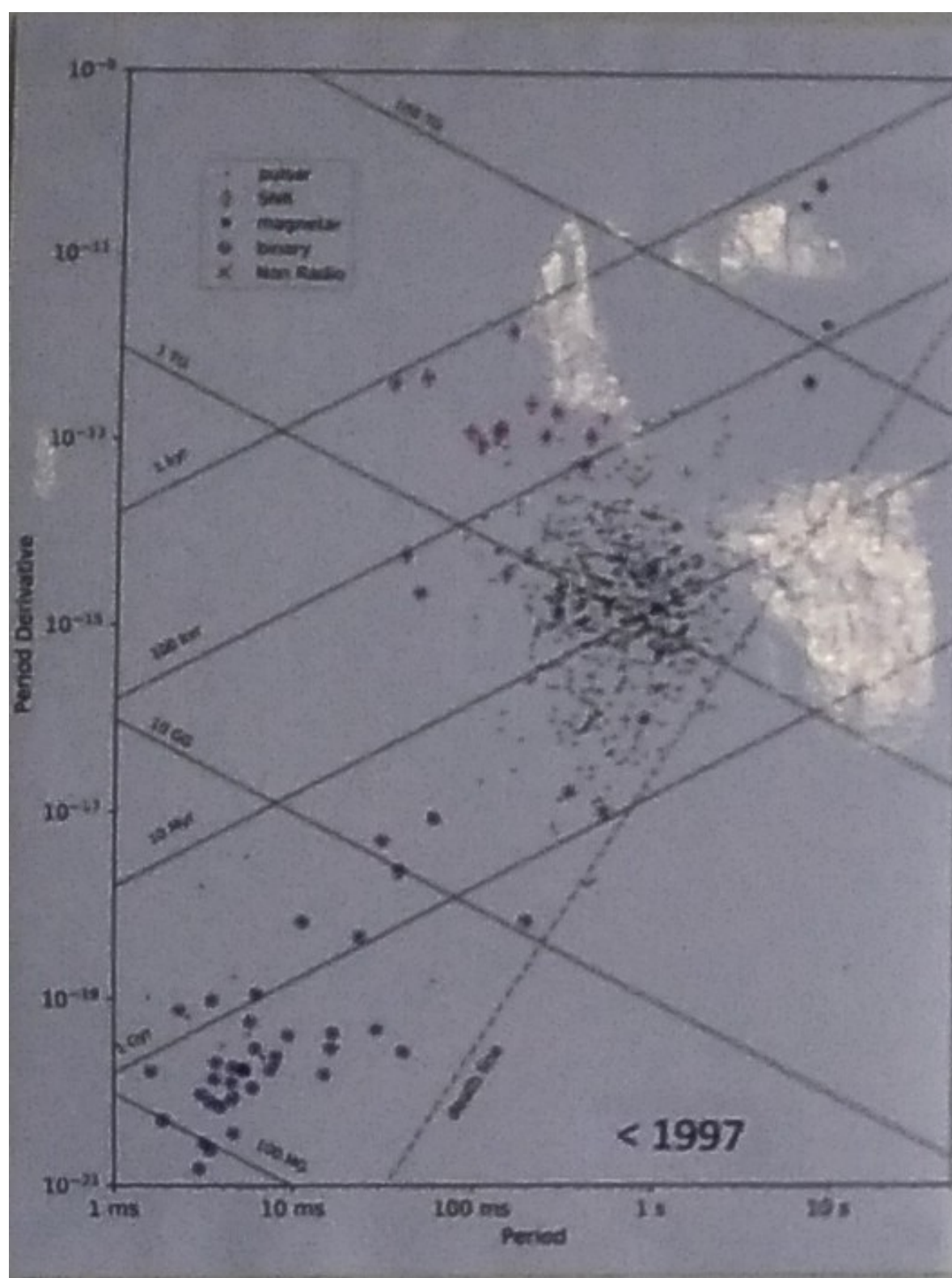


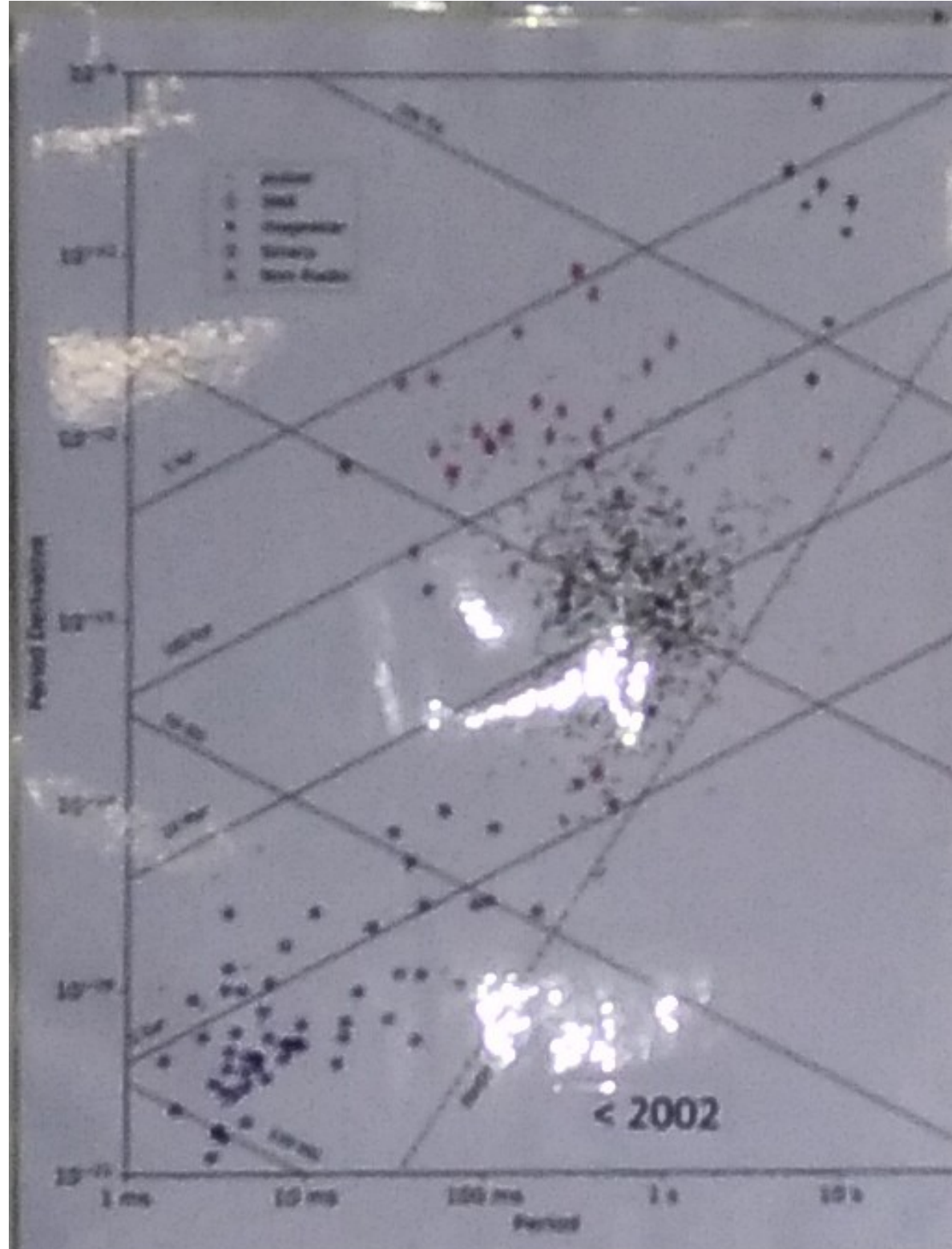


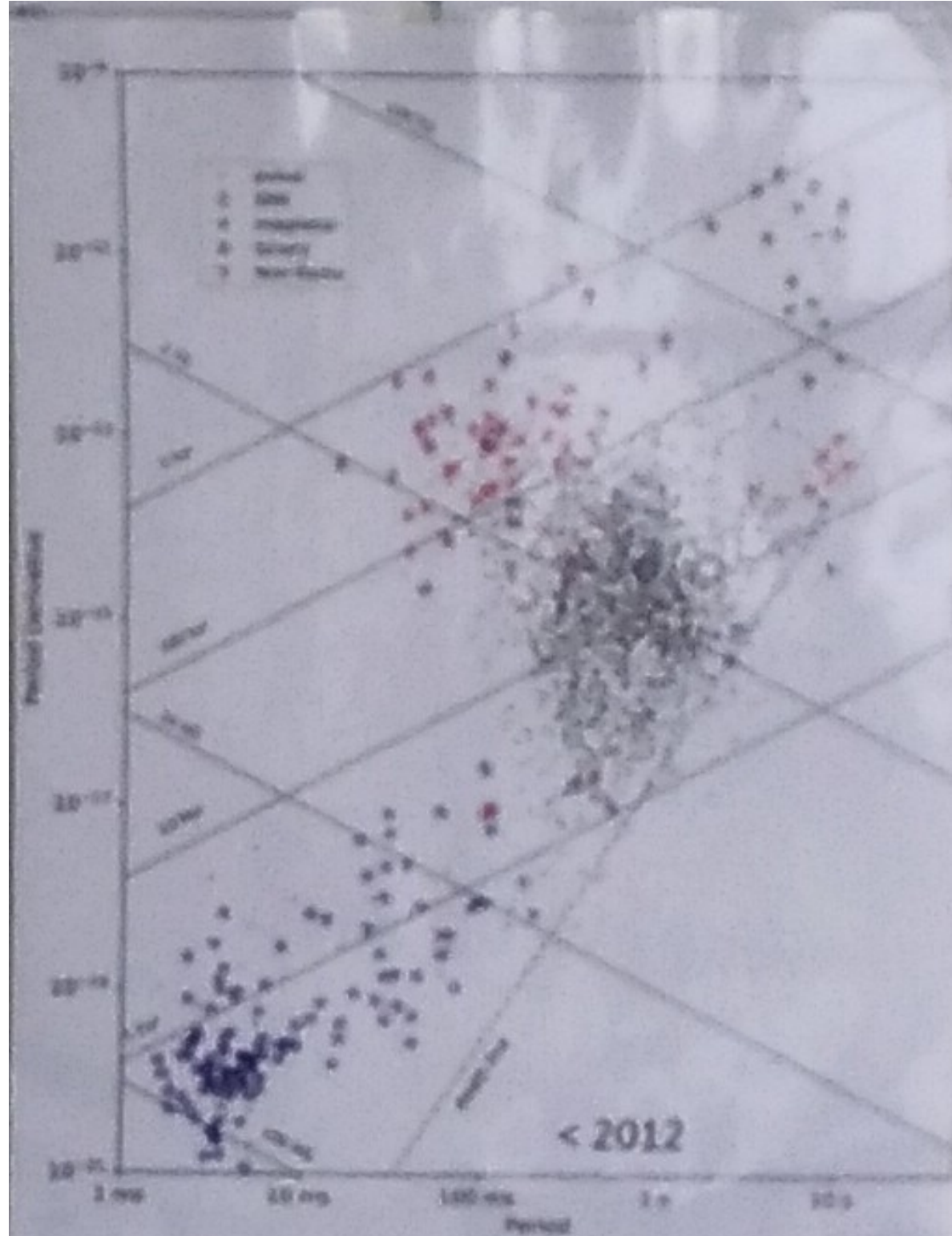


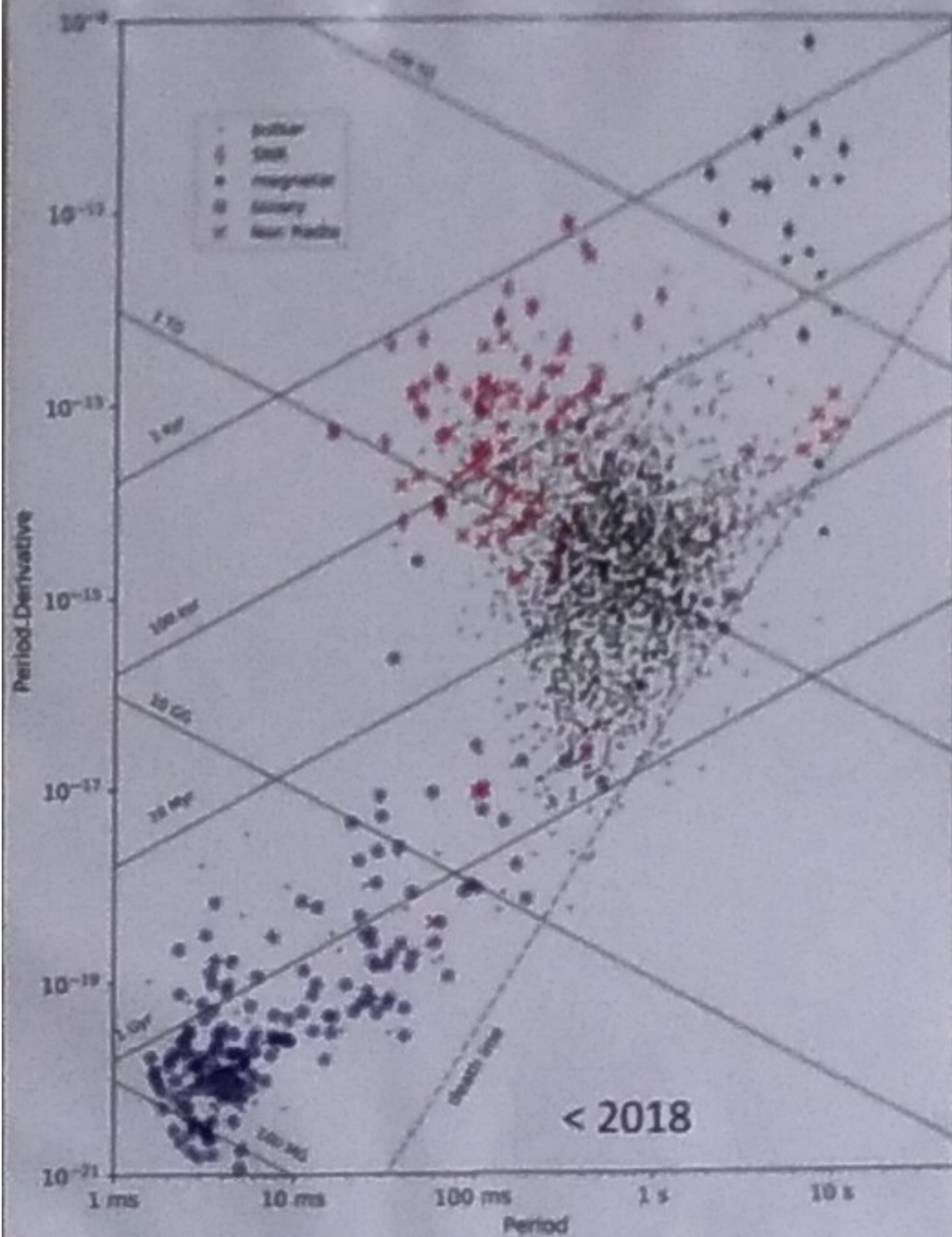






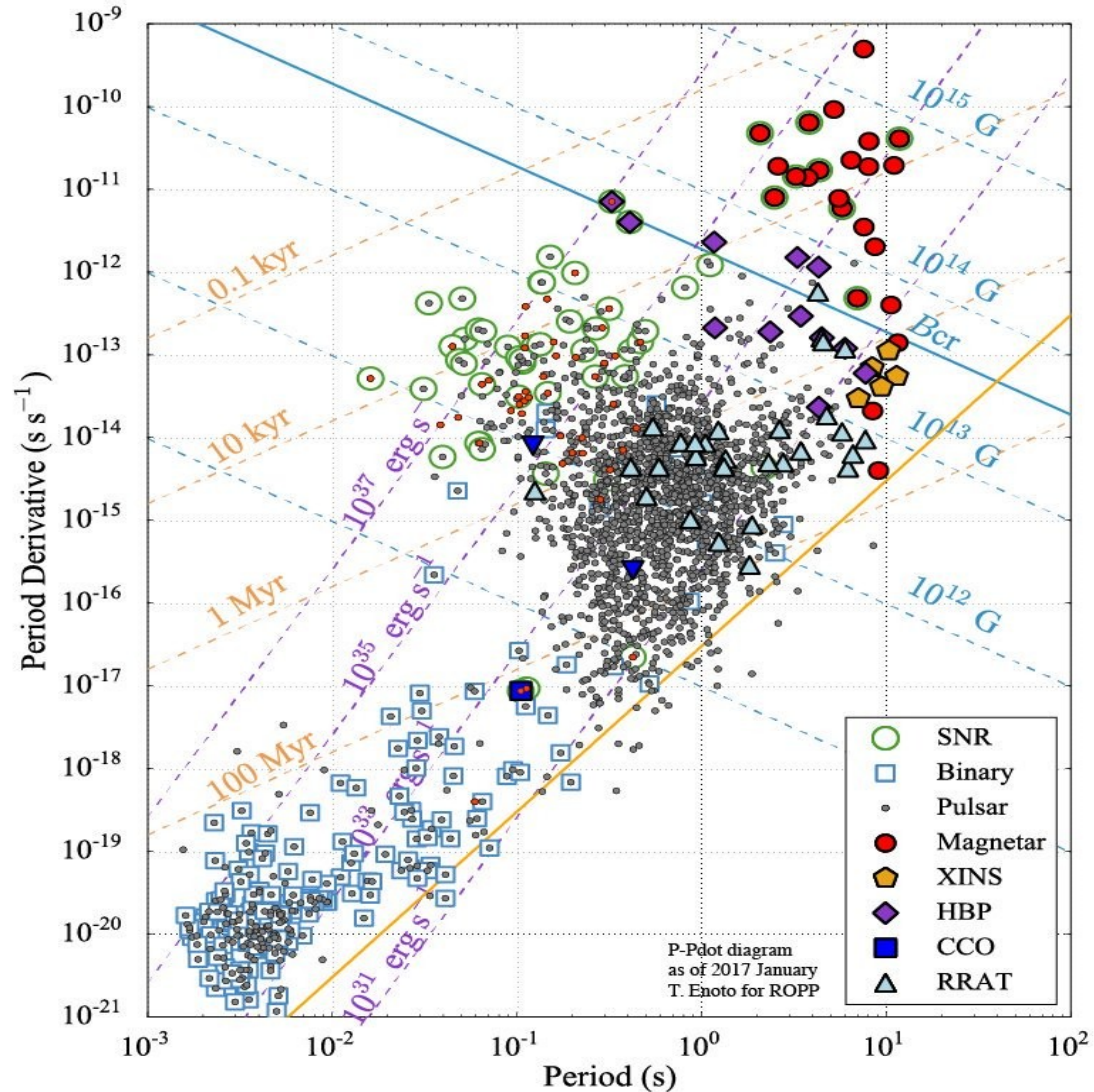






回転とその時間変化と磁場と年齢

$$\dot{P} (s/s)$$



$P (s)$
©榎戸さん

マグネター

- パルス周期が長い ($P \sim 2-11$ 秒)
 - 回転エネルギーが小さい
- X線で定常的に明るい ($L_x \sim 10^{35}$ erg/s)
 - スピンダウン光度 $\dot{E}_{rot} = 10^{32-34}$ erg/s より大きい
- 回転とその時間変化から推定される磁場が大きい
 - 双極子磁場 $B_d = 10^{14-15}$ G 程度
- 特性年齢が若い ($\tau_c = 1-100$ k yr)

磁気双極子放射

- パルサーが双極子磁場を持っていて、磁気双極子放射によって回転が遅くなると仮定

$$\left(\frac{1}{2} I (\dot{\Omega})^2 \right) = 2 \pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3} = \frac{2}{3} \frac{B^2}{c^3} R^6 \left(\frac{2 \pi}{P} \right)^4$$

