

硬X線によるマグネター研究の進展 — 宇宙で最強の磁石星？ —



榎戸 輝 揚

〈Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, Stanford University, Physics Astrophysics Building, 452 Lomita Mall, MC 4085, Stanford, CA 94305-4085, USA〉
e-mail: teru.enoto@riken.jp, teruaki.enoto@gmail.com

銀河系内やマゼラン雲には、星の自転や物質の降着といった標準的なエネルギー源ではX線のエネルギー放射を説明できない、特異なパルサーが見ついている。観測された特徴から、磁場の強さは通常の中性子星を2桁以上も凌駕し、磁場をエネルギー源とする磁気駆動型の天体“マグネター”と考えられるようになった。これはまだ仮説の域を出ないものの、これらの天体が突発的に放つバーストやX線増光の検出で新天体も相次いで発見され、これまで考えられていた以上に銀河系に存在するようである。本稿では、マグネター観測の進展を紹介するとともに、新たな観測の窓である硬X線に着目し、「すざく」衛星で示唆された系統的なスペクトル進化について報告する。

1. 奇妙なX線パルサーの発見史

1979年、後に巨大フレア (Giant Flare) と呼ばれるようになる、200 秒ほども続く強烈なガンマ線のバースト現象が、複数の衛星によって検出された¹⁾。およそ8秒の緩やかな周期変動が見つかり、マゼラン雲の同じ位置から再びバーストが検出されたため²⁾、一般的なガンマ線バースト (GRB) と区別して、発生源の天体は**軟ガンマ線リピーター (Soft Gamma Repeater; SGR)** と呼ばれるようになった。その後、銀河系内の別の2天体から、1998年³⁾ と2004年^{4), 5)} にも、図1の巨大フレアが観測され、その放出エネルギーは 10^{44-46} ergに達すると見積られた。これは、太陽が1万年以上もかけて放出するエネルギーを一瞬のうちに解放したことになり、GRBや超新星爆発に次いで最も激しい爆発現象の一つである。

巨大フレアに周期が見られたことや、一部の軟

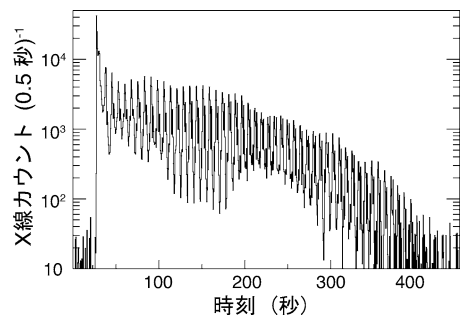


図1 2004年に軟ガンマ線リピーター SGR 1806-20 が起こした巨大フレアのライトカーブ⁴⁾。RHESSI 衛星による20-100 keVの観測。およそ7.6秒のモジュレーションは星の自転に対応し、 $kT \sim 20$ keVのX線スペクトルをもつ。

ガンマ線リピーターは超新星残骸の中に見つかったため、当初から発生源は中性子星と考えられた⁶⁾。さらに、RXTE衛星と「あすか」衛星により定常放射の中にX線パルスが検出され^{7), 8)}、中性子星の一種という考えが定着した。軟ガンマ線

〈現所属: 理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1〉

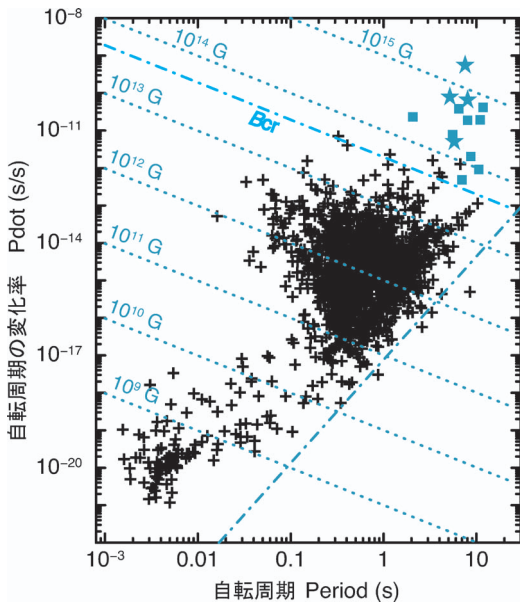


図2 これまでに2,000個近く見つかった孤立中性子星のパルス周期とその伸び率の分布図¹⁰⁾ ($P-\dot{P}$ ダイアグラム). 周期 $P \sim 1$ 秒, 伸び率 $\dot{P} \sim 10^{-15} \text{ s s}^{-1}$ に集中する種族は, おもに回転駆動型の電波パルサー¹¹⁾で, 右上の一群がマグネターと総称される軟ガンマ線リピーター(星)と特異X線パルサー(四角)である¹²⁾. 右下がりの点線は磁気双極子放射でのスピンドアウンを仮定した表面磁場の強さ (1テスラ = 10^4 ガウス)であり, 右上がりの一点破線はパルサーの活動がやむ, いわゆる death lineを示し, B_{cr} は臨界磁場を示す.

リピーターは, 巨大フレアのほかに, 1秒以下のタイムスケールでスパイク状の短時間バースト (Short burst) を頻発するなどの特徴をもち⁹⁾, 通常の中性子星とは随分と様子が異なるようである. 例えば図2は, 孤立した中性子星をその自転周期 P とその変化 \dot{P} の上で分類した図で, $P-\dot{P}$ ダイアグラムと呼ばれている. 軟ガンマ線リピーターの自転は2-11秒と遅く, 急速に減速しているため, 図2では, 一般的な電波パルサーよりも P も \dot{P} も大きな範囲に現れる.

