

マグネターの新しい特徴づけ： 誕生率、質量、内部磁場、粒子加速 + 磁場の起源

牧島一夫

東京大学理学系研究科 (名誉教授)

Kavli IPMU (Senior Affiliate Member)

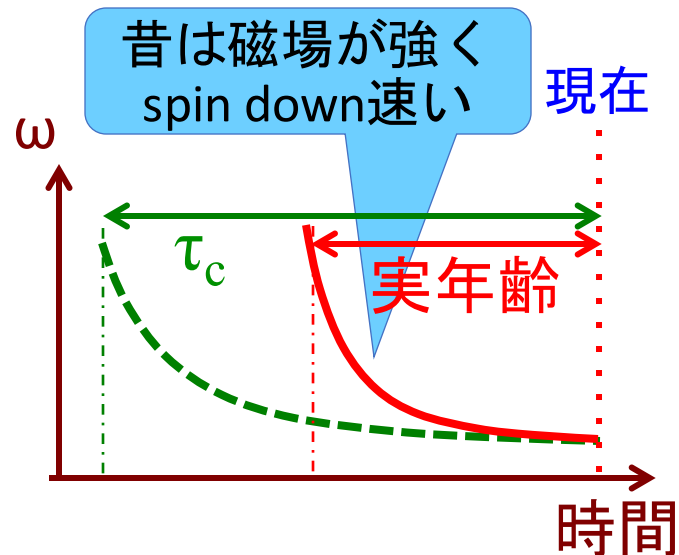
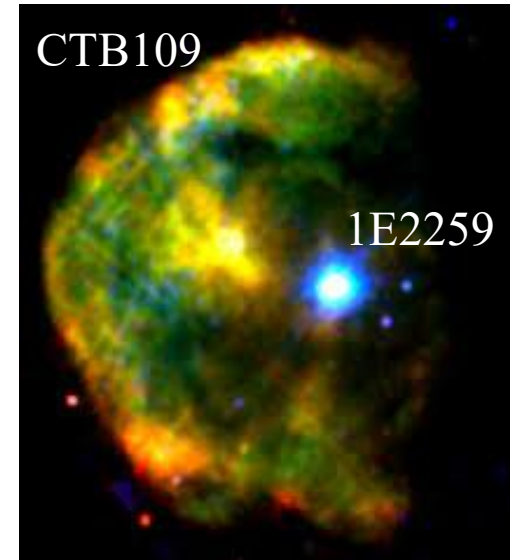
理化学研究所 (名誉主任研究員)

1. マグネターは特殊で稀なNSか？
2. 連星中にもマグネターは存在するか？
3. マグネターの質量も $\sim 1.4 M_{\odot}$ か？
4. マグネター内部に $\sim 10^{16} \text{G}$ のトロイダル磁場が潜むか？
5. マグネターは粒子加速源になりうるか？
6. マグネターの磁場の起源は？

1. マグネターは特殊で稀なNSか？

たぶんNo!

- 降着のないNSの年齢の目安は、 $\tau_c = P/2\dot{P}$ の「特性年齢」。
図のマグネター 1E2259+586では、 $\tau_c = 23$ 万年。
- 付随する超新星残骸CTB109の年齢は $\tau_{\text{SNR}} \sim 1.4$ 万年で矛盾。
- しかし τ_c は双極子磁場 B_d の減衰を無視した計算。磁場減衰を考慮すると $\tau_{\text{SNR}} \sim$ **マグネター実年齢** $\ll \tau_c$ となり無矛盾 (Nakano+15)。他のSNR-マグネターのペアでも同様。



- マグネターは τ_c から推定されるよりずっと若く短命。
- よってその誕生率 ($\propto$ 観測数/実年齢) は、とても高い。
- マグネターは稀な天体ではなく、 $B \sim 10^{12}$ G の通常NSより多数派の可能性さえある (Nakano+15)。
- FRB源やXINSとの関連。
- SN1987Aにはマグネターが遺されているかも？

