

# ガンマ線連星 LS 5039 における X 線・ ガンマ線変動メカニズム



山口 正輝

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉  
e-mail: masaki@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

この宇宙は電子・陽子をはじめとする高エネルギーの宇宙線で満たされている。それら宇宙線を生み出す高エネルギー天体の一つとして「ガンマ線連星」がある。ガンマ線連星は10年ほど前に発見された比較的新しい天体であり、X線とガンマ線が連星運動とともに変動する珍しい天体である。X線・ガンマ線放射が連星運動に連動していることから、高エネルギー放射の現場をさまざまな角度から見ることができると考えられる。そのため、ほかの高エネルギー天体では得られない情報が得られると期待される。筆者らは、そのX線・ガンマ線変動のメカニズムに興味をもち、ガンマ線連星の一つであるLS 5039に対して理論的な研究を行ってきた。本稿では、そこで明らかになったユニークな変動メカニズムについて紹介する。

## 1. ガンマ線連星の発見

宇宙には、高いエネルギーをもった電子・陽子・原子核が満ち満ちている。地球にも多くの高エネルギー粒子が降り注ぎ、放射線として人間社会に影響を与える。電子や陽子などの粒子は地球上にありふれているが、それらは通常原子・分子の中に存在し、熱運動をする程度のエネルギーしかもっていない。宇宙からくる放射線（宇宙線）は加速器で人工的に与えられるエネルギーをはるかに超えたエネルギーをもっている。このような粒子は宇宙のどこかでエネルギーを与えられ作られているはずであるが、100年前の発見以来、その生成機構の全容はいまだに謎に包まれている。宇宙線を作る天体は電波、X線そしてガンマ線のような非熱的放射を放つ天体（以降、高エネルギー天体と呼ぶ）であると考えられている。高エネルギー天体は、スケールの小さなものから、パルサー、ガンマ線バースト、超新星残骸、活動銀河核などが挙げられるが、10年ほど前に、これ

らの天体に「ガンマ線連星」が仲間入りした。

ナミビアにある超高エネルギーガンマ線望遠鏡 H.E.S.S. が2002年に観測を始めたことにより、連星系からも TeV ( $=10^{12}$  eV) ガンマ線が放射されることが明らかとなった。宇宙ジェットをもつ X線連星系（一般にマイクロクエーサーと呼ばれる）と考えられていた天体 LS 5039<sup>1)</sup> とパルサーをもつ X線連星系 PSR B1259-63<sup>2)</sup> から TeV ガンマ線が検出された。また、スペイン領カナリア諸島にある超高エネルギーガンマ線望遠鏡 MAGIC が2004年に観測を開始し、マイクロクエーサーと考えられていた別の天体 LSI+61 303 からも TeV ガンマ線が検出された<sup>3)</sup>。これら三つの天体は、単に TeV ガンマ線の検出だけでなく、明るさの時間変動も同時に報告された。こうして、超高エネルギーガンマ線を放射する X線連星系として、「ガンマ線連星」という新たな天体種族が確立された。

ガンマ線連星には、ガンマ線を放射する以外にいくつかの共通する性質がある。特に重要な

が、連星の周期に同期してガンマ線が変動しているという性質である。ガンマ線連星の発見以来、観測が継続されLS 5030とLSI+61 303のTeVガンマ線が連星周期と同じ周期で変動していることがわかった<sup>4), 5)</sup>。また、PSR B1259-63からのTeVガンマ線は近星点付近でのみ放射されることが明らかになった<sup>6)</sup>。ガンマ線連星は、大質量星(太陽の10倍以上の質量をもつ恒星)とコンパクト天体(中性子星またはブラックホール、PSR B1259-63以外はどちらか決着がついていない)からなる連星であることがわかっているが、これは大質量星を伴星にもつX線連星(大質量X線連星)と同じである。しかし、大質量X線連星からのX線は連星周期と同期していない。大質量X線連星からのX線は、降着円盤からの放射だからである。それに対して、ガンマ線連星からのTeVガンマ線は連星周期と連動していることから、大質量星とコンパクト天体の間の何らかの相互作用に起因していると考えられる。

ガンマ線連星は、パルサーや超新星残骸などほかの高エネルギー天体との違いから、宇宙線生成について新たな知見が得られると期待される。最も大きな違いは、先に述べたガンマ線放射の周期性である。連星は、二つの星が共通重心の周りを同じ周期で公転している。これは、見方を変えれば静止した二つの星の周りをわれわれが回転して観測していると言うこともできる。つまり、連星は連星であるがゆえにさまざまな角度から観測することができる。したがって、連星が変動するガンマ線を放射しているということは、ガンマ線放射の様子をさまざまな角度から観測できるということを意味する。また、連星軌道は一般に楕円形状をしているため、一周の間お互いに近づいたり遠ざかったりする。前の段落で述べたとおり、ガンマ線連星でのガンマ線放射は大質量星とコンパクト天体の間の相互作用が関係していると考えられるため、これらの天体の間の距離が変わることはガンマ線放射の変動にも影響を与えると

