

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：33402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540271

研究課題名(和文) 超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星系の統一モデルを構築する理論研究

研究課題名(英文) A theoretical study to construct a unified model for high mass binaries with very high energy Gamma-ray emissions.

研究代表者

内藤 統也(Naito, Tsuguya)

山梨学院大学・経営情報学部・教授

研究者番号：50319084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星の放射メカニズムの統一モデルを構築することである。我々は、パルサーとBe型星からなる大質量連星において、パルサー風と星風、星周円盤の相互作用を数値シミュレーション(1)と解析的方法(2)を用いて研究した。

その結果、(1)では、星周円盤の密度が高い時に、パルサー風によって星周円盤に空洞ができ、高い圧力と広い放射領域を確保して強いガンマ線が放出されることを示した。(2)では、パルサー風の駆動エネルギーが大きい時に、星周円盤のより内側までパルサー風の勢力が届き、観測のふた山の時間変化を説明出来ることを示した。

研究成果の概要(英文)：A goal of this study is to construct a unified model for an emission mechanism of high mass binaries emitting very high energy Gamma-rays. For high mass binaries including pulsar and Be type star, we research on interactions between pulsar wind and stellar wind/decretion disk using a numerical simulation (1) and an analytical approach (2).

In the case of (1), for the high density disk a cavity is made in the disk by pulsar wind. Thus, we show that intense Gamma-rays are emitted from the cavity because of high pressure in the cavity and large emission area. In the case of (2), for the strongly driven pulsar it goes into more inside the disk. Thus, we show that a double-peak light curve of Gamma-rays in the observation is explained.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学 超高エネルギーガンマ線 大質量連星系

1. 研究開始当初の背景

研究開始当は、PSR B1259-63/LS2883、LS 5039、LS I +61° 303、Cygnus X-1 の4天体が超高エネルギーガンマ線を放射する連星系として知られていた。これらは、いずれも高密度天体(中性子星、ブラックホール)と大質量星(O型星、Be型星)の連星系である。図1-1に示すように、これらの超高エネルギーガンマ線を放射する連星系では、高密度天体の星風とBe型星のガス円盤との相互作用によるガンマ線放射モデル(a)と、ジェットからのガンマ線放射モデル(b)が提唱されている。しかし、いずれのモデルも細部に検討の余地があり確証を得るに至っていない。我々は、研究開始当初までに(a)の相互作用モデルを採用してPSR B1259-63/LS2883の超高エネルギーガンマ線の時間変化を調べてふたつ山のピークを持つことを示し、観測結果との類似を示すことに成功していた。一方、国内外の他の研究グループは、ふたつ山のピークを説明することは出来ていなかった。

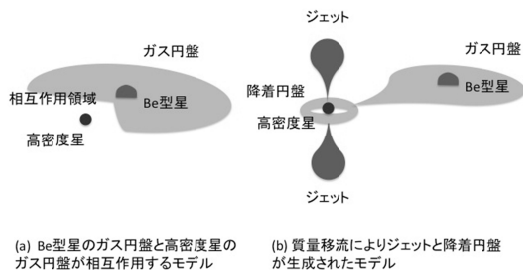


図1-1: 超高エネルギーガンマ線放射モデルの概要図

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星系、とりわけ高密度星と大質量星の連星系の放射メカニズムの統一的なモデルを構築することである。こうした連星系における高密度星の星風と大質量星の星風、星周円盤の相互作用を理論的に研究し、超高エネルギーガンマ線の放射強度と時間変化を解明する。

(1) 超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星とは

超高エネルギーガンマ線(1TeV以上のエネルギーを持つガンマ線)を放射する大質量連星系は、2000年代になって発見された新しいタイプの天体である。それまでも、高密度天体(中性子星、ブラックホール)と大質量星(O型星、Be型星)が連星系を組んでいることは知られていた。とりわけ、大質量星から高密度星へ質量移流のある連星系は、X線、ガンマ線の放射が劇的に時間変動する天体として注目されていた。こうした時間変動は、高密度星への質量移流で作られた降着円盤やジェットに起因すると考えられている。一方、大質量連星系では高密度星の相対論的なジェット・星風が大質量星周辺の大気と激しく相互作用すると考えられる。相互作用領域では、電子や原子核(主に陽子)が高エネ