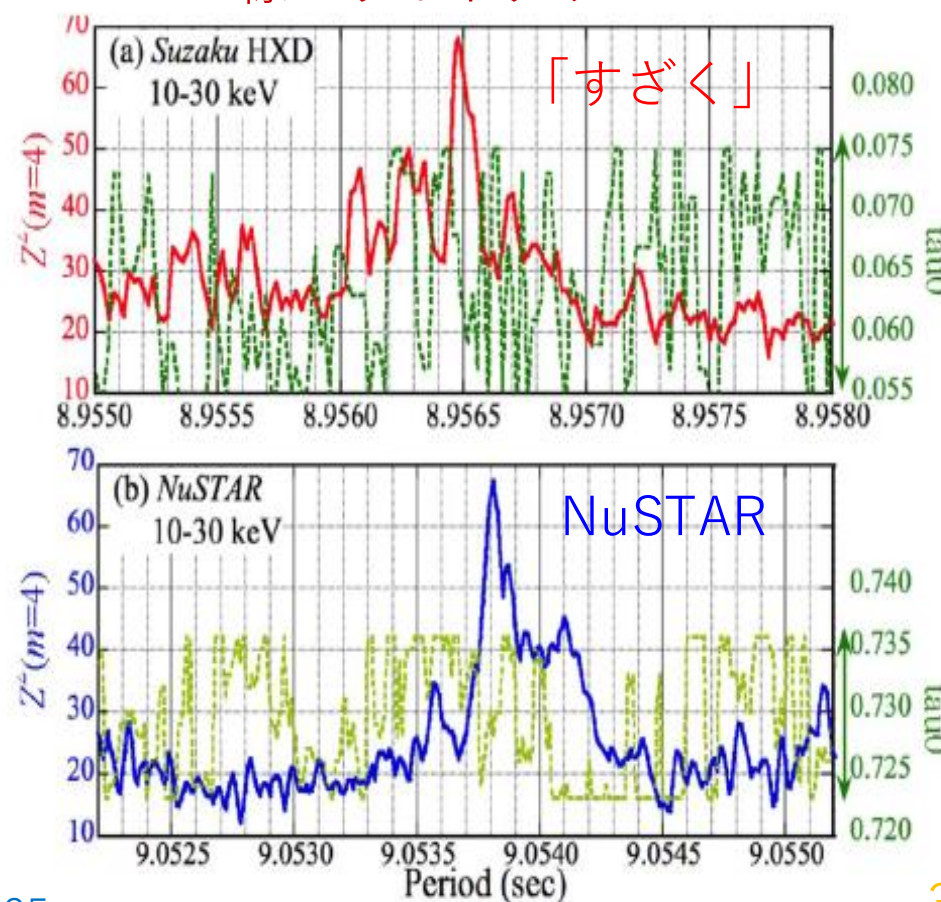
2. 連星中にもマグネターは存在するか？ たぶんYes!

マグネターの定義を、(i) $B_d > 4.4 \times 10^{13}$ G & (ii) 磁気エネルギーを源に輝く、
とすると、両条件を満たす「狭義のマグネター」(数十例)は、ほぼすべてが
孤立NS。しかし連星中にも、候補天体がある。