実はこの右上の領域には, 軟ガンマ線リピーターの発見とは独立に, パルス周期が2-11秒ほどの特異X線パルサー (Anomalous X-ray Pul-

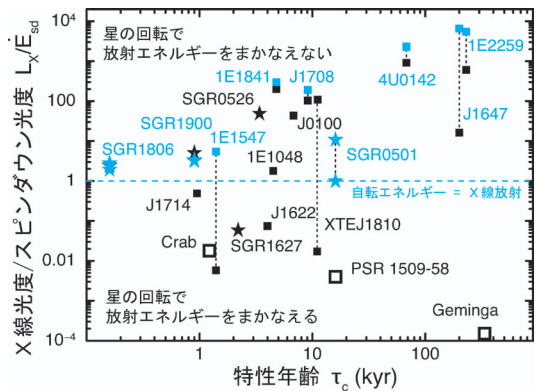


図3 X線の光度 L_x を, 星の自転が遅くなる効果から計算した回転エネルギーの減少 (スピンドアウン光度) \dot{E}_{sd} に対する比で示した. 横軸は, 式(2)から計算した特性年齢 $\tau_c = P/(2\dot{P})$. マグネターと総称される軟ガンマ線リピーター(星)と特異X線パルサー(四角), および有名な回転駆動型パルサー(中抜き四角)について, 「すぎく」による観測(青)¹⁰⁾, カタログ値(黒)¹²⁾を使用してプロットした. X線光度は, 10 keV以下の熱的な成分のみから計算. いくつかのマグネターは光度が変動することが知られており, 点線で結んでいる. 図中の $L_x = L_{sd}$ の線より上の領域は, 星の回転エネルギーでX線の放射を説明することができない.

sar; AXP) と呼ばれる天体も見つかった¹³⁾. 活発なバースト活動は見られず, 温度 $\sim 0.5 \text{ keV}$ の熱的なX線スペクトルで定常的に輝いていた. 図3に示すように, そのX線の光度は $L_x \sim 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ に達するのに対し, 自転周期と伸び率から推定される回転エネルギーの減少は $\dot{E}_{sd} \sim 10^{32-34} \text{ erg s}^{-1}$ に過ぎない. そのため, 回転エネルギーを電磁エネルギーに変換してパルスを放つ通常の電波パルサー (回転駆動型パルサー) の枠組み¹⁴⁾では説明できない. また, 連星系をなして質量降着をしている観測的な証拠もなく^{15), 16)}, 降着エネルギーでも説明できないため, そのエネルギー源は未解決の問題として残されていた.

ここ数年の間に新天体の発見も相次いでおり, 約8個の軟ガンマ線リピーターと約10個の特異X線パルサーが, 図4のように見つかった. ど

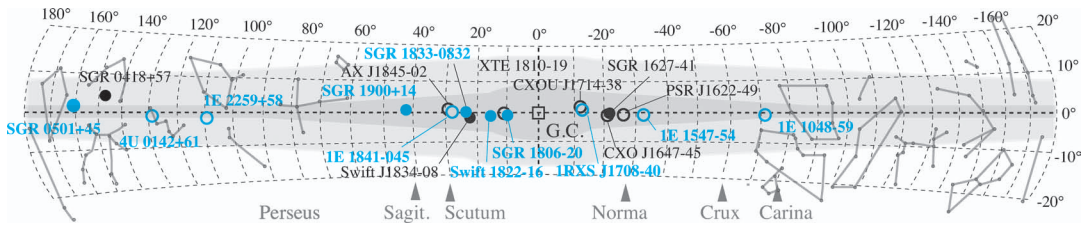


図4 これまでに知られている軟ガンマ線リピーター（黒丸）と特異X線パルサー（中抜き丸）の位置を銀河面上に示した. 青いデータ点は「すぎく」衛星により観測された天体を示す. 一部の候補天体, マゼラン雲の天体は含まれていない. 年に1個のペースで新しい天体が見つかるようになってきた.

うやら, この種族は銀河系内にこれまで考えられていた以上に多く存在するようで, その正体を解明することは, 天体物理学にとっての大きな課題と言える.

2. マグネター仮説—宇宙の磁石星—

軟ガンマ線リピーターと特異X線パルサーの2種族は, 歴史的には別種の天体として見つかったが, 特異X線パルサーからもバーストが検出され¹⁷⁾, 両者の間に共通した特徴が見いだされつつある¹⁸⁾⁻²⁰⁾. これらの種族の特徴を表1に示す. 孤立したパルサーを回転する磁石として扱えば, 磁気双極子放射をしながら回転エネルギーを捨てて減速していくと近似できる²¹⁾. 自転周期とそのスピンドOWN率の計測から回転エネルギーの減少率 $E_{sd} \propto \dot{P}/P^3$ を求め, これを表面磁場 B_s の磁気双極子放射の放射量 $L_{mag} \propto B_s^2/P^4$ と等しいとすると, 磁場強度を

$$B_s = 3.2 \times 10^{19} \sqrt{\dot{P}P} \quad (\text{G}) \quad (1)$$

と推定できる (図2点線). このようにして推定した磁場を図5に示した. 通常の電波パルサーは $B \sim 10^{12}$ ガウスにピークをもつに対し, 特異なパルサー群にもこの近似を当てはめた場合, 通常の中性子星を2-3桁もしのぐ, 10^{14-15} ガウスの磁場に集中する.

