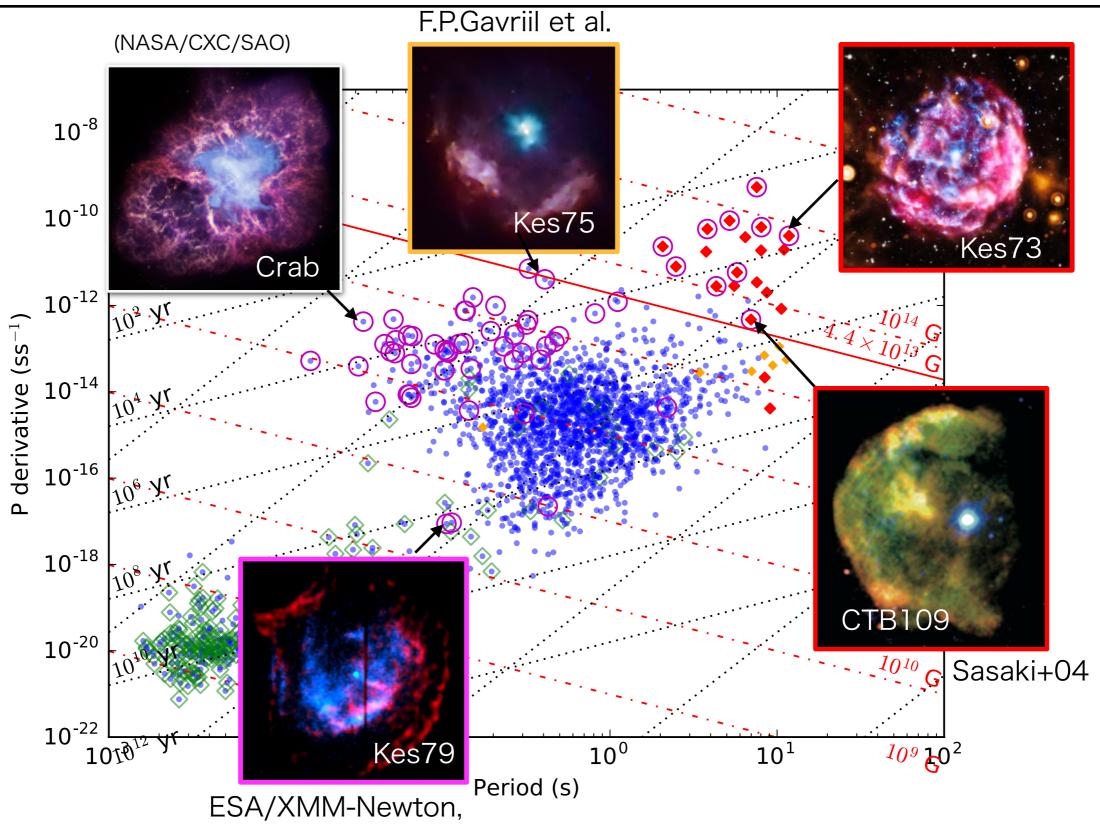
超新星残骸の観測と中性子星の磁場進化

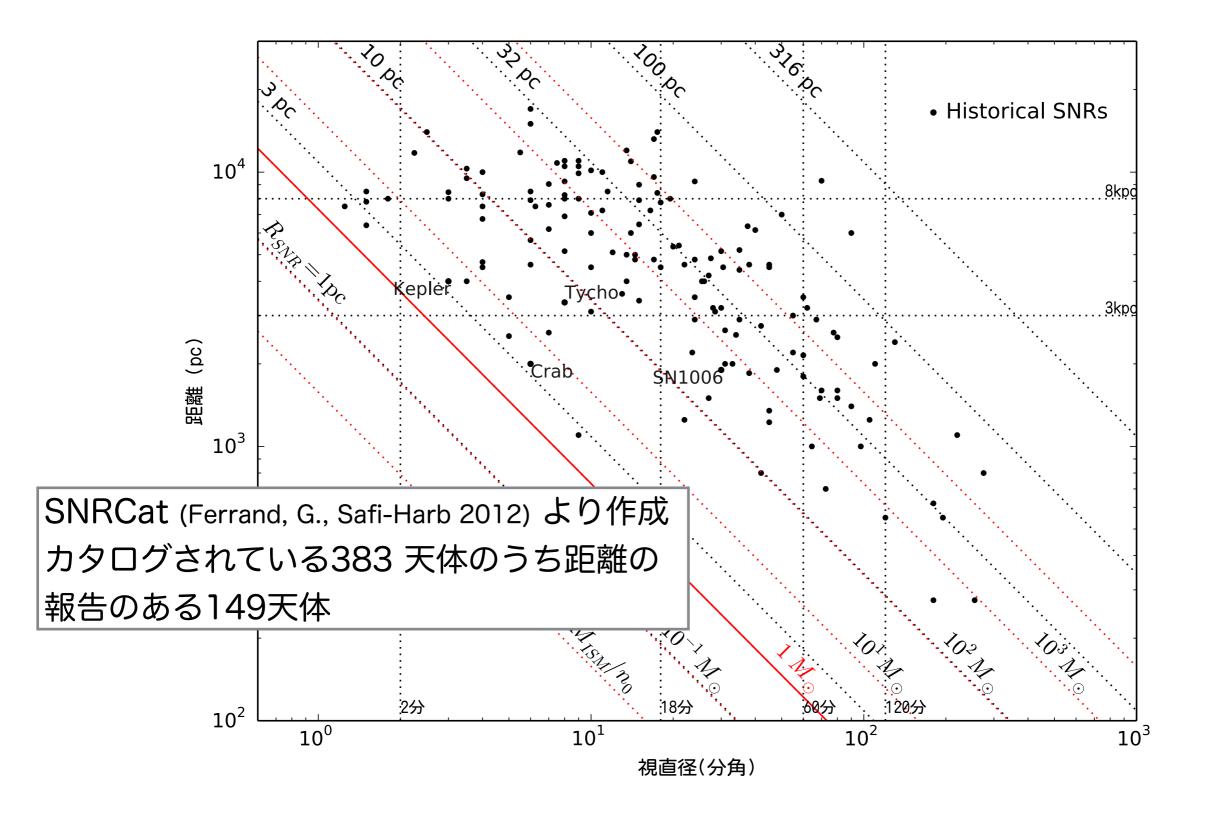
中野俊男 (理研)

1. パルサーと超新星残骸(SNR)

