

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年 5月30日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19340044

研究課題名（和文） 高速分光システムでとらえるブラックホール粒子加速の現場

研究課題名（英文） Observation of the site of particle acceleration near black holes by high-speed spectroscopy

研究代表者

嶺重 慎（MINESHIGE SHIN）

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70229780

研究成果の概要（和文）：ブラックホールなどの高密度天体連星系からの放射は激しい時間変動を示す。しかし、その起源は今もって不明である。本研究課題は、ブラックホールなどコンパクト天体を含む近接連星系からの可視光放射を秒程度以下の時間分解能で分光観測することにより、急激なスペクトル変化、すなわち粒子加速の証拠を検出しようというものである。われわれは、当初の計画通り、高速分光システムの開発に取り組み実用化を達成した。それを広島大学天文台「かなた」望遠鏡に取り付け、激変星の高速分光観測を行い、興味深い変動を見いだした。放射磁気流体力学シミュレーションを実行し観測の解釈を試みているところである。

研究成果の概要（英文）：Radiation from compact objects, such as black holes, is known to exhibit rapid variations, though its origin remains to be an open question. In this project we construct a high-speed spectroscopy system and perform high-optical speed spectroscopy of close binary systems, aiming at detecting rapid color changes, that is, an evidence of particle acceleration. On schedule we have completed the system, attached it to the “Kanata” telescope at the Hiroshima Observatory, and observed cataclysmic variables, finding some interesting variations. We also perform radiation-magnetohydrodynamic simulations of accretion flow and are trying to interpret our observational findings.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 12,200,000 | 3,660,000 | 15,860,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2009年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 総計 | 13,700,000 | 4,110,000 | 17,810,000 |

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：コンパクト天体、高速分光、放射磁気流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) コンパクト天体からの電磁波放射における短時間変動は、X線に特有なものでなく、可視光放射も激しく変動していることが明らかにされた。それを受けてわれわれは高速測光システムを完成させ、高速観測を行った。(2) しかしながら測光だけでは物理過程を特定することは難しい。そのため、高速分光

で色変化を見る必要性が高まっていた。

2. 研究の目的

(1) 高速分光システムを開発してコンパクト天体を秒程度以下で高速分光観測し、光度変動に伴う色変化やライン変動を検出する。(2) 降着流の放射磁気流体力学シミュレーションを実行し、観測の理論解釈を試みる。

3. 研究の方法

- (1) 高速読み出し可能な CCD を用いて、低分散の高速分光装置を開発、完成させる。
- (2) 広島大学「かなた」望遠鏡に装着して、コンパクト天体の高速分光観測を実行する。
- (3) コンパクト天体周辺のガス流を大域的放射磁気流体シミュレーションで調べる。

4. 研究成果

(1) 高速分光装置の開発

高速分光装置は、最速で 36 frame/s (no-bin, full frame) の連続撮像が可能な高速 CCD カメラで分光観測を行うことを目的とした装置である。観測対象は、ブラックホール連星、激変星での連続光 SED および輝線強度の短時間変動 (~0.1-10s) である。

本装置で受光器として使用している高速 CCD カメラは、e2v 社の電子増倍 (EM) ・背面照射 ・ frame transfer 型 CCD (CCD87) を使って浜松ホトニクスと共同で開発した EM-CCD カメラ (C9100-12、図 1) である。本カメラの量子効率曲線は図 2 に、仕様は表 1 に載せてある。



図 1: EM-CCD カメラ C9100-12

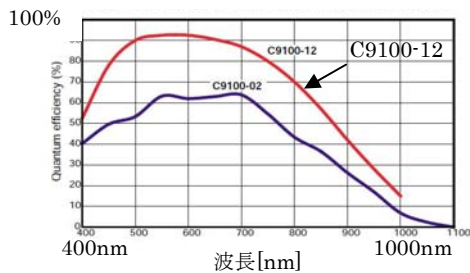


図 2: 量子効率曲線 (赤線の方)