期待される。ガンマ線放射をさまざまな角度から観測できること、そしてガンマ線放射をする際の周囲の環境が変化すること(さらに言うとその環境は一周後に同じ状況が再現されること)は、ほかの高エネルギー天体と異なるユニークな特徴である。このことから、ガンマ線連星でのガンマ線放射を研究することにより宇宙線生成の新たな側面を発見できると期待できるのである。

## 2. ガンマ線放射のシナリオと放射プロセス

ここで、連星を構成する2天体の間の相互作用とガンマ線放射、そして宇宙線生成の関係を述べる。ガンマ線連星においてどのようにしてガンマ線をはじめとする非熱的放射が作られているか(同時に高エネルギーの宇宙線が作られているか)は、現在のところ大きく二つのシナリオが挙げられている。一つは、すでに言葉としては出ているが、マイクロクエーサーと同様なシステムとするシナリオである(マイクロクエーサーシナリオ、図1上パネル)。もう一つは、コンパクト天体が相対論的アウトフローをもち大質量星からの星風と衝突するシナリオである(星風衝突シナリオ、図1下パネル)。これらのシナリオは、どちらも衝撃波ができてそこで宇宙線が生成され、ガンマ線が放射される。以下にそれぞれのシナリオに対して衝撃波のでき方を述べ、その後衝撃波からの非熱的放射について説明する。

まず、マイクロクエーサーシナリオについてであるが、このマイクロクエーサーという言葉は、古くから知られているクエーサーという言葉の縮小版という意味である。宇宙ジェットを示す銀河スケールの天体であるクエーサーに対し、連星スケールで宇宙ジェットを示す天体をこう呼んだのである。マイクロクエーサーシナリオでは、ガンマ線はジェットに付随する衝撃波で生成される。ジェットの内部で、速度の遅い物質とあとから放出された速い物質があると、それらが衝突して衝

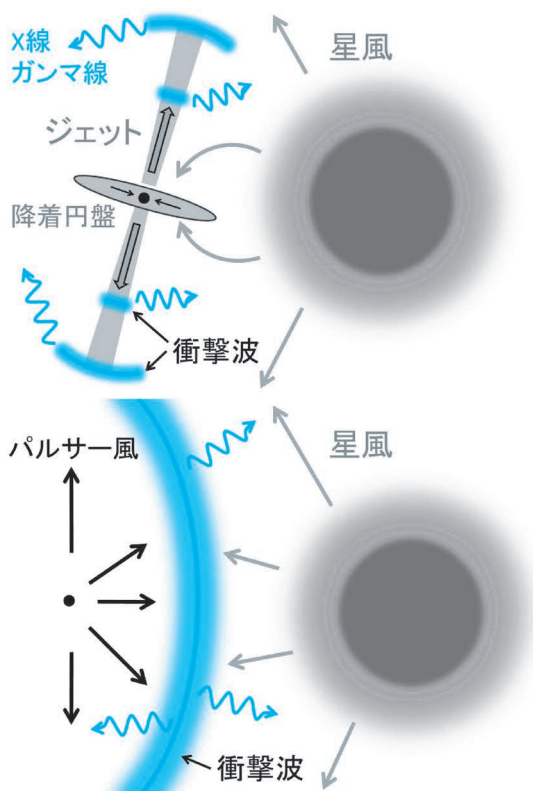


図1 ガンマ線連星からの放射を説明する2種類のシナリオ。上がマイクロクエーサーシナリオ，下が星風衝突シナリオを表している。ぼかし付きの丸は大質量星，ぼかし付きの青い直線または曲線は衝撃波，波線矢印は非熱的放射（X線・ガンマ線）をそれぞれ表している。