[候補 1] ガンマ線連星LS 5039

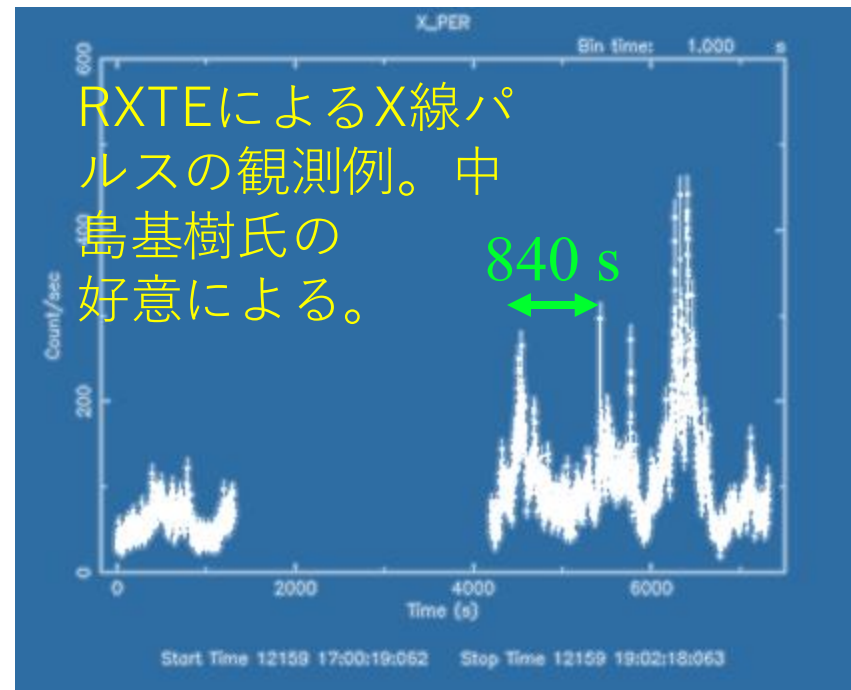
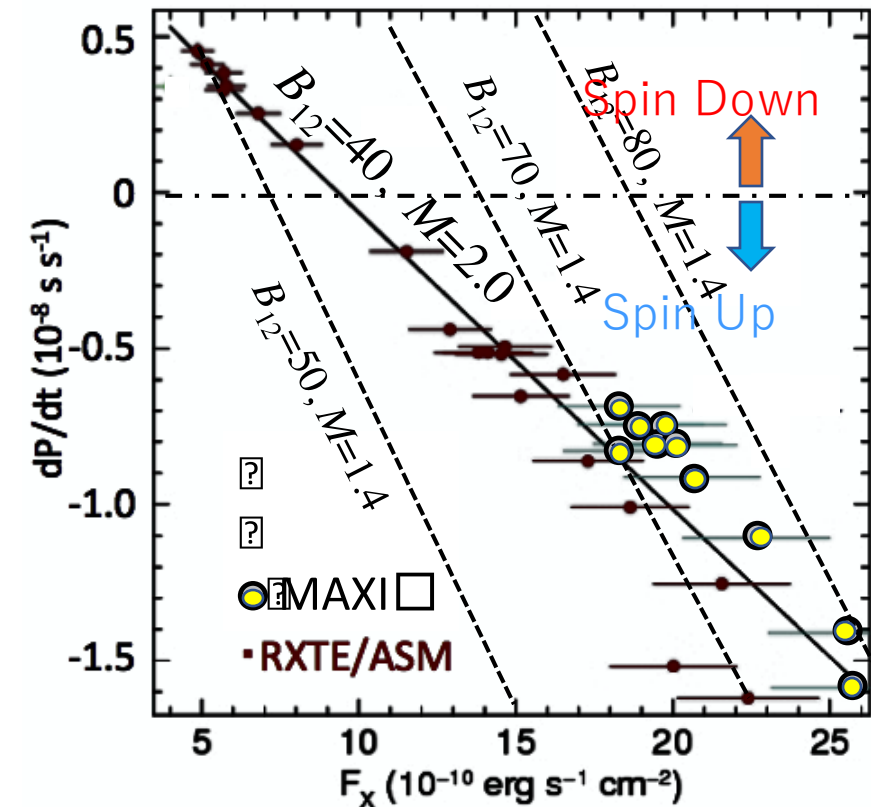
- 大質量星とNS/BHの3.9日の連星、全天最強MeVガンマ線源。しかしNSかBHか不明のままだった。
- 「すざく」(2007)で8.956s, *NuSTAR*(2016)で9.054s [Yoneda+20], 「あすか」(1999)で8.891s [KM+23] のパルス。NSである。 $P_{\text{dot}} = 3 \times 10^{-10}$ s/s.
- 星風との相互作用を無視すると $B_d \sim 10^{15}$ G. 星風の捕獲が阻止されていることから、同程度の B_d .
- 広帯域放射の光度 ($\sim 10^{36}$ erg/s)は、spin-down光度を2桁しのぐ➡磁気駆動天体である[Yoneda+20].

X線ピリオドグラム



[候補2] Be連星X線パルサー X Persei

- Be星と250日の連星をなす。パルス周期 $P \sim 840$ s, spin up/down繰り返す。
- X線光度と $\dot{P}$ の21年間の相関をRXTE/ASMとMAIXで追跡。Ghosh-Lambの降着トルク理論 (Takagi+16で校正) から $B_d = (0.4-2.5) \times 10^{14}$ G [Yatabe+18].
- 基本は降着駆動だが、巨大パルスなどは磁気駆動の関与を示唆。



[候補3] 長周期のX線連星パルサーたち

GX 1 + 4 (120 s)
4U 0114+65 (9380s)
4U 2206+54 (5540s)
4U 1909+07 (604 s)
4U 1700-37 (unknown)