本装置の光学系は開発費削減のため、広島大学の観測装置「可視 1 露出型偏光撮像器 HOWPo1」の予備のレンズセットを用いた。HOWPo1 の光学図面は図 3 である。望遠鏡焦点面で一度焦点を結んだ像は、コリメータレンズ、再結像レンズを経て再結像する (縮比 0.57 倍)。最終的な視野はこの縮比と CCD 受光面積で約 2.6' × 2.6' となっている。光学系の近軸光のみを用いるので歪みの少ない良質な像が得られる。

| | |
|---------------|--------------------|
| ピクセル数 | 512×512 |
| ピクセルサイズ | 16 μm × 16 μm |
| 露光時間 | 27.1 ms ~ 10s |
| 最速 frame rate | 35.8 frame/s |
| 電子増倍 (EM) | 4 ~ 2000 (可変) |
| カメラヘッド | 真空封じ切り |
| 冷却方式 | 電子冷却 + 空冷 |
| 冷却温度 | -50°C (@室温 0-30 度) |
| 読み出しノイズ [e-] | 100 |
| 変換係数 [e-/ADU] | 23 |
| A/D コンバータ | 14 bit |
| 飽和電荷量 [e-] | 400,000 |

表 1: CCD カメラの仕様

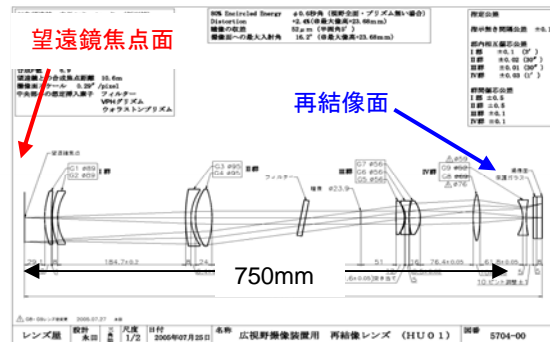


図 3: 光学図面

本装置は広島大学かなた望遠鏡の第 2 ナスミス焦点に設置する。同焦点は眼視装置でも利用されているため、斜鏡の出入りにより、両光路の切り替えを可能としている。

本装置の全体像は図 4 の通りである。全ての光学素子は光学定盤上に設置しており、この光学定盤はキャスター付きラックを土台としている。ラックには固定具と 3 本の位置決めピンを装着しており、装置の移動・再設置が容易に行える。

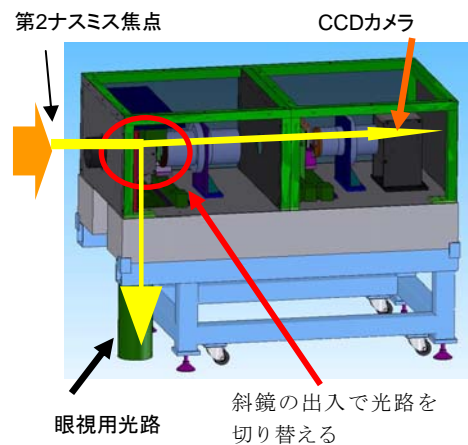


図 4: 装置組み立て図

波長分解能の異なる分光観測に対応するため、2種類の分散素子を用意している。超低分散分光用($R=\lambda/\Delta\lambda\sim 9-73$)には2種類の異なる素材(BK7, F2)を組み合わせたプリズム(頂角 27.5° と 4.9°)を、低分散分光用($R\sim 150$)にはグリズム(溝本数200gr/mm, 角度 10° 、1次のブレイズ波長505nm、プリズム頂角 12.2° 、素材:BK7)を採用した。

フィルターは撮像観測用に広帯域B, V, Rcの3種類を、低分散分光観測用に2種類のオーダーカットフィルター(GG495, L38)を用意している。

望遠鏡焦点面には、3種類のマスクスリット($\phi 9\text{mm}$, 幅0.11, 0.2mm)を用意している。各分散素子、フィルター、マスクスリットは電動ステージ上に設置しており、パソコンからの操作で各素子の切り替えが可能である。マスクスリットの直後には、視野を絞るための固定マスクが設置されている。望遠鏡焦点面の前には光路切り替え用の斜鏡と、波長較正用の人工光源を電動ステージ上に設置しており、パソコン上より切替可能である。

本装置の仕様を表2にまとめる。光学定盤上での各素子の配置は図5のとおりである。

| 積分時間 | 27.1ms ~ 10 s | | |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 観測モード | 撮像 | 超低分散分光 | 低分散分光 |
| 分散素子 | — | 2素子 プリズム | グリズム |
| マスクスリット | 素通し | 素通し | 0.2mm スリット |
| 視野 | 2.6' x 2.6' | 2.6' x 2.6' | 2.2" x 2.6' |
| 観測波長域 | B, V, Rc | 400- 800nm | 430- 690nm |
| 波長分解能 ($R\equiv\lambda/\Delta\lambda$) | — | 73-9 | 114- 180 |
| 限界等級(※) [mag] | ~18 | 15.7 | 12.4 |

