

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects V

氏名：新中善晴（京都産業大学 嘱託職員（渡航当時））

渡航先：イタリア／モンデッロ

期間：2019年9月1～9日

私は、2019年9月2-7日にイタリア共和国で開催された“The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects V”に参加し、“Spatial Distribution of Nova Ejecta during the Early Phase of Explosion of V339 Del from its High-resolution Optical Spectropolarimetry”というタイトルで発表を行った。本研究会は2011年から隔年で開催されている激変星に関する世界最大規模の研究会であり、研究会から招待された約60名の研究者が参加した非常に専門性の高い研究会である。本研究会において、自身の研究テーマに関連する話題を数多く聞くことができ、さらに様々な研究者と自身の研究内容を含む様々な内容について議論でき、大変有意義なものであった。

新星爆発では、通常の恒星と比べて高温な状態の核融合反応（hot-CNOサイクル）が生じるため、元素合成パターンも通常の恒星内部や超新星爆発における元素合成とは異なることが知られている。特に ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{13}\text{C}$ 、 ${}^{15}\text{N}$ 、 ${}^{17}\text{O}$ などの元素を宇宙空間に大量に放出しており（Tajitsu et al. 2015; Kawakita et al. 2015など）、新星爆発は銀河系の化学進化に一定の役割を果たしていると考えられている。新星爆発で放出されるこれらの新星由来の元素の質量を正確に推定するためには、爆発の原動力となる白色矮星表面の熱核暴走反応の様子を直接反映する爆発初期の放出物の構造を知ることが不可欠である。

新星の爆発放出物構造の研究は古く、1940-50年代には可視光高分散分光観測から多層構造の描

像が提案されている（McLaughlin 1950など）。それ以降、爆発後数十年経過した新星の直接撮像や爆発から数10日-数100日後の分光観測による輝線形状から、爆発放出物の構造が多様性に富んでいることが明らかになってきた（Gill & O'Brien 2000; Ribeiro et al. 2013など）。近年、複数の新星においてガンマ線が検出されるようになり（Ackermann et al. 2014; Ahnenn et al. 2015など）、新星爆発放出物中での衝撃波の存在が明らかとなった。特に、ガンマ線は爆発から数日後の可視光極大付近から検出されており、新星爆発の放出物間で衝撃波が生じるまでに時間差があることがわかってきた。理論的には、放出時期および膨張速度の異なる2つのガス成分が衝突することで衝撃波が生じるという描像が提案されている（Li et al. 2017など）。この描像では、低速度成分は爆発のごく初期に連星系のL2およびL3点からあふれ出したガス成分（おそらく連星系の軌道運動に伴った公転面に螺旋状の構造）、高速度成分は等方的に膨張する新星風（Kato & Hachisu 1994）であると考えられており、新星で見られる爆発放出物の非対称性の形成やダスト生成も説明できるものとして期待されている。しかしながら、一般に新星爆発は地球から遠方で起こるため、10 m級の大望遠鏡を用いても点源にしか見えないこともあり、新星爆発直後の放出物の幾何については現在でも詳しいことはほとんどわかっていない。

新星V339 Delは、2013年8月14.584日（UT）に日本のアマチュア天文家・板垣公一氏によってか座に発見された新星である。この新星は、極大が $V=4.46$ 等と近年の新星の中では非常に明るい爆発現象であったため、爆発初期から最近に至るまで多くの様々な観測がなされており、その爆発の詳細が明らかになりつつある。特に、

V339 Delは、ガンマ線の発生およびダスト生成が共に観測された新星の1つであり、上記の爆発放出物の描像を確認するのにうってつけの天体であった。V339 Delにおけるガンマ線は、8月16日(UT)に検出され8月21日頃に強度のピークを迎えており(Ackermann et al. 2014)、これは、8月16日頃にガスの衝突が起きたことを示唆している。