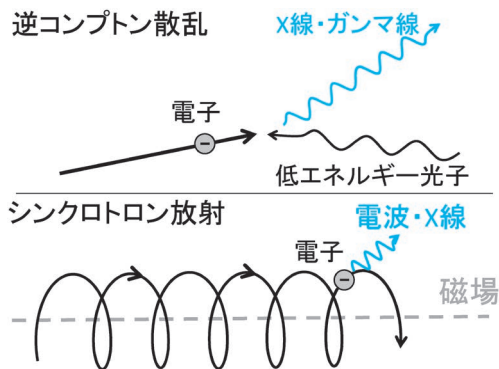


図2 逆コンプトン散乱とシンクロトロン放射の模式図。

いて、ガンマ線はパルサー風と大質量星からの星風が衝突してできた衝撃波で生成される。

こうしてできた衝撃波では、粒子加速が起こり高エネルギー宇宙線の生成を通してガンマ線やX線で輝くと考えられる。衝撃波ではフェルミ一次加速によって電子や陽子などが加速されることが期待され、これらが地球で観測されている宇宙線の起源となっている可能性がある。ガンマ線連星では、こうして加速された粒子のうち、電子が主に放射を担っていると考えられている。このとき重要となる放射プロセスは、逆コンプトン散乱とシンクロトロン放射である。逆コンプトン散乱とは、高エネルギー電子がより低エネルギーの電磁波にエネルギーを与える過程であり、量子論的な見方では電子と光子の衝突と考えることができる（図2上）。この過程では、低エネルギー光子が必要であるが、ガンマ線連星においては星表面からの可視光・紫外線がこれに該当する。ここで重要なのは、この過程は本質的に方向依存性をもっていることである。このことは、逆コンプトン散乱を衝突過程と考えることで自然に理解できる。つまり、電子の衝突によってエネルギーを与えられた光子はその電子の方向と同じ方向を向く傾向がある（電子のもつエネルギーが相対論的であればあるほどこの傾向は強くなる）。加えて、正面衝突と背面衝突（衝突する2物体の速度方向

衝撃波を形成する。また、ジェットと外部の物質（今の場合、大質量星の星風が考えられる）とが衝突して衝撃波を形成することも考えられる。マイクロクエーサー（SS 433, GRS 1915+105など）からのガンマ線検出の報告はないが、活動銀河核ジェットやガンマ線バーストではジェットを起源としたガンマ線が観測されている。

次に、星風衝突シナリオである。こちらは、マイクロクエーサーシナリオでのジェットを相対論的アウトフローに置き換えたものである。相対論的アウトフローは具体的にはパルサー風が考えられるため、星風衝突シナリオにおけるコンパクト天体は中性子星が想定される。このシナリオにお

が観測者系で同じである衝突)を比べたとき正面衝突のほうが衝突頻度は高い。したがって、電子群の速度がある一方向に偏っているときは、衝突する光子が全方向から等しく到来するときであっても電子の速度方向に放射が偏る。また、衝突する光子の到来方向が一方向に偏っているときは、電子群の速度が等方的であっても光子の到来方向に放射が偏る。もちろん、衝突前の電子・光子がどちらも等方であれば、出てくる放射も等方的になる。逆コンプトン散乱では、主にガンマ線が生成される。

もう一つの重要なプロセスはシンクロトロン放射過程である。こちらは、磁場の存在によって電子が加速度運動するときに放射される(図2下)。シンクロトロン放射も方向依存性をもちうる。そろった磁場の中を電子が運動するとき、電子は磁場に垂直な面で円運動をする。このときはその面に沿った放射が最も強くなる。ただし、電子の速度分布が等方的であるか磁場がそろっていなければ等方化される。シンクロトロン放射過程では、一般的に言って電波からX線の電磁波が放射される。

### 3. LS 5039に対する先行研究

ここから、ガンマ線連星LS 5039に絞ることにする。LS 5039は元々明るい星に対して付けられた名前であり、その意味では大質量星(O型星)を指している。この大質量星に対する視線速度の観測から、見えない相手の星がいることはガンマ線検出以前にわかっていた<sup>7)</sup>。しかし、ほかのガンマ線連星同様、この相手の星が中性子星なのかブラックホールなのかはいまだに決着がつかない。LS 5039は今までに見つかっているガンマ線連星のうち、連星周期が3.9日と最も短い天体である。このため、ほかのガンマ線連星と比べて一周期をカバーする観測が容易であり、筆者が研究を開始する2009年時点で周期性に関する観測データが最も詳細に報告されていた。この理由か

らLS 5039を研究対象とすることとなった。

筆者が研究を始めるまでに、前章で述べたシナリオに基づきLS 5039に対するガンマ線放射の観測を説明する先行研究がいくつかなされていた。Khangulyanら<sup>8)</sup>は、マイクロユーザーシナリオに基づき、ジェット内部の衝撃波からのガンマ線放射を計算した。また、Dubusら<sup>9)</sup>は星風衝突シナリオに基づき、衝突により生じた衝撃波からのガンマ線放射を計算した。いずれの研究においても、定性的にはH.E.S.S.によって得られたガンマ線放射の観測結果を説明することができた。ただし、Dubusらの研究においてコンパクト天体が大質量星の向こう側にいる時期のスペクトルは観測と大きく食い違っていた。また、Khangulyanらの研究においてもジェットの根元で衝撃波ができると仮定した場合は観測のスペクトルを説明できなかった。これらの問題は、ガンマ線放射が手前にいる大質量星からの放射によって吸収を受けることが原因であった(吸収についての詳しい説明は次章を参照)。したがって、いずれのシナリオを想定するかにかかわらず、ガンマ線は吸収を受けない程度に連星から離れたところから出ていると結論づけられる。

## 4. ガンマ線の放射メカニズム

### 4.1 研究開始時の動機

前章で述べたとおり、先行研究では連星系から離れたところでガンマ線が放射されていそうだということがわかった。しかし、本当にそうだろうか? 実はこれらの先行研究では、重要な過程が無視されていた。それは「電磁カスケード」である。電磁カスケードとは、逆コンプトン散乱と「二光子対消滅」が連鎖的に起こる過程である。二光子対消滅とは、二つの光子が反応して電子陽電子対に変わる過程である。ガンマ線連星においては、星表面からの強い可視光・紫外線の放射があるために、その光子とガンマ線が反応し電子陽電子対に変わる。このとき、ガンマ線が消滅する