磁場に関して解き、典型的な値を使うと

$$B = \left(\frac{3 I c^3 P \dot{P}}{8 \pi^2 R^6} \right)^{1/2} \sim 2 \times 10^{12} G (P \dot{P}_{15})^{1/2}$$

$$I = 10^{45} [g \text{ cm}^2] \quad R = 10^6 [cm]$$

特性年齢

- 磁気双極子放射の逆に周期に関してまとめると、

$$P \dot{P} = \frac{1}{2} \frac{dP^2}{dt} = \frac{8 \pi^2 R^6 B^2}{3 c^3 I}$$

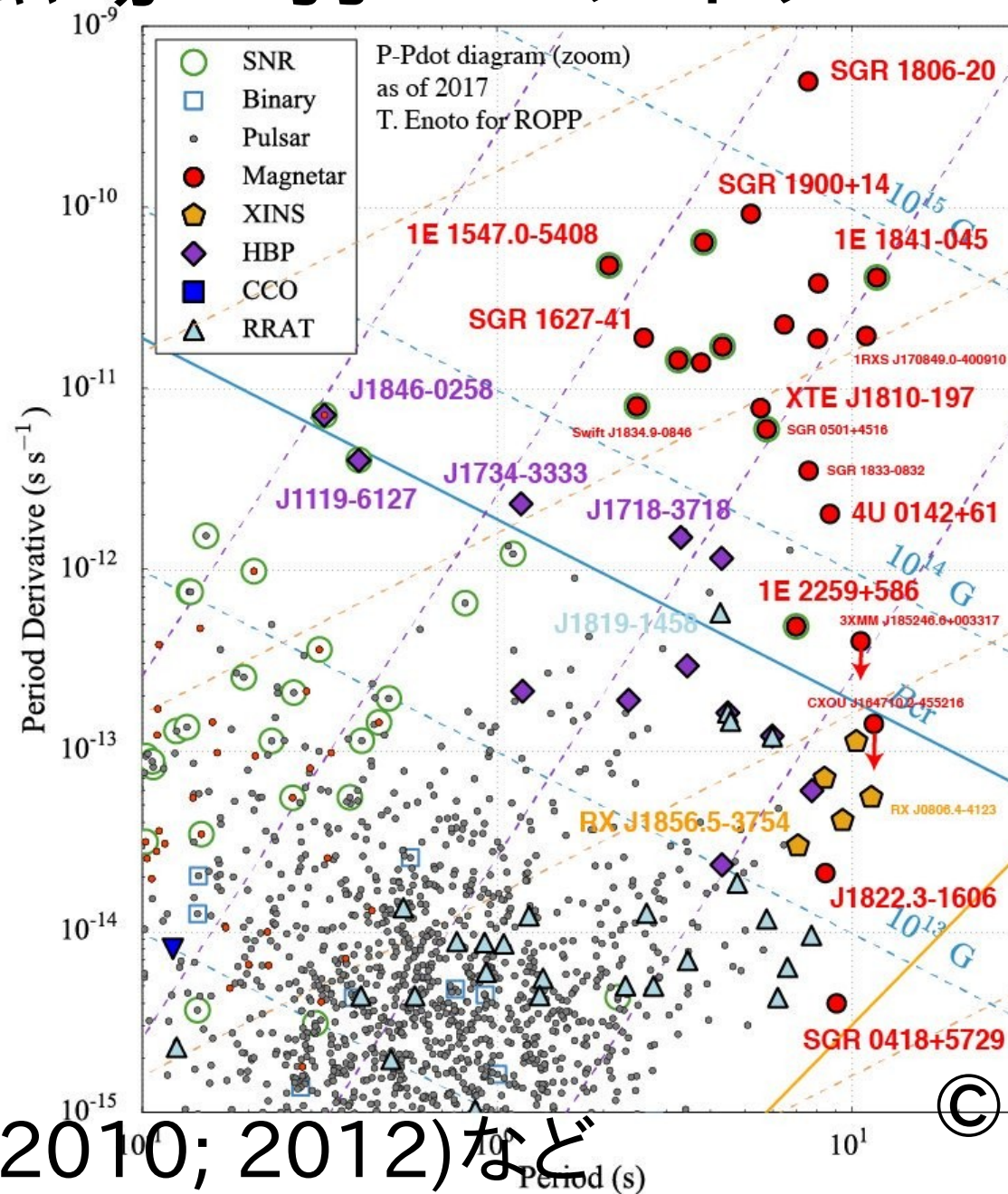
磁場が一定であるとするると解析的に時間積分できて

$$\frac{1}{2} (P^2 - P_0^2) = \frac{8 \pi^2 R^6 B^2}{3 c^3 I} \tau_c = P \dot{P} \tau_c$$

初期周期が現在の周期に比べて短いとして、 P_0 を無視すると特性年齢を得る

$$\tau_c \equiv \frac{P}{2 \dot{P}}$$

磁場の弱いマグネター



Rea et al. (2010; 2012)など

©榎戸さん

磁場の弱いマグネター

1. SGR 0418+5729 (Rea+ 2010, 2013)

$B \sim 6 \times 10^{12} \text{ G}$, $\tau_c \sim 36000 \text{ kyr}$. $P \sim 9.1 \text{ s}$

2. SWIFT J 1822.3-1606 SGR 1822-1606 (Rea+ 2012)

$B \sim 1.4 \times 10^{13} \text{ G}$, $\tau_c \sim 6300 \text{ k yr}$. $P \sim 8.4 \text{ s}$

3. CXOU J164710.2-455216 (An et al. 2013)

$B < 7 \times 10^{13} \text{ G}$, $\tau_c \sim > 420 \text{ kyr}$. $P \sim 10.6 \text{ s}$

4. 3XMM J 185246.6+003317 (Rea+ 2014)

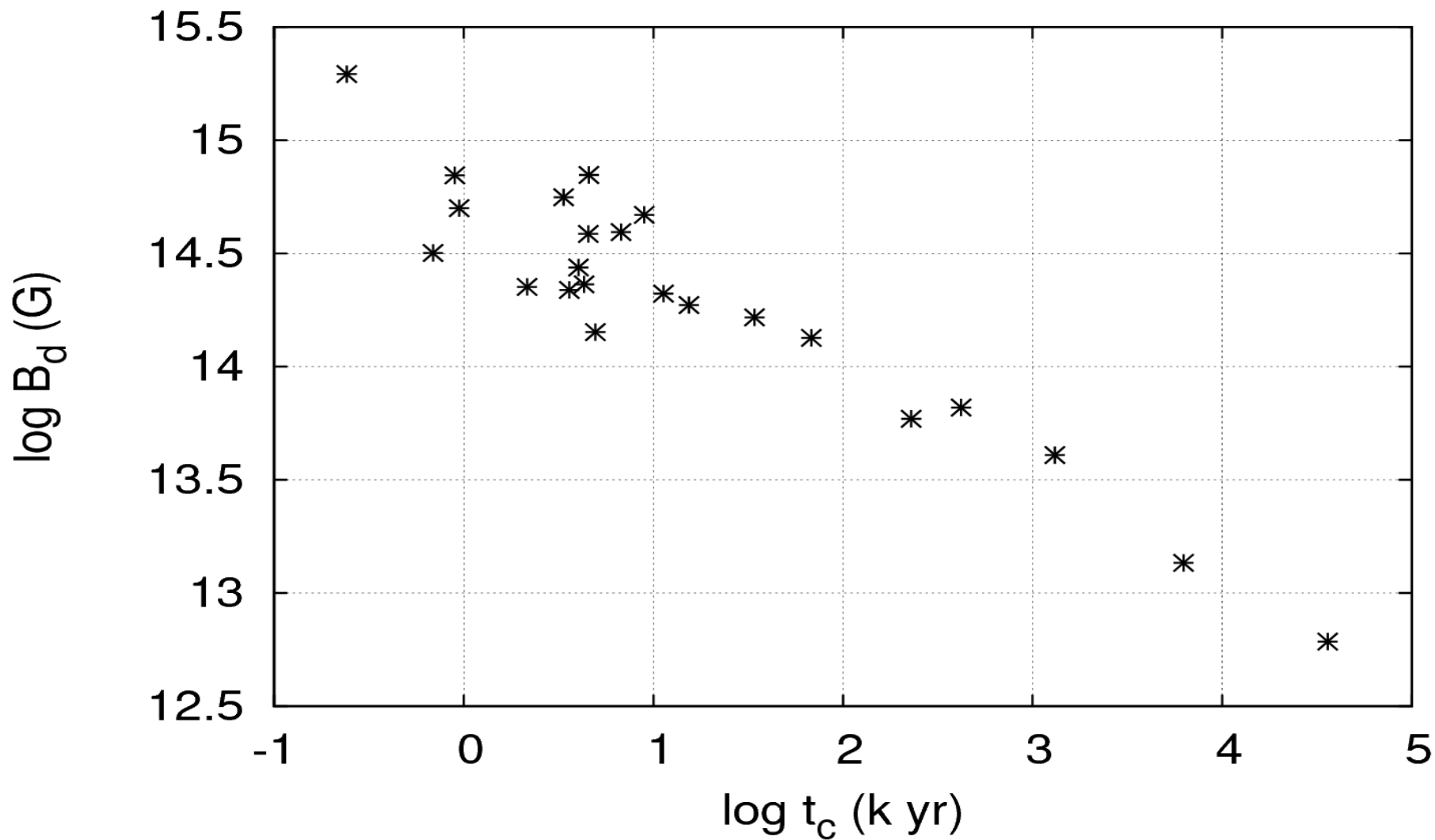
$B < 4.1 \times 10^{13} \text{ G}$, $\tau_c \sim > 1300 \text{ kyr}$. $P \sim 10.6 \text{ s}$

5. 1E 2259+586 (Dib & Kaspi 2014)

