

論文内容の要旨

X-ray Studies of Magnetars with Suzaku (「すざく」衛星によるマグネター天体の X 線観測)

榎戸 輝揚

研究の背景: 超強磁場天体 マグネター

マグネターは、数ある X 線天体でも極めて特異な中性子星である。この特異な X 線パルサーは、軟ガンマ線リピーター、あるいは異常 X 線パルサーとして、おもに銀河面上に ~ 16 個ほど発見されてきた (図 1)。不思議なことに、 $P \sim 5$ 秒のパルス周期とその変化率 $\dot{P} \sim 10^{-11} \text{ s s}^{-1}$ から求まる回転エネルギーの消費率は $\sim 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ にすぎず、それでは、観測された軟 X 線光度 $\sim 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ を説明できない。連星からの質量降着の徴候もないため、よく知られた自転や降着以外のエネルギー源が必要である。自転周期の減衰から磁気双極子放射を仮定して求まる磁場強度が $\sim 10^{15} \text{ G}$ に達するため、これらの天体は莫大な磁気エネルギーを何らかの方法で解放して輝く、磁気駆動型の天体、すなわちマグネターと考えられるようになった。マグネターが $B \gtrsim 10^{15} \text{ G}$ もの強磁場をもてば、電子対生成、光子の分裂、電子のエネルギー単位の離散化などの極限的な物理現象が生じていると期待できるため、宇宙物理のみならず、地上で成し得ない基礎物理の視点からも興味深い観測対象といえる。巨大フレアや、散発的に生じるバースト現象など、強磁場を支持する観測も増えてきているが、この不思議な天体が「異常に強い磁場をもつのか」「磁場エネルギーをどのように解放して X 線を放射するのか」などはよくわかっておらず、またそれらの性質や進化を系統的に記述する試みも、まだきわめて不十分である。本研究では、マグネターのこれらの疑問に答えるため、日本の 5 番目の宇宙 X 線観測衛星「すざく」の X 線 CCD カメラ (XIS; 0.2–12 keV) と硬 X 線検出器 (HXD; 10–60 keV) を駆使し、世界ではじめての 0.2–600 keV にわたる広帯域での網羅的なマグネター観測を行った。

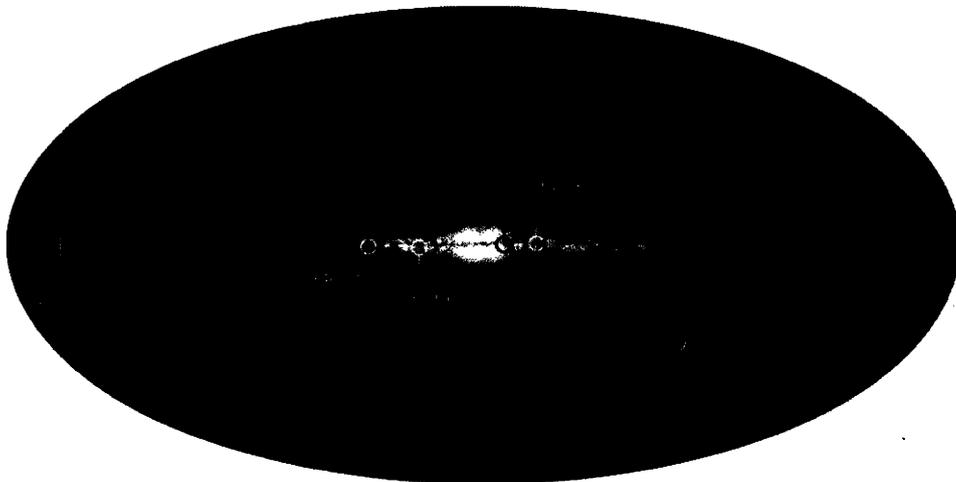


図 1 可視光画像と合わせて銀河座標上に示したマグネター分布。「すざく」が観測した天体を橙色で、それ以外を白で示した。1E 1048-59 は、2009 年 11 月の段階でデータ未公開。

