

---

2021 年度 第 51 回 天文・天体物理 若手夏の学校  
星間現象 アブストラクト集

---

---

佐藤 寿紀 (立教大学 理学部物理学科・助教)

8月24日 15:45–16:45 C会場

## 超新星残骸のX線観測で探る星の爆発機構

宇宙空間では、長い時間を掛け様々な星が誕生し、死んでゆく。これらの星の一生を観測や理論を駆使して探求することは、宇宙の進化の理解にも繋がるため、天文学において非常に重要なテーマである。特に、星の進化の最終段階やその最期に起きる大爆発「超新星」については謎が多い。我々の研究では、その超新星で星間空間にばら撒かれた元素を「超新星残骸」のX線観測を用いて調査し、どのように星は爆発に至り、どのような元素を宇宙に供給しているかを明らかにすることを目的にしている。

超新星残骸は、超新星爆発後に形成される高温プラズマであり、X線で明るく輝く。数百歳程度の若い残骸であれば、爆発噴出物(イジェクタ)は減速をほぼ受けずに数千 km/s で自由膨張し続けているため、超新星残骸の形状やイジェクタの運動学は爆発時の情報を保存している。また、そのガス内の元素組成から恒星内部や爆発時に合成された元素量を推定でき、そこから親星や超新星爆発時の物理状態の議論が可能になる。本講演では、我々の近年の研究成果 [1,2,3,4] を紹介しながら、超新星残骸観測が星の爆発を理解する上で、どのような役割を果たすか、また、今後どのような発展を期待できるかを議論したい。

実は、このように超新星と超新星残骸を繋げ、その起源に迫るような研究は、まだまだ発展途上であり、分野間(今回の場合、超新星理論・観測と残骸理論・観測)の協力が必須な研究分野である。若手研究者として、国内外の装置開発・観測・理論を専門とする様々な研究者と議論し、新しい研究に出会えた瞬間は何にも変えがたい喜びを感じた。講演では、自らの経験も含め、これらの協力研究の楽しさも伝えていきたい。

1. T. Sato et al., Nature, 592, 7855, p.537–540, (2021)
2. T. Sato et al., The Astrophysical Journal, 893, 1, 49, (2020)
3. T. Sato et al., The Astrophysical Journal, 890, 2, 104, (2020)
4. T. Sato et al., The Astrophysical Journal, 879, 2, 64, (2019)

内田 裕之 (京都大学 理学研究科物理学第二教室・助教)

8月25日 15:45–16:45 C会場

## 精密 X 線分光と電離非平衡プラズマ – 近年の超新星残骸の研究成果を中心に

分光学 (spectroscopy) は、電波からガンマ線まで現代の観測天文学の基礎的手法である。特に輝線や吸収線といったスペクトル線の検出は、我々に天体の組成やドップラー運動といった様々な物理量の測定を可能にする。X 線帯域においては、温度  $> 10^6$  K の高温希薄なプラズマのスペクトル中に、ヘリウム状や水素状イオンの L 殻・K 殻輝線が多数検出される。こうした高階電離イオンの輝線群の強度比や線幅を測定することで、その天体の組成、温度、密度からイオン価数、乱流速度や電離パラメータなどを正確に見積もることができる。宇宙で観測される高温希薄なプラズマの多くは、加熱から十分時間が経った電離平衡状態にある。一方、過渡的な電離非平衡状態を示すものも知られており、比較的最近の加熱 (または冷却) の痕跡と考えられる。これらは宇宙における激しいエネルギー交換の現場として重要である。このような「非平衡プラズマ」の代表例が超新星残骸である。近年の研究から、超新星残骸の衝撃波 (熱いプラズマ) と密度の非一様な周辺分子雲 (冷たいガス) の相互作用領域では、磁場乱流加速や熱伝導冷却といった、これまであまり考慮されてこなかった種々の興味深い現象が起きることが明らかになりつつある [1][2]。

こうした過渡的な非平衡プラズマの状態をイオン-電子レベルで調査できるのが精密 X 線分光である。例えば、従来の CCD を主とする検出器 (エネルギー分解能 130–200 eV; FWHM@6 keV) に対して、1桁以上良い分解能の分光器を用いると、ヘリウム状イオンの  $K\alpha$  輝線を共鳴線・異重項間遷移線・禁制線に分離することができる。これらの輝線強度は電子軌道遷移の選択則に従うため、イオンの励起/脱励起における量子状態 (始状態と終状態) を推定でき、言い換えるとイオンと周辺の電子・原子とのエネルギー交換の履歴から物理パラメータを直接測定する、いわゆるプラズマ診断が可能になる。精密 X 線分光を行える検出器として期待されているのは、2年後に打ち上げを予定している XRISM 衛星搭載のマイクロカロリメータ (エネルギー分解能  $\sim 5$  eV) である。しかし我々は、既存の XMM-Newton 衛星などに搭載されている回折 X 線分光装置が、条件付きでカロリメータに匹敵するエネルギー分解能を実現することに着目し、これを利用して XRISM や次世代の Athena に先駆けた研究を行っている。最近の研究で我々は、複数の超新星残骸の精密 X 線分光スペクトルから、従来の描像では説明できない異常に強い禁制線を次々に発見した [3][4]。これらは超新星残骸における電荷交換反応の初の観測的証拠と考えられ、衝撃波下流の高階電離イオンと上流の中性原子の間で、言い換えると「熱いプラズマ」と「冷たいガス」の接触領域で、従来考えられているより効率的なエネルギー交換が行われていることを示唆する。他にも我々は、超新星残骸において分子雲で圧縮された衝撃波プラズマによる共鳴散乱現象が起きていることを世界で初めて提示するなど、精密 X 線分光による興味深い成果を上げている [5]。本講演では、超新星残骸に限らず、宇宙における「激しいエネルギー交換の現場」を捉えるという観点から、国内外の近年の精密 X 線分光研究の成果と、XRISM 以降の展望を紹介したい。