ため吸収過程とみなせる。これが前節先行研究の部分で触れたガンマ線吸収過程である。ただし、この二光子対消滅は同時に電子陽電子を生み出すため、それらが逆コンプトン散乱によりさらにガンマ線を放射しうる。こうしてできたガンマ線がさらに二光子対消滅し…と連鎖的に起こる過程が電磁カスケード過程である。

電磁カスケード過程を考慮に入れると、吸収のみ（二光子対消滅のみ）の場合と比較してガンマ線の量は多くなる。なぜなら、ただ消えるだけでなく再びガンマ線を放射するからである。このガンマ線の再放射を考慮に入れることにより、吸収によって説明できなくなったガンマ線スペクトルを説明できる可能性がある。筆者は当時の指導教員であった高原文郎先生のご指導の下、電磁カスケード過程を考慮に入れたガンマ線連星 LS 5039 からのガンマ線放射機構の研究を開始した。これが2009年の3月頃のことである。

4.2 GeVガンマ線とTeVガンマ線の反相関

半年ほどかけて、電磁カスケード過程を再現する放射輸送計算コードが完成した。これによって、ガンマ線のスペクトルと光度曲線を計算し、観測データと比較することができるようになった。また、比較的低エネルギーの電子を入れることで、TeVガンマ線だけでなくGeV (10<sup>9</sup> eV) ガンマ線のスペクトルも計算できる。計算コード完成時点では、GeVガンマ線の観測データはコンプトンガンマ線観測衛星CGROによって得られたスペクトルのみであったため<sup>10)</sup>、光度曲線を計算することで将来の観測の予言も可能であった。

このガンマ線放射計算コードを用いて光度曲線を計算してみたわかったことは、GeVガンマ線とTeVガンマ線が反相関するということである。図3にTeVガンマ線とGeVガンマ線の光度曲線を観測データとともに示す。この図からGeVガンマ線が明るいときにTeVガンマ線は暗く、逆も成り立っていることがわかる。このことは、す

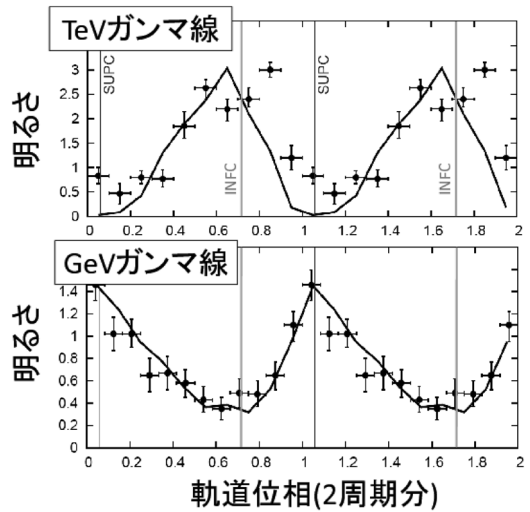


図3 TeVガンマ線（上パネル）とGeVガンマ線（下パネル）の光度曲線<sup>17)</sup>。誤差棒付きの丸はH.E.S.S.（上パネル）<sup>4)</sup>とFermi（下パネル）<sup>12)</sup>によって得られた観測結果を、実線は放射の計算結果を表している。同じデータを2周期分繰り返して示している。SUPCは観測者に対してコンパクト天体が星の向こう側にある位相を、INFCは星の手前側にある位相を表す。

でにBednarek<sup>11)</sup>によって示されていたが、以下のように説明される。まず、GeVガンマ線はエネルギーが低いために、星表面からの放射とは二光子対消滅を起こさない。そのため、逆コンプトン散乱過程のみによって説明される。今考えている逆コンプトン散乱は星表面からの光子と衝撃波で加速された電子との反応である。また、この衝撃波はコンパクト天体の近くにあると仮定して放射計算を行っている。このとき、電子にとって逆コンプトン散乱の相手となる光子は、星表面からのみ到来するために異方性をもつ。2章で述べたとおり、反応相手の光子が異方性をもつとき逆コンプトン散乱も異方性をもつ。異方性をもった放射が連星の系に乗って回転運動をする場合、観測者系では放射が変動して観測される。また、2章で述べたとおり、逆コンプトン散乱による放射は衝突相手の光子の到来方向に偏るため、今の場合は星の方向に向かうガンマ線が明るく、逆向き