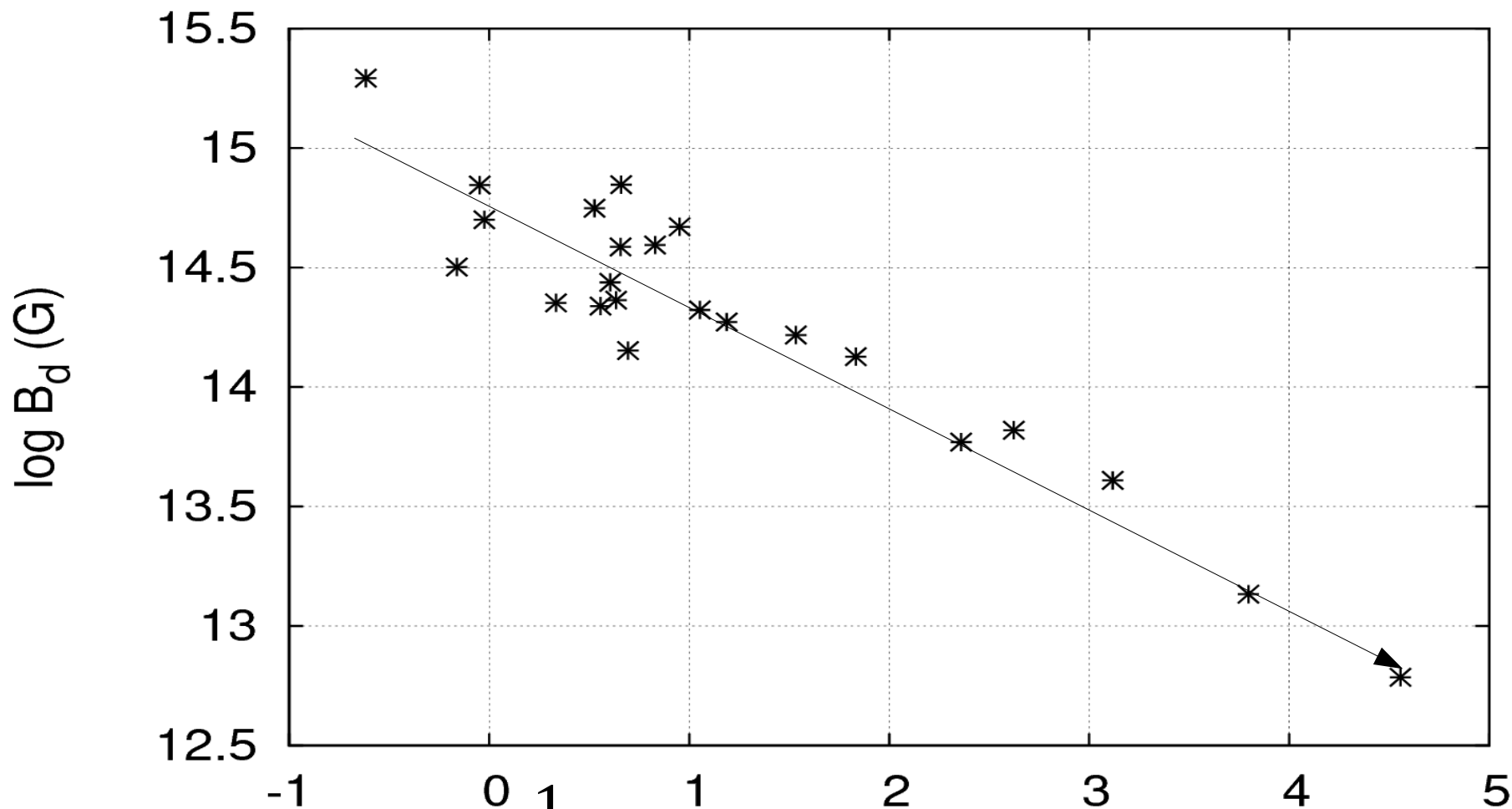
$B \sim 5.9 \times 10^{13} \text{ G}$, $\tau_c \sim 230 \text{ kyr}$. $P \sim 6.97 \text{ s}$

回転は典型的だが特性年齢が大きく、磁場が弱い

マグネターの特性年齢と双極子磁場



マグネターの特性年齢と双極子磁場



$$\frac{E_{mag}}{L_x} \sim \frac{\frac{1}{8\pi} B^2 R^3 \log t_c \text{ (k_yr)}}{L_x} = \frac{10^{47} \text{ erg}}{10^{35} \text{ erg/s}} \sim 10^4 \text{ k yr}$$

マグネターまとめ

- マグネター (磁気的なエネルギーで輝く)
 - 磁場が強く (10^{14-15} G)、特性年齢が若い (\sim k yr.)
 - 回転が遅い (\sim 数秒)
- 磁気エネルギーを解放し磁場は減少？

$$\frac{E_{mag}}{L_x} \sim \frac{\frac{1}{8\pi} B^2 R^3}{L_x} = \frac{10^{47} \text{ erg}}{10^{35} \text{ erg/s}} \sim 10^4 \text{ k yr}$$

磁場減衰の計算

1. 現象論的なモデル

- 現象論的なモデルを仮定してフィティングする

Colpi et al. (2000); Dall'Osso et al. (2012)

Nakano et al. (2015)

2. 物理的な計算に基づいたモデル

- Hall drift
- Ambipolar 拡散

現象論的モデル

- Colpi et al. (2000); Dall'Osso et al.(2012); Nakano et al. (2015)

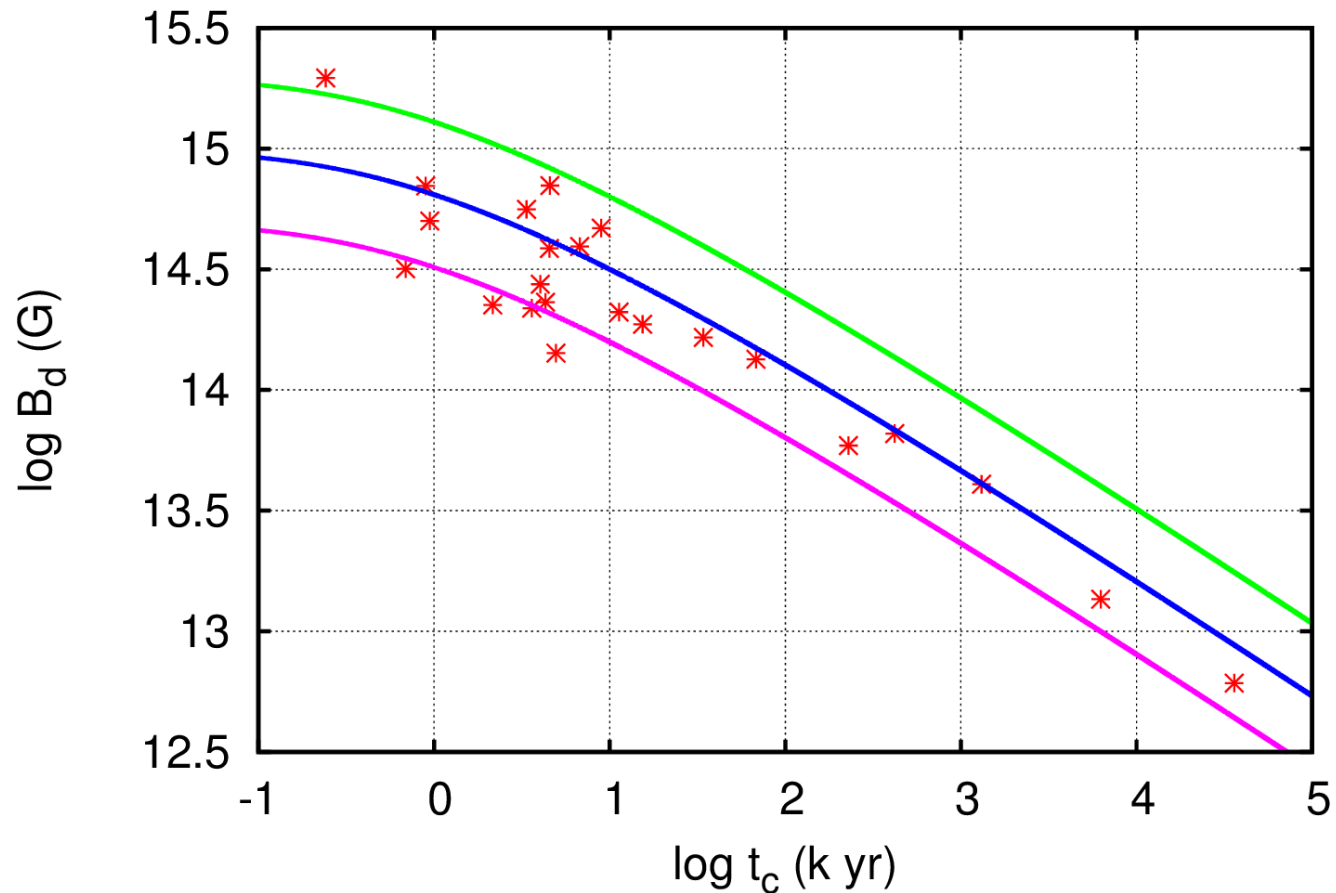
$$\frac{dB}{dt} = -A B^{\alpha+1}$$

$$A = \left(\tau_d (B^{15})^\alpha \right)^{-1} \quad \tau_d = \left(A (B^{15})^\alpha \right)^{-1} = 1 \text{ k yr} .$$

- (磁場が 10^{15} Gの時の減衰タイムスケールを1kyr とする)