表4: 高速分光装置を用いた新星観測

※積分時間:10秒、電子増倍率:最小(4倍)、 $\lambda=550\text{nm}$ でS/N=10となる等級

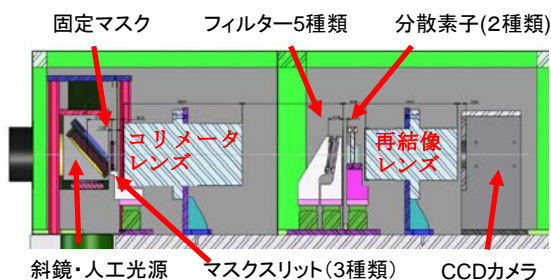


図5: 光学定盤上の光学素子配置図

(2) X線連星系の観測

X線連星のブラックホールや中性子星の周辺では、強い重力と磁場活動により可視光での短時間変動(数十秒)が起こることが知られているが、その放射機構は謎のままである。高速カメラの目的の一つである、ブラックホールや中性子星周辺で起きる短時間光度変化の研究を行うため、静穏期でも明るいX線連星の観測を行った。観測内容(観測天体、期間、回数)は表3のとおりである。また、図6は、ブラックホールX線連星V4641 Sgrの静穏期の2007年5月26日の光度曲線とパワースペクトルである。

| 天体名 | 観測期間 | 回数 |
|---------------|-------------------|----|
| V4641 Sgr | 2006 Sep-2008 Oct | 8 |
| Cyg X-2 | 2006 Sep-2007 May | 2 |
| Sco X-1 | 2007 Apr | 2 |
| Swift J1753 | 2007 Aug-2007 Nov | 4 |
| ASAS J1509-21 | 2009 Apr | 6 |

表4: 高速分光装置を用いた新星観測

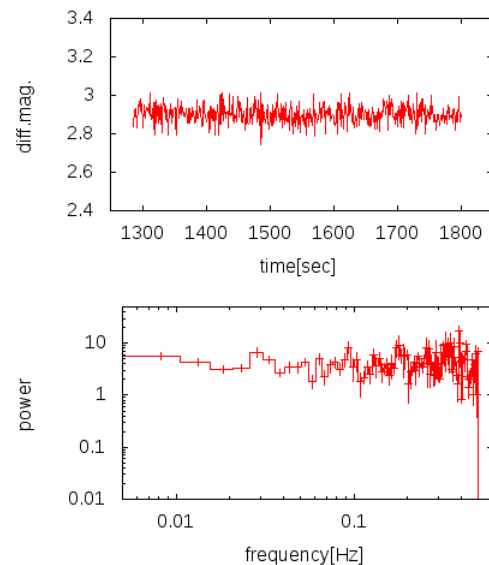


図6 ブラックホール連星V4641 Sgrの静穏期の光度曲線(上段)とそのパワースペクトル(下段)による時間変動解析の例。有意な変動成分は検出されなかった。

V4641 Sgrは、アウトバースト中に激しい短時間変動を示すことで有名であるが、今回の静穏期での観測期間には顕著な短時間変動は検出されず、パワースペクトルからは変動成分はなく、白色雑音のみが検出された。この結果から、静穏期では伴星からの放射の

寄与が支配的であったと考えられる。また、現時点で唯一アウトバースト中の観測に成功した X 線連星 J1509-21 についても短時間変動は検出されなかった。この結果は、観測期間は発達した降着円盤からの黒体放射が卓越した状態にあったことを示唆する。

この他、これまでに取得したデータについては、現在詳細を解析中である。これまでの観測期間ではアウトバースト中の観測がほとんど行えなかったために、期待されるような変動現象は検出されていない。今後、V4641 Sgr のような天体のアウトバースト期間中の観測サンプル取得を増やすことにより、短時間変動成分の物理に迫れると期待できる。