3. マグネターの質量も $\sim 1.4 M_{\odot}$ か？ $\sim 2 M_{\odot}$ かも

孤立マグネターの質量を推定することは困難。しかし連星中の候補は、マグネターの質量を知る貴重な手がかりを提供してくれる。

- LS 5039: 9秒パルスの連星ドップラー解析によりコンパクト天体の質量が推定でき、 $M = 1.8 \pm 0.6 M_{\odot}$ [Yoneda+20]。
- X-Per : Ghosh-Lambの降着トルク理論は、パラメータとしてNSの慣性モーメントを含む➔ $M = 2.03 \pm 0.17 M_{\odot}$ [Yatabe+18]。
- マグネターの質量は $\sim 2.0 M_{\odot}$ かもしれない。
- 形成時点の原始NSが偶然やや重いと、たとえば outer coreの核物質の、物性的な相が少し異なり、強磁性を獲得してマグネターができるのでは？
- マグネターを擁するSNRはみな極めて丸く、マグネターの固有運動も割に小さい (e.g., Lyman+22)。よって、親星の自転が速いとマグネターが作られるというナイーブな考え (e.g., Swapnil+21) は、観測事実とは合わないようだ。

4. マグネターのトロイダル磁場 [KM+14,+16,+19, +21ab, +24ab]。

マグネター内部には普遍的に $\sim 10^{16}$ G のトロイダル磁場が潜む

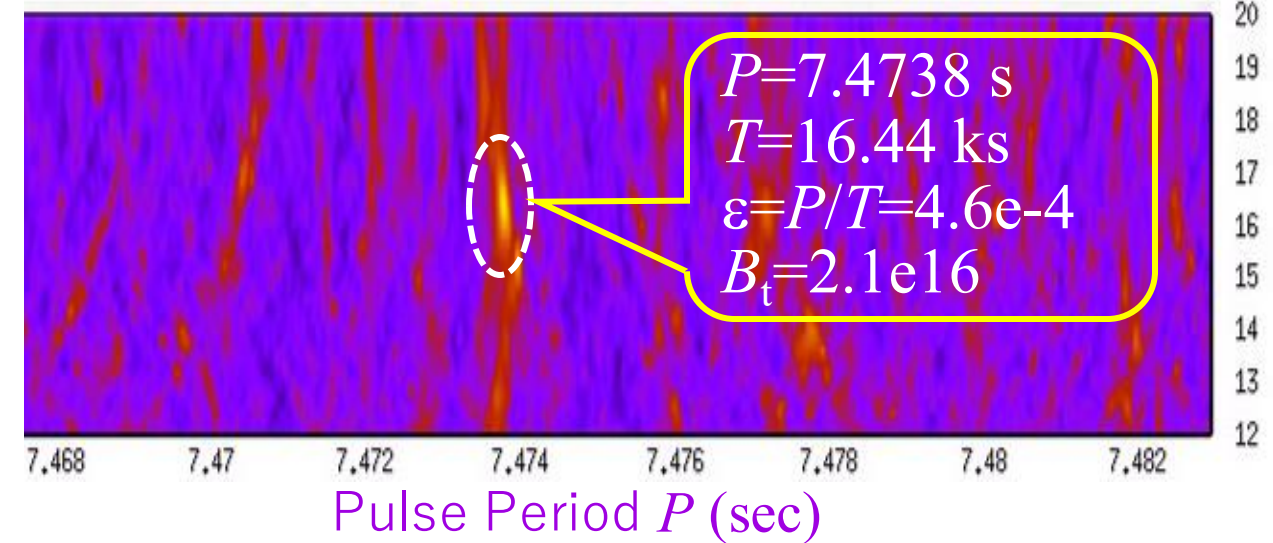
➤ いくつかの傍証が、この可能性を示唆。

➤ するとNSは $\Delta I/I = \varepsilon \sim 10^{-4} (B_t/10^{16})$ 程度に縦長変形し自由歳差運動するはず。

➤ i.e. 自転周期と歳差周期は ε だけ異なり、そのビートで長周期 $T = P/\varepsilon$ が作られ、パルスは周期 T で位相変調されるはず。
； コマの首振り は強制歳差運動で別物。

- 実際に7個のマグネターで自由歳差運動の検出に成功。i.e., 復調操作により、硬X線パルスの有意度が大幅↑, それが最も効果的な周期として T が決められた。
- それら7天体で $\varepsilon = P/T \sim 10^{-4}$ が測定でき、 $B_t \sim 10^{16} \sqrt{10^4 \varepsilon} \sim 10^{16}$ G が推定できた。