現象論的モデル

$$\alpha = 1.75$$



$1.5 < \alpha < 1.75$ ぐらいがよく合う

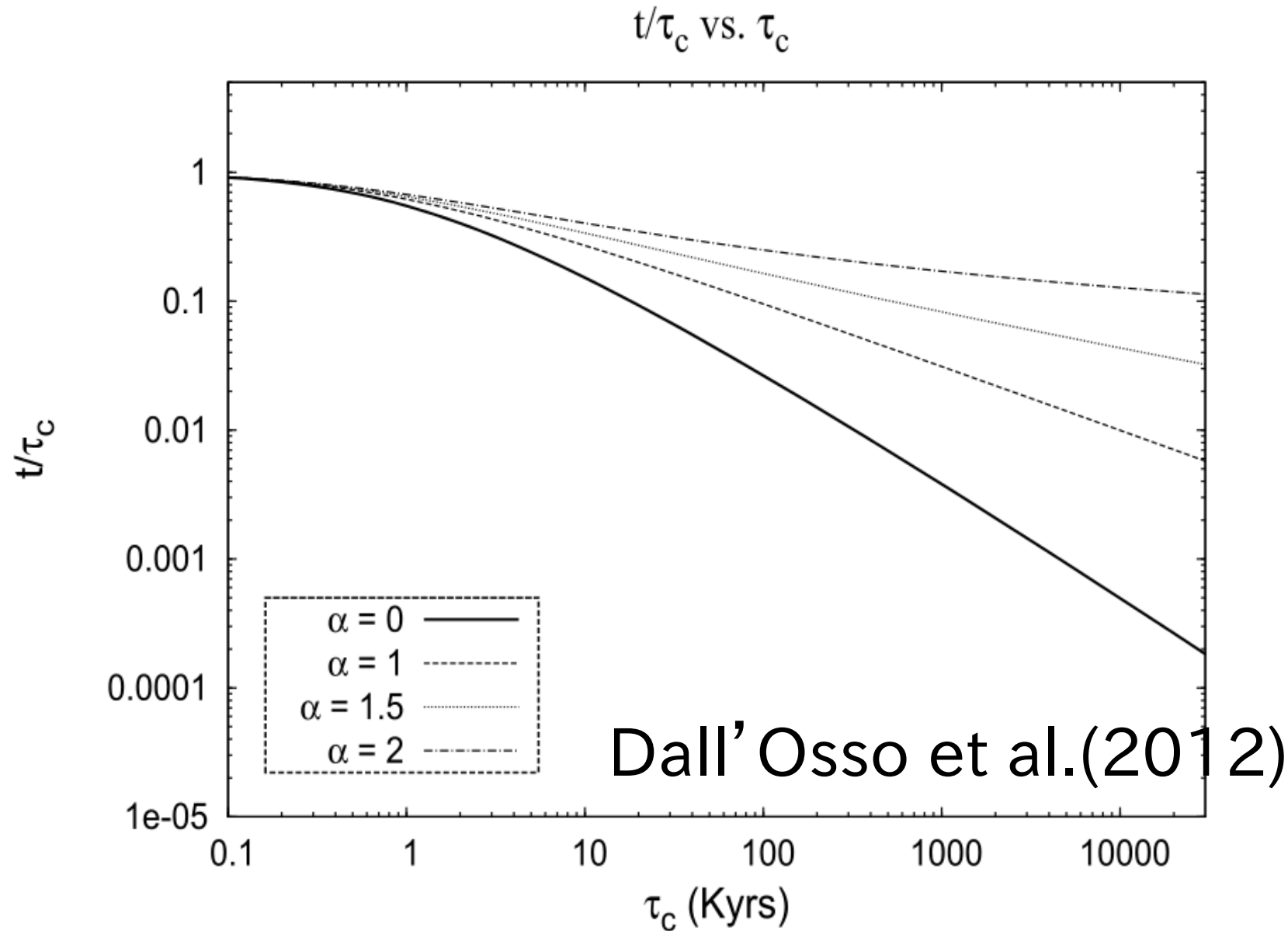
(Dall'Osso et al.(2012); Nakano et al. (2015))

磁場が変化すると、

$$\frac{dP^2}{dt} = \frac{16 \pi^2 R^6 B^2}{3 c^3 I} \quad \tau_c \equiv \frac{P}{2 \dot{P}}$$

- 磁場が一定 \rightarrow 周期無限大: 特性年齢 = 年齢
- 磁場が減衰 \rightarrow 終端周期へ: 特性年齢 > 年齢
- 磁場が増大 \rightarrow 減少が加速: 特性年齢 < 年齢

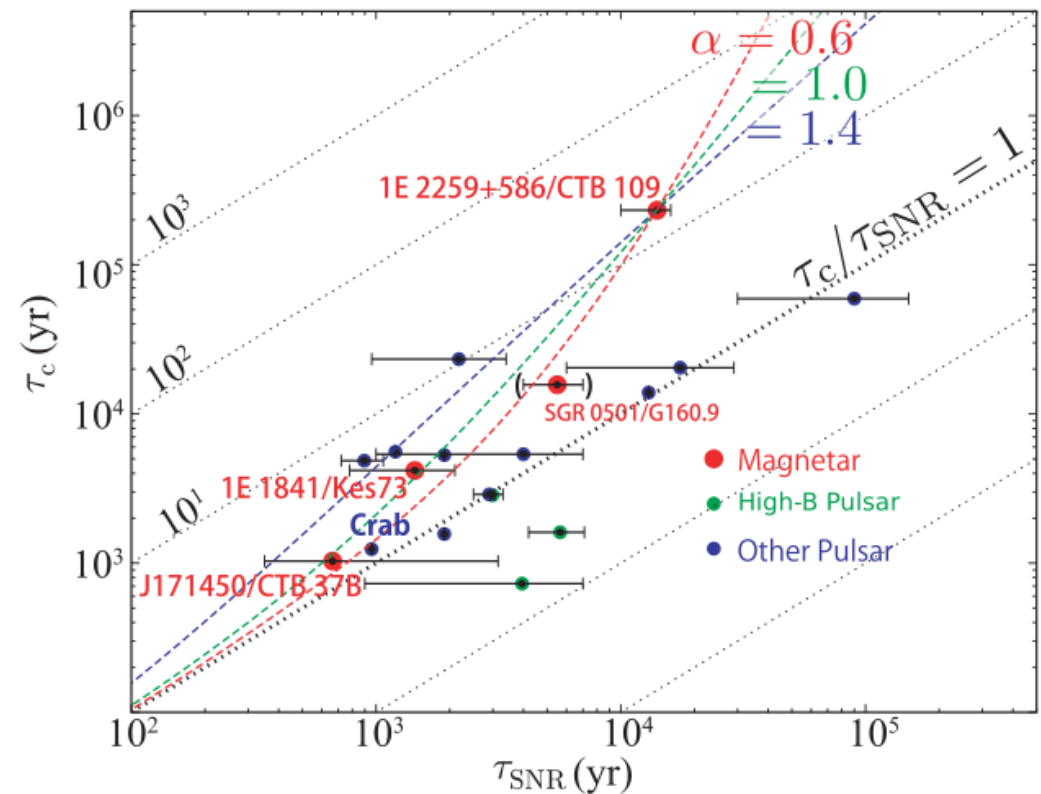
磁場が減衰するので特性年齢より若い (see also Nakano et al. 2015)



Nakano et al. (2015)

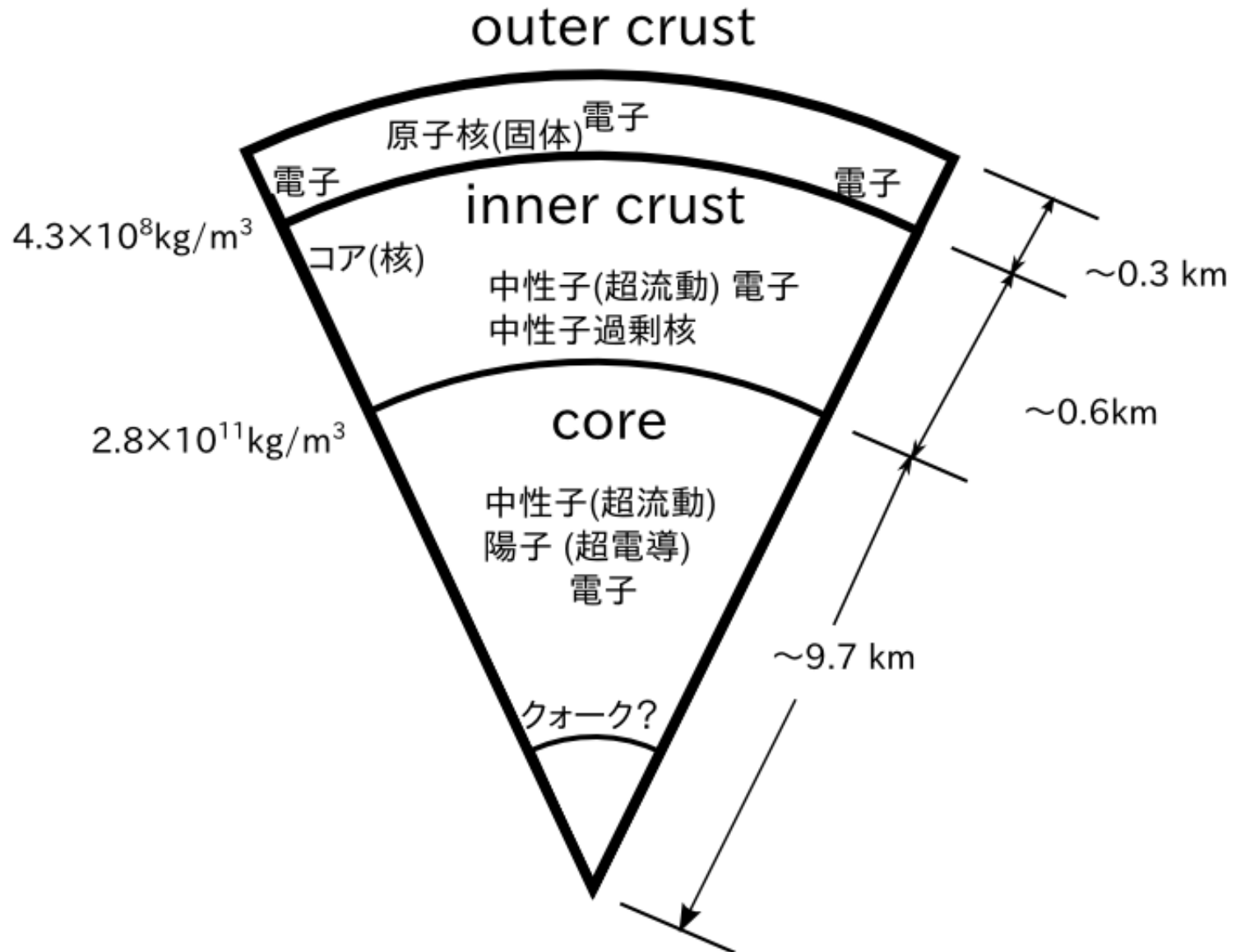
- Low field マグネター 1E 2259+586
 - $B \sim 5.9 \times 10^{13}$ G、 $\tau_c \sim 230$ kyr. $P \sim 6.97$ s
- 超新星残骸 CTB 109