「すざく」衛星によるマグネター観測

マグネターからは温度 ~ 0.5 keV の熱的な放射 (ソフト成分) が観測されてきたが、2006 年になり欧州の INTEGRAL 衛星によって、いくつかのマグネターから、硬 X 線帯域で ~ 100 keV 近くまで「べき」的に伸びる新たなハード成分が発見された。観測の難しい硬 X 線帯域のハード成分の性質はまだよくわかっておらず、高い硬 X 線感度をもつ「すざく」に最適の観測対象である。我々はハード成分の研究に狙いを定め、「すざく」の観測提案を行ってきた。第 2 期公募観測では 4U 0142+61 を提案して採択され、2007 年に実施された観測から、 $\gtrsim 100$ keV 以上に延びる光子指数 $\Gamma_h \sim 0.8$ のハード成分を検出した。幸運なことに、翌年には歴史上 5 番目になる軟ガンマ線リピーター SGR 0501+4516 が発見され、我々を中心とするグループが迅速に緊急観測を実施して、世界に先駆けてその X 線放射の性質を明らかにした (Enoto et al., 2009, ApJL)。続く 2009 年の 1 月には、静穏期にあったマグネター 1E 1547.0-5408 が 2 桁近く明るくなり、我々が主導した緊急観測により、この天体からはじめてハード成分を検出できた (Enoto & Makishima et al., 2010, submitted)。さらに、第 4 期公募観測において重点観測プロジェクトとしてマグネター観測を提案し、5 天体が採択された (PI 牧島, Co-PI 榎戸)。本研究は、これらの観測データに加え、過去に他の研究者により観測され 2009 年までに公開されたデータまで含めた、「すざく」の全マグネター観測 (9 天体; 14 観測) を統一的な観点のもとで解析したものである。これは、これまでに知られているマグネター ~ 16 天体の 6 割ほどに当たる (図 1)。

広帯域データの統一的な解析

「すざく」搭載の HXD は、硬 X 線に高い感度を持ち、個々の X 線光子の到来時刻を $61\mu\text{s}$ の精度で記録できるが、実際の観測データから X 線パルサーの周期を正確に決定しパルス波形を求めるためには、地球や衛星の公転運動を補正する必要がある。この補正ソフトウェアの開発と既知のパルサーを利用した時刻精度の検証作業を行い、ハードウェアとソフトウェアを統合して、所期の時刻精度が達成できていることを検証した。これらをもとに、マグネターのパルス周期とパルス波形を求めた。

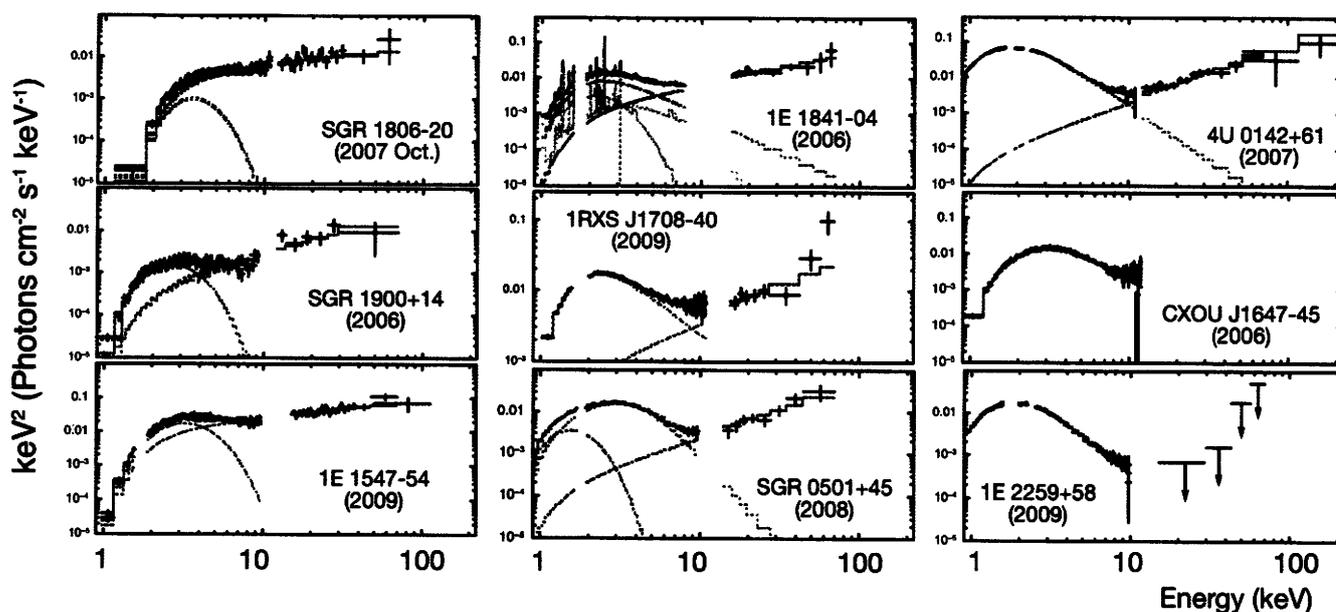


図 2 「すざく」が観測したマグネター 9 天体のエネルギースペクトル。縦軸は νF_ν で示し、星間吸収は含まれている。赤、緑、水色はそれぞれハード成分、ソフト成分、超新星残骸からの混入成分を表している。個々の図中に、天体名と観測時期を記した。