1. Okon H., Tanaka T., Uchida H., Yamaguchi H., Tsuru T. G., Seta M., Smith R. K., Yoshiike S., Orlando S., Bocchino F., Miceli M., ApJ, 890, 62, 8, 2020
2. Tanaka T., Uchida H., Sano H., Tsuru T. G., ApJ, 900, 1, 2020
3. Uchida H., Katsuda S., Tsunemi H., Mori K., Gu, L., Cumbee R. S., Petre R., Tanaka T., ApJ, 871, 234, 2019
4. Suzuki, H., Yamaguchi, H., Ishida, M., Uchida, H., Plucinsky, P. P., Foster, A. R., & Miller, E. D., ApJ, 900, 39, 2020
5. Amano, Y., Uchida, H., Tanaka, T., Gu, L., & Tsuru, T. Go., ApJ, 897, 12, 2020

## 星間 1

### 銀河面拡散 X 線放射のスペクトル解析

山本 久美子 (奈良女子大学 人間文化総合科学研究科数物科学専攻 M1)

天の川銀河には銀河系全体に広がった X 線放射 (Galactic diffuse X-ray emission; GDXE) が存在する。GDXE は高階電離した鉄輝線を持つことが特徴であり、その空間分布から銀河中心 (Galactic center X-ray emission; GCXE)、バルジ (Galactic bulge X-ray emission; GBXE)、銀河面 (Galactic ridge X-ray emission; GRXE) の 3 つの成分に分解された [1]。GRXE は銀経  $|l| \lesssim 60^\circ$ 、銀緯  $|b| \lesssim 1-2^\circ$  で見られる銀河面に沿う放射である。

放射の起源は、真に広がったプラズマであるとする説と未分解の点光源の重ね合わせであるとする説がある。プラズマ説では、スペクトルは光学的に薄い数千万度のプラズマからの放射として強い鉄輝線を問題なく説明できることがわかっている [2]。しかし、数千万度にもなるプラズマは銀河面の重力で束縛できないため、プラズマの供給源や磁場による閉じ込め機構が必要となる。一方、点光源説では、3本の鉄輝線の強度を説明できないことがわかっている [3][4]。

本研究では、銀河面上で観測時間が十分長すぎず衛星のデータを用いて、GRXE のスペクトルについて Uchiyama et al. (2013) の 2 温度プラズマモデルと点光源の重ね合わせのモデルの両方で解析を行った。そして、各モデルの 2-10keV 帯域のフラックスから、真に広がった熱プラズマであった場合の全放射エネルギーと点光源の重ね合わせであった場合の候補天体の空間数密度を見積もった。講演では、解析結果の詳細について報告する。

1. Yamauchi, S. and Koyama, K., 1993, ApJ, 404, 620
2. Uchiyama, H., et al., 2013, PASJ, 65, 19
3. Nobukawa, M., et al., 2016, ApJ, 833, 268
4. Yamauchi, S., et al., 2016, PASJ, 68, 59

## 星間 2

### 銀河系内を高速移動する強重力源が駆動する星間媒質の動力学

北島 歓大 (名古屋大学 M2)

近年の観測により、星間空間に直線状で高密度な領域 (フィラメント) が種々の場所・スケールで見られている。そのうち長さが数 pc 程度と比較的短く、臨界線密度を超えたものは、星形成の現場であり、その形成過程が解明されつつある [1]。しかし、起源が全く不明な長大構造を持つフィラメントも多く存在する。特に、線密度が大きく長さが数十 pc にも及ぶフィラメント [2] や、銀河中心のスパーク [3] 等、

構造が非常に巨大なフィラメントの形成過程に関する理論研究はほとんどない。

そこで本研究では、このような長大フィラメント状構造の新しい形成シナリオとして、強い重力源が高速で移動した後の軌跡上で起こるガスの圧縮とそれに伴う相転移現象を調べることにした。計算結果と観測を比較し、特定のフィラメント状構造が、強い重力源が高速で星間空間を移動したことに帰着することができれば、観測結果を統計的に考察することによりそのような重力源の存在頻度についての示唆が得られる。特に、中質量ブラックホールなど、存在が期待されているが未だ直接観測されていない天体の重要な手がかりが得られる可能性もある。

本講演では、理論的考察の手法と計算結果について述べる。

1. Abe, D., Inoue, T., Inutsuka, S. and Matsumoto, T., ApJ accepted (arXiv:2012.02205), 2021
2. Zucker, C., Battersby, C., and Goodman, A., ApJ, 864, 153, 2018
3. MeerKAT Collaboration, Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa, 77, 2018

## 星間 3

### 銀河系中心領域における上昇磁気ループとフィラメントの形成

高橋 克幸 (千葉大学大学院融合理工学府先進理化学専攻物理学コース 1 年)