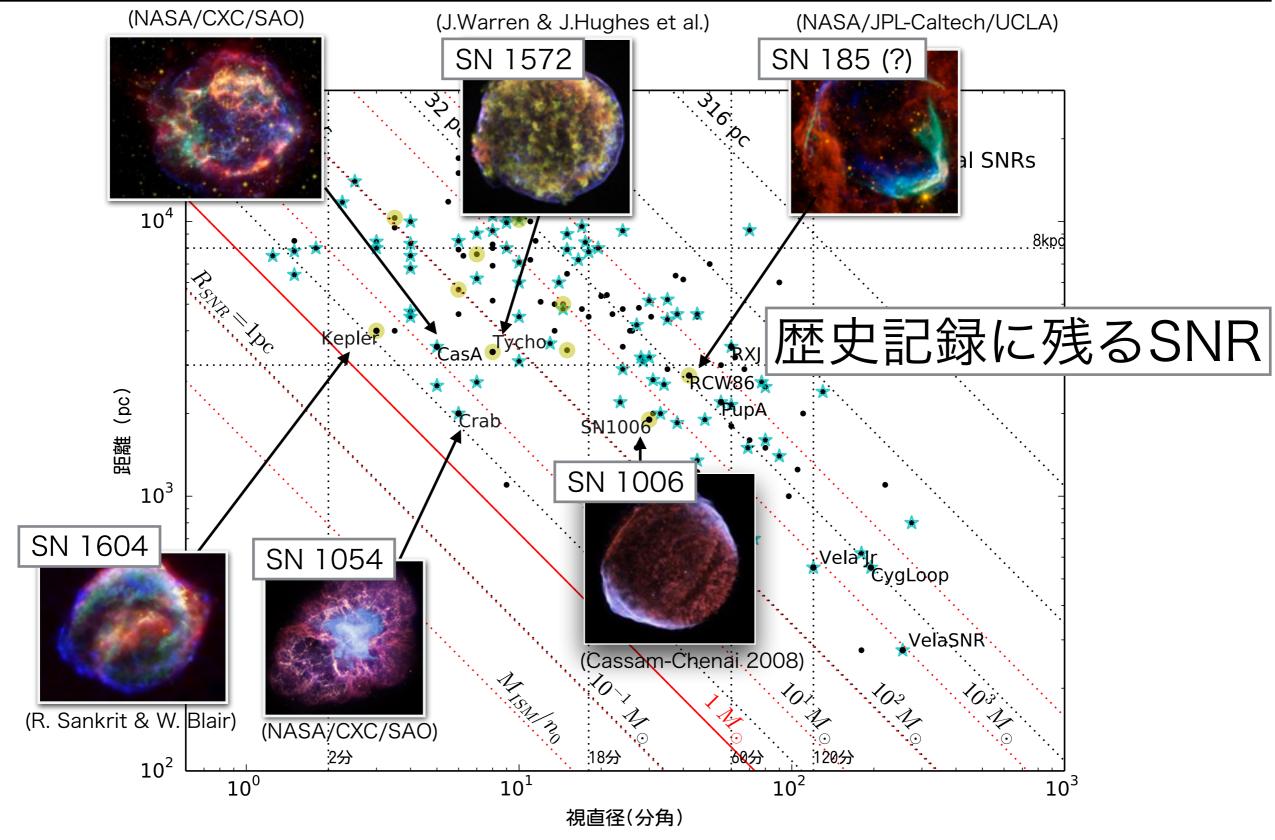


様々なタイプの中性子星に超新星残骸(SNR)が付随

2. 銀河系SNRの分布

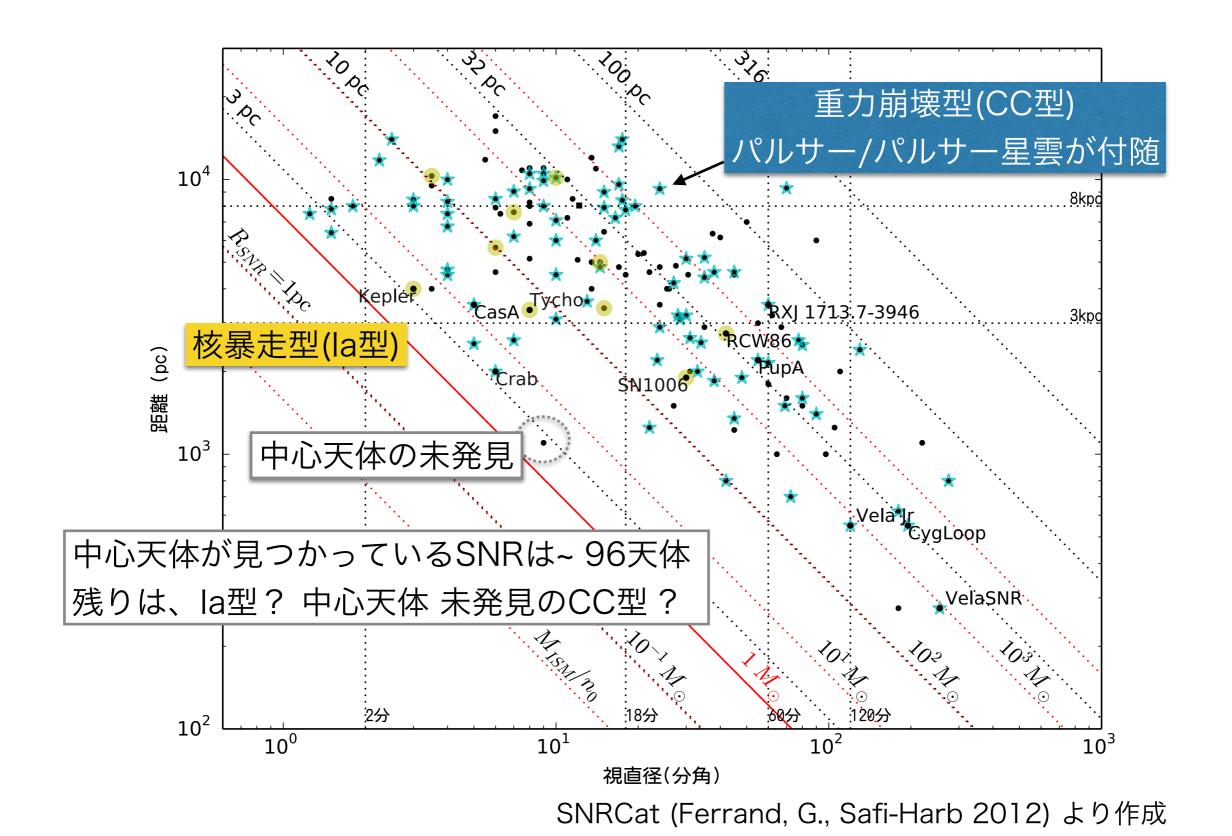


2.1 銀河系SNRの分布

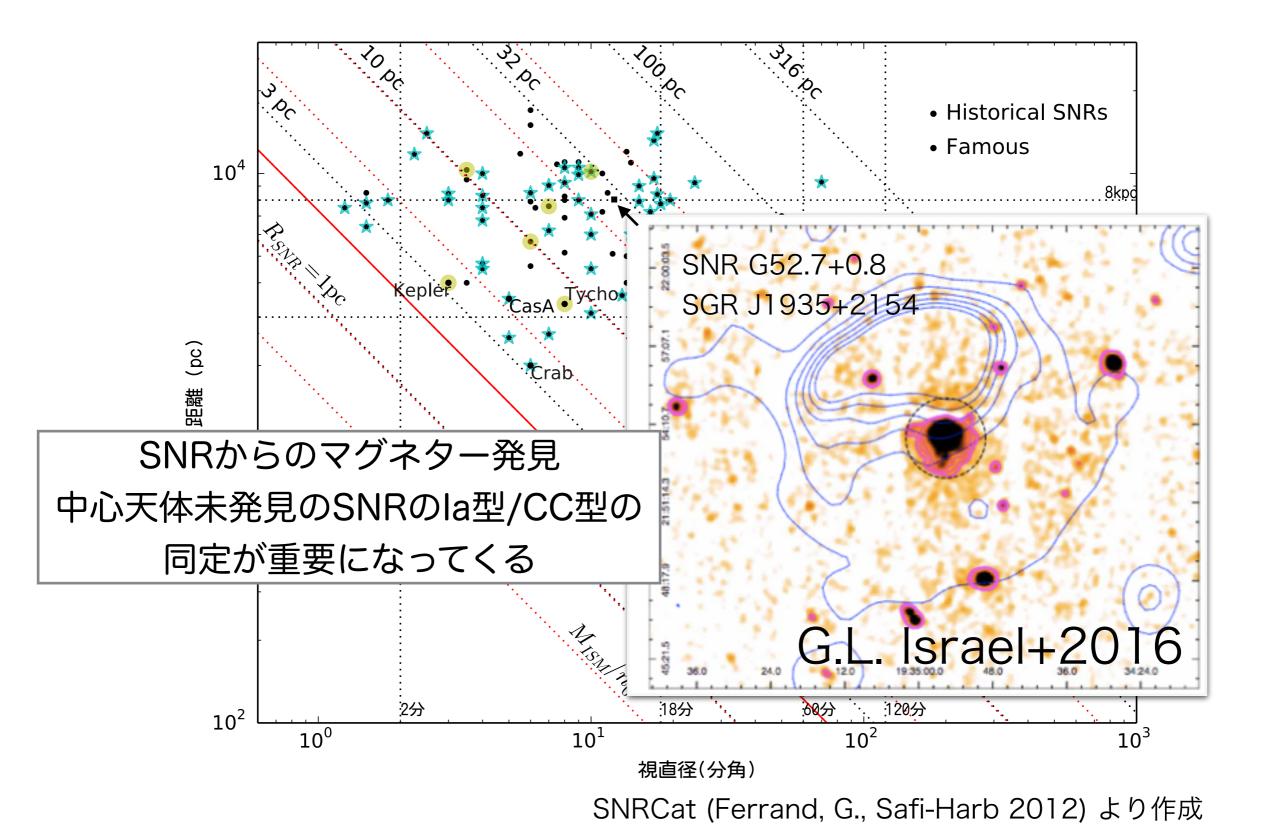


SNRCat (Ferrand, G., Safi-Harb 2012) より作成