(3) 激変星の観測

(a) 新星爆発の観測的研究

新星爆発とは、近接連星系の白色矮星に相方の星（伴星）からのガスが降着し、臨界量に達して熱核暴走反応の火がついたときに宇宙空間へガスを吹き飛ばす現象である。爆発初期では 1 万度程度に加熱された光球と希薄なガスが連星系を覆い、可視光で最も強く輝く。このため初期からの密な可視光分光観測を行うことにより、未だ統一的理解が困難な物質放出の幾何分布や組成の多様性を探ることができると期待される。我々は、表 3 のとおり新星の高速分光器による観測を行った。

| 天体名 | 観測期間 | 観測回数 |
|-----------|------------------|------|
| V5583 Sgr | 2009 年 8 月—9 月 | 8 |
| V2672 Oph | 2009 年 8 月 | 2 |
| V1280 Sco | 2009 年 9 月 | 1 |
| V5584 Sgr | 2009 年 10 月—11 月 | 4 |

表 4: 高速分光装置を用いた新星観測

図 6 に、2009 年 8 月に発見された新星 V2672 Oph の可視スペクトル (2009 年 8 月 16 日と 22 日) を示す。2 度の観測では非常に幅の広い H α 輝線 (FWZI \sim 8000km/s 輝線中心: 6563 Å) とその形状変化を検出した。この結果から、V2672 Oph では非球対称に分布する 3 種類の速度を持つプラズマ領域が新星周囲に形成され、さらに時間と共に速度差を保ったままプラズマ領域が広がったと考えられる。

図 7 には、2009 年 8 月に発見された新星 V5583 Sgr の時系列スペクトルを示す。この天体のスペクトルでの注目すべき点は、水素

バルマー輝線 (H α : 6563 Å, H β : 4861 Å) の形状変化である。爆発初期はダブルピークの形状をしていたが、時間と共に赤方偏移した成分が発達した。これは非球対称の物質放出 (ジェット状) があったことを強く示唆する。

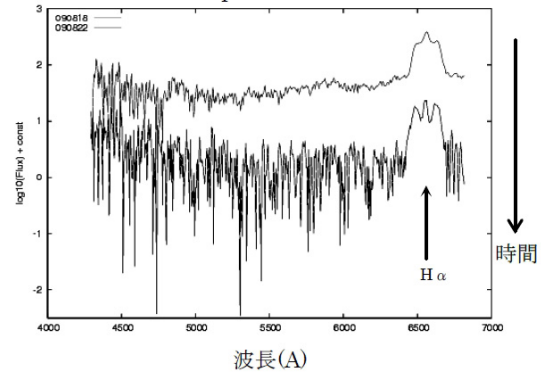


図 7 V2672 Cyg のスペクトル。上が 8 月 16 日で下が 22 日のもの。幅広い H α 輝線は高速なウィンドの存在を示している。

(b) 中間ポーラー HT Cam の観測

HT Cam は白色矮星の自転周期が 514 秒、連星の軌道周期が 86 分の中間ポーラーであり、1 年に 1 回程度の頻度で持続時間が 1—2 日以内の短いアウトバーストをおこすことが知られている。高速カメラの目的の一つである激変星降着円盤からの短時間変動の研究の一環として、この天体のアウトバーストを 2008 年 2 月 7、8 日と 2009 年 4 月 17、18 日に観測した。

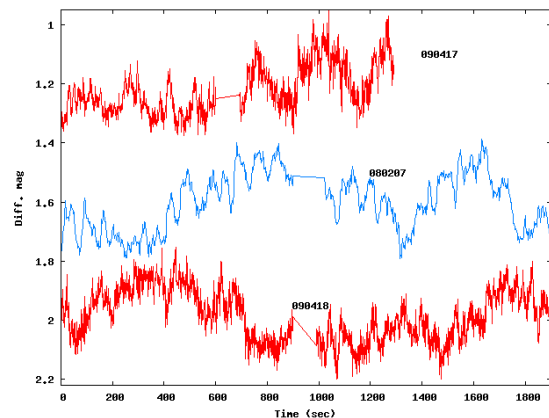


図 8 HT Cam の光度曲線。100 秒以下の時間スケールでの光度変化が顕著である。

図 8 はその結果得られた光度曲線である。観測の結果、100 秒以下のタイムスケールで振幅が 0.1 等を越えるような準周期的な変動が多数検出された。これは、通常の激変星で知られている同様のタイムスケールの変動

振幅よりも一桁程度大きい。一方で白色矮星の自転に伴う変動は確認できず、降着円盤からの放射が卓越していることが示唆される。白色矮星の磁気圧によって、短時間変動が発生している領域よりも内側の降着円盤が存在しないと考えると、観測された大きな振幅を説明できるかもしれない。この成果の一部は研究会「新天体からのサイエンス」(兵庫県立西はりま天文台; 2008年9月19-21日)で発表した。