この事実と表1の特異な観測的特徴とを合わせ, 90年代中頃には, 自転や降着ではエネルギー源を説明できないこれらの天体は, 「きわめ

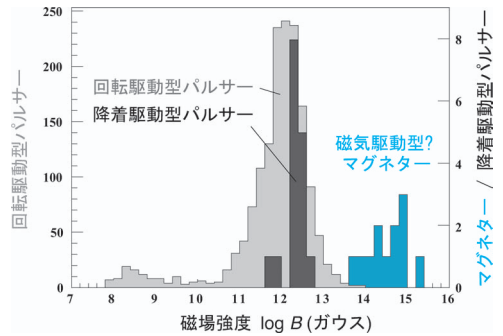


図5 回転駆動型の電波パルサー (薄黒)¹¹⁾, 連星系で質量降着による降着駆動型パルサー (濃黒)²²⁾, 磁場駆動型と考えられているマグネター (青)¹⁰⁾ の3種族の磁場強度の分布¹⁰⁾. 前者2種族は, 図2を射影したことに対応.

て磁場の強い特殊な高密度天体で, 内部に蓄えた莫大な磁場エネルギーを解放して輝く磁気駆動型の天体, マグネターである」(マグネター仮説)と提唱されるに至った²³⁾⁻²⁵⁾. 地球や太陽の磁場 ~ 1 ガウスや1,000ガウスをはるかに超え, 典型的な中性子星を2-3桁も上回る磁石星が存在すれば, 宇宙で最強の磁場をもつ天体となる.

初期の理論研究においてThompsonとDuncanらは, II型超新星で生まれた中性子星が十分に速く自転している場合, ダイナモ機構が働いて流体の運動エネルギーの一部が磁場に移ることで, 10^{15} ガウスを超える磁場をもつマグネターを形成できると指摘した. これだけ強い磁場をもつと自転に急速にブレーキをかけ, 観測された遅い自転周期を説明できる. この仮説によれば, 星表層の硬い殻を貫く磁力線が動いて地震 (星震) が発生

表1 マグネターと総称される天体の特徴一覧

1. パルス周期が長く ($P=2-11$ s), 周期の変化率が大きい ($\dot{P}=10^{-12}-10^{-9}$ s s⁻¹). これらから求まる表面磁場は臨界磁場を超える ($B_s > B_{cr} = 4.4 \times 10^{13}$ G).
2. 定常的に輝いている軟X線 ($\sim 1-10$ keV) の光度 $L_X \sim 10^{35}$ erg s⁻¹ は, スピンドアウン光度 $\dot{E}_{sd} = 10^{32-34}$ erg s⁻¹ を1-3桁上回る.
3. 安定したX線パルスには, ドップラー変調など, 連星をなす証拠が見当たらず, 孤立星と考えられる.
4. 周期と変化率から計算される特性年齢は $\tau_c < 100$ kyr と若く, いくつかの天体は超新星残骸に付随する.
5. 軟X線の定常放射のスペクトルは $kT \sim 0.5$ keV の黒体放射に近く, これはマグネター以外の孤立中性子星の表面温度より高い.
6. 定常X線は希に, 少なくとも2-3桁ほどの突発増光を起こし, 1-2カ月ほど徐々に減光する.
7. 歴史的に3例の巨大フレアが観測された. 継続時間 ~ 400 秒に及び, 温度数十keVのプラズマの閉じ込めを起こすには $\geq 10^{14}$ ガウスの磁場が必要になる.
8. 突発的に, 数十ミリ秒の2温度黒体放射で近似できる短時間バースト (short burst) を起こす. そのX線光度はエディントン光度を超える場合もあり, 強磁場中で電子-光子相互作用の断面積が小さくなった効果という指摘もある. 定常X線の増光に連動することが多い.
9. ほとんど電波パルスが検出できない. 強磁場での光子分裂が e^+e^- 対生成より卓越するための影響という指摘もある.
10. ~ 10 keV 以上で卓越する, 光子指数 $\Gamma_h \sim 1$ のハード成分 (硬X線放射) が, 静穏期と活動期のマグネターから確認され始めている (本稿の主題).

すれば, 磁気エネルギーを解放して頻発するバーストになり, より稀に磁場の大規模な組み換えが起きれば巨大フレアも形成できる. 実際, 周期をもつ巨大フレアを説明するには, ~ 400 秒という長時間にわたって, 星表面に温度 $kT \sim 10-30$ keV もの高温プラズマを閉じ込めておく必要があり, マグネターの磁場強度が必要だ. このように, この仮説は表1であげた観測事実に説明を与えようとしている.

マグネター仮説によれば, X線放射は星内部に蓄えられた磁場エネルギーによって賄われていることになる. では, 誕生後どのくらいの期間にわたり磁場エネルギーで輝くだろうか? 孤立した

パルサーの年齢推定では, 周期の観測から

$$\tau_c = P/2\dot{P} \quad (2)$$

という特性年齢がよく用いられる. 1054年に超新星爆発の記録された年齢958年の, かに星雲のパルサーの場合, 計測された33ミリ秒の周期とスピンドアウン率から $\tau_c = 1246$ 年となり, ほぼ一致する. マグネターは周期から推定すると, $\tau_c < 100$ kyr の比較的若い天体であり, 初期に 10^{46} erg の磁場エネルギーを蓄えていれば, kyrのタイムスケールにわたって, 観測された $L_X \sim 10^{34-35}$ erg s⁻¹ のX線放射をすることが可能である.

もし本当にマグネターの磁場がこれほど強ければ, 基礎物理の視点からも面白い. 強磁場中での電子ランダウ準位間のエネルギー差が電子質量と等しくなる, 臨界磁場 $B_{cr} = m_e^2 c^3 / \hbar e = 4.4 \times 10^{13}$ ガウス (図2) を超えると, 方解石の結晶のように偏光により光の速度が変わる“真空の複屈折”や, 磁場との相互作用で生じる“光子の自然分裂”, 電子が磁場に強く束縛されるための“光子-電子の散乱断面積の磁場依存性”など, 地球上では検証できない素過程が理論的に予言されている²⁶⁾. 実際, エディントン光度を超えるバースト放射は, 電子-光子の散乱断面積が磁場中で小さくなる効果であるという指摘もある²⁷⁾. マグネターは, 天文学的な視点のみならず, 極限的な磁場における光と物質の振る舞いを調べる実験室になるかもしれない.