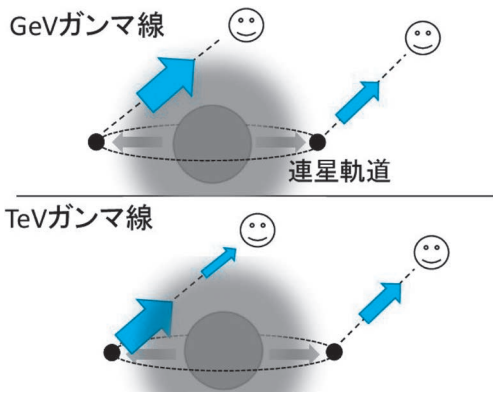


図4 GeVガンマ線（上パネル）とTeVガンマ線（下パネル）の放射変動のメカニズム。矢印は星表面からの放射（灰色）とガンマ線放射（青色）を表す。ガンマ線放射の明るさを矢印の太さで表している。

ガンマ線は暗い。結果として、GeVガンマ線はコンパクト天体が星の向こう側にあるときに明るく、星の手前側にあるときに暗くなる（図4上）。

一方で、TeVガンマ線は星表面からの光子との二光子対消滅により吸収を受ける。二光子対消滅も衝突過程と考えられるため、逆コンプトン散乱過程と同様に異方性をもつ。つまり、星表面からの光子と正面衝突するTeVガンマ線（言い換えると星の方向に向かうTeVガンマ線）のほうが、星の方向と逆に向かうTeVガンマ線に比べて強く吸収を受け暗くなる。このため、TeVガンマ線がコンパクト天体の近くから出ているとすると、コンパクト天体が星の向こう側にあるときには暗く、星の手前側にあるときは明るくなる（図4下）。これはGeVガンマ線と逆である。このような理由でTeVガンマ線とGeVガンマ線は反相関すると説明され、筆者の計算コードでも再現できた。

### 4.3 Fermi衛星の観測結果とコンパクト天体の質量

ガンマ線放射計算コードがおおよそ完成したのと同時期に、偶然にもLS 5039に対するGeVガンマ線の新しい観測データが発表された。2008年

に打上がったガンマ線宇宙望遠鏡Fermiによって得られたLS 5039に対する1年弱のデータが解析され、2009年秋に公開された<sup>12)</sup>。LS 5039の連星周期3.9日での周期的な変動がはっきりと検出され、きれいな光度曲線が得られた（図3下）。しかも、H.E.S.S.で得られたTeVガンマ線の光度曲線ときれいに反相関していたのである。この観測データと筆者計算コードの結果を比較しない手はないと早速計算を行った。すると、連星系の軌道傾斜角が30°のときに観測された光度曲線と完全に一致することがわかった（図3下）。このとき、高原先生が「合いすぎていて逆に怪しいよね」と話されていたことが印象に残っている。

軌道傾斜角が30°のときに光度曲線を再現できたという事実は、重要な示唆を含んでいる。まず、連星系の軌道傾斜角は光度曲線の振幅に影響を与える。つまり、連星系を真上から見ると逆コンプトン散乱の非等方性の効果が薄く、逆に真横から見ると非等方性の効果は強い。こうして、軌道傾斜角が観測データによって制限されるが、軌道傾斜角は実はコンパクト天体の質量の情報をもっている。詳細な説明は省くが、大質量星に対する視線速度の観測によりコンパクト天体質量と傾斜角の正弦の積が得られている。そのため、傾斜角がわかればコンパクト天体の質量が得られるのである。こうして得られた質量は、3-7  $M_{\odot}$ となった（不定性は傾斜角の不定性からきている）。3  $M_{\odot}$ 以上の中性子星は、理論的に棄却され観測的にも見つかっていないため、LS 5039のコンパクト天体はブラックホールであると結論づけられる。ガンマ線の光度曲線からコンパクト天体の正体を決める研究はほかに例がなく、われわれの研究がユニークである。

元々TeVガンマ線のスペクトルの再現を目的に始めた研究であったが、Fermi衛星によって得られたGeVガンマ線観測データの再現とそこからコンパクト天体の正体への制限という予想していなかった方向に研究が進んだ。ちなみに、電磁

カスケード過程を考慮に入れてガンマ線スペクトルを計算したとき、H.E.S.S.の観測結果に近づいたが、定性的には状況は改善しなかった。つまり、星の近くでTeVガンマ線が出ている場合は、電磁カスケードを入れても吸収の影響が強いため、スペクトルを説明できなかった。

### 5. X線の放射メカニズム

GeVガンマ線をうまく再現できたことに気をよくした、というわけではないが、日本のX線観測衛星すざくによって得られたX線の観測結果<sup>13)</sup>も同時に再現することを試みた。具体的には、磁場を仮定してシンクロトロン放射を計算した。このとき電子の分布はガンマ線放射を計算した結果得られるものを用いた。そうすると、観測されたX線変動を定性的に説明することができた(図5)。「定性的に」というのは、変動の振幅に加えて正弦カーブ的な変化の仕方を再現できたということである。

ここで、筆者の計算コードでどのようにX線が変動しているかを説明する。一言で言うと、シンクロトロン放射でX線を出す電子の数が1周期で変化するために変動する。まず、シンクロトロン放射をする電子は、逆コンプトン散乱でガンマ線を出す電子と同じである。このため、逆コンプトン散乱が効果的に起こった場合、高いエネルギー