本研究の目的は銀河系中心領域における上昇磁気ループと高密度分子ガスフィラメントの形成機構を磁気流体シミュレーションによって明らかにすることである。銀河系中心領域では、銀河面に垂直な電波フィラメントや、アーチ状の電波・X 線放射領域などが観測されており、磁気ループの上昇や、磁気エネルギーの解放などが重要な役割になっていることが示唆されている。NANTEN 望遠鏡による銀河系中心領域観測によって銀河面から 200 pc 程度の高さの分子ガスループを発見し、視線速度  $\pm 40$  km/s 程度の分子ガスの運動を、磁気ループに沿う分子ガスの落下運動によって説明した [1]。Peng and Matsumoto (2017) は太陽プロミネンス形成のリコネクション・凝集モデル銀河系中心に適用した 2 次元磁気流体計算によって、上昇する磁気アーケード中に低温高密度のフィラメントが形成されることを示した [2]。この計算ではアーケード状の force-free 磁場が仮定されているが、実際の銀河円盤部はディスクに沿った水平磁場が形成されていると考えられている。本研究では、その状況に近づけるために、シミュレーション領域全体に水平磁場を加え、その影響を調べた。高次精度磁気

流体計算コード CANS+[3] を用いて加熱冷却入りの磁気流体方程式を銀河と共に回転する局所直交座標系を用いて数値計算した。円盤中に強い水平磁場を加えると、従来のモデルと比べて磁気ループが上昇しにくくなったが、初期にフィラメント基部に向かう速度場を追加したところ、水平磁場を加えても磁気ループが上昇し。磁気リコネクションによって形成された螺旋状の磁気ループの底部に低温高密度フィラメントが形成され、高く上昇した。この計算を三次元に拡張した結果を報告する。

1. Fukui, Y. et al., Science, 314, 106-109 (2006)
2. Peng, C., and Matsumoto, R., APJ 836, 149 (2017)
3. Matsumoto, Y. et al., PASJ 71, id. 83 (2019)

#### 星間 4

### M87 ジェットの構造:放物線から円錐の流線への移行

辻 悠樹 (新潟大学 自然科学研究科 物理学コース M1)

本発表は先行研究 [1] のレビューである。

代表的な電波銀河である M87 は相対論的アウトフロー (ジェット) を示す地球から最も近い活動銀河核の一つであり、中心には大質量ブラックホールが存在することが知られている。M87 ジェットの構造は電波干渉計でサブパーセクからキロパーセクに及ぶ幅広いスケール画像を使い調べられている。観測画像をもとに、ブラックホールからの距離とジェット半径の関係を調べた結果、ジェットはシュバルツシルト半径の  $10^5$  倍程度の範囲まで放物線状の流線を維持し、その後は円錐状へと流線の形が遷移していることが判明した。

この幾何学的遷移の要因をジェットの内部圧力とその外部にある星間物質の圧力の釣り合いから解釈を試みる。シュバルツシルト半径の  $10^5$  倍程度の距離までは大質量ブラックホールの重力場の影響が強いため、その重力に強く支配されている外部の星間物質による閉じ込めを受ける。それと同時に、ジェットの内圧により広がろうとする力が働いて両者がおおよそ釣り合うため、継続して細く絞られて放物線形状を保ったまま成長する。その後、重力による影響が支配的ではなくなると一時的に外圧が内圧より勝ることで衝撃波領域 (HST-1) が生成されると考えられる。その結果、ジェットの内圧と外圧の圧力関係が逆転するため、円錐形になって広がる。

1. Asada, K. and Nakamura, M., Apj, vol. 745, no. 2, 2012.

#### 星間 5

### 超新星残骸 G296.1-0.5 からの OVII He $\alpha$ の高い禁制/共鳴線強度比の発見

田中 優貴子 (京都大学 物理学第二教室 M1)

G296.1-0.5 は Carina Spiral arm に位置する 1973 年に発見された重力崩壊型の超新星残骸 (SNR) であり [1][2]、X 線で北西部に一つ、南部に二つ重なったシェル構造が特徴である [3]。本研究では XMM-Newton 搭載の CCD 検出器 (EPIC) 及び反射型回折分光器 (RGS) のデータから 0.4-1.5 keV で G296.1-0.5 の北西シェルと南内側シェルのスペクトル解析を行った。先行研究から北西シェルの OVII He $\alpha$  の高い禁制/共鳴線強度比 (f/r 比) の兆候はあったが [2]、南内側シェルでは本研究で初めて分光でき、共鳴線より禁制線の方が強いスペクトルが得られた。これらは先行研究 [2] で示されていた衝突電離非平衡 (NEI) プラズマモデルでは再現できない。f/r 比が高い He-like イオンの輝線は近年複数の SNR で報告されているが [4][5]、単一の SNR で複数のシェルから発見されたのはこの天体が初めてである。我々はミリ波による CO ( $J = 1-0$ ) 輝線観測から G296.1-0.5 の北部および南内側シェル方向に付随している可能性のある分子雲を発見し、分子雲中の中性物質と衝撃波加熱された高温プラズマの相互作用として電荷交換反応 (CX) が起こっていると考えた。そこで CX モデルを組み込んだところ、f/r 比を説明できることがわかった。本講演では CX モデルの結果とともに共鳴散乱の妥当性についても議論を行う。