これまでマグネター仮説は広く議論されているが, 白色矮星や降着型パルサーのサイクロトロン共鳴による磁場推定²²⁾ に比べると, 磁場推定に間接的な傍証が多い. そのため, 通常磁場の降着型パルサーの降着流²⁸⁾ や, 特殊な白色矮星²⁹⁾ で説明しようとする対立仮説も依然として残っており, マグネター仮説で決着がついたとまでは言い難い. 以下では, あくまでマグネターの存在を作業仮説として受け入れ, 新しい観測データを素直に見ていくことにする.

3. 新たな観測窓 — 硬 X 線の検出 —

図6は、典型的なマグネターの多波長スペクトルである。一部の例³¹⁾を除いて電波放射は検出されておらず、主にX線で放射が卓越する。赤外線や可視光の帯域でX線とは異なる成分が見えているが^{32), 33)}、本稿の紙面を超えるため、以下では高エネルギー放射に話を限る。

2000年代中頃まで、X線スペクトルは、星表面からと考えられる、温度 $kT \sim 0.5$ keVの黒体放射のみと思われおり、多くの観測が行われてきた²⁰⁾。ところがINTEGRAL衛星による銀河面の長時間の撮像観測により、10 keV以上の硬X線において、新しい放射成分が数天体から見つかった³⁴⁾。この硬X線の放射は、これまで知られていた10 keV以下の放射とは明確に別成分で(図6)、光子指数(スペクトルの傾き)は $\Gamma_h \sim 1$ なので νF_ν にすると顕著に右上がりになり、高エネルギー側でパルス率が $\sim 100\%$ に近くなるなど、このエネルギー帯域で他のX線源には見られない特徴をもっていた。その起源はよくわかっておらず、マグネター観測の新たな鍵になると期待できる。以下では、この成分を**ハード成分**と呼ぶ。ハード成分には、CGRO衛星により >1 MeVで上限値が付けられたため³⁴⁾、 ~ 1 MeV以下に折れ曲がりをもつのだろう。さらに、Fermi衛星で

もガンマ線で上限値が付けられている³⁵⁾。

次節に述べるように、マグネターのX線光度はときに桁で時間変動を示すため、軟X線から硬X線に及ぶ広帯域の同時観測が不可欠だ。しかし、INTEGRAL衛星の広視野感度は20 keV以上に限られ、10 keV以下の熱的成分は、別衛星の同時観測をしないといけない。一方、2005年に打ち上がった宇宙X線衛星「すざく」は、10–600 keVをカバーする硬X線検出器(HXD)と、0.2–12 keVを観測できるX線CCDカメラ(XIS)を併せ持ち、まさに広帯域の高感度観測により、両成分を同時に、かつ短時間で捉えることが可能だ。

この特長を生かし、図6に示した4U 0142+61の筆者らの観測と³⁰⁾、超新星残骸を伴う1E 1841–045の森井幹雄氏らの初期観測が行われ³⁶⁾、図6のように10 keV以上のハード成分を明確に検出できた。硬X線を担当するHXDが、INTEGRAL衛星よりも極めて短い観測で検出に成功したことは、時間変動する天体に「すざく」の威力が発揮されることを示唆していた。

4. 突発天体の「すざく」緊急観測

マグネターは定常X線とバーストの2種類の放射をする (§1, 2)。ここ数年、突発的なバーストをSwift衛星BATで検出し、同衛星のXRTが即座に追観測すると、熱的成分の定常X線も明るくな