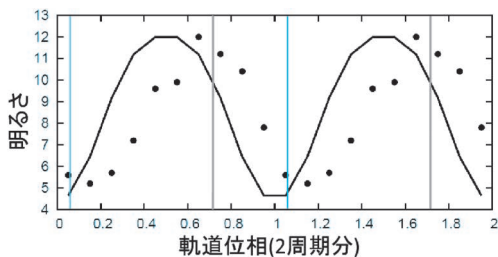


図5 X線の光度曲線<sup>17)</sup>。黒丸はすざくによって得られた観測結果<sup>13)</sup>を、実線はシンクロトロン放射の計算結果を表している。図3と同様に、同じデータを2周期分繰り返して示している。青線はSUPCを、灰色線はINFCを表す。

をもつ電子の数が減るためにシンクロトロン放射は暗くなる。一方、LS 5039の軌道は離心率をもつため、軌道のどこにいるかによって大質量星とコンパクト天体の距離が変化する。その両者の距離が近づくと、星表面からの光子の数密度が大きくなり逆コンプトン散乱が効果的に起こる。逆に、遠ざかったときは逆コンプトン散乱は比較的起こりにくい。こうして、両者の距離が近づいたときはシンクロトロン放射によるX線が暗くなり、遠ざかったときには明るくなる(図6)。このような変動は、X線がシンクロトロン放射であり、連星系の離心率がある場合には必ず起こる。高橋ら<sup>13)</sup>による先行研究では、人工的な変動を仮定しているため、筆者らが提案している変動メカニズムのほうが自然に変動するという意味で有利である。

こうしてX線放射をうまく説明できたと思われるが、X線をシンクロトロン放射で説明するときには避けられない問題がある。それは、「シンクロトロン放射による電子のエネルギー損失」(以降、シンクロトロン冷却と呼ぶ)である。今、電子の数は逆コンプトン散乱を定期的に出すことから決められるため、観測されているX線の明るさを再現するために必要な磁場の値が決まってしまう。その磁場の値は、LS 5039の場合は数ガウス程度であるが、この程度の磁場だとシンクロトロン冷却が十分効く。このことは、高いエネルギーの電子の数が劇的に少なくなることを意味し、こ

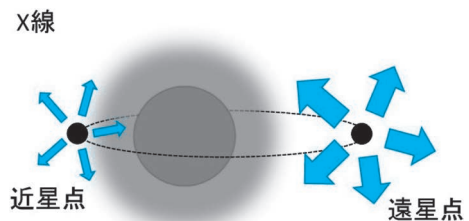


図6 軌道位相によるX線放射強度の違い。矢印は放射を表し、その太さで強さを示している。軌道が離心率をもつため、1周期の間に星とコンパクト天体の距離が変化する。

れにより H.E.S.S. で観測されている光度を全く説明できなくなる<sup>14)</sup>。この大問題は、X線をシンクロトロン放射で説明しようとする場合は必ず発生する。この問題を回避するためには、ガンマ線を放射する場所とX線を放射する場所が異なり、それぞれの場所での磁場が異なるという状況を考える必要がある。

筆者らは、この問題に対して、「X線は逆コンプトン散乱で放射されている」と仮定してX線のスペクトルと光度曲線を説明することを試みた。シンクロトロン放射で説明できないのであれば、逆コンプトン散乱で説明してしまおうという単純な発想である。この場合、X線からTeVガンマ線まですべて逆コンプトン散乱で説明することになる。観測されているX線は、ガンマ線に比べて暗いため、ガンマ線を放射するような電子が冷却するだけで、X線の明るさを説明するのに十分な電子ができると予想される。つまり、粒子加速によってガンマ線を放射するような電子が生成され、この電子が逆コンプトン散乱をしてエネルギーを失い、よりエネルギーの低い電子が生成される。こうしてできた低エネルギー電子の逆コンプトン散乱によってX線が放射されると考えるのである。こう考えることにより、スペクトルの傾きがうまく説明できる。図7は、このような仮定の下でコンプトン散乱の放射計算をした結果のスペクトルを表している。実線が計算結果であるが、X線のエネルギー領域では冷えてできた電子のみの逆コンプトン散乱が放射を担っている。さすがの観測データと比較すると、明るさだけでなく傾きも一致していることがわかる。こうして、X線はガンマ線を放射するような電子が冷えてできた逆コンプトン散乱によって説明できる。

図7では軌道位相を二つに分けたスペクトルがそれぞれ観測を再現できているが、このようにX線の軌道変動を再現するときには少し工夫を必要とする。なぜなら、X線もGeVガンマ線も同一の過程（非等方逆コンプトン散乱）によって放射