1. Clark et al., Nature, 246, 28, 1973
2. Castro et al., ApJ, 734, 86, 2011
3. Markert & Lamb, ApJ, 248, L17, 1981
4. Uchida et al., ApJ, 871, 234, 2019
5. Amano et al., ApJ, 897, 12, 2020

#### 星間 6

### 再結合優勢プラズマを持つ超新星残骸 W49B の空間構造の調査

鈴木 那梨 (奈良女子大学 大学院人間文化総合科学研究科 M2)

星はその生涯の終わりに大爆発を起こす。その残骸を超新星残骸 (SNR) と呼び、この SNR は爆発の衝撃加熱により高温のプラズマを持つ。まず衝撃波加熱により、エネルギーを得て活発に動く電子がイオンと衝突電離を起こすようになり、電離優勢プラズマ (IP) と呼ばれる状態となる。その後、SNR のプラズマは光学的に薄いため、電離を進めていく間に数十万年の時間を経て、徐々に電離とその逆過程の再結合の釣り合った電離平衡状態になっていく。多くの SNR は数万年以下の年齢であるため、通常は IP 状態である。し

かし近年、電離よりも再結合が起こりやすい、再結合優勢プラズマ (RP) という新しいプラズマ状態を持つ SNR が多数発見され、その起源が様々に議論されている。本研究対象の W49B は、シェル状の電波放射とその中心部での熱的な X 線放射が観測されている、Mixed-Morphology SNR (MM-SNR) である。RP は、W49B も含めた MM-SNR のみで発見され、また多くが分子雲と相互作用していることがわかっている。本研究では、この 2 点を考慮した進化シナリオを考えたい。

ここで、従来の RP のスペクトル解析モデルでは、RP 初期の電離状態を元素間で共通のものとし、電離平衡状態から RP への遷移を仮定する。しかし、多くの SNR は電離平衡状態に至っていないはずであり、従来のモデルの妥当性には問題が残る。Hirayama et al. (2019) では、RP-SNR の IC443 を対象に、元素毎に RP 初期の電離状態が異なることを示した。すなわち、RP 初期が電離平衡状態ではないモデルを用いる必要性が示された。そこで私達は、RP の形成過程をより詳細に議論するために、このモデルを用いて W49B の空間構造の調査を行う。本研究では、高エネルギーバンドで高感度かつ良い分光力を持つすざく衛星により得られた W49B のデータを用いて、スペクトルを 0.8–12.0 keV の広範囲で解析した。その結果を報告する。

## 星間 7

### 超新星残骸 W28 における過電離プラズマの生成機構の観測的研究

火物 瑠偉 (奈良教育大学 大学院教育学研究科 M2)

超新星残骸 (SNR) は爆発噴出物と衝撃波によりかき集められた星間物質 (ISM) で構成される温度  $kT \sim \text{keV}$  の高温プラズマを伴う。SNR のプラズマは 2 つの温度、電子温度 ( $kT_e$ ) と電離温度 ( $kT_z$ ) の関係により特徴付けられ、多くの SNR は電離が優勢な状態 (IP;  $kT_e > kT_z$ ) である。近年、複数の SNR から再結合が優勢なプラズマ (RP;  $kT_e < kT_z$ ) が観測された (e.g., IC443; Yamaguchi et al. 2009, W28; Sawada & Koyama 2012)。しかし、その起源は未だ議論が続いている。この起源を理解するには、詳細なスペクトル解析が必要である。Sawada & Koyama(2012) では元素間で  $kT_z$  の異なるモデルを W28 に適用し、 $kT_z$  の元素依存性を明らかにした [2]。Hirayama et al.(2019) ではさらにプラズマの時間進化を加えたモデルを IC443 に適用し、RP 遷移時の  $kT_z$  が元素間で異なることを明らかにした [3]。

対象天体である W28 は、大きな視直径を持ち ( $\sim 48'$ )、場所によって環境が異なる。W28 の RP 起源について、2 つの先行研究では互いに異なるシナリオを主張した [2,4]。本研究では RP の起源を調査するために、W28 を空間分解

し、Hirayama et al.(2019) と同様のモデルを用いてスペクトル解析を行った。7 個の領域からそれぞれ取得したスペクトルを上記モデルで再現できることが分かった。いずれの領域においても、RP 遷移時に  $kT_z$  の元素依存性があることを初めて明らかにした。また、Center と南西シェル領域では 2 成分の Fe が存在することが分かった。さらに電離タイムスケールの結果から RP 遷移後の経過時間を見積ると、中心に近い領域ほど短く (数 100 年)、外側の領域ほど長く (数万年以上)、SNR の年齢 (3~4 万年) とほぼ同等であることが分かった。

本講演では、得られた解析結果とそれに基づくシミュレーション結果を基に、W28 の RP 起源について議論する。

1. Yamaguchi et al. ApJ, 705, L6, 2009
2. Sawada, M., & Koyama, K., PASJ, 64, 4, 81, 2012
3. Hirayama et al. PASJ, 71, 37, 2019
4. Okon et al. PASJ, 70, 35, 2018