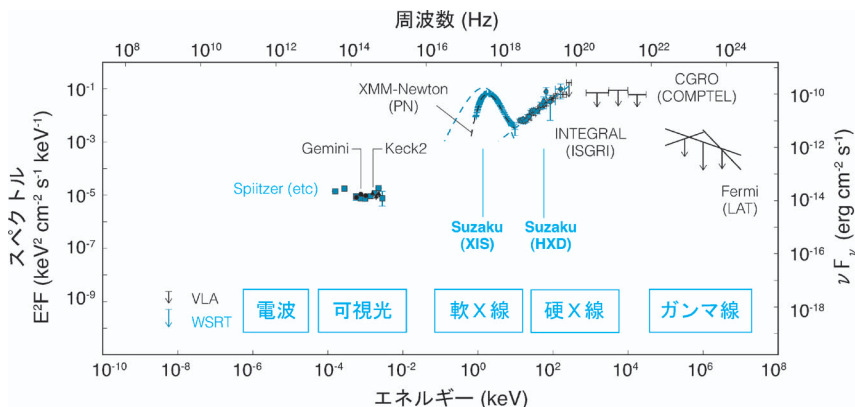


図6 典型的な特異X線パルサーである4U 0142+61の電波からガンマ線に及ぶ多波長スペクトル³⁰⁾。

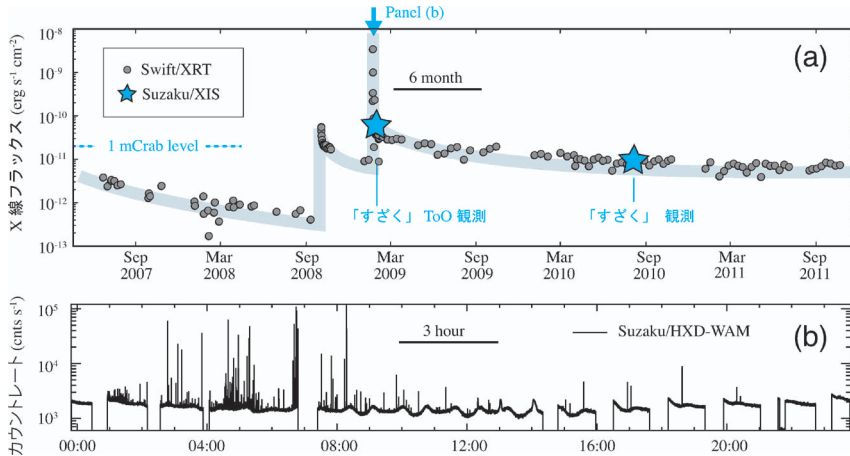


図7 (a) 特異X線パルサー1E 1547.0-5408のSwift衛星XRT検出器による、2-10 keVの熱的成分の長期モニタリング。2009年1月22日(図中の矢印)に3桁近い急激なX線増光を生じ、多数の短時間バーストを発生した。(b) 1月22日にHXD-WAMにより記録された短時間バーストの例^{41), 42)}。およそ70-300 keVのエネルギーに対応。通常の緩やかな変動の上に多数のスパイク状のバーストが多数見られる。

るといふ突発増光の報告が相次ぐようになった³⁷⁾。マグネターはトランジェント天体として、活動性を増す期間(活動期)があるようだ。

INTEGRALが報告したハード成分は、定常的に明るい天体から検出されただけで、活動期にハード成分が現れるかはわかっていなかった。まさに、「すざく」はこの突発現象に向いており、そのようなチャンスは比較的早くめぐってきた。

2008年、史上5番目の軟ガンマ線リピーターSGR 0501+4516が発見され、4日後に日欧米グループ提案の「すざく」緊急観測を実施した。バーストや定常X線など、新発見の成果を世界に先駆けて発表し³⁸⁾、10-70 keVに光子指数 $\Gamma_h \sim 0.9$ のハード成分の存在を検出した³⁹⁾。

さらに翌年の1月、HXDの外側を囲むアクティブ・シールドのライトカーブに、図7bの見たこともない無数のバースト現象が記録された⁴⁰⁾。このようなすざまじい記録はこれまでになく、余りに強いバーストは、検出器の安全装置を作動させ、一時、高圧がオフになった(図7bの07:00あたり)。この一連のバースト群は、他の複数の衛星でもとらえられ、既知の特異X線パ

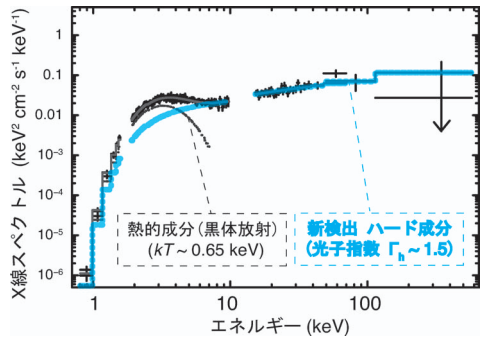


図8 増光時の1E 1547.0-5408の「すざく」広帯域X線スペクトル⁴⁴⁾。ハード成分を初検出。~2 keV以下は星間吸収を受けている。

ルサー1E 1547-5408が発生源であることが明らかになった。これまで1E 1547.0-5408は10 keV以下の観測ばかりで、ハード成分は報告されていない。今回の観測で、硬X線で検出されるのか? 緊急観測が行われた。

観測中にXISでバーストが検出できた。さらに、軟X線は静穏な $kT \sim 0.43$ keVの黒体放射に比べ⁴³⁾、~0.65 keVと高温になり2桁も明るい定常X線が観測された⁴⁴⁾。HXDのデータでバーストを取り除き、慎重な解析を行ったところ、図8

のスペクトルに示した、 $\Gamma_h \sim 1.5$ という硬いスペクトルで、100 keV以上まで延びる、卓越したハード成分をこの天体から世界で初めて顕著に検出できた⁴⁴⁾。これほど硬X線が卓越する例はこれまでになく、20–100 keVの硬X線フラックスは、2–10 keVのそれを1.6倍も凌駕していた。

このように、活動期のマグネターにおいてハード成分も増加し、熱的成分と同程度か、それ以上に放射を担うらしい。それでは、両者の間には何らかの規則性が潜んでいるのだろうか？

5. X線スペクトルの系統的進化

これらの成果により、国内でもマグネターへの関心が高まり、第4期の重点観測（AO-4 Key Project）として2009年から複数天体の観測が行われた（文献42のTable 1）。2009年末の段階で、検出可能なマグネターのほぼ全てを観測し、9天体中、混入天体の影響を受けた天体等を除き、7天体からハード成分を検出した。

それらの解析から、いくつかの特徴が見え始めた⁴⁵⁾。まず図9のように、ハード成分の光子指数は、式(2)から推定される特性年齢が大きくなるに伴って小さくなっていく。老齢な天体ほど硬く（より高エネルギー側に向かって卓越し駆け上がっていく）という傾向だ。これは、図10aに示したX線スペクトルの比較によく現れており、INTEGRALの観測結果とも一致した（図9）。

さらに熱的成分も合わせ、図10aを見ると、若い天体ほどハード成分が低エネルギー側まで延び、熱的成分に対して卓越しているようだ。そこで、1–60 keVの熱的成分のX線光度 L_h に対し、同じ帯域のハード成分の光度 L_s についてハードネス比を調べた。これを特性年齢、磁場強度に対して示したものが図10c, dで、本来は独立な観測量である年齢や磁場に対して、ハードネス比は

$$\begin{aligned} \xi &= L_h/L_s & (3) \\ &= (3.3 \pm 0.3) \times (\tau_c/1 \text{ kyr})^{-0.67 \pm 0.04} \\ &= (0.09 \pm 0.07) \times (B_s/B_{cr})^{1.2 \pm 0.2} \end{aligned}$$