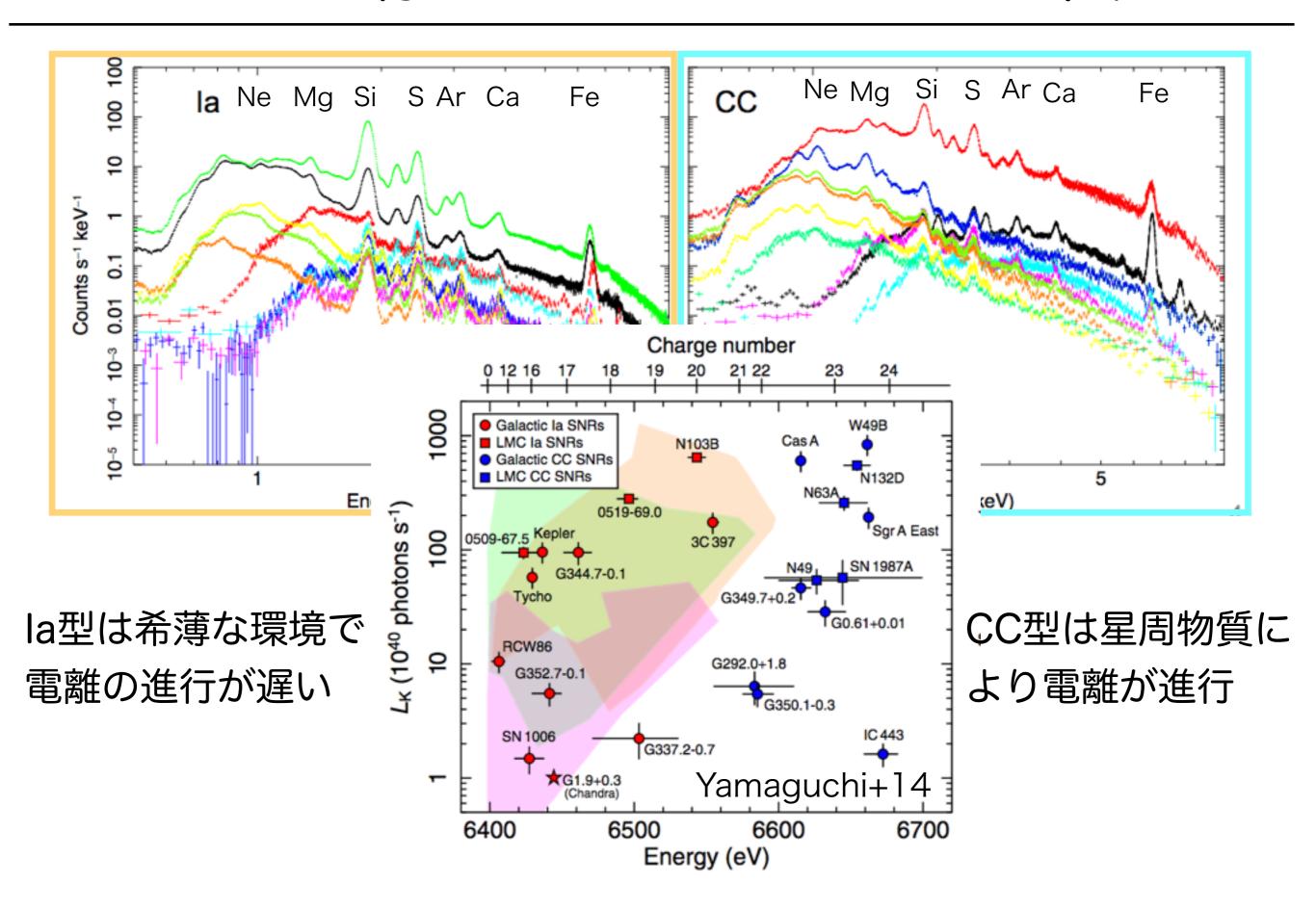
2.2 Ia型SNRとCC型SNR



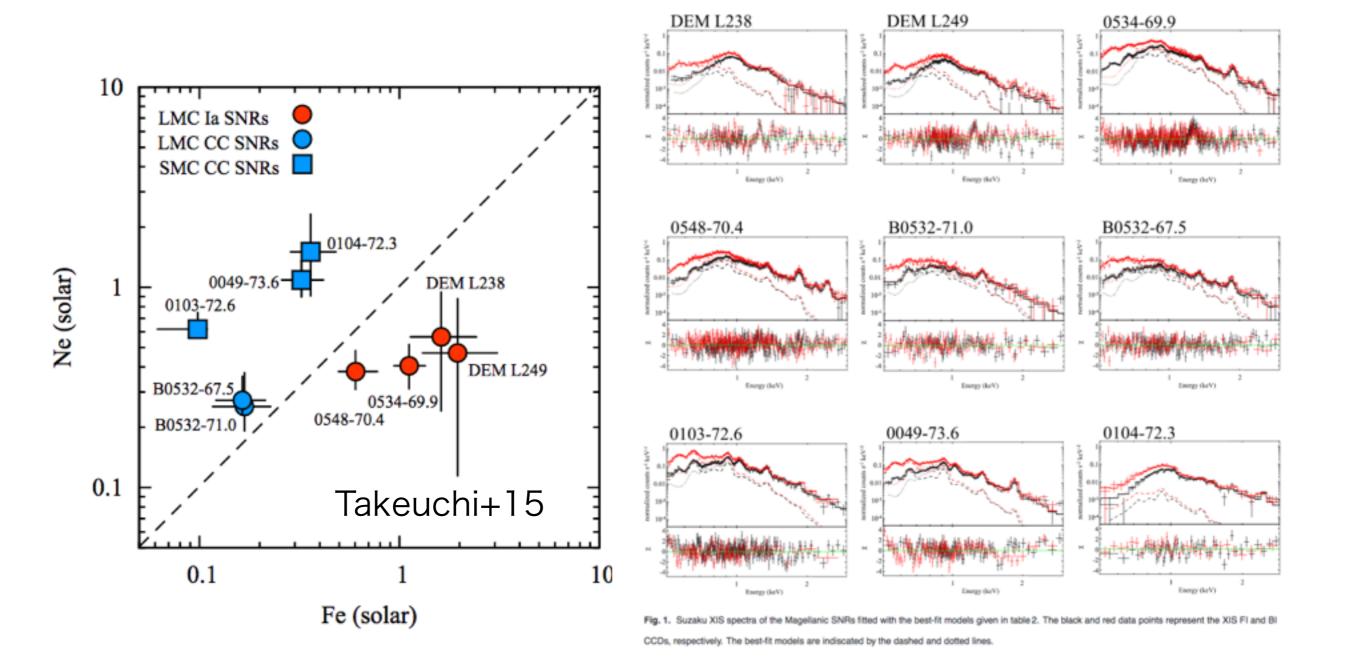
2.3 SNRからマグネター発見



3.1 Fe-Kα線による Ia型とCC型の判別

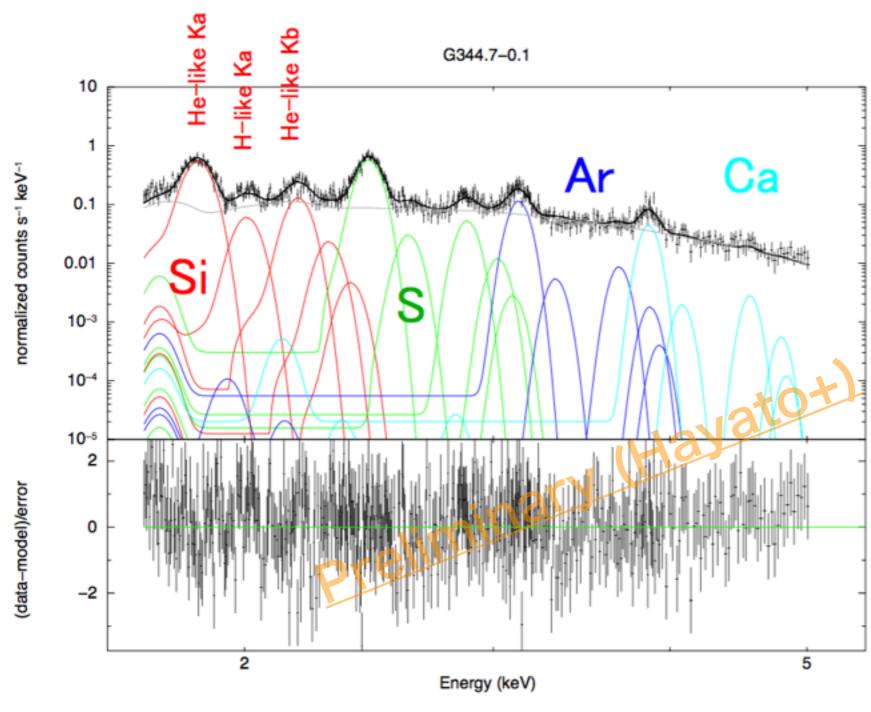


3.2 Ne/Fe アバダンス比による判別



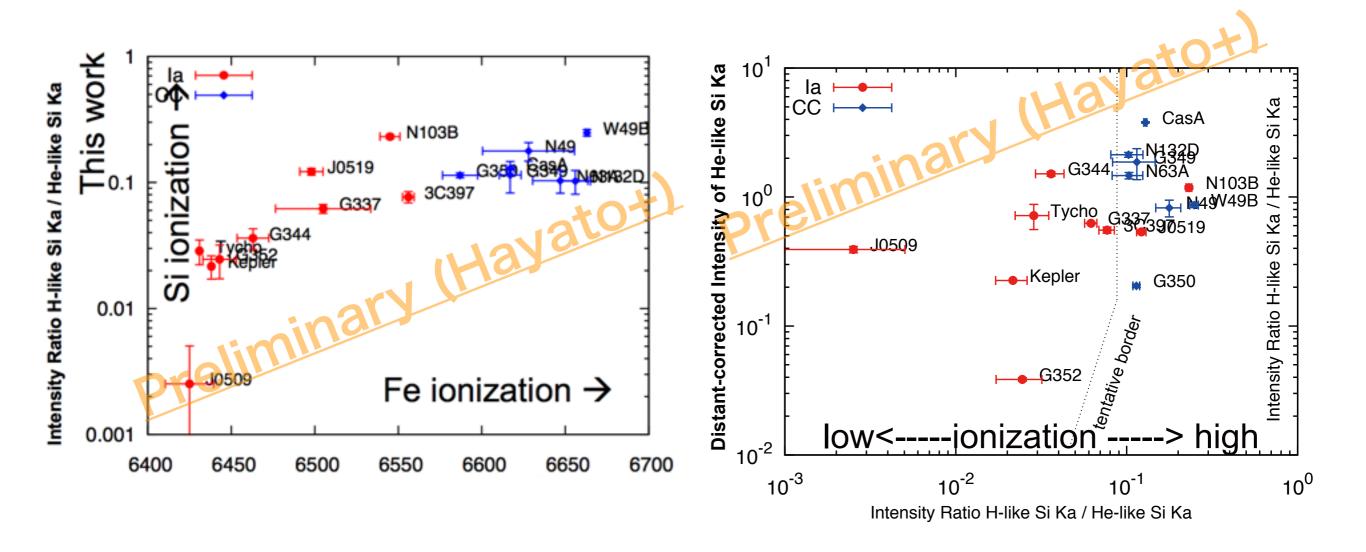
