

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### Study of the high-energy emission from the gamma-ray binary system LS 5039 (ガンマ線連星LS 5039のX線ガンマ線放射の研究)

氏名 米田 浩基

2000年代中頃から、TeVガンマ線観測技術の発展とともに、1 MeV以上の帯域で支配的な放射を示す、大質量X線連星が発見されてきた。「ガンマ線連星」と呼ばれるこれらの天体は、TeVまでのびる非熱的なスペクトルを持つため、粒子加速が起きていると考えられている。これまでに、8つの天体が見つまっているが、その多くは、コンパクト星が、中性子星なのかブラックホールであるか、わかっておらず、その非熱的放射・粒子加速のメカニズムも全く確立していない。したがって、ガンマ線連星という「宇宙の新たな大加速器」が何故、熱的な放射を示す多くのX線連星と異なり、TeVガンマ線に至るまでの高エネルギー放射を示すのかは、大きな謎である。

Collmar+14は、CGRO/COMPTELの観測データを再解析し、ガンマ線連星 LS 5039が、MeVガンマ線で極めて明るく輝く天体であり、約20 MeVにピークを持つ顕著な放射を示すことを発見した。LS5039の多波長スペクトル、特に、その顕著なMeVガンマ線放射は、これまで精力的に研究が進められてきたマイクロクエーサーモデルやパルサー風モデルなどの主要なモデルでは説明することができず、考えの抜本的な見直しに迫られている。

本論文では、LS 5039の高エネルギー放射機構の解明に向け、硬X線で最高感度をもつNuSTAR衛星や、11年に渡ってGeVガンマ線で全天観測を続けるFermi衛星を用いて、これまでにない感度で、硬X線・GeVガンマ線の観測的研究を行った。また、LS 5039は、X線からTeVガンマ線に渡る広いエネルギー帯域で放射するため、特定の帯域のみに注目するだけではなく、マルチバンドでのスペクトル解析が本質的に重要である。したがって、X線やGeVガンマ線での詳細な解析を行うと同時に、基礎的な放射モデルを構築した上で、X線からTeVガンマ線のスペクトルを包括的に解釈することを試みた。

本研究の内容は、大きく分けて、4つに分けられる。(1) これまで高い感度で観測がされてこなかった10 keVから70 keVの帯域に注目し、硬X線衛星NuSTARを用いた、1周期に渡るスペクトル解析、(2) すざく衛星の硬X線観測データも合わせて利用し、LS 5039において初めて硬X線帯域でのパルス放射の探索、(3) Fermi衛星の11年間に渡る観測データを解析し、GeV帯域での詳細なスペクトル解析や時間変動の調査、(4) LS 5039の粒子加速領域への制限を得るために、できるだけ仮定を排除した放射モデルの構築と、今回得られた広帯域のスペクトルとの比較、である。最後に、これらの結果を統合し、LS 5039の放射描像の解明に取り組んだ。

#### (I) 硬X線スペクトル解析

LS 5039のX線スペクトルは、SN比の悪さから、10 keVより上の帯域では、これまで詳細なスペクトル解析がされてこなかった。そこで、我々は、硬X線集光系によって高い感度を達成したNuSTAR衛星を用いたスペクトル解析を行った。その結果、LS 5039のスペクトルは、70 keVに至るまで、カットオフを伴わない単一のpowerlawモデルでうまく説明できることを発見した。

次に、軌道位相ごとにデータを分割して、3-10 keVのスペクトルを解析したところ、コンパクト星が観測者に最も近くなるInferior Conjunction (INFC) 付近で、フラックスが過去の観測と有意に異なっていることを発見した(図1左)。また、以前、INFC付近で観測されていた、短時間での増光現象