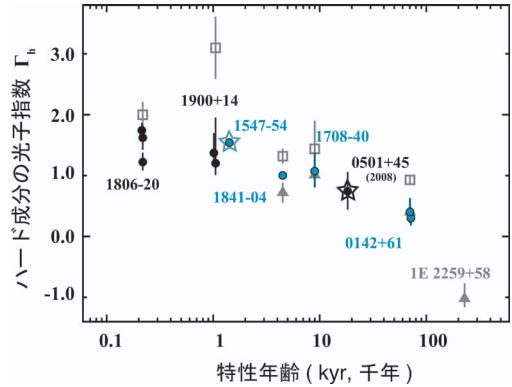


図9 ハード成分の光子指数 Γ_h と特性年齢 τ_c の関係⁴⁵⁾。「すぎく」による軟ガンマ線リピーター（黒丸）と特異X線パルサー（青丸）での観測結果。星印は活動期に観測された天体で、灰色は主にINTEGRAL衛星で得られた結果。

と関連していた。

図10c, dの相関係数はそれぞれ、 $-0.989, 0.873$ で、サンプル数は現段階では多くないものの、強い相関と言える。P- \dot{P} ダイアグラム（図2と図10b）では右上ほどハード成分が強く、これは図11のように、“マグネターのハード成分は、特性年齢が若く磁場が強い天体では低エネルギー側まで延び、熱的成分に対して卓越する（ $\xi \sim 10$ ）が、老齢になると、低エネルギー側が弱くなり、光子指数が小さく（傾きが硬く）、熱的成分に対し弱くなる（ $\xi \sim 0.1$ ）”ことを意味する。

このことは、軟ガンマ線リピーターと特異X線パルサーという歴史的に別種として扱われた2種族が、スペクトル進化で統一的に扱える可能性を示している。恒星のヘルツシュプルング・ラッセル図（HR図）のように、超新星爆発でマグネターが生まれ、磁場エネルギーを解放して輝き、どのように死んでいくのかという基本特性かもしれない。

ハード成分は $\Gamma_h = 0.5 - 1.7$ と硬く（高エネルギー側ほど卓越するスペクトルの特徴）、既知の非熱的放射を単純に当てはめては説明できない。星表面の熱制動放射^{46), 47)}や、強磁場のコンプト