大小マゼラン星雲のSNRをNe/Feのアバンダンス比で分類

3.3 水素状/ヘリウム状 比による判別



電離が進むとH-like 輝線が強くなる

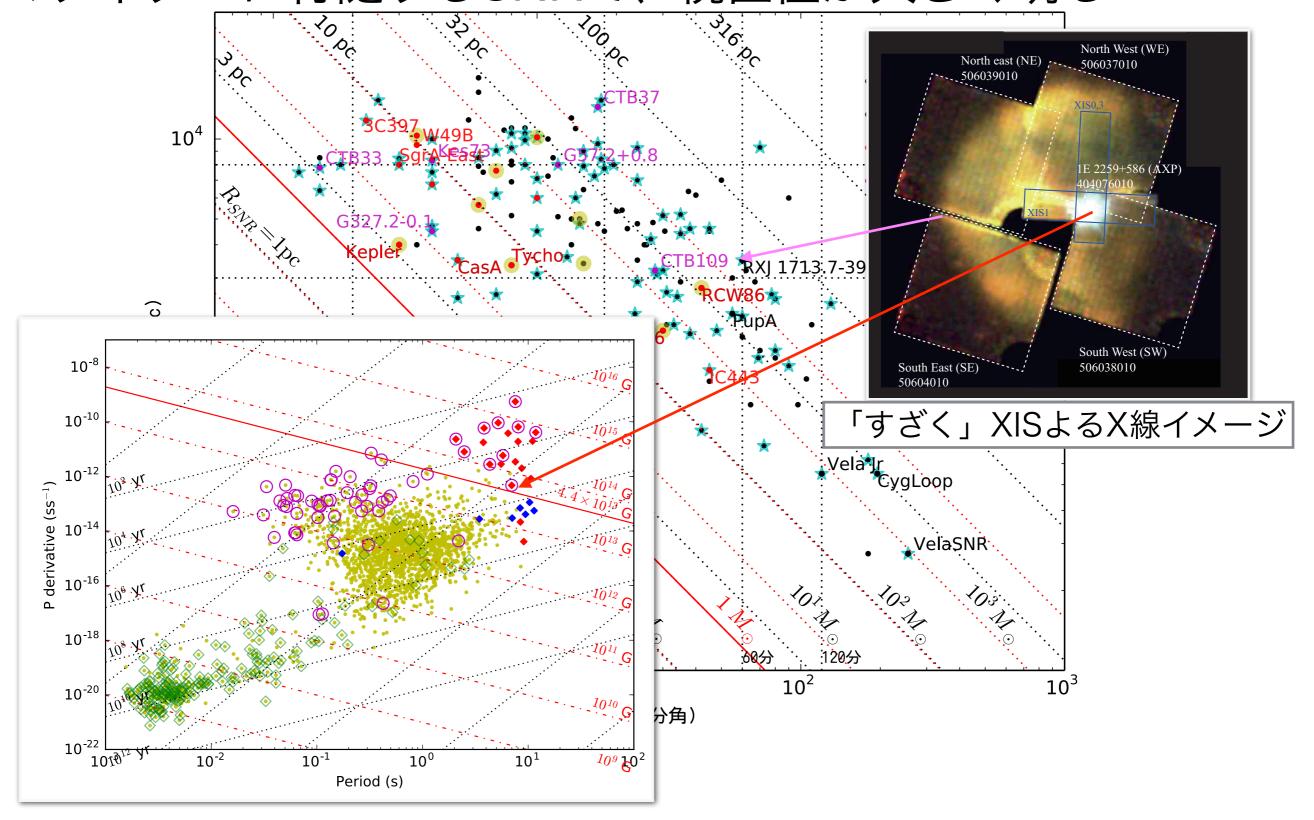
3.4 水素状/ヘリウム状 比による判別



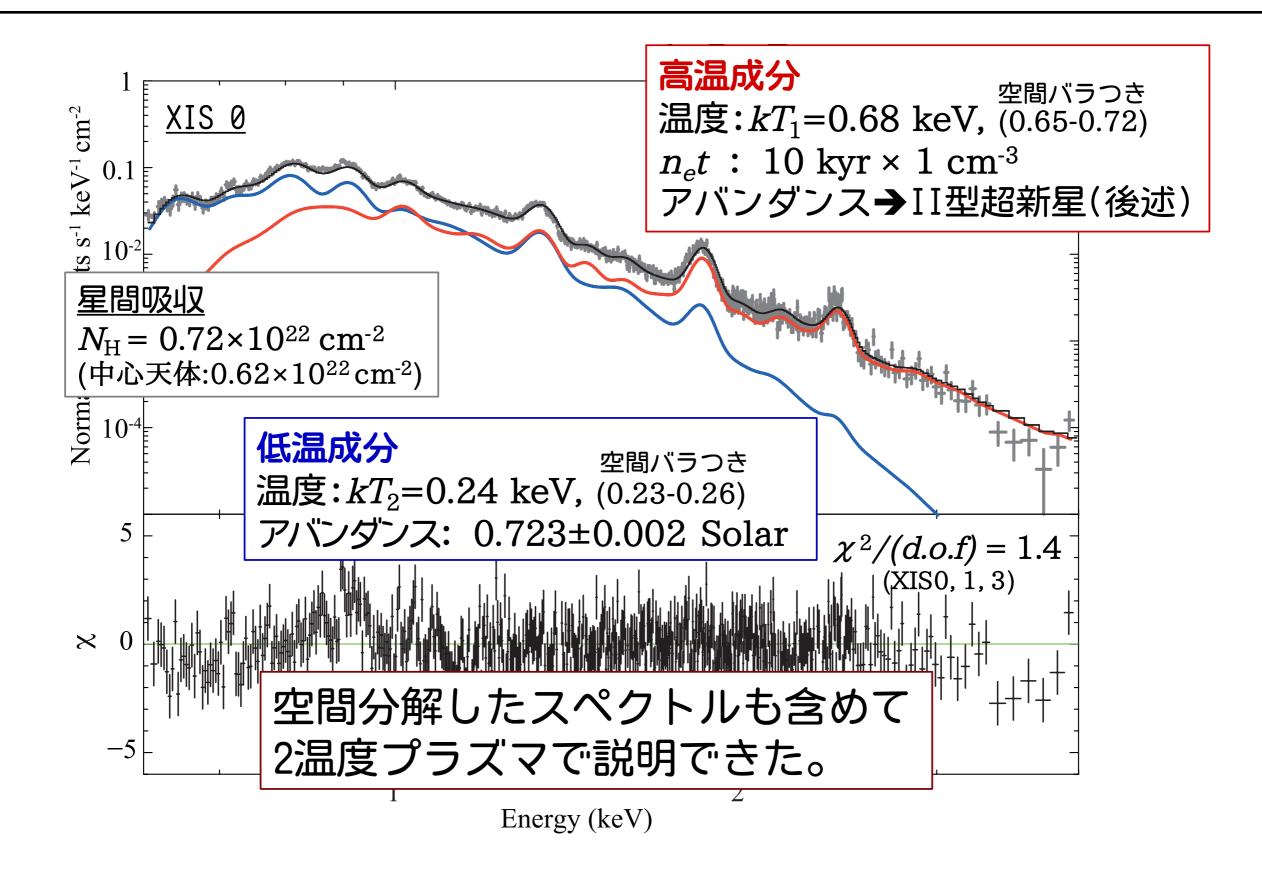
Fe輝線の中心値とSiの水素状/ヘリウム状の輝線強度比は相関同様にIa型/CC型の判別指標になる。