ギーへと加速され、高エネルギー粒子が作る超高エネルギーガンマ線が放射されると予想される。これまでに、その強度や時間変動が議論されてきた。

(2) 着想にいたった経緯

そうした予想の中、2005年に解像型チェレンコフ光望遠鏡を用いてH.E.S.S.グループが中性子星(高密度星)とBe型星(大質量星)の連星系PSR B1259-63/LS2883から超高エネルギーガンマ線を発見したと発表した[2-1]。この連星系は、中性子星が離心率の大きな楕円軌道でBe型星の周り回る興味深い天体である。発見された超高エネルギーガンマ線の時間変動は、中性子星とBe型星が最近接する近星点の前後にふたつ山のピークを示す特徴を持っていた(図2-1)。

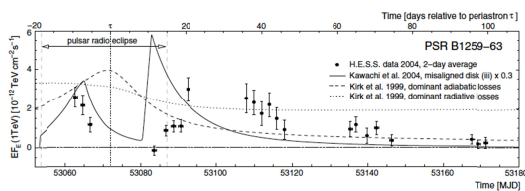


図2-1: 黒塗り四角はH.E.S.S.グループによる観測結果。点線はKirkらによる研究のひとつ山の予想。多くの研究者が彼らと同様の予想をしていた。実線は我々の研究の予想。近星点の前後にふたつ山のピークを持つ。

この発見以前に議論されていた研究の多くは、超高エネルギーガンマ線の放射は近星点にひとつ山のピークを持つ特徴を予想していた。唯一、我々の研究がふたつ山の時間変動を提唱し、観測結果と定性的に合致した。我々の研究[2-2]は、中性子星からの相対論的星風とBe型星のガス円盤との相互作用で衝撃波が生じて、その衝撃波により電子と原子核(主に陽子)が高エネルギーへと加速されるモデルを用いていた。相互作用領域の位置や物理状態は解析的に計算していた。このモデルは、中性子星が近星点の前と後にBe型星のガス円盤を通過して相互作用が強くなるのでふたつ山のピークを自然に説明出来る。

以降観測が進み、現在までにPSR B1259-63/LS2883、LS 5039、LS I +61° 303、Cygnus X-1、HESS J0632+057、1FGL J1018.6-5856の6天体が超高エネルギーガンマ線を放射する連星系として知られている[2-3]。いずれも、高密度天体(中性子星、ブラックホール)と大質量星(O型星、Be型星)の連星系である。図1に示すように、これらの超高エネルギーガンマ線を放射する連星系では、高密度天体の星風とBe型星のガス円盤との相互作用によるガンマ線放射モデル(a)と、ジェットからのガンマ線放射モデル(b)が提唱されている。しかし、いずれのモデルも細部に検討の余地があり確証を得るに至っていない。我々も(a)の相互作用モデルを採用した研究を3次元数値シミュレーション

ンを用いて発展させ PSR B1259-63/LS2883 の超高エネルギーガンマ線のふたつ山のピークを予想し、観測結果との類似を示すことに成功した[2-4]。本研究では(a)の相互作用モデルを採用した研究を数値シミュレーションと解析的な方法で発展させ、他の大質量連星系にも適用して、統一的な放射モデルの構築を目指す。

我々はこれまでに、3次元数値シミュレーションを用いて PSR B1259-63/LS2883 の放射モデルを議論してきた[2-4]。このモデルはふたつの山のピークを再現するなどある程度成功を収めているが、まだ十分に PSR B1259-63/LS2883 の放射を説明できてはいない。また、数値シミュレーションには数時間から数日の長い時間が必要であるため、十分な結果を得るには多くの時間と労力を要する。こうした欠点を補うために、我々は本研究でモデルを定式化して解析的に研究することにも取り組む。解析的なモデルは、多くの天体に適用しそれぞれの天体特有のパラメータを短時間に調べることが可能であるので、統一的なモデルを構築するのに有用である。