我々は、京都産業大学神山天文台の口径1.3 m 荒木望遠鏡に搭載された可視光線偏光分光装置 VESPolA (Arasaki et al. 2015) を用い、V339 Delの爆発の翌日(2013年8月15.49日)から7日間連続で可視光高分散偏光分光観測を実施した(Kawakita, Shinnaka et al. 2019)。解析の結果、新星爆発物は初期に放出されゆっくりと膨張($v_{\text{exp}} \sim$ 数100 km s⁻¹)するトーラス状あるいはドーナツ状の成分と、後から速い速度($v_{\text{exp}} \sim$ 1000-2000 km s⁻¹)で球対称に膨張する成分の、2つの成分からできている可能性が強く示唆された。これらの2つの成分は、爆発から2-3日後に衝突を起こし、後から出てきた球対称な膨張成分はトーラスの空いている方向から双極的に吹き出すと考えられる。こうした激しい衝突が起こると、新星からガンマ線など高エネルギーの電磁波が放射されることが分かっており、新星V339 Delの先行研究とも矛盾しない結果である。また



会議参加者の集合写真

同新星は、爆発数日後に行われた赤外線干渉計観測で非対称性が見られており(Shaefer et al. 2014)、本研究の偏光観測結果から推定された方位角と一致した。

高分散偏光分光観測の特徴の1つが、通常の撮像観測では画像として捉えられない小さな空間スケールの天体構造を明らかにできる点である。今回、その特徴を最大限に活かし、世界で初めて爆発直後からの新星爆発放出物の変化を明らかにでき、高分散偏光分光観測が新星爆発直後の爆発放出物の幾何構造を調べる上で非常に強力なツールであることを示した。

最後になりましたが、研究会参加にあたって援助をいただいた日本天文学会早川幸男基金および関係者の皆様に心から感謝いたします。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Views on the ISM in Galaxies in the ALMA Era / Extremely Big Eyes on the Early Universe

氏名: 藤本征史(国立天文台/早稲田大学
PD(渡航当時))

渡航先: イタリア/ボローニャ, ローマ

期間: 2019年9月1~14日

今回私は2019年9月2-6日、9-13日にイタリアのボローニャ、ローマで開催された国際研究会“Views on the ISM in Galaxies in the ALMA Era”, 並びに“Extremely Big Eyes on the Early Universe”にそれぞれ参加し、自身の研究成果に

ついていずれも口頭発表を行ってきました。

目的として、研究成果を国外の研究者に向けてアピールし国際的プレゼンス向上に繋げることで、参加している世界的に影響のある研究者達と自身の研究内容に関して意見交換・議論を行うこと、そして本渡航で得られた最先端の内容を帰国後、速やかに自身の研究室のみならず国内の研究者とシェアすることでした。以下、私の研究概要とともに実際に研究会を経て得られた成果について報告します。

宇宙誕生後、水素とヘリウムで構成される原始的なガスから初代星が生まれ、その集まりとして初期の銀河が形成されます。その後、恒星内部の核融合や超新星爆発過程で重元素が生み出され、銀河中心の巨大ブラックホールの活動や超新星爆発を受けて、重元素は銀河外へ放出されます。これを *outflow* と呼びます。星を作るガスも同時に銀河外へ放出し、星の形成を抑制することから、*outflow* は銀河の形成・進化解理解にとっても重要な物理機構です。一方で、宇宙誕生後数億年後に普遍的に存在する初期銀河においても、こうした *outflow* が存在しているかは、観測的に確かめられておらず、よくわかっておりませんでした。近年のアルマを用いた観測では、初期銀河から炭素の微細構造輝線 [C II] 158 μm の光が明るく検出されることが知られていました。初期銀河でも *outflow* が起これば、[C II] で光る炭素ガス雲が銀河の大きさを超えて広く分布する可能性があります。一方で、薄く広がった放射は単位面積当たりの明るさがとても暗くなるため、最新のアルマ感度でも、銀河の大きさを超えた [C II] の光は捉えられておりませんでした。

そこで我々は現在公開されている、初期銀河の [C II] を狙ったアルマの公開データを全て集めました。ゼロから解析を行い、統一的な解析により 18 個の初期銀河から [C II] 輝線を検出しました (これまで検出報告のなかった 2 天体を含む)。これら 18 個の初期銀河から検出した [C II] 輝線を干