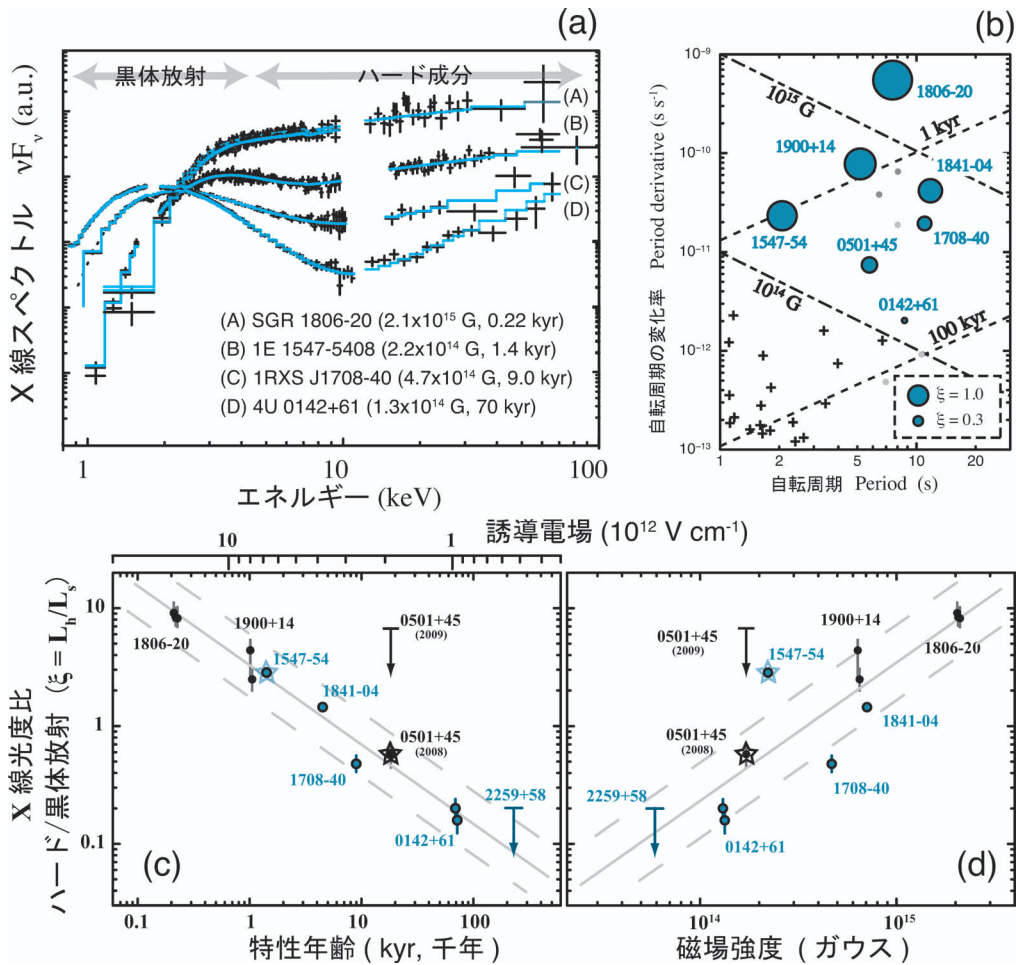


図10 (a) 代表的なマグネター4天体のX線スペクトルを、比較のため2 keVで規格化した。天体名に、周期から推定される磁場強度と特性年齢も示す。(b) $P-\dot{P}$ ダイアグラム(図2)にハードネス比 ξ を、円の大きさに対応させて表示⁴⁵⁾。(c) 軟ガンマ線リピーター(黒)と特異X線パルサー(青)のハードネス比 ξ と特性年齢 τ_c の相関⁴⁵⁾。線と破線は式(3)と、その2、1/2倍を示す。なお、半径Rで回転角周波数 Ω をもつ天体が回転すると、発生する誘導電場は、 $E \sim R\Omega B_s \propto R(1/P)\sqrt{(P\cdot\dot{P})} \propto \tau_c^{-0.5}$ と表せるので、横軸を誘導電場でも示すことができる(上軸)。ハード成分の成因に、マグネター磁気圏の粒子加速がかかっているのかもしれない。(d) 磁場強度に対する相関。(AASの許可を得て掲載。)

ン散乱^{48), 49)}、磁気圏のシンクロトロン放射など、多くの理論モデル^{28), 50)}が提示されつつあり、「すぎく」のスペクトル変化に着目した議論も出始めたが⁵¹⁾、結論に至っているとは言い難い。

柴田晋平氏と高田順平氏らとわれわれが検討している仮説の一つは、強磁場の物理プロセスである「光子分裂」の効果である⁵²⁾。通常磁場のパルサー ($B \sim 10^{12}$ ガウス) の標準的なモデルでは、

磁気圏において、電子対生成と曲率放射によるカスケードが生じる。一方、臨界磁場 B_{cr} を超えると、光子が低エネルギーの2光子に分裂する効果も無視できない^{26), 53)}。実際、電波放射が検出されないのは、この効果で高エネルギー粒子が生成されないためという指摘もある⁵³⁾。もし、 e^+e^- 対消滅や星表面のフレアで軟ガンマ線が生成され、光子分裂といった効果の中を伝播すると、強

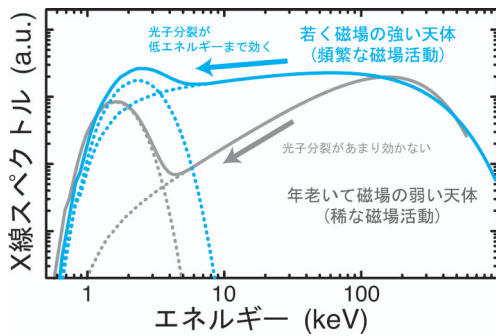


図11 年齢の若く磁場の強い天体で予想されるスペクトル（青）と老齢で磁場の弱くなった天体で予想されるスペクトル（黒）の概念図。

磁場ほど低エネルギーまで光子分裂が有効に効くため、本稿のスペクトルの傾向を再現できる。シミュレーションも進んでおり⁵²⁾、理論の進展に期待するとともに、ぜひ今後の観測により決着をつけたい。

6. マグネター研究の広がり

高感度・広帯域な「すざく」の性能をフルに活かし、マグネターの統一的描像に一步近づいた。これは氷山の一角なのか、より深い物理があるのかは今後の課題である。特に、ハード成分の観測は今後進むと期待され、増光直後に図10c, d上どのように振る舞うのかは興味深い。これを調べるには、増光時に観測を複数回行うのがとても有効であり、他の衛星には真似のできない「すざく」の特長を生かした観測と言える。

本稿では定常X線を議論したが、バーストの解析も行われている。安田哲也・寺田幸功氏らは、1E 1547.0–5408から、極めて珍しい ~ 1 MeV近いエネルギーまでの放射をHXD-WAMで検出した⁴¹⁾。また、中川友進氏は定常放射がバーストの重ね合わせで説明できるかを検証しており、SGR 0501+4516のバーストと定常放射のスペクトルの類似性を指摘した⁵⁴⁾。筆者の1E 1547.0–5408の解析も同様の結果を示唆している⁵⁵⁾。

図7aのように、マグネターは希に突発的なエ

ネルギー解放を起こすほかは、静穏期として過ごすことがわかってきた。もしかすると、銀河系内のマグネター数はこれまで考えられていた以上に多いのかもしれない。最近発見されたSGR 0418+5729は磁場が $< 7.5 \times 10^{12}$ Gaussと示唆されており⁵⁶⁾、中野俊男・牧島一夫氏は特性年齢に磁場減衰の効果を入れた議論を始めた。銀河系が活動を停止したマグネターの成れの果てに満ちているというのは面白い想像だ。

マグネター仮説においてはそもそも、この種族が本当に磁気駆動型の天体か、決着がつかない。今後打ち上げられるASTRO-H衛星やGEMS衛星での進展が期待される。ASTRO-Hでは、強磁場の効果で ~ 1 MeVで急峻に折れ曲がるスペクトルを軟ガンマ線検出器(SGD)で観測し、高エネルギー分解能を誇るカロリメーター(SXS)で陽子サイクロトロンを見つければ、強磁場のより直接的な証拠となる。また、強磁場ではトムソン散乱の断面積が偏光に強く依存するため(§2)、X線偏光の専門衛星GEMSの活躍が期待できる。

このような極限的な物理系にマグネター仮説でアプローチすることにより、この奇妙な天体システムの解明とともに、高密度天体の状態方程式や磁性の起源の理解が進めば、地味豊かで多様な自然の理解がより広がると期待している。観測によって決着をつけるべく、解明は始まったばかりである。

謝辞

本稿は、筆者の博士論文を元にしています。大学院の5年間にわたり、論文の執筆をはじめ、すべての面で熱心にご指導をいただいた牧島一夫先生には、心から深く感謝しています。共同研究者の柴田晋平氏、高田順平氏との放射機構に関する議論、中川友進氏、中澤知洋氏とのデータ解析の議論に御礼を申し上げます。本稿のデータの多くは、牧島一夫先生を筆頭とする「すざく」キープロジェクトによって得られたものであり、