$\tau \sim 14$ kyr



磁場の起源とその進化

マグネターの内部構造と組成



磁場の起源

- コア・クラストにおける電流(荷電粒子)
 - 化石磁場
 - (差動)回転による増幅 (ダイナモ, MRI)
 - Thompson & Duncan (1992); Sawai & Yamada (2014)
 - クラスト内部の熱磁気効果
 - Blandford et al. (1983); Ho, Blandford, & Hernquist (2004)
- コア中心部分での強磁性
 - Makishima et al. (1999); Tatsumi (2000);
Eto, Hashimoto & Hatsuda (2013); Hashimoto (2015)

3流体(npe)モデル

定常を仮定し、慣性項を落とす

Goldreich & Reisenegger (1992)

$$0 = -n_n \nabla \mu_n - n_n \frac{\mu_n}{c^2} \nabla \phi - \sum_{j \neq n} \gamma_{nj} n_n n_j (\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_j),$$

$$0 = -n_c \nabla \mu_c - n_c \frac{\mu_p}{c^2} \nabla \phi + en_p (\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}_p}{c} \times \mathbf{B}) - \sum_{j \neq p} \gamma_{pj} n_p n_j (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_j),$$

$$0 = -n_c \nabla \mu_e - n_c \frac{\mu_e}{c^2} \nabla \phi - en_c (\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}_i}{c} \times \mathbf{B}) - \sum_{j \neq p} \gamma_{ej} n_e n_j (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_j),$$

3流体(npe)モデル

Goldreich & Reisenegger (1992)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times [(\mathbf{v}_A + \mathbf{v}_H) \times \mathbf{B}] - \nabla \times \left(\frac{c^2 \nabla \times \mathbf{B}}{4\pi\sigma} \right)$$

$$\mathbf{v}_H \equiv \frac{\gamma_{en} - \gamma_{pn}}{\gamma_{cn}} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_e) = \frac{c(\gamma_{en} - \gamma_{pn})}{ne\gamma_{cn}} \mathbf{j}.$$

$$\mathbf{v}_A \equiv \frac{\gamma_{pn}(\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_n) + \gamma_{en}(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n)}{\gamma_{pn} + \gamma_{en}}.$$

星内部の荷電粒子(磁場)進化

- 以下、磁場が荷電粒子のみによって担われているとすると
 - Ohm 散逸 ($\sim B^0$)
 - Hall 効果 ($\sim B^1$)
 - Ambipolar 拡散 ($\sim B^2$)

$$\frac{dB}{dt} = \nabla \times (D_{Ohm} \nabla \times B) + \nabla \times (D_{Hall} B \times (\nabla \times B)) - \nabla \times (D_{Ambipolar} (\nabla \times B) \times B \times B)$$

- 数kyr. ぐらいのタイムスケールで効いて欲しい

コアでのOhm散逸

Baym et al. (1969a,b)

- コアの電気伝導度が非常に高く、Ohm散逸のタイムスケールも非常に長い

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

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

→ ほとんど効かない

クラストでのOhmic decay

$$t_{Ohmic} \sim \frac{4\pi\sigma L^2}{c^2}$$

$$t_{Ohmic} \sim 5 \times 10^3 \left(\frac{L}{10^5 \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{\sigma}{10^{24} \text{ s}^{-1}} \right) k \text{ yr}.$$

- 局所的な磁場(小さい磁場)や温度が高い(σ が小さい)とよく効いてくる

Hall 効果

Naito & Kojima (1994)
Goldreich & Reisenegger (1992)

- クラストの磁場が自由電子によって担われているとする

$$\frac{dB}{dt} = \nabla \times (D_{Ohm} \nabla \times B) + \nabla \times (D_{Hall} B \times (\nabla \times B))$$

$$t_{Hall} \sim 5.0 \times 10^2 \left(\frac{B}{10^{15} G} \right)^{-1} \left(\frac{L}{10^5 cm} \right)^2 \left(\frac{\rho}{10^{14} g/cm^3} \right) kyr.$$

$$R_m = \left(\frac{t_{Ohm}}{t_{Hall}} \right) = \frac{\sigma B}{e c n_e} = 10 - 100 \left(\frac{B}{10^{15} G} \right) \left(\frac{\sigma}{10^{24}} \right)$$

- 電子がローレンツ力によってドリフトすることによる (≠拡散)
- 高次の磁場が生まれ、トロイダル磁場とポロイダル磁場が入れ替わる

コアでのAmbipolar diffusion

Goldreich & Reisenegger (1992)

- 中性粒子と荷電粒子がある時におきる

$$t_{ambipolar} \sim 3 \left(\frac{B}{10^{15} G} \right)^{-2} \left(\frac{L}{10^5 cm} \right)^2 \left(\frac{T}{10^8 K} \right)^2 kyr.$$

- 多流体(荷電粒子)の拡散による磁場の散逸
- 磁場が強いと非常に速いタイムスケールで効く
 - 陽子、電子、中性子の運動(進化)を考えなければ
ならない

星内部の磁場進化

- 磁場が 10^{15} Gの時のタイムスケール
 - Ohm 散逸 ($\sim B^0$) コア: $\sim 10^{13}$ yr. クラスト: ~ 5000 k yr.
 - Hall 効果 ($\sim B^1$) クラスト: ~ 100 k yr.
 - Ambipolar 拡散 ($\sim B^2$) コア: ~ 1 k yr.

$$\frac{dB}{dt} = \nabla \times (D_{Ohm} \nabla \times B) + \nabla \times (D_{Hall} B \times (\nabla \times B)) - \nabla \times (D_{Ambipolar} (\nabla \times B) \times B \times B)$$

- 数kyr. ぐらいのタイムスケールで効いて欲しい

現象論は $1.5 < \alpha < 1.75$ を示唆

マグネター磁場進化の現象論モデル II

新しい現象論的なモデル

コア磁場(Ambipolar 拡散) + クラスト磁場(Hall 効果)

$$B_d = B_{cr} + B_{co} \quad \tau_{Hall} = 100 \text{ k yr} \cdot \tau_{Amb} = 1 \text{ k yr} \cdot$$

$$\frac{dB_{cr}}{dt} = -D_{Hall} B_{cr}^2 \quad \frac{dB_{co}}{dt} = -D_{Amb} B_{co}^3$$

従来の現象論的なモデル

$$\frac{dB}{dt} = -A B^{\alpha+1}$$

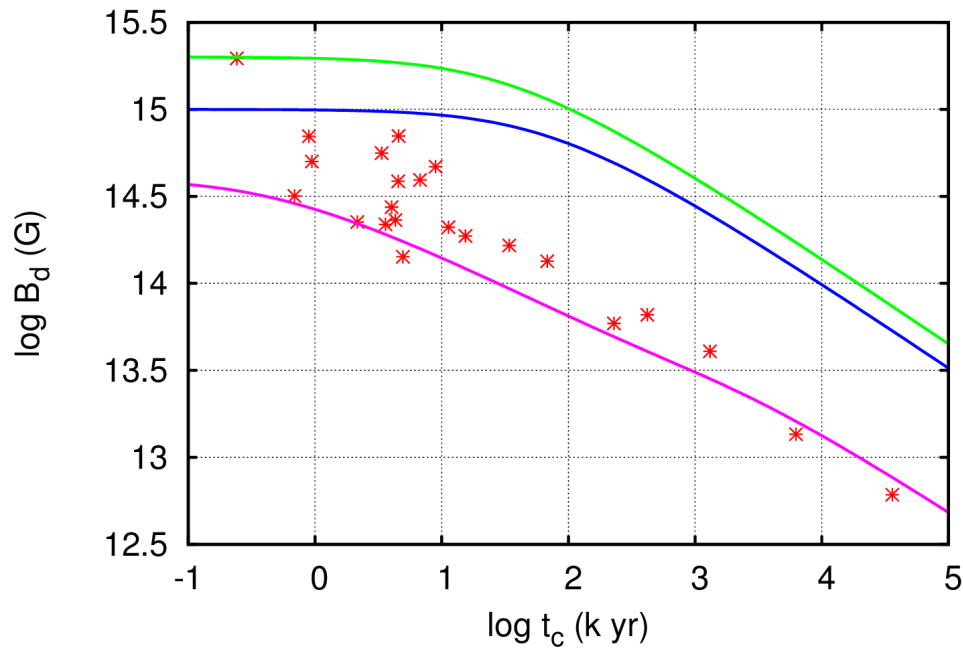
$$\tau = 1000 \text{ yr} \cdot 1.5 < \alpha < 1.75$$

(磁場の減衰タイムスケールを1 k yr とする)