(d) 矮新星 V455 And の観測

矮新星 V455 And は Hamburg Quasar Survey で発見された。その初期追観測から 1) 食現象を示すこと、2) 81.08 分という短い軌道周期、3) 83.38 分の正体不明の明るさの変化、4) 5-6 分周期の白色矮星の脈動が起源と思われる明るさの変化、5) 周期 1.12 分の白色矮星の自転が起源と思われる明るさの変化、などの特徴を持った矮新星候補星として注目されていた。この星が 2007 年 9 月に増光を起こし、光度曲線や特異な振る舞いから、珍しい WZ Sge 型矮新星であることが確定した。

この矮新星爆発期及び爆発終了直後の集中的な観測では、各種の報告から 5-6 分の光度変化が消えていた。一般に恒星ではヘリウムの電離状態の変化に伴う不透明度の変化によって脈動が観測される、H-R 図上での脈動不安定帯が知られている。この不安定帯は主系列星や巨星だけではなく、白色矮星にも伸びていると考えられているが、詳しいことが分かっているわけではない。

V455 And では、矮新星爆発によって白色矮星が温められて白色矮星の不安定帯を抜けていたものと考えられ、爆発後には白色矮星は徐々に冷えていき、やがてまた不安定帯に戻ってくるはずである。この考えのもと、イギリスの Boris Gaensicke らのグループとの共同研究として、矮新星爆発後 2 年経った 2009 年 9 月と 2010 年 1 月に、高速分光撮像装置の撮像モードで 2 秒露出の高速測光観測を行った。観測内容は表 5 のとおりである。

| 天体名 | 観測期間 | 観測回数 |
|----------|------------|------|
| V455 And | 2009 年 9 月 | 1 |
| V455 And | 2010 年 1 月 | 1 |

表 5 矮新星 V455 And の観測

図 9 に 2010 年 1 月の観測結果を示す。軌道運動の 2 周期弱の観測で、0.3 等程の 2 回の食と 0.1 等程度の短時間変動が受かっている様子がわかる。2009 年 9 月の観測結果と 2010 年 1 月の観測結果のパワースペクトル密

度が図 10 である。いずれの日にも、5 分程度と 67 秒辺りのところにピークが見られる。これにより白色矮星の脈動が復活していることがわかり、白色矮星が再び脈動不安定帯に入っていることが示された。

今回観測された脈動周期は爆発前の周期よりも短くなっており、共同研究グループの他のデータとも合わせて詳細な解析することで、今後白色矮星の放射冷却の様子がわかり、白色矮星の脈動不安定に関しての重要な情報が得られるであろう。

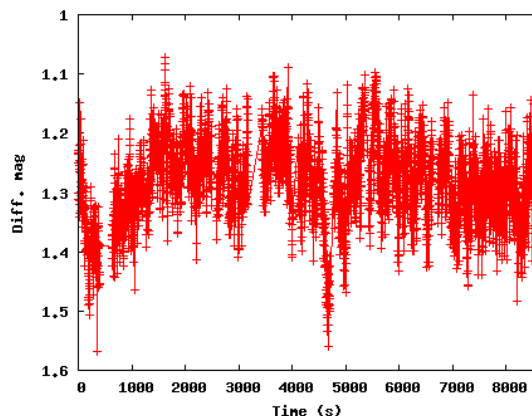


図 9 : V455 And の変動。様々な時間尺度の光度変化が起こっていることが見て取れる。

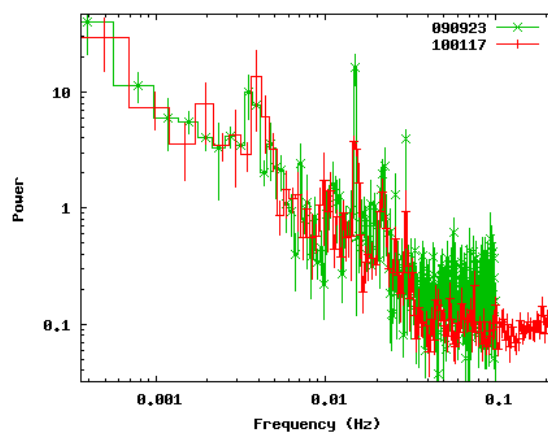


図 10 : 2009 年 9 月 23 日と 2010 年 1 月 17 日のデータのパワースペクトル密度図。5 分程度の白色矮星の脈動によると思われるピークと、67 秒の白色矮星の自転によるものと思われるピークが受かっている。

