

氏名	安田 哲也		
博士の専攻分野の名称	博士（理学）		
学位記号番号	博理工甲第 977 号		
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 24 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	Sub-MeV Gamma-ray Study of Anomalous X-ray Pulsar 1E 1547.0-5408 with Suzaku (すざく衛星を用いた特異 X 線パルサー 1E 1547.0-5408 の軟ガンマ線放射の観測的研究)		
論文審査委員	委員長	准教授	寺田 幸功
	委員	教授	田代 信
	委員	教授	吉永 尚孝
	委員	連携准教授	望月 優子

## 論文の内容の要旨

本研究では、X 線検出器の開発・運用チームの一員として衛星軌道上での較正やデータ解析に携わってきた「すざく」衛星搭載の WAM (Wide-band All-sky Monitor) 検出器によって得られた超強磁場中性子星「マグネター」候補である AXP 1E 1547.0-5408 天体からの軟ガンマ線バースト放射の観測データを解析し、現在も明らかにされていないその放射メカニズムに対して制限を与えた。

中性子星は太陽のような恒星が進化の末にたどり着く天体で、半径約 10 km、質量は太陽の 1.4 倍程度の高密度天体である。中性子星からの放射を双極子磁場による放射を仮定することで、星表面の磁場強度を自転周期とその変化率で推定することができる。典型的な中性子星は 1 億テスラほどであるが、その約百倍の 100 億テスラにも達する天体は理論的に「マグネター」と呼ばれている。先行研究によって観測されたマグネター天体からの放射は、従来の典型的な中性子星と同じ枠組みでは光度の時間変動や光子のエネルギー分布は説明できない。そのため、その特殊な放射はマグネター天体のもつ莫大な磁気エネルギーを解放することで輝いているとする強磁場説「マグネター仮説」が一般的である。マグネター仮説は、中性子星の表面に現れるポロイダル磁場に加えて、星内部に強力なトロイダル磁場を内在するモデルが広く受け入れられているものの、観測的な実証は乏しく決定的ではない。その一方で、上記で述べたような強磁場は必要とせず、超新星爆発で吹き飛んだ物質が中性子星に降り積もることでその放射を説明する化石円盤（またはフォールバック）モデルなどの「非マグネター説」も否定されていないのが現状であるため、マグネター仮説は未完成である。

真にマグネター仮説が正しければ、これほどの強磁場を作り出し保持するための磁場構造や中性子星の殻構造は、星内部の組成や状態方程式に直結するため、マグネター仮説の検証は天体物理に限らず現代物理学にとって解くべき課題である。さらに、磁場強度が 40 億テスラを超える極限の場でしか起こらない「光子分裂」現象が非線形量子電磁力学から予言されており、実証実験の場として注目されている。

本研究では、マグネター仮説および非線形量子電磁力学の検証へのアプローチとして、2009 年 1 月に

WAM 検出器によって観測されたマグネター天体 AXP 1E 1547.0-540 から得られたバースト放射のデータ解析をおこなった。WAM 検出器は現在運用中の硬 X 線・軟ガンマ線検出器のなかで 300-5000 keV 帯域においても最も有効面積が大きい。そのため、継続時間が典型的に 100 ms と短いマグネター天体からのバースト放射の光子を効率よく検出でき、455 イベントの検出に成功した。しかしその一方で、明るいイベントの場合、WAM 検出器の信号処理機器での処理速度よりも早い頻度で光子が検出器に入射している可能性が高く、入射光子数と光子のエネルギー測定を正しく測定できない「パイルアップ」の影響が無視できないことがわかった。そこで、申請者は信号処理機器の動作を再現する計算コードを開発し、モンテカルロ法を用いることで、パイルアップの効果を補正することに成功した。

本申請者は、以上の方法を用いて全検出イベントの統計的な解析をおこなうとともに、興味あるイベントを対象にした詳細なスペクトル解析をおこなった。特に、06:45:13(UT)に観測されたバーストのエネルギースペクトルは、約 20keV のプラズマ温度の黒体放射と 350keV で指数関数的に減衰する光子指数約 0.5 のべき関数の足し合わせで再現できることを発見した。この 350keV での折れ曲がり、一つの解釈として高エネルギー光子が複数の低エネルギー光子に分裂する光子分裂の効果による可能性がある。この示唆はマグネター天体が真に強磁場をもつ天体であることを支持することを明らかにした。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、中性子星パルサーの軟ガンマ線観測にもとづき、特異 X 線パルサーが強磁場中性子星であるとする「マグネター仮説」の検証を観測的に行った研究である。本研究で初めて、特異 X 線パルサーの突発現象であるショートバーストの軟ガンマ線エネルギースペクトルが詳細に測定され、強い磁場の環境下での放射を示唆するスペクトルの折れ曲がりが見出された。また、熱的放射と非熱的放射の光度が、突発現象の規模によらず、ほぼ一定であることが観測的に示され、マグネター説を補強する結果が導かれた。