(3) どこまで明らかにするか

我々は、PSR B1259-63/LS2883 に高密度天体の相対論的星風と Be 型星のガス円盤との相互作用によるガンマ線放射モデルを適用する。次に、LS I +61° 303、LS 5039、Cygnus X-1、HESS J0632+057、1FGL J1018.6-5856 に適用して統一的なモデルを構築する。その後、これまでに超高エネルギーガンマ線を放射が確認されていない大質量連星系へこのモデルを適用して放射強度を予想し、観測の可能性を議論する。

こうした超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星系の素過程が明らかになることで、放射を担う高エネルギー粒子の生成メカニズムが明らかになると期待される。PSR B1259-63/LS2883 と LS 5039 のような公転軌道の離心率の大きな連星系では、高エネルギー粒子生成の環境が1周期の間に大きく変化するため、ひとつの天体で様々な物理状態を検証出来る。これにより、現在でも謎の多い宇宙線加速過程の解明の手助けになると期待される。また、単独の星の研究からでは、中性子星からの相対論的星風の構造、Be 型星からの星風やガス円盤の構造を調べる事は難しく、理解されていないことが多くあり、超高エネルギーガンマ線を放射する大質量連星の放射機構の解明が、こうした中性子星や Be 型星の大気の構造理解の手助けになると期待している。

参考文献

- [2-1] Aharonian, F., et al., 2005, A&A 442, 1-10
- [2-2] Kawachi, A., Naito, T., et al., 2004, ApJ, 607, 949-958
- [2-3] Paredes, J.M. et al., 2013, Astropart. Phys 43, 301-316 とその reference
- [2-4] Naito et al., 2010, ASC Series, Vol. 422, 69-76

3. 研究の方法

我々は、これまで行って来た PSR B1259-63/LS2883 に対する3次元数値シミュレーションによる研究[3-1][3-2]の結果を整理、発展させて研究成果を発表する。さらに、Be 型星のガス円盤と大気の状態を定式化する。そして、中性子星の相対論的星風と Be 型星のガス円盤・大気の相互作用領域の位置と物理量を科学計算ソフトウェア Mathematica を用いて導出する。数値シミュレーションでは数日の時間を要した計算が、短時間で計算できるようになる。次に、このモデルを LS I +61° 303、LS 5039、Cygnus X-1、HESS J0632+057、1FGL J1018.6-5856、未発見天体へ適用する。より多くの天体へ適用する事で統計的な扱いが可能となり、モデルの信頼度を向上させる。

(1) PSR B1259-63/LS2883 に対する数値シミュレーションの結果の整理と発展

我々はこれまでに、PSR B1259-63/LS2883 に対する3次元数値シミュレーションによる研究[3-1][3-2]を行って来た。この3次元数値シミュレーションは、重力と摩擦だけを考慮したシンプルなものであったが、3次元を扱った研究としては世界に先駆けたものであった。その結果、いくつかの重要な研究成果を我々に示した。中でも我々が最も注目する成果は、放射の時間変動におけるピークが、中性子星がガス円盤の中心の最も密度が濃い部分を通る時では無いということである。PSR B1259-63/LS2883 からのガンマ線放射の発見後の多くの研究は、円盤の中心を放射のピークと考えモデル化してきた。これは、ガス円盤の構造を3次的に扱っていないためであると考えられる。