渉計特有の素観測量である *visibility* 平面上で重ね合わせる処理により、実質的に世界最高感度のアルマデータの取得を達成しました。これにより、星の光で見えている初期銀河の大きさの約 5 倍に相当する、半径 10 kpc に広がる [C II] の構造を発見することができました。これは初期銀河における *outflow* の痕跡を、初めて観測的に捉えたことになりました。

さらにこのような巨大炭素ガス雲の構造について、国内外の最新の理論モデルを用いて検証しました。複数のモデルと比較しましたが、いずれも観測結果が示す、巨大な炭素ガス雲のような十分な広がりには再現されませんでした。宇宙初期における巨大な炭素ガス雲の発見は、これまで理論モデルで欠けていた新しい物理機構を要請する結果となりました。

以上、1) 10 kpc に及ぶ巨大炭素ガス雲構造の発見、2) 初期銀河における *outflow* の痕跡を観測的に初めて捉えたこと、3) 現在の標準的な銀河形成モデルでは再現されないこと、を自身の研究成果として、口頭発表を行ってきました。発表後は研究に関して積極的に質問をいただき、今後の発展性なども含め大変有意義な時間を過ごすことができました。例を挙げると、Emanuel Daddi 氏からは重ね合わせの解析手法について、Pascal Oesch 氏からは巨大炭素ガス構造の物理起源について質問をいただき、発表後も休憩時間などで詳しく議論させていただきました。また自身の発表以外でも、当該理論分野のレビューとして招待講演者であった Desika Narayanan 氏の発表において、3) に関して今後の重要課題として取り上げていただくなど、反響をいただきました。

その他、現在携わっている国際的な共同プロジェクトである ALMA Lensing Cluster Survey (PI: 河野孝太郎氏)、The ALMA Large Program to INvestigate C II at Early Times (PI: Olivier Le Fèvre 氏) の内容についても、共同研究者である Jorge González-López 氏、Aravena Manuel 氏、

Michele Ginolfi氏, Gareth Jones氏, Yoshi Fudamoto氏らと近況を共有し, 議論を深めることができました. また着手している研究内容以外にも, 発表を聞いて興味を持った, Bram Venemans氏, Smaran Deshmukh氏, Karina Caputi氏, Francesco Valentino氏らとは, 休憩時間, 帰国後のメールでのやりとり, その後別の国際会議の場などで今後の共同研究も視野にいた議論を進めております. 研究会で出ていた最新の知見は, 帰国後はもちろん, 研究期間中から国内の共同研究者にメールで迅速に共有するなど, 積極的に行うことができました.

以上のように今回の渡航では, 当初の目的であった, 国際的プレゼンス向上, 研究に関する活発な議論, 最新知見の共有, いずれも達成することができ, 実りある渡航となりました. 今回の渡



ローマの台所, トラステヴェレにて研究会参加者と夕食のひとつ

航で得た知見・繋がりを生かし, 今後も研究活動に打ち込みたいと思います.

最後になりますが, 今回の渡航に向けて多大なる援助をしてくださった, 日本天文学会早川基金関係者の皆様に厚く御礼申し上げます.

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

X-ray Astronomy 2019—Current Challenges and New Frontiers in the Next Decade—

氏名: 朝倉一統 (大阪大学M2 (渡航当時))

渡航先: イタリア/ポローニャ

期間: 2019年9月7~14日

私は今回, 日本天文学会早川幸男基金のご支援のもと, イタリアで開催された国際学会, “X-ray Astronomy 2019 —Current Challenges and New Frontiers in the Next Decade—” に参加し, “X-ray Imaging Polarimetry with a 2.5 μm Pixel CMOS Sensor for Visible Light at Room Temperature” というタイトルでポスター発表を行いました. 本学会ではX線天文学での主要な観測対象である活動銀河核や銀河団等の解析結果と共に, これから打ち上げる予定のX線天文衛星の計画, 将来展望の発表の枠があり, 私はその枠組みとして, 可視光用の微小ピクセルCMOSセンサーが過去最高の位

置分解能をもつX線偏光検出器になり得るという趣旨の内容を報告してきました.