## 星間 8

### X 線衛星 *Chandra* による SN1006 北西部衝撃波の空間分解スペクトルの解析 市橋正裕 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

プラズマ物理の大きな未解決問題の一つに無衝突衝撃波による電子の加熱プロセスがある。無衝突衝撃波の研究をする環境として最適なものの一つが、超新星残骸中の衝撃波である [1]。その中でも本研究での研究対象である超新星残骸 SN1006 は、距離 2.2 kpc と近傍にある若い系であり、衝撃波の詳細な構造の研究に適している。特に、SN1006 の北西部領域では熱的成分の放射が卓越しており、プラズマの電子温度をスペクトルから直接測ることができる [2]。X 線観測衛星 *Chandra* は空間分解能が 0.5 秒角と非常に優れており、この衛星のデータを用いることでプラズマの電子温度の細かな空間変化を探ることが可能となる。実際に加藤らは、*Chandra* による SN1006 北西部領域の一部の観測データから、衝撃波面から離れるに従ってプラズマ温度が上昇する傾向を捉えている [3]。

本研究では上述の研究と比較して、観測領域を SN1006 北西部領域全体に広げ、また新たに観測データを追加して統計をおよそ 2 倍にあげた上で、同様の解析を行なった。その結果、北西部全体の領域において、衝撃波直下では  $\sim 0.5$  keV、衝撃波から 45 秒角 (0.48 pc) 内側の領域では  $\sim 0.8$  keV と、衝撃波から遠ざかるほどプラズマ温度が上昇していることを新たに示した。本講演では、この温度上昇をクーロン散乱による加熱と比較することで、加熱機構についての議論を行う。

1. Vink, 2012, The Astronomy and Astrophysics Re-

view, 20, 49 (2012)

2. Bamba et al, 2008, Publication of the Astronomical Society of Japan, 60, 153-161
3. 加藤佑一 et al, 日本天文学会 2017 年春季年会講演, Z104a

## 星間 9

### カシオペア座 A の X 線時間変動解析

小湊 菜央 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

宇宙空間では、高エネルギーの粒子である宇宙線が飛び交っているが、その起源はまだ分かっていない。しかし、数 PeV 以下の宇宙線は銀河系内で加速されていることが分かっており、超新星残骸が起源の有力な候補になっている。宇宙線 (主に陽子) は減衰しやすく、磁場で方向が変わるため、直接観測することが難しい。そのため、宇宙線が磁場や光子場、星間物質との相互作用で発した X 線や  $\gamma$  線の電磁場の観測が重要となる。

カシオペア座 A は、約 350 年前に爆発した重力崩壊型超新星の残骸である。超新星残骸で加速された数 TeV の電子はシンクロトン放射で X 線を放射する。カシオペア座 A のような若い超新星残骸は高いエネルギーまで粒子を加速することができるため、この非熱的な X 線放射を研究することで、超新星残骸で起こる粒子加速について調べることができる。本研究では、Chandra 衛星が観測した 20 年分のカシオペア座 A のデータを解析し、0.5–8keV の X 線の時間変動を調べた。

## 星間 10

X 線天文衛星「すざく」を用いた超新星残骸 G352.7–0.1 におけるプラズマの空間構造の調査  
藤重 朝妃 (奈良女子大学 人間文化総合科学研究科数物科学専攻 M1)

恒星の一生の最期に起こる超新星爆発は、重力崩壊 (CC) 型と白色矮星による爆発である Ia 型の 2 つに分類される。爆発のタイプや爆発後に残される超新星残骸 (SNR) の進化についての情報は、X 線スペクトル解析によるプラズマの温度や電離状態、元素組成比などの調査によって得られる。G352.7–0.1 は銀河系内にある SNR であり、年齢は 2,200–8,500 年と推定される (Ferrand & Safi-Harb 2012)。X 線では 1998 年に初めて観測され (Kinugasa et al. 1998)、放射は中心集中である (Giacani et al. 2009)。また、Giacani et al. (2009) による先行研究では爆発のタイプは CC 型であると主張されたが、その後、Yamaguchi et al. (2014) および Sezer & Gök (2014) は Ia 型と結論付けた。

本研究では G352.7–0.1 のプラズマの空間構造と物理状

態を調査するために、バックグラウンドの寄与を慎重に見積もった X 線スペクトルの解析を行った。SNR 領域全体から抽出したスペクトルでは、Fe 輝線 ( $\sim 6.4$  keV) にのみ広がりをもつ可能性が発見され、これまで検出されていない Cr, Mn 輝線の徴候も見られた。また、Fe は Si, S などの元素に比べて低電離であり、少なくとも 2 つの電離進行プラズマが存在することを確認した。領域を内側と外側に分解した解析では、Fe は内側により多く分布し、内側の方が低電離であることが示された。したがって、全体のスペクトルで見られた Fe 輝線の広がりには Fe の電離状態が内側と外側で異なることが原因であり、これは中心部での電離がまだ十分に進行していないことを示唆する。また、プラズマに含まれる Fe の組成比が Si, S などよりも多いという Ia 型の特徴が見られたため、G352.7–0.1 の爆発のタイプは Ia 型である可能性が高いと考えられる。本講演では、スペクトル解析の方法と詳細な結果について報告する。

## 星間 11

マグネターの親星推定のための RCW103 の X 線精密分光解析

成田 拓仁 (京都大学 物理学第二教室 M1)