2010年以降、Be 型星 LS2883 の可視光による観測的な研究が進み、H 輝線幅の観測からガス円盤の密度がそれまでに予想されていたものより高くても許されることが示された。(これにより、当初は SS2883 の名称を使っていたこの天体は、SL2883 へと名称を変更した。)そこで、本研究では、我々は3次元数値シミュレーションの研究[3-2]を様々な密度に適用し、高エネルギーガンマ線の時間変化を調べる。また、ガス円盤の回転の方向を変える、ガス円盤と高密度天体の公転面の位置関係を変えてその影響を調べる。さらに、高密度天体の相対論的星風に方向依存性を持たせて、その影響を調べる。

(2) 解析的な研究

我々は、ガス円盤の3次元構造を考慮に入れ、中性子星からの相対論的星風(パルサー風)とガス円盤が相互作用する領域を特定する方法を定式化して解析的な研究を行う。相互作用は、ガス円盤とパルサー風の圧力が等しくなる場所で起こると考えられる。各時刻でのこの領域の位置と物理量を科学計算ソフトウェア Mathematica を用いて算出し3次元の構造を明らかにする。その結果、これま

では数値シミュレーションで数時間～数日かかって求めていた相互作用の位置を、パラメータを決定すれば瞬時に求められるようにする。さらに3次元構造の他に、これまでは考慮されてこなかった Be 型星のガス円盤の回転速度に注目して、ガス円盤の圧力構造のモデルを構築する。ガス円盤が重力のみで回転していれば、その周囲を回る中性子星と等速で回転しており影響はない。しかし、ガス円盤は粘性抵抗で回転していると予想されており、中性子星に対し大きな相対速度を持っている。この速度による同圧は、ガス円盤の熱的圧力を上回っていると予想される。(3) 統一モデルの構築と LS 1 +61° 303 への適用

最初に手がけた PSR B1259-63/LS2883 に対するモデルは、公転周期が長く、離心率の大きなこの連星系に特有のモデルである。特に、Be 型星のガス円盤は中性子星の近星点通過時に大きく乱れるが、次の近星点通過までには十分な時間があるため、ガス円盤は安定化することができる。統一モデルを構築するためには、ガス円盤の安定性を調べる必要がある。連携研究者岡崎は、様々なタイプの天体に対し、星風の相互作用を調べる数値シミュレーションを行っており、この経験を生かし、より公転周期が短く離心率の小さな LS 1 +61° 303 へ数値シミュレーションを適用する予定である。その結果を踏まえて、統一モデルを構築する。

(4) 本研究の応用

宇宙線加速との関連、高密度天体からの相対論的星風の構造の理解、Be 型星のガス円盤の構造の理解へと研究を応用する。そのためには、電波、赤外線、可視光、X線、ガンマ線、超高エネルギーガンマ線の放射強度、時間変化の研究を総括的に扱う必要がある。PSR B1259-63/LS2883 の赤外線 / 可視光の観測的研究は連携研究者河内が平成 21 年度から行っている。その結果を我々のモデルすることで Be 型星のガス円盤の構造が理解されると期待している。

参考文献

- [3-1] Naito et al., 2010, ASC Series, Vol. 422, 69-76
- [3-2] Okazaki, A. T., Nagasaki, S., Naito, T., et al. 2011, PASJ, 63, 893

4. 研究成果

(1) 3次元数値シミュレーションを用いた研究

PSR B1259-63/LS2883 に対する最新の観測結果を取り入れ、大質量星のガス円盤の密度として現実で考え得る幾つかの条件で3次元数値シミュレーションを行った。具体的には、ガス円盤の星表面での密度をパラメータとし、 10^{-11} 乗 g/cm^3 、 10^{-10} 乗 g/cm^3 、 10^{-9} 乗 g/cm^3 の場合を調べた。その結果、 10^{-9} 乗 g/cm^3 の場合に、大質量星のガス円盤が高密度星の星風と相互作用する際に、ガ