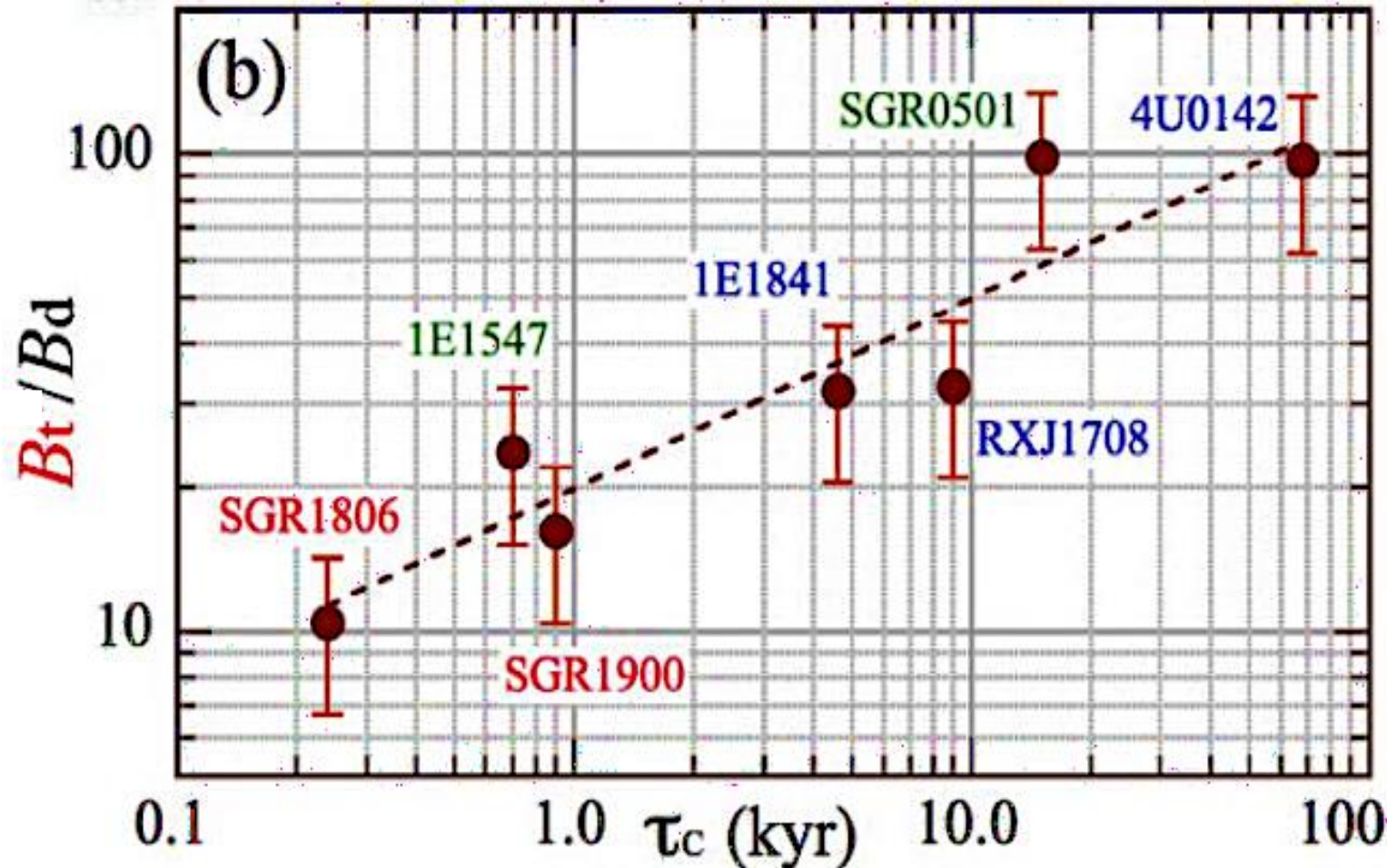
「あすか」GIS (3-12 keV)による
SGR 1806-20の二重周期性[KM+24b]



7 個のマグネターにおける B_t の測定結果

(P-Pdotで求めた B_d で規格化して示す)