RCW 103 は  $\sim 2000$  歳の若い重力崩壊型超新星残骸 (SNR) であり [1]、6.67 時間の長い変動周期を持つマグネター (1E 161348–5055) が中心に存在する [2]。一般的なマグネターの変動周期は  $\sim 10^0$  s であり [3]、1E 161348–5055 は、これらと比べて長い変動周期を持っている。マグネターを持つ SNR は少なく、どのような親星がマグネターになるのかは分かっていない。RCW 103 の親星の起源を探るために、我々は SNR 中の ejecta 及び星周物質に着目した。親星の起源を推定するには、SNR に含まれる元素組成比を正確に測定することが重要であり、測定の精度を上げるためには高いエネルギー分解能による輝線の分離が必要になる。CCD を用いたこれまでの研究では、親星の推定質量は 18–20  $M_{\odot}$  [4] や 15  $M_{\odot}$  [5] などと定まっていなかった。この原因として、CCD のエネルギー分解能では  $\lesssim 1$  keV の Ne や Fe などの輝線が分離できていないことが挙げられる。本研究では  $\lesssim 1$  keV の輝線の解析に対して、現在のところ最も適した検出器である XMM-Newton 衛星搭載の反射型回折分光器 (RGS) を用いた。RCW 103 の、RGS による X 線精密分光観測の結果から、今までの観測では十分に分光できていなかった Fe-L や Ne-K、Mg-K、O-K、N-K などの多数の輝線を検出した。本講演では解析結果を報告し、RCW 103 の親星について議論を行う。

1. Carter et al., PASP, 109, 990, 1997
2. De Luca et al., ApJ, 682, 1185, 2008
3. Enoto et al., Rep. Prog. Phys., 82, 1069012019

4. Frank et al., ApJ, 810, 113, 2015
5. Braun et al., Mon. Notices Royal Astron. Soc., 489, 4444-4463, 2019

## 星間 12

### 超新星残骸 RX J0852.0-4622 における陽子起源・電子起源ガンマ線の分離と定量 有賀 麻貴 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

超新星残骸 (SNR) は銀河宇宙線加速の場として有望視されてきた。近年のガンマ線観測の進展によってガンマ線撮像が高分解能で可能となり、宇宙線加速を実証する可能性が開かれた。これまでの研究によって陽子起源と電子起源の両方が検討され、それぞれがガンマ線起源として可能であるとされてきたが、両者を分離して定量することはできず、起源の決定的検証にはいたっていなかった。この状況は最近 Fukui et al. (2021) によって打開され、ガンマ線 SNR RX J1713.7-3946 (以後 RXJ1713) において両起源のガンマ線が初めて分離定量された。Fukui et al. (2021) は、X 線のガンマ線寄与のみでなく、星間陽子の寄与も考慮してガンマ線起源の分離を行った点で従来の方法と異なる。他の SNR にもこの手法を適用することで、ガンマ線発生機構の更なる理解が望まれる。そこで我々は、2 つ目の天体として RX J0852.0-4622 (Vela Jr.) の解析を行った。SNR に付随する分子雲と原子雲を特定するために、NANTEN  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  と ATCA & Parkes HI を使用し、X 線は Suzaku、ガンマ線は H.E.S.S. (2018 年) のデータを使用した。SNR に付随する分子雲と原子雲は周りの SNR の影響で複雑な速度構造を持っているため注意深く定量を行った。RXJ1713 同様にフィットした結果、陽子起源：電子起源を分離し定量することができた。本講演では、陽子・電子起源ガンマ線を決定づける要素について議論するとともに、RXJ1713 と Vela Jr. の星間環境の違いについて考察する。

## 星間 13

### 深層学習を用いた Cygnus X 領域の赤外線リング構造の同定 西本 晋平 (大阪府立大学 M1)

一般的に、大質量星が形成する若い H II 領域 ( $< \sim$  数 Myr) は  $24\mu\text{m}$  の波長等の連続波でトレースされるホットダストを  $8\mu\text{m}$  等で明るい PAH feature の emission が取り囲むようなリング状構造 (赤外線リング構造) を有している。これらの周囲には、大質量星形成時の環境が少なからず残されていると考えられるため、その物理的性質を調べることは大質量星形成のメカニズムを解明する上で重要で

ある。しかしながら、このような構造を持つ天体の同定はこれまで人間の目で行われてきており、多大な労力と時間がかかることに加え、見落としや誤検知といった人的誤差が生じる問題がある。その同定の大規模な例として、Milky Way Project (MWP) があり、数万人の市民科学者の目によって、銀河面で 2600 個同定されている (Tharindu et al. 2019)。我々は、これらの問題を解決するために、深層学習手法を用いて、赤外線リング構造検出モデルを構築した。今回は、深層学習の中でも、物体検出に長けた手法である Single Shot MultiBox Detector (Liu W et al. 2016) を用いた。データには、赤外線天文衛星 Spitzer の  $8\mu\text{m}$ ,  $24\mu\text{m}$  を使用し、教師データには MWP の天体を用いた。本モデルを太陽系から最も近い活発な大質量形成領域の一つである Cygnus X 領域に適用した結果、数百天体が新たに検出され、MWP によってすでに同定されていた 47 天体の約 8 割と一致していた。講演では、本モデルの正当性や、同定された天体の物理的性質について議論する。