新しい現象論の解

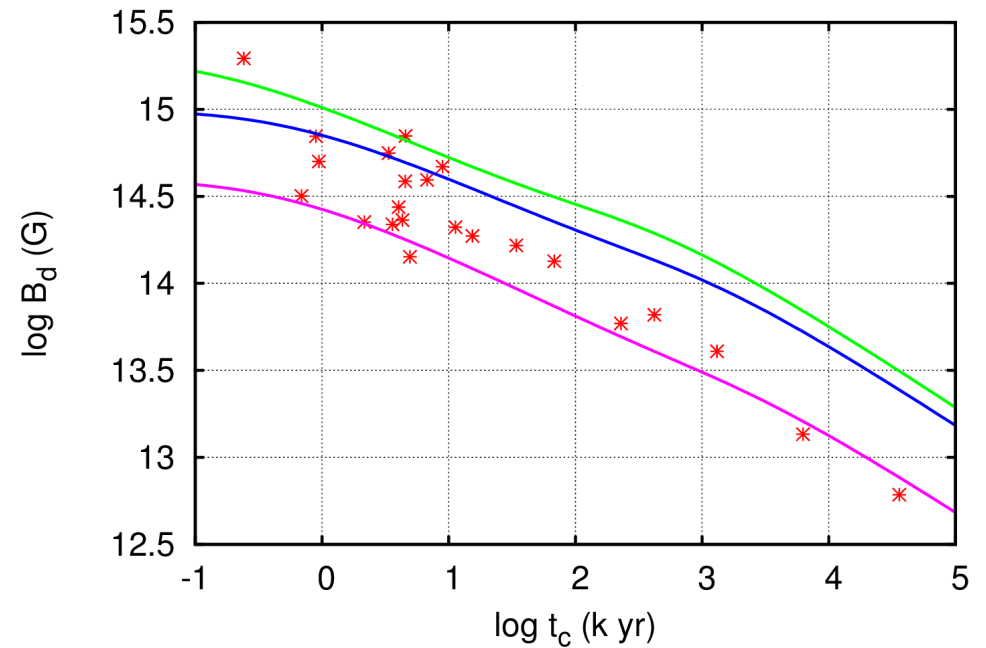
• クラスト磁場優勢

$$B_{cr} : B_{co} = 90 : 10$$



コア磁場優勢

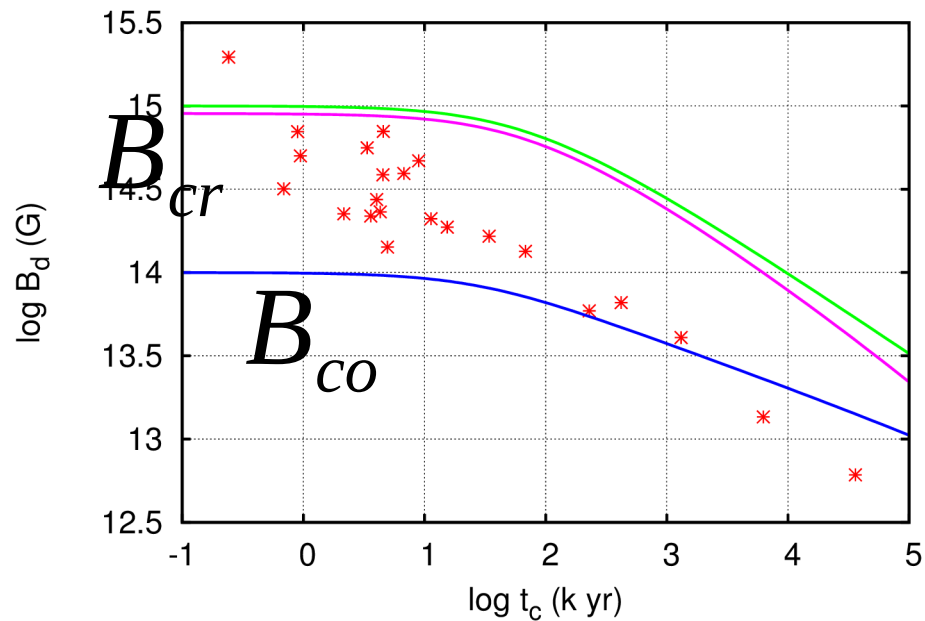
$$B_{cr} : B_{co} = 10 : 90$$



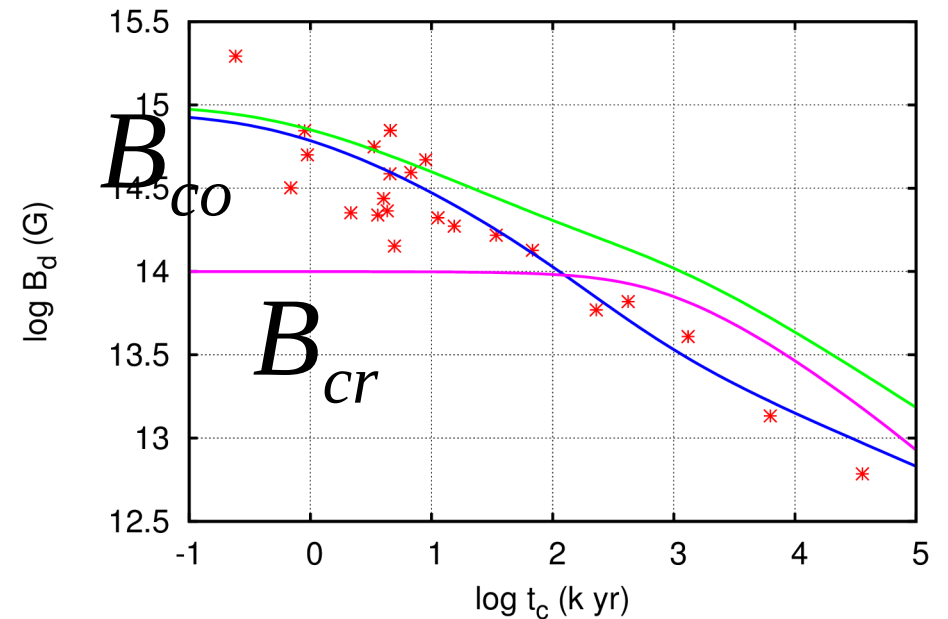
コア磁場が優勢のモデルがよく合う

新しい現象論の解

- クラスト磁場優勢



- コア磁場優勢

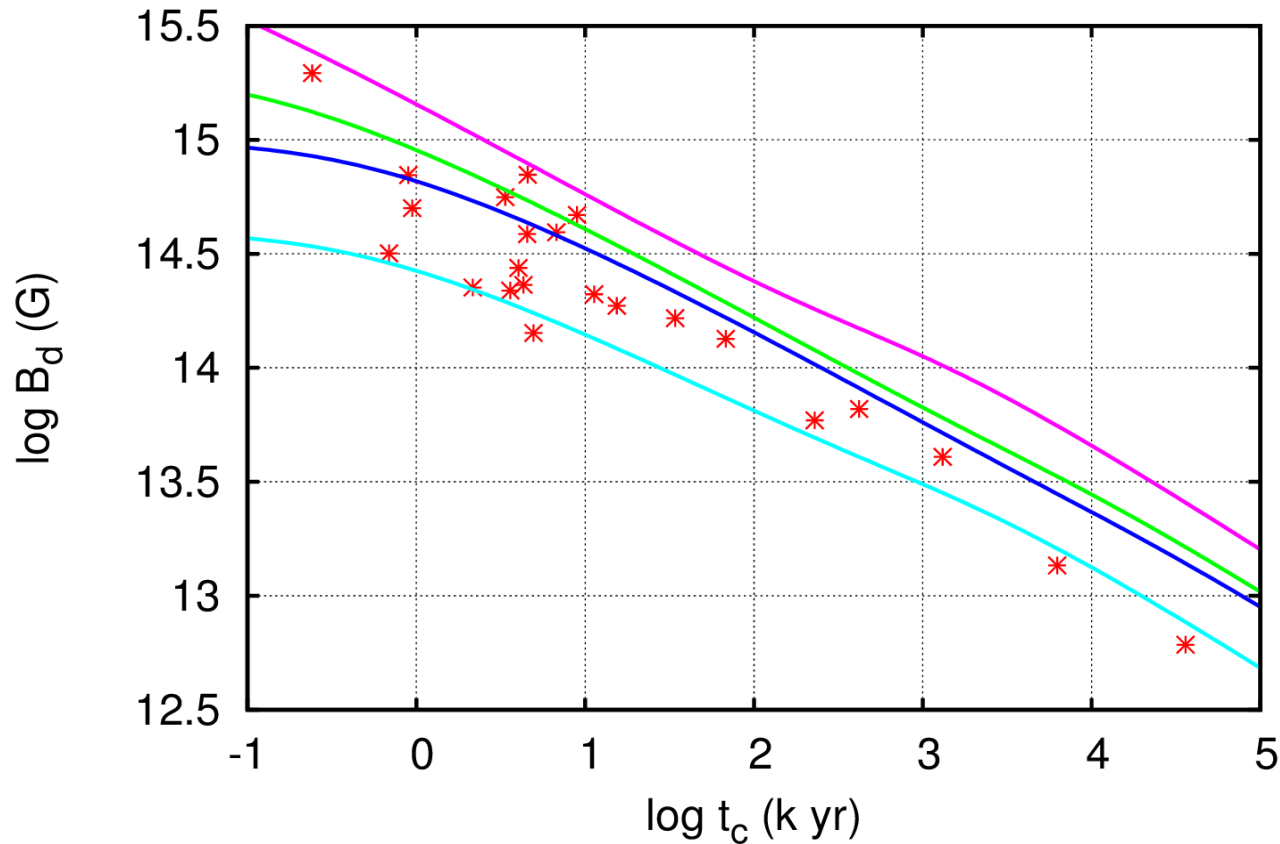


- コア磁場が優勢の時は、最初はAmbipolar拡散が優勢で、100k yr 程度からHall効果が優勢に

新しい現象論の解

コア磁場がとても強い

$$B_{cr} : B_{co} = 1 : 99$$



- 初期のコア磁場がとても強くても合う

結果のまとめ

- コア磁場が強いモデルが合う
- 強いコア磁場でのAmbipolar 拡散による速い減衰
 - クラストでのHall効果によるゆっくりとした減衰
 - 10kyr程度でコア磁場優勢からクラスト磁場優勢へ
- 若いマグネターはAmbipolar拡散によるコア磁場
- 老齢なマグネターは Hall効果による複雑な表面磁場

Ambipolar 擴散

最近の研究

- オーダー評価(空間構造は無視)(Goldreich & Reisenegger 1992)
- コア磁場のみの一次元進化計算
(Hoyos et al. 2008;2010; Beloborodov & Li 2016)
- コア磁場のみの二次元で速度のみ計算
 - 中性子の数密度一定(Passamonti et al. 2017)
 - 任意の数密度分布、ただし定式化のみ(Gusakov et al. 2017)
- コア磁場のみの二次元進化計算
 - 荷電粒子、中性子の数密度一定 (Castillo et al. 2017)