8 例目の候補は、次の講演。



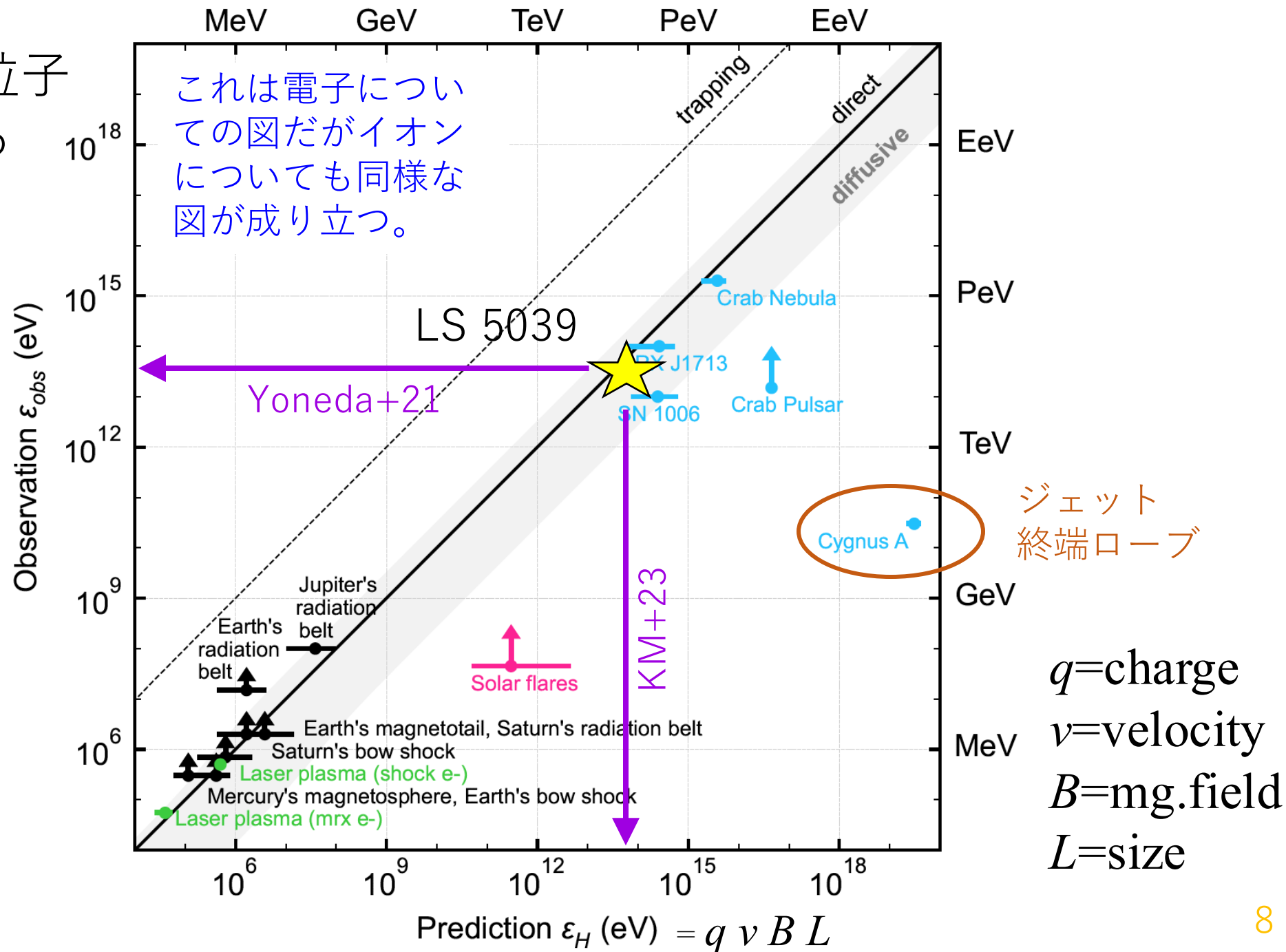
マグネターの双極子
磁場 B_d はトロイダル
磁場 B_t より速く減衰
するようだ。