(4) 大域的放射磁気流体シミュレーション

ブラックホールに流れ込むガス流の、大域的放射磁気流体シミュレーションを実行し、放射が効かない低光度の場合はもちろん、放射プロセスが支配的な高光度の場合について磁場がぎりぎり巻きになって磁気タワーを形成し、ガスをジェット形で噴出すること、放射エネルギーがはるかに卓越する場合

にも、ジェットの出束機構としては磁場のローレンツ力が支配的で、これは放射エネルギー分布の非等方性、すなわち、円盤面方向には放射エネルギー分布がフラットで放射圧が抑えられていることが原因であることをつきとめた。

図 12 に、われわれが発見した放射磁気流体力学ジェットの出束図を示す。エネルギー密度としては放射エネルギーが他（ガスや磁場のエネルギー）を 1 桁以上凌駕するにも関わらず、出束機構として磁場が効いている点が新しい。大量の物質を光速に近い速度で遠方に運ぶ機構として注目される。もっとも、スペクトル変動については今後の課題として残されている。

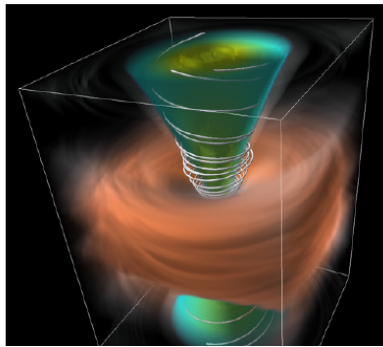


図 12：放射磁気流体ジェットの出束図。磁場によって出束し、放射圧によって加速されるタイプのジェットである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Kawabata, R., Mineshige, S. “Radiative Spectra from Disk Corona and Inner Hot Flow in Black Hole X-ray Binaries”, PASJ, 62 巻, 印刷中 (2010) 査読あり
- ② Ohsuga, K., Mineshige, S., Mori, M., Kato, Y. Global “Two-dimensional Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three Distinct States”, PASJ, 61 巻, L7-L10, (2009) 査読あり
- ③ Arai, A., Uemura, M., Sasada, M., ほか 21 名 “Anti-Correlation of the Near-Infrared and X-Ray Variations of the Microquasar GRS 1915+105 in Soft State”, PASJ, 61 巻, L48-L51, (2009) 査読あり
- ④ Kawanaka, N., Kato, Y., Mineshige, S. X-Ray emissions from Three-Dimensional Magneto-hydrodynamic

Coronal Accretion Flow”, PASJ, 60 巻, 653-659, (2008) 査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

- ①磯貝 瑞希、嶺重 慎、野上 大作、川端 弘治、植村 誠、他 12 名、高速分光システムの開発、日本天文学会 2007 年秋季年会 (2007 年 9 月 27 日、岐阜大学)
- ②磯貝 瑞希、嶺重 慎、野上 大作、川端 弘治、植村 誠、他 12 名、高速分光システムの開発Ⅱ、日本天文学会 2008 年春季年会 (2008 年 3 月 24 日、国立オリンピック記念青少年総合センター)
- ③磯貝 瑞希、嶺重 慎、野上 大作、川端 弘治、植村 誠、他 14 名、高速分光システムの開発Ⅲ日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月 11 日、岡山理科大学)
- ④竹内駿、大須賀健、嶺重 慎、磁場によって出束された放射圧加速ジェット、天文学会 2010 年春季年会 (2010 年 3 月 25 日、広島大学)

〔図書〕(計 2 件)

- ①Kato, S., Fukue, J., Mineshige, S. Kyoto University Press, 2008
- ②小山勝二、嶺重 慎(共編著)、日本評論社、ブラックホールと高エネルギー現象、2008

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶺重 慎 (MINESHIGE SHIN)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：7 0 2 2 9 7 8 0

(2) 研究分担者

川端 弘治 (KAWABATA KOHJI)
広島大学・宇宙科学センター・助教
研究者番号：6 0 3 7 2 7 0 2

植村 誠 (UEMURA MAKOTO)
広島大学・宇宙科学センター・助教
研究者番号：5 0 4 0 3 5 1 4

(H19→H20, H21：連携研究者)

野上 大作 (NOGAMI DAISAKU)
京都大学・大学院理学研究科附属天文台・助教

研究者番号：2 0 3 3 2 7 2 8

(H19→H20, H21：連携研究者)

(3) 連携研究者

該当せず。