次に、すべてのマグネターについて、非 X 線バックグラウンド、宇宙 X 線背景放射、銀河面からのリッジ放射、視野内の混入天体、半導体検出器のノイズ現象などに注意し、包括的なデータ選別とバックグラウンド除去を行い、XIS と HXD 間の有効面積の相対比の補正を考慮した上で、同一の手法で全データのスペクトル解析を行った。図 2 は解析の結果得られた 9 天体のエネルギースペクトルの一覧である。いずれの天体からも、星表面からとおぼしき ~ 0.5 keV の熱的なソフト成分に加え、9 天体のうち 7 天体からは、ハード成分を検出することに成功した。

スペクトルから求まる物理量を正しく評価するには、広帯域を正しく説明できるスペクトルモデルが必要である。10 keV 以下へのハード成分の寄与を考慮しても、ソフト成分は単一の黒体放射では表せないことがわかった。そこで広く用いられてきたモデルとして、2 温度黒体放射や、黒体放射 + べき関数を用いたが、前者では 5–10 keV での超過分を説明できず、後者では 2 keV 以下で不自然に高い星間吸収を要求することが確かめられた。これらを解消し、広帯域スペクトルを正確にモデル化するため、欧米で開発されてきたシミュレーションに基づくモデルとともに、現象論的な式でスペクトルを記述できるモデルを新たに導入し、広帯域スペクトルを無理なく説明することに成功した。図 2 の色線は、これらのモデルを表している。

図 2 では、パルサーの年齢指標として広く用いられている特性年齢 $\tau_c = P/2\dot{P}$ の若い順に、左上から右下に向けてマグネターを並べている。 τ_c が小さい若いマグネターほどハード成分が卓越する傾向が見受けられる。特定のモデルに強く依存しないで広帯域スペクトルの特徴を定量化するため、星間吸収を除去した上で、ハード成分の 1–60 keV の X 線光度 L_h とソフト成分の 1–20 keV の光度 L_s の比 $\xi = L_h/L_s$ (Hardness Ratio; HR) を用いる手法を開発した。図 3 は特性年齢 $\tau_c = P/\dot{P}$ に対して ξ をプロットしたもので、強い負の相関が見られる。これは、マグネターの広帯域放射の中に発見された、新しい経験法則であり、これらの天体の進化を表すものと考えられる。

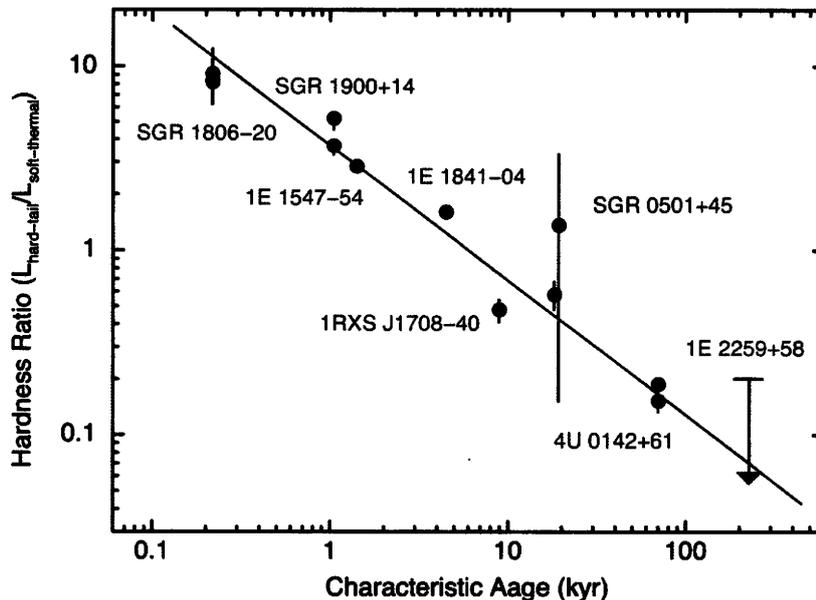


図 3 ソフト成分に対するハード成分の光度比 ξ を、特性年齢 τ_c に対して示した、HR 図。

マグネターのスペクトル進化と磁気圏での粒子加速

我々の「すぎく」データの解析から、以下のことが明らかになった。

- (a) マグネターの 1–100 keV に及ぶ広帯域スペクトルは、星表面からと考えられる温度 $kT \sim 0.5$ keV の熱的なソフト成分に加え、光子指数 $\Gamma_h \sim 1$ という異常に硬い「べき」で表される、 ~ 100 keV 以上まで伸