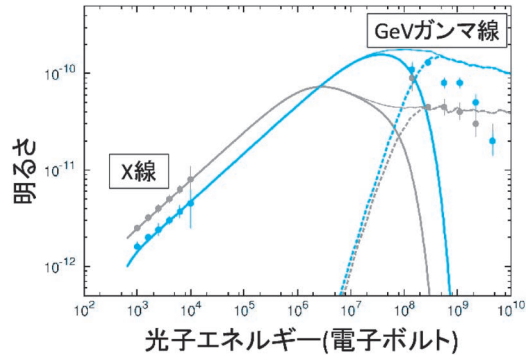


図7 X線からGeVガンマ線までのスペクトル<sup>18)</sup>。誤差棒付きの丸印は観測データで、X線がさすが衛星、GeVガンマ線がFermi衛星の結果を表す。実線は計算結果を表している。観測結果、計算結果ともに軌道位相を二つに分けて平均したスペクトルを示しており、SUPC側が青線でINFC側が灰色線である。

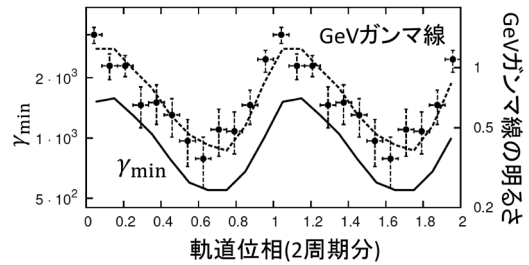


図8 X線を逆コンプトン散乱で説明するために必要な、加速電子の最低エネルギー $\gamma_{\min}$ の変動<sup>18)</sup>。実線が $\gamma_{\min}$ を表し、値は右の目盛に対応する。誤差棒付き黒丸はFermiの観測結果<sup>12)</sup>を表し、破線はそれを曲線として表したものの。

されるため、それらは相関することが期待されるからである（図3下と図5を比較すると、観測されているX線とGeVガンマ線はきれいに反相関していることがわかる）。X線観測を再現するためには、加速電子のエネルギー分布、特に加速電子の最低エネルギー（以降、 $\gamma_{\min}$ と書く）が時間変動すると仮定すればよい。図8にX線光度曲線を再現するために必要な $\gamma_{\min}$ の時間変化を示す。これを見ると、 $\gamma_{\min}$ がGeVガンマ線の変動と同様な変動を示すときにX線の変動を説明できることがわかる。つまり、コンパクト天体が大質量星



の向こう側にいるときに $\gamma_{\min}$ が大きく、大質量星の手前側にいるときには $\gamma_{\min}$ が小さければよい。これが正しければ、電子の加速機構も非等方性をもっているのかもしれない。X線がシンクロトロン放射か逆コンプトン散乱かは、MeV ( $10^6$  eV)ガンマ線のスペクトルの軌道変動が得られれば明らかになると期待される。将来、ガンマ線連星で非等方な粒子加速が起こっていることを明らかにできるかもしれない。

## 6. 流体シミュレーションと今後の展望

ガンマ線連星からの放射の研究を進めるうえで、流体シミュレーションを用いた研究は避けて通れないと考えている。筆者らの研究に先立って行われたKhangulyanらとDubusらの研究<sup>8),9)</sup>では、すでに述べたように電子の加速とガンマ線の放射がどこで起こっているかが重要であった。このことは、衝撃波がどこに形成されるかという問題に帰着するが、衝撃波ができる場所を特定するためには流体シミュレーションが必須である。衝撃波を形成する星風とジェットまたはパルサー風は、楕円運動をする大質量星とコンパクト天体から放出される。そのため、衝撃波の構造は単純でないことが予想され、流体シミュレーションで特定する必要がある。

Bosch-Ramonらは、星風衝突シナリオに基づき、相対論的流体を扱える計算コードを用いた星風衝突シミュレーションを行った<sup>15)</sup>。その結果、コリオリ力によって曲げられた大質量星からの星風が、連星から離れたところでパルサー風と衝突し衝撃波を形成することを明らかにした。このことは、KhangulyanらとDubusらが行った先行研究の文脈で非常に重要である。TeVガンマ線放射のスペクトルを説明するためには連星系から離れたところで放射が起こっていればよかった。シミュレーションの結果、連星系から離れたところで衝撃波ができるとわかったため、この衝撃波

でTeVガンマ線が出ていればスペクトルを説明できると期待される。Zabalzaらは、Bosch-Ramonらの流体シミュレーションの結果を用いてガンマ線放射の計算を行った<sup>16)</sup>。彼らはその結果、大質量星とパルサーの間の衝撃波からの放射でGeVガンマ線を、連星系から離れたところにある衝撃波からの放射でTeVガンマ線を説明できることを明らかにした。彼らの論文では、強い吸収のためにTeVガンマ線のスペクトルが再現できていない上に、X線をシンクロトロン放射で説明する場合にはすでに5章で述べた大問題をクリアする必要がある。しかし、星風衝突シナリオにおいて、連星系から離れた場所でガンマ線を放射することは、ガンマ線連星からの放射メカニズムを明らかにするうえで重要なヒントになると筆者は考えている。