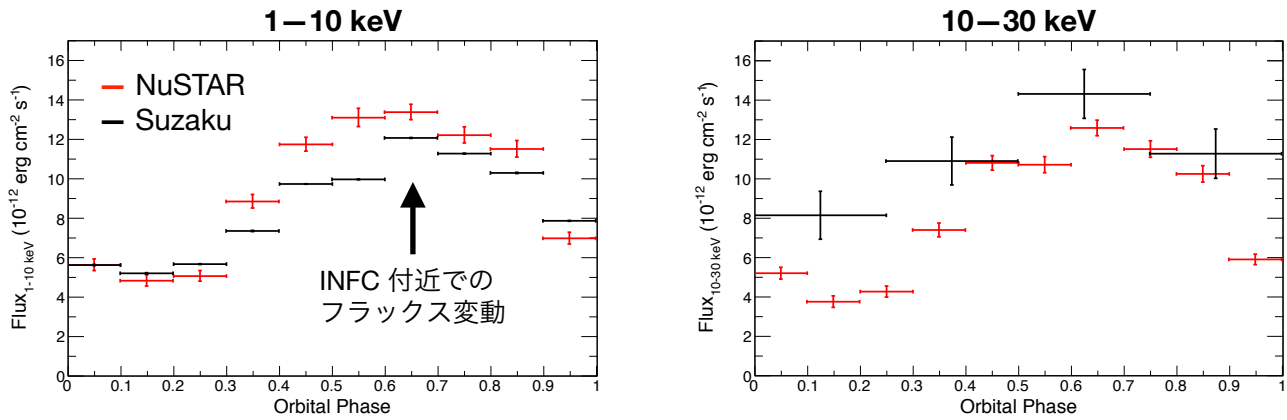


図1: 軌道位相とX線フラックスの関係。左が、1 keVから10 keVのエネルギーフラックス、右が10 keVから30 keVのエネルギーフラックスを示している。赤と黒は、それぞれNuSTAR衛星とすざく衛星から得られた結果を示す。

(Kishishita+09)が、今回の観測では発見されなかった。これらから、少なくともINFC付近では、軌道ごとに10%程度のフラックス変動を伴った放射機構の変化があることを明らかにした。

最後に、10-30 keVにおいて、すざく衛星のHXD-PINの観測データと比較したところ、全位相に渡って、フラックスが互いに異なることがわかった(図1右)。軌道ごとのフラックス変動が10 keV以上でより顕著になっている可能性を初めて示した。

## (2) 硬X線パルスの探索

LS 5039 中のコンパクト星が、中性子星かブラックホールであるかは、わかっていない。コンパクト星が中性子星であるか検証するため、これまで、電波・軟X線を用いたパルス探索が行われてきた (McSwain+01, Rea+11) が、パルスは検出されていない。仮にパルス放射があったとしても、伴星からの星風によって吸収されている可能性が指摘されており、より高いエネルギーでのパルス探索が求められてきた。

そこで、我々は、すざく衛星・NuSTAR衛星を用いて、10-30 keVの帯域で、初めてパルス探索を行った。まず、連星運動に伴うドップラー効果を評価し、適切にデータを分割してから周期解析を行うことが有効であることを明らかにした。その上で、1 Hz以下の範囲で、パルス探索を行ったところ、すざく衛星のデータから、 $8.960 \pm 0.009$  s の周期信号を偶然確率 約 $10^{-3}$ で発見した。また、すざくよりも有意度は低いものの、NuSTAR衛星からも、 $9.046 \pm 0.009$  s に周期信号の兆候を発見した(図2)。連星運動の補正を行った時に有意な連星パラメータが見つからないという問題点はあるものの、2つの独立したデータからの周期性を**確認**し、LS5039のコンパクト星が、周期 約9秒、周期変化率 約 $3 \times 10^{-10}$  s  $s^{-1}$ の中性子星である**可能性を示した**。

## (3) GeVガンマ線スペクトル解析

LS 5039のGeVガンマ線放射を詳細に調べるため、我々は、約11年に渡るFermi/LATの観測データの解析を行い、エネルギーバンド毎にガンマ線画像を2次元フィットし、近傍のガンマ線天体の効果を差し引いてスペクトルを求めた。その上で、データを軌道位相  $0.45 < \phi < 0.9$  (INFC)と、 $0.0 < \phi < 0.45$ ,  $0.9 < \phi < 1.0$  (SUPC) の2つに分け、スペクトル解析を行ったところ、INFCにおいて、2 GeV付近にハンプ構造を確認した(図3 左)。この構造自体は、Hadasch+12で既に指摘されているが、我々は、powerlaw成分と、カットオフpowerlaw成分の2成分で、このスペクトルをうまく説明できることを初めて明らかにした。また、より細かく軌道位相ごとに分けて解析したところ、1 GeVから5 GeVにかけ