中性子星は、重い恒星が進化の最終段階で到達する天体で、半径は約 10 キロメートル、質量は太陽の 1.4 倍程度（すなわち約  $3 \times 10^{30}$  キログラム）の高密度天体である。中性子星からの放射が周期的に明滅する事からパルサーとも呼ばれる。電磁波放射の明滅のタイミングから自転周期とその変化率が観測でき、その回転エネルギーの減少率が磁気双極子放射と同じだと仮定することで、星表面の磁場強度が推定される。典型的な中性子星の磁場強度は 1 億テスラ程度であるが、中には、その 100 倍近くの磁場が推定される「特異 X 線パルサー (AXP)」や「軟ガンマ線リピーター (SGR)」と呼ばれる中性子星も観測されている。これら AXP や SGR の磁場強度は臨界磁場 ( $10^{10}$  テスラ) を超えるため、その正体は「超強磁場中性子星 (マグネター)」であるとされる。一方で、中性子星が生成される超新星爆発の際に吹き飛んだガスが中性子星の重力に捉えられて再び降着する化石円盤モデルなど、非マグネター説もいまだ健在で、マグネター仮説に決着が着いていないのが現状である。

本論文では、AXP からの電磁波の観測でマグネター仮説を検証するために、X 線観測衛星「すざく」に搭載されたシンチレーションカウンター WAM 検出器を用いて、2009 年 1 月に検出した特異 X 線パルサー AXP 1E 1547.0-5408 からの増光現象のデータ解析を行っている。WAM 検出器は、現在運用中の軟ガンマ線検出器の中でも 300 キロ電子ボルト～6 メガ電子ボルト帯域で最も有効面積が大きい装置である。マグネターのような強磁場環境で、非線形量子電磁気学が予言する「光子分裂」現象が起こると、その放射のガンマ線スペクトルにカットオフが見られるはずである。WAM はまさにこのカットオフを観測するのに最適の検出器である。本研究により、合計 568 イベントもの増光現象の検出に成功し、そのうち 404 イベントが他衛星のデータと比較することで AXP 1E 1547.0-5408 から到来したとされており、その明るさ分布が、地球上の地震の規模分布の経験則とよくあうことが再確認されている。

本論文で、明るい 78 イベントのスペクトル解析の結果、低エネルギー帯域（硬 X 線領域）に見られる黒体放射が過去の衛星の結果と矛盾ないこと、また、このプラズマを閉じ込めるための磁場強度が、通常の中性子星の  $10^8$  テスラよりも強い必要があること、等が観測的に示されており、「マグネター仮説」を補強する結果となっている。なお、本論文では、明るいイベントを検出する際のパイルアップの効果を見積もるために、検出器の信号処理回路を模擬したモンテカルロシミュレーターが開発されており、太陽フレアを用いた系統的な効果検証がなされ、ひじょうに高い精度で AXP 1E 1547.0-5408 のエネルギースペクトルが計測できている。

一方、高エネルギー帯域（軟ガンマ線領域）までスペクトルが計測できた 20 イベントの軟ガンマ線スペクトルには、前述の熱的放射に加えて非熱的冪型放射が観測された。これは特異 X 線パルサーのショートバーストからは世界初の検出となっている。これらのうち 9 イベントからは「マグネター仮説」で予言されるカットオフ構造が観測されており、強磁場環境を示唆する発見となっている。さらに定量的に、増光のない定常状態から含めて 8 桁にわたり、非熱的放射の光度が硬 X 線帯域の熱的放射の光度とよく相関することが示され、

特異 X 線パルサーの活動状態によらず同一の機構でガンマ線が放射されている示唆が、本研究で得られた。

以上、述べたとおり、特異 X 線パルサーのショートバースト現象の軟ガンマ線観測と入念なデータ解析によって、世界で初めてショートバースト現象における軟ガンマ線スペクトルのカットオフが観測的に示され、正体がマグネターだとする仮説を補強している。本論文の主要部は査読制度のある国際的学術誌である Publications of Astronomical Society of Japan に英文で掲載受理され、その他、関連する共著査読論文が 2 編ある。また、本論文のテーマで、国際会議で 1 編のポスター発表がなされている。以上の実績も踏まえ、本論文は学位論文に値すると判断され、学位審査委員会は全員一致で合格と判断した。