このような意味で、ガンマ線連星研究の今後は、流体シミュレーションから放射計算までをひとまとめにして行うことが重要であると思う。前段落で紹介したBosch-Ramonらの研究では2次元のシミュレーションであったが、衝撃波は実際には3次元的な構造をもつと考えられる。放射の計算においても3次元性は無視できない。したがって、流体・放射を3次元で計算することが重要である。さらには、マイクロクエーサーシナリオでの流体シミュレーションはまだほとんどなされていない。ガンマ線連星におけるシナリオの決定には、それぞれのシナリオに対して流体・放射計算することに加え、それらを比較することが必要である。大規模な計算になるが、これらのことを通して初めてガンマ線連星からの放射の理解に達することができると考えられる。

## 7. まとめ

本稿では、ガンマ線連星LS 5039に焦点を当てて、ガンマ線放射とX線放射の変動メカニズムについて考察した。電磁カスケード過程を考慮に入れた逆コンプトン散乱過程とシンクロトロン放射

を計算し観測データと比較することにより、以下のようなメカニズムでGeVガンマ線、TeVガンマ線、そしてX線が変動していることがわかった。まず、GeVガンマ線は二光子対消滅を起こさないために、逆コンプトン散乱の非等方で説明できることがわかった。また、TeVガンマ線は、二光子対消滅の起こりやすさが連星軌道によって変化することが原因で変動することがわかった。このとき、逆コンプトン散乱が起こりやすいときは、同時に二光子対消滅も起こりやすいため、GeVガンマ線とTeVガンマ線は反相関する。最後にX線であるが、シンクロトロン放射であるとすると、放射を担う電子の数が軌道位相ごとに異なることによって変動することがわかった。ただしこのとき、X線の明るさを説明するために必要な磁場が強すぎるために、TeVガンマ線放射が観測と比較して非常に暗くなる問題が生じる。そのため、逆コンプトン散乱でTeVガンマ線を放射する電子とシンクロトロン放射過程でX線を放射する電子は（エネルギーは同じであるが）異なる場所にいる状況を考える必要がある。その一方で、X線が逆コンプトン散乱で説明できることもわかった。このときは上記の問題を回避できるが、加速電子のエネルギー分布を軌道位相によって変化させる必要がある。今後は流体計算を組み合わせ、流体から放射まで統一的に理解することが重要であると考えられる。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2010年と2012年に筆者らが発表した投稿論文<sup>17), 18)</sup>に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。本稿の研究は、筆者が大学院生のときの指導教員である高原文郎氏のご助言、ご指導によって完成された。また、本稿を完成させるにあたって、編集委員の富永望氏には的確な助言をいただいた。この場をお借りして感謝申し上げたい。

## 参考文献

- 1) Aharonian F., et al., 2005, *Science* 309, 746
- 2) Aharonian F., et al., 2005, *A&A* 442, 1
- 3) Albert J., et al., 2006, *Science* 312, 1771
- 4) Aharonian F., et al., 2006, *A&A* 460, 743
- 5) Albert J., et al., 2009, *ApJ* 693, 303
- 6) Aharonian F., et al., 2009, *A&A* 507, 389
- 7) McSwain M. V., et al., 2001, *ApJL* 558, 43
- 8) Khangulyan D., et al., 2008, *MNRAS* 383, 467
- 9) Dubus G., et al., 2008, *A&A* 477, 691
- 10) Hartman R. C., et al., 1999, *ApJS* 123, 79
- 11) Bednarek W., 2006, *MNRAS* 368, 579
- 12) Abdo A. A., et al., 2009, *ApJL* 706, 56
- 13) Takahashi T., et al., 2009, *ApJ* 697, 592
- 14) Cerutti B., et al., 2010, *A&A* 519, 81
- 15) Bosch-Ramon V., et al., 2012, *A&A* 544, 59
- 16) Zabalza V., et al., 2013, *A&A* 551, 17
- 17) Yamaguchi M. S., Takahara F., 2010, *ApJ*, 717, 85
- 18) Yamaguchi M. S., Takahara F., 2012, *ApJ*, 761, 146

## Modulation Mechanism of X-Ray and Gamma-Ray Emission in the Gamma-Ray Binary LS 5039

Masaki YAMAGUCHI

*Institute of Astronomy, University of Tokyo,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

**Abstract:** Our universe is filled with high-energy cosmic rays such as electrons and protons. "Gamma-ray binary" is one of objects where high-energy cosmic rays and high-energy emission are produced. Gamma-ray binaries have been discovered over the last dozen years, and show X-ray and gamma-ray emissions synchronized with their orbital periods which have never been observed in other objects. This peculiar feature of gamma-ray binaries may allow us to observe them from various angles, so that we can obtain information about cosmic-ray acceleration never obtained in other objects emitting high-energy emission. We are interested in their modulation mechanism of X-ray and gamma-ray emissions, and have theoretically studied the modulation mechanism for a gamma-ray binary, LS 5039. I here explain the results obtained from these study.