天文学において, 撮像や分光観測の他, 天体の磁場や幾何学情報を得る手段として有効なのが偏光観測です. X線天文学では偏光観測の重要性が指摘されながらも観測的進展がない状態が長らく続いていましたが, 近年になり20 keV以上の硬X線分野で様々な偏光検出器が打ち上げられるようになりました. 2021年にはImaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) が軟X線 (2-8 keV) のエネルギー帯の偏光撮像を初めて行う予定であり, X線偏光観測を更に進展させる見込みです. しかしながら, その間隙である10-20 keVのX線偏光観測に関しては, 最適な検出器が存在しませんでした. そこで我々はその間隙を縫う検出器の開発として, 可視光用の微小ピクセルCMOSセ

センサーに着目しました。半導体検出器にX線が入射した場合、光電吸収により光電子が放出され、その放出方向は入射光の偏光方向に依存しています。つまり光電子の飛跡を追跡できれば、入射光の偏光方向、偏光度を測定できることに繋がります。このCMOSセンサーはピクセルサイズが従来のX線CCDよりも非常に小さいのが特徴で、我々はもしこの可視光用CMOSセンサーでX線が検出できれば、10-20 keVのX線が入射した際の光電子の飛跡を追跡し、X線偏光測定ができるのではないかと考えました。

実際に常温大気中でCMOSセンサーにX線を照射した結果、室温にも関わらずノイズレベルが数 e^- RMSと非常に少ない状態でX線の撮像分光に成功し、我々はこの可視光用CMOSセンサーがX線に対しても有用であることを実証しました。そこで、センサーをシンクロトン放射光施設、SPring-8に持ち込み、高い偏光度のX線(12.4, 24.8 keV)を照射して、偏光検出が可能であるか実験を行いました。光電子が2ピクセルに跨ったX線イベントを抽出して解析した結果、12.4, 24.8 keVではModulation Factorがそれぞれ 7.63 ± 0.07 , $15.5 \pm 0.4\%$ の精度でX線偏光検出に成功しました。これまでのX線偏光検出器の中では過去最高の位置分解能を誇り、他の検出器では観測が難しいエネルギー帯を補うことができます。

同じくX線偏光撮像を可能とするIXPEに関するのポスターが自分のポスター展示の近くにあり、IXPEでの具体的な観測提案や搭載装置の性能について色々と学ぶことができました。装置開発に関する口頭、ポスター発表は少数派でしたが、ポスターを見にきてくださった方には声をかけ、いくつか質問やコメントをいただくことができました。自分の向かい側にポスターを展示していた方も互いに質問、議論をする機会があり、英語の議論に不慣れな自分にとっては良い刺激になりました。それと同時に、多くの方の天体解析



Conference Dinnerの会場
“Palazzo Re Enzo” 宮殿の入口にて

の発表を聞く中で、自身の装置開発の研究を今後の観測に応用すると具体的に何がどれだけ見えるのかをもっと定量的に評価しないと有意義な議論に繋がらないと感じました。

今後発表を行う際にはその点も考慮して天体解析の専門家の方々にも面白いと思ってもらえるよう尽力したいです。

また、同じCMOSセンサーを用いることから、指導教官が本学会の口頭発表で紹介した「多重X線干渉計 (MIXIM)」の実験およびその解析も担当しており、その発表にいくつか反響があったことも今回の渡航で嬉しく感じたことの一つです。現在は原理実証の段階ですが、これからも解析を続けることで少しでも実際の観測の実現に近づければと考えています。次に国際学会に参加する際には議論の幅が広げられるよう、帰国後はこちらの解析にもより一層励む予定です。

自身にとって初めての国際学会であり反省点も幾つかありましたが、非常に充実した時間を過ごすことができました。最後になりますが、本国際会議での発表に際し、多大な援助をいただきました日本天文学会早川幸男基金及びその関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。