3流体(npe)モデル

定常を仮定し、慣性項を落とす Goldreich & Reisenegger (1992)

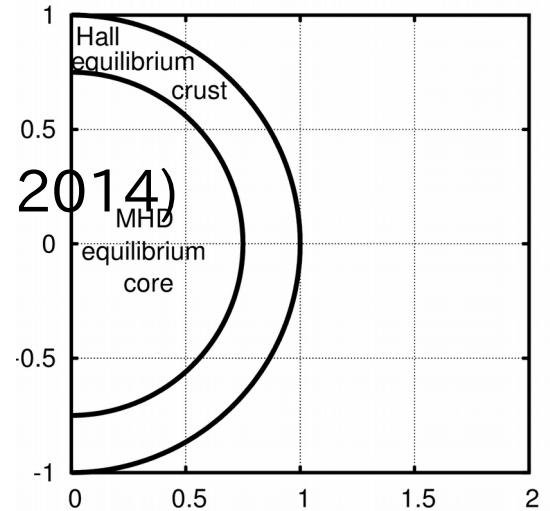
$$0 = -n_n \nabla \mu_n - n_n \frac{\mu_n}{c^2} \nabla \phi - \sum_{j \neq n} \gamma_{nj} n_n n_j (\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_j),$$

$$0 = -n_c \nabla \mu_c - n_c \frac{\mu_p}{c^2} \nabla \phi + en_p (\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}_p}{c} \times \mathbf{B}) \\ - \sum_{j \neq p} \gamma_{pj} n_p n_j (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_j),$$

$$0 = -n_c \nabla \mu_e - n_c \frac{\mu_e}{c^2} \nabla \phi - en_c (\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}_i}{c} \times \mathbf{B}) \\ - \sum_{j \neq p} \gamma_{ej} n_e n_j (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_j),$$

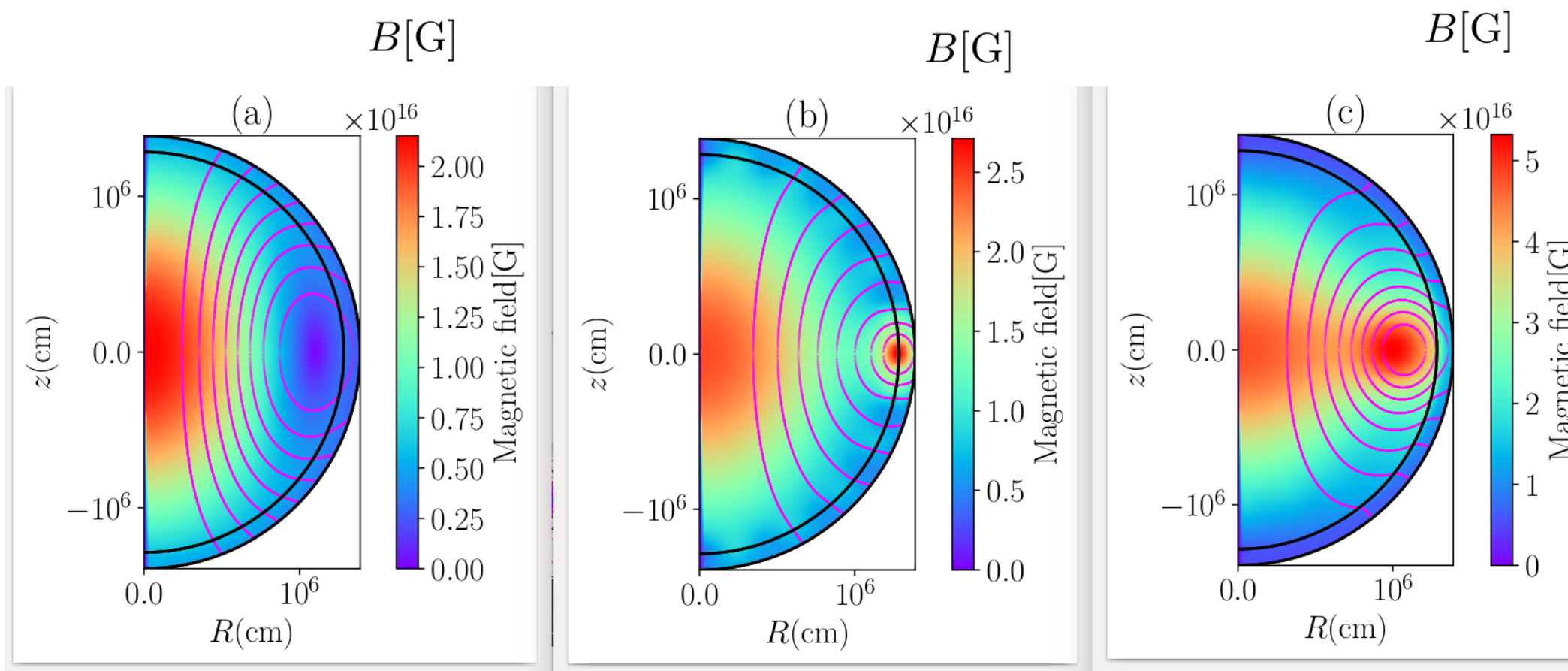
今回のモデル

- コア磁場 + クラスト磁場 (Fujisawa & Kisaka 2014)
- コア磁場は力学的に釣り合っている
(c.f. Passamonti et al. 2017b)
- 1.45 太陽質量, 半径13.9 km
 - npe 3種のコアEOS(Glendenning & Moszkowski 1991)
+ クラストEOS(Douchin & Hansel 2001)
- Gusakov et al. (2017) の定式化を改良してAmbipolar 拡散速度を計算

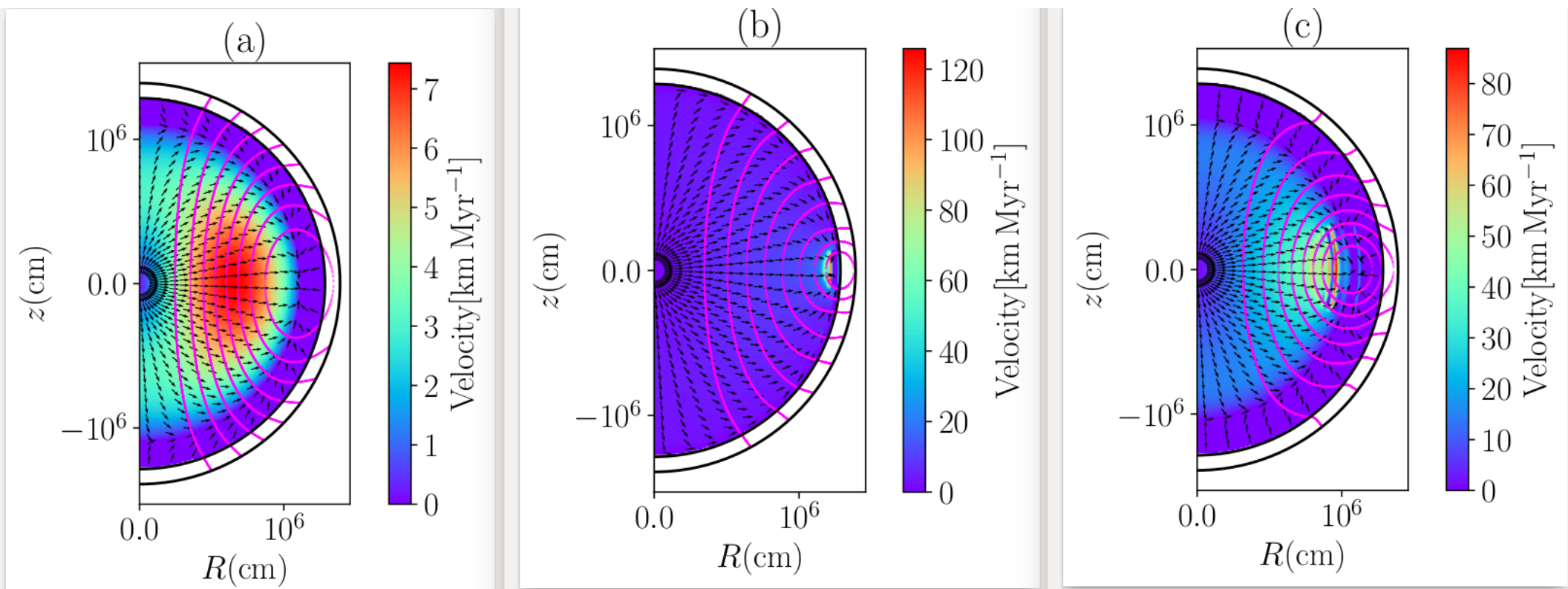


3種類の磁場構造

- 極で双極子磁場 $\sim 5 \times 10^{15}$ G コアの温度 10^9 K



Ambipolar 拡散速度



$$\tau_{Amb} \sim 0.4 \text{ k yr.}$$

$$\tau_{Amb} \sim 0.069 \text{ k yr.}$$

$$\tau_{Amb} \sim 0.5 \text{ k yr.}$$

コア磁場構造へ

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v}_A \times \mathbf{B})$$

- コア磁場のクラストとの境界条件がAmbipolar 拡散速度に影響を与える
 - コア磁場の進化に影響を与える
- 拡散速度は $\sim 10\text{km/Myr}$ 程度、散逸のタイムスケールは数百年程度
 - 現象論的なモデルと同程度になりそう
- 中性子、荷電粒子の数密度分布に依存
(Passamonti et al. 2017 より早くなった)

まとめと展望

- コア・クラスト両方の磁場を考慮してAmbipolar 拡散速度の計算を行った
- クラストの境界条件によるコア磁場構造の違いがAmbipolar 速度に影響を及ぼす
- 今後は今回求めたAmbipolar 拡散速度を元にしてコア磁場の多次元的な進化形をおこなう
- マグネターの磁場・熱進化の解明へ