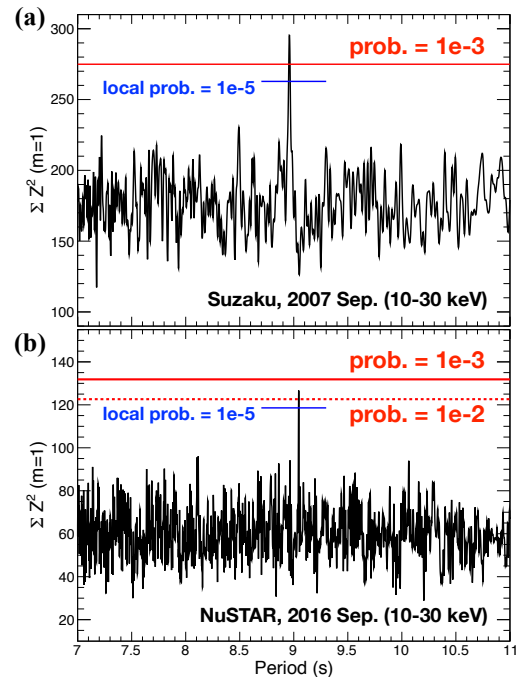


図2: 硬X線周期探索で見つかった、パルス放射。  
(a) すざく衛星のHXD-PIN (10 keV - 30 keV)  
(b) NuSTAR衛星 (10 keV - 30 keV)

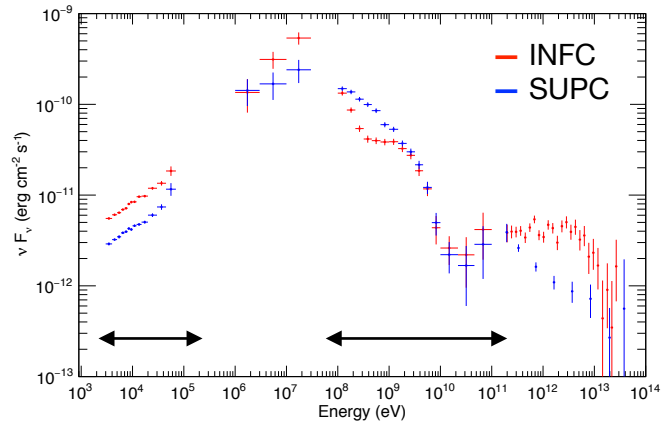
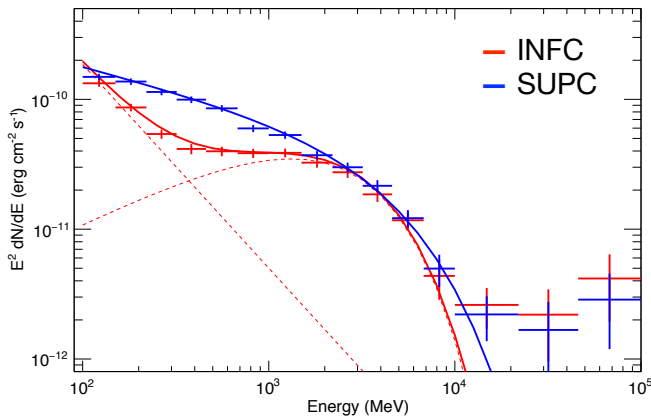


図3: LS 5039のspectral energy distribution. (左) Fermi衛星11年分のデータ解析の結果。INFCにおいて、2成分あることが顕著に確認できる。(右) X線からTeVガンマ線までのSED。矢印で示した範囲が本研究で得られた範囲。

て、フラックスの軌道位相に対する依存性が大きく低下することを発見した。これらから、GeV帯域では、2つの放射成分があることを明らかにした。

#### (4) マルチバンドのスペクトル解析

硬X線・GeVガンマ線の解析結果を合わせることで、我々は、LS 5039の広帯域スペクトルを得た (図3 右)。これから、LS 5039の粒子加速機構に対する情報を引き出すために、我々は、基礎的な非熱的放射モデルを構築した。スペクトルモデルは、1次元モデルを採用し、放射領域のサイズ・磁場・伴星からの距離を主なパラメータとした。できるだけ仮定を排除したモデルを構築することで、モデルの詳細に依存せず、放射領域の基本的な物理量に対する制限を加えることを試みた。