プロジェクトメンバーとともに、衛星運用に負担をかける緊急観測を受理し、厳しいスケジュール下で観測していただいた「すざく」チームの皆様にも御礼を申し上げます。研究員として渡米後にスタンフォード大学（ガブリ研究所）でお世話になった田島宏康先生、Roger Blandford先生、本稿を執筆する機会を与えていただいた竹井 洋氏にも感謝しております。なお、本研究は、日本学術振興会の援助を受けて行われました。

参考文献

- 1) Mazets E. P., et al., 1979, *Nature* 282, 587
- 2) Evans W. D., et al., 1980, *ApJ* 237, L7
- 3) Feroci M., et al., 2001, *ApJ* 549, 1021
- 4) Hurley K., et al., 2005, *Nature* 434, 1098
- 5) Terasawa T., et al., 2005, *Nature* 434, 1110
- 6) Murakami T., et al., 1994, *Nature* 368, 127
- 7) Kouveliotou C., et al., 1998, *Nature* 393, 235
- 8) 村上敏夫, 1999, *天文月報* 92(3), 152
- 9) 中川友進, 2008, *天文月報* 101(1), 7
- 10) Enoto T., 2010, Ph.D. thesis, University of Tokyo <http://repository.tksc.jaxa.jp/pl/dr/IS8000023000/en>
- 11) Manchester R. N., et al., 2005, *VizieR Online Data Catalog*, 7245, 0
- 12) McGill Pulsar Group, McGill SGR/AXP Online Catalog, <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>
- 13) Fahlman G., Gregory C., 1981, *Nature* 293, 202
- 14) 柴田晋平, 1993, *天文月報* 86(6), 250
- 15) Koyama K., et al., 1989, *PASJ* 41, 461
- 16) Mereghetti S., et al., 1998, *MNRAS* 296, 689
- 17) Gavriil F. P., et al., 2002, *Nature* 419, 142
- 18) Woods P. M., Thompson C., 2006, *Compact Stellar X-ray Sources* 547
- 19) Kaspi V. M., 2007, *Ap&SS* 308, 1
- 20) Mereghetti S., 2008, *A&AR* 15, 225
- 21) Meszaros P., 1992, *Theoretical Astrophysics*, Chicago: University of Chicago Press—c1992
- 22) Makishima K., et al., 1999, *ApJ* 525, 978
- 23) Duncan C., Thompson C., 1992, *ApJL* 392, L9
- 24) Thompson C., Duncan R. C., 1995, *MNRAS* 275, 255
- 25) Thompson C., Duncan R. C., 1996, *ApJ* 473, 322
- 26) Harding A. K., Lai D., 2006, *Reports on Progress in Physics*, 69, 2631
- 27) Paczynski B., 1992, *Acta Astron.* 42, 145
- 28) Trümper J. P., et al., 2010, *A&A* 518, A46
- 29) Malheiro M., et al., 2011, *arXiv:1102.0653*
- 30) Enoto T., et al., 2011, *PASJ* 63, 387
- 31) Camilo F., et al., 2006, *Nature* 442, 892
- 32) Kern B., Martin C., 2002, *Nature* 417, 527
- 33) Morii M., et al., 2009, *PASJ* 61, 51
- 34) Kuiper L., et al., 2006, *ApJ* 645, 556
- 35) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJL* 725, L73
- 36) Morii M., et al., 2010, *PASJ* 62, 1249
- 37) Rea N., Esposito P., 2011, *High-Energy Emission from Pulsars and their Systems*, 247
- 38) Enoto T., Nakagawa Y. E., Rea N., et al., 2009, *ApJL* 693, L122
- 39) Enoto T., et al., 2010, *ApJ* 715, 665
- 40) Terada Y., et al., 2009, *GCN Circ.* 8845
- 41) Yasuda T., et al., 2010, *The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources*, 31p
- 42) Enoto T., et al., 2010, *Suzaku Conf. Proc.*
- 43) Halpern J. P., et al., 2008, *ApJ* 676, 1178
- 44) Enoto T., et al., 2010, *PASJ* 62, 475
- 45) Enoto T., Nakazawa K., Makishima K., Rea N., Hurley K., Shibata S., 2010, *ApJL* 722, L162
- 46) Thompson C., et al., 2005, *ApJ* 634, 565
- 47) Beloborodov A. M., et al., 2007, *Ap&SS* 308, 631
- 48) Baring M. G., et al., 2007, *Ap&SS* 308, 109
- 49) Fernandez R., et al., 2007, *ApJ* 660, 615
- 50) Heyl J. S., et al., 2005, *MNRAS* 362, 777
- 51) Beloborodov A. M., 2012, *arXiv:1201.0664*
- 52) Takata J., Shibata S., Enoto T., 2012, *submitted*
- 53) Baring M. G., et al., 1998, *ApJL* 507, L55
- 54) Nakagawa Y. E., et al., 2011, *PASJ* 63, 813
- 55) Enoto T., et al., 2012, *submitted*
- 56) Rea N., et al., 2010, *Science* 330, 944

Recent X-Ray Study of Magnetars

Teruaki ENOTO

Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, Stanford University, Physics Astrophysics Building, 452 Lomita Mall, MC 4085, Stanford, CA 94305-4085, USA

Abstract: "Magnetars" are ultra-strongly magnetized neutron stars powered by the magnetic energy. Using the Suzaku satellite, unified spectral studies over the 0.8–70 keV range revealed a clear wide-band spectral evolution, in which the hard-tail component become weaker and harder towards sources with older characteristic age.