## 星間 14

### ALMA による小マゼラン雲 N66 領域の大質量原始星に付随する分子ガス観測 大川 将勢 (大阪府立大学 M2)

小マゼラン雲は地球から比較的近傍 ( $\sim 61 \pm 1 \text{ kpc}$ ) に位置しており、銀河系と比べて重元素量が  $1/5$  程度 ( $\sim 0.1-0.2Z_{\odot}$ ) であることから、低金属量環境下の星形成過程や分子雲の性質を高分解能で観測できる重要な銀河である。北部には同銀河内で最も明るい H II 領域である N66 領域が存在し、大きさ  $\gtrsim 10 \text{ pc}$ 、質量  $\sim 10^4 M_{\odot}$  の分子雲が確認されているため、大規模な星団形成領域における星形成の初期段階を研究する上で適している。N66 北部では  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  の観測により分子雲衝突による中質量星程度の星形成がトリガーされたことが最近示唆された [1]。また、N66 南部では分光観測により大質量原始星 Source C, E, I の存在が確認されており、それぞれ中心星の質量は  $26 M_{\odot}$ ,  $16 M_{\odot}$ ,  $20 M_{\odot}$  と見積もられている [2]。本講演では新たに ALMA Band 6 のアーカイブデータ (2015.1.01296.S) より  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$  及び  $1.3\text{mm}$  連続波等のデータ (空間分解能  $\sim 0.5 \text{ pc}$ ) を取得し、特に N66 領域南側に存在する上記 3 つの大質量原始星 Source 方向で分子ガスの特徴を調べた。その結果、これらすべての Source 方向で  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $1.3\text{mm}$  のエミッションが付随していたことから、いずれの原始星も、母体分子雲を散逸させていない大質量星形成の初期段階と思われる。 $1.3\text{mm}$  連続波源のフラックスは  $\sim 1-2 \text{ mJy}$  程度であったことから、大質量星周辺に  $\sim 10^3 M_{\odot}$  程度の大質量クランプが付随していると考えられる。このうち最も重い原始星である Source C では、

複数の異なった速度を持つ CO フィラメントの交点に存在していたが、Source E, I に付随した分子雲では、CO 輝線で見られるガスはビームサイズ程度の広がりを持つのみであった。発表では大質量原始星に付随する分子雲の特徴とその多様性について議論する。

1. Neelamkodan et al. 2021, ApJ, 908, 43
2. Rubio et al. 2018, A & A, 615, 121

## 星間 15

### ALMA-ACA を用いた渦巻銀河 M33 の分子雲広域観測

小西 亜侑 (大阪府立大学 M1)

銀河進化および星形成を紐解く上では、主要な星形成の場である巨大分子雲 (Giant Molecular Clouds: GMCs) の形成とその進化過程を明らかにすることが重要である。特に、GMC の進化段階とそのタイムスケールを統計的に推定するためには、ひとつの銀河全体にわたる観測が必須である。M33 は最近傍の渦巻銀河 ( $D \sim 840$  kpc) で程よい傾斜角 ( $i \sim 50^\circ$ ) を持つため、均一な GMC のサンプルを得られ、かつ渦巻腕など銀河の大局的な構造と分子雲の進化の関係を探る上で重要な観測ターゲットである。我々は M33 における CO 分子雲の性質を統計的に解析し、その他の銀河と比較を行うため、ALMA の Atacama Compact Array (ACA) による CO ( $J=2-1$ ) 輝線データ (空間分解能  $\sim 30$  pc) の解析を行っている。Dendrogram アルゴリズム (Rosolowsky et al. 2008) を用いて同定した CO の階層構造のうち、典型的なサイズが空間分解能程度である約 500 個の最小構造 “リーフ” を GMC とした。また、KPNO 2.1m によって得られた  $H\alpha$  データにも同様の階層構造同定を行い、各 GMC における H II 領域の付随状態を調査した。その結果、H II 領域が付随していない GMC が  $\sim 100$  個、H II 領域が付随している GMC が  $\sim 400$  個となった。さらに CO 輝線強度と  $H\alpha$  光度との間には正の相関が見られた。本講演では GMC の進化段階とそのタイムスケールについて、GMC に付随する H II 領域の  $H\alpha$  光度と比較して議論する。

1. Rosolowsky et al. 2008, ApJ, 679, 1338

## 星間 16

### 位置天文観測機 Gaia を用いた Orion OB1 association の解析

樋山 舜崇 (新潟大学 自然科学研究科数理物質科学専攻 M1)

欧州宇宙機関 (ESA) の位置天文観測機 Gaia は銀河系の詳細な 3 次元地図を作成することを目的に 2013 年に打ち上

げられた。Gaia は星の位置、固有運動、年周視差、明るさ、色等を観測する。前身の Hipparcos 衛星の観測では 1 ミリ秒角の精度で 100pc 以内の星を観測したが、Gaia では 0.01 ミリ秒角の精度で 10kpc 以内の星が観測可能である。このように Gaia はその観測するデータの量、質ともに大きく進化し、その観測結果をもとに銀河系の歴史を解き明かすことが期待されている。最新のデータ公開 (EDR3) は 2020 年 12 月に行われ、14 億個以上の星について天球上の位置、年周視差、固有運動の 5 つのパラメータの高精度な情報が公開された。