まず、X線帯域での光子指数と、GeVガンマ線帯域とX線帯域の輝度比の観測値を、矛盾なく説明できる物理条件を調べた。その結果、図4に示すように、前者から磁場の上限値が、後者から磁場の下限値に制限がかかることがわかった。放射領域の伴星からの距離が、50 光秒である場合、磁場は、**約 1.4 Gから150 G**の範囲に制限された。

さらに、上で求めた物理条件を満たしている場合、X線からMeVガンマ線のスペクトルを同時に説明できないことがわかった。これから、MeVガンマ線放射が、X線とは異なる加速・放射領域を起源としていることを初めて明らかにした。さらに、MeVガンマ線の放射機構は、

- ・放射領域に注入される加速電子は、べき1程度の硬いスペクトルを持つ
- ・加速効率 $\eta$ が、約2-3と極めて小さい
- ・放射領域の大きさは、最低でも10 光秒より小さい
- ・磁場は、最低でも数ガウスよりも大きい

という条件を満たすことを明らかにした。これから、加速機構が、磁気リコネクションに代表されるような直接加速である可能性が極めて高いことを示した。

#### (5) マグネター連星仮説の提唱

一般に、中性子星を含む連星系の放射エネルギー源は、降着エネルギー、中性子星の回転エネルギー、星風の運動エネルギー、中性子星磁気エネルギーの4つの可能性がある。**硬X線で兆候が見つかったパルスの**周期 約9秒、スピンの変化率 約 $3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ の値をもとに、それぞれの供給エネルギーの最大を見積もると、唯一中性子星の磁気エネルギーのみがLS 5039の輝度 $10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ を説明できることがわかった。さらに、この場合、中性子星の磁場は、エネルギー収支から、約 $10^{15} \text{ G}$ と求まり、コ

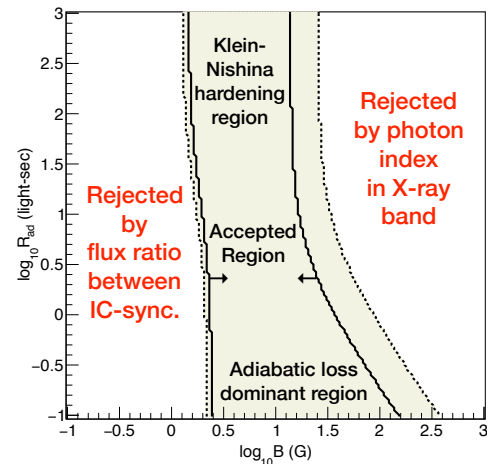


図4: X線放射領域の大きさと磁場に対する制限

コンパクト星がマグネターであるという新しい可能性を示す。これは、多波長スペクトルの点からも支持される。なぜなら、直接加速を起源とするMeVガンマ線放射を、磁気リコネクションで解釈すると、強い磁場の供給源が必要だが、マグネターの存在は、自然にそれを説明するからである。

マグネターを仮定すると、X線からTeVガンマ線までの放射は以下のように自然に説明される(図5)。

- X線：伴星からの星風が、マグネター磁場圧で止められてできたショックからのシンクロトロン放射
- MeVガンマ線：中性子星に近い領域における磁気リコネクションからの、シンクロトロン放射
- GeVガンマ線：リコネクション領域で加速された電子が磁気圏で起こす曲率放射
- TeVガンマ線：リコネクション領域で加速された電子が形成するアウトフローからの逆コンプトン散乱

これらを統一的に説明する仮説として、図6のような磁気構造が形成されていることを提案する。星風により生じたショックにより、大域的な磁場構造が決まるとすると、中性子星近傍のある点で、双極子磁場と大域的な磁場が反平行になり、磁気リコネクションに適した領域が形成される。加速電子のほとんどは、シンクロトロン放射でMeVガンマ線を放出しながらエネルギーを失うが、一部の電子が、磁力線に沿って加速領域を離れることにより、GeVガンマ線やTeVガンマ線が生じる。

本研究では、広帯域での観測結果をもとに、ガンマ線連星 LS 5039の、これまで全く分からなかった放射機構について、「LS 5039が、マグネターを含み、磁気リコネクションが非熱的放射を引き起こしている」という新しい可能性を導いた。これが正しいければ、LS 5039は、初めて発見されたマグネターを含む連星系、かつ、太陽圏外において、磁気リコネクションの直接的な証拠を掴んだ初めての天体となる。磁気リコネクションの発生要因として提案した中性子星近傍での反平行磁場構造は、少なくとも他の2つのガンマ線連星においても生じると我々は考えており、中性子星を含む連星系で容易に生じるのかもしれない。今後、詳細な研究を進めることで、宇宙における磁気リコネクションの普遍性や、謎の多いマグネターの性質に迫ることができよう。