びたハード成分からなる。すなわち L_h は L_s と同程度か、若いマグネターでは数倍に達する (図 3)。

- (b) 図 3 が明瞭に示すように、 $\xi = L_h/L_s$ は τ_c に負に相関する。これはおもに L_h が τ_c とともに減少することに由来し、 L_s は τ_c にはよらず $\sim 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ であることがわかった。また、ハード成分の Γ_h は τ_c に従って 1.8 から 0.4 へ硬くなっていくのに対し、ソフト成分の温度は $\sim 0.5 \text{ keV}$ 程度で、 τ_c に対する依存性はあまり見られなかった。
- (c) 活動期のマグネター 2 天体でも他の静穏期の天体で得られる ξ と τ_c の相関に一致するスペクトル形状を示した。したがって、活動期においても両成分の光度は、ほぼ同程度に増大していると考えられる。
- (d) ハード成分の低エネルギー側への寄与を考慮しても、ソフト成分は単一の黒体放射では表せず、高エネルギー側に裾を引く構造をもつ。さらに SGR 1806-20 の観測から、ハード成分の低エネルギー側は、少なくとも 2 keV まで「べき」的な形で伸びていることもわかった。
- (e) パルス波形のピーク強度はエネルギーに依存して変わるものがあり、ソフト成分で見られる 2 山の一方がハード成分では消失する例があるが、パルス波形の形はソフト成分とハード成分で大きくは異ならなかった。

これらの観測結果と先攻研究を合わせて、マグネターの X 線放射について以下の解釈を導ける。

- (1) ハード成分はほとんどのマグネターに普遍的に見られ、(a) より、マグネターのエネルギー放出のかなりの割合を占める。
- (2) $\sim 100 \text{ keV}$ を超えて伸びるハード成分は、加速された高エネルギー粒子が存在することを意味する。星表面では加速距離を稼げないため、無衝突なマグネター磁気圏での加速を考えるのが自然である。さらに (d) のソフト成分の裾構造は、こうした磁気圏での高エネルギー粒子により、表面からの熱的光子が叩き上げられた結果として説明でき、その定量モデルによれば、(陽) 電子は典型的に $\gamma \sim 1$ 程度のローレンツ因子をもつと見積もられる。
- (3) ハード成分の光度 L_h が加速粒子のエネルギー解放に由来すると考えると、 L_h の減少 (b) は加速粒子の生成率が年齢とともに低下することを意味する。(2) の $\gamma \sim 1$ を仮定すると、ハード成分の光度を供給するには磁気圏の密度が古典的な Goldreich-Julian 密度より 2-3 桁高い必要があり、星内部のトロイダル磁場に起因する「ねじれ」の寄与があると考えれば説明できる。一方で、 τ_c によらずほぼ一定のソフト成分の光度 (b) は、ハード成分を形成する加速粒子の熱化ではなく、おもに星内部の磁気エネルギーの直接解放によると考えられる。
- (4) 本来、星の回転軸に対して我々が見る角度はランダムであるにもかかわらず、(b) の相関が強いことは、両成分の放射パターンが見る角度に大きくは依存しないことを意味する。(e) と合わせると、ハード成分もソフト成分と同様、星の表面近くから放射されるとするのが自然である。その場合、放射効率が高いことが要求される。これらの条件は、シンクロトロン放射、制動放射、コンプトン過程では説明が難しい。
- (5) 磁気圏に $\gamma \sim 1$ 程度の電子・陽電子プラズマが存在し、磁力線に沿って磁極に突入すると、陽電子の対消滅線が生じる。この 511 keV 光子が強磁場中での光子分裂を受けてハード成分を形成すると考えると、観測事実の全体を大きな矛盾なしに説明できる。

本研究により、「すぎく」による広帯域のデータ解析から、マグネターの広帯域スペクトルを統一的に定量化し、それらの放射領域や生成機構に物理的な考察を与えた。さらに強磁場における物理過程への考察と合わせ、観測結果に合う放射機構を指摘した。これらはいずれも $B \sim 10^{15} \text{ G}$ を必要とし、マグネター仮説はより強固なものとなったと言える。