ス円盤が変形して星風を包み込むように高密度・高圧の壁となり、“空洞”を作ることを発見した(図3-1)。

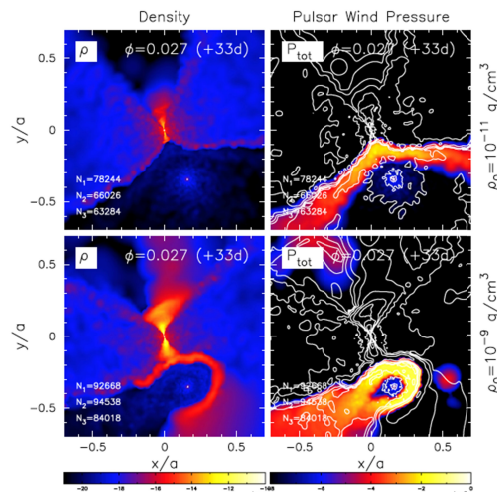


図 3-1: 3次元数値シミュレーションの結果。左は密度の分布を、右は圧力を2次元上に射影したものである。上は、ガス円盤の星表面での密度が 10^{-11} 乗 g/cm^3 の場合、下は 10^{-9} 乗 g/cm^3 の場合である。下の図では、高密度、高圧の壁が高密度星の星風を包み込んでいる。上の図にはそのような状況は現れていない。

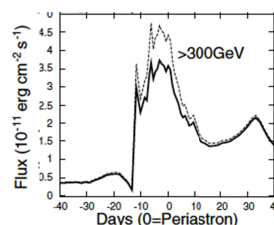


図 3-2: 3次元数値シミュレーションをもとに、0.3 TeV 以上の超高エネルギーガンマ線の時間変化を示した図。ガス円盤の星表面での密度は 10^{-9} 乗 g/cm^3 としている。点線はガス円盤による吸収がない場合である。

さらに、この空洞がX線～ガンマ線の放射を増幅していることを見だし(図3-2)論文へとまとめ発表した(雑誌論文)。このような3次元シミュレーションを行い、密度と圧力の空間分布を示すことができるのは、国内外で我々の研究グループだけである。

その後、この3次元シミュレーションを、軌道傾斜角、軌道方位角、ガス円盤の回転の向き、離心率などの状態パラメータを変える研究を行った。軌道傾斜角とは高密度星の公転面と大質量星の高密度円盤の傾斜を表す角、軌道方位角とは公転面の楕円形の長軸とディスクの回転軸の公転面上への射影方向のなす角である。これまでの研究でいくつかの場合でのX線放射の時間変化を調べ以下の結果を得られた。軌道傾斜角が小さいとき、ピーク位相が遅れる傾向にある。軌道方位角の値が 10° の時と 30° の時では、1回目の高密度ガス円盤通過時の高密度星/大質量星の距離は殆ど変わらない。一方で2回目の通過時には倍ほども差があるためピーク位相は大幅に遅れる。また高密度ガス

円盤の密度が距離の2乗に比例して薄くなっていくことから、軌道方位角が小さいほど相互作用領域での圧力は高くなるため、より強い放射となる。高密度ガス円盤の回転方向については、パルサー軌道運動に沿った順回転では逆回転に比べ、より強い放射が得られる。離心率が大きい時、軌道方位角と同様にガス円盤の外側を通過するため、放射は強くなる。この結果をまとめて天文学会で発表した(学会発表)。

(2) 解析的な研究

高密度星(中性子星を仮定)の相対論的星風と大質量星のガス円盤・大気相互作用領域の位置と物理量を科学計算ソフトウェア Mathematica を用いて解析的に導出する研究を行った。

この研究の準備をしている最中に、本研究と同様の主旨の論文が発表されていることに気がついた[4-1]。そこで、この論文と差別化のためにはどの観点から研究を進めれば良いか、対策を建てる必要が生じた。その結果、本研究以前は我々の先行研究も含めて、ガス円盤に対し動径方向の速度の速いモデルを用いていたが、最新の観測結果より、粘性で流れ出す動径方向の速度の遅いモデルが現実的であることが分かった。そこで、我々は、この粘性移出円盤(viscous decretion disk)を用いて、解析的研究を行った。粘性移出円盤を用いた研究は、赤外線、可視光の分野では一般的となりつつあるが、X線、ガンマ線のような高エネルギーの研究に用いられるのは、世界で初めてである。