KM+24b, *MNRAS*
532, 4535

5. マグネターは粒子加速源になりうる

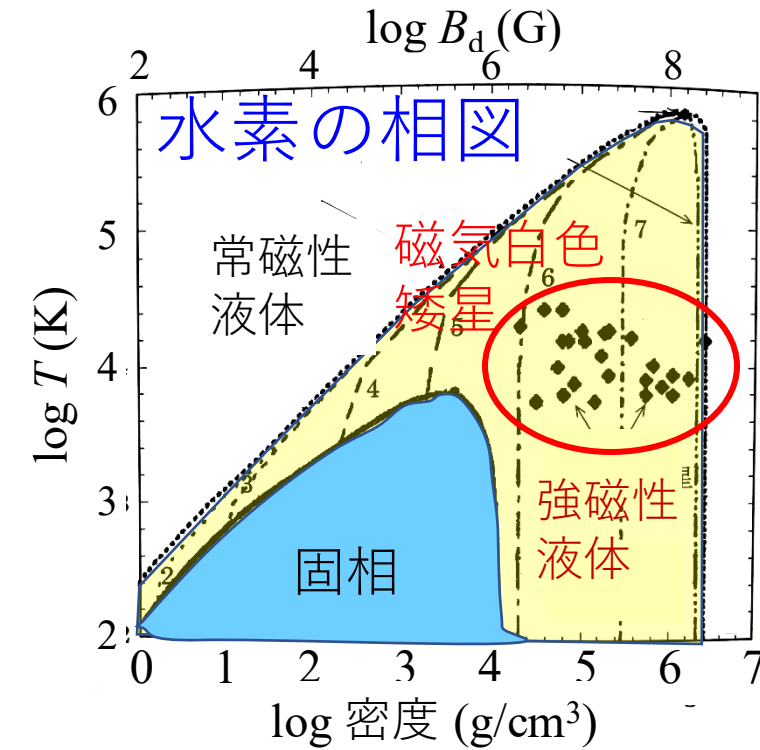
Oka, KM & Terasawa 2025, *ApJ* **979**, id.161

- Hillas 1984
- Terasawa 2000
- KM 1999

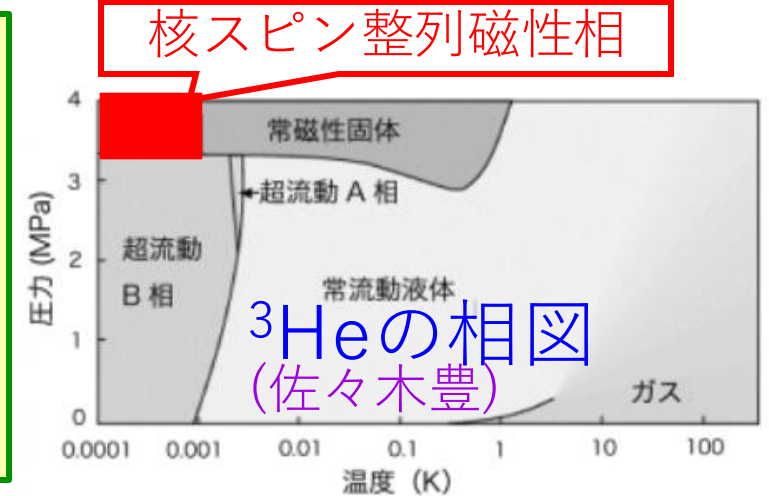


6. マグネターの磁場の起源は？ フェルミ液体の強磁性か？

- 「NSの磁性=残留陽子の超流動渦糸が担う」という電磁石説は、見直す時期に。
- 連星X線パルサーは、この定説の予言する磁場減衰の兆候を示さない (KM99)。
- マグネターの超強磁場は、親星磁場の濃縮で説明できるレベルを超える。



ランダウのフェルミ液体理論 (フェルミ気体+相互作用) にもとづく強磁性として、 ^3He 、白色矮星、およびNSの磁性を、統一的に解釈できないか。少数多体系からのアプローチに対比。



一丸節夫：高密度プラズマの物理 (2020)
Physics Plasmas 8, 48 (2001).



文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)

1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー

非摂動磁場による化学結合の科学

松田康弘・
領域代表

この公募研究課題に採択いただき、
物性物理学の研究者とコラボ開始。

結論

1. マグネターは特殊で稀なNSか？
2. 連星中にもマグネターは存在するか？
3. マグネターの質量も $\sim 1.4 M_{\odot}$ か？
4. マグネター内部に $\sim 10^{16} \text{G}$ のトロイダル磁場が潜むか？
5. マグネターは粒子加速源になりうるか？
6. マグネターの磁場の起源は？

たぶんNo 論文化済み

たぶんYes

重い ($\sim 2 M_{\odot}$) 可能性あり

Yes!

たぶんYes

フェルミ液体の強磁性か？

マグネターは魅力的です