4.1 AXP 1E 2259+586とSNR CTB109

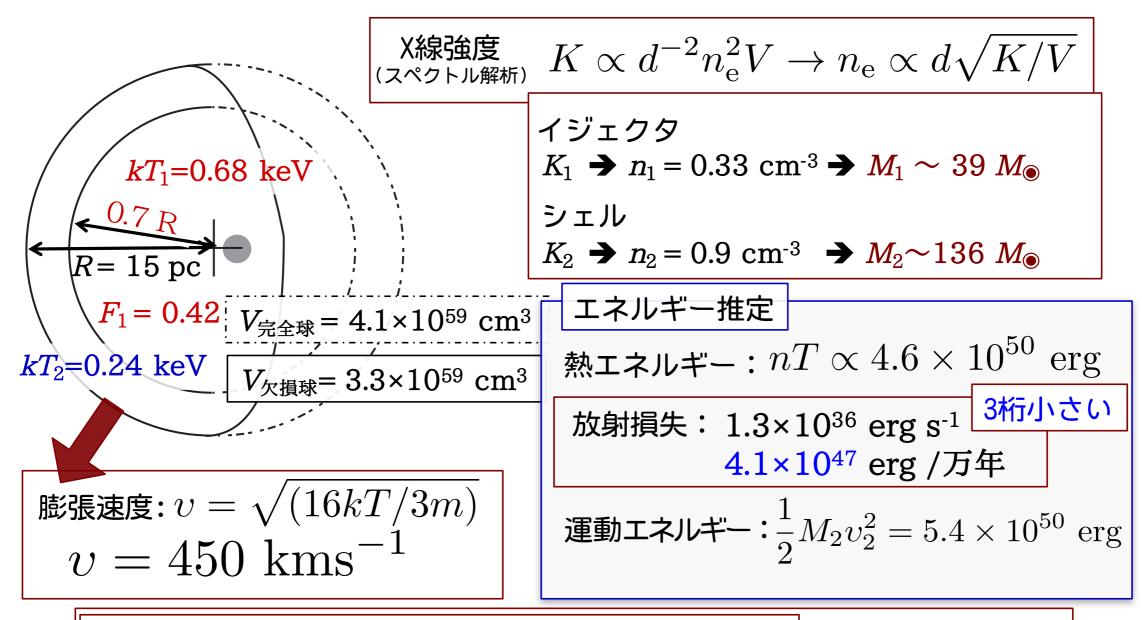
マグネターに付随するSNRで、視直径が大きく明るい



4.2 SNR CTB109のX線スペクトル



4.3 SNR CTB109のX線スペクトル

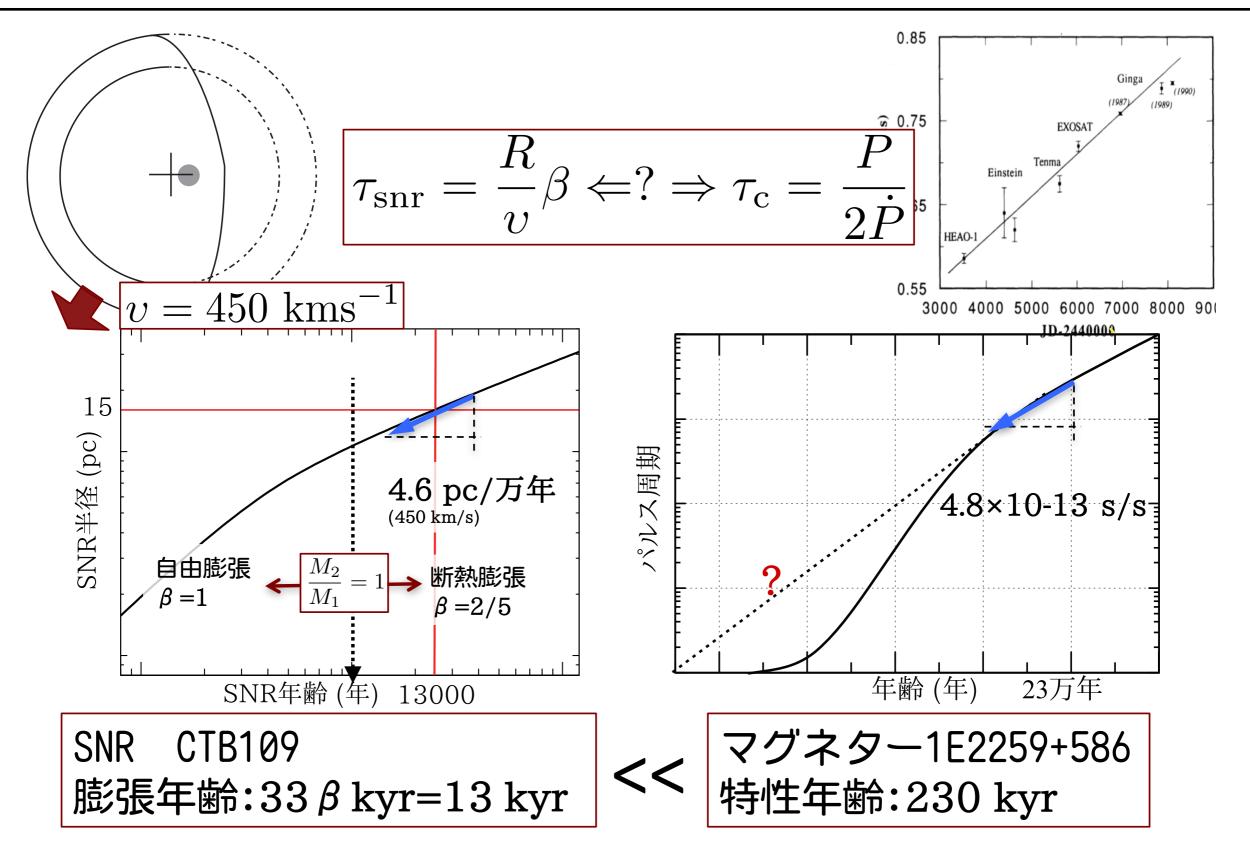


- *シェルの質量はイジェクタに比べて十分大きい
- *放射はSNRのエネルギーに比べて十分小さい
- *爆発のエネルギーは重力崩壊として典型的

→断熱膨張期

 $R \propto t^{2/5}$

4.4 特性年齢とSNR年齢の齟齬



5.1 特性年齢と磁場減衰モデル

マグネターは磁気駆動天体

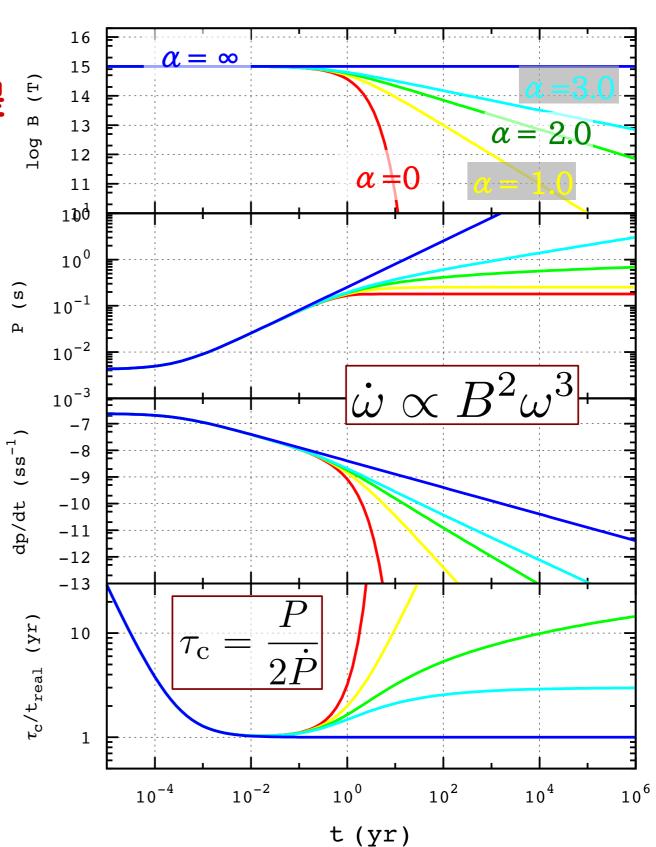
→特性年齢は磁場一定を前提

磁場減衰モデルを導入

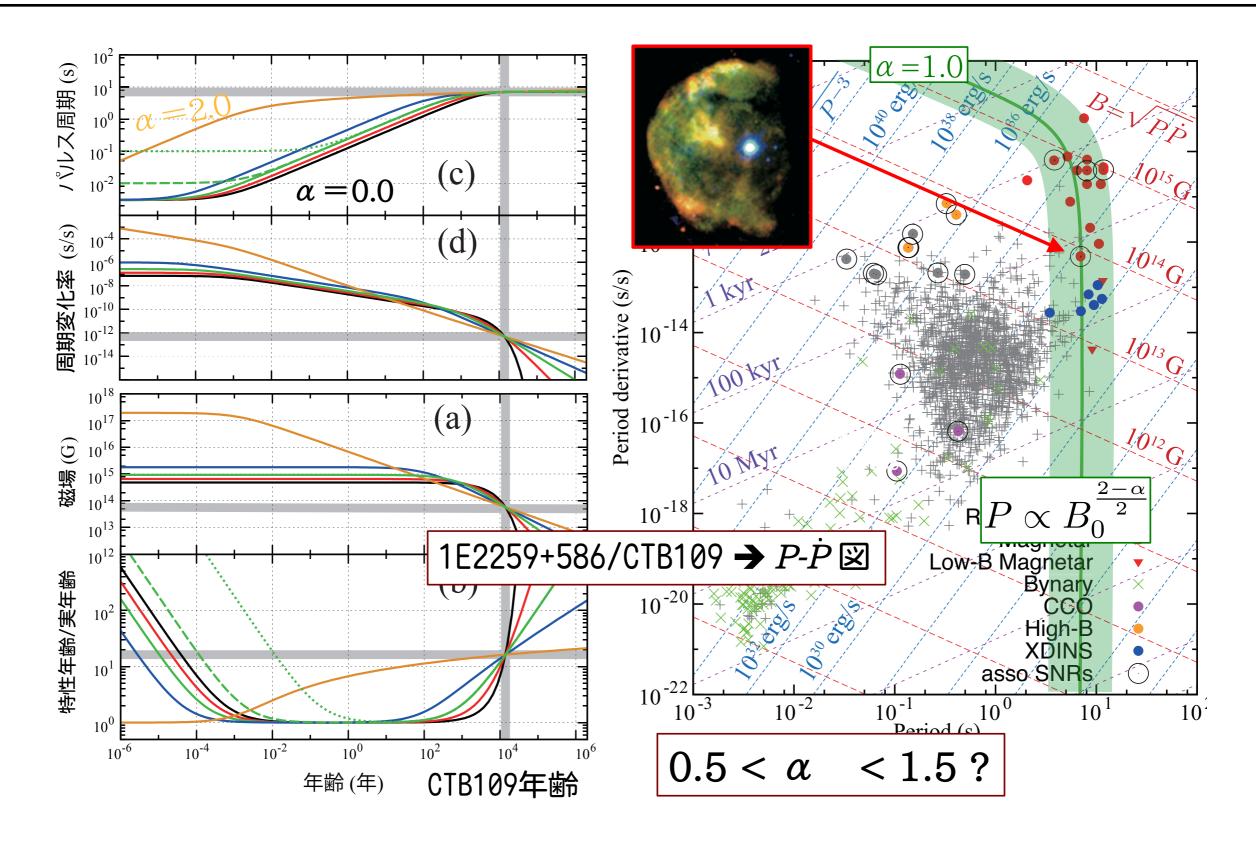
$$\frac{dB}{dt} = -aB^{1+\alpha}$$
(Colpi et al., 2000)
$$\Rightarrow B = \frac{B_0}{\left(1 + \alpha t/\tau_{\rm d}\right)^{1/\alpha}}$$