我々は、まず1次元でモデル化を行い、2次元、3次元へと拡張する計画を建て、現在2次元の解析的な定式化が終っている。その結果を、国際学会で発表を行った(学会発表)。

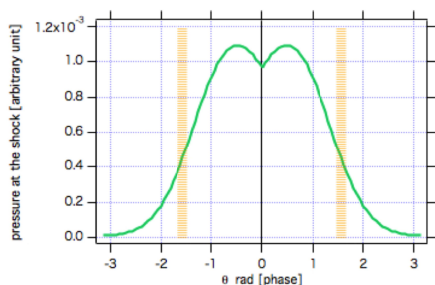


図 3-3: 2次元の解析的モデルによるガンマ線の時間変化。肌色の線はガス円盤を中性子星がガス円盤を通過する位置である。実際中性子星 PSR B1259-63 よりも、星風の駆動エネルギーを10倍大きくしている。

図 3-3 に 2次元の解析的モデルによるガンマ線放射の時間変化を示す。このように観測的な特徴と類似する二つ山のピークは、中性子星 PSR B1259-63 のパラメータでは現れず、星風の駆動エネルギーを10倍大きくした場合に現れる。解析的なモデルは、数値シミュレーションと違い結果を得るまでに時間がかからないため、様々なパラメータを用いて

計算を行うことが可能である。

現在は学会発表の内容をまとめて論文投稿の準備をしている。

(3) 統一的なモデルを構築

当初の計画では、解析的モデルを LS 1 +61° 303 に適用し、さらに超高エネルギーガンマ線が未検出な大質量星と高密度星の連星系天体へ応用する予定であった。現在までに、その後新しく発見された HESS J0632+057 をフェルミガンマ線宇宙望遠鏡で観測するとどうなるかの推測に、このモデルの適用を検討している(雑誌論文)。

一方、我々は国際協力による超高エネルギーガンマ線観測天文台 CTA の研究グループに所属し、CTA 天文台が完成した際に大質量星と高密度星の連星系天体の超高エネルギーガンマ線強度がどのようなエネルギー分布と時間変化を示すかを予測する研究に協力している。(雑誌論文)。

参考文献

[4-1] Khangulyan, D., et al., 2010, *Astrophys. J.* 742, 98-103

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Paredes, Josep M., 他全23名+1コンソーシアム中内藤 統也は13番目、Exploring high-energy processes in binary systems with the Cherenkov Telescope Array, In Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), Rio de Janeiro (Brazil)、査読の無、C13-07-02 巻、2013年発行、

<http://jp.arxiv.org/abs/1307.3048>

Paredes, Josep M., 他全24名+1コンソーシアム中内藤 統也は14番目、Binaries with the eyes of CTA, *Astroparticle Physics*、査読の有、43 巻、2013年発行年、301-316

DOI:10.1016/j.astropartphys.2012.09.04

森 正樹、河内 明子、長滝 重博、内藤 統也、Fermi-LAT study of two gamma-ray binaries, HESS J0632+057 and AGL J2241+4454, 2012 Fermi Symposium proceeding、査読の無、eConf C121028 巻、2012年発行、1-4

<http://jp.arxiv.org/abs/1303.1606>

高田 順平、岡崎 敦男、長滝 重博、内藤 統也、河内 明子、Lee, Shiu-Hang (Herman)、森正樹、早崎公威、山口正輝、Owoccki, Stan、Modeling High-energy Light curves of the PSR B1259-63/LS 2883 Binary Based on 3D SPH Simulations, *The Astrophysical Journal*、査読の有、750 巻、2012年発行、