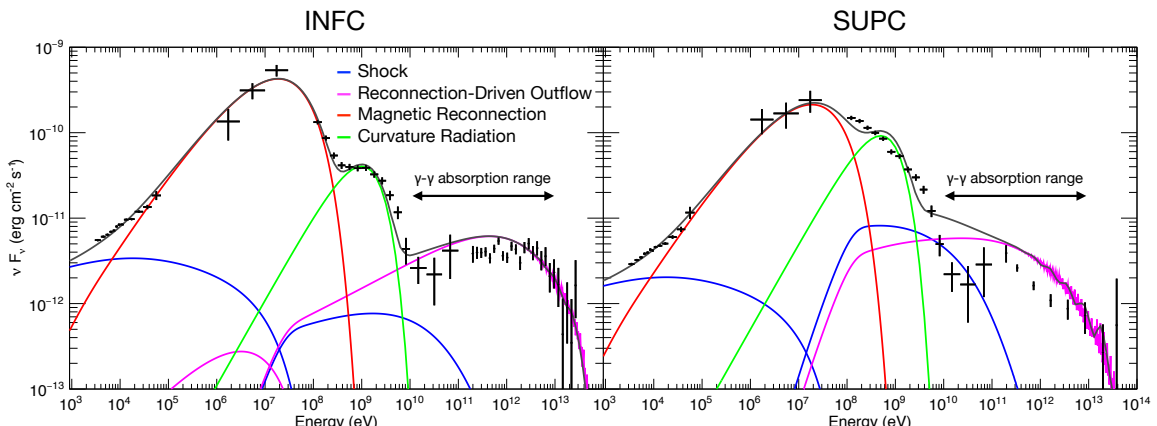


図5: 本研究で得られた、LS 5039のスペクトルモデル。左が、軌道位相  $0.45 < \phi < 0.9$  のスペクトル、右が、 $0.0 < \phi < 0.45$ ,  $0.9 < \phi < 1.0$  でのスペクトル。

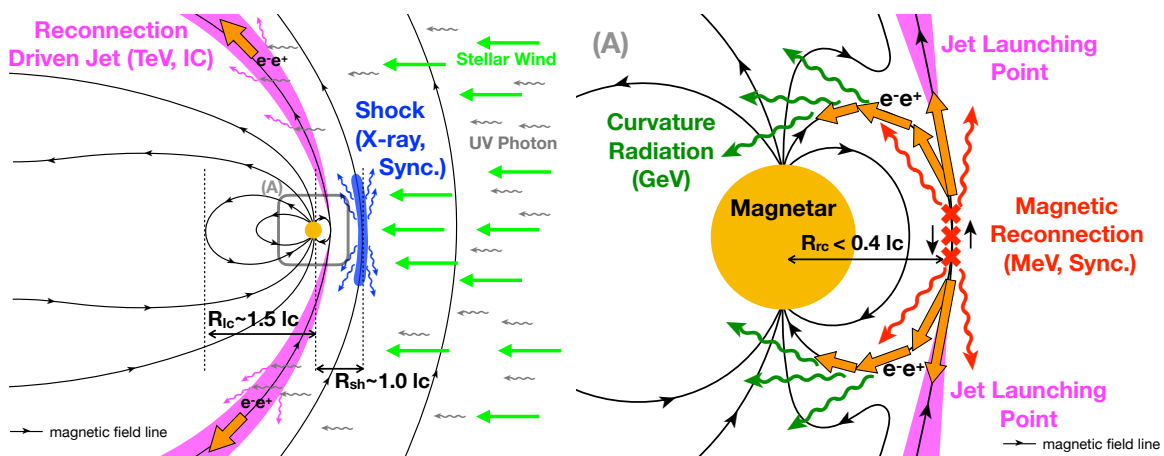


図6: 本研究で、提案した、LS 5039の磁場構造と、放射領域。星風と磁場の相互作用で生じたショックによって、中性子星近傍の磁場構造が変化し、反平行磁場ができる。すると、磁気リコネクションが効率的に発生する。