$$\begin{split} \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} &= c \nabla \times \left(\frac{\boldsymbol{j}}{\sigma} \right) & \text{Ohmic decay (\sim10$$}^{13} \text{ yr ?}) \\ &+ \nabla \times (v \times \boldsymbol{B}) & \text{Ambipolar diffusion(\sim100 yr ?}) \\ &- \left(\frac{m_{\mathrm{p}}/\tau_{\mathrm{pn}} - m_{\mathrm{e}}^{*}/\tau_{\mathrm{en}}}{m_{\mathrm{p}}/\tau_{\mathrm{pn}} + m_{\mathrm{e}}^{*}/\tau_{\mathrm{en}}} \right) \nabla \times \left(\frac{\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}}{n_{\mathrm{e}} e} \right) \end{split}$$

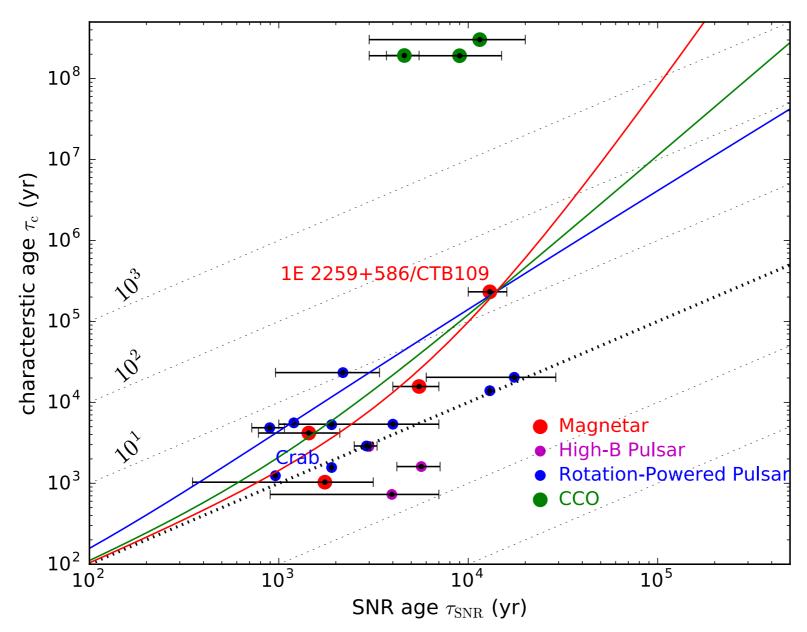
磁場減衰モデルを用いて 特性年齢とSNR年齢の 齟齬を解決できるのか?



5.2 特性年齢と磁場減衰モデル



6. SNR年齢と特性年齢



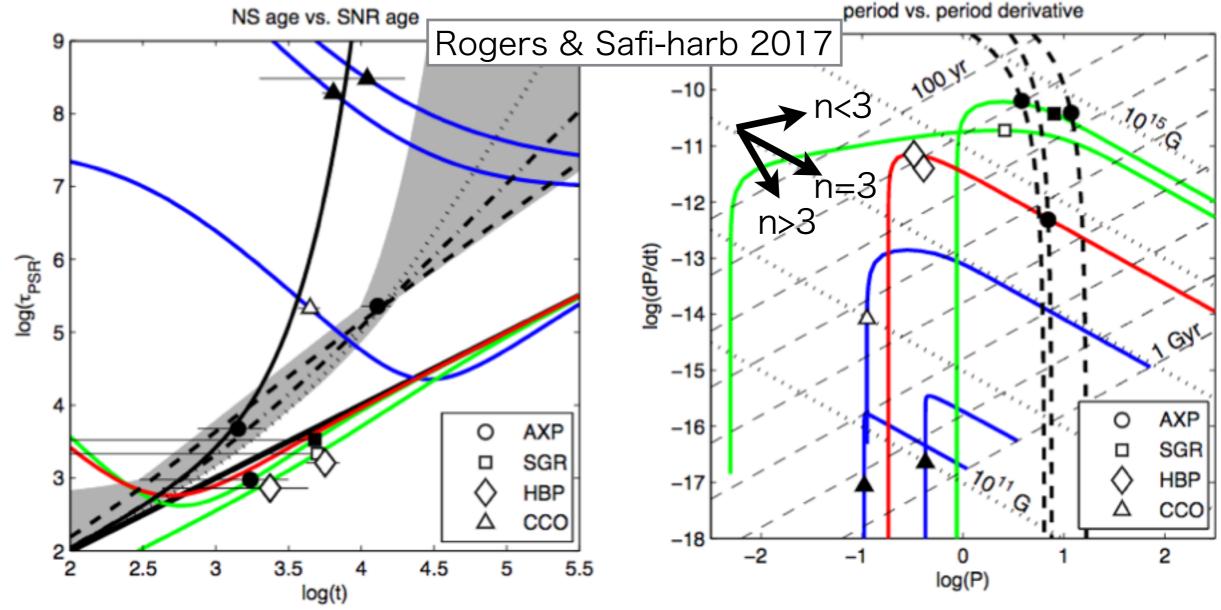
マグネター/SNRでは 年取ったものほど大きな年齢差 CCOではさらに大きな年齢不一致 強磁場パルサーでは特性年齢がSNRよりも小さい傾向

7. 磁場の増幅モデル

特性年齢 = 実年齢 => 磁場は一定

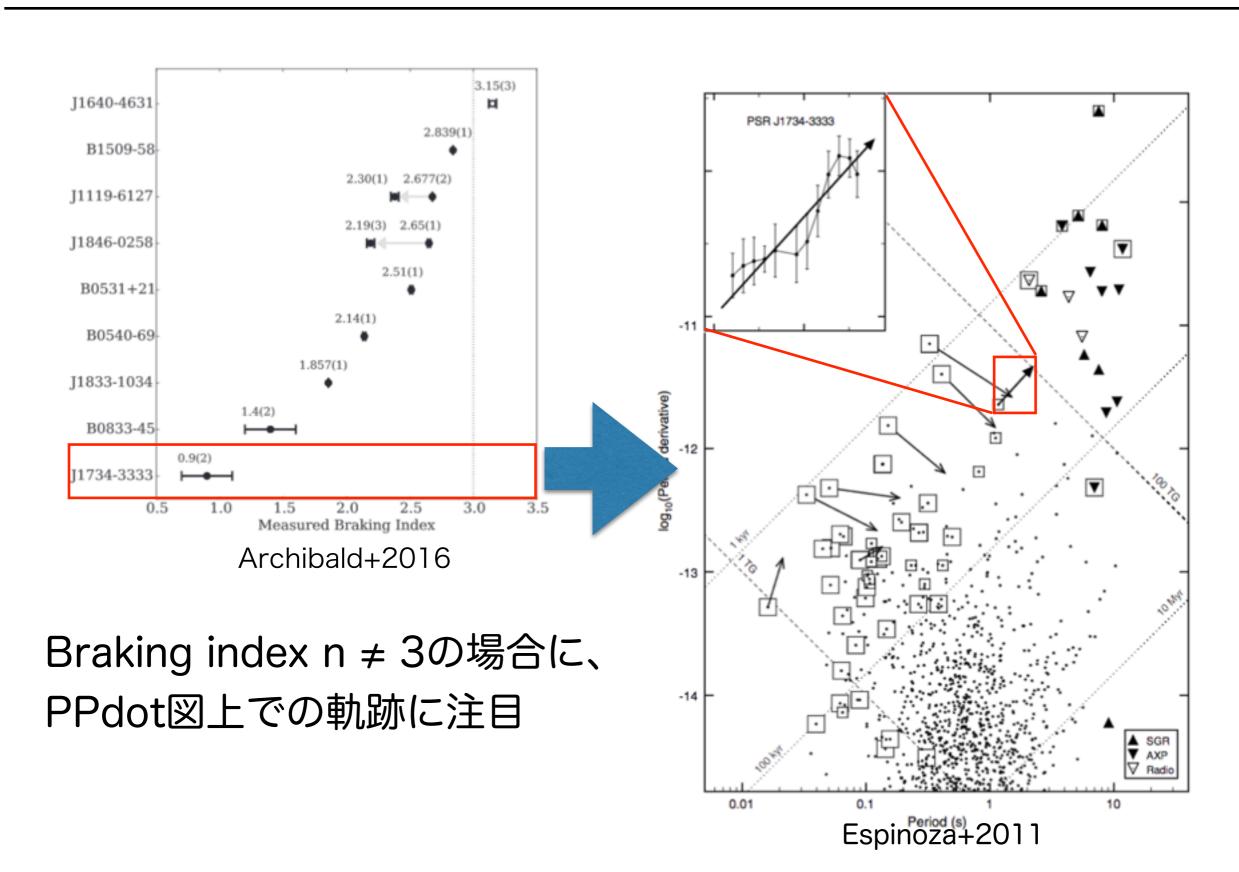
特性年齢 > 実年齢 \Rightarrow 磁場は減衰 or $P_0 \sim P$

特性年齢 < 実年齢 => 磁場は増大?

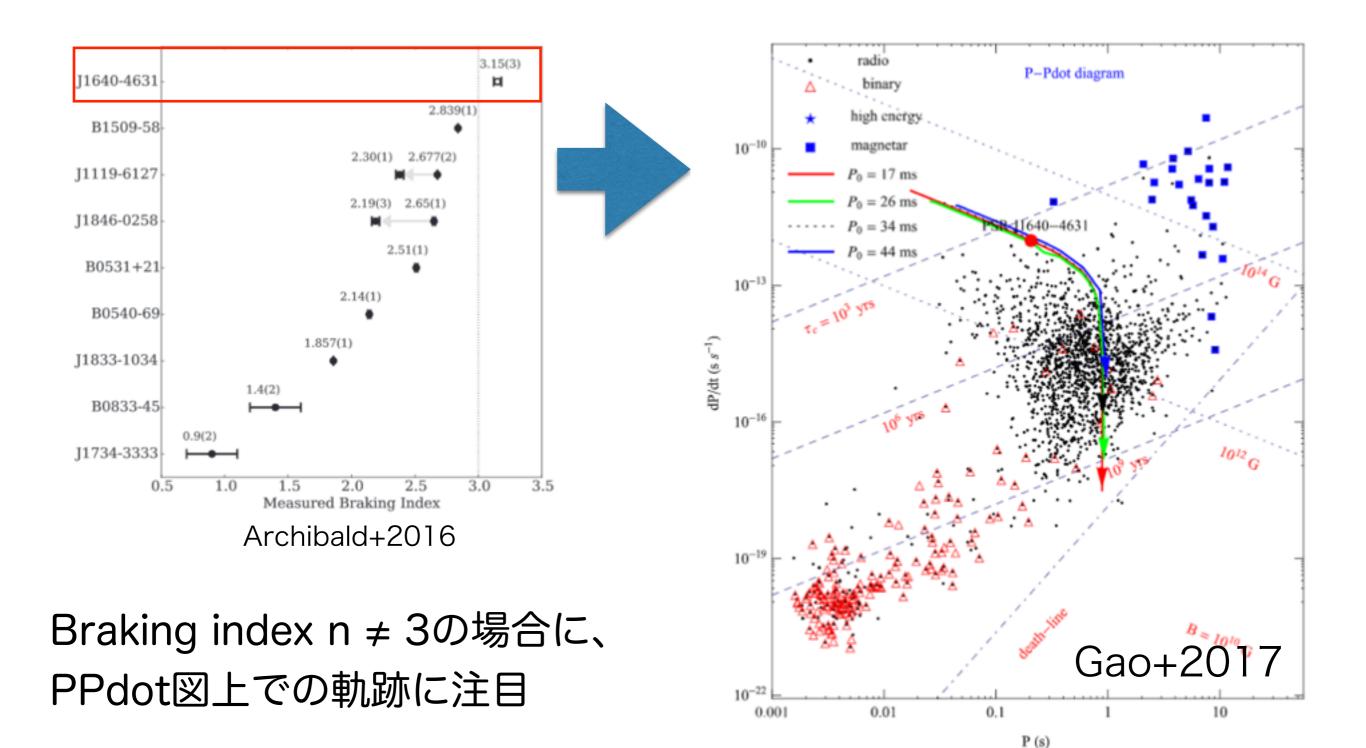


中性子星のタイプによって特性年齢の過大/過小?

8.1 PPdot図上での推移 n < 3



8.1 PPdot図上での推移 n > 3



9. その他の n の測定

Long-term timing observations of 374 pulsars

G. Hobbs, 1,2★ A. G. Lyne, M. Kramer, C. E. Martin and C. Jordan

Accepted 2004 June 24. Received 2004 June 22; in original form 2003 November 4

$$n=\nu\ddot{\nu}/\dot{\nu}\Rightarrow\ddot{\nu}=n\dot{\nu}^2/\nu$$
 磁気双極子(n=3)で期待される値よりも桁で大きい。

developed to mitigate the effects of timing noise by whitening the pulsar timing residuals. This whitening is applied before standard fitting procedures are followed to measure the astrometric and dispersion measure (DM) parameters of a pulsar. We show that the values obtained using this new technique are consistent with other methods, and that the new timing solutions are, in general, significantly more precise than those in earlier publications. We consider the second derivative of the frequency ν of pulsars, $\ddot{\nu}$, and the DM gradient, d(DM)/dt, in detail. The $\ddot{\nu}$ values are obtained by fitting to timing residuals that have not been whitened and are found to be orders of magnitude larger than those expected from magnetic dipole radiation; the measured values are dominated by the effects of timing noise, and therefore lead to braking indices that are not consistent with magnetic dipole radiation. We find a dependence between |d(DM)/dt| and DM of $|d(DM)/dt| \approx 0.0002\sqrt{DM}$ cm⁻³ pc yr⁻¹, which allows DM variations to be estimated for any radio pulsar.

Key words: methods: data analysis – astrometry – pulsars: general.

 $\ddot{\nu}$ は多くの電波パルサーで測定されているが、nは3より非常に大きく、気双極子によるスピンダウンを反映していないと考えられている。

¹University of Manchester, Jodrell Bank Observatory, Macclesfield, Cheshire SK11 9DL

²Australia Telescope National Facility, CSIRO, PO Box 76, Epping, NSW 1710, Australia

10. 磁場の変化とBraking index n

特性年齢 = 実年齢 => 磁場は一定

特性年齢 > 実年齢 => 磁場は減衰

特性年齢 < 実年齢 => 磁場は増大?

$$\dot{\nu} = -\frac{8\pi^2}{3c^3} \frac{B^2 \sin^2 \alpha}{I} \nu^3$$

$$n_{\rm obs} = n + \frac{\nu}{\dot{\nu}} \left(-\frac{\dot{I}}{I} + 2\frac{\dot{\alpha}}{\tan \alpha} + 2\frac{\dot{B}}{B} \right)$$
 e.g., Lyne+2015

Braking index: $n=\frac{\nu\ddot{\nu}}{\nu}$ が見かけじょう3からずれる

nobs が3 からどの程度ずれるかの簡単な見積もり

・1E 2259/CTB109の年齢差(23万年/1.3万年)を解消するには…

$$n_{\rm obs} \sim 1 + \frac{P}{\dot{P}t_{\rm snr}} \sim 32$$

・1E 2259のLxをすべて磁場エネルギーで賄うには…

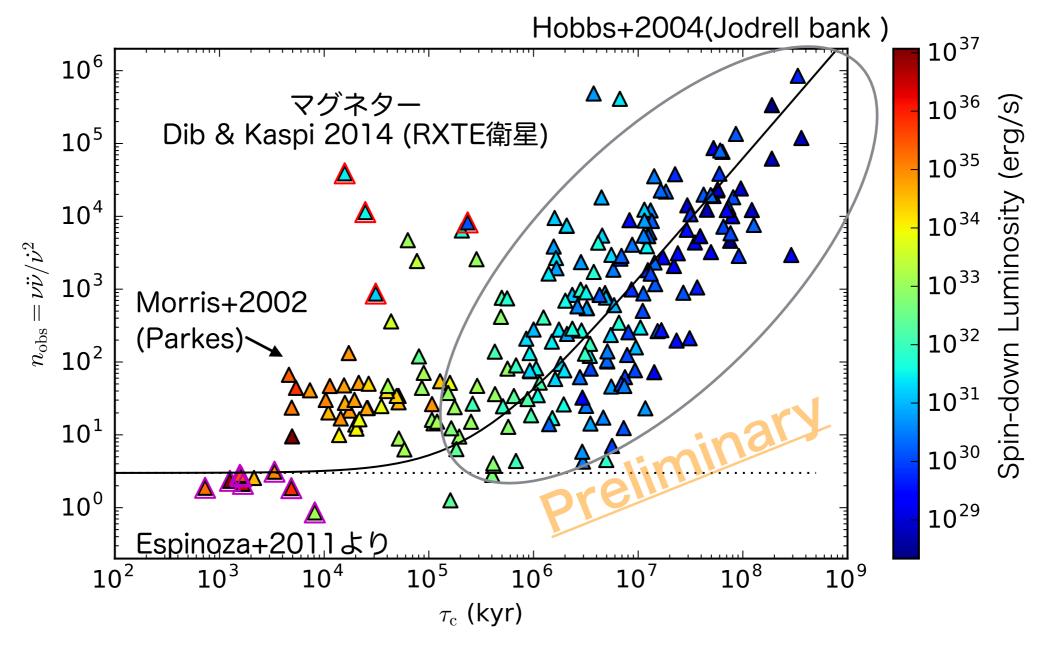
$$n_{\rm obs} = 3 - 4 au_{\rm c} rac{B}{B}$$
 , $E_B = rac{4 \pi R^3}{3} \left(rac{B^2}{8 \pi}
ight)$, $L_{\rm x} \sim L_B = rac{d E_B}{dt}$

Lx = 1.7×10^{34} erg/s, B = 5.9×10^{13} G => $\dot{B} \sim 1.5 \times 10^{13}$ G/kyr $\rightarrow n_{\rm obs} \sim 240$

磁場の弱いマグネターSGR 0418+5729の場合 $n_{\rm obs}\sim210$

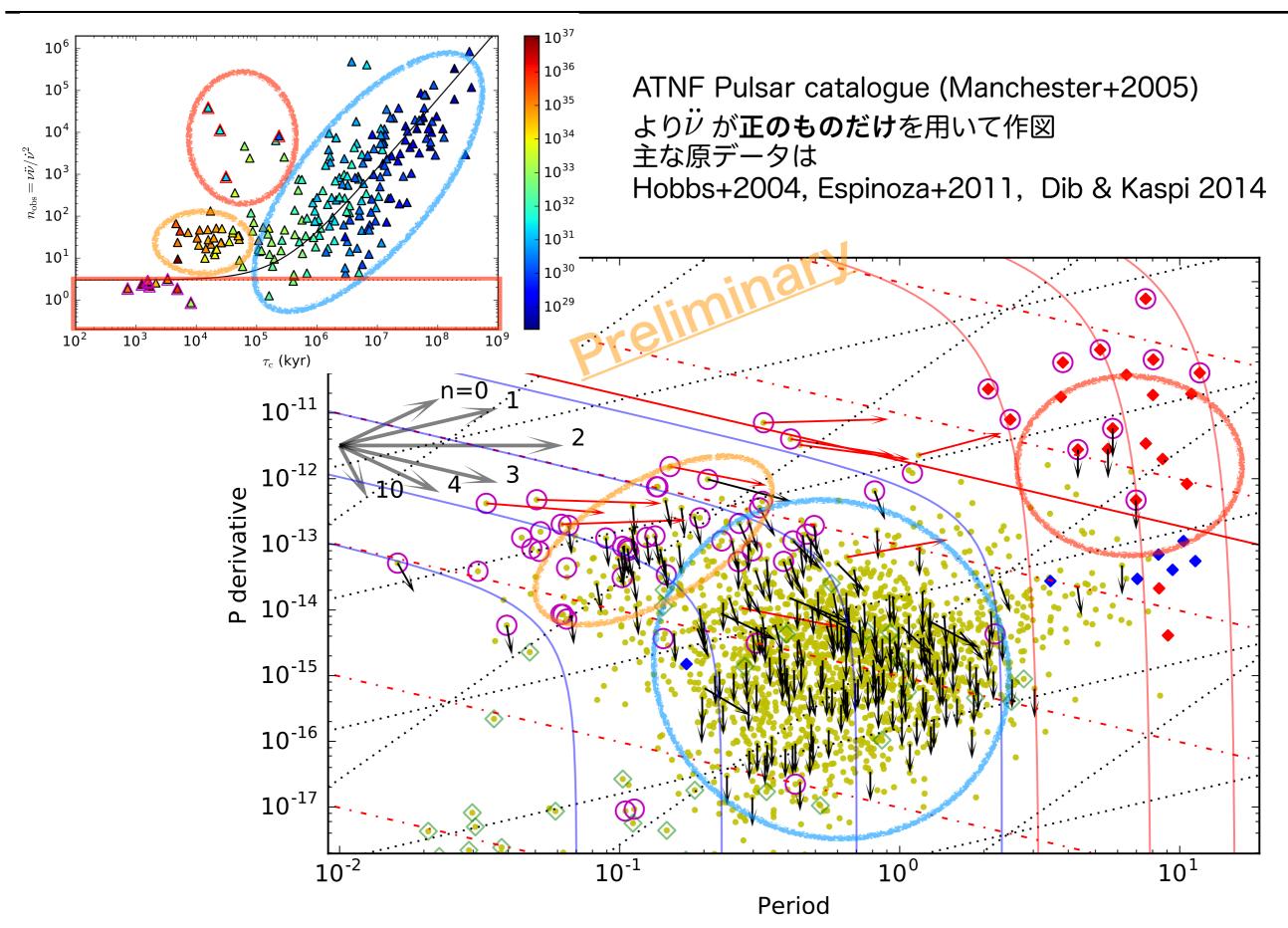
最強磁場のマグネターSGR 1806-20の場合 $n_{\rm obs} \sim 3.002$

11. 特性年齢とBraking index n



ATNF Pulsar catalogue (Manchester+2005) より $\ddot{\nu}$ が**正のものだけ**を用いて作図 主な原データは Hobbs+2004, Espinoza+2011, Dib & Kaspi 2014

12. PPdot図上での推移



まとめ

- ◆ SNR観測は中性子星の親星や超新星を探る重要な手掛かり
- ◆ これまでに中性子星2627天体(ATNF)、SNR383天体 (SNRCat)が発見され、そのうち60-80天体が関連し合う
- ◆ 中心天体が未発見のSNRのIa/CC型の判別も重要となる
- ◆ 特性年齢とSNR年齢の比較は、中性子星の長期的な磁場進化 の間接的な指標となる
- ◆ 磁場の変化は、Braking index n を3(磁気双極子放射)から、 大きくずらす可能性がある
- \star 今後の $\ddot{\nu}$ の測定に期待