70-79

DOI: 10.1088/0004-637X/750/1/70

水上 拓、他全 4 9 中内藤 統也は 3 1 番目、CANGAROO-III Observation of TeV Gamma Rays from the Unidentified Gamma-Ray Source HESS J1614-518、The Astrophysical Journal、査読の有、740 巻、2011 年発行、78-86

DOI: 10.1088/0004-637X/740/2/78

岡崎 敦男、長瀧 重博、内藤 統也、河内 明子、早崎 公威、Owocki, Stan、高田 順平、Interaction between the Be star and the compact companion in TeV gamma-ray binaries、Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium、査読の無、272 巻、2011 年発行、628-629

DOI: 10.1017/S174392131101163X

岡崎 敦男、長瀧 重博、内藤 統也、河内 明子、早崎 公威、Owocki, Stan、高田 順平、Hydrodynamic Interaction between the Be Star and the Pulsar in the TeV Binary PSR B1259-63/LS2883、Publication of Astronomical Society of Japan、査読の有、63 巻、2011 年発行、893-901

DOI: 10.1093/pasj/63.4.893

[学会発表](計 5 件)

内藤 統也、An Attempt to estimate High Energy Light Curves of the Gamma-ray Binaries Based on Analytical Calculation、X-raying the Gamma-Ray Universe -- CTA-X-ray LINK Meeting -- (国際シンポジウム)、2013 年 11 月 04 日 ~ 2013 年 11 月 06 日、富士屋ホテル湯本 (神奈川県)

内藤 統也、HIGH ENERGY LIGHT CURVES OF THE GAMMA-RAY BINARIES BASED ON ANALYTICAL CALCULATIONS、SETTING A NEW STANDARD IN THE ANALYSIS OF BINARY STAR、2013 年 9 月 16 日 ~ 2013 年 9 月 19 日、ルーヴェン・カトリック大学 (ベルギー)

山本 未知彦、岡崎 敦男、高田 順平、河内 明子、内藤 統也、長瀧 重博、早崎 公威、森 正樹、山口 正輝、TeV ガンマ線連星 PSR B1259-63/LS2883 の連星軌道面と主星の位置関係が与える高エネルギー放射変動への影響、日本天文学会 2013 年春季年、2013 年 3 月 20 日、埼玉大学 (埼玉)

佐藤 景子、河内 明子、岡崎 敦男、永山 貴宏、中島 康、内藤 統也、長瀧 重博、早崎 公威、森 正樹、IRSF/SIRIUS・SIRPOL を用いたガンマ線連星の近赤外観測、日本天文学会 2013 年春季年、2013 年 3 月 20 日、埼玉大学 (埼玉県)

寺田 幸功、Paredes, Josep M.、Adrover, Pere Munar、Ribo, Marc、長瀧 重博、内藤 統也、ASTRO-H 衛星と次世代ガンマ線望遠鏡 CTA で切り拓くガンマ線連星、日本天文学会 2012 年春季年会、2012 年 3 月

22 日、龍谷大学 (京都府)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 統也 (NAITO, Tsuguya)
山梨学院大学・経営情報学部・教授
研究者番号: 5 0 3 1 9 0 8 4

(2) 研究分担者

2011 年度まで
早崎 公威 (HAYASAKI, Kimitake)
京都大学・理学部・研究員 (科学研究)
研究者番号: 3 0 3 7 4 2 1 8

2013 年度から

河内 明子 (KAWACHI, Akiko)
東海大学・理学部・准教授
研究者番号: 7 0 3 3 2 5 9 1

(3) 連携研究者

岡崎 敦男 (OKAZAKI, Atsuo)
北海学園大学・工学部・教授
研究者番号: 0 0 1 8 5 4 1 4

2012 年度まで

河内 明子 (KAWACHI, Akiko)
東海大学・理学部・准教授
研究者番号: 7 0 3 3 2 5 9 1

長瀧 重博 (NAGATAKI, Shigehiro)
独立行政法人理化学研究所・准主任研究員
研究者番号: 6 0 3 5 9 6 4 3