本講演では、Gaia EDR3 で得られたデータを用いて、星形成領域の解析を行った論文についてのレビューを行う。質量が  $10^4 M_\odot$  以上の分子雲は巨大分子雲と呼ばれ、ここでは中小質量星だけでなく、大質量星も形成されている。巨大分子雲で形成された星はその後、OB association と呼ばれる集団を形成し、最終的に空間的に広がってフィールド星となると考えられている。本論文は最も近傍にある巨大分子雲があり、現在でも星形成を活発に行っているオリオン領域の Orion OB1 association について Gaia EDR3 を用いて解析を行った。Gaia EDR3 のデータから若い星を抜きだし、年齢分布や固有運動分布、空間構造を調べ、フィールド星と 2 体相関関数を比較した。また、OB association に属する星を年齢ごとに分類し、それらの 2 体相関関数を比較することで空間構造の時間進化を調べた。その結果、この領域の空間分布、運動、年齢分布について新たな描像を得られた。

## 星間 poster1

### lb/c 型超新星残骸における宇宙線加速の数値シミュレーション

安田 晴皇 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D3)

高エネルギー天文学の課題の一つとして、宇宙線加速機構が挙げられる。特に  $10^{15}$  eV 以下の宇宙線は、超新星残骸 (Supernova remnant; SNR) における拡散衝撃波加速機構 (Diffusive shock acceleration; DSA) で加速されていると考えられており、実際に宇宙線と星周ガスの相互作用によって生成されるガンマ線が SNR で観測されている [1, 2]。したがって、SNR のガンマ線を研究することで、宇宙線加速機構に迫ることができる。しかし観測例が 10 天体程度とまだ少なく、個別の天体に注目した研究が多く統計的な議論が出来ていない状況である。そのため数値シミュレーションを通じた宇宙線加速の研究が必要となってくる。先行研究である Yasuda & Lee 2019 では、Ia 型と II 型の超新星残骸を模した、一様分布とべき分布を持つ星周環境下での宇宙線加速を計算した [3]。その結果、超新星残骸から放射

される非熱的放射の時間進化は、星周環境のガス分布と磁場分布に強く影響されていることが分かった。

一方、ガンマ線が観測されている SNR で、Ib/c 型だと考えられている天体は 1 天体 [4] と少なく、観測的な研究すら進んでいない。そのため、このことが超新星の親星や星周環境に起因するのか、それとも観測バイアスによるものなのか判定することは、非常に重要なものとなる。そこで我々は、Ib/c 型の超新星残骸から放射される多波長非熱的放射が、どのように時間進化するのか、また Ia 型や II 型の進化とどう異なるか確認するため、初めて self-consistent な数値計算を行った。方法として、まず stellar evolution を考慮した mass-loss history を仮定し、星周環境を用意する。その後、その星周環境下での SNR の時間進化と DSA 計算を、Yasuda & Lee 2019 で開発された CR-Hydro code を用いて同時に計算した。その結果、特殊な星周環境を反映した放射を出し、他の型とは大きく異なる時間進化を辿ることが分かった。本講演では計算結果の詳細、またその観測可能性を議論する。

1. Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2016, ApJS, 224, 8
2. H.E.S.S. Collaboration, Abdalla, H., Abramowski, A., et al. 2018, A&A, 612, A6
3. Yasuda, H., & Lee, S.-H. 2019, ApJ, 876, 27
4. Katsuda, S., Acero, F., Tominaga, N., et al. 2015, ApJ, 814, 29

## 星間 poster2

### 宇宙線のフェルミ加速の計算法と精度の比較

樋口 諒 (名古屋大学 M2)

宇宙線とは宇宙空間を飛びまわる高エネルギーの陽子、原子核、電子といったものを指す。それらは  $10^2\text{eV}$  から  $10^{20}\text{eV}$  にわたる広いエネルギー分布を持っており、べき型の分布をしている。そのべきの値は  $10^{15.5}\text{eV}$  付近で変化しておりこのエネルギーは knee energy と呼ばれている。それ以下のエネルギーを持つ宇宙線の起源は超新星残骸によって加速されていると考えられている。その理由は超新星残骸 (SNR) の衝撃波面で粒子が加速される機構である、フェルミ加速が考えられているからである。フェルミ加速を考えることで宇宙線のべき型分布とべきの値を説明できる [1] [2] が、宇宙空間の典型的な物理量の値では宇宙線が knee energy まで到達できない問題が知られており、宇宙線の起源に対する議論は未だ決着がついていない。この問題を解決するため、数値的に宇宙線の振る舞いを解く必要がある。しかし宇宙線の拡散を数値的に解こうとしたときには時間刻みが分解能の影響を強く受け、計算コストが大きく

なることが知られている。本研究は陽解法、陰解法、Super TimeStepping 法 [3][4]、電信方程式法 [5] の四つの数値的解法でテスト計算を行い、比較することで優れた数値的解法の特定を行った。

1. Bell , the Royal Astronomical Society, Vol.182, 147-156 ,1978
2. Blandford & Ostriker , Astrophysical Journal, Vol. 221, 29-32 , 1978
3. Alexiades et al. , Communications in numerical methods in engineering , Vol. 12 , 31 1996,
4. Meyer et al. , the Royal Astronomical Society, Vol.422, 2102-2115 , 2012
5. Inoue , The Astrophysical Journal, Vol. 872 